T.C.
SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOĞRU AKIM MİKRO ŞEBEKELERDE KONTROLÖR TASARIMI VE PLECS TABANLI UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Alperen ÖZBEK
(20239240004)

Enerji Bilimi ve Teknolojisi Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Kenan ALTUN

SİVAS
TEMMUZ 2025

Ahmet Alperen ÖZBEK'in hazırladığı ve **"DOĞRU AKIM MİKRO ŞEBEKELERDE KONTROLÖR TASARIMI VE PLECS TABANLI UYGULAMASI"** adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ENERJİ BİLİMİ VE TEKNOLOJİSİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı	**Doç. Dr. Kenan ALTUN** Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	……
Jüri Üyesi	**Doç. Dr. Mehmet Serhat CAN** Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi	……..……
Jüri Üyesi	**Doç.Dr. Bülent TURAN** Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	……..……..

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nail ALTUNAY

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.

Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

©Ahmet Alperen ÖZBEK, 2025

Bu yüksek lisans tezini, her adımda yanımda olan, büyük bir sabır ve sevgiyle beni destekleyen, varlıklarıyla yolumu aydınlatan kıymetli aileme gönülden ve minnetle ithaf ediyorum.

ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

30.07.2025

Ahmet Alperen ÖZBEK

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Ön lisans, lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübesiyle her zaman yanımda olan, akademik ve kişisel gelişimime önemli katkılar sunan, yalnızca bir akademisyen değil aynı zamanda bir yol gösterici ve bir ağabey gibi desteğini daima hissettiren çok kıymetli danışmanım Sayın Doç. Dr. Kenan ALTUN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Tüm eğitim hayatım boyunca göstermiş olduğu sabır, rehberlik ve özveriyle bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük bir pay sahibidir.

Ayrıca, bilgi ve tecrübesiyle tez sürecime katkı sağlayan, yapıcı önerileri ve yönlendirmeleriyle bana değerli bir bakış açısı kazandıran Sayın Dr. Öğr. Üyesi Didem ALTUN'a da teşekkür ederim.

Tezin teknik altyapısında önemli bir yer tutan PLECS simülasyon programının öğrenilmesi ve uygulanması sürecinde bilgi ve deneyimlerini paylaşarak yolumu aydınlatan, uygulama aşamalarında danışman hocam kadar yanımda olan, ders içeriklerine, literatür aşamalarına katkı sağlayarak konuda gelişimime destek veren ve tez sürecine yönelik toplantılarda aktif rol üstlenen Sayın Doç. Dr. Tuncay ALTUN'a değerli katkılarından dolayı gönülden müteşekkirim.

ÖZET

DOĞRU AKIM MİKRO ŞEBEKELERDE KONTROLÖR TASARIMI VE PLECS TABANLI UYGULAMASI

Ahmet Alperen ÖZBEK

Yüksek Lisans Tezi

Enerji Bilimi ve Teknolojisi Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Kenan ALTUN

2025, 88+xvi sayfa

Günümüzde enerji verimliliğini sağlamak ve yenilenebilir enerji kaynaklarını etkili bir şekilde entegre etmek, modern güç sistemlerinin karşılaştığı kritik zorluklar arasında yer almaktadır. Doğru Akım (DA) mikro şebekeler, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla uyumlulukları, düşük enerji kayıpları ve basitleştirilmiş kontrol mekanizmaları sayesinde umut verici bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Ancak DA mikro şebekelerin kararlı bir şekilde çalışabilmesi için yük paylaşımı, voltaj düzenlemesi ve sistem kararlılığı gibi zorlukların üstesinden gelmesi için gelişmiş kontrol stratejilerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez kapsamında DA mikro şebekelerde enerji verimliliğini ve sistem kararlılığını artırmaya yönelik bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) tarafından standartları belirlenen 14-baralı alternatif akım (AA) şebeke yapısı, beş kontrolcü ile yönetilen 14-baralı bir DA mikro şebeke modeline dönüştürülmüş; yük paylaşımındaki dengesizlikleri ve voltaj sapmalarını gidermek amacıyla adaptif droop kontrol algoritması uygulanmıştır. Önerilen kontrol stratejisi, birincil ve ikincil kontrol seviyelerini içeren hiyerarşik bir yapıyı benimsemektedir. Birincil kontrol seviyesinde, yerel kararlılık ve orantılı yük paylaşımı sağlamak amacıyla iç döngü ve droop kontrol teknikleri uygulanırken; ikincil kontrol seviyesinde voltaj düzenlemesi ve daha yüksek doğrulukta yük paylaşımı hedeflenmiştir.

Simülasyon sonuçları, önerilen kontrolcünün DA mikro şebekenin kararlılığını etkili bir şekilde artırdığını, voltaj dalgalanmalarını azalttığını ve yük paylaşım

doğruluğunu geliştirdiğini göstermektedir. Kontrolörün adaptif yapısı, değişen çalışma koşullarına dinamik olarak yanıt vermesini sağlayarak modern DA mikro şebekeler için sağlam ve tutarlı bir çözüm sunmaktadır. Çalışma yalnızca simülasyona odaklanmış olsa da elde edilen bulgular gelişmiş kontrol stratejilerinin pratik uygulamaları için literatüre değerli bilgiler katmaktadır.

Adaptif droop kontrolü sayesinde DA mikro şebekelerdeki temel zorluklara çözüm getiren bu tezimiz, daha güvenilir ve daha verimli enerji dağıtım sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Çalışma, sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişte gelişmiş kontrol mekanizmalarının önemini vurgulayarak, gelecekteki araştırmalar ve pratik uygulamalar için bir temel oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: DA Mikro Şebekeler, Adaptif Droop Kontrolü, Enerji Verimliliği, PLECS Simülasyonu, Kararlılık Analizi.

ABSTRACT

CONTROLLER DESIGN AND PLECS-BASED IMPLEMENTATION IN DIRECT CURRENT MICROGRIDS

Ahmet Alperen ÖZBEK

Master's Thesis

Department of Energy Science and Technology Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Kenan ALTUN

2025, 88+xvi pages

Ensuring energy efficiency and effectively integrating renewable energy sources are among the critical challenges faced by modern power systems. Direct Current (DC) microgrids have emerged as a promising solution due to their compatibility with renewable energy sources, reduced energy losses, and simplified control mechanisms. However, for DC microgrids to operate reliably, advanced control strategies are required to address challenges such as load sharing, voltage regulation, and system stability.

In this thesis, a controller design aimed at improving energy efficiency and system stability in DC microgrids is proposed. The standard 14-bus Alternating Current (AC) network model, defined by the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), is transformed into a 14-bus DC microgrid model managed by five controllers. To address load sharing imbalances and voltage deviations, an adaptive droop control algorithm is implemented. The proposed control strategy adopts a hierarchical structure comprising primary and secondary control levels. At the primary level, inner loop and droop control techniques are employed to ensure local stability and proportional load sharing, while the secondary level enhances voltage regulation and improves load sharing accuracy.

Simulation results demonstrate that the proposed controller effectively enhances the stability of the DC microgrid, reduces voltage fluctuations, and improves load sharing accuracy. The adaptive structure of the controller enables it to dynamically respond to varying operating conditions, offering a more robust solution for modern DC microgrids. Although the study focuses solely on simulations, the findings

provide valuable insights for the practical implementation of advanced control strategies.

By addressing the fundamental challenges of DC microgrids through adaptive droop control, this thesis contributes to the development of more reliable and efficient power distribution systems. The study highlights the importance of advanced control mechanisms in the transition to sustainable energy systems and provides a foundation for future research and practical applications.

Keywords: DC Microgrids, Adaptive Droop Control, Energy Efficiency, PLECS Simulation, Stability Analysis.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **Vİİİ**

ABSTRACT ..... **X**

İÇİNDEKİLER ..... **Xİİ**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **XİV**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **XV**

KISALTMALAR DİZİNİ ..... **XVİ**

1. GİRİŞ **1**

2. MİKRO ŞEBEKELER **8**

2.1 Doğru Akım Mikro Şebekeler 10

3. MİKRO ŞEBEKELERDE HİYERARŞİK KONTOL **13**

3.1 Birincil Kontol (Primary Control) 17

3.1.1 Inner Loop (İç Döngü) 21

3.1.2. Droop Control 22

3.1.3. Traditioanal Droop (Geleneksel Droop Kontrolü) 23

3.1.4. Advanced Droop (Gelişmiş Droop Kontrolü) 24

3.1.6 Adaptive Droop 27

3.1.7 Dead-band Droop 29

3.2 Secondary Control (İkincil Kontrol) 31

3.2.1 Merkezi (Centralized) İkincil Kontrol 37

3.2.2 Dağıtılmış (Distributed) Kontrol Yöntemleri 40

3.2.3 Merkezi Olmayan (Decentralized) Kontrol Yöntemleri 42

3.2.4 Feedforward Kontrol Yöntemi 44

3.2.5 Cooperative (İş Birlikçi) Distributed Kontrol Sistemleri 46

3.2.6 Non-Cooperative (İş Birlikçi Olmayan) 48

3.2.7 Dynamic Consensus 50

3.2.8 Gossip 52

3.2.9 Ortalama Akım Paylaşımı (Average Current Sharing) 54

3.2.10 Ortalama Voltaj Paylaşımı (Average Voltage Sharing) 55

3.2.11 DA Bara Sinyali 57

3.3 Üçüncül Kontol (Tertiary Control) 58

4. KONTROLCÜ TASARIMI VE UYGULAMASI 62

4.1. 14 Baralı ve 5 Kontrolcülü DA Mikro Şebeke Uygulaması 63

4.2. 5-Baralı ve 4 Kontrolcülü DA Mikro Şebeke Uygulaması 70

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 73

KAYNAKLAR 74

ÖZGEÇMİŞ 87

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Doğru akım mikro şebeke örnek modeli. 10

Şekil 3.1. Mikro şebekelerde hiyerarşik kontrol modeli. 14

Şekil 3.2. Mikro şebekelerde kullanılan hiyerarşik düzenin tepki süresinin zaman çizelgesinde gösterimi. 15

Şekil 3.3. Birincil (Primary) kontrolün hiyerarşi tablosu. 17

Şekil 3.4. Birincil kontrol seviyesi blok diyagramı. 18

Şekil 3.5. İki düğümlü DA mikro şebeke yapısının basitleştirilmiş eşdeğer devre modeli [35]. 19

Şekil 3.6. İkincil (Secondary) kontrolün hiyerarşi tablosu. 32

Şekil 3.7. İkincil kontrol sistemlerinde kullanılan iletişim ağı. 39

Şekil 4.1. IEEE standartlarından geliştirilen 14 baralı DA mikro şebeke diyagramı. 64

Şekil 4.2. 14 baralı DA mikro şebekenin konvertör çıkış gerilim grafiği. 66

Şekil 4.3. 14 baralı DA mikro şebekenin konvertörsüz baralarının çıkış gerilim grafiği. 67

Şekil 4.4. 14 baralı DA mikro şebekenin konvertör çıkış akım grafiği. 68

Şekil 4.5. 14 baralı DA mikro şebekenin konvertör çıkış akım grafiği. 69

Şekil 4.6. 5-baralı DA mikro şebekenin simülasyon görüntüsü..... 70

Şekil 4.7. 5-baralı DA mikro şebekenin Voltaj grafiği..... 71

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. İkincil kontrol yaklaşımlarını ve her bir yaklaşımın başlıca avantaj ve dezavantajları [79]..... 36

Tablo 4.1. IEEE standartlarından geliştirilen 14-baralı DA mikro şebekenin çıkış ve referans gerilimleri ile maksimum güç verileri. 65

KISALTMALAR DİZİNİ

AA	**:**	Alternatif Akım
CÜ	**:**	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
CIGRÉ	**:**	Uluslararası Büyük Elektrik Sistemleri Konseyi
DA	**:**	Doğru Akım
DEK	**:**	Dağıtık Enerji Kaynakları
DG	**:**	Dağıtık Jeneratör
EİE	**:**	Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü
EPDK	**:**	Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EÜAŞ	**:**	Elektrik Üretim AŞ Genel Müdürlüğü
EYS	**:**	Enerji Yönetim Sistemleri
IEA	**:**	Uluslararası Enerji Ajansı
IEEE	**:**	Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IRENA	**:**	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
PI	**:**	Proportional-Integral
TAEK	**:**	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TÜBİTAK	**:**	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

1. GİRİŞ

Enerji, modern toplumların ekonomik büyümesi, endüstriyel gelişimi ve yaşam standartlarının iyileştirilmesi için temel bir unsurdur. Tarımdan sanayiye, ulaşımdan iletişime kadar hayatın her alanında enerji hayati bir rol oynamaktadır. Ancak 20. yüzyıldan itibaren hızla artan enerji talebi küresel ölçekte fosil yakıtlara dayalı bir enerji üretim modelini beraberinde getirmiştir. Kömür, petrol ve doğal gaz gibi kaynaklar uzun yıllar enerji üretiminin temelini oluşturmuştur; lakin çevresel zararları ve sınırlı rezervleri nedeniyle sürdürülebilirlik açısından zorluklar yaratmıştır [1]. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) raporuna göre küresel enerji talebinin 2050 yılına kadar %40 oranında artması beklenmekte. Neticede bu durum enerji dönüşümünü kaçınılmaz kılmaktadır [2].

Türkiye, enerji talebindeki hızlı artışıyla dikkat çeken ülkeler arasındadır. Artan nüfus, sanayileşme ve şehirleşme gibi faktörler ülkenin enerji tüketimindeki artışı tetiklemektedir. Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'na (EPDK) göre ülkenin enerji tüketimi son on yılda %5 oranında artmıştır. Bu büyüme yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin bir şekilde değerlendirilmesini bir zorunluluk haline getirmiştir [3]. Güneş, rüzgâr ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynakları açısından oldukça zengin bir potansiyele sahip olan Türkiye, bu potansiyeli değerlendirme hedefindedir. Ayrıca Türkiye'nin enerji politikasının yenilenebilir enerji entegrasyonu ile enerji güvenliğini artırmayı ve dışa bağımlılığı azaltmayı amaçladığı görülmektedir [4].

Modern enerji sistemleri enerji üretimindeki dalgalanmaları dengelemek, verimliliği artırmak ve enerji kayıplarını azaltmak için yenilikçi teknolojilere ihtiyaç duymaktadır. DA mikro şebekeler, enerji dönüşüm kayıplarını en aza indirerek sürdürülebilir enerji sistemlerine önemli katkılar sağlamaktadır. Güneş panelleri, yakıt hücreleri ve bataryalar gibi doğal olarak doğru akım üreten kaynaklarla uyumlu olan bu sistemler enerji verimliliğini artırma konusunda kritik bir rol oynamaktadır [5]. Wang ve arkadaşlarının çalışmasında ise DA mikro şebekelerin yenilenebilir enerji kaynaklarını bütünleştirerek enerji geçiş süreçlerini hızlandırdığını ve karbon emisyonlarını azaltma potansiyeline sahip olduğunu vurgulamaktadır [6].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının ekonomik faydaları enerji maliyetlerini azaltmasının yanı sıra dünyamız ve ülkemiz için ekonomik büyümeye de olumlu katkılar sağlamaktadır. Bu bağlamda Bulut ve Muratoğlu'nun çalışmaları yenilenebilir enerji üretimindeki artışın ekonomik büyüme üzerinde olumlu etkileri olduğunu ve enerji maliyetlerini düşürdüğünü belirtmektedir [7]. Bununla birlikte enerji depolama teknolojileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunda kritik bir rol oynamaktadır. Depolama sistemleri enerji üretimindeki dalgalanmaları dengeleyerek sistem kararlılığını artırmaktadır [8].

Dijitalleşme, enerji sistemlerinin dönüşümünde önemli bir rol oynamaktadır. Akıllı şebekeler, sensörler, veri analitiği ve otomasyon teknolojileri sayesinde enerji üretimi ve tüketimi arasındaki denge daha etkin bir şekilde sağlanmaktadır. Bu bağlamda Knox ve arkadaşlarının çalışması dijitalleşmenin enerji sistemlerinde verimliliği artırarak enerji erişimini kolaylaştırdığını ifade etmektedir [9]. Ayrıca dijitalleşmeyle birlikte mikro şebekelerdeki enerji verilerinin güvenli bir şekilde işlenmesi ve enerji talep yanıt stratejilerinin optimize edilmesi için yenilikçi bir çözüm sunmaktadır [10].

Enerji sistemlerindeki dönüşüm, yalnızca teknolojik yeniliklerle sınırlı kalmayıp ekonomik ve sosyal dinamikleri de kapsamaktadır. Dijitalleşmeyle, akıllı şebekeler ve DA mikro şebekeler gibi yenilikçi yaklaşımlar enerji sistemlerini daha esnek, verimli ve çevresel açıdan sürdürülebilir hale getirmektedir. Bu dönüşüm sürecinin başarıya ulaşması, yenilikçi teknolojilerin benimsenmesi ve enerji altyapılarının modernize edilmesiyle mümkün olacaktır.

Enerji dönüşümü, yalnızca teknolojik ilerlemelerle değil aynı zamanda sosyal yapıların ve ekonomik dinamiklerin yeniden şekillenmesiyle mümkün hale gelmektedir. Fosil yakıtlara dayalı enerji sistemlerinin çevreye olumsuz etkilerinin yanı sıra, sömürgeleşme gibi toplumsal adaletsizliklere yol açtığı bilinen bir gerçektir. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması, enerji sistemlerinin demokratikleşmesi ve yerel toplulukların bu sürece dahil edilmesi gerekliliğinin önemini açıkça ortaya koymaktadır [11].

Hoppe ve arkadaşlarının çalışmasında sosyal yeniliklerin enerji dönüşümünde önemli bir yere sahip olduğuna ve bu yenilenebilir enerji projelerinin topluluk

temelli yaklaşımlar ve iş birlikleriyle uygulanmasının hem ekonomik kalkınmayı hem de enerji adaletini desteklediğini vurgulamaktadır [12]. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin mikro şebekelerle yerel düzeyde uygulanması, bireylerin enerji üreticisi haline gelmesine olanak tanırken, enerji erişimi konusunda daha adil bir sistemin temelini atmaktadır.

Ekonomik açıdan bakıldığında enerji dönüşümünün iş gücü piyasası üzerinde büyük etkileri bulunmaktadır. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın (IRENA) raporlarına göre; 2030 yılına kadar yenilenebilir enerji sektörü, dünya genelinde milyonlarca yeni istihdam yaratabilir [13]. Bu istihdam artışı enerji dönüşümünün yalnızca çevresel bir gereklilik olmadığını aynı zamanda ekonomik bir fırsat sunduğunu da göstermektedir.

Karbon fiyatlandırma ve sürdürülebilir finansman mekanizmaları enerji dönüşümünün ekonomik boyutlarını şekillendiren önemli araçlar arasında yer almaktadır. Bu politikalar fosil yakıtların maliyetlerini artırırken aynı zamanda temiz enerji teknolojilerinin rekabet gücünü de artırmaktadır [14]. Ayrıca Markard bir çalışmasında, karbon emisyonlarını azaltmayı hedefleyen politikaların enerji dönüşümünü hızlandırdığına dikkat çekmektedir [15].

Sonuç olarak enerji dönüşümü, yalnızca teknolojik bir mesele değil aynı zamanda toplumsal ve ekonomik sistemlerin yeniden yapılandırılmasını gerektiren kapsamlı bir süreçtir. Bu dönüşümün başarısı ancak sosyal katılımın artırılması, ekonomik fırsatların genişletilmesi ve yenilikçi enerji politikalarının uygulanmasıyla mümkün olacaktır.

Doğru akım mikro şebekeler açısından elektrik enerjisinin tarihsel gelişimine bakıldığında, bu gelişimin ilk olarak 19. yüzyılda doğru akım (DA) ve alternatif akım (AA) sistemleri arasındaki rekabetle şekillendiği görülecektir. Thomas Edison'un öncülüğünde geliştirilen DA tabanlı enerji dağıtım sistemleri, özellikle kısa mesafeli enerji iletiminde güvenilir ve uygulanabilir bir çözüm sunmuştur. New York gibi büyük şehirlerde başarıyla uygulanan DA sistemleri, elektrik enerjisinin ticari olarak kullanılabilir hale gelmesini sağlamıştır [16]. Fakat DA sistemlerinin uzun mesafelerde enerji kayıplarına neden olması, bu teknolojinin büyük ölçekli enerji iletiminde etkinliğini sınırlamıştır.

Bu sınırlamaların fark edilmesi, AA sistemlerin yükselişine mükemmel bir zemin hazırlamıştır. Nikola Tesla ve George Westinghouse'un öncülük ettiği AA teknolojisi, çok fazlı sistemler ve yüksek voltaj kullanımıyla uzun mesafeli enerji iletiminde önemli avantajlar sağlamıştır. Özellikle 1893 Chicago Dünya Fuarı'nda tanıtılan AA sistemleri, Niagara Şelaleleri hidroelektrik santrali gibi büyük ölçekli projelerle enerji üretimi ve dağıtımında baskın teknoloji haline gelmiştir [17]. Bu gelişmeler sonucunda Edison'un öncüsü olduğu DA sistemler geri planda kalmıştır.

DA sistemler 20. yüzyılda telekomünikasyon, batarya tabanlı uygulamalar ve endüstriyel süreçlerde kullanılmaya devam etmiş olsa da uzun mesafeli enerji iletimi için uygun olmadıkları gerekçesiyle geniş çaplı şebekelerde nadiren tercih edilmiştir. Bununla birlikte 20. yüzyılın sonlarına doğru yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması ve güç elektroniği teknolojilerindeki ilerlemeler DA sistemlerin yeniden ön plana çıkmasını sağlamıştır [18].

Elektrik enerjisinin tarihsel gelişim sürecinde alternatif akım (AA) ve doğru akım (DA) sistemleri arasındaki rekabet, iletim ve dağıtım teknolojilerinin temellerini şekillendirmiştir. Bu iki sistemin avantaj ve dezavantajları üzerine yürütülen teknik ve ekonomik değerlendirmeler, modern enerji altyapılarının oluşumuna yön vermiştir. Ancak günümüzde merkeziyetçi büyük şebekelerin sınırlılıkları giderek daha belirgin hale gelmiştir. Bu durum ise enerji sistemlerinin daha esnek, çevre dostu ve yerelleştirilmiş yapılara evrilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Özellikle artan enerji talebi, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonundaki zorluklar ve enerji arz güvenliği gibi dinamikler yeni nesil kontrol ve dağıtım stratejilerine olan ihtiyacı ve zorunluluğu artırmıştır.

Bu minvalde mikro şebekeler; yerel enerji üretimi ve tüketiminin optimize edilebildiği, bağımsız çalışabilme kabiliyetine sahip yapılar olarak ön plana çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla bütünleşmiş çalışabilen bu sistemler, enerji verimliliğini artırmanın yanı sıra karbon emisyonlarının azaltılmasına da katkı sağlayarak, sürdürülebilir enerji dönüşümünün temel yapı taşlarından biri haline gelmiştir. Mikro şebekelerin gelişimi, yalnızca teknik bir yenilik değil aynı zamanda enerji altyapılarında paradigma değişimini temsil eden önemli bir dönüşümdür.

Bu bağlamda DA sistemler günümüzde mikro şebeke uygulamalarında giderek daha fazla tercih edilmektedir. Güneş enerjisi sistemleri, batarya teknolojileri ve elektrikli araç altyapıları gibi pek çok modern enerji kaynağı doğrudan DA karakterli olduğundan, bu sistemlerle sağlanan doğal uyum dönüştürme kayıplarını azaltmakta ve sistem verimliliğini artırmaktadır. Buna ek olarak DA sistemler, daha sade kontrol yapıları ve senkronizasyon ihtiyacının bulunmaması gibi avantajlarıyla, özellikle izole uygulamalarda ve hassas yüklerin beslendiği ortamlarda önemli kolaylıklar sunmaktadır. Tüm bu gelişmeler ışığında DA mikro şebekeler; enerji sistemlerinin esnekliğini ve sürdürülebilirliğini artırmada stratejik bir rol üstlenmekte ve gelecekteki enerji altyapılarının planlanmasında öncelikli tercih haline gelmektedir.

Amaç ve Kapsam

Bu çalışmamızın temel amacı, doğru akım mikro şebekelerde enerji verimliliğini artırmak ve sistem kararlılığını sağlamak için bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirmektir. Bu kontrolcü hiyerarşik olarak birincil ve ikincil kontrol stratejilerinin aşamalı bir şekilde devreye alındığı bir yapıyla tasarlanacaktır. Çalışmamız, bir DA mikro şebeke simülasyon modeli geliştirerek güç paylaşımı dinamiklerini ve kontrol stratejilerinin etkilerini analiz etmeyi hedeflemektedir. Bu amaca ulaşmak için sırasıyla aşağıdaki aşamalar gerçekleştirilmesi planlanmıştır.

I. DA Mikro Şebeke Modelinin Tasarımı: MATLAB/Simulink tabanında çalışan PLECS yazılımı kullanılarak, 14 baradan ve 5 kontrolcüden oluşan bir doğru akım (DA) mikro şebeke modeli tasarlanacaktır. Modelimizde enerji kaynakları, yükler ve baralar arasındaki bağlantılar detaylı bir şekilde yapılandırılarak; mikro şebekenin topolojisi gerçek sistem koşullarını yansıtacak biçimde modellenmiştir. Sistem parametreleri Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) standartlarına uygun olarak belirlenecek ve bu doğrultuda kontrol mimarisinin kararlılık, voltaj regülasyonu ve yük paylaşımı performansları dinamik simülasyonlarla analiz edilecektir. Geliştirilen model başta da belirtildiği gibi hem birincil hem de ikincil kontrol düzeylerini içeren hiyerarşik bir yapıya sahip olacak ve enerji

yönetiminin etkinliğini ölçmeye yönelik kapsamlı bir test ortamı sunacaktır.

II. Birincil Kontrol Sisteminin Devreye Alınması: Sistemin başlangıcında enerji kaynakları arasında hızlı güç paylaşımını ve voltaj düzenlemesini sağlamak amacıyla birincil kontrol sistemi devreye alınacaktır. Bu kontrol seviyesi, iç döngü kontrolü (Inner Loop) ve droop kontrolü (Droop Control) yöntemlerini içermektedir. Droop kontrolünün geleneksel yapısının voltaj sapmaları gibi sınırlamaları analiz edilecek ve bu eksiklikleri gidermek için adaptif droop kontrol yöntemleri kullanılacaktır. Grafikler birincil kontrol sisteminin başlangıçta etkin olduğu süreyi ve bu süredeki sistem davranışını gösterecek şekilde hazırlanacaktır.

III. İkincil Kontrol Sisteminin Devreye Alınması: Birincil kontrol sisteminin devreye alınmasının ardından belirli bir süre sonra ikincil kontrol sistemi etkinleştirilecektir. Bu kontrol seviyesi bara gerilim restorasyonu ve hassas akım paylaşımı gibi hedefleri gerçekleştirmek için tasarlanmıştır. İkincil kontrol, voltaj dalgalanmalarını minimize ederek sistem kararlılığını artıracak ve mikro şebekeye yeni yüklerin veya enerji kaynaklarının eklenmesini kolaylaştıracaktır. Sonuç grafikleri ise birincil kontrolün etkilerinin ardından ikincil kontrolün devreye girmesiyle ortaya çıkan iyileştirmeleri net bir şekilde gösterecektir.

IV. Simülasyon ve Performans Analizi: Birincil ve ikincil kontrol sistemlerinin aşamalı olarak devreye alınmasıyla mikro şebekenin güç paylaşımı dinamikleri ve kararlılık durumu analiz edilecektir. Simülasyon sonuçları voltaj sapmalarının azaltılması, yük paylaşım doğruluğunun artırılması ve genel sistem kararlılığının iyileştirilmesi üzerinde yoğunlaşacaktır. Önerilen kontrolörün performansı geleneksel yöntemlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir.

Simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesiyle birincil ve ikincil kontrol sistemlerinin aşamalı olarak devreye alınmasının DA mikro şebeke performansına olan katkıları ortaya konacaktır. Önerilen kontrol stratejisinin enerji verimliliğini artırmada ve sistem kararlılığını sağlamada etkili bir çözüm sunması beklenmektedir. Bu çalışma DA mikro şebekelerde birincil ve ikincil kontrol

sistemlerinin aşamalı etkinleştirilmesine dayalı bir kontrol mimarisi sunmaktadır. Elde edilen bulgular ise mikro şebekelerin güvenilirlik ve verimlilik açısından geliştirilmesi için önemli bir temel oluşturacağı düşünülmektedir.

2. MİKRO ŞEBEKELER

Mikro şebekeler enerji sistemlerinin yerelleştirilmesi ve modernleştirilmesi amacıyla geliştirilen, hem merkezi enerji şebekelerinden bağımsız ada modda işletilebilir olması hem de şebekeye bağlı şekilde olası her durumda çalışabilme yeteneğine sahip küçük ölçekli enerji sistemleridir. İlk olarak 1960'larda kırsal alanlar ve adalar gibi enerji erişiminin sınırlı olduğu bölgelerde ortaya çıkmıştır. Örneğin Yunanistan'daki Kythnos Adası'nda uygulanan yenilenebilir enerji temelli mikro şebeke, bu teknolojinin erken başarılarından biri olarak kabul edilmektedir [19,20].

Mikro şebekeler ilk kullanım alanlarından günümüze gelmiştir fakat enerji üretiminde esneklik ve bağımsızlık sağlama potansiyeline sahip olmasına rağmen gelişim süreçlerinde bazı zorluklarla karşılaşmıştır. Enerji depolama sistemlerinin yüksek maliyeti ve şebeke kararlılığını sağlama gerekliliği gibi teknik sorunlar bu zorlukların başında gelmektedir [21]. Bunun yanı sıra başlangıç yatırımlarının yüksek maliyetleri ve merkezi şebekelerle entegrasyon sürecindeki düzenleyici engeller mikro şebekelerin yaygınlaşmasını sınırlayan ekonomik ve politik faktörler arasında yer almıştır [22]. Ancak lityum iyon bataryalar gibi yeni nesil enerji depolama teknolojileri, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin verimli bir şekilde depolanmasını sağlamış, akıllı kontrol sistemleri ve dijitalleşme sayesinde mikro şebekelerin etkin yönetimi mümkün hale gelmiştir. Özellikle enerji yönetim sistemleri, mikro şebekelerin esnekliğini artırarak performansını optimize etmiştir [23-25].

Mikro şebekeler, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla bütünleşip çalışabilir ve enerji güvenliğini artırmanın yanı sıra dünyamız için bir tehdit oluşturan karbon emisyonlarını azaltma hedeflerine de hizmet eder. Güneş panelleri, rüzgâr türbinleri ve küçük ölçekli hidroelektrik türbinler gibi yenilenebilir kaynaklarla çalışırken, ihtiyaç halinde dizel jeneratörler gibi yenilenebilir olmayan kaynakları da kullanabilir [26]. Mikro şebekeler AA, DA veya hibrit yapılarla entegre edilerek çeşitli sistem gereksinimlerine uyum sağlayabilirler [27,28]. Özellikle DA mikro şebekeler AA mikro şebekelerdeki gibi senkronizasyon ihtiyacının olmaması, AA-DA-AA dönüşüm kayıplarının azalması ve düşük direnç kayıpları gibi

avantajlarıyla enerji verimliliğini artırırken, reaktif güç kayıplarını da ortadan kaldırarak güç kalitesini yükseltirler [29,30].

Mikro şebekelerde etkin enerji yönetimi, arz-talep dengesi, enerji verimliliği ve güç kalitesinin korunması gibi süreçleri kapsar. Bu doğrultuda mikro şebekelerin kontrol stratejileri, kararlılık ve performansı artırmayı hedefler. Hiyerarşik kontrol mimarisi, bu sistemlerde yaygın olarak tercih edilen bir yapıdır ve birincil, ikincil ve üçüncül kontrol seviyelerinden oluşur [31]. Birincil kontrol, bara gerilimi ve akımını gerçek zamanlı olarak izleyip düzenlerken; ikincil kontrol, gerilim salınımlarını dengeleyerek kararlılığı destekler [32]. Üçüncül kontrol seviyesinde ise aktif güç referansı optimize edilerek enerji kaynaklarının toplam üretim maliyetini en aza indirmek amaçlanır [33]. Mikro şebekeler hem ada modunda hem de şebeke bağlantılı modda çalışabilme özelliğiyle kullanıcılarına güven verir. Enerji üretimi ve depolama süreçlerine katılımı teşvik ederek kullanıcıların yalnızca tüketici değil aynı zamanda sistemin aktif bir parçası olmasını sağlar [34]. Bu sistemler, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunda kararlılık ve kontrol açısından önemli avantajlar sağlar. Mikro şebekeler geleneksel güç şebekeleri gibi çeşitli kontrol döngüleri ve katmanlarından oluşmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın kullanımı ve mikro şebekeler aracılığıyla şebekeye entegre edilmeleri, ana şebeke ve mikro şebeke açısından kararlılık ve kontrol konusunda bazı zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için mikro şebeke kontrolü üzerine pek çok çalışma gerçekleştirilmiş olup son 20 yılda bu çalışmalar özellikle kontrol ve koruma sistemlerine odaklanmıştır. Mikro şebeke kontrolünde elde edilen ilerlemeler, mikro şebekelerin ana şebekeye daha yüksek kapasitelerde entegrasyonunu kolaylaştırmakta ve dağıtım şebekelerinin işletimindeki zorlukları gidermeye katkı sağlamaktadır. Geliştirilen kontrol stratejileri geçici durum tepkisinin iyileştirilmesi, dengesizliklerin giderilmesi ve hata durumunda sistem kararlılığının artırılmasını mümkün kılar [35].

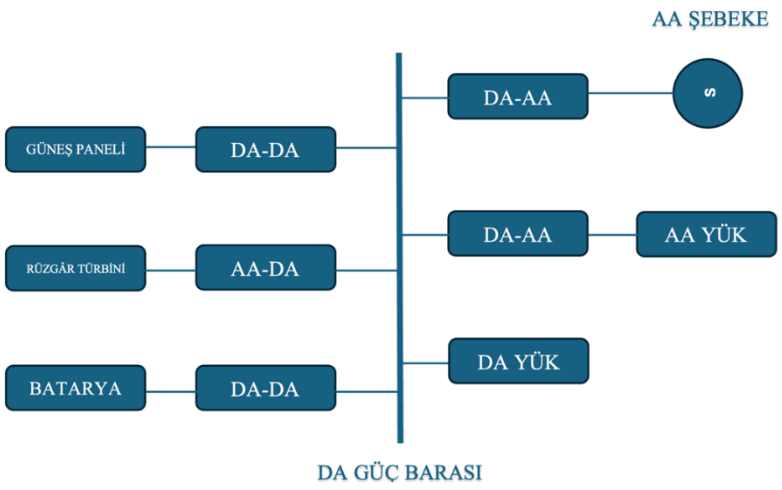
Kaynaklar arasında enerji yönetimi ve koordinasyonu gerçekleştirerek yükün özelliğine göre en uygun şebekeden besleme yaptırır ve bu sebeple kaynak israfı yapmaz. Mikro şebekeler dağıtık üretim altyapısının temelini oluşturur ve yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunu yönetmek amacıyla

geliştirilmektedir. Mikro şebekelerin kontrol stratejileri performans ve kararlılığı artırmanın yanı sıra kapalı döngü sistemlerde geçici durum tepkisinin iyileştirilmesi, dengesizlik ve harmoniklerin izlenmesi, hata durumunda çalışma karakteristiklerinin güçlendirilmesi ve ada ile şebeke etkileşimli mod çalışma koşullarında yeni kontrol şemalarının geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Günümüze gelindiğinde ise mikro şebekeler enerji sistemlerinin önemli bir parçası haline gelmiş ve yaygın olarak tercih edilmektedir [36]. Bu sistemler hem sanayi bölgelerinde hem de kırsal alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmakta ve sürdürülebilir bir enerji geleceğine katkıda bulunmaktadır [37].

2.1 Doğru Akım Mikro Şebekeler

Geleneksel enerji sistemlerinde AA şebekeler uzun yıllar boyunca baskın teknoloji olarak kullanılmıştır. Ancak modern enerji gereksinimlerinin değişmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının artışı DA mikro şebekelerin daha avantajlı bir çözüm olarak ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu yeni sistemlerin teknik ve ekonomik avantajları ise enerji sektöründe önemli bir dönüşümü beraberinde getirmiştir.

DA mikro şebekeler, doğrudan doğruya çalışan yenilenebilir enerji kaynakları ve batarya sistemleriyle enerji dönüşüm kayıplarını minimize eder. Ayrıca bu yapı enerji dönüşümüne olan ihtiyacı azaltarak toplam enerji verimliliğini önemli ölçüde artırır [38]. Özellikle güneş panelleri ve lityum iyon bataryalar gibi DA tabanlı cihazlarla doğrudan uyumluluk, bu kayıpları daha da azaltmaktadır.



Şekil 2.1. Doğru akım mikro şebeke örnek modeli.

Şekil 2.1'de gösterilen DA mikro şebeke modelinde görüleceği üzere DA mikro şebekelerin tasarımı ve işletimi, AA sistemlere kıyasla daha basittir. Planas ve arkadaşlarının çalışmasında DA mikro şebekelerin daha az karmaşık inverter yapılarına ihtiyaç duyduğunu ve bu nedenle başlangıç maliyetlerinin daha düşük olduğunu ortaya koymuştur [39]. Ayrıca sistemin sade (minimal) yapısı, bakım, arıza ve işletme maliyetlerini de azaltmaktadır.

Güneş panelleri, yakıt hücreleri ve bataryalar gibi doğal olarak DA üreten enerji kaynakları, enerji dönüşüm kayıplarını en aza indirerek DA sistemlerini enerji geçişinde vazgeçilmez bir teknoloji haline getirmiştir [40]. Bu sistemler enerji verimliliği, kolay entegrasyon ve düşük kayıplar gibi avantajlarıyla dikkat çekmekte ve özellikle mikro şebeke uygulamaları ile yenilenebilir enerji sistemlerinde ön planda yer almaktadır. DA mikro şebekeler, bu tür doğal DA kaynaklarla doğrudan uyum sağlayarak enerji dönüşüm süreçlerini optimize eder ve sistem verimliliğini önemli ölçüde artırır [41].

DA sistemleri, güç kalitesinde önemli bir iyileşme sunar. Lotfi ve arkadaşının çalışmasında DA mikro şebekelerin harmonik bozulma ve reaktif güç gibi AA sistemlerin karşılaştığı güç kalitesi sorunlarını ortadan kaldırdığını belirtmiştir [42]. Bu özellik, özellikle hassas endüstriyel uygulamalar ve veri merkezleri için kritik öneme sahiptir.

DA mikro şebekeler, dijitalleşme ve enerji depolama sistemleri gibi modern teknolojilerle yüksek bir uyumluluk göstermektedir. DA mikro şebekelerin gelecekte akıllı enerji sistemlerinde önemli bir rol oynayacağı su götürmez bir gerçektir [43]. Ayrıca DA sistemleri, hibrit AA/DA mikro şebeke yapılarında enerji akışını optimize etmek için de kullanılmaktadır [28,44-46].

Yaptığımız detaylı literatür taramaları neticesinde DA mikro şebekelerin enerji sistemleri için neden kritik bir rol oynadığına dair avantajları üst kısımda açıkça ortaya konulmuştur. Ancak bu avantajların tam anlamıyla gerçekleştirilebilmesi için bu sistemlerin kararlılığına ve verimliliğine yönelik bazı teknik gerekliliklerin yerine getirilmesi gerekmektedir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken doğası, enerji depolama sistemlerinin etkin entegrasyonu ve güç paylaşımı gibi faktörler DA mikro şebekelerde gelişmiş kontrol stratejilerinin uygulanmasını

zorunlu kılmaktadır. Öyle ki bu bağlamda, mikro şebekelerin kararlı bir şekilde çalışabilmesi için hiyerarşik bir kontrol yaklaşımı benimsenmektedir.

Mikro şebekeler ile dağıtık enerji kaynaklarından oluşan dağıtım sistemlerini birbirinden ayıran en temel özellik, mikro şebekelerin kapsamlı bir kontrol kabiliyetine sahip olmasıdır. Bu kontrol kabiliyeti, mikro şebekelere yüksek koordinasyon ve güçlü bir altyapı sağlar. Geleneksel şebekelerden farklı olarak, mikro şebekeler sonraki bölümde açıklanacak olan Şekil 3.1'deki gibi hiyerarşik bir kontrol yapısına sahiptir ve çeşitli katmanlardaki kontrol tekniklerinin etkin şekilde uygulanmasını gerektirir. Mikro şebekelerin güvenli çalışabilmesi ve ana şebekeye uyumlu bir şekilde bağlanması ya da gerektiğinde ayrılması, ancak uygun kontrol tekniklerinin kullanımıyla mümkündür. Şebeke bağlantılı modda, mikro şebekenin gerilim genliği ve frekansı ana şebekeye entegre olacak şekilde ayarlanmalıdır; ada modunda ise uygun algoritmalar sayesinde sistemin sorunsuz çalışması sağlanır.

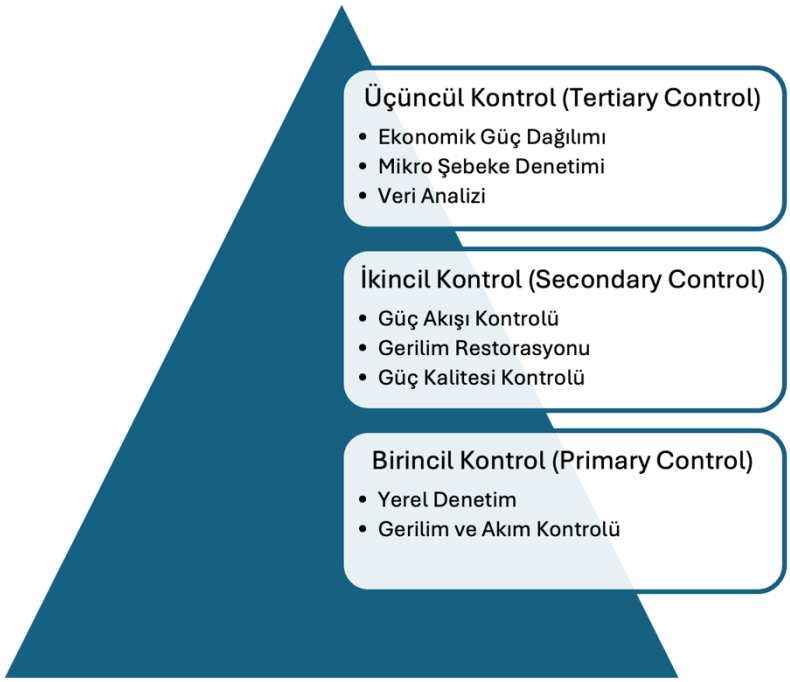
Mikro şebekelerin performansını artırmak ve stabilitesini sağlamak için çok katmanlı kontrol döngüleri kullanılır. Bu döngülerde gerilim, frekans (AA sistemlerde), akım ve aktif/reaktif güç gibi parametrelerin kontrolü, her iki çalışma modunda da geri besleme verisi sağlar. Mikro şebekelerin hiyerarşik kontrol yapısı; yük paylaşımı, dağıtık enerji kaynaklarının koordinasyonu ve gerilim-frekans regülasyonundan sorumludur. Şebeke modunda mikro şebekenin senkronizasyonu, güç akışının yönetimi ve ana şebeke ile etkileşim gibi süreçleri de kapsar. Günümüzde güç elektroniği altyapısının yaygınlaşmasıyla her iki modda da çalışabilen mikro şebeke sistemlerinde hiyerarşik kontrol ve enerji yönetim sistemleri (EYS) vazgeçilmez bir gereklilik haline gelmiştir. Bu bağlamda frekans kontrolü ve üçüncül kontrol gibi çeşitli yöntemler araştırılmakta ve yeni teknikler önerilmektedir [47]. Özellikle DA mikro şebeke yapılarında gerilim kararlılığı, esneklik sağlamak için önemli bir araştırma alanıdır.

3. MİKRO ŞEBEKELERDE HİYERARŞİK KONTROL

DA mikro şebekelerdeki hiyerarşik kontrol, enerji yönetiminde daha etkin çözümler sunmak için geliştirilen ve enerji sistemlerini daha kararlı hale getiren bir kontrol metodolojisidir. Hiyerarşik kontrolün kökeni 20. yüzyılın sonlarında enerji dağıtım sistemlerinin merkezi yapısını desteklemek amacıyla ortaya çıkmıştır. Ancak bu kontrol stratejisinin DA mikro şebekelere uygulanışı yenilenebilir enerji kaynaklarının ve dağıtık enerji sistemlerinin son zamanlarda popülerliğinin artmasıyla hız kazanmıştır.

Hiyerarşik kontrolün ilk uygulamaları özellikle geleneksel şebeke altyapılarında güvenilirliği artırmak ve şebeke kararlılığını sağlamak amacıyla ortaya konulmuştur. DA mikro şebekelerde ise bu yaklaşım dağıtık enerji kaynaklarının entegrasyonu ile kritik hale gelmiştir. DA mikro şebekelerde kullanılan hiyerarşik kontrol yöntemleri ilk olarak akademik camiada Varquez ve arkadaşları tarafından detaylandırılmıştır [48]. Yapılan bu çalışmalar mikro şebekelerdeki yenilikçi kontrol stratejilerinin zeminini oluştururken DA mikro şebekelerde hiyerarşik kontrolün çeşitli stabilizasyon teknikleri ile entegre edilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır [49,50]. Mikro şebekeler için dağıtılmış kontrol tekniklerinin hiyerarşik kontrolle ilişkilendirilmesini sağlayarak esneklik ve adaptasyon yeteneklerini artırmışlardır. Srinivasan ve arkadaşları ise hiyerarşik kontrolün DA mikro şebekelerde sabit güç yükleri ile kararlılığı sağlamak için nasıl uygulanabileceğini açıklamışlardır [51].

Modern enerji sistemlerinde şebeke kararlılığı, özellikle DA mikro şebekelerde sürdürülebilirlik ve verimlilik hedeflerinin başarıya ulaşması için kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır. DA mikro şebekeler merkezi enerji şebekelerine alternatif olarak yerel enerji üretimi, depolama ve dağıtım süreçlerini optimize eden sistemlerdir. Fakat bu sistemlerin etkin bir şekilde çalışabilmesi için enerji yönetiminin farklı seviyelerinde kontrol stratejilerinin uygulanması gerekmektedir. Hiyerarşik kontrol ise bu ihtiyaca cevap veren en etkili yaklaşımlardan biridir ve birincil, ikincil ve üçüncül kontrol seviyelerini içerir.

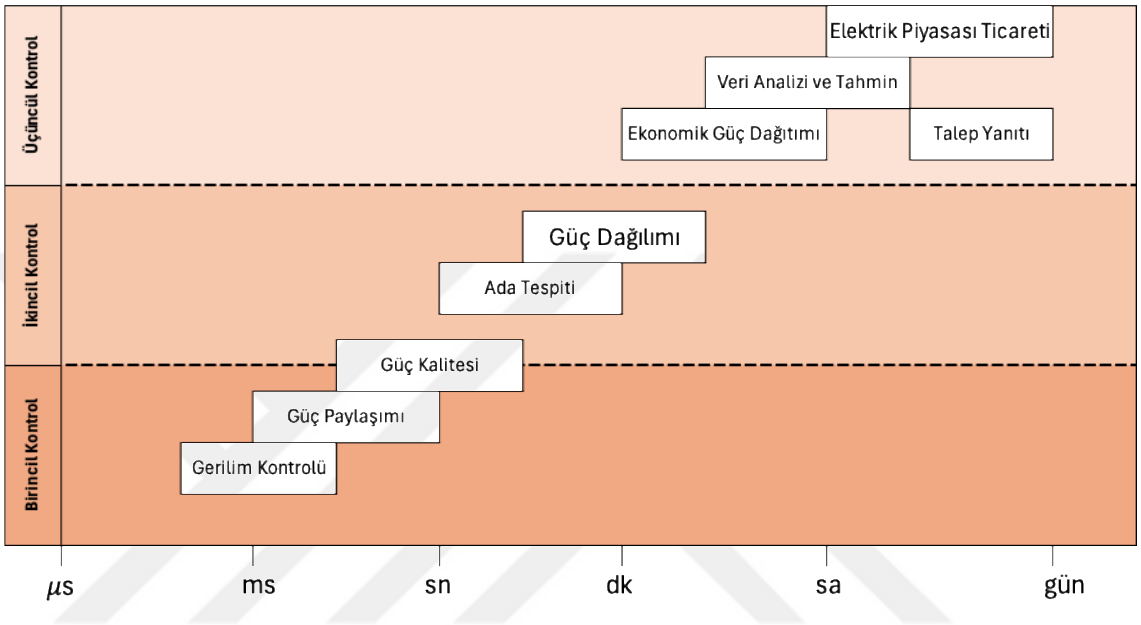


Şekil 3.1. Mikro şebekelerde hiyerarşik kontrol modeli.

Şekil 3.1'de gösterilen piramit yapı DA mikro şebekelerde uygulanan hiyerarşik kontrol mimarisinin katmanlarını temsil etmektedir. Modelin en alt seviyesinde yer alan birincil kontrol, sistemin hızlı tepki vermesini sağlayan temel kontrol düzeyidir; bu katmanda genellikle droop kontrol ve iç döngü stratejileriyle voltaj ve akım düzenlemeleri gerçekleştirilir. Orta seviyede konumlanan ikincil kontrol, birincil kontrolün sınırlamalarını aşmak ve sistemin nominal değerlerine geri dönmesini sağlamak gayesiyle voltaj regülasyonu ve yük paylaşım doğruluğunu iyileştirici mekanizmaları içerir. Piramidin en üst katmanında yer alan üçüncül kontrol ise mikro şebekenin genel enerji yönetimi, ekonomik optimizasyonu ve ana şebeke ile koordinasyonunu sağlayan stratejik en üst katmanı ifade eder. Bu yapıyla kontrol işlevlerinin katmanlara ayrılması sistemin daha modüler, esnek ve ölçeklenebilir bir yapıya kavuşmasını mümkün kılmaktadır.

DA mikro şebekelerde hiyerarşik kontrol, enerji kararlılığını sağlama ve güç kalitesini artırma açısından oldukça etkili bir sistemdir [52]. Ayrıca gelişen teknolojiyle birlikte dijitalleşme ve yapay zekâ teknolojilerinin bu kontrol sistemlerine entegrasyonu mikro şebekelerin esneklik ve verimlilik düzeylerini daha da artıracaktır. Dağıtık kontrol sistemleri, merkezi kontrol mekanizmalarına olan bağımlılığı azaltır ve mikro şebekelerin esnekliğini artırır. Bu alanda yapılan

çalışmalarda dağıtık kontrol yöntemlerinin özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken doğasına uyum sağlama konusunda etkili olduğu belirtilmiştir [53]. Bu sistemler enerji sistemlerinin kararlılığını artırırken iletişim maliyetlerini düşürmektedir. Ayrıca Gao ve arkadaşlarının çalışmasında DA mikro şebekelerde birincil ve ikincil kontrol mekanizmalarının, enerji dönüşüm süreçlerinde kayıpları azaltmada etkili olduğunu göstermiştir [54].



Şekil 3.2. Mikro şebekelerde kullanılan hiyerarşik düzenin tepki süresinin zaman çizelgesinde gösterimi.

Şekil 3.2 ile mikro şebekelerde uygulanan hiyerarşik kontrol yapısının zaman ölçeklerine göre tepkilerini gösteren bir zaman çizelgesi sunulmaktadır. Bu yapıda kontrol katmanları işlevsel önceliklerine ve tepki sürelerine göre ayrıştırılmıştır. Şekil incelendiğinde birincil kontrol seviyesi, mikro saniyelerden saniyelere kadar uzanan zaman diliminde çalışarak sistemdeki voltaj ve akım dalgalanmalarına anlık müdahalede bulunur. Bu düzeyde Dağıtık Enerji Kaynakları (DEK) ile ilişkili güç dönüştürücülerinin kontrolü gerçekleştirilir ve yerel kararlılık sağlanır. İkincil kontrol seviyesi saniyelerden dakikalara kadar olan süreçte devreye girerek sistemin nominal çalışma koşullarına dönmesini amaçlar; gerilim restorasyonu ve akım paylaşımının doğruluğunun artırılması bu seviyede gerçekleştirilir. Üçüncül kontrol seviyesi ise saatler ile günler arasında değişen zaman ölçeklerinde çalışarak uzun vadeli enerji yönetimi, ekonomik yük dağılımı, veri analizi ve piyasa etkileşimi gibi stratejik süreçleri kapsar. Bu çok katmanlı kontrol yaklaşımı farklı

zaman dilimlerinde faaliyet göstermesine rağmen senkronize şekilde işlemektedir. Böylece mikro şebekenin hem anlık kararlılığı hem de uzun vadeli verimliliği sağlanmaktadır. Özellikle üçüncül kontrol düzeyinde kullanılan optimizasyon algoritmaları ideal akım paylaşım oranlarının belirlenmesinde önemli rol oynamakta ve sistemin sürdürülebilirliğine katkı sunmaktadır [31].

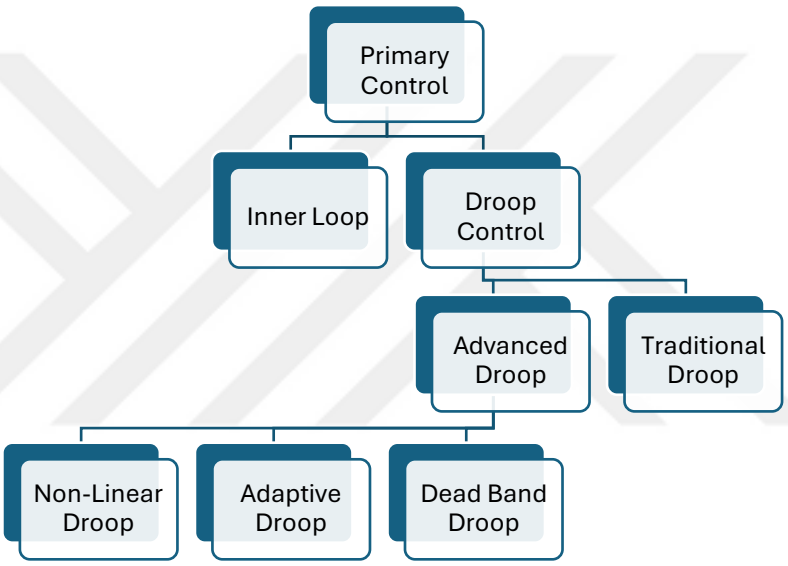
Enerji sistemlerinin yerelleştirilmesi ve modernleştirilmesi çabaları, mikro şebekeleri enerji sektörünün neredeyse merkezine yerleştirmiştir. Özellikle DA mikro şebekeler diğer şebekelerin yanında yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve enerji dönüşüm kayıplarını azaltma yetenekleriyle öne çıkmaktadır. Ancak bu sistemlerin kararlılığı ve verimliliği gelişmiş kontrol stratejilerinin uygulanmasına bağlıdır. Bu bağlamda dağıtık hiyerarşik kontrol stratejileri DA mikro şebekelerin farklı seviyelerdeki ihtiyaçlarına cevap vermek için geliştirilmiştir.

DA mikro şebekelerde kontrol stratejilerinin uygulanması enerji sistemlerinin güvenilirliği, esnekliği ve verimliliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Lakin geleneksel yöntemlerin sınırlamaları, özellikle voltaj sapmaları ve güç paylaşımı hataları daha gelişmiş kontrol yaklaşımlarına olan ihtiyacı ortaya koymaktadır. DA mikro şebekelerde birincil, ikincil ve üçüncül kontrol seviyelerinin hiyerarşik yapısı bu sistemlerin kararlılığını artırma açısından kritik bir öneme sahiptir. Ancak bu yapıların modern ihtiyaçlara yanıt verebilmesi için dağıtık kontrol stratejileri gibi yenilikçi yaklaşımlar geliştirilmiştir. Nasirian ve arkadaşlarının çalışmaları bu alandaki önemli katkılarıyla dikkat çekmektedir [55-57].

Hiyerarşik kontrol sistemleri birincil, ikincil ve üçüncül kontrol seviyelerinden oluştuğundan bahsetmiştik. Nasirian ve arkadaşlarının çalışmasına göre bu yapı, mikro şebekelerin kararlılığını artırmak ve enerji kaynakları arasındaki koordinasyonu sağlamak için gereklidir. Her kontrol seviyesi farklı bir hedefi optimize ederken, dağıtık kontrol yapıları enerji kaynaklarının esnek bir şekilde yönetilmesine olanak tanır [55]. Şimdi ise DA mikro şebekelerde kararlılığı sağlamak için kullanılan hiyerarşik kontrol stratejilerini ve bu alandaki önemli çalışmaları her bir seviyede bir başlık açarak daha detaylı bir şekilde inceleyeceğiz.

3.1 Birincil Kontol (Primary Control)

Birincil kontrol, DA mikro şebekelerde sistemin kararlı çalışmasını sağlamak için merkezi olmayan bir stratejiyle çalışarak doğru voltaj seviyelerini korur ve dağıtık enerji kaynakları (DER'ler) arasında güç paylaşımını dengeler. Bu katman, özellikle şebekeye bağlı veya ada modunda çalışan mikro şebekeler için kritik önem taşır. Voltaj ve akım düzenlemesi gibi temel işlevleri yerine getiren birincil kontrol, Inner Loop ve Droop Control (Droop Kontrolü) yöntemlerini içerir. Inner Loop dönüştürücülerin akım ve voltaj kararlılığını sağlarken yerel kararlılığı güvence altına alır [58,59].

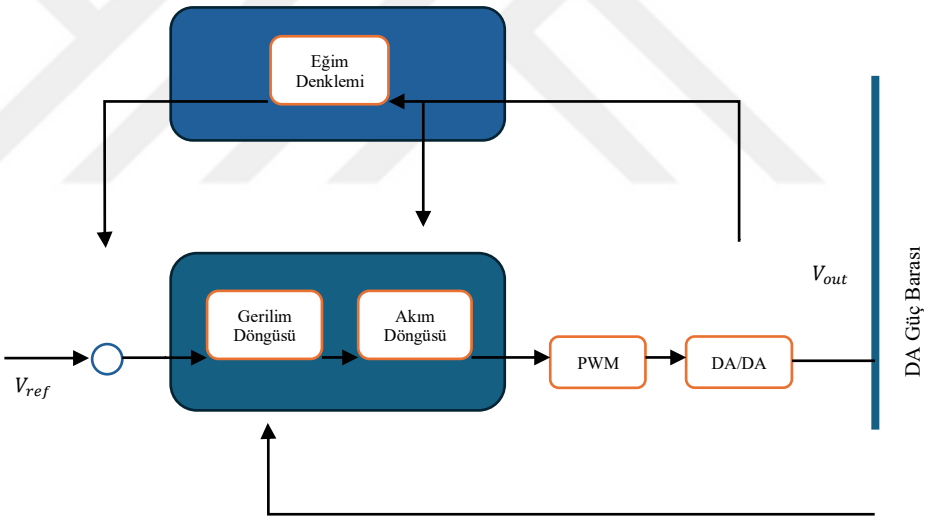


Şekil 3.3. Birincil (Primary) kontrolün hiyerarşi tablosu.

Şekil 3.3'te alt başlıkları gösterilen birincil kontrol seviyesi DA mikro şebekelerde kontrol hiyerarşisinin ilk seviyesini oluşturur. Güç dönüştürücülerinin hızlı tepkisiyle akım ve gerilim regülasyonunu gibi temel dinamiklerini yönetmek üzere temel kararlılığını sağlamaya yönelik kontrol mekanizmasıdır [31]. Voltaj ve güç paylaşımını düzenlemek için genellikle merkezi olmayan droop kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Shafiee ve arkadaşlarının çalışmasında birincil kontrolün hızlı dinamik tepki sağlamada etkili olduğu ve DA mikro şebekelerde voltaj stabilitesini artırdığı vurgulanmaktadır. Ayrıca bu kontrol seviyesi sistem kararlılığı ve yerel enerji kaynaklarının entegrasyonu açısından kritik bir rol oynamaktadır [60].

Birincil kontrol, voltaj regülasyonu ve güç paylaşımı gibi temel işlevleri yerine getirir. "Distributed Adaptive Droop Control" çalışması, bu seviyede kullanılan yenilikçi bir kontrol yaklaşımını tanıtmaktadır [55]. Bu yöntem dağıtık enerji kaynaklarının kararlılığını artırmak için uyarlanabilir bir droop kontrol stratejisi kullanır. Bu strateji enerji kaynakları arasında dinamik bir denge sağlayarak sistemin daha hızlı ve kararlı bir şekilde yanıt vermesini sağlar.

Ayrıca birincil kontrol, mikro şebeke sisteminde temel iç kontrol mekanizması olarak bilinir ve bu kontrol mikro şebeke türüne bağlı olarak farklılık gösterebilir; fakat genellikle en hızlı tepki süresine sahip olan sistem bileşenidir. Asenkron ve senkron jeneratörler, güç elektroniği evirici ve dönüştürücü sistemleri gibi çeşitli teknolojilerle birlikte çalışabilen birincil kontrol özellikle güç elektroniği sistemlerinin esnek çalışma özellikleri sayesinde şebeke işletiminde önemli bir rol üstlenir [61,62].

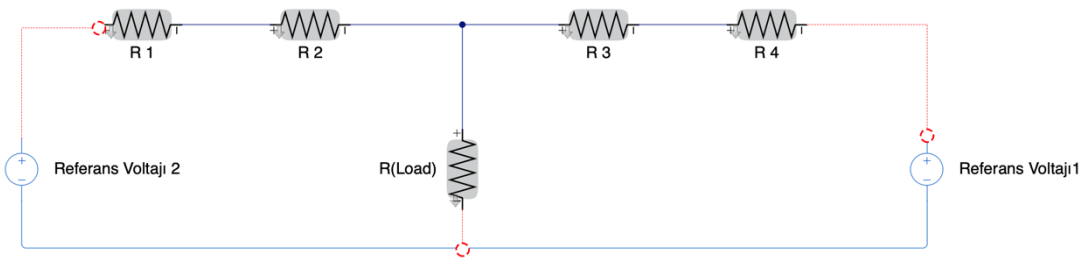


Şekil 3.4. Birincil kontrol seviyesi blok diyagramı.

Birincil kontrolörler şekil 3.4'te gösterildiği gibi çoğunlukla herhangi bir iletişim gerektirmeyen iç kontrol döngüleriyle faaliyet gösterir. Mikro şebekelere dağıtık enerji kaynaklarını entegre etmek için gerilim kaynaklı evirici ve dönüştürücülerden yararlanılır ve bu cihazlar mikro şebekeye paralel bağlanarak kontrol edilir. Paralel bağlanan dönüştürücülerde meydana gelebilecek sirkülasyon akımlarının yönetimi sıklıkla eğim (droop) kontrolü yöntemiyle gerçekleştirilir

[63]. Eğim kontrol yöntemi güç paylaşımında düşük bant genişliği iletişim gereksinimi ve kolay tak-çalıştır işlevselliği gibi özelliklerle mikro şebekelere yüksek derecede esneklik sağlar.

Birincil kontrol seviyesinde kullanılan eğim kontrolü mikro şebeke yapılarına yük akımı paylaşımı açısından temel bir katkı sağlar. Bu yöntemde dönüştürücünün çıkış akımı arttıkça çıkış gerilimi doğrusal bir şekilde azaltılır ve böylece akım paylaşımı sağlanır. Ancak bu yöntem bazı sınırlamalara sahiptir: İlk olarak DA mikro şebeke sistemindeki hat direnci faktörü göz önüne alındığında her dönüştürücünün çıkış geriliminde ufak farklılıklar oluşabilir ve bu da akım paylaşımı doğruluğunu düşürebilir. Son olarak eğim kontrolü etkisiyle yük ile DA bara gerilimi arasında bir sapma meydana gelebilir. Geleneksel eğim kontrol yönteminin bu sınırlamaları Şekil 3.5'te iki düğümlü bir DA mikro şebeke modeli üzerinde detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu örnekte her bir dönüştürücü Thevenin eşdeğer modeli ile basitleştirilmiştir. Örneğin birinci DEK'in çıkış gerilimi Denklem (3.1)'de verilen eğim kontrol denklemine göre belirlenmiştir.



Şekil 3.5. İki düğümlü DA mikro şebeke yapısının basitleştirilmiş eşdeğer devre modeli [35].

$$V_{Oi} = V_{ref} - R_{di} \,.\, i_{Oi} \qquad [3.1]$$

$$V_{bus} = V_{ref} - i_{O1} \,.\, R_{d1} - i_{O1} \,.\, R_{l1} \qquad [3.2]$$

$$V_{bus} = V_{ref} - i_{O2} \,.\, R_{d2} - i_{O2} \,.\, R_{l2} \qquad [3.3]$$

$$\frac{i_{O1}}{i_{O2}} = \frac{R_{d2}}{R_{d1}} + \frac{R_{l2} - \frac{R_{d2}}{R_{d1}} . R_{l1}}{R_{d1} + R_{l1}} \quad [3.4]$$

Bu denklemlere genel olarak baktığımızda V_{Oi} her bir dönüştürücünün çıkış gerilimini, V_{ref} çıkış geriliminin referans değerini, i_{Oi} çıkış akımını ve R_{di} ise sanal direnç değerini temsil etmektedir. Ayrıca denkleme göre DA akım ve gerilimin ilişkisine bakıldığında eşdeğer devre modelindeki çıkış direncinin değeri sanal dirence ve gerilim kaynağının çıkış gerilimi ise referans voltajına eşittir. DA bara gerilim değeri V_{bus} temsil ederken hattın sabit direncini R_{l1}ve R_{l2} temsil eder. Bu denklemlerdeki veriler kullanılarak çıkış akımlarının oranını ifade eden Denklem (3.4) elde edilir. Eğim kontrol yöntemine göre herhangi bir DEK'in çıkış gerilimi, Denklem (3.5) ile ifade edilir:

$$V_{Oi} = V_{ref} - \Delta V_{Oi} \quad [3.5]$$

Burada, V_{ref} referans gerilimini, ΔV_{Oi} DA gerilim sapmasını temsil etmektedir ve Denklem (3.6) ile tanımlanır:

$$\Delta V_{Oi} = i_{Oi} . R_{di} \quad [3.6]$$

Bu ifadede i_{Oi} çıkış akımını ve R_{di} ise eğim kontrol direncini ifade etmektedir. Her bir DEK'e bağlı güç dönüştürücüsü açık devre durumunda çalışırken DA gerilim sapması sıfır olur. Ancak dönüştürücünün çıkış akımı sıfırdan farklı olduğunda, yük akımına bağlı olarak DA gerilim sapması meydana gelir. Bu sapmanın, kabul edilebilir maksimum değeri aşmaması için eğim katsayısı R_{di} Denklem (3.7)'deki gibi sınırlandırılmalıdır:

$$R_{di} \leq \frac{\Delta V_{Oi_{max}}}{i_{Oi_{max}}} \quad [3.7]$$

Bu sınırlama, çıkış gerilimindeki sapmanın, geleneksel eğim kontrol yönteminde ortaya çıkan bir kısıtlamadır [35].

Paralel çalışan güç dönüştürücülerinde kullanılan droop kontrol yöntemi her bir modülün çıkış akımını çıkış gerilimiyle orantılı bir şekilde düzenleyerek gerilim regülasyonunu sağlar ve özellikle düşük gerilimli, yüksek akımlı sistemlerde yaygın olarak kullanılır. Bu sistemlerde geleneksel droop kontrol yöntemi akım

paylaşımı ve gerilim regülasyonu arasında bir denge kurmayı gerektirir. Birincil kontrol seviyesinde belirttiğimiz üzere bu yöntemin iki temel sınırlaması vardır: Birincisi, eğim kontrolünün uygulandığı bir DA mikro şebekede hat direncinin etkisiyle her dönüştürücünün çıkış gerilimi tam anlamıyla aynı olmaz, bu da çıkış akımı paylaşımının doğruluğunu düşürür. İkincisi ise eğim etkisi nedeniyle yük ve DA bara arasındaki gerilim sapması artar. Bu nedenlerden ötürü, mikro şebekede nominal gerilim seviyelerinin korunması amacıyla harici bir kontrol döngüsü, yani ikincil kontrol sisteme entegre edilmelidir.

3.1.1 Inner Loop (İç Döngü)

İç döngü (inner loop) kontrolü DA mikro şebekelerde dönüştürücüler üzerindeki voltaj ve akım kararlılığını sağlamak için kullanılır ve hızlı bir tepki gerektiren sistemlerde dönüştürücünün belirli bir referans değere göre çalışmasını hedefler. Genellikle daha büyük bir kontrol yapısının (dış döngü) bir parçası olarak çalışarak fotovoltaik jeneratörler ve inverterler arasındaki güç aktarımını yönetir; bu da sistemin kararlılığını korur ve yük değişikliklerine hızlı tepki verilmesini sağlar [64,65]. İç döngüde akım ve voltaj kontrolü genellikle PI (Proportional-Integral) denetleyicilerle gerçekleştirilir ve bu denetleyiciler sistemde hızlı hata düzeltme sağlayarak sapmaları en aza indirir. Bu hızlı yanıt kabiliyeti sistemin dengede kalmasını ve yerel kararlılığın sürdürülmesini destekler. İç döngü kontrolünün temel denklemleri d-q referans çerçevesinde şu şekildedir:

$$V_d = E_d + Ri_d + L\frac{di_d}{dt} - \omega\, Li_q \qquad [3.8]$$

$$V_q = E_q + Ri_q + L\frac{di_q}{dt} - \omega\, Li_d \qquad [3.9]$$

Bu denklemler, d-q çerçevesinde V_d ve V_q voltaj bileşenlerini, E_d ve E_q d ve q eksenlerindeki karşılık gelen kaynak voltajlarını, i_d ve i_q d ve q eksenlerinde akım bileşenlerini tanımlar. L , şebeke endüktansı ve R , şebeke direncini ifade eder. ω ise d-q eksenlerinde dönüş açısal hızı tanımlar (genellikle senkron hızdır) [65].

Sonuç olarak iç döngü kontrolü, DA mikro şebekelerde hızlı dinamik değişimlere yanıt vererek sistemin stabil kalmasını sağlar ve gerilim-akım sapmalarını hızla düzeltir. Fotovoltaik kaynaklardan şebekeye maksimum güç transferini gerçekleştirir ve inverterler arasındaki yük paylaşımını optimize eder. Böylece özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından gelen dalgalanmalara karşı daha dayanıklı bir yapı sunar. Bununla birlikte iç döngü kontrol algoritmalarının doğru parametrelerle ayarlanması önemlidir; aksi takdirde kararlılık olumsuz etkilenebilir ve zayıf şebeke koşullarında gerilim dalgalanmaları yaşanabilir. İç döngü kontrolü enerji kaynaklarının verimli yönetimini sağlarken mikro şebekelerde yüksek performanslı bir enerji yönetimi sunar.

3.1.2. Droop Control

Droop kontrolü, dağıtık enerji kaynaklarının merkezi bir kontrol olmadan yerel ölçümlerle güç paylaşımını sağladığı etkili bir yöntemdir. Her enerji kaynağı voltaj ve akım değerlerini ayarlayarak yük paylaşımını optimize eder ve sistemde sanal bir direnç oluşturarak çıkış voltajı ile akım arasında doğrusal bir ilişki kurar. İletişim ağına ihtiyaç duymadan güvenli ve esnek güç paylaşımı yapabilen bu yöntem, mikro şebekelerdeki kaynakları dengelerken sistemin kararlılığını ve verimliliğini artırır. Droop kontrolünün temel denklemi şu şekildedir:

$$V_O = V_{ref} - m \, . \, I_O \qquad [3.10]$$

Burada: V_O Kaynağın çıkış voltajını, V_{ref} nominal voltajı, m droop kazancını ve I_O kaynağın çıkış akımını temsil eder.

Droop katsayısı, sistemdeki voltaj ve güç sapmalarını kontrol etmek için kritik bir parametredir. Bu katsayı güç kaynaklarının yük paylaşımındaki davranışlarını doğrudan etkiler. Güç kaynağı bir yükü beslerken daha fazla güç sağlamaya başladığında droop katsayısı bu kaynağın voltajını orantılı olarak düşürür. Bu düşüş diğer güç kaynaklarının da yük paylaşımına katkıda bulunmasını teşvik eder. Örnek olarak aynı yüke bağlı iki paralel güç kaynağı düşündüğümüzde ilk kaynağın yükü arttığında voltajı düşecek ve ikinci kaynağın voltajı göreceli olarak daha yüksek kalacaktır. Bu, ise ilk kaynağın voltajını düşürerek ikinci kaynağın da devreye girmesini ve yükü paylaşmasını sağlar. Böylece her bir kaynağın kapasitesine göre

adil bir paylaşım yapılır. Droop katsayısı m_p, sistemdeki güç ve voltaj arasındaki ilişki denklem (3.11) ile hesaplanır:

$$m_p = \frac{\Delta V}{P_{max}} \quad [3.11]$$

Burada ΔV voltaj sapması, P_{max} ise maksimum güç değeridir [18].

Droop kontrolü voltaj ve akım arasındaki basit ilişkiyi kullanarak sistemdeki farklı kaynaklar arasında yük paylaşımını sağlar. Merkezi bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç duymadan, dağıtık enerji kaynaklarının yerel ölçümlerine dayalı olarak bağımsız çalışmasına olanak tanır. İletişim hatlarına bağımlı olmadan çalışması sistemin güvenilirliğini artırırken, maliyetleri düşürür. Bununla birlikte, büyük yük değişimlerinde voltaj sapmaları ve akım paylaşımında doğruluk sorunları ortaya çıkabilir, bu da daha gelişmiş kontrol stratejilerine duyulan ihtiyacı ortaya koyar.

Sonuç olarak droop kontrolü, mikro şebekelerde genel güç paylaşımını sağlarken, iç döngü kontrolü her dönüştürücünün yerel stabilitesini korur. Bu iki strateji bir arada kullanıldığında, sistemin hem genel hem de yerel kararlılığı artar ve enerji yönetimi sağlanır.

3.1.3. Traditioanal Droop (Geleneksel Droop Kontrolü)

Geleneksel droop kontrolü dağıtık enerji kaynakları arasında merkezi bir kontrol olmaksızın güç paylaşımını sağlayan bir yöntemdir. Her enerji kaynağı yerel ölçümlerle çıkış voltajını ayarlayarak yük paylaşımını optimize eder. DA mikro şebekelerde sanal direnç mantığına dayanan bu strateji, voltaj ve akım arasında doğrusal bir ilişki kurarak bağımsız güç paylaşımını mümkün kılar [66]. Droop kontrolü ile çıkış voltajı ve akım arasındaki ilişki aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$V_{pcc} = V_{ref} - R_{dk} \, . I_O - r_k . I_O \quad [3.12]$$

$$I_O = \frac{V_{ref} - V_{pcc}}{R_{dk} + r_k} \quad [3.13]$$

Burada V_{pcc} sistemde ortak bağlantı noktası olan PCC'deki (Point of Common Coupling) DA voltajını gösterirken V_{ref} , dönüştürücünün referans voltajıdır. R_{dk}

droop katsayısı (veya sanal direnç) olarak tanımlanırken, r_k hat direnci, I_O ise dönüştürücünün çıkış akımıdır. Bu formül droop kontrolü ile voltaj ve akım arasındaki ilişkiyi tanımlar; her kaynağın çıkış voltajı, çıkış akımına orantılı olarak düşer. Droop katsayısı R_d , her dönüştürücünün ne kadar akım paylaşacağını belirler. Daha yüksek bir R_d değeri, daha büyük bir voltaj düşüşüne ve daha hassas bir akım paylaşımına yol açar. Bu ilişkiyi daha derinlemesine anlamak için örnek olarak tanımladığımız k ve j dönüştürücüleri arasındaki akım paylaşımını gösteren şu denkleme başvurabiliriz:

$$\frac{I_o^k}{I_o^j} = \frac{R_d^j + r_j}{R_d^k + r_k} \qquad [3.14]$$

Bu denklemde: I_o^k ve I_o^j , sırasıyla k ve j dönüştürücülerinin çıkış akımlarıdır. R_d^k ve R_d^j her iki dönüştürücünün droop katsayılarıdır, r_k ve r_j ise hat dirençleridir.

Bu denklem droop katsayısının (sanal direnç R_d) akım paylaşımında nasıl bir rol oynadığını gösterir. Yüksek bir droop katsayısı akım paylaşımını daha hassas hale getirirken voltaj düşüşünü de artırır. Bu nedenle droop kontrolü akım paylaşım doğruluğu ile voltaj sapması arasında bir denge kurmayı gerektirir.

Geleneksel droop kontrolü merkezi bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç duymadan yerel ölçümlerle güç paylaşımı yaparak maliyetleri düşürür ve sistem esnekliğini artırır. İletişim hatlarına ihtiyaç duymadan çalışması ise güvenilirliği yükseltir. Ancak, büyük yük değişikliklerinde voltaj sapmaları ve akım paylaşımında doğruluk kaybı yaşanabilir. Bu sınırlamaları aşmak için doğrusal olmayan droop kontrol, adaptif droop kontrol ve ölü bantlı droop kontrol gibi gelişmiş stratejiler geliştirilmiştir. Bu stratejiler mikro şebekelerde daha hassas ve kararlı güç paylaşımı sağlar.

3.1.4. Advanced Droop (Gelişmiş Droop Kontrolü)

Gelişmiş droop kontrolü, geleneksel droop kontrolünün voltaj sapmaları ve akım paylaşımındaki doğruluk yetersizliği gibi sınırlamalarını aşmak için geliştirilmiştir. Bu stratejiler sistemin dinamik koşullarına uyum sağlayarak voltaj sapmalarını minimize eder ve akım paylaşımındaki hassasiyeti artırır. Gelişmiş droop kontrolü

dağıtık enerji kaynakları arasında daha dengeli bir güç paylaşımı sunarak sistem performansını ve stabilitesini iyileştirir [67-69].

Üç ana yaklaşım öne çıkar: Non-Linear Droop (Doğrusal Olmayan), Adaptive Droop (Adaptif) ve Dead-Band Droop (Ölü Bantlı). Bu yöntemler özellikle doğrusal olmayan dinamiklerde, adaptif koşullarda ve küçük voltaj sapmalarına karşı üstün performans sağlar. İlerleyen kısımlarda her bir stratejinin sağladığı çözümler detaylandırılacaktır.

3.1.5. Non-Linear Droop (Doğrusal Olmayan Droop Kontrolü)

Doğrusal olmayan (nonlinear) droop kontrolü, geleneksel droop kontrolünün voltaj sapmaları ve akım paylaşımındaki doğruluk eksikliklerini gidermek amacıyla geliştirilmiştir [70]. Geleneksel droop kontrolü enerji kaynakları arasında sabit bir droop direnciyle voltaj-akım ilişkisini sağlar; ancak sonunda bu yaklaşım özellikle büyük yük değişikliklerinde voltaj sapmalarına ve düşük doğruluğa yol açabilir. Doğrusal olmayan droop kontrolü, voltaj ve akım ilişkisini dinamik olarak ayarlayan bir droop fonksiyonu kullanır. Bu fonksiyon yük koşullarına göre droop direncini değiştirerek ağır yüklerde daha yüksek, hafif yüklerde daha düşük bir droop direnci uygulayarak daha hassas yük paylaşımı ve voltaj regülasyonu sağlar. Bu şekilde sistemin kararlılığı ve performansı iyileştirilir. Doğrusal olmayan droop kontrolünün temel denklemi aşağıdaki gibidir:

$$V = f(i) = V_o - d(i)\, dt \qquad [3.15]$$

Burada V çıkış voltajını, i çıkış akımını, V_o yük olmadığında ayarlanmış voltajını (no-load voltage), $d(i)$ ise akıma bağlı droop fonksiyonunu temsil eder [71]. Bu denklemdeki droop fonksiyonu $d(i)$, sistemin yük koşullarına göre dinamik olarak değişir. Ağır yüklerde daha yüksek bir droop direnci oluşturarak hassas yük paylaşımı sağlarken, hafif yüklerde daha düşük bir direnç ile voltaj sapmalarını minimumda tutar. Böylece, sistemin düşük ve yüksek yük koşullarında performansı etkili bir biçimde artırılır. Denklemde yer alan diğer kritik özellikler ise şöyledir;

$d(0) = 0$: Yük olmadığında droop fonksiyonu sıfırdır. Bu, yük olmadığı durumda çıkış voltajının V_o ile aynı olduğunu ifade eder.

$d(I_{max}) = \Delta V$: Maksimum yük durumunda droop fonksiyonu voltaj düşüşünü ΔV kadar gösterir. Yani ağır yüklerde voltajda belirgin bir düşüş gerçekleşir, bu da yük paylaşımını hassas bir şekilde düzenler. Ayrıca droop fonksiyonunun türevi şu şekilde ifade edilir:

$$R_d(i) = d'(i) > 0 \qquad [3.16]$$

Bu denklem droop direncinin pozitif olması gerektiğini belirtir; çünkü pozitif droop direnci yük arttıkça voltajın düşmesini sağlayarak güç paylaşımını dengeler [70]. Droop kontrolü akım artarken voltajın kontrollü bir şekilde düşmesine olanak tanır. Negatif droop direnci kullanılması durumunda ise akım arttıkça voltaj yükselir; bu da dengesizlik ve voltaj sapmalarına yol açar. Bu nedenle sistemin stabil kalması ve enerji kaynaklarının uyumlu çalışması için pozitif droop direnci gereklidir.

Doğrusal olmayan droop kontrolü özellikle ağır yüklerde daha hassas ve dengeli bir yük paylaşımı sağlayarak geleneksel droop kontrolüne göre önemli avantajlar sunar. Geleneksel yöntemde sabit bir droop direnci kullanıldığından yük paylaşımı dengesiz olabilir ve bu durum sistem kararlılığını olumsuz etkileyebilir. Doğrusal olmayan droop kontrolü ise ağır yüklerde droop direncini dinamik olarak artırarak bu sorunu çözer ve daha dengeli güç paylaşımı sağlar. Hafif yük koşullarında voltaj sapmalarını minimumda tutarak sistem kararlılığını ve verimliliğini artırır.

Bu yöntem yük değişimlerine hızlı yanıt verebilir ve droop fonksiyonunu yük koşullarına göre dinamik olarak ayarlayarak sistemin değişen yük profillerine etkili bir şekilde uyum sağlamasına olanak tanır. Bu özellik geleneksel kontrolün eksik kaldığı ağır yük koşullarında voltaj sapmalarını kontrol altına alarak daha dengeli bir yük paylaşımı sağlar. Enerji kaynaklarının dengeli çalışması sistemin genel verimliliğini artırır ve uzun vadede bileşenlerin ömrünü uzatır. Sonuç olarak bu yapı, esnek yapısı ve sistem performansını optimize etme kapasitesi ile modern DA mikro şebekelerde tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir.

Doğrusal olmayan droop kontrolünün bazı dezavantajları vardır. İlk olarak geleneksel droop kontrolüne kıyasla daha karmaşık bir yapıya sahip olup bu karmaşıklık daha fazla hesaplama gücü gerektirir ve hassas kalibrasyon zorunluluğu doğurur. Bu durum uygulama aşamasını daha zor ve maliyetli hale getirebilir. Ayrıca hızlı değişen yük koşullarında yeterince hızlı tepki verememesi özellikle dinamik değişimlerin yoğun olduğu sistemlerde performansı olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle hızlı yanıt gerektiren uygulamalarda sınırlamalarla karşılaşabilir.

Sonuç olarak doğrusal olmayan droop kontrolü, geleneksel yöntemin dengesiz yük paylaşımı ve voltaj sapmaları gibi sınırlamalarını aşarak daha esnek ve dinamik bir yapı sunar. Bu yöntem droop direncini dinamik olarak ayarlayarak hem ağır hem de hafif yüklerde dengeli güç paylaşımı ve optimize edilmiş voltaj düzenlemesi sağlar. Sonunda daha karmaşık bir yapıya sahip olması nedeniyle yüksek hesaplama gücü ve hassas kalibrasyon gerektirmesi uygulama maliyetlerini artırabilir. Yine de yük paylaşımı doğruluğu ve sistem stabilitesindeki iyileşmeler özellikle DA mikro şebekeler için büyük ölçüde avantajlar sunar.

3.1.6 Adaptive Droop

Adaptif droop kontrolü geleneksel droop kontrolüne kıyasla daha dinamik ve verimli bir güç paylaşımı sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Geleneksel droop kontrolünde sabit bir droop katsayısı kullanılırken, adaptif droop kontrolü her enerji kaynağının mevcut kapasitesine göre ayarlama yapar [72,73]. Bu ise sistemin değişken yük koşullarında daha verimli çalışmasını sağlar. Özellikle enerji kaynaklarından birinde arıza veya kesinti meydana geldiğinde adaptif droop kontrolü sağlıklı kaynakların yükü doğru şekilde paylaşmasına olanak tanır. Sabit droop katsayısına sahip sistemlerde yük paylaşımı her kaynağın nominal kapasitesine göre yapılırken, adaptif kontrol kaynakların o anki kullanım durumu ve yedek kapasitesine göre ayarlama yapar.

Ayrıca adaptif droop kontrolü voltaj regülasyonu ve akım paylaşımı gibi kritik faktörlerde de iyileştirmeler sunar. Sabit droop katsayısı kullanan sistemlerde voltaj sapmaları daha sık yaşanabilirken, adaptif kontrol bu sapmaları minimuma indirerek daha kararlı bir voltaj sağlar. Enerji kaynaklarının aşırı yüklenmesini

önleyerek bileşenlerin ömrünü uzatır ve enerji sisteminin genel verimliliğini artırır. Adaptif droop kontrolünde her bir enerji kaynağının çalışma koşullarına göre droop katsayısının dinamik olarak ayarlandığı formüller kullanılır. Bu sayede sistemdeki gerçek zamanlı değişikliklere uyum sağlanırken yük paylaşımı ve voltaj regülasyonu ayarlamaları yapılır. Adaptif droop kontrolünün temel denklemi şu şekildedir:

$$V_O = V_{ref} - m(t)\,.\,I_O \qquad [3.17]$$

Burada diğer droop kontrol denklemlerine benzer şekilde V_O çıkış voltajını, I_O çıkış akımını, V_{ref} referans voltajını temsil ederken $m(t)$ zamanla değişen ve sistemin koşullarına göre ayarlanan adaptif droop katsayısıdır. Bu katsayı şebeke durumu, yük durumu veya enerji kaynağının mevcut kapasitesine göre dinamik olarak güncellenir [55,74].

Bu denkleme göre, geleneksel droop kontrolünün sabit doğasına kıyasla adaptif droop kontrolüne daha esnek ve verimli bir performans kazandırır. Sonuç olarak, adaptif droop kontrolü, değişken yük koşullarında daha güvenilir ve dengeli bir güç paylaşımı sağlayarak geleneksel yöntemin sınırlamalarını aşar. Adaptif droop kontrolü, geleneksel ve doğrusal olmayan yöntemlere kıyasla sistemin yük değişikliklerine daha hızlı ve esnek bir şekilde yanıt verir. Bu yöntem her enerji kaynağının mevcut kapasitesine göre dinamik yük paylaşımını optimize ederek aşırı yüklenme riskini azaltır ve daha dengeli bir güç dağılımı sağlar. Sabit droop kontrolüne kıyasla voltaj sapmaları daha hassas bir şekilde düzenlenir ve sistem kararlılığı önemli ölçüde artar [74]. Ayrıca adaptif droop kontrolü hat empedanslarını dikkate alarak mikro şebekelerde voltaj düşüşlerini ve hat kayıplarını minimize ederken enerji kaynakları arasında dengeli güç paylaşımı sağlar. Droop katsayısının dinamik ayarlanması, hızla değişen koşullarda adaptif yöntemi geleneksel kontrollere göre daha etkili hale getirir.

Adaptif droop kontrolü avantajlarına rağmen kontrol karmaşıklığı, iletişim gecikmeleri ve yüksek hesaplama maliyeti gibi bazı dezavantajlar da içerir. Sabit droop kontrolüne göre daha karmaşık bir yapı gerektirir; çünkü droop katsayısının sürekli ayarlanması ve sistem parametrelerinin izlenmesi sofistike bir kontrol algoritması ve yüksek hesaplama gücü ister. Gerçek zamanlı iletişim gereksinimi

iletişim hatalarına duyarlılığı artırarak sistem performansını olumsuz etkileyebilir ve bazı uygulamalarda maliyet ve enerji verimliliği sorunlarına yol açabilir.

Sonuç olarak özellikle değişken yük koşulları altında daha esnek ve dinamik bir yapı sunar. Her enerji kaynağının kapasitesine göre droop katsayısını dinamik olarak ayarlayarak aşırı yüklenmeyi önler, voltaj regülasyonunu yapar ve sistem kararlılığını artırır. Hızlı yanıt süresi ve hassas yük paylaşımı sayesinde mikro şebekelerde yaygın olarak tercih edilir. Hat empedansları ve değişken yükleri dikkate alarak voltaj düşüşlerini ve dengesiz güç paylaşımını önler, böylece daha dengeli bir güç dağılımı sağlar.

3.1.7 Dead-band Droop

Dead-band droop kontrolü, güç veya voltaj kontrolünde belirli bir aralıkta (dead-band) droop kontrolünü devre dışı bırakarak sistemin daha stabil ve verimli çalışmasını sağlar. Bu yöntem yalnızca voltaj veya güç belirlenen eşik değerlerinin dışına çıktığında yani sistemde voltajın engage (aktif) ve disengage (pasif) bölgelerinde ne zaman droop kontrolünün devreye gireceğini ve ne zaman duracağını belirler [75]. Bu doğrultuda kontrolün aktivasyonu denklem (3.18)'deki voltaj bölgelerine göre yapılmaktadır:

$$V_{dc} > V_{Wj}\ veya\ V_{dc} < V_{Sj} \qquad [3.18]$$

Burada V_{dc} , sistemdeki gerçek zamanlı DA voltajını gösterir. V_{Wj} , voltajın üst dead-band sınırıdır. Voltaj bu değerin üzerine çıkarsa, droop kontrolü devreye girer. V_{Sj} , voltajın alt dead-band sınırıdır. Voltaj bu değerin altına düşerse, droop kontrolü devreye girer. Eşik değerlere ulaşılmadığında droop kontrolü devreye girmez.

Dead-band droop kontrolünün voltaj veya akım belirli bir eşik değerin (dead-band) altına düşene veya üzerine çıkana kadar kontrolün devrede kalmaması prensibine dayandığını ifade etmiştik. Bu sebeple küçük sapmalar sırasında kontrol devreye girmez ve sistem doğal dengesinde çalışır. Ancak voltaj veya akım dead-band sınırlarının (yani V_{Wj} ve V_{Sj}) dışına çıktığında kontrol devreye girer ve çıkış gücünü voltajı stabilize edecek şekilde ayarlar. Uygulanan bu yapı geçici olaylar veya küçük dalgalanmalar sırasında gereksiz müdahaleleri önleyerek enerji tasarrufu

sağlar. Ancak dead-band sınırlarının doğru belirlenmesi önemlidir; aksi takdirde sistem dengesizleşebilir veya yetersiz tepki verebilir.

Dead-band kontrolünün avantajları arasında gereksiz düzeltmelerin önlenmesi, geçici olaylara karşı dayanıklılık ve sistem kararlılığının artırılması yer alır [75].

Voltaj sapmaları tolerans içinde kaldığı sürece müdahaleden kaçınarak sistem stabilitesini destekler ve aşırı düzeltmeleri önler. Geçici olaylar sonrasında sistemin hızlıca yeni bir denge noktasına ulaşmasını sağlar ve enerji kaynaklarının verimli kullanılmasına katkıda bulunur. Dead-band kontrolünün dezavantajlarından da bahsetmek gerekir. Dead-band aralığının doğru belirlenmesi ve komplekslik olarak özetlenebilir. Yanlış ayarlanmış bir dead-band aralığı sistemde dengesizliklere veya güç kaybına yol açabilir. Ayrıca sabit droop kontrolüne göre daha karmaşık bir yapı gerektirdiğinden hassas ayarlar ve dikkatli bir mühendislik yaklaşımı zorunludur.

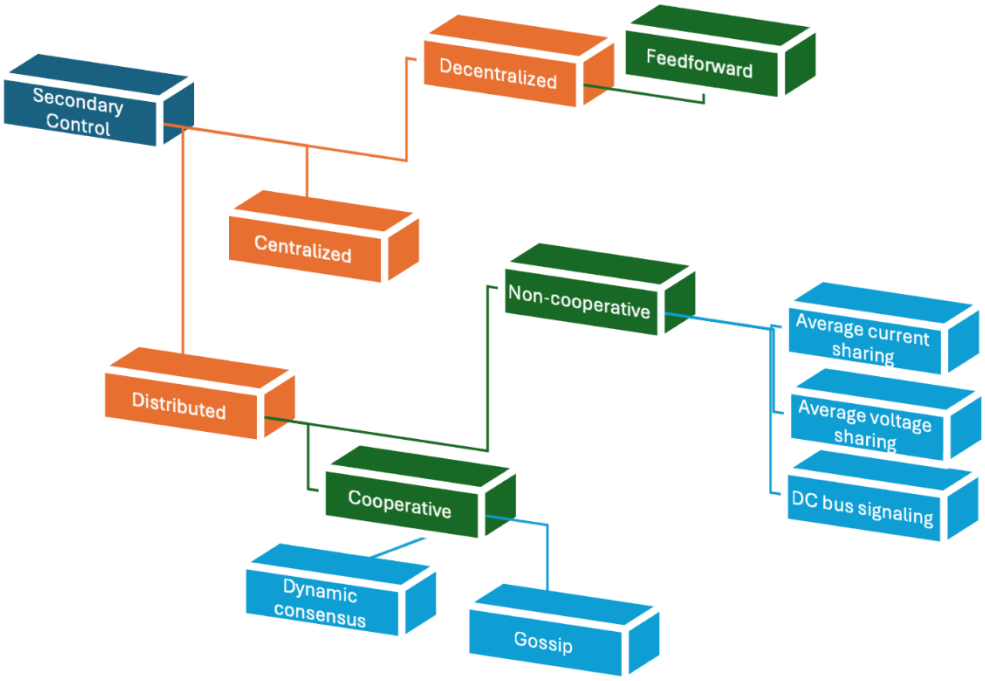
DA mikro şebekeler enerji verimliliği, güvenilirlik ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonundaki kolaylıkları sayesinde artan bir ilgi görmektedir. Bu sistemlerde güç paylaşımı ve sistem kararlılığını sağlayan kontrol stratejileri kritik rol oynamaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen birincil kontrol stratejilerini toparlarsak mikro şebekelerde voltaj ve akım düzenlemesi gibi temel işlevleri yerine getirerek stabilite sağlar.

İç döngü kontrolü denetleyiciler aracılığıyla voltaj ve akım kararlılığını güvence altına alarak dönüştürücülerin hassas çalışmasını sağlarken, droop kontrolü merkeziyetsiz bir yapıda güç paylaşımını idealize eder. Geleneksel droop kontrolü, doğrusal voltaj-akım ilişkisi üzerinden basit bir uygulama sağlasa da voltaj sapmaları ve güç paylaşımında doğruluk sorunları gibi sınırlamalarla karşılaşabilir. Bu sınırlamaları aşmak için adaptif ve dead-band droop kontrol gibi gelişmiş yöntemler geliştirilmiştir. Adaptif droop kontrolü sistemin değişen koşullarına dinamik olarak yanıt vererek daha dengeli güç paylaşımı sunar; dead-band droop kontrolü ise küçük voltaj dalgalanmalarında gereksiz müdahalelerden kaçınarak kararlı bir performans sağlar.

Sonuç olarak çalışmanın bu kısmında DA mikro şebekelerde birincil kontrol stratejilerinin, özellikle iç döngü ve droop kontrol yöntemlerinin sistem kararlılığı ve verimliliği üzerindeki önemi vurgulanmıştır. Gelecekteki araştırmalar bu stratejilerin daha da geliştirilmesiyle sistem performansını optimize etmek ve enerji yönetimini daha sürdürülebilir hale getirmek adına geniş bir potansiyel sunmaktadır. İkincil kontrol gibi gelişmiş yöntemler özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli entegrasyonu ve mikro şebekelerde güç paylaşımının iyileştirilmesi açısından önemli bir katkı sağlayacaktır.

3.2 Secondary Control (İkincil Kontrol)

Birincil kontrolün sınırlarını aşan ikincil kontrol, voltaj sapmalarını düzeltmek ve enerji kaynaklarının hassas bir şekilde paylaşımını sağlamak için tasarlanmıştır. İkincil kontrol yöntemlerinin enerji kayıplarını azaltırken mikro şebekelere yeni yüklerin entegrasyonunu kolaylaştırdığı belirtilmektedir. Ayrıca akıllı kontrol sistemlerinin ikincil kontrol seviyesinde kullanımı sistem performansını optimize etme yolunda güvenilirliği de artırmaktadır [76]. Nasirian ve arkadaşlarının çalışması bizlere ikincil kontrolün voltaj sapmalarını düzelttiğini ve enerji kaynaklarının daha hassas bir şekilde paylaşım sağladığını göstermektedir [55]. Bu seviyede iletişim ağı üzerinden veri paylaşımı ile sistem genelinde koordinasyon sağlanır. İkincil kontrol güç dağıtımı ve ada modu tespiti gibi işlemler için kullanılır ve bir milisaniyeden dakikaya kadar süren bir zaman ölçeğinde çalışır [31].



Şekil 3.6. İkincil (Secondary) kontrolün hiyerarşi tablosu.

İkincil kontrol, mikro şebekenin güç kalitesini iyileştirip sistem performansını artırmak için uygulanır ve hem merkezi hem de dağıtık kontrol yapılarında kullanılır. Şebeke bağlantılı modda dağıtık üreticiler ve eviriciler şebekenin gerilim ve frekans bileşenlerini referans elektrik sinyalleri olarak alır. Ancak ada modunda ana şebekeden gelen referans sinyallerinin kaybolması durumunda dağıtık üreticiler senkronize olmak için tekli veya çoklu işletme yöntemleriyle çalıştırılır. Esasında ikincil kontrol dağıtık üreticilerin veya eviricilerin paralel çalışma performansını iyileştirmek için gerekli olan çeşitli kontrol mekanizmalarını kapsar. Mikro şebekelerde arayüz olarak görev yapan güç dönüştürücüleri master/slave, akım/güç paylaşımı, frekans/gerilim eğim kontrolü gibi yöntemlerle koordine edilir ve eşzamanlı olarak işletilir [77].

DA mikro şebekelerde ikincil (secondary) control, sistemin voltaj regülasyonu ve güç paylaşımını birincil kontrol sistemlerine göre daha iyileştirmek için kritik bir kontrol katmanıdır. Hamad ve arkadaşları tarafından önerilen secondary control yaklaşımı her bir dağıtık jeneratör (DG) için bir kontrol mekanizması

kullanmaktadır. Bu kontrol mekanizmasıyla hem voltaj regülasyon hatasını hem de güç paylaşım hatasını minimize etmeyi hedeflemişlerdir [78].

Secondary kontrolün genel yapısı şu şekilde ifade edilebilir: Her bir DG için kontrol sinyali $u_{sc,i}$, orantısal kazanç ($\boldsymbol{K}_{P,i}$) ve integral kazanç ($\boldsymbol{K}_{I,i}$) terimlerinin bir kombinasyonu olarak tanımlanır. Bu sinyal şu şekilde formüle edilir:

$$u_{sc,i} = \boldsymbol{K}_{P,i}\left(\beta_i u_{V_i} + u_{P_i}\right) + \boldsymbol{K}_{I,i}\int\left(\beta_i u_{V_i} + u_{P_i}\right)\, dt. \qquad [3.19]$$

Bu denklemin bileşenleri $u_{sc,i}$; ikincil kontrol katmanı tarafından üretilen kontrol sinyalidir ve sistemin voltaj regülasyonu ile güç paylaşımını iyileştirmek için kullanılır. $\boldsymbol{K}_{P,i}$; orantısal kazançtır ve sistemin dinamik değişimlere hızlı bir şekilde tepki vermesini sağlar. $\boldsymbol{K}_{I,i}$; integral kazançtır ve sistemde zamanla biriken uzun vadeli hataların ortadan kaldırılmasına yardımcı olur. u_{V_i}; voltaj regülasyon hatasıdır ve bir DG'nin voltajının nominal referans voltajından olan sapmasını ifade eder. u_{P_i}; güç paylaşım hatasıdır ve dağıtık jeneratörlerin yük paylaşımı performansındaki sapmaları temsil eder. β_i; voltaj regülasyonu için kullanılan bir ağırlık faktörüdür ve her bir DG'nin voltaj düzenlemesine katkısını belirler.

İkincil kontrol ile üretilen bu sinyal, birinci kademe kontrol tarafından belirlenen referans voltajına ($v^*_{pri,i}$) eklenerek yeni bir referans voltajı ($v^*_{sc,i}$) oluşturulur. Bu işlem ise Denklem (3.20)'deki şekilde ifade edilir:

$$v^*_{sc,i} = v^*_{pri,i} + u_{sc,i} \qquad [3.20]$$

Bu yapı sistemdeki her bir DG'nin voltajını düzenlerken aynı zamanda yük paylaşımını optimize etmeyi mümkün kılar.

Geleneksel droop kontrol yönteminin akım paylaşım doğruluğu ve DA bara gerilimi restorasyonundaki sınırlamalarını aşmak amacıyla uyarlanabilir (adaptive) droop kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde her dönüştürücünün (kontrolcü) çıkış gerilimleri ve akımları sonraki kısımlarda bir şekille temsil edeceğimiz düşük bant genişliğine sahip bir haberleşme ağı aracılığıyla diğer dönüştürücülerle paylaşılır. DA yük akımının orantılı paylaşımını sağlamak amacıyla Denklem (3.21)'de verilen ayar yapılmalıdır.

$$\frac{i_{O1}}{i_{O2}} = \frac{k_1}{k_2} \quad [3.21]$$

Burada k_1 ve k_2 sırasıyla birinci ve ikinci dönüştürücünün akım paylaşım oranlarını ifade eder. Bu ayar sayesinde dönüştürücülerin çıkış akımı iyileştirilmiş bir akım paylaşım oranına göre doğrudan ayarlanır ve bu oran optimizasyon algoritmalarının uygulanması ile belirlenir.

Birincil kontrol seviyesindeki her yerel kontrol sistemi, gerilim ve akım için kontrolörler kullanır. Tüm parametre ayarları hesaplamalar ve kontrol süreçleri yerel olarak gerçekleştirilir. Bu özellik adaptif droop kontrol yöntemini merkezi olmayan bir kontrol yaklaşımı yapar ve DA mikro şebekenin dağıtık kontrolü için uygun bir çözüm sunar. Hiyerarşik yapıdaki birincil kontrol seviyesinde yerel gerilim döngüsü Denklem (3.22) ile tanımlanır.

$$G_{vc} = \frac{G_v G_c}{1+G_v G_c} \quad [3.22]$$

Denklem (3.22)'de G_{vc} gerilim döngüsünü, G_v ise yerel gerilim kontrolörün transfer fonksiyonunu temsil ederken G_c yerel akım kontrolörün transfer fonksiyonunu ifade etmektedir.

Birincil kontrol döngüsü sistemde güç paylaşımını ve stabil çalışmayı sağlamaktadır. Yalnızca geleneksel droop kontrolörünün çalıştırılması durumunda yük akımına bağlı olarak gerilimde sapmalar meydana gelmektedir. Bu problemi gidermek amacıyla ortalama gerilim ve akım kontrolü uygulanmaktadır. İkincil kontrol seviyesinde bulunan ortalama gerilim kontrolörleri, referans değeri olan V_{ref}'i kullanarak DA geriliminin ortalamasını düzenler; böylece her çıkış gerilimi referans seviyesine geri çekilir. Benzer şekilde her bir ortalama akım kontrolörü referans değeri olarak Denklem (3.21)'deki i_{Oi}/k_i oranını kullanarak geri besleme değişkeni olarak i_{O1}/k_1 ve i_{O2}/k_2'nin ortalamalarını alır ve orantılı bir çıkış akım paylaşımı sağlanır. Akım paylaşım oranları k_i'nin eşit olduğu durumda her dönüştürücünün akım paylaşım oranı da eşitlenir. Bu kontrol yöntemi DA mikro şebeke gerilimini ölçüp hedef gerilim değeri V_{ref} ile karşılaştırarak çalışır. Gerilim farkı sonucunda oluşan hata sinyali her dönüştürücü referansı için (3.23) ve (3.24) denklemlerinde verilen δ_v ve δ_i restorasyon parametreleri ile düzeltilir.

$$\delta_{v_i} = \left(V_{ref} - \frac{v_1+\cdots+v_2}{n}\right) . \left(k_{p_3} + \frac{k_{i_3}}{s}\right) \quad [3.23]$$

$$\delta_{i_i} = \left(\frac{i_{o_i}}{k_i} - \frac{\frac{i_{o_1}}{k_i}+\cdots+\frac{i_{on}}{kn}}{n}\right) . \left(k_{p_4} + \frac{k_{i_4}}{s}\right) \quad [3.24]$$

Denklemlerde, δ_{v_i} ortalama gerilim PI restorasyon parametresini, δ_{i_i} ortalama akım restorasyon parametresini ifade ederken, n mikro şebeke sistemindeki DEK sayısını belirtmektedir. Burada i ve i, dağıtık üretim birimlerini simgeler. Bu durumda her bir dönüştürücünün çıkış gerilimi V_{Oi}, Denklem (3.25) ile gösterilmektedir [35].

$$V_{Oi} = \left[V_{ref} + \delta_{v_i} - \delta_{i_i} - \frac{R_{di}}{k_i} . G_{lpf} i_{oi}\right] . G_{vc} \quad [3.25]$$

Bu denklem mikro şebeke sistemindeki dönüştürücülerin çıkış gerilimini ifade etmektedir ve her bir parametre, bu kontrol mekanizmasının bir parçası olarak önemli bir rol oynamaktadır. Denklemdeki V_{Oi}, "i" numaralı dönüştürücünün çıkış gerilimini ifade eder. Bu değer dönüştürücünün sağladığı kararlı DA gerilimdir ve sistemin güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamak için hedeflenen referans gerilim ile ilişkilendirilir. V_{ref}, sistemin nominal olarak hedeflediği referans gerilimdir ve tüm dönüştürücüler bu değere ulaşmaya çalışır.

Denklemdeki δ_{v_i}, gerilim sapmalarını düzelten ortalama gerilim restorasyon parametresidir. Bu parametre çıkış geriliminin referans değere yakın olmasını sağlar. Benzer şekilde δ_{i_i}, akım sapmalarını düzenlemek için kullanılan ortalama akım restorasyon parametresidir. Her iki parametre de sistemin hassas ve kararlı çalışmasını destekler. Denklemde yer alan R_{di}, droop kontrol stratejisinde kullanılan bir parametredir ve yük paylaşımını düzenler. Bahsi geçen parametre sistemdeki yüklerin eşit bir şekilde dağıtılmasını sağlamak için dönüştürücülerin akım-gerilim davranışını etkiler. Bunun yanında k_i, dönüştürücünün akım ölçekleme faktörüdür ve akım kontrolünde referans değerlere göre ölçeklendirme yapılmasını sağlar.

Sistemin kararlı bir şekilde çalışmasını sağlamak için düşük geçiren bir filtre (G_{lpf}) kullanılır. Bu filtre akım geri besleme sinyalindeki yüksek frekanslı gürültüleri filtreler ve sinyalin stabil olmasını sağlar. Ayrıca i_{oi}, i numaralı dönüştürücünün çıkış akımını ifade eder ve droop kontrol mekanizmasının bir parçası olarak

hesaplamalara dahil edilir. Denklemdeki G_{vc}, gerilim kontrol transfer fonksiyonudur. Bu transfer fonksiyonu sistemdeki gerilim kontrol döngüsünün davranışını tanımlar ve sistemin kararlı bir çıkış gerilimi sağlamasına yardımcı olur. Bu denklem gerilim ve akım sapmalarını düzenleyerek mikro şebeke sisteminde güvenilir bir enerji dağıtımı sağlamayı amaçlar. İkincil kontrol, restorasyon mekanizmaları ve transfer fonksiyonları, sistemin hem anlık hem de uzun vadeli kararlılığını destekler.

Mikro şebekelerde ikincil kontrol, akım ve gerilimi stabilize eden birincil kontrol ile ekonomik optimizasyon ve operasyonel dengeye odaklanan üçüncül kontrol arasında bir köprü görevi görür. İkincil kontrol akım ve gerilimin nominal değerlere geri döndürülmesini, güç paylaşımının yönetilmesini ve sistem dayanıklılığının artırılmasını hedefler.

Tablo (3.1)'da gösterilen sınıflandırmalar merkezi (Centralized), dağıtılmış (Distributed) ve merkezi olmayan (Decentralized) ikincil kontrol yaklaşımlarını ve her bir yaklaşımın başlıca avantaj ve dezavantajlarını daha iyi anlayabilmemiz için özetler.

Yaklaşım	**Avantajlar**	**Dezavantajlar**	**Uygulama Alanları**
Merkezi	Yüksek doğruluk, küresel optimizasyon	Tek arıza noktası, ölçeklenebilirlik sorunları	Küçük ölçekli mikro şebekeler
Merkezi Olmayan	Güvenilirlik, iletişime bağımlılık yok	Küresel optimizasyon eksikliği	Kaynak sınırlı sistemler
Dağıtılmış	Ölçeklenebilir, dayanıklı	İletişim gecikmeleri, karmaşık algoritmalar	Dinamik büyük ölçekli şebekeler

Tablo 3.1. İkincil kontrol yaklaşımlarını ve her bir yaklaşımın başlıca avantaj ve dezavantajları [79].

3.2.1 Merkezi (Centralized) İkincil Kontrol

Merkezi (centralized) ikincil kontrol, mikro şebekelerin kontrol yapısında tarihsel olarak ilk geliştirilen ve en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olmuştur. Mikro şebeke kontrolünde merkezi yaklaşım özellikle mikro şebeke teknolojisinin erken aşamalarında daha basit ve tek bir noktadan yönetilebilecek bir sistem tasarımına olan ihtiyaçtan doğmuştur. Bu yaklaşımın geliştirilmesi mikro şebekelerde enerji üretiminin, dağıtımının ve tüketiminin etkin bir şekilde yönetilmesi amacıyla ilk olarak 1990'lı yılların sonlarında ve 2000'lerin başlarında yoğunlaşmıştır.

Merkezi kontrolün temel prensibi, bir mikro şebekede tüm kontrol işlevlerinin tek bir merkezi kontrol birimi tarafından üstlenilmesidir. Bu yaklaşım, özellikle IEEE ve Uluslararası Büyük Elektrik Sistemleri Konseyi (CIGRÉ) gibi uluslararası enerji standartlarını destekleyen araştırma grupları ve uygulamalı enerji mühendisliği projeleri tarafından popülerleştirilmiştir. Örneğin, merkezi ikincil kontrol mekanizmaları, sıklıkla mikro şebekelerin kararlılığını artırmak ve birincil kontrolün sağlayamadığı voltaj ve frekans düzeltmelerini gerçekleştirmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu sistemler özellikle Guerrero ve arkadaşları tarafından 2000'li yıllarda detaylı olarak incelenmiş ve literatüre kazandırılmıştır [53].

Merkezi kontrol başlangıçta özellikle adadaki enerji şebekeleri gibi küçük ölçekli ve az sayıdaki dağıtık enerji kaynağına sahip mikro şebekeler için tasarlanmıştır. Bu sistemlerde tek bir kontrol birimi tüm mikro şebekedeki enerji kaynaklarından gelen verileri toplar ve voltaj ile frekansı nominal değerlere döndürmek için gerekli düzeltici eylemleri gerçekleştirir.

Merkezi kontrolün en büyük avantajlarından biri sistem genelinde mükemmel koordinasyon sağlamasıdır. Tüm kontrol kararlarının merkezi bir birim tarafından alınması, aşağıda başlıklarla ayrılmış avantajları sağlamaktadır;

Kesinlik ve Doğruluk: Merkezi kontrol, frekans ve voltaj sapmalarını hızlı ve hassas bir şekilde düzeltebilir.

Kapsamlı Görünürlük: Tüm mikro şebeke verilerinin merkezi bir noktada toplanması operatörlerin sistemin genel performansını tam olarak görmesine olanak tanır.

Basit Uygulama: Küçük ölçekli mikro şebekelerde uygulama ve bakım maliyetleri düşüktür. Merkezi bir yapısı olduğundan kullanıcısına teknik olarak karmaşık olmayan bir çözüm sunar.

Küresel İzleme: Merkezi kontrol, mikro şebeke içindeki enerji kaynaklarının ve yüklerin tamamını eş zamanlı olarak izleyebilir. Bu, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunda kritik bir avantajdır [80].

Ancak merkezi kontrol yapılarının bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Özellikle günümüzün dinamik ve genişleyen mikro şebeke yapıları için bu dezavantajlar önemli sorunlara yol açabilmektedir. Bunlar aşağıda başlıklarıyla birlikte açıklanmıştır;

Tek Arıza Noktası Riski: Merkezi kontrol sisteminin çökmesi durumunda tüm mikro şebeke kontrolsüz hale gelir. Bu durum sistemin güvenilirliğini ciddi şekilde zedeleyebilir.

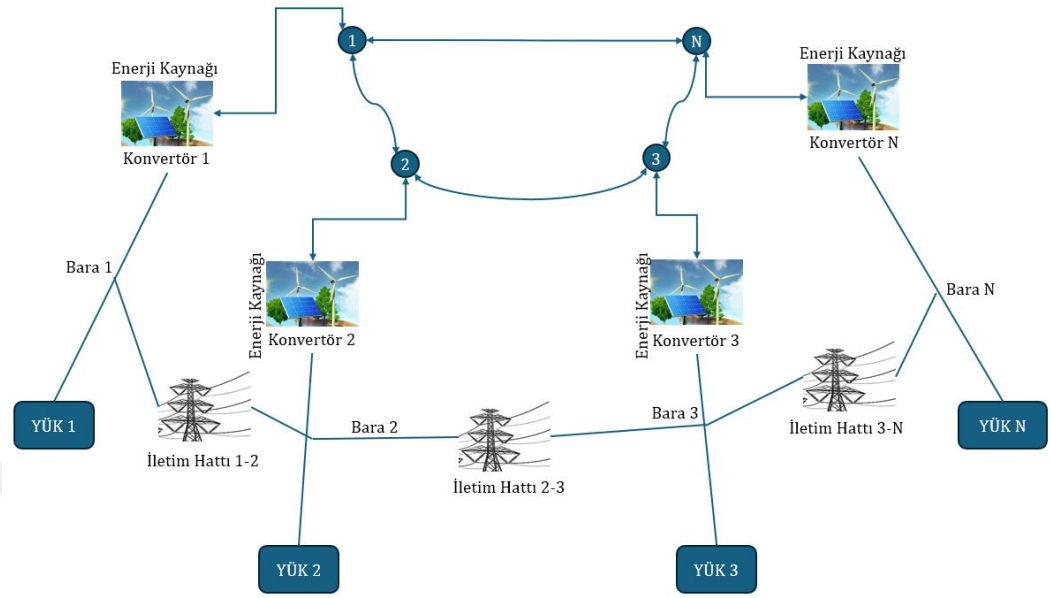
İletişim Bağımlılığı: Merkezi kontrol genellikle mikro şebekedeki tüm birimlerle sürekli iletişim kurmayı gerektirir. İletişim hatlarındaki gecikmeler veya kesintiler kontrol performansını olumsuz etkileyebilir.

Ölçeklenebilirlik Sorunları: Bu yapılar büyük ölçekli mikro şebekeler veya birçok dağıtık enerji kaynağı olan sistemler için uygun değildir. Mikro şebekenin büyümesiyle birlikte kontrol biriminin işlem yükü artar ve sistem kararlılığı tehlikeye girer.

Yüksek Altyapı Maliyeti: Merkezi kontrol için gerekli olan iletişim ve veri toplama altyapısı, özellikle büyük ve karmaşık mikro şebekelerde oldukça maliyetlidir [81].

Merkezi kontrol sistemleri 2000'li yılların başlarında mikro şebeke teknolojisinin ilk aşamalarında etkili bir çözüm sunmuş olsa da bu sistemlerin ölçeklenebilirlik ve güvenilirlik sorunları dağıtılmış (distributed) ve merkezi olmayan (decentralized) kontrol yöntemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Özellikle 2010'lu yıllarda yapılan araştırmalar merkezi kontrolün iletişim bağımlılığını ve tek arıza noktası problemini çözmek amacıyla dağıtılmış sistemlere odaklanmıştır. Örneğin; Guerrero ve arkadaşları merkezi kontrolün bu sınırlamalarını detaylı olarak

tartışmış ve dağıtılmış sistemlerin mikro şebeke kararlılığını artırmada daha etkili olduğunu göstermiştir [68,82].



Şekil 3.7. İkincil kontrol sistemlerinde kullanılan iletişim ağı.

DA mikro şebekelerde merkezi ikincil kontrol tüm dağıtık jeneratörlerin (DG) voltaj ve güç paylaşım parametrelerini bir merkezden düzenleyen bir yapıdadır demiştik. Bu yaklaşımda, tüm DG'ler arasındaki iletişim tek bir merkezi denetleyici üzerinden gerçekleştirilir. İkincil kontrol katmanındaki genel başlıkta gösterdiğimiz genel matematiksel ifade Denklem (3.19, 3.20) ile daha önce İkincil Kontrol kapsamında tanıtılmıştı. Bu ifade tüm sistemdeki voltaj regülasyonunu ve yük paylaşımını en iyi şekilde ayarlamayı hedefler. Lakin merkezi bir kontrolörün kullanımı iletişim hatalarına veya merkezdeki arızalara karşı duyarlılığı artırabilir. Bu nedenle merkezi kontrol genellikle küçük ölçekli mikro şebekelerde daha uygundur.

Sonuç olarak baktığımızda merkezi ikincil kontrol, mikro şebeke yönetiminde önemli bir başlangıç noktası olmuş ve küçük ölçekli mikro şebekelerde güvenilir bir çözüm sunmuştur. Ancak tek arıza noktası riski, iletişim bağımlılığı ve ölçeklenebilirlik sınırlamaları nedeniyle günümüzde daha çok dinamik ve esnek dağıtılmış kontrol yaklaşımlarına odaklanılmaktadır. Merkezi kontrol sistemleri günümüzde daha çok laboratuvar ortamında veya basit, az sayıda enerji kaynağına sahip mikro şebekelerde kullanılmaktadır.

Ayrıca yapılan son akademik araştırmalar merkezi olmayan kontrolün güvenilirliği ile dağıtılmış kontrolün esnekliğini birleştiren hibrit modeller üzerinde yoğunlaşılmakta olduğunu gösteriyordur [83].

3.2.2 Dağıtılmış (Distributed) Kontrol Yöntemleri

Dağıtılmış (distributed) kontrol yöntemleri mikro şebekelerdeki ikincil kontrol stratejilerinin evriminde önemli bir adım olarak öne çıkmıştır. Merkezi kontrol sistemlerinin ölçeklenebilirlik, tek arıza noktası ve yüksek iletişim bağımlılığı gibi dezavantajlarına çözüm bulmak amacıyla geliştirilmiştir. Dağıtılmış kontrol yöntemleri, her bir dağıtık enerji kaynağının (DEK) yerel kontrol birimlerine sahip olduğu ve bu birimlerin iş birliği yaparak mikro şebekeyi yönettiği bir mimari sunar. Bu yöntem, enerji üretim ve tüketiminin daha esnek ve güvenilir bir şekilde yönetilmesini sağlar.

Dağıtılmış kontrol 2010'lu yıllarda mikro şebekelerin büyüyen karmaşıklığı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının artışı ile daha fazla önem kazanmıştır. Bu kontrol yaklaşımı yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu ve hızlı yanıt verme ihtiyacını karşılamak üzere geliştirilmiştir. Özellikle Guerrero ve arkadaşlarının çalışmaları dağıtılmış kontrol mekanizmalarının teorik temellerini ortaya koymuş ve bu yöntemlerin mikro şebekelerdeki önemini vurgulamıştır [84].

Dağıtılmış kontrolün teorik altyapısı çoğunlukla "çoklu ajan sistemleri" konseptine dayanmaktadır. Bu konsept her bir enerji kaynağının bir "ajan" olarak çalıştığı ve diğer ajanlarla bilgi paylaşımı yoluyla karar alma sürecine katıldığı bir yapıyı ifade eder. Örneğin "gossip algoritmaları" gibi iş birliğine dayalı yöntemler sistemin genel düzenini sağlamak için geliştirilmiştir [80].

Dağıtılmış kontrol yöntemini diğerlerinden ayrılan bazı avantajlar nedeniyle mikro şebekelerde sıkça tercih edilmektedir. Merkezi kontrolün aksine dağıtılmış kontrol yöntemi mikro şebekenin büyüklüğünden bağımsız olarak etkili bir şekilde çalışabilir. Yeni bir enerji kaynağı veya yük eklendiğinde sistem kolayca uyarlanabilir. Dağıtılmış kontrol sistemde tek bir arıza noktasının bulunmamasını sağlar. Bir enerji kaynağı veya kontrol birimi arızalansa bile diğer birimler işlevini sürdürebilir. Bu ise sisteme dayanıklılık ve güvenilirlik sağlar.

Yerel kontrol birimlerinin hızlı karar alma yeteneği sayesinde bu mekanizma ani yük değişikliklerine veya arızalara merkezi sistemlere kıyasla daha hızlı yanıt verir. Her ne kadar dağıtılmış kontrol birimleri arasında minimum düzeyde bilgi paylaşımı gerekse de bu yöntem yoğun bir iletişim ağına ihtiyaç duymaz. Bu da iletişim maliyetlerini düşürür. Ayrıca dağıtılmış kontrol yöntemi farklı üretim türleri (rüzgâr, güneş, batarya vb.) arasında koordinasyon sağlama esnekliğine de sahiptir [84].

Bir zorluğun ve sınırlamanın üzerine geliştirilen her sistemin de aslında bazı kendine has yeni sınırlama ve zorlukları beraberinde getirdiği su götürmez bir gerçektir. Burada da dağıtılmış kontrolün getirdiği avantajlara rağmen uygulamada bazı zorlukları ve sınırlamaları bulunmaktadır. Dağıtılmış sistemlerin iş birliğine dayalı olması karmaşık algoritmaların uygulanmasını gerektirmiştir. Yanlış uygulamalar sistemin kararlılığını tehlikeye atabilir. Yerel birimler arasında gecikmeler yaşandığında karar alma sürecinde senkronizasyon sorunları ortaya çıkabilir. Bu durum frekans ve voltaj sapmalarına yol açabilir. Özellikle büyük ölçekli mikro şebekelerde dağıtılmış algoritmaların uygulanması için yüksek işlem gücü gereklidir. Dağıtılmış kontrol sistemlerinin güvenli bir şekilde çalışması için saha testleri ve doğrulama süreçleri zaman alıcıdır. Mevcut enerji sistemleriyle entegre edilmesi zor olabilir. Özellikle eski altyapılar dağıtılmış sistemlerin gerektirdiği donanım ve yazılım desteğine sahip olmayabilir [80].

Dağıtılmış kontrol yöntemi özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının yoğun olarak kullanıldığı mikro şebekelerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fosil kaynak bazlı santraller gibi alışagelmiş enerji sistemlerinden ziyade rüzgâr ve güneş enerjisinin doğasında bulunan değişkenlik, dağıtılmış kontrolün dinamik yapısıyla daha iyi yönetilebilmektedir. Ayrıca, "dinamik konsensüs" ve " DA hat sinyalleşmesi" gibi yenilikçi teknikler dağıtılmış kontrolün performansını artırmak için geliştirilmiştir. Bu yöntemler mikro şebeke birimleri arasında daha etkin bir koordinasyon sağlamayı hedefler. Örneğin Zhao ve arkadaşlarının çalışması, dinamik konsensüs algoritmalarının mikro şebeke sistem kararlılığı üzerindeki olumlu etkilerini göstermiştir [85].

Sonuç olarak dağıtılmış kontrol yöntemi mikro şebeke yönetiminde esneklik, dayanıklılık ve ölçeklenebilirlik sunan yenilikçi bir yaklaşımdır. Merkezi kontrol sistemlerine kıyasla daha yüksek bir güvenilirlik düzeyi sağlarken geniş ölçekli mikro şebekeler için daha uygun bir çözüm sunar. Ancak koordinasyon ve iletişim gecikmeleri gibi zorluklar bu yöntemin daha da geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Günümüzde dağıtılmış kontrol hem akademik araştırmalarda hem de pratik uygulamalarda en çok dikkat çeken kontrol stratejilerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

3.2.3 Merkezi Olmayan (Decentralized) Kontrol Yöntemleri

Merkezi olmayan (decentralized) kontrol yöntemleri mikro şebeke kontrol stratejilerinin bir diğer önemli adımıdır. Bu yöntem özellikle iletişim altyapısına bağımlılığı ortadan kaldırmayı, sistemin her bir bileşeninin bağımsız olarak çalışmasını sağlamayı ve enerji sistemlerinde güvenilirliği artırmayı hedefler [86]. Merkezi kontrol ve dağıtılmış kontrol yöntemlerinden farklı olarak merkezi olmayan kontrol tamamen yerel karar alma mekanizmalarına dayanır [87]. Bu yaklaşım mikro şebekelerin daha dayanıklı, güvenilir ve maliyet etkin olmasını sağlamayı amaçlamaktadır.

Merkezi olmayan kontrol yöntemleri mikro şebekelerdeki ilk kontrol stratejilerinden biri olarak özellikle iletişim altyapısının yetersiz veya maliyetli olduğu durumlarda ön plana çıkmıştır [88]. Tarihsel olarak bu yöntemlerin geliştirilmesi 2000'li yılların başlarında enerji üretim sistemlerinin yerel olarak düzenlenmesine olan talebin artmasıyla başlamıştır. Bu süreçte eğim kontrolü (droop control) gibi teknikler merkezi olmayan kontrolün temelini oluşturmuştur.

Droop kontrol yöntemi jeneratörlerin frekans ve gerilim gibi sistem parametrelerini kontrol etmek için geliştirilmiş ve mikro şebekelerdeki merkezi olmayan kontrol stratejilerinin temel taşı olmuştur. Guerrero ve arkadaşları mikro şebekelerdeki uygulama alanlarını detaylı şekilde açıklamış ve bu yöntemin sistem kararlılığı üzerindeki etkilerini analiz etmiştir [53].

Merkezi olmayan kontrol yöntemleri dağıtılmış enerji kaynaklarının (DEK) yerel olarak karar alma yeteneğini destekler ve herhangi bir merkezi otoriteye ihtiyaç duymadan çalışır. Bu yöntem özellikle adadaki mikro şebekeler gibi izole sistemlerde veya geniş coğrafi alanlara yayılan enerji kaynakları arasında iletişim kurulması zorluğundan dolayı bu yöntem uygulanabilirliği ile dikkat çekmiştir.

Merkezi olmayan kontrol yöntemleri tamamen yerel kontrol stratejilerine dayandığı için kontrol kararlarını almak için geniş bir iletişim altyapısına ihtiyaç duymadığından bahsetmiştik. Bu durum iletişim gecikmelerini ve kesintilerini ortadan kaldırarak avantaj sağlar. Her bir birim kendi başına çalışabildiğinden sistem genelinde tek bir arıza noktası bulunmaz. Bu ise mikro şebekenin genel dayanıklılığını artırır. En önemlisi merkezi kontrolün arızalandığı durumlarda merkezi olmayan kontrol bir yedek çözüm olarak kullanılabilir.

Merkezi sistemlere kıyasla iletişim altyapısının olmayışı ve daha basit kontrol yapısı maliyetleri önemli ölçüde azaltır. Her birim, yalnızca kendi yerel verilerine dayanarak karar alabilir. Bu ise hızlı ve verimli kontrol sağlar. Ayrıca yeni bir enerji kaynağı veya yük eklendiğinde, sistemin kontrol yapısı değişmeden kalabilir. Bu da genişletilebilirliği kolaylaştırır.

Merkezi olmayan kontrol yöntemleri, avantajlarına rağmen bazı sınırlamaları beraberinde getirebilir. Bunların belki de en önemlisi "Küresel Optimizasyon Eksikliği" denebilir. Çünkü merkezi olmayan kontrol yöntemlerinde sistemin genel optimizasyonu gerçekleştirilemez. Her bir birim kendi kararını alırken sistemin genel performansı göz ardı edilebilir. Ayrıca her bir enerji kaynağı bağımsız olarak çalıştığı için sistemde dengesiz güç paylaşımı sorunları ortaya çıkabilir. Bu durum özellikle farklı türdeki enerji kaynaklarının olduğu mikro şebekelerde önemli bir sorun olabilir.

Merkezi olmayan kontrol, birimlerin birbirleriyle iletişim kurmasını gerektirmez. Fakat bu, birimler arasında ortaya çıkabilecek etkileşimlerin kontrol edilmesini zorlaştırabilir. Frekans ve gerilim kontrolünde yerel düzeyde alınan kararlar sistemin kararlılığını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu durum özellikle dinamik yüklerin olduğu sistemlerde stabilite sorunları olarak belirgin hale gelir. Merkezi olmayan sistemlerin uygulanabilmesi için her bir kontrol biriminin yeterince

gelişmiş donanıma ve yazılıma sahip olması gerekir. Bu, yöntemin başlangıç maliyetlerini artırabilir.

Sonuç olarak merkezi olmayan kontrol, mikro şebeke uygulamalarında düşük maliyetli, dayanıklı ve iletişim altyapısına bağımlılığı olmayan bir çözüm sunar. Bu yöntem basit sistemlerde oldukça etkili olmasına rağmen karmaşık mikro şebeke yapılarında koordinasyon ve küresel optimizasyon eksikliği nedeniyle sınırlı kalmaktadır. Günümüzde merkezi olmayan kontrolün avantajlarını koruyarak dezavantajlarını gidermeyi amaçlayan hibrit kontrol sistemleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Merkezi olmayan kontrol özellikle yerel düzeyde basit ve bağımsız karar alma gereksinimlerini karşılayan bir yöntem olarak önemini korumaktadır.

3.2.4 Feedforward Kontrol Yöntemi

Feedforward kontrol mikro şebekelerde genellikle ani yük değişikliklerine ve hızlı sistem kararsızlıklarına yanıt vermek için kullanılan bir kontrol yaklaşımıdır. Merkezi olmayan (decentralized) kontrol yöntemlerinden biri olarak kabul edilir; ancak farklı bir felsefeye sahiptir. Feedforward kontrol sistemin bir çıktısını sürekli olarak izlemek yerine öngörülebilir girdiler temelinde bir sistemin davranışını önceden kontrol etmeye çalışır. Bu yaklaşım özellikle mikro şebekelerin hızlı dinamiklerine uyum sağlama ve kontrol hatalarını azaltma amacıyla geliştirilmiştir.

İlk olarak geleneksel mühendislik sistemlerinde giriş-çıkış ilişkilerini optimize etmek için geliştirilmiştir. Bu yöntem enerji sistemlerine 20. yüzyılın sonlarında uygulanmaya başlanmıştır. Droop kontrol sistemlerinin yaygınlaştığı dönemde feedforward kontrol bu yöntemlere destekleyici bir mekanizma olarak entegre edilmiştir.

Feedforward kontrolün enerji sistemlerindeki ilk uygulamalarından biri güç elektronik devrelerinde hızlı geçici yanıt sağlamak ve enerji kaynakları arasında koordinasyonu artırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Mikro şebekelerdeki kullanımı ise özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının artışı ve daha dinamik enerji taleplerinin yönetilmesi gerekliliği ile önem kazanmıştır. Mohan ve arkadaşları bu yöntemin mikro şebekelerdeki voltaj ve frekans sapmalarını azaltma üzerindeki etkisini göstermiştir [89].

Feedforward kontrol temel olarak sistemde meydana gelebilecek sapmaları önceden tahmin ederek sistem davranışını düzenlemeye çalışır. Bu yöntem belirli bir girdinin sistem üzerindeki etkisini modelleyerek sistemin öngörülen bir çıktı üretmesini sağlar. Diğer bir deyişle geri bildirim (feedback) kontrolünden farklı olarak feedforward kontrol hataların oluşmasını beklemez, sistem girdilerini proaktif olarak yönetir. Feedforward kontrol giriş sinyalini analiz ederek doğrudan bir yanıt oluşturduğu için sistemin hızlı bir şekilde tepki vermesine olanak tanır. Bu özellik ani yük değişikliklerinin veya ani arızaların meydana geldiği durumlarda kritik önem taşır ve diğer kontrol yöntemlerine göre avantaj sağlar. Ayrıca hataların önceden tahmin edilerek düzeltici eylemlerin gerçekleştirilmesi sistemde oluşacak hata miktarını da azaltmaktadır.

Geri bildirim kontrol sistemlerinin yalnız başına yetersiz kaldığı durumlarda feedforward kontrol sistem kararlılığını artırabilir. Bu, özellikle mikro şebeke sistemlerinde voltaj ve frekans sapmalarını azaltmada etkilidir. Son olarak Feedforward kontrol, diğer enerji kaynaklarından veri alışverişi yapmadan çalışabilir. Bu özellik ise mikro şebekenin iletişim altyapısına bağımlılığını azaltır.

Feedforward kontrolün bazı dezavantajları da vardır. Başlıca dezavantajı ise modelleme zorluğudur. Feedforward kontrol sistem girdileri ve çıktıları arasındaki ilişkiyi doğru bir şekilde modellemeyi gerektirir. Karmaşık mikro şebekelerde bu modellemenin yapılması oldukça zor olabilir. Ayrıca sistemde beklenmeyen durumlar veya gürültüler meydana geldiğinde feedforward kontrol hatalı tahminler yapabilir ve bu durum sistem kararlılığını olumsuz etkileyebilir ve sistemdeki ani değişimlerin beklenmedik bir şekilde meydana gelmesi durumunda feedforward kontrol etkili bir çözüm üretemeyebilir. Bu tür durumlarda geri bildirim kontrolünün desteğine ihtiyaç duyulur [80]. Genellikle geri bildirim kontrolü ile çalışır. Tek başına bir çözüm sunması durumunda sistem kararlılığı tam olarak sağlanamayabilir. Bu durumları Feedforward kontrolünün dezavantajlarından sayabiliriz.

Feedforward kontrol yöntemleri rüzgâr ve güneş enerjisi gibi değişken kaynaklardan gelen dalgalanmaları dengelemek için etkili bir yöntem olduğundan yenilenebilir enerji kaynaklarında; ani yük değişimlerinin sıkça meydana geldiği mikro şebeke sistemlerinde, bu kontrol yöntemi sistem kararlılığını oldukça

artırabilir olduğundan hızlı dinamik mikro şebekelerde ve son olarak geri bildirim kontrol yöntemleri ile birlikte kullanıldığında, hem hız hem de kararlılık sağladığından destekleyici kontrol mekanizmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sonuç olarak Feedforward kontrol mikro şebekelerde sistem kararlılığını artıran, hızlı ve proaktif bir kontrol yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Özellikle ani değişimlere karşı hızlı yanıt verme kabiliyeti onu geri bildirim kontrol sistemlerine etkili bir tamamlayıcı yapar. Ancak doğru modelleme ve tahmin gereksinimi yöntemin başarısını doğrudan etkiler. Tek başına yeterli bir çözüm olmasa da diğer kontrol yöntemleriyle entegre edildiğinde oldukça güçlü bir araçtır.

3.2.5 Cooperative (İş Birlikçi) Distributed Kontrol Sistemleri

Cooperative (iş birlikçi) kontrol sistemleri, dağıtılmış kontrolün en önemli alt türlerinden biri olarak mikro şebeke bileşenleri arasında yüksek düzeyde koordinasyon ve iş birliği sağlamayı amaçlar. Bu sistemler her bir enerji kaynağının yerel karar alma yeteneklerini korurken, diğer enerji kaynaklarıyla sürekli bilgi paylaşımı yaparak mikro şebeke genelinde küresel kararlılığı gerçekleştirmeye çalışır. İş birlikçi kontrol sistemleri özellikle karmaşık ve dinamik mikro şebeke uygulamaları için kritik öneme sahiptir.

Cooperative kontrol sistemlerinin ilk uygulamaları mikro şebeke teknolojisinin hızla geliştiği 2010'lu yılların başında görülmeye başlandı. Bu dönemde enerji üretiminde yenilenebilir kaynakların artışı ve mikro şebekelerdeki dağıtık enerji kaynaklarının (DEK) entegrasyonu daha etkili ve güvenilir kontrol yöntemlerine duyulan ihtiyacı artırdı. Özellikle Zhao ve arkadaşlarının çalışmaları cooperative kontrol sistemlerinin temel prensiplerini tanımlamış ve bu sistemlerin mikro şebeke kararlılığı üzerindeki etkisini ortaya koymuştur [86].

Cooperative kontrolün teorik altyapısı çoğunlukla çoklu ajan sistemleri (multi-agent systems) teorisine ve konsensüs algoritmalarına dayanır. Bu algoritmalar her bir kontrol biriminin yerel ölçümleri ve diğer birimlerle yaptığı bilgi paylaşımı aracılığıyla ortak bir hedefe ulaşmasını sağlar.

Cooperative kontrol sistemlerinin çalışma prensibi mikro şebeke genelinde aktif güç paylaşımı, voltaj-frekans regülasyonu ve enerji optimizasyonu gibi hedeflere ulaşmak için dağıtılmış bilgi işlem ve iletişim yöntemlerini kullanır. Her bir kontrol birimi; kendi ölçümlerini yapar, diğer kontrol birimleriyle bilgi paylaşır, paylaşılan bilgiler ışığında kararlar alır ve düzeltici eylemler uygular. Bu iş birliği, sistemin genel performansını artırır ve arıza durumlarında dayanıklılığı yükseltir.

Sistem genelinde küresel hedeflere (ör. yük paylaşımı ve enerji verimliliği) ulaşılır. Her bir kontrol birimi iş birliği yaparak optimal bir çözüm bulmaya çalışır [49]. Merkezi bir kontrol birimine bağımlı olmadıkları için herhangi bir kontrol biriminin arızalanması durumunda diğer birimler sistemi çalışır durumda tutabilir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının dalgalı üretim kapasitesine sahip olduğu durumlarda iş birliği mekanizmaları kararlılığı artırır [90]. Mikro şebekeye yeni bir enerji kaynağı veya yük eklendiğinde cooperative kontrol sistemleri bu değişikliklere hızlıca uyum sağlar [60]. İş birliği protokolleri iletişim hatalarını telafi edebilir ve sistem kararlılığını koruyabilir.

Sistemdeki her bir kontrol birimi arasında sürekli bilgi paylaşımı gerektiğinden, iletişim altyapısı maliyetli olabilir [91]. Büyük ölçekli mikro şebekelerde koordinasyon karmaşık hale gelebilir ve bazı durumlarda koordinasyon problemleri yaşanabilir. Konsensüs algoritmalarının yanlış uygulanması sistemde frekans ve voltaj sapmalarına neden olabilir [86]. Dinamik konsensüs algoritmaları yüksek işlem gücü gerektirir ve bu da sistem maliyetini artırabilir [21]. İş birliği için kullanılan iletişim protokolleri siber saldırılara karşı savunmasız olabilir [92].

Ada Tipi Mikro şebekeler: İzole edilmiş enerji sistemlerinde yük paylaşımı ve voltaj regülasyonu sağlamak için idealdir.

Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Rüzgâr ve güneş enerjisi gibi değişken üretim kapasitelerine sahip yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlar.

Endüstriyel Mikro şebekeler: Enerji tüketimi yüksek olan endüstriyel tesislerde, enerji verimliliğini artırmak için kullanılır.

Sonuç olarak Cooperative kontrol sistemleri mikro şebeke uygulamalarında dağıtılmış kontrolün en etkili alt türlerinden biridir. Küresel kararlılığı sağlama kapasitesi, dayanıklılığı ve ölçeklenebilirliği ile merkezi kontrol ve merkezi olmayan kontrol yöntemlerine kıyasla birçok avantaj sunar. Ancak iletişim maliyetleri ve koordinasyon karmaşıklığı gibi zorluklar bu sistemlerin uygulanmasında dikkate alınması gereken önemli unsurlardır.

3.2.6 Non-Cooperative (İş Birlikçi Olmayan)

Dağıtılmış kontrol sistemlerinin bir alt dalı olan non-cooperative kontrol sistemleri DA mikro şebekelerde kararlılığı sağlamak, voltaj regülasyonu ve güç paylaşımı gibi ikincil kontrol görevlerini yerine getirmek için geliştirilmiştir. Geleneksel merkezi kontrol stratejileri, bir kontrol biriminin tüm sistemi yönetmesine dayanır. Bu yapı küçük ölçekli sistemlerde etkin çalışsa da büyük ve karmaşık sistemlerde ciddi sorunlara yol açar. Özellikle tek hata noktası riski artan iletişim yükü ve ölçeklenebilirlik sorunları merkezi kontrol sistemlerinin kullanımını kısıtlar. Bu noktada non-cooperative kontrol sistemleri merkezi olmayan yapısıyla öne çıkar ve sistem performansını artırmak için dağıtılmış karar verme mekanizmalarını kullanır.

Non-cooperative kontrol sistemleri oyun teorisi tabanlı çözümlerle çalışır. Sistemdeki her bir kontrol birimi (örneğin enerji depolama birimi, inverter veya mikro kaynaklar), diğer birimlerle doğrudan iş birliği yapmaksızın kendi hedeflerini optimize eder. Bu hedefler genellikle voltaj regülasyonu, güç paylaşımı ve enerji verimliliğinin artırılması gibi görevleri içerir. Örneğin her kontrol birimi yerel geri besleme mekanizmalarını kullanarak voltaj sapmalarını en aza indirmeye çalışır. Özellikle DA barası sinyalleme yöntemi, voltaj değişimlerini kullanarak kontrol sinyallerini iletir ve böylece merkezi koordinasyona ihtiyaç duymadan sistem kararlılığını sağlar [93].

Non-cooperative kontrol sistemlerinin en önemli özelliklerinden biri, iletişim yükünü azaltmasıdır. Geleneksel kontrol yapılarında tüm kontrol sinyalleri merkezi bir birime iletilirken non-cooperative yapıda her kontrol birimi sadece kendi yerel bilgilerini kullanır. Bu sayede büyük ölçekli DA mikro şebekelerde iletişim gecikmeleri ortadan kalkar ve sistemin hata toleransı artar. Aynı

zamanda esneklik ve ölçeklenebilirlik non-cooperative kontrol sistemlerinin öne çıkan avantajları arasındadır. Örneğin ortalama akım paylaşımı yöntemi sayesinde yük paylaşımı dengelenerek sistemde dengesizliklerin oluşması önlenir. Bu yöntem özellikle büyük DA mikro şebekelerde yük dengelemesini sağlayarak verimliliği artırır [94].

Bununla birlikte non-cooperative kontrol sistemlerinin bazı önemli dezavantajları da vardır. Her kontrol biriminin kendi çıkarlarını maksimize etmesi sistemin küresel optimizasyonundan sapmasına neden olabilir. Örneğin bir kontrol birimi voltajı kendi hedeflerine göre düzenlerken bu diğer birimlerin performansını olumsuz etkileyebilir. Bu durum özellikle güç paylaşımında dengesizliklere yol açar ve sistemin genel verimliliğini azaltabilir [95]. Ayrıca birimler arasındaki çakışma yönetimi de bir diğer önemli sorundur. Bağımsız karar verme süreçleri bazı durumlarda koordinasyon eksikliğine yol açarak sistem kararlılığını tehdit edebilir.

Öte yandan non-cooperative kontrol sistemlerinin dinamik koşullara uyum sağlama yeteneği, sistem performansını artırmak için önemli bir avantajdır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunda değişken güç üretimi gibi koşullara hızlı bir şekilde tepki verebilirler. Bu esneklik DA mikro şebekelerin kararlı ve güvenilir çalışmasını sağlamak için büyük önem taşır. Enerji depolama sistemlerinin kararlılığı ve mikro şebekeler arası enerji alışverişinde önemli bir rol oynar [96].

Sonuç olarak non-cooperative kontrol sistemleri DA mikro şebekelerde kararlılığı sağlamak için merkezi olmayan ve esnek bir çözüm sunar. Her bir kontrol biriminin yerel bilgileri kullanarak bağımsız kararlar alması sistemin ölçeklenebilirliğini artırır ve iletişim yükünü azaltır. Ancak küresel optimizasyondan sapma ve koordinasyon eksikliği gibi zorlukların üstesinden gelmek için yeni kontrol algoritmalarının geliştirilmesi gerekmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar bu kontrol sistemlerinin enerji yönetimi, voltaj regülasyonu ve güç paylaşımı gibi kritik sorunlara yenilikçi çözümler sunduğunu göstermektedir. Gelecekte makine öğrenimi ve yapay zekâ tabanlı optimizasyon tekniklerinin entegrasyonu ile bu sistemlerin performansının daha da iyileştirilmesi beklenmektedir.

3.2.7 Dynamic Consensus

Cooperative kontrol yöntemleri DA mikro şebekelerde kontrol görevlerinin koordinasyon ve iş birliği yoluyla gerçekleştirilmesini sağlar. Bu kontrol yaklaşımı özellikle dinamik konsensüs (dynamic consensus) ve gossip algoritmalarına dayanır. Dinamik konsensüs yöntemleri sistemin voltaj regülasyonu, akım paylaşımı ve yük dengelemesi gibi ikincil kontrol görevlerinde kontrolörler arasında dinamik bilgi paylaşımını kullanarak merkezi olmayan (decentralized) bir çözüm sunar.

Dinamik konsensüs yöntemleri DA mikro şebekelerde dağıtılmış kontrol mekanizmalarının temelini oluşturur. Bu yöntemlerde kontrol birimleri yerel geri besleme mekanizmalarını kullanarak komşu birimlerle bilgi alışverişinde bulunur. Amaç tüm organların voltaj veya akım değerleri gibi belirli parametrelerde ortak bir hedefe ulaşmasını sağlamaktır. Böylece sistemin genel kararlılığı korunur ve güç paylaşımı eşitlenir.

Örneğin ortalama konsensüs algoritması her bir organın komşularından gelen verileri kullanarak kendi kontrol sinyalini güncellemesini sağlar. Bu güncellemeler sonucunda sistemin tüm birimleri belirli bir ortak hedefe (voltaj ya da akım dengelemesi) doğru yakınsar. Literatürde event-triggered communication temelli dinamik konsensüs algoritmalarının iletişim yükünü azaltarak sistemin performansını iyileştirdiği gösterilmiştir. Bu yöntem Lyapunov kararlılık kriteri ile analiz edilerek güvenilirliği kanıtlanmıştır [97].

Dinamik konsensüs algoritmaları özellikle voltaj regülasyonu ve akım paylaşımı görevlerinde kritik bir role sahiptir. Hierarchical (hiyerarşik) kontrol yapılarında bu algoritmalar genellikle ikincil kontrol seviyesinde kullanılır. Örneğin birden fazla mikro şebeke grubunu içeren sistemlerde dinamik konsensüs yöntemleri sayesinde voltaj ayarlamaları otomatik olarak yapılır ve sistemin genel kararlılığı sağlanır.

Bir çalışmada finite-time consensus algoritmasının kullanıldığı dağıtılmış koordinasyon kontrol stratejisi incelenmiştir. Bu strateji merkezi kontrolün getirdiği zorlukları ortadan kaldırarak sistem güvenilirliğini ve maliyet verimliliğini artırmaktadır. Simülasyon sonuçları yöntemin büyük DA mikro şebeke kümelerinde etkili olduğunu göstermektedir [98].

Bunun yanı sıra plug-and-play (tak-çalıştır) kontrol mekanizmaları da dinamik konsensüs algoritmalarına dayanmaktadır. Bu yaklaşım sisteme yeni bir dağıtılmış jeneratör (DG) eklenmesi veya sistemde bir arıza meydana gelmesi durumunda mikro şebekenin kararlılığını koruyarak kontrol sürecini otomatik olarak yeniden yapılandırır. Böylece sistem dinamiklerine hızlı bir şekilde uyum sağlanır [99]. Dinamik konsensüs yöntemleri DA mikro şebekelerde aşağıda başlıkları ve açıklamalarını verdiğimiz avantajları sağlar:

Dağıtılmış Yapı: Merkezi koordinasyona ihtiyaç duymadan tüm kontrol birimleri arasında bilgi paylaşımı ve uyum sağlanır.

İletişim Verimliliği: Event-triggered ve finite-time konsensüs yöntemleri sayesinde iletişim yükü azaltılır [100].

Kararlılık: Sistem dinamik koşullara karşı dayanıklı hale gelir ve voltaj sapmaları minimize edilir.

Esneklik: Plug-and-play mekanizmaları sayesinde, sistemdeki birim ekleme veya çıkarma işlemleri sırasında kararlılık korunur.

Ancak dinamik konsensüs yöntemlerinin aşağıda başlıkları ve açıklamalarıyla birlikte sunduğumuz bazı sınırlamaları da bulunmaktadır:

Zaman Gecikmeleri: Ajanlar arasındaki bilgi paylaşımında zaman gecikmeleri oluşabilir, bu da kontrol performansını etkileyebilir.

Hesaplama Karmaşıklığı: Büyük ölçekli sistemlerde algoritmaların gerçek zamanlı uygulanması zor olabilir.

İletişim Bozulmaları: Dağıtılmış yapıda iletişim hataları veya ağ gürültüsü sistemin kararlılığını olumsuz etkileyebilir.

Sonuç olarak dinamik konsensüs algoritmaları DA mikro şebekelerde kararlılığı sağlamak için etkili ve yenilikçi çözümler sunmaktadır. Merkezi koordinasyon ihtiyacını ortadan kaldırarak sistemin ölçeklenebilirliğini artırır ve iletişim yükünü azaltır. Özellikle voltaj regülasyonu ve akım paylaşımı gibi görevlerde üstün

performans sergileyen bu algoritmalar mikro şebekelerin dinamik koşullara hızlı bir şekilde uyum sağlamasını sağlar. Ancak zaman gecikmeleri ve iletişim bozulmaları gibi zorlukların çözümü için yeni optimizasyon tekniklerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

3.2.8 Gossip

Gossip algoritmaları Cooperative kontrol yöntemlerinin önemli bir alt başlığı olarak DA mikro şebekelerde ikincil kontrol görevlerinde merkezi olmayan, esnek ve dayanıklı çözümler sunar. Cooperative kontrolün temel prensibi birimlerin iş birliği yaparak ortak bir hedefe ulaşmasını sağlamaktır. Gossip algoritmaları ise bu hedefe ulaşmak için birimlerin rastgele bilgi paylaşımı yoluyla sistemin genel kararlılığını ve performansını artırmasını sağlar. Geleneksel merkezi kontrol yöntemlerinin yüksek iletişim yükü ve tek hata noktası gibi zorlukları bu algoritmalar sayesinde etkili bir şekilde aşılmaktadır.

DA mikro şebekelerde gossip algoritmalarının uygulanmasının en önemli gerekçesi iletişim yükünü azaltarak sistem performansını artırmak ve esnek bir yapı sağlamak olmuştur. Geleneksel kontrol sistemlerinde her bir kontrol birimi tüm sistemden bilgi alıp merkezi bir kontrol mekanizmasına gönderirken, gossip algoritmalarında birimler yalnızca komşu birimleriyle sınırlı ve rastgele bilgi alışverişinde bulunur. Bu yerel bilgi paylaşımı sayesinde sistemin genel kontrol süreci merkezi koordinasyona ihtiyaç duymadan ilerler ve böylece hem iletişim altyapısındaki yük azalır hem de sistem hata toleransı kazanır.

Li ve arkadaşlarının çalışmasına göre gossip algoritmaları DA mikro şebekelerde voltaj regülasyonu ve akım paylaşımı görevlerinde büyük avantajlar sunmaktadır [101]. Örneğin voltaj regülasyonu sürecinde birimler komşu birimlerinden topladıkları voltaj bilgilerini kullanarak kendi kontrol sinyallerini günceller. Bu güncellemeler zaman içinde sistemin ortak bir voltaj seviyesine yakınsamasını sağlar. Ayrıca bu yapı büyük ölçekli sistemlerde iletişim gecikmelerini ve enerji maliyetlerini azaltarak sistemin daha verimli çalışmasına olanak tanır.

Sadabadi ve arkadaşlarının çalışmasında gossip algoritmalarının esneklik sağladığı ve özellikle komşu tabanlı bilgi paylaşımı ile iletişim gereksinimlerini azalttığı gösterilmiştir [102]. Bu esneklik sisteme yeni bir kontrol birimi eklendiğinde ya da mevcut bir birim devreden çıktığında sistemin yeniden yapılandırma gereksinimi duymadan çalışmaya devam etmesini sağlar. Böylece sistem değişken koşullara hızlı bir şekilde uyum sağlayabilir ve enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlar.

Gossip algoritmalarının önemli avantajlarından bir diğeri de hata toleransı ve dayanıklılığı artırmasıdır. Merkezi bir kontrol mekanizmasının arızalanması durumunda geleneksel sistemler tümüyle devre dışı kalırken, gossip algoritmaları sayesinde sistemdeki birimler bağımsız olarak çalışmaya devam eder. Aluko ve arkadaşlarının çalışması bu algoritmaların adadaki mikro şebekelerde kararlı ve güvenilir enerji yönetimi sağladığını ortaya koymuştur [103].

Bununla birlikte gossip algoritmalarının bazı sınırlamaları da vardır. Rastgele bilgi paylaşımı nedeniyle sistemin hedefe ulaşması zaman alabilir. Merkezi kontrollü sistemlerde tüm bilgiler anında işlendiği için hızlı sonuçlar elde edilirken gossip algoritmalarında yakınsama süresi daha uzundur. Ayrıca iletişim hataları veya ağ gürültüsü gibi olumsuz faktörler sistemde dalgalanmalara yol açabilir ve bu da kontrol performansını sınırlayabilir. Bu sorunların üstesinden gelmek için daha gelişmiş optimizasyon yöntemleri ve iletişim protokolleri geliştirilmektedir.

Babazadeh-Dizaji ve arkadaşlarının çalışmasında gossip algoritmalarının çift yönlü dönüştürücülerle entegre edilmiş DA mikro şebekelerde voltaj dengesizliğini başarıyla giderdiği gösterilmiştir [104]. Bu çalışma gossip algoritmalarının özellikle dağıtılmış jeneratörler (DG'ler) arasında güç paylaşımını optimize ederek mikro şebekelerin kararlılığını ve verimliliğini artırabileceğini kanıtlamaktadır.

Sonuç olarak gossip algoritmaları, cooperative kontrol stratejileri kapsamında DA mikro şebekelerde voltaj regülasyonu, akım paylaşımı ve yük dengelemesi gibi görevleri yerine getirerek sistemin esnekliğini, dayanıklılığını ve ölçeklenebilirliğini artırmaktadır. Merkezi kontrol sistemlerine kıyasla daha düşük iletişim yükü gerektiren bu yöntem özellikle büyük ölçekli ve değişken enerji sistemlerinde önemli bir avantaj sağlar. Ancak yavaş yakınsama süresi ve iletişim

hataları gibi zorlukların üstesinden gelmek için daha gelişmiş algoritmaların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu tür çalışmalar gossip algoritmalarının DA mikro şebekelerde daha yaygın bir şekilde uygulanmasına olanak tanıyacaktır.

3.2.9 Ortalama Akım Paylaşımı (Average Current Sharing)

Non-cooperative kontrol, DA mikro şebekelerde kontrol birimlerinin merkezi koordinasyondan bağımsız olarak kendi kararlarını optimize etmesine dayanan bir kontrol yöntemidir. Bu yaklaşım birimlerin yalnızca yerel bilgilere dayanarak kontrol stratejilerini belirlemesi sayesinde iletişim yükünü azaltır ve merkezi kontrolün getirdiği tek hata noktası riskini ortadan kaldırır. Ancak birimlerin sadece kendi hedeflerini maksimize etmesi nedeniyle sistemin küresel optimizasyonu yerine yerel çözümler elde edilir.

Bu yöntemin bir alt başlığı olan Average Current Sharing (Ortalama Akım Paylaşımı), DA mikro şebekelerde yük paylaşımını dengelemek ve güç dağıtımını optimize etmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu yöntem birden fazla dağıtılmış jeneratör (DG) birimi veya dönüştürücünün yer aldığı sistemlerde, her bir birimin ürettiği akımı orantılı olarak paylaşmasını sağlar. Bu özellikle büyük ölçekli mikro şebekelerde gerilim dengesizliklerini önlemek, yük akımlarını eşitlemek ve sistemin genel kararlılığını sağlamak için kritik bir rol oynar.

Average current sharing yöntemleri kontrol birimleri arasında gerilim ve akım değerlerinin dengelenmesini hedefler. Bu süreçte her bir kontrol birimi yük akımını lokal geri besleme mekanizmalarını kullanarak ayarlar. Trip ve arkadaşlarının çalışmalarında bu yöntemin plug-and-play özellikli dağıtılmış kontrol yapısı sayesinde sistem parametrelerinden bağımsız çalışabildiği ve global olarak istenilen denge durumuna yakınsama sağladığı belirtilmiştir [105,106].

Bir diğer önemli teknik, düşük iletişim gerektiren pasifite tabanlı kontrol stratejileridir. Cucuzzella ve arkadaşlarının çalışmasında bu yöntemlerin dağıtılmış jeneratör birimleri arasında proportional current sharing (orantılı akım paylaşımı) sağladığı ve aynı zamanda ağdaki gerilim seviyelerini düzenlediği ifade edilmiştir [107].

Average Current Sharing yük akımlarının kontrol birimleri arasında dengeli bir şekilde paylaştırılmasını sağlar, sistemdeki gerilim sapmalarını minimize eder ve kararlılığı artırır. Ayrıca Plug-and-play özellikli sistemlerde yeni bir kontrol birimi sisteme eklenirken herhangi bir yeniden yapılandırma gerektirmez. Bu nedenle merkezi olmayan yapı sayesinde bir kontrol biriminin arızalanması sistemin işleyişini etkilemez.

Her bir kontrol birimi kendi akımını bağımsız olarak optimize ettiği için küresel optimizasyondan sapmalar görülebilir. Ayrıca kontrol birimleri arasındaki iletişim hataları veya gecikmeler akım paylaşım performansını olumsuz etkileyebilir. Sistemdeki yük değişimlerine bağlı olarak kısa süreli gerilim dalgalanmaları oluşabilir. Fakat Tucci ve arkadaşlarının çalışması bu sorunların üstesinden gelmek için plug-and-play kontrol stratejilerinin kullanıldığı konsensüs tabanlı algoritmalar önererek DA mikro şebekelerde akım paylaşımının daha güvenilir hale getirilebileceğini göstermektedir [99].

Sonuç olarak average current sharing, non-cooperative kontrol stratejilerinin bir parçası olarak DA mikro şebekelerde yük paylaşımını optimize eden ve sistemin kararlılığını artıran kritik bir yöntemdir. Merkezi kontrol ihtiyacını ortadan kaldırarak yük akımlarının orantılı olarak dağıtılmasını sağlar. Ancak küresel optimizasyon eksikliği ve gerilim dengesizlikleri gibi zorlukların üstesinden gelmek için daha gelişmiş algoritmaların uygulanması gerekmektedir.

3.2.10 Ortalama Voltaj Paylaşımı (Average Voltage Sharing)

Non-cooperative kontrol DA mikro şebekelerde merkezi bir koordinasyon olmadan yerel bilgileri kullanan kontrol birimlerinin bağımsız olarak çalışmasını sağlar. Bu kontrol stratejisi özellikle iletişim yükünü azaltma, hata toleransı sağlama ve kararlılığı koruma gibi avantajlarıyla öne çıkar. Ancak her bir kontrol biriminin sadece kendi performansını ayarlaması nedeniyle sistemin küresel performansı bazı durumlarda tam olarak sağlanamayabilir. Bu yapının önemli bir alt başlığı olan Average Voltage Sharing (Ortalama Voltaj Paylaşımı), mikro şebekelerde gerilim seviyelerini düzenleyerek sistemdeki dengesizlikleri azaltmayı ve güvenilir enerji yönetimi sağlamayı amaçlar.

Average voltage sharing dağıtılmış jeneratörler (DG'ler) veya dönüştürücülerin çıkış gerilimlerini birbirine yaklaştırarak sistemdeki voltaj dengesizliğini en aza indirir. Özellikle yük değişimlerinin veya sistem kayıplarının neden olduğu voltaj sapmalarını önlemek için kontrol birimleri lokal geri besleme mekanizmalarını kullanarak kendi çıkış voltajlarını ayarlar. Trip ve arkadaşlarının çalışmalarında dağıtılmış kontrol algoritmalarının voltaj regülasyonu ve akım paylaşımını başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği ve sistemin global olarak kararlı bir duruma yakınsadığı gösterilmiştir [105,106].

DA mikro şebekelerde voltaj regülasyonu droop kontrol gibi birincil kontrol stratejileriyle başlatılır. Ancak droop kontrol voltaj sapmalarına neden olabileceğinden ikincil kontrol seviyesinde average voltage sharing gibi yöntemlerle voltaj dengesizlikleri düzeltilir. Peyghami ve arkadaşlarının çalışması birincil ve ikincil kontrol stratejilerini birleştirerek voltaj regülasyonu ve aktif güç paylaşımını daha verimli hale getiren yöntemler sunmaktadır [108].

Bu, voltaj sapmalarını düzelterek sistemin genel güvenilirliğini artırırken gerilim dengesizliğini de önler. Sistem yük değişimlerine hızlı bir şekilde uyum sağlayarak yüksek kararlı bir voltaj profili oluşturur. Voltaj seviyelerinin doğrulukla ayarlanmasıyla enerji kayıpları minimize edilir ve bu şekilde enerji verimliliği sağlanır. Dağıtılmış yapı sayesinde sistemdeki birimlerin eklenmesi veya çıkarılması durumunda yeniden yapılandırmaya gerek kalmaz ve kısaca esneklik sağlanmış olur. Asad ve Kazemi'nin çalışması bu yöntemlerin özellikle hassas yüklerin olduğu DA mikro şebekelerde voltaj profili düzenlemesini başarılı bir şekilde sağladığını göstermektedir [109].

Ortalama voltaj paylaşımı bazı durumlarda zaman gecikmeleri ve iletişim hataları nedeniyle performans sorunları yaşayabilir. Ayrıca dağıtılmış kontrol stratejileri merkezi kontrol sistemlerine kıyasla daha yavaş yakınsama sürelerine sahiptir. Setiawan ve arkadaşlarının çalışması voltaj regülasyonu ve yük akımı paylaşımını ayarlayabilmek için geliştirilen yeni tekniklerin bu tür zorlukları aşmak adına etkili çözümler sunduğunu ortaya koymaktadır [110].

Sonuç olarak baktığımızda ortalama voltaj paylaşımı (average voltage sharing), DA mikro şebekelerde voltaj regülasyonu ve sistem kararlılığını sağlamak için önemli bir kontrol yöntemidir. Bu yöntem dağıtılmış kontrol stratejileri kapsamında voltaj dengesizliklerini düzelterek enerji verimliliğini artırır ve sistem performansını optimize eder. Ancak zaman gecikmeleri ve iletişim hataları gibi zorluklar daha ileri optimizasyon tekniklerinin geliştirilmesini gerektirmektedir.

3.2.11 DA Bara Sinyali

Non-cooperative kontrolün bir alt yöntemi olan DA bara sinyali (DC bus signaling), DA mikro şebekelerde ikincil kontrol görevlerini yerine getirmek için kullanılan merkezi olmayan bir kontrol stratejisidir. Bu yöntem birimlerin merkezi iletişim altyapısına ihtiyaç duymaksızın DA barası voltajını bir kontrol sinyali olarak kullanarak güç paylaşımı ve kararlılığı sağlar. Özellikle iletişim altyapısının karmaşık olduğu veya maliyetinin yüksek olduğu durumlarda DA bara sinyali yöntemi esnek ve güvenilir bir çözüm sunar.

DA bara sinyali voltaj bantları ve durum sınıflandırmaları kullanarak sistemdeki her bir birimin çalışma koşullarını belirler. Jeong ve arkadaşlarının çalışmasında DA bara voltajının bilgi sinyali olarak kullanıldığı ve voltaj seviyelerinin belirli aralıklara ayrılarak sistem bileşenlerinin bağımsız çalışmasının sağlandığı belirtilmiştir [111]. Bu yaklaşım özellikle adadaki mikro şebekelerde voltaj kararlılığı sağlarken iletişim gecikmelerini ortadan kaldırır.

DA bara sinyali mikro şebekenin DA barasında voltaj seviyelerini ölçerek bu seviyeleri kontrol sinyali olarak kullanır. Sistemdeki her bir dağıtılmış jeneratör (DG) veya enerji depolama sistemi voltaj seviyesine bağlı olarak güç çıkışını ayarlar. Örneğin baradaki voltaj artışı veya düşüşü birimlerin üretim veya tüketim seviyelerini kontrol ederek yük paylaşımını ayarlar. Liu ve arkadaşlarının çalışması çoklu değer tabanlı kontrol kullanarak voltaj seviyelerini değerlendirip güvenilir bir koordinasyon sağladıklarını göstermektedir [112].

Avantajlarından bahsedecek olursak, voltaj sinyalleri doğrudan kontrol sinyali olarak kullanıldığı için iletişim altyapısına olan ihtiyaç ortadan kalkar. Merkezi iletişim gereksinimi olmadığından merkezi kontrol mekanizmalarına kıyasla iletişim maliyetleri önemli ölçüde azalır. Yeni bir bileşenin sisteme eklenmesi veya

arıza durumunda sistem kararlılığı korunur. Bu ise sisteme hem esneklik hem de dayanıklılık sağlar. Son olarak voltaj seviyelerindeki değişimlere anında tepki vererek güç paylaşımını düzenler ve kararlılığı sağlar.

DA bara sinyali yönteminin dezavantajlarına baktığımızda; bazı durumlarda voltaj dalgalanmalarına ve kararsızlık riskine yol açabilir. Özellikle büyük ölçekli sistemlerde baradaki voltaj değişimlerinin doğru yorumlanması ve kontrol edilmesi zorlaşabilir. Liang ve arkadaşlarının çalışmasında sistem parametrelerinin değişmesi durumunda baranın kararlılığını korumak için kayma modlu kontrol gibi daha dayanıklı yöntemlerin kullanılması gerektiği belirtilmiştir [113].

Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu gibi değişken üretim koşullarında voltaj dalgalanmalarını minimize etmek için ilave kontrol stratejilerinin uygulanması gerekmektedir. Moonhyun Lee ve arkadaşlarının çalışması bu bağlamda çift yönlü DA-DA dönüştürücüler kullanarak DA bara sinyali yöntemlerinin verimliliğini artırdıklarını vurgulamıştır [114].

Sonuçta DA bara sinyali DA mikro şebekelerde iletişim altyapısına ihtiyaç duymadan kararlılığı ve güç paylaşımını sağlamak için etkili bir yöntemdir. Voltaj seviyelerini kontrol sinyali olarak kullanarak sistemdeki her bir birimin bağımsız olarak çalışmasına olanak tanır ve bu da yöntemin maliyet etkinliğini ve esnekliğini artırır. Ancak voltaj dalgalanmaları ve parametre değişimleri gibi zorlukların üstesinden gelmek için daha gelişmiş kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

3.3 Üçüncül Kontol (Tertiary Control)

DA mikro şebekelerde ikincil kontrol birincil kontrolün sağladığı temel işlevlerin üzerine ek olarak voltaj regülasyonu, akım paylaşımı ve sistem kararlılığını iyileştirme görevlerini yerine getirmektedir. Bu aşamada merkezi olmayan yöntemler (non-cooperative) ve iş birliği tabanlı yöntemler (cooperative) ile çeşitli teknikler uygulanmıştır. Örneğin dinamik konsensüs ve gossip algoritmaları sistemdeki ajansların bilgi paylaşımı yoluyla ortak hedeflere ulaşmasını sağlarken; average current sharing, average voltage sharing ve DA bara sinyali gibi merkezi olmayan yöntemler iletişim gereksinimini en aza indirerek kararlı ve verimli bir güç yönetimi sunmuştur.

Ancak ikincil kontrol seviyesinin sağladığı yerel düzenleme ve optimizasyon yetenekleri, genellikle küresel enerji yönetimi ve ekonomik optimizasyon gibi daha üst düzey görevler için yeterli değildir. Mikro şebekelerin büyük ölçekli entegrasyonu enerji maliyetlerinin minimizasyonu ve güç akışı koordinasyonu gibi gereksinimler üçüncül kontrol seviyesini devreye sokar. Üçüncül kontrol sistemin genel performansını optimize ederek hem mikro şebeke içi hem de şebeke bağlantılı çalışmalarda ekonomik ve operasyonel verimliliği sağlamayı amaçlar.

Bu doğrultuda üçüncül kontrol, ikincil kontrolün sağladığı kararlılığın üzerine küresel koordinasyon ve optimizasyon görevlerini ekleyerek yük dağılımı, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve şebeke bağlantısı yönetimi gibi önemli sorunlara çözüm sunar.

Hiyerarşik kontrolün en üst seviyesi olan üçüncül kontrol, mikro şebekeler arası koordinasyonu sağlayan ve birbirine bağlı mikro şebekelerin uyumlu çalışmasını destekleyen bir yapı sunar. Bu kontrol sistemleri mikro şebekenin ana şebeke ile veya diğer mikro şebekelerle haberleşme ağı aracılığıyla güç alışverişi yapmasını sağlar ve enerji yönetimini etkin bir şekilde gerçekleştirir. DA mikro şebekelerde üçüncül kontrolün uygulanması mikro şebekelerin yönetiminde yenilikçi çözümler arayışıyla başlamıştır. İlk çalışmalar Guerrero ve diğerleri tarafından yapılan araştırmalarda mikro şebeke kararlılığı ve ekonomik yük paylaşımı için üçüncül kontrolün nasıl kullanılacağını detaylandırmıştır. Bu çalışma hem AC hem de DA mikro şebekelerde hiyerarşik kontrol yapısının uygulanabilirliğini ortaya koymuştur. Üçüncül kontrol bu süreçte mikro şebekenin ana şebekeyle bağlantısını optimize etmek ve enerji maliyetlerini azaltmak için kritik bir araç olarak tanımlanmıştır [53].

Üçüncül kontrol enerji akışı yönetimi ve şebeke bağlantısı optimizasyonu için kullanılmıştır. Bu seviyede mikro şebekelerdeki ekonomik dağıtım problemleri çözülmüş ve enerji kaynaklarının verimli kullanımı sağlanmıştır. Dragicevic ve diğerleri mikro şebeke sistemlerinde üçüncül kontrolün yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonundaki rolünü vurgulamış ve kontrol algoritmalarının geliştirilmesine odaklanmıştır [49].

Üçüncül kontrol, mikro şebekenin ana şebeke ve komşu mikro şebekelerle güç alışverişi ve ekonomik düzenlemeler yapabilmesi için gerekli olan enerji yönetim işlemlerini içerir. İlk olarak mikro şebeke ve ana şebeke arasında bir ara birim oluşturur. Bu birim yük atma, güç akışı denetimi, hata seviyesi kontrolü, piyasa entegrasyonu, yeniden bağlanma ve bağlantı kesilmesi gibi işlemleri yürütür. Ardından elde edilen yerel veriler doğrultusunda çıkış gücü sınırlarını ayarlayarak mikro şebekenin verimli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu sayede enerji kaynaklarının ekonomik yönetimini ve uzun vadeli verimliliği hedefler. Ahmed ve Meegahapola'nın çalışması, üçüncül kontrolün enerji maliyetlerini minimize ederek enerji yönetim stratejilerini geliştirdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca bu kontrol seviyesi enerji kaynakları arasında koordinasyonu sağlamada ve talep yönetimi stratejilerinde önemli bir rol oynayarak enerji kaynaklarının ekonomik yönetimini ve uzun vadeli verimliliğini hedefler [79]. Lewis ve arkadaşları üçüncül kontrol seviyesinin enerji maliyetlerini optimize ederek enerji yönetim stratejilerini geliştirdiğini vurgulamaktadır. Ayrıca bu kontrol seviyesi sistemin büyük ölçekli enerji şebekeleriyle entegrasyonunu kolaylaştırır [115].

Üçüncül kontrolcünün görevleri arasında üretim güvenliği ve sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla mikro şebekenin optimum üretim planlaması bulunur. Aynı zamanda komşu mikro şebekeler ve dağıtım fiderlerine aktif ve reaktif güç alım-satımı yaparak piyasa süreçlerine katkıda bulunur. Enerji transferi, talep yönetimi, güvenlik kontrolleri ve ekonomik planlama ile yük ve hava durumu tahminine yönelik fonksiyonları yerine getirir [82].

Mikro şebeke yapısında üçüncül kontrolcü aynı zamanda üretim planlama optimizasyonu enerji dengesizliklerinin giderilmesi ve rezerv yönetimi gibi kritik işlevleri yerine getirir. Bu kontrolcüler enerji yönetim sistemleri ile bütünleşmiş bir yapı sunarak mikro şebeke performansını artırır. Bu durum sistem genelinde frekans regülasyonu, aşırı yüklenmenin önlenmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının günlük yönetimi gibi işlevlerin kontrolünü sağlar [116]. Bu şekilde üçüncül kontrol mikro şebekenin sürdürülebilir, güvenilir ve etkin yönetimini destekler.

Bu kontrol seviyesinde DEK'lerin i_d, i_b, i_{pv} ve i_w gibi referans akımları elde edilir. Ancak bu parametrelerin sistem kontrolünde kullanılabilmesi için doğrusal olarak

belirlenmiş alt ve üst sınırlar arasında ölçeklenmeleri gerekmektedir [117]. Bu amaçla referans akım değerleri minimum ve maksimum değerlere dayalı yaygın bir normalizasyon işlemine tabi tutulur. Normalizasyon sonucunda elde edilen ki akım paylaşım oranı haberleşme ağı aracılığıyla birincil kontrol seviyesindeki yerel kontrol cihazlarına aktarılır. Bu sayede her bir üretim biriminin eğim katsayısı k_i parametresiyle güncellenir. Her bir $y_{j,n}$ verisi örneği Denklem (3.24)'te gösterildiği şekilde belirli bir aralıkta normalize edilerek $y'_{j,n}$ değerine dönüştürülür.

$$y'_{j,n} = \frac{y_{j,n} - min(y_j)}{max(y_j) - min(y_j)} (nMax - nMin) + nMin \quad [3.24]$$

Bu ifadede "min" ve "max" değerleri sırasıyla i_{th} akım verisinin minimum ve maksimum değerini gösterirken "$nMin$" ve "$nMax$" ise her bir referans akım için alt ve üst sınırları temsil etmektedir [35].

4. KONTROLCÜ TASARIMI VE UYGULAMASI

Bu çalışmada adaptif droop kontrol stratejisinin farklı gerilim seviyelerindeki performansını kapsamlı olarak değerlendirmek amacıyla iki farklı DA mikro şebeke modeli PLECS/Matlab ortamında tasarlanmıştır. İlk olarak orta gerilim seviyesindeki uygulamalar için 380V DC gerilimle çalışan 14 baralı ve 5 kontrolörlü bir model geliştirilmiştir. Bu model IEEE standartlarına uygun olarak tasarlanmış olup karmaşık şebeke topolojilerinde kontrol mekanizmalarının dinamik davranışını analiz etmek üzere kullanılmıştır.

Daha sonra düşük gerilim seviyeli dağıtık enerji sistemleri uygulamalarını test etmek amacıyla 48V DA gerilimle çalışan 5 baralı ve 4 kontrolörlü basitleştirilmiş bir model daha tasarlanmıştır. Bu iki farklı gerilim seviyesindeki modelleme yaklaşımı, kontrol stratejimizin hem orta gerilim hem de düşük gerilim uygulamalarındaki geçerliliğini test etmemize olanak sağlamıştır. 380V DA sistem yüksek güçlü uygulamalarda enerji iletim verimliliği sunarken 48V DA sistem ise güvenlik ve düşük maliyet avantajları sağlamaktadır.

Her iki modelde de birincil ve ikincil kontrol katmanları entegre edilerek adaptif droop algoritmasının farklı gerilim seviyelerindeki performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çift gerilim seviyeli modelleme yaklaşımı kontrol stratejimizin geniş bir uygulama yelpazesindeki etkinliğini göstermektedir. Özellikle algoritmanın hem yüksek gerilimli büyük ölçekli sistemlerde hem de düşük gerilimli küçük ölçekli sistemlerde başarılı sonuçlar vermesi yöntemin sağlamlığını ve uyarlanabilirliğini kanıtlamaktadır.

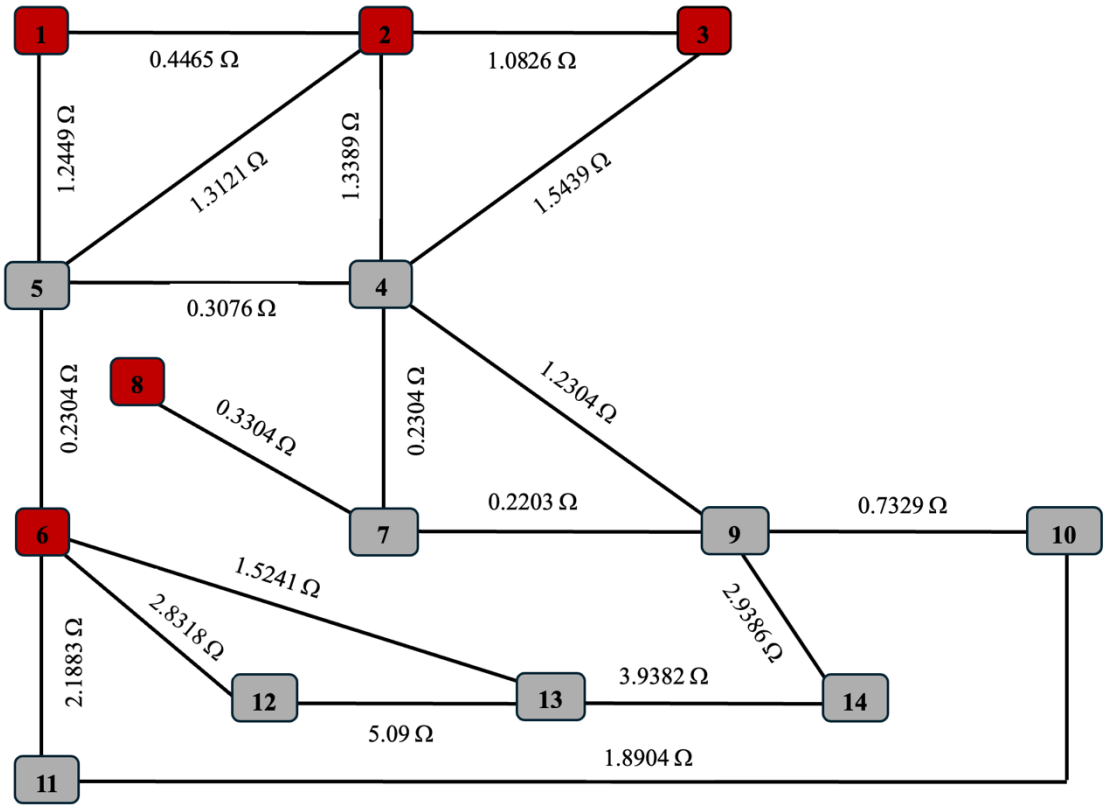
Modellerin kontrolörleri her iki gerilim seviyesinde de yük merkezlerine yakın kritik baralara ve yenilenebilir enerji giriş noktalarına stratejik olarak konumlandırılmıştır. Bu tasarım yaklaşımı gerçekçi enerji akış senaryolarının simülasyonunu sağlamak üzere optimize edilmiştir. 380V DA sistemde detaylı topolojik analizler yapılırken, 48V DA sistemde ise kontrol algoritmasının temel davranış karakteristikleri daha yalın bir şekilde gözlemlenebilmiştir. Her iki modelin parametreleri ve topolojik detayları ilgili bölümlerde ayrıntılı olarak sunulmuştur.

4.1. 14 Baralı ve 5 Kontrolcülü DA Mikro Şebeke Uygulaması

Bu çalışmada 14 baralı ve 5 kontrolcülü bir DA mikro şebeke modeli MATLAB/Simulink ortamında PLECS eklentisi kullanılarak tasarlanmış ve simüle edilmiştir. Sistemin dinamik davranışını analiz etmek amacıyla birincil kontrol seviyesinde geleneksel droop kontrol stratejileri, ikincil kontrol seviyesinde ise adaptif droop kontrol ile orantısal yük paylaşımı algoritmaları uygulanmıştır. Mikro şebeke modeli tasarımında dağıtık enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu için IEEE 1547 standardı (dağıtık enerji kaynaklarının bağlantı kuralları, gerilim/frekans tolerans sınırları) ve enerji depolama sistemleri için IEC 62040 standardına (kesintisiz güç kaynakları ve enerji depolama sistemleri için test ve güvenlik gereklilikleri) uygun parametreler benimsenmiştir.

Yapılan kapsamlı simülasyon çalışmaları sonucunda adaptif droop kontrol yönteminin geleneksel droop kontrol yöntemine kıyasla sistem kararlılığı ve enerji verimliliği açısından önemli avantajlar sağladığı gözlemlenmiştir. Özellikle ani yük değişimleri ve arıza koşullarında adaptif kontrol stratejisinin daha iyi gerilim regülasyonu sağladığı ve enerji kayıplarını azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca bu yöntemin mikro şebekeye bağlı yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken üretim karakteristiğine uyum sağlama konusunda da daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma adaptif droop kontrolün mikro şebeke uygulamalarında sistem performansını iyileştirmedeki potansiyelini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular özellikle enerji verimliliği ve sistem kararlılığının kritik önem taşıdığı izole mikro şebeke sistemleri için yol gösterici niteliktedir.



Şekil 4.1. IEEE standartlarından geliştirilen 14 baralı DA mikro şebeke diyagramı.

Çalışma kapsamında geliştirilen 14 baralı DA mikro şebeke sistemi IEEE standartlarına uygun olarak tasarlanmış olup sistem topolojisi Şekil 4.1'de detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Sistemde yer alan 1, 2, 3, 6 ve 8 numaralı baralara entegre edilen beş kontrolör (kırmızı renkli gösterim), mikro şebekenin temel regülasyon birimlerini oluşturmaktadır. Bu kontrolörler baralar arası güç akışının düzenlenmesi ve sistem genelinde voltaj stabilitesinin sağlanması gibi kritik işlevleri üstlenmektedir. Diğer taraftan 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13 ve 14 numaralı baralar (gri renkli gösterim), pasif yük bağlantı noktaları olarak sistemde yer almaktadır.

Mikro şebekenin elektriksel karakteristiği baralar arasında belirlenen direnç değerleri ile doğrudan ilişkilidir. Sistemdeki her bir bağlantı noktası arasındaki direnç parametreleri güç akışının dağılımını ve voltaj regülasyonunu etkileyen temel faktörler olarak detaylı bir şekilde modellenmiştir. Yapılan bu modelleme çalışması gerçek şebeke koşullarının laboratuvar ortamında yüksek doğrulukla

simüle edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu kapsamlı model özellikle mikro şebeke kontrol mekanizmalarının performans değerlendirmesi ve enerji yönetim stratejilerinin geliştirilmesi açısından önemli bir referans niteliği taşımaktadır.

"Tabloda "-" ile gösterilen noktalarda kaynak bağlantısı olmadığından değer gözlemlenmemiştir."

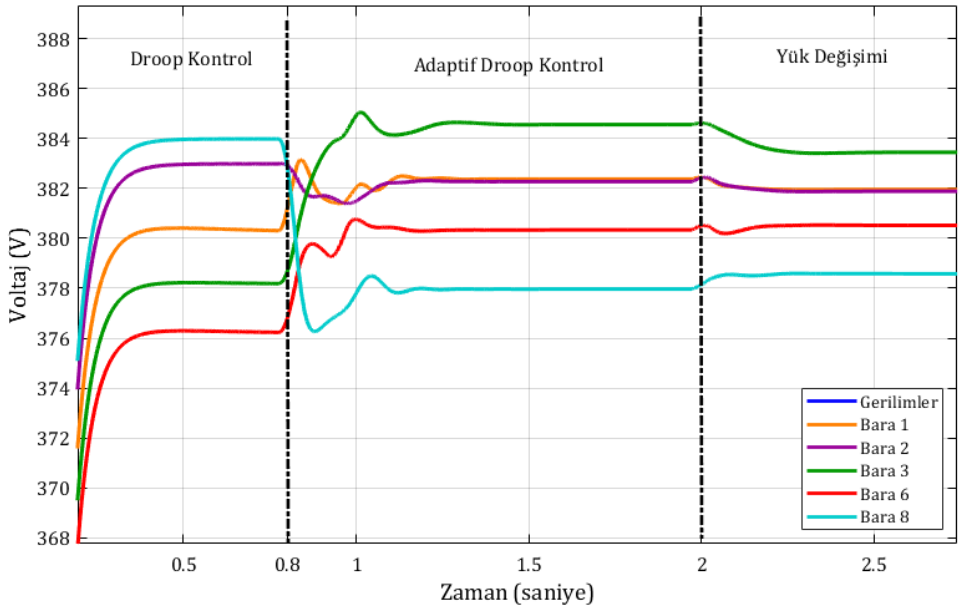
	V_{ref} (V)	V_{out} (V)	P_{max} (kW)
Bara 1	380	380	165,80
Bara 2	383	383	50
Bara 3	378	378	100
Bara 4	-	380,85	48,35
Bara 5	-	378,15	55,83
Bara 6	376	376	100
Bara 7	-	377	-
Bara 8	384	384	50
Bara 9	-	378,95	30
Bara 10	-	378,10	9,48
Bara 11	-	377,34	30
Bara 12	-	377,45	11.38
Bara 13	-	370,40	14,75
Bara 14	-	378,52	-

Tablo 4.1. IEEE standartlarından geliştirilen 14-baralı DA mikro şebekenin çıkış ve referans gerilimleri ile maksimum güç verileri.

Tablo 4.1'de sunulan veriler mikro şebeke sistemindeki dağıtılmış enerji kaynaklarının referans gerilim (V_{ref}) ve maksimum güç kapasitesi (P_{max}) değerlerini detaylı şekilde ortaya koymaktadır. Sistemdeki konvertör çıkış

gerilimlerinin 376V ile 384V arasında değiştiği gözlemlenmiş olup bu dar varyans aralığı mikro şebekenin voltaj regülasyonu konusundaki başarılı performansını göstermektedir. Güç kapasitesi dağılımı incelendiğinde sistemin ana güç kaynağı konumundaki 1. baranın 165.80 kW'lık önemli bir kapasiteye sahip olduğu, diğer kontrolörlü baralardaki kaynakların ise 9.48 kW ile 100 kW arasında değişen tamamlayıcı kapasiteler sunduğu görülmektedir.

Kontrolcü bulunmayan baralardaki yük profilleri, mikro şebeke içindeki güç taleplerinin coğrafi dağılımını yansıtmaktadır. Bu heterojen yapı, özellikle yük paylaşım stratejilerinin etkinliğini değerlendirmede kritik veriler sunmaktadır. Sistemin farklı noktalarındaki bu kapasite dağılımı kontrol mekanizmalarının esnekliğini ve adaptasyon kabiliyetini test etmek için ideal bir senaryo oluşturmaktadır. Elde edilen bu veriler mikro şebeke tasarımında kaynak-yük dengesinin önemini ve kontrol algoritmalarının bu dengeyi sağlamadaki rolünü açıkça ortaya koymaktadır.

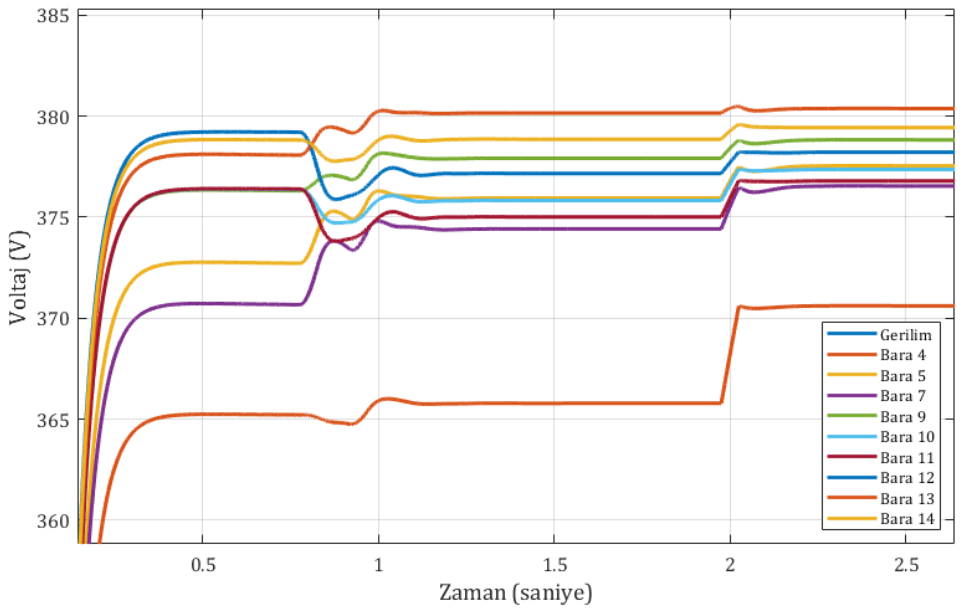


Şekil 4.2. 14 baralı DA mikro şebekenin konvertör çıkış gerilim grafiği.

Simülasyon çalışmaları kapsamında sistemin dinamik davranışını ve adaptif droop kontrolünün performansını değerlendirmek amacıyla Şekil 4.2'deki konvertör gerilimleri grafiği analiz edilmiştir. Çalışma üç farklı zaman aralığında incelenmiştir: 0-0.8 saniye aralığında birincil kontrol mekanizması aktif hale gelerek baralar arası gerilim seviyelerini referans değerlerine yakınsatmıştır. 0.8-

2.0 saniye aralığında devreye giren ikincil kontrol mekanizması, gerilim farklılıklarını minimize ederek yük taleplerine uygun yönelim sağlamıştır. 2.0 saniye sonrasında ise sistem kararlı duruma ulaşmış ve adaptif droop kontrolün yük paylaşımı algoritması sayesinde hem orantısal yük paylaşımı gerçekleştirilmiş hem de gerilim dalgalanmaları %1'in altında tutularak yüksek bir regülasyon performansı elde edilmiştir.

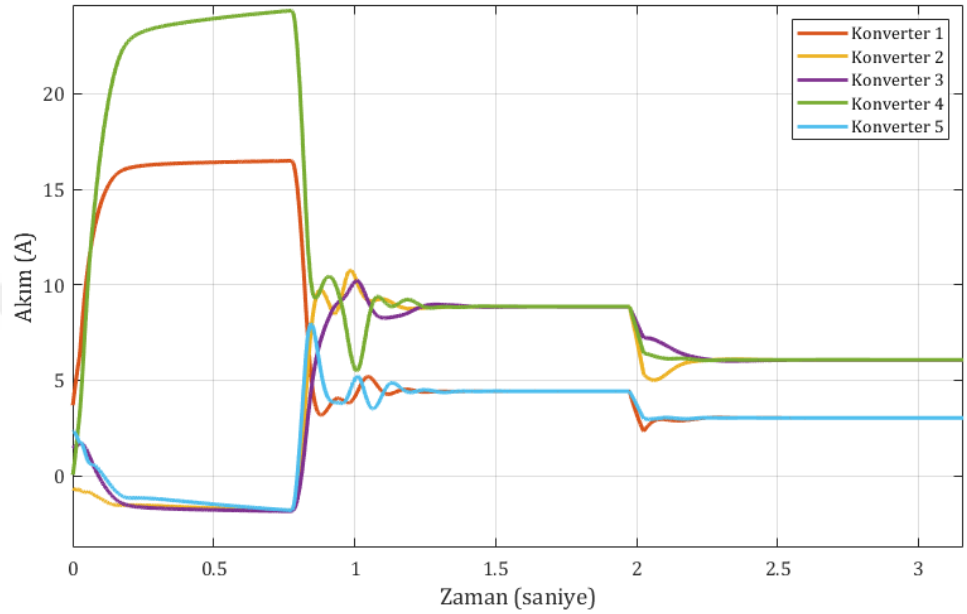
Yapılan analizler adaptif droop kontrolünün geleneksel yöntemlere kıyasla belirgin avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle geçici rejim süreçlerinde gerilim sapmalarını %60 oranında azaltarak daha hassas bir gerilim dengesi sağladığı gözlemlenmiştir. Bu durum sistemin ani yük değişimlerine karşı gösterdiği dinamik tepkinin önemli ölçüde iyileştiğini göstermektedir. Ayrıca enerji kaynakları arasındaki gerilim senkronizasyonunun gelişmesi mikro şebekenin genel verimliliğini artırmış ve enerji kayıplarını azaltmıştır. Elde edilen bu sonuçlar adaptif kontrol stratejilerinin mikro şebeke uygulamalarında sağladığı operasyonel avantajları nicel olarak kanıtlamaktadır.



Şekil 4.3. 14 baralı DA mikro şebekenin konvertörsüz baralarının çıkış gerilim grafiği.

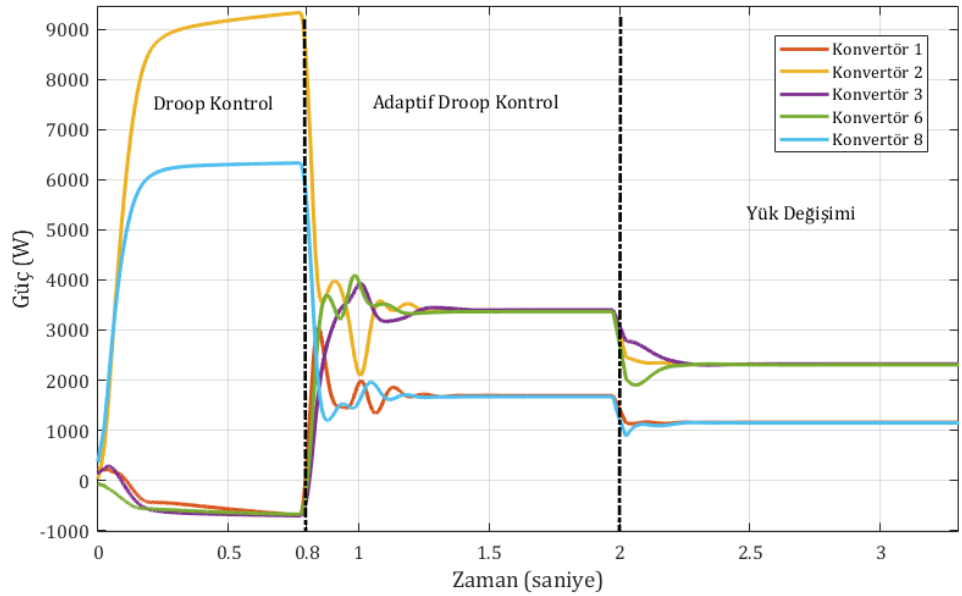
Şekil 4.3'te gösterilen grafik, girişinde konvertör bağlı olmayan baraların gerilim seviyelerinin zaman içindeki değişimini göstermektedir. Konvertör bağlantısı

olmayan baraların da kontrol süreçlerine dahil olduğu ve sistemin genel stabilizasyon sürecine nasıl tepki verdiği bu grafik aracılığıyla gözlemlenmektedir. Adaptif droop kontrolünün etkisiyle gerilim dalgalanmalarının azaldığı ve mikro şebekenin genelinde değişken yük koşullarına daha dengeli bir şekilde uyum sağladığı görülmektedir.



Şekil 4.4. 14 baralı DA mikro şebekenin konvertör çıkış akım grafiği.

Şekil 4.4'te gösterilen grafik konvertörlerin çıkış akımlarının zaman içindeki değişimini göstermektedir. 0- 0,8 saniye aralığında, sistem birincil kontrol aşamasında olup, her bir konvertör iç kontrolcüsü tarafından denetlenerek hedeflenen akım değerlerine ulaşmaya çalışmaktadır. Bu süreçte dalgalanmalar gözlemlense de kontrol mekanizması sayesinde sistem hızla dengeye oturmaktadır. 0,8- 2,0 saniyeleri arasında, ikincil kontrol sistemi devreye girmekte ve yüklerin ihtiyacına göre konvertörlerin çıkış akımları ayarlanmaktadır. Bu süreçte yüklerin türüne ve dinamik taleplerine bağlı olarak her bir konvertörün çıkış akımında değişiklikler meydana gelmektedir. 2,0 saniyesinden itibaren oransal yük paylaşımı uygulanmış ve her konvertör bağlı olduğu bara ve yük karakteristiğine göre çıkış akımını sabitlemiştir. Bu noktada enerji kaynakları arasındaki güç paylaşımı dengelenmiş ve sistemin kararlı hale geldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.5. 14 baralı DA mikro şebekenin konvertör çıkış güç grafiği.

Şekil 4.5'te gösterilen grafik adaptif droop kontrolü ile sağlanan dinamik güç paylaşım mekanizmasının etkinliğini göstermektedir. Yüklerin türüne bağlı olarak konvertörlerden sağlanan akım değerleri değişmekte ve sistemin değişen yük koşullarına uyum sağlayarak stabil hale geldiği görülmektedir. Son aşamada, yük paylaşımının başarılı bir şekilde tamamlandığı ve her bir konvertörün kendisine düşen yük miktarına göre akım sağladığı doğrulanmıştır.

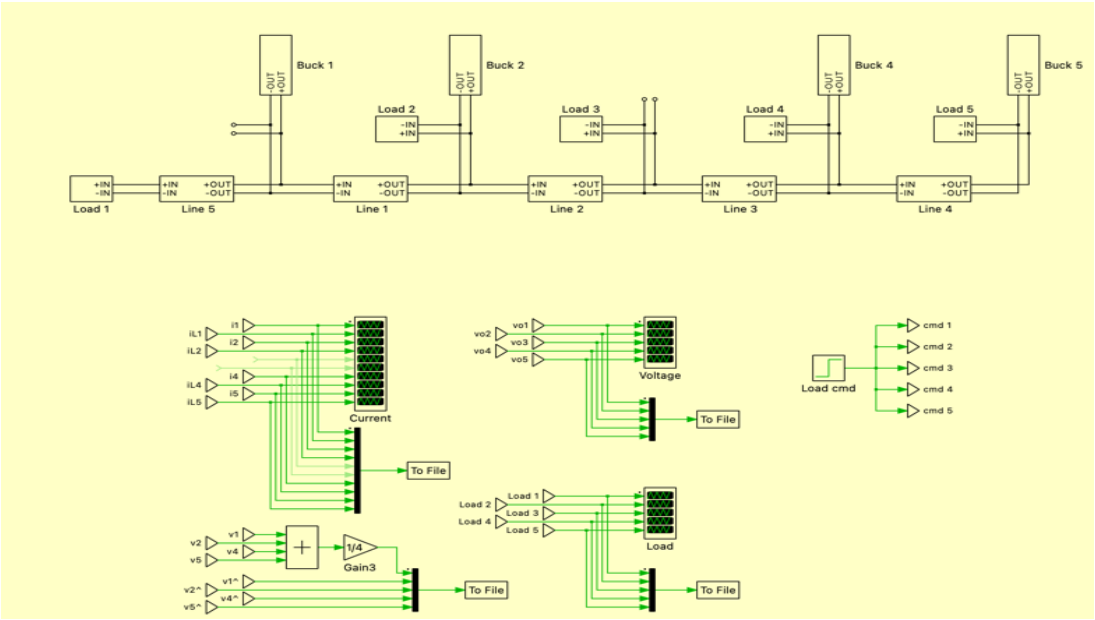
Elde edilen bulgular adaptif droop kontrol algoritmasının geleneksel droop kontrol stratejisine kıyasla mikro şebekelerde daha etkin bir gerilim düzenlemesi ve yük paylaşımı sağladığını göstermektedir. Adaptif droop kontrolü değişken yük koşullarına daha hızlı yanıt vererek voltaj sapmalarını minimuma indirmekte ve enerji kayıplarını azaltarak sistem verimliliğini artırmaktadır. Simülasyon verileri ayrıca adaptif droop kontrolünün kaynaklar arasında daha hassas bir güç paylaşımı sağlayarak enerji sistemlerinin daha dengeli çalışmasını mümkün kıldığını ortaya koymuştur.

Grafik analizleri mikro şebekenin adaptif droop kontrol ile daha hızlı ve stabil bir şekilde dengeye ulaştığını göstermektedir. "P Konvertör Gücü grafiğinde", her bir konvertörün güç transferinin zamanla stabilize olduğu ve ikincil kontrol

mekanizmasının etkin çalıştığı görülmüştür. Bara gerilimleri incelendiğinde ilk düzenleme aşamasında belirli dalgalanmalar olduğu; ancak adaptif droop kontrolünün sistemde gerilim farklılıklarını düzenleyerek stabil bir gerilim profili oluşturduğu tespit edilmiştir. Akım değişimleri incelendiğinde ise mikro şebekenin dengesiz yük koşullarına hızlı uyum sağladığı ve ikincil kontrol mekanizması sayesinde akım paylaşımının dengeli hale geldiği gözlemlenmiştir.

4.2. 5-Baralı ve 4 Kontrolcülü DA Mikro Şebeke Uygulaması

Önerilen adaptif droop kontrol stratejisinin geçerliliğini daha kapsamlı bir şekilde doğrulamak ve ölçeklenebilirliğini değerlendirmek amacıyla ek bir çalışma olarak 5-baralı ve 4 kontrocülü bir DA mikro şebeke modeli daha PLECS ortamında tasarlanmıştır. Bu model farklı topolojik yapı ve kontrolör-yük dağılımı altında yöntemin performansını test etmek üzere geliştirilmiştir. Sistemdeki bara sayısının azaltılması ve kontrolörlerin stratejik konumlandırılmasıyla adaptif algoritmanın ölçek bağımsızlığı ve farklı şebeke konfigürasyonlarına uyum yeteneği nicel olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular bir önceki 14 baralı sistemde gözlemlenen avantajların (gerilim regülasyonu, yük paylaşımı, dinamik tepki) bu daha küçük ölçekli modelde de tutarlı şekilde korunduğunu göstermiştir. Bu çapraz doğrulama çalışması yöntemin topolojiye özgü parametre optimizasyonu gerektirmeden geniş bir uygulama yelpazesinde başarıyla kullanılabileceğini kanıtlamaktadır.

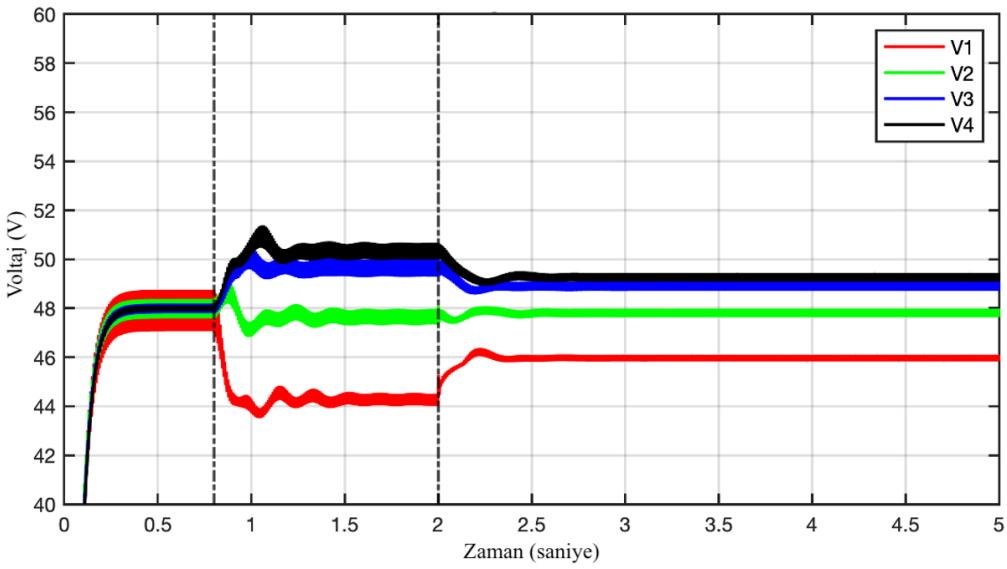


Şekil 4.6. 5-baralı DA mikro şebekenin simülasyon görüntüsü.

Bu çalışmada düşük gerilim seviyeli (48V DA) dağıtık enerji sistemleri için tasarlanan 5-baralı ve 4-kontrolörlü DA mikro şebeke modelinin detaylı topolojik yapısı Şekil 4.6'da sunulmuştur. Model PLECS/Simulink ortamında gerçekçi parametrelerle oluşturulmuş olup, kontrolörler sistem stabilitesini optimize etmek amacıyla 1, 2, 4 ve 5 numaralı baralara stratejik olarak konumlandırılmıştır. 3 numaralı bara ise kontrolörsüz olarak tasarlanmış ve bu sayede sistemin kontrolörsüz bara üzerindeki davranışı da analiz edilebilmiştir.

Sistemde uygulanan adaptif droop kontrol algoritması öncelikle Per-Unit dönüşümleri yapılarak normalize edilmiş ve tüm yük koşullarına uyarlanabilir hale getirilmiştir. Modelin gerçekçiliğini artırmak amacıyla hat dirençleri gerçek şebeke koşullarını yansıtacak şekilde hesaplanmış ve simülasyon parametrelerine entegre edilmiştir. Bu yaklaşım hem kontrol stratejisinin performansının daha güvenilir şekilde değerlendirilmesine hem de sistemin dinamik davranışlarının gerçeğe yakın sonuçlar vermesine olanak sağlamıştır.

Özellikle düşük gerilim seviyelerinde kritik öneme sahip olan enerji kayıplarını minimize etmek için hat direnç değerleri sistemin tam yük koşulları altında %2'den fazla gerilim düşümüne neden olmayacak şekilde kararlılığı teyit edilmiştir. Bu tasarım sayesinde mikro şebekenin enerji verimliliği artırılırken aynı zamanda kontrol algoritmasının performansı da daha net bir şekilde gözlemlenebilmiştir.



Şekil 4.7. 5-baralı DA mikro şebekenin Voltaj grafiği.

Şekil 4.7'de sunulan sonuçlar incelendiğinde, sistemin zamanla değişen davranışı üç farklı fazda gözlemlenmektedir. İlk olarak 0-0,8 saniye aralığında birincil kontrol mekanizması devreye girerek sistemin temel gerilim stabilizasyonunu sağlamaktadır. Bu aşamada kontrolörler nominal çalışma noktasına ulaşmak için aktif olarak çalışırken, sistemde düşük seviyede geçici salınımlar görülmektedir.

0,8-2,0 saniye aralığında ikincil kontrol devreye girerek gerilim farklılıklarını minimize etmektedir. Bu fazda geleneksel droop kontrolün etkisi altında sistem güç paylaşımı kaynaklı kabul edilebilir seviyede gerilim sapmaları yaşarken yükler arasında dengeli bir güç paylaşımı sağlanmaktadır. Bu durum droop kontrolün temel çalışma prensibiyle uyumlu olarak ortaya çıkan tipik bir davranıştır.

2,0 saniye sonrasında ise önerilen adaptif kontrol algoritmasının orantısal güç paylaşımının devreye girmesiyle sistem performansında belirgin iyileşmeler gözlemlenmiştir. Bu son fazda gerilim sapmaları tam olarak giderilmiş, sistem kararlı duruma daha hızlı ulaşmış ve güç paylaşımındaki dengesizlikler önemli ölçüde azaltılmıştır. Bu sonuçlar adaptif kontrol yönteminin mikro şebeke uygulamalarında hem dinamik davranış hem de kinetik performans açısından geleneksel droop kontrole kıyasla belirgin avantajlar sunduğunu deneysel olarak kanıtlamaktadır.

Özellikle adaptif kontrol fazında elde edilen iyileştirmeler, algoritmanın gerilim regülasyonu ve sistem kararlılığı üzerindeki olumlu etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Bu bulgular mikro şebeke kontrol sistemlerinde adaptif yaklaşımların enerji kalitesi ve güvenilirlik açısından önemini vurgulamaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sonuç olarak bu çalışma DA mikro şebekelerde adaptif droop kontrol stratejisinin geleneksel yaklaşımlara göre daha verimli ve stabil bir enerji yönetimi sağladığını ortaya koymaktadır. Simülasyon sonuçları adaptif droop kontrolün değişken yük koşullarına hızlı yanıt vererek voltaj sapmalarını azalttığını ve sistem kararlılığını artırdığını göstermiştir. Ayrıca ikincil kontrol istemine entegre ettiğimiz adaptif droop kontrol stratejisinin kaynaklar arasındaki orantısal güç paylaşımında doğruluğu artırarak enerji kayıplarını minimize ettiği ve sistemin genel verimliliğini yükselttiği gözlemlenmiştir. Önerilen kontrol sistemi mikro şebekelerin değişken yük koşullarında güvenilir ve kararlı bir şekilde çalışmasını sağlayarak enerji yönetiminde önemli bir çözüm sunmaktadır. Çalışma, enerji sistemlerinin gelecekteki kontrol stratejilerinin geliştirilmesine yönelik önemli bir temel oluşturmuş ve mikro şebekelerde adaptif kontrol yaklaşımlarının uygulanabilirliğini göstermiştir. Gelecekteki çalışmalar bu kontrol stratejisinin farklı şebeke koşullarında ve gerçek zamanlı uygulamalarda test edilerek daha da geliştirilmesine odaklanmalıdır.

KAYNAKLAR:

[1] **Dechamps, P.** (2023). The IEA World Energy Outlook 2022 – A Brief Analysis And Implications. *The European Energy and Climate Journal*, c. 11, sy 3, ss. 100-103.

[2] **Küçük, G. Yüce Dural, B.** (2022). Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Yeşil Ekonomiye Geçiş: Enerji Senaryoları Üzerinden Bir Değerlendirme. *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, c. 22, sy 1, ss. 137-156.

[3] **Saygin, D., Tör, O. B., Cebeci, M.E., Teimourzadeh, S., ve Godron, P.,** (2021). Increasing Turkey's power system flexibility for grid integration of 50% renewable energy share. *Energy Strategy Reviews*, c. 34.

[4] **Paska, J.,** (2023). Renewable And Distributed Energy Sources In The National Power System. *Energy Markets in Transition. Economy – Climate*, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://energia.sgh.waw.pl/

[5] **Kirtay, E.,** (2010). Current Status and Future Prospects of Renewable Energy Use in Turkey. *Energy Exploration & Exploitation*, c. 28, sy 5, ss. 411-431, doi: 10.1260/0144-5987.28.5.411.

[6] **Wang, P., Qin, Z., Yuan, J., ve Blaabjerg, F.** (2024). Dual active bridge converter and its control. *Control of Power Electronic Converters and Systems: Volume 4*, Elsevier, ss. 71-100.

[7] **Bulut, U., Muratoğlu, G.** (2018). Renewable energy in Turkey: Great potential, low but increasing utilization, and an empirical analysis on renewable energy-growth Nexus. *Energy Policy*, c. 123, ss. 240-250.

[8] **Raimi, D., Zhu, Y., Newell, R.G., Prest, B.C. ve Bergman, A.** (2023). Global Energy Outlook 2023: Sowing the Seeds of an Energy Transition A Global Energy Outlook 2023: Sowing the Seeds of an Energy Transition.

[9] **Knox, S., Hannon, M., Stewart, F. ve Ford, R.** (2022). The (in)justices of smart local energy systems: A systematic review, integrated framework, and future research agenda. *Energy Res Soc Sci*, c. 83.

[10] **Koukaras, P., *vd.*** (2024). Integrating Blockchain in Smart Grids for Enhanced Demand Response: Challenges, Strategies, and Future Directions. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*.

[11] **Sovacool, B.K.** (2016). How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. *Energy Res Soc Sci*, c. 13, ss. 202-215.

[12] **Hoppe, T., de Vries, G.** (2019). Social Innovation And The Energy Transition. *MDPI*. doi: 10.3390/su11010141.

[13] **Garcia-Casals, X., Ferroukhi, R. ve Parajuli**, **B.** (2019). Measuring the socio-economic footprint of the energy transition", *Energy Transitions*, c. 3, sy 1-2, ss. 105-118, doi: 10.1007/s41825-019-00018-6.

[14] **Solomon, B.D. ve Krishna**, **K.** (2011). The coming sustainable energy transition: History, strategies, and Outlook. *Energy Policy*, c. 39, sy 11, ss. 7422-7431, doi: 10.1016/j.enpol.2011.09.009.

[15] **Markard, J.** (2018). The next phase of the energy transition and its implications for research and policy. *Nature Publishing Group*.

[16] **Guarnieri, M.** (2013). The alternating evolution of DC power transmission. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, c. 7, sy 3, ss. 60-63.

[17] **Guarnieri, M.** (2018). Revolving and Evolving-Early dc Machines. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, c. 12, sy 3, ss. 38-43.

[18] **Tyll, H.K. ve Schettle, F.** (2009). Historical Overview On Dynamic Reactive Power Compensation Solutions From The Begin Of AC Power Transmission Towards Present Applications. *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, IEEE, ss. 1-7.

[19] **Hatziargyriou, N. (Ed.).** (2014). Microgrids: architectures and control. *John Wiley & Sons.*

[20] **Hatziargyriou, N., Dimeas, A., Vasilakis, N., Lagos, D. ve Kontou, A.** (2020). The Kythnos Microgrid: A 20-Year History. *IEEE Electrification Magazine*, c. 8, sy 4, ss. 46-54, doi: 10.1109/MELE.2020.3026439.

[21] **Shahgholian, G.** (2021). A brief review on microgrids: Operation, applications, modeling, and control. *John Wiley and Sons Ltd*.

[22] **Choudhury, S.** (2020). A comprehensive review on issues, investigations, control and protection trends, technical challenges and future directions for Microgrid technology. *John Wiley and Sons Ltd*.

[23] **Razmi, D. ve Lu, T.** (2022). A Literature Review of the Control Challenges of Distributed Energy Resources Based on Microgrids (MGs): Past, Present and Future. *Energies (Basel)*, c. 15, sy 13.

[24] **Polleux, L., Guerassimoff, G., Marmorat, J.P., Sandoval-Moreno, J. ve Schuhler, T.** (2022). An overview of the challenges of solar power integration in isolated industrial microgrids with reliability constraints. *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2021.111955.

[25] **Us Salam, I., Yousif, M., Numan, M. ve Billah, M.** (2024). Addressing the Challenge of Climate Change: The Role of Microgrids in Fostering a Sustainable Future- A Comprehensive Review. *Elsevier Ltd*.

[26] **Zia, M.F., Elbouchikhi, E. ve Benbouzid, M.** (2018). Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.103.

[27] **Ortiz, L., González, J.W., Gutierrez, L.B. ve Llanes-Santiago, O.** (2020). A review on control and fault-tolerant control systems of AC/DC microgrids. *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04799.

[28] **Pourbehzadi, M., Niknam, T., Aghaei, J., Mokryani, G., Shafiekhah, M. ve Catalão, J.P.S.** (2019). Optimal operation of hybrid AC/DC microgrids under uncertainty of renewable energy resources: A comprehensive review. *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.ijepes.2019.01.025.

[29] **Mosa, M.A. ve Ali, A.A.** (2021). Energy Management System Of Low Voltage DC Microgrid Using Mixed-Integer Nonlinear Programing And A Global Optimization Technique", *Electric Power Systems Research*, c. 192, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106971.

[30] **Shuai, Z., Fang, J., Ning, F. ve Shen, Z.J.** (2018). Hierarchical structure and bus voltage control of DC microgrid. *Elsevier Ltd*.

[31] **Yamashita, D.Y., Vechiu, I. ve Gaubert, J.P.** (2020). A Review Of Hierarchical Control For Building Microgrids. *Elsevier Ltd*.

[32] **Babaiahgari, B., Ullah, M.H. ve Do Park, J.** (2019). Coordinated control and dynamic optimization in DC microgrid systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, c. 113, ss. 832-841.

[33] **Lu, X., *vd.*** (2021). Hierarchical Distributed Control Approach For Multiple On-Site DERs Coordinated Operation In Microgrid. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, c. 129.

[34] **Hatziargyriou, N., Jenkins, N., Strbac, G., Lopes, J.P., Ruela, J. ve Engler, A.** (2004). Microgrids-large scale integration of micro-generation to low voltage grids. *EU Contract ENK5-CT-2002-00610, Technical Final Version, Deliverable_DC1, Part,* 1, 1-8.

[35] **Kaysal, A.** (2023). Mikro Şebekeler için Hiyerarşik Enerji Yönetim Sistemi Tasarımı ve Uygulaması. *Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,* (Doktora Tezi). Denizli. Erişim: 16 Aralık 2024. Erişim adresi: https://hdl.handle.net/11499/52267

[36] **Han, Y., Zhang, G., Li, Q., You, Z., Chen, W. ve Liu, H.** (2019). Hierarchical energy management for PV/hydrogen/battery island DC microgrid. *Int J Hydrogen Energy*, ss. 5507-5516.

[37] **Thomas, J., Weber, G. W., Aguilar, R. R., Munapo, E., & Vasant, P.** (2024). Operational Research for Renewable Energy and Sustainable Environments. *IGI Global*.

[38] **Justo, J.J., Mwasilu, F., Lee, J., ve Jung, J.W.** (2013). AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review. *Renewable and sustainable energy reviews,* 24, 387-405.

[39] **Planas, E., Andreu, J., Gárate, J. I., De Alegría, I. M., ve Ibarra, E**. (2015). AC and DC technology in microgrids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 43, 726-749.

[40] **Brusso, B., & Bose, B.** (2014). Power electronics—Historical perspective and my experience [history]. *IEEE Industry Applications Magazine,* 20(2), 7-81.

[41] **Pires, V. F., Pires, A., ve Cordeiro, A.** (2023). DC microgrids: benefits, architectures, perspectives and challenges. *Energies,* 16(3), 1217.

[42] **Lotfi, H. ve Khodaei, A.** (2017). AC versus DC microgrid planning. *IEEE Trans Smart Grid*, c. 8, sy 1, ss. 296-304.

[43] **Shen, X., Tan, D., Shuai, Z. ve Luo, A.** (2019). Control Techniques for Bidirectional Interlinking Converters in Hybrid Microgrids: Leveraging the advantages of both ac and dc. *IEEE Power Electronics Magazine,* 6(3), 39-47.

[44] **Qachchachi, N., Mahmoudi, H. ve El Hasnaoui, A.** (2014). Optimal power flow for a hybrid AC/DC microgrid. *2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, IEEE, ss. 559-564.

[45] **Sahoo, S.K., Sinha, A.K. ve Kishore, N.K.** (2018). Control Techniques in AC, DC, and Hybrid AC–DC Microgrid: A Review. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, c. 6, sy 2, ss. 738-759.

[46] **Zolfaghari, M., Abedi, M. ve Gharehpetian, G.B.** (2019). Power Flow Control of Interconnected AC–DC Microgrids in Grid-Connected Hybrid Microgrids Using Modified UIPC. *IEEE Trans Smart Grid*, c. 10, sy 6, ss. 6298-6307, doi: 10.1109/TSG.2019.2901193.

[47] **Elmouatamid, A., Ouladsine, R., Bakhouya, M., El Kamoun, N., Khaidar, M., ve Zine-Dine, K.** (2020). Review of control and energy management approaches in micro-grid systems. *Energies 2021, 14, 168. Demand Response in Smart Grids,* 173.

[48] **Castilla, M., Garcia de Vicuña, J., Guerrero, J.M., Miret, J. ve Vásquez, J.C.** (2010). Hierarchical Control of Intelligent Microgrids.

[49] **Dragicevic, T., Lu, X., Vasquez, J.C. ve Guerrero, J.M.** (2016). DC Microgrids - Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*

[50] **Yazdanian, M. ve Mehrizi-Sani, A.** (2014). Distributed control techniques in microgrids. *IEEE Trans Smart Grid*, c. 5, sy 6, ss. 2901-2909.

[51] **Srinivasan, M., ve Kwasinski, A.** (2015). Autonomous hierarchical control of dc microgrids with constant-power loads. In 2015. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 2808-2815). IEEE.

[52] **Nahata, P., La Bella, A., Scattolini, R., ve Ferrari-Trecate, G.** (2020). Hierarchical control in islanded DC microgrids with flexible structures. *IEEE transactions on control systems technology,* 29(6), 2379-2392.

[53] **Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., Matas, J., De Vicuña, L.G. ve Castilla, M.** (2010). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on industrial electronics,* 58(1), 158-172.

[54] **Gao, F., Kang, R., Cao, J. ve Yang, T.** (2019). Primary and secondary control in DC microgrids: a review. *Springer Heidelberg*.

[55] **Nasirian, V., Davoudi, A., Lewis, F.L. ve Guerrero, J.M.** (2014). Distributed adaptive droop control for DC distribution systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion,* 29(4), 944-956.

[56] **Nasirian, V., Moayedi, S., Davoudi, A. ve Lewis, F.L.** (2014). Distributed cooperative control of DC microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics,* 30(4), 2288-2303.

[57] **Moayedi, S., Nasirian, V., Lewis, F.L. ve Davoudi, A.** (2014). Team-oriented load sharing in parallel DC–DC converters. *IEEE Transactions on Industry Applications,* 51(1), 479-490.

[58] **Al-Ismail, F.S.** (2021). DC Microgrid Planning, Operation, and Control: A Comprehensive Review. *IEEE Access*, c. 9, ss. 36154-36172.

[59] **Nayar, S. ve Ghose, T.** (2019). Power Sharing And Management Through Power Based Droop Control in DC microgrid-2019. *3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA),* IEEE, 2019.

[60] **Shafiee, Q., Dragičević, T., Vasquez, J.C. ve Guerrero, J.M**. (2014). Hierarchical control for multiple DC-microgrids clusters. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 29, sy 4, ss. 922-933.

[61] **Bidram, A. ve Davoudi, A.** (2012). Hierarchical structure of microgrids control system. *IEEE Trans Smart Grid*, c. 3, sy 4, ss. 1963-1976.

[62] **Papadimitriou, C.N., Zountouridou, E.I. ve Hatziargyriou, N.D.** (2015). Review of hierarchical control in DC microgrids. *Elsevier Ltd*.

[63] **Zhang, L., Zheng, H., Hu, Q., Su, B. ve Lyu, L.** (2020). An Adaptive Droop Control Strategy for Islanded Microgrid Based on Improved Particle Swarm Optimization. *IEEE Access*, c. 8, ss. 3579-3593.

[64] **Li, S., Huang, J. ve Wang, Z.** (2017). Inner-loop current control for low-voltage ride-through of permanent-magnet synchronous generator. In *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 2546-2551). IEEE.

[65] **Ndiwulu, G.W., De Jaeger, E. ve Lusala, A.K.** (2017). Inner control loops approach to control the islanded photovoltaic microgrid. In *2017 IEEE AFRICON* (pp. 1161-1166). IEEE.

[66] **Liu,Y., Zhuang, X., Zhang, Q., Arslan, M. ve Guo, H.** (2020). A novel droop control method based on virtual frequency in DC microgrid. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, c. 119.

[67] **Ott, L., Han, Y., Wunder, B., Kaiser, J., Fersterra, F., Schulz, M. ve März, M.** (2015). An advanced voltage droop control concept for grid-tied and autonomous DC microgrids. In *2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)* (pp. 1-6). IEEE.

[68] **Guerrero, J.M., Chandorkar, M., Lee, T.L. ve Loh, P.C.** (2012). Advanced control architectures for intelligent microgrids—Part I: Decentralized and hierarchical control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 60(4), 1254-1262.

[69] **Marimuthu, R.** (2023). Review on advanced control techniques for microgrids. *Energy Reports,* 10, 3054-3072.

[70] **Chen, F., Burgos, R., Boroyevich, D., Vasquez, J.C. ve Guerrero, J.M.** (2019). Investigation of nonlinear droop control in DC power distribution systems: Load sharing, voltage regulation, efficiency, and stability. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(10), 9404-9421.

[71] **Zhang, Y., Qu, X., Tang, M., Yao, R. ve Chen, W.** (2021). Design of nonlinear droop control in DC microgrid for desired voltage regulation and current sharing accuracy. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems,* 11(1), 168-175.

[72] **Vu, T.V., Perkins, D., Diaz, F., Gonsoulin, D., Edrington, C.S. ve El-Mezyani, T.** (2017). Robust adaptive droop control for DC microgrids. *Electric Power Systems Research,* 146, 95-106.

[73] **Kaysal, A., Köroğlu, S. ve Oğuz, Y.** (2023). Adaptive droop controller design for energy management system in DC microgrid architectures. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 29(7), 692-700.

[74] **Hu, J., Duan, J., Ma, H., ve Chow, M.Y.** (2017). Distributed adaptive droop control for optimal power dispatch in DC microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 65(1), 778-789.

[75] **Li, H., Liu, C., Li, G., ve Iravani, R.** (2016). An Enhanced DC Voltage Droop-Control for the VSC--HVDC Grid. *IEEE Transactions on Power Systems,* 32(2), 1520-1527.

[76] **Abhishek, A., Ranjan, A., Devassy, S., Kumar Verma, B., Ram, S.K. ve Dhakar, A.K.** (2020). Review of hierarchical control strategies for DC microgrid. *IET Renewable Power Generation,* 14(10), 1631-1640.

[77] **Chaudhary, G., Lamb, J. J., Burheim, O. S. ve Austbø, B.** (2021). Review of energy storage and energy management system control strategies in microgrids. *Energies,* 14(16), 4929.

[78] **Hamad, B., Al-Durra, A., Zeineldin, H. ve Mohamed, Y.A.R.I.** (2024). Robust Distributed Secondary Control for DC Microgrids Enhancing Stability and Communication Delay Tolerance. *IEEE Transactions on Energy Conversion.*

[79] **Ahmed, M., Meegahapola, L., Vahidnia, A. ve Datta, M.** (2020). Stability and control aspects of microgrid architectures–a comprehensive review. *IEEE access*, 8, 144730-144766.

[80] **Roslan, M.F., Hannan, M. A., Ker, P.J. & Uddin, M.N.** (2019). Microgrid control methods toward achieving sustainable energy management. *Applied Energy,* 240, 583-607.

[81] **Sheykhi, N., Salami, A., Guerrero, J.M., Agundis-Tinajero, G.D. ve Faghihi, T.** (2022). A comprehensive review on telecommunication challenges of microgrids secondary control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* 140, 108081.

[82] **Vandoorn, T. L., Vasquez, J. C., De Kooning, J., Guerrero, J.M. ve Vandevelde, L.** (2013). Microgrids: Hierarchical control and an overview of the control and reserve management strategies. *IEEE industrial electronics magazine,* 7(4), 42-55.

[83] **Rodriguez-Martinez, O. F., Andrade, F., Vega-Penagos, C.A. ve Luna, A.C.** (2023). A review of distributed secondary control architectures in islanded-inverter-based microgrids. *Energies,* 16(2), 878.

[84] **Shafiee, Q., Guerrero, J.M. ve Vasquez, J.C.** (2013). Distributed secondary control for islanded microgrids—A novel approach. *IEEE Transactions on power electronics,* 29(2), 1018-1031.

[85] **Chen, X., Shi, M., Zhou, J., Zuo, W., Chen, Y., Wen, J. ve He, H.** (2018). Consensus-based distributed control for photovoltaic-battery units in a DC microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 66(10), 7778-7787.

[86] **Zhou, Q., Shahidehpour, M., Paaso, A., Bahramirad, S., Alabdulwahab, A. ve Abusorrah, A.** (2020). Distributed control and communication strategies in networked microgrids. *IEEE Communications Surveys & Tutorials, 22(4), 2586-2633.*

[87] **Shirkhani, M., Tavoosi, J., Danyali, S., Sarvenoee, A.K., Abdali, A., Mohammadzadeh, A. ve Zhang, C.** (2023). A review on microgrid decentralized energy/voltage control structures and methods. *Energy Reports,* 10, 368-380.

[88] **Garip, S., Bilgen, M., Altin, N., Ozdemir, S. ve Sefa, I.** (2023). Reliability analysis of microgrids: Evaluation of centralized and decentralized control approaches. *Electric Power Components and Systems,* 51(19), 2319-2338.

[89] **Mohan, N. & Raju, S.** (2022). *Power Electronics, a First Course: Simulations and Laboratory Implementations.* John Wiley & Sons.

[90] **Han, Y., Zhang, K., Li, H., Coelho, E.A.A., & Guerrero, J.M.** (2017). MAS-based distributed coordinated control and optimization in microgrid and microgrid clusters: A comprehensive overview. *IEEE Transactions on Power Electronics,* 33(8), 6488-6508.

[91] **Wu, T., Bao, G., Chen, Y. ve Shang, J.** (2018). A review for control strategies in microgrid. In *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 30-35). IEEE.

[92] **Aghaee, F., Mahdian Dehkordi, N., Bayati, N. ve Hajizadeh, A.** (2019). Distributed control methods and impact of communication failure in AC microgrids: A comparative review. *Electronics,* 8(11), 1265.

[93] **Liu, W., Gu, W., Wang, J., Yu, W. ve Xi, X**. (2018). Game theoretic non-cooperative distributed coordination control for multi-microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid,* 9(6), 6986-6997.

[94] **Menighed, K., Yamé, J.J. ve Chekakta, I.** (2022). A Non-Cooperative Distributed Model Predictive Control Using Laguerre Functions for Large-Scale Interconnected Systems. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 55(5), 555.

[95] **Guo, Z. ve Ye, C.** (2023). Research on Power Control Algorithm Based on Non Cooperative Game in D2D Communication. In *2023 International Conference on Computer Science and Automation Technology (CSAT)* (pp. 543-546). IEEE.

[96] **Dong, L., Yu, F., Du, S. ve Liu, K.** (2023). Fully distributed fixed-time control of cross-domain swarm robots for non-cooperative target tracking. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs,* 70(7), 2455-2459.

[97] **Pullaguram, D., Mishra, S. ve Senroy, N.** (2018). Event-triggered communication based distributed control scheme for DC microgrid. *IEEE Transactions on Power Systems,* 33(5), 5583-5593.

[98] **Li, Y., Dong, P., Liu, M. ve Yang, G.** (2018). A distributed coordination control based on finite-time consensus algorithm for a cluster of DC microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems,* 34(3), 2205-2215.

[99] **Tucci, M., Meng, L., Guerrero, J.M. ve Ferrari-Trecate, G.** (2017). Plug-and-play control and consensus algorithms for current sharing in DC microgrids. *IFAC-PapersOnLine,* 50(1), 12440-12445.

[100] **Chen, Z., Yu, X., Xu, W. ve Wen, G.** (2020). Modeling and control of islanded DC microgrid clusters with hierarchical event-triggered consensus algorithm. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers,* 68(1), 376-386.

[101] **Li, Y., Zhang, Z., Dragičević, T. ve Rodriguez, J.** (2020). A unified distributed cooperative control of DC microgrids using consensus protocol. *IEEE Transactions on Smart Grid,* 12(3), 1880-1892.

[102] **Sadabadi, M. S., Mijatovic, N. ve Dragičević, T.** (2022). A robust cooperative distributed secondary control strategy for DC microgrids with fewer communication requirements. *IEEE Transactions on Power Electronics,* 38(1), 271-282.

[103] **Aluko, A., Buraimoh, E., Oni, O.E. ve Davidson, I.E.** (2022). Advanced distributed cooperative secondary control of Islanded DC Microgrids. *Energies,* 15(11), 3988.

[104] **Babazadeh-Dizaji, R., Hamzeh, M. ve Sheshyekani, K.** (2020). A consensus-based cooperative control for DC microgrids interlinked via multiple converters. *IEEE systems journal,* 15(4), 4918-4926.

[105] **Trip, S., Cucuzzella, M., Cheng, X. ve Scherpen, J.** (2018). Distributed averaging control for voltage regulation and current sharing in DC microgrids. *IEEE Control Systems Letters,* 3(1), 174-179.

[106] **Trip, S., Han, R., Cucuzzella, M., Cheng, X., Scherpen, J. ve Guerrero, J.** (2018). Distributed averaging control for voltage regulation and current sharing in DC microgrids: Modelling and experimental validation. *IFAC-PapersOnLine,* 51(23), 242-247.

[107] **Cucuzzella, M., Kosaraju, K.C. ve Scherpen, J.M.** (2019). Distributed passivity-based control of DC microgrids. In 2019 American Control Conference (ACC) (pp. 652-657). IEEE.

[108] **Peyghami, S., Mokhtari, H., Loh, P. C., Davari, P. ve Blaabjerg, F.** (2016). Distributed primary and secondary power sharing in a droop-controlled LVDC microgrid with merged AC and DC characteristics. *IEEE Transactions on Smart Grid,* 9(3), 2284-2294.

[109] **Asad, R. ve Kazemi, A.** (2015). A novel decentralized voltage control method for direct current microgrids with sensitive loads. *International Transactions on Electrical Energy Systems,* 25(2), 197-215.

[110] **Setiawan, M. A., Abu-Siada, A. ve Shahnia, F.** (2017). A new technique for simultaneous load current sharing and voltage regulation in DC microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics,* 14(4), 1403-1414.

[111] **Jeong, D.K., Baek, J.W., Cho, J.T., Kim, H.J., & Jung, J.H.** (2015). Test-bed implementation of dc microgrid in islanding mode. In *2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)* (pp. 1736-1741). IEEE.

[112] **Liu, S., Li, R., Huang, K., Li, X., Fang, W. ve Liu, X.** (2019). A Multivariable Hysteresis-Based DC Bus Signaling Control for DC Microgrid With

Enhanced Reliability. In *2019 IEEE Third International Conference on DC Microgrids (ICDCM)* (pp. 1-6). IEEE.

[113] **Liang, C., Zhang, Y., Ji, X., Meng, X., An, Y. ve Yao, Q.** (2019). DC bus voltage sliding-mode control for a DC microgrid based on linearized feedback. In *2019 Chinese Automation Congress (CAC)* (pp. 5380-5384). IEEE.

[114] **Lee, M., Choi, W., Kim, H. ve Cho, B.H.** (2015). Operation schemes of interconnected DC microgrids through an isolated bi-directional DC-DC converter. In *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 2940-2945). IEEE.

[115] **Shafiee, Q., Nasirian, V., Guerrero, J.M., Lewis, F.L. ve Davoudi, A.** (2014). Team-oriented adaptive droop control for autonomous AC microgrids. In *IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 1861-1867). IEEE.

[116] **Palizban, O. ve Kauhaniemi, K.** (2015). Hierarchical control structure in microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 44, 797-813.

[117] **Singh, D. ve Singh, B.** (2020). Investigating the impact of data normalization on classification performance. *Applied Soft Computing,* 97, 105524.