



T.C.

**YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

DC MİKROŞEBEKELERDE KARARLILIK

MELİH KARAMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Doç. Dr. Tuncay ALTUN

HAZİRAN – 2025

YOZGAT

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DC MİKRO ŞEBEKELERDE KARARLILIK

MELİH KARAMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Doç. Dr. Tuncay ALTUN

HAZİRAN – 2025

YOZGAT

	YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ LİSANSÜSTÜ TEZ ONAY FORMU
---	---

T.C.

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Enstitümüzün Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı 91111722041 numaralı öğrencisi Melih KARAMAN'nın hazırladığı “**DC Mikroşebekelerde Kararlılık**” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince / / günü saat : 'da yapılmış, tezin onayına oy birliği/oy çokluğu ile karar verilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Esma UZUNHİSARCIKLI

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Tuncay ALTUN
(Danışman)

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Sinan YİĞİT

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun / / tarih ve sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

..... / / 20.....

İmza

Prof. Dr.

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan eder, aksi bir durumda aleyhine doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğini beyan ederim.

Melih KARAMAN

...../...../.....

ÖN SÖZ

Bu tez çalışması, Yozgat Bozok Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimim süresince edindiğim bilgi birikimini uygulamaya dökme fırsatı sunmuştur. DC mikroşebekelerde kararlılığın sağlanması amacıyla önerilen dağıtılmış adaptif droop kontrol yöntemi, enerji yönetimi alanında daha verimli ve güvenilir sistemlerin geliştirilmesine katkı sunmayı hedeflemektedir.

Çalışmanın her aşamasında akademik ve moral desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle yol gösterici olan danışmanım Doç. Dr. Tuncay Altun'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Akademik yolculuğum boyunca bana destek olan, bilgi ve deneyimlerini paylaşan tüm öğretim üyelerine ve bölüm çalışanlarına da ayrıca teşekkür ederim.

Ayrıca, yüksek lisans eğitimim süresince manevi desteğini her zaman hissettiren sevgili eşim Fatma Betül Karaman'a ve aileme sonsuz şükranlarımı sunarım. Onların sabrı, anlayışı ve desteği olmasaydı bu süreci tamamlamak mümkün olmayabilirdi.

Melih KARAMAN

.../.../.....

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DC MİKRO ŞEBEKELERDE KARARLILIK

MELİH KARAMAN

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. TUNCAY ALTUN

Bu çalışma, DC mikro şebekelerde güç paylaşımı ve gerilim regülasyonunu iyileştirmek amacıyla dağıtılmış adaptif droop kontrol yöntemini ele almaktadır. Geleneksel sabit droop kontrol mekanizmaları, yük paylaşım doğruluğunu artırmak için yüksek droop katsayıları gerektirirken, bu durum gerilim dalgalanmalarına yol açmaktadır. Ayrıca, merkezi kontrol mekanizmaları yüksek haberleşme gereksinimi nedeniyle ölçeklenebilirlik açısından sınırlamalar taşımaktadır.

Bu araştırmada, merkezi olmayan bir kontrol yaklaşımı benimsenerek, mikro şebeke içerisindeki dönüştürücüler arasında yalnızca komşu birimler üzerinden haberleşme sağlanmıştır. Önerilen adaptif droop kontrol yöntemi, her dönüştürücünün yük paylaşım oranını çevresel bilgilere dayanarak dinamik olarak ayarlamasını mümkün kılmaktadır. Çalışmada, yöntemin doğruluğunu ve etkinliğini test etmek amacıyla simülasyon analizler gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, önerilen adaptif kontrol stratejisinin güç paylaşım doğruluğunu artırdığını, gerilim regülasyonunu iyileştirdiğini ve sistem ölçeklenebilirliği açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Bu çalışma, DC mikro şebekelerde daha verimli ve güvenilir bir enerji yönetim sisteminin geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

2025, xiii + 69 sayfa

Anahtar Kelimeler: Adaptif Droop Kontrol, Dağıtılmış Kontrol, DC Mikroşebekeler, Droop Kontrol, Gerilim Regülasyonu, Güç Paylaşımı, Merkezi Olmayan Kontrol, Ölçeklenebilirlik.

ABSTRACT

MASTER THESIS

STABILITY IN DC MICROGRID

MELİH KARAMAN

YOZGAT BOZOK UNIVERSITY

SCHOOL of GRADUATE STUDIES

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. TUNCAY ALTUN

This study addresses the distributed adaptive droop control method to enhance power sharing and voltage regulation in DC microgrids. Traditional fixed droop control mechanisms require high droop coefficients to improve load-sharing accuracy, which can lead to voltage fluctuations. Additionally, centralized control mechanisms impose scalability limitations due to high communication requirements.

In this research, a decentralized control approach is adopted, enabling communication between converters in the microgrid only through neighboring units. The proposed adaptive droop control method dynamically adjusts the power-sharing ratio of each converter based on environmental information. In the study, simulation analyzes were carried out to test the accuracy and effectiveness of the method.

The results demonstrate that the proposed adaptive control strategy enhances power-sharing accuracy, improves voltage regulation, and provides significant advantages in terms of system scalability. This study aims to contribute to the development of a more efficient and reliable energy management system in DC microgrids.

2025, xiii + 69 pages

Keywords: Adaptive Droop Control, Distributed Control, DC Microgrids, Droop Control, Voltage Regulation, Power Sharing, Decentralized Control, Scalability.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAY SAYFASI.....	ii
TEZ BEYANI.....	iii
ÖN SÖZ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar LİSTESİ	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Problem Durumu / Konunun Tanımı	2
1.2. Araştırmanın Amacı.....	4
1.3. Araştırmanın Önemi	5
1.4. Varsayımlar / Sayıtlar / Araştırmanın Hipotezleri / Soruları.....	6
1.4.1. Araştırmanın Hipotezleri.....	6
1.4.2. Araştırma Soruları.....	7
1.5. Sınırlılıklar.....	7
1.5.1. Kavramsal Sınırlılıklar	7
1.5.2 Yöntemsel Sınırlılıklar	8
1.6. Tanımlar.....	8
2. GENEL BİLGİLER.....	10
2.1. Mikroşebeke.....	10
2.2. Mikroşebekenin Tanımı	11
2.3. DC Mikroşebeke Yapısı.....	13

2.3.1. Besleyici Yapı	13
2.3.2. Tek Bara (Tek Hat) Yapı (Radyal Yapı)	14
2.3.3. Çoklu Bara (Çoklu Hat) Yapı (Radyal Yapı)	16
2.3.4. Halka (Ring) Yapı	17
2.3.5. Ağ (Mesh) Yapı	19
3. DC MİKROŞEBEKE KONTROLÜ	21
3.1. Kontrol Hedefleri	22
3.2. Kontrol Stratejileri	23
3.3. Temel Kontrol Stratejileri	24
3.3.1. Merkezi Kontrol	24
3.3.1.1. Avantajlar	24
3.3.1.2. Dezavantajlar	25
3.3.1.3. Kullanım Alanları	25
3.3.1.4. Çalışma Prensipleri	25
3.3.2. Merkezi Olmayan Kontrol	27
3.3.2.1. Droop Kontrolü	27
3.3.2.1. Droop Kontrol	29
3.3.3. Dağıtılmış Kontrol Yöntemi	33
4. DC MİKRO ŞEBEKELERİN DAĞITIK KOOPERATİF KONTROL ÇERÇEVESİ ...	35
4.1. Mikro Şebeke ve Siber Katman	38
4.2. İletişim Grafiği ve Matris Modellenmesi	39
4.3. Mikro Şebekede Veri Paylaşımı ve Kontrol Yapısı	41
4.4. Adaptif Droop Kontrol	42
4.4.1. Adaptif Droop Kontrolünün Amacı	42
4.4.2. Adaptif Droop Kontrolünün Matematiksel Modeli	43
4.4.2.1. Yerel Gerilim Set Noktası (Voltage Set Point)	43

4.4.3 Adaptif Droop Kontrolünün Performans Avantajları	44
4.5. Gerilim Regülatörü (Voltage Regulator)	44
4.6. Voltaj Gözlemcisi (Voltage observer)	45
4.6.1. Voltaj Gözlemcisinin Amacı ve İşleyişi	45
4.6.2. Voltaj Gözlemcisinin Matematiksel Modeli	46
4.6.3. Dinamik Konsensüs Protokolü.....	46
5. GEREÇ VE YÖNTEM.....	48
5.1. Materyal	48
5.2. Metot	48
5.2.1. Simülasyon Yöntemi.....	48
5.2.2. Performans Değerlendirme	48
6. BULGULAR	50
6.1. Simülasyon.....	50
6.2. Simülasyon.....	50
6.2.1. Bara Gerilimlerinin Zamanla Değişimi.....	51
6.2.2. Kaynak Akımlarının Zamanla Değişimi	52
7. TARTIŞMA.....	57
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	59
9. KAYNAKLAR.....	61
EKLER	67

TABLolar LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Mikroşebe yapı sınıfları.....	13
Tablo 3.1. Droop kontrolünün iyileştirilmesi için kullanılan yöntemler	32
Tablo 4.1. Geleneksel droop kontrolü ve önerilen adaptif droop kontrolü karşılaştırılması.....	44



ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Mikroşebekelerin tipik sınıflandırılması	10
Şekil 2.2. Besleyici tipi DC mikroşebeke	14
Şekil 2.3. Tek bara (tek hat) tipi DC mikroşebeke	14
Şekil 2.4. Tek bara topolojisinin tipik bir örneğinin şeması: (a) şebekeye bağlı ve (b) ada modunda çalışma.	15
Şekil 2.5. Çoklu bara tipi DC mikroşebeke	16
Şekil 2.6. Radyal topolojinin tipik bir örneğinin şeması: (a) seri yapılandırma ve (b) paralel yapılandırma.....	17
Şekil 2.7. Tekli halka tipi DC mikroşebeke	18
Şekil 2.8. Çoklu halka tipi DC mikroşebeke	19
Şekil 2.9. Halka topolojisinin tipik bir örneğinin şeması	19
Şekil 2.10. Ağ yapı tipi DC mikroşebeke.....	20
Şekil 2.11. Ağ topolojisinin tipik bir örneğinin şeması.....	20
Şekil 3.1. DC mikroşebeke kontrol diyagramı	21
Şekil 3.2. Merkezi kontrol şemasının şematik diyagramı.	26
Şekil 3.3. Şematik diyagram Master-slave kontrolü.	27
Şekil 3.4. Merkezi olmayan kontrol şemasının şematik diyagramı.	29
Şekil 3.5. Önerilen dağıtılmış kontrol politikası: tek bir etken (dönüştürücü) için işbirlikçi adaptif droop kontrolü	31
Şekil 3.6. Dağıtık kontrol şemasının şematik diyagramı.....	34
Şekil 4.1. Şebekeyi besleyen enerji kaynakları ve kaynaklar arasında veri alışverişini kolaylaştıran siber ağ da dahil olmak üzere bir DC mikro şebekesinin genel düzeni.	35
Şekil 4.2. Bir DC mikro şebekesinin genel düzeni: şebekeyi besleyen dönüştürücüler .	38
Şekil 4.3. Bir DC mikro şebekesinin genel düzeni: veri değişimi için kaynaklar arasında uzanan iletişim ağı.....	38
Şekil 6.1. Simülasyon devresi	50
Şekil 6.2. Bara gerilimleri	50
Şekil 6.3. Kaynak akımları	52
Şekil 6.4. Yük akımı.....	53
Şekil 6.5. Bara gerilimlerinin zamanla değişimi	54
Şekil 6.6. Kaynak akımlarının zamanla değişimi (DC mikroşebeke)	55
Şekil 6.7. DC Şebekede yük akımının zamanla değişimi.....	56

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A

: Amper

V

: Gerilim

W

: Watt

Kısaltmalar

Açıklamalar

AC

: Alternatif Akım

DC

: Doğru Akım

DEK

: Dağıtılmış Enerji Kaynakları

PV

: Fotovoltaik

DCMG

: DC Mikroşebeke

ESD

: Enerji Depolama Sistemleri

VSC

: Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü

HBC

: Yüksek Bant Genişliği İletişimi

CSI

: Sabit Kaynaklı İnvertör

DCL

: Dijital İletişim Bağlantıları

CPL

: Sabit Güç Yükleri

1. GİRİŞ

Günümüzde, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması ve enerji verimliliği gereksinimleri, doğru akım (DC) mikro şebekelerinin (mikro şebekelerin) enerji dağıtım sistemlerinde giderek daha fazla tercih edilmesine neden olmuştur. Geleneksel alternatif akım (AC) sistemlerine kıyasla, DC mikro şebekeler, dönüşüm kayıplarını azaltma, güç kalitesini artırma ve sistem entegrasyonunu kolaylaştırma gibi avantajlar sunmaktadır (Uddin vd., 2023) ,(Altun, Madani, Yadav, Nasir & Davoudi, 2020). Ancak, bu sistemlerde güç paylaşımı ve gerilim regülasyonu gibi temel kontrol problemleri, hat empedansları ve yük değişimleri gibi etmenlerden dolayı önemli bir mühendislik sorunu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu tez çalışması, DC mikro şebekelerde güç paylaşımının daha verimli ve güvenilir bir şekilde gerçekleştirilmesi için dağıtılmış adaptif droop kontrol yöntemini ele almaktadır. Geleneksel droop kontrol yöntemleri, güç paylaşımında doğruluk sağlamak için yüksek droop katsayıları gerektirirken, bu durum gerilim regülasyonunu olumsuz etkileyebilmektedir. Ayrıca, merkezi kontrol yaklaşımları yüksek bağlantı gereksinimi ve sistem ölçeklenebilirliği açısından bazı zorluklar içermektedir. Bu bağlamda, dağıtılmış adaptif droop kontrolü, her bir güç dönüştürücüsünün yalnızca komşu birimlerle haberleşmesini sağlayarak merkezi olmayan bir kontrol yapısı oluşturmakta ve sistemin güvenilirliğini artırmaktadır (Uddin vd., 2023).

Mikro şebekelerin güvenli, kararlı ve esnek çalışabilmesi için çok katmanlı bir kontrol mimarisi gereklidir. Bu bağlamda, mikro şebeke kontrolü genel olarak üç temel seviyeye ayrılır: birincil (primary), ikincil (secondary) ve üçüncül (tertiary) kontrol. Bu hiyerarşik yapının her bir katmanı sistemin belirli hedeflerine hizmet eder. Birincil kontrol, çoğunlukla yerel ölçümlere dayanarak gerilim ve akımın stabilitesini sağlamayı hedefler ve sıklıkla droop kontrol yöntemiyle gerçekleştirilir (Guerrero vd., 2011). Bu katman, sistemin geçici durumlarda kararlı kalmasını sağlar ve haberleşmeye ihtiyaç duymadan hızlı tepki sunar.

İkincil kontrol, birincil kontrolün neden olduğu gerilim ve frekans sapmalarını telafi ederek sistemin nominal referans değerlerine dönmesini sağlar ve bu sayede mikro şebeke içerisindeki senkronizasyonu mümkün kılar (Lu vd., 2014). Bu katman, genellikle sınırlı haberleşme altyapısı ile çalışır ve merkezi ya da dağıtılmış yapıda uygulanabilir.

Üçüncül kontrol ise mikro şebekenin genel enerji yönetiminden sorumludur. Bu seviyede, ekonomik yük akışı, güç alışverişi ve kaynak optimizasyonu gerçekleştirilir. Üçüncül kontrolün amacı, sistem genelinde enerji akışlarını optimize etmek ve işletme maliyetlerini azaltmaktır (Tsikalakis & Hatziargyriou, 2008). Bu yapı, kararlılığı yalnızca teknik olarak değil, ekonomik ve operasyonel anlamda da destekler.

Bu çalışmada, mikro şebeke içindeki dönüştürücülerin, komşularıyla bilgi paylaşımı yaparak hem küresel gerilim regülasyonunu hem de orantılı yük paylaşımını sağlamaları amaçlanmaktadır. Gerilim regülatörü, dinamik bir gözlemci kullanarak mikro şebeke genelindeki ortalama gerilimi tahmin etmekte ve bu değeri kullanarak her dönüştürücünün referans gerilimini ayarlamaktadır.

Bu tez kapsamında, önerilen kontrol yönteminin performansı detaylı olarak incelenecek ve simülasyonlar ile doğrulanacaktır. Çalışmanın bulguları, adaptif droop kontrol mekanizmasının DC mikro şebekelerde güvenilir bir çözüm sunabileceğini ve sistem ölçeklenebilirliği açısından avantaj sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, dağıtılmış kontrol yaklaşımlarının enerji sistemleri alanındaki önemini vurgulamakta ve daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, sistemin daha yüksek doğruluk, daha hızlı tepki süresi ve ölçeklenebilirlik açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Bu çalışma, mevcut literatürde yer alan geleneksel droop kontrol yöntemleriyle kıyaslandığında, hat empedanslarının etkisini daha etkin bir şekilde minimize ederek güç paylaşımını optimize etmesi açısından farklılık arz etmektedir. Ayrıca, önerilen yöntemin, geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek verimlilik, esneklik ve arıza toleransı sağladığı gözlemlenmiş olup, bu durum enerji yönetim sistemlerinin gelecekteki gelişiminde önemli bir rol oynayacaktır. Bu bağlamda, çalışma yalnızca akademik bir katkı sunmakla kalmayıp, aynı zamanda pratik uygulamalara da ışık tutarak sektördeki mühendislik çözümlerine önemli bir referans olacaktır.

1.1. Problem Durumu / Konunun Tanımı

Günümüzde enerji sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve enerji verimliliğinin artırılması açısından büyük bir dönüşüm geçirmektedir. Geleneksel AC tabanlı şebekeler, bu yeni gereksinimlere yanıt vermekte yetersiz kalırken, DC mikro şebekeler giderek daha fazla ön plana çıkmaktadır. DC mikro şebekeler, enerji dönüşüm kayıplarını azaltma, güç kalitesini iyileştirme ve sistem entegrasyonunu kolaylaştırma gibi önemli avantajlar sunmaktadır (Guerrero, Vasquez, & Lopes, 2011). Ancak, bu sistemlerde

gerilim regülasyonu ve güç paylaşımı gibi kontrol problemleri hala çözülmesi gereken temel mühendislik sorunları arasında yer almaktadır (Eltawil, Mohamed, & Mohammed, 2020). Mevcut kontrol yöntemleri, özellikle sabit droop kontrolü gibi geleneksel yaklaşımlar, yük paylaşımı doğruluğunu artırmak için yüksek droop katsayıları gerektirmekte, bu da gerilim dalgalanmalarına ve sistem kararlılığı açısından olumsuz sonuçlara yol açmaktadır (Zhao, Zhang, & Li, 2015). Merkezi kontrol yöntemleri ise daha hassas sonuçlar sunabilmesine rağmen, yüksek bağlantı gereksinimi, sistem genişletilebilirliği ve iletişim bağlantılarındaki arıza durumlarında sistemin güvenilirliğini azaltma gibi dezavantajlara sahiptir (Guerrero et al., 2011; Lu et al., 2014). Bu nedenle, merkezi olmayan, dağıtılmış ve adaptif bir kontrol mekanizmasına olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu çalışmada ele alınan temel bilimsel problem, DC mikro şebekelerde enerji kaynaklarının orantılı güç paylaşımını sağlayan ve aynı zamanda küresel gerilim regülasyonunu koruyan bir kontrol mekanizmasının geliştirilmesidir. Dağıtılmış adaptif droop kontrolü, bu soruna çözüm sunabilecek bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, merkezi kontrol mekanizmasına ihtiyaç duymadan, yalnızca komşu dönüştürücüler arasında bilgi alışverişine dayalı olarak gerilim regülasyonu ve yük paylaşımını iyileştirebilen bir yaklaşımdır. Önerilen sistem, haberleşme altyapısını minimize ederek enerji yönetimi süreçlerini daha verimli hale getirmekte ve ölçeklenebilirliği artırmaktadır. Önceki çalışmalar incelendiğinde, sabit droop kontrol yöntemlerinin yaygın olarak kullanıldığı ancak iletim hatlarının empedanslarının yük paylaşımı doğruluğunu olumsuz etkilediği görülmektedir (Dragicevic, Vasquez, & Guerrero, 2016; Al-Awami, Memon, & Abido, 2020). Alternatif olarak geliştirilen merkezi kontrol yaklaşımları, hassasiyet açısından avantaj sağlasa da sistem ölçeklenebilirliği ve güvenilirlik açısından sınırlamalar barındırmaktadır (Lu et al., 2020; Eltawil et al., 2020). Literatürde, adaptif droop kontrol mekanizmalarının uygulanabilirliği üzerine yapılan çalışmalar bulunmakla birlikte, çoğu yaklaşım ya merkezi bir yapı gerektirmekte ya da dağıtılmış bir yapı içerisinde yüksek bant genişliği ve tam bağlantılı iletişim gereksinimleri nedeniyle sınırlı uygulanabilirlik sunmaktadır (Tsikalakis & Hatziargyriou, 2008; Guerrero et al., 2011). Bu çalışmada, mevcut literatürdeki bu eksikliklerin giderilmesi amaçlanmaktadır. Önerilen dağıtılmış adaptif droop kontrol yöntemi, her dönüştürücünün yalnızca komşu birimlerle haberleşmesini sağlayarak, küresel gerilim regülasyonu ve orantılı yük paylaşımını eş zamanlı olarak gerçekleştirebilen bir sistem sunmaktadır. Ayrıca, bu yaklaşım, düşük haberleşme maliyetleri ve daha yüksek arıza toleransı ile geleneksel yöntemlere kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Bu bağlamda, geliştirilen yöntemin

performansı simülasyonlar ve deneysel çalışmalarla test edilerek, enerji yönetim sistemleri alanına yenilikçi bir katkı sağlanması hedeflenmektedir.

1.2. Araştırmanın Amacı

Bu araştırmanın genel amacı, DC mikro şebekelerde enerji kaynaklarının orantılı güç paylaşımını sağlarken aynı zamanda küresel gerilim regülasyonunu iyileştirebilen, merkezi olmayan, ölçeklenebilir ve güvenilir bir kontrol yöntemi geliştirmektir. Mevcut yöntemlerin sınırlamalarını aşarak daha verimli ve esnek bir enerji yönetim sistemi oluşturulması hedeflenmektedir. Özellikle, dağıtılmış adaptif droop kontrol mekanizmasının kullanımıyla, mikro şebeke bileşenlerinin yalnızca komşu birimleriyle haberleşerek yük paylaşımı ve gerilim regülasyonunu optimize etmesi amaçlanmaktadır. Bu genel amacı gerçekleştirmek için aşağıdaki alt amaçlar belirlenmiştir:

- **Mevcut Yöntemlerin Analizi:** Geleneksel sabit droop kontrol ve merkezi kontrol yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarını belirleyerek, DC mikro şebekeler üzerindeki etkilerini incelemek.
- **Adaptif Droop Kontrol Mekanizmasının Tasarımı:** Hat empedanslarının etkisini minimize eden, değişen yük koşullarına hızlı tepki verebilen ve gerilim regülasyonunu sürdürülebilir hale getiren bir adaptif droop kontrol algoritması geliştirmek.
- **Dağıtılmış Kontrol Yaklaşımının Geliştirilmesi:** Haberleşme altyapısını minimize ederek, merkezi bir yönetime ihtiyaç duymadan güvenilir bir kontrol mekanizması oluşturmak.
- **Performans Analizi:** Önerilen sistemin simülasyonlar ile test edilerek, değerlendirilmesi.
- **Uygulanabilirlik ve Ölçeklenebilirlik:** Geliştirilen kontrol algoritmasının farklı sistem büyüklükleri ve yapıları üzerinde nasıl çalıştığını inceleyerek, pratik kullanım açısından etkinliğini doğrulamak.

Bu araştırma, DC mikro şebekelerde kontrol sistemleri konusunda önemli bir gelişim sağlayarak hem akademik hem de endüstriyel uygulamalar için yeni bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır. Böylece, gelecekteki enerji yönetim sistemlerinin daha güvenilir, esnek ve verimli olmasına katkıda bulunacaktır.

1.3. Araştırmanın Önemi

Enerji sistemleri, sürdürülebilirlik, verimlilik ve güvenilirlik açısından hızla gelişen ve dönüşen bir alan haline gelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve enerji yönetiminin optimizasyonu, modern enerji sistemleri için kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, DC mikro şebekeler, daha az enerji kaybı, yüksek verimlilik ve basitleştirilmiş güç dönüşüm süreçleri sayesinde giderek daha fazla tercih edilen bir alternatif olmaktadır. Ancak, bu sistemlerde gerilim regülasyonu ve yük paylaşımı gibi temel kontrol sorunlarının varlığı, daha gelişmiş ve ölçeklenebilir çözümler gerektirmektedir.

Bu araştırma, geleneksel kontrol yaklaşımlarının eksikliklerini gidererek, DC mikro şebekelerde daha güvenilir ve esnek bir güç yönetim sisteminin geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Önerilen dağıtılmış adaptif droop kontrol yöntemi, mikro şebekelerin merkezi bir yönetim gerektirmeden daha etkin bir şekilde çalışmasını sağlamakta, böylece haberleşme altyapısının karmaşıklığını azaltarak sistemin ölçeklenebilirliğini artırmaktadır. Bu, özellikle büyük ölçekli enerji sistemleri ve geleceğin akıllı şebekeleri açısından önemli bir yenilik olarak değerlendirilmektedir. Araştırmanın temel katkıları şunlardır:

- **Bilimsel Katkı:** Bu çalışma, mevcut literatürdeki boşlukları doldurarak DC mikro şebekelerde dağıtılmış kontrol mekanizmalarının uygulanabilirliğini artırmaktadır. Geliştirilen model, adaptif droop kontrol mekanizmasının verimliliğini artırarak enerji dağıtım süreçlerinde yeni bir perspektif sunmaktadır.
- **Pratik Uygulanabilirlik:** Endüstriyel ölçekte uygulanabilir bir çözüm sunarak, enerji yönetim sistemlerinin daha verimli çalışmasını sağlayacak ve gelecekteki mikro şebeke tasarımlarına rehberlik edecektir.
- **Sürdürülebilirlik ve Gelecek Perspektifi:** Önerilen yöntem, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırarak karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sunacaktır. Akıllı enerji yönetimi sayesinde, enerji üretimi ve tüketimi daha dengeli hale getirilerek çevresel sürdürülebilirlik teşvik edilecektir.
- **Teknolojik Gelişim:** Bu araştırma, güç elektroniği ve kontrol mühendisliği alanlarında ilerlemeler kaydetmeyi hedeflemektedir. Akıllı şebekeler ve enerji yönetim sistemleri üzerine yapılan çalışmaların daha etkin hale gelmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, bu araştırma yalnızca akademik literatüre katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda enerji yönetimi alanında pratik çözümler sunarak mühendislik disiplinine önemli bir katkı yapmaktadır. DC mikro şebekeler konusunda gelecekte yapılacak çalışmalar için bir temel oluşturması ve bu alandaki gelişmelere yön vermesi beklenmektedir.

1.4. Varsayımlar / Sayıtlar / Araştırmanın Hipotezleri / Soruları

Bu çalışmada, aşağıdaki varsayımlar geçerli kabul edilmektedir:

- DC mikro şebekeler, yenilenebilir enerji entegrasyonu için uygun bir altyapı sunmaktadır. Bu varsayım, mikro şebekelerin enerji yönetiminde verimli ve sürdürülebilir çözümler sunduğu kabul edilerek araştırmanın temellendirilmesini sağlamaktadır.
- Mikro şebekelerde kullanılan dönüştürücüler, belirli teknik parametreler doğrultusunda çalışmaktadır. Dönüştürücülerin güç paylaşımı ve gerilim regülasyonu üzerindeki etkilerinin standart donanım ve yazılım özellikleri çerçevesinde değerlendirildiği varsayılmaktadır.
- **Önerilen dağıtılmış adaptif droop kontrol yöntemi, haberleşme gecikmeleri ve veri kaybı gibi olası ağ problemleri göz ardı edilerek test edilmektedir.** Gerçek dünya uygulamalarında bu tür faktörler dikkate alınabilir, ancak araştırmanın temel amacını bozmamak için bu çalışma kapsamında göz ardı edilmiştir.
- **Simülasyon ortamında elde edilen sonuçlar, gerçek sistemlerde benzer eğilimler gösterecektir.** Gerçek sistemlerde bazı fiziksel kısıtlamalar olabileceği kabul edilmekle birlikte, temel performans göstergelerinin benzer olması beklenmektedir.

1.4.1. Araştırmanın Hipotezleri

Bu çalışmada test edilecek hipotezler şunlardır:

- **H1:** Dağıtılmış adaptif droop kontrol yöntemi, geleneksel droop kontrol yöntemine kıyasla daha kararlı bir gerilim regülasyonu sağlamaktadır.
- **H2:** Önerilen yöntem, DC mikro şebekelerde güç paylaşım doğruluğunu artırarak hat empedanslarının olumsuz etkilerini minimize etmektedir.
- **H3:** Merkezi olmayan adaptif droop kontrol mekanizması, sistem ölçeklenebilirliğini artırarak daha büyük ve karmaşık mikro şebekelerde etkin bir şekilde çalışabilir.

- **H4:** Simülasyon ve deneysel sonuçlar, adaptif droop kontrol mekanizmasının geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı dinamik tepki süresi sunduğunu gösterecektir.

1.4.2. Araştırma Soruları

Bu çalışmada ele alınan temel araştırma soruları şunlardır:

- DC mikro şebekelerde geleneksel sabit droop kontrol yöntemleri hangi sınırlamalara sahiptir?
- Dağıtılmış adaptif droop kontrol yöntemi, güç paylaşımı ve gerilim regülasyonu açısından nasıl bir iyileştirme sunmaktadır?
- Merkezi olmayan bir kontrol yapısı, mikro şebeke güvenilirliği ve ölçeklenebilirliği üzerinde nasıl bir etkiye sahiptir?
- Simülasyon testler, önerilen yöntemin geleneksel kontrol yaklaşımlarına kıyasla nasıl bir avantaj sunduğunu göstermektedir?

Bu varsayımlar, hipotezler ve araştırma soruları, çalışmanın temel dayanaklarını oluşturarak araştırmanın metodolojisini yönlendirecektir. Elde edilen bulgular, bu varsayımlar doğrultusunda değerlendirilerek, enerji yönetimi ve kontrol stratejileri açısından önemli katkılar sunacaktır.

1.5. Sınırlılıklar

Her bilimsel çalışma, belirli kapsam ve koşullar altında gerçekleştirilir ve bu bağlamda bazı sınırlılıklar içerebilir. Bu araştırma kapsamında karşılaşılan sınırlılıklar kavramsal ve yöntemsel olmak üzere iki ana başlık altında ele alınmaktadır.

1.5.1. Kavramsal Sınırlılıklar

- **Araştırma Kapsamı:** Çalışma yalnızca DC mikro şebekelerde dağıtılmış adaptif droop kontrol yöntemine odaklanmaktadır. Alternatif kontrol stratejileri ve AC mikro şebeke sistemleri araştırmanın kapsamı dışında bırakılmıştır.
- **Gerçek Dünya Koşulları:** Simülasyon tabanlı analizler bilgisayar ortamında gerçekleştirildiğinden, saha uygulamalarında karşılaşılabilecek olası değişkenler ve belirsizlikler tam olarak modellenmemiştir.

- **İletişim Gecikmeleri ve Veri Kaybı:** Çalışma, haberleşme ağı gecikmelerini ve veri kayıplarını dikkate almadan ideal bir sistem varsayımıyla gerçekleştirilmiştir. Gerçek zamanlı uygulamalarda ağın performansı farklılık gösterebilir.
- **Sistem Büyüklüğü:** Araştırma belirli bir ölçek üzerindeki mikro şebeke sistemlerine odaklanmaktadır. Daha büyük ve daha karmaşık sistemler için önerilen yöntemin etkinliği farklılık gösterebilir.

1.5.2 Yöntemsel Sınırlılıklar

- **Simülasyon Çalışmalar:** Önerilen kontrol yöntemi, ağırlıklı olarak simülasyonlar ile test edilmiştir. Gerçek dünya uygulamalarında farklı çevresel faktörler ve beklenmeyen durumlar sistem performansını etkileyebilir.
- **Kullanılan Donanım ve Yazılım:** Deneylerde kullanılan donanım ve yazılım belirli üretici ve teknolojilere dayanmaktadır. Farklı platformlarda uygulanabilirlik, donanım ve yazılım uyumluluğuna bağlı olarak değişebilir.
- **Ölçüm Hassasiyeti:** Kullanılan sensörlerin ve ölçüm cihazlarının belirli bir hata payı bulunmaktadır. Bu durum, gerilim regülasyonu ve güç paylaşımı analizlerinde küçük farklılıklara yol açabilir.
- **Test Koşulları:** Çalışma, belirli senaryolar altında test edilmiştir. Daha karmaşık veya aşırı yüklenmiş mikro şebekelerde önerilen yöntemin performansı farklı olabilir.

Bu sınırlılıklar, araştırmanın geçerliliği ve güvenilirliği konusunda daha bilinçli bir değerlendirme yapılmasına olanak tanımaktadır. Gelecek çalışmalarda, saha testlerinin artırılması, haberleşme gecikmelerinin modellenmesi ve daha büyük ölçekli sistemler üzerinde testler gerçekleştirilmesi, mevcut sınırlamaların aşılması açısından faydalı olacaktır.

1.6. Tanımlar

Bu bölümde, araştırmada sıkça kullanılan terimlerin anlamları açıklanarak kavramsal netlik sağlanacaktır. Terimlerin doğru anlaşılması, araştırmanın tutarlılığını ve okuyucunun konuyu daha iyi kavramasını kolaylaştıracaktır.

- **Adaptif Droop Kontrolü:** Mikro şebekelerde yük paylaşımını ve gerilim regülasyonunu dinamik olarak ayarlayan bir kontrol mekanizmasıdır. Sabit droop kontrol yöntemine

kıyasla daha esnek ve hat empedanslarından kaynaklanan olumsuzlukları minimize edebilen bir yapıya sahiptir.

- **DC Mikro Şebeke:** Doğru akım (DC) ile çalışan ve genellikle yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren küçük ölçekli enerji dağıtım sistemidir. Daha az dönüşüm kaybı ve daha yüksek verimlilik sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir.
- **Gerilim Regülasyonu:** Bir enerji sisteminde gerilimin belirlenen bir referans değerinde tutulmasını sağlayan kontrol sürecidir. Mikro şebekelerde, yük değişimlerine rağmen sistem geriliminin stabil kalmasını garanti eder.
- **Güç Paylaşımı:** Mikro şebekeye bağlı enerji kaynaklarının yükleri belirli oranlarda paylaşmasını ifade eder. Orantılı güç paylaşımı, enerji kaynaklarının kapasitelerine uygun şekilde yükü paylaşmasını sağlar.
- **Merkezi Olmayan Kontrol:** Mikro şebekelerde, tek bir merkezi kontrol birimi yerine dağıtılmış kontrol algoritmalarının kullanıldığı bir yaklaşımı ifade eder. Bu yöntem, sistem ölçeklenebilirliğini ve güvenilirliğini artırır.
- **Ölçeklenebilirlik:** Mikro şebeke kontrol mekanizmasının, sistemin büyüklüğü veya karmaşıklığı arttıkça etkinliğini kaybetmeden çalışabilme yeteneğidir. Merkezi olmayan kontrol yöntemleri, genellikle daha yüksek ölçeklenebilirlik sunar.
- **Hat Empedansı:** Elektrik iletim hatlarında karşılaşılan direnç, endüktans ve kapasitans etkilerini ifade eder. Mikro şebekelerde güç paylaşım doğruluğunu ve gerilim seviyelerini etkileyen önemli bir parametredir.
- **Yük Dinamiği:** Mikro şebekeye bağlı yüklerin zaman içinde değişmesiyle ortaya çıkan dinamik davranışları ifade eder. Kontrollü bir sistem, yük dinamiklerine hızlı ve kararlı bir şekilde yanıt verebilmelidir.

Bu tanımlar, araştırmanın temel kavramlarını açık ve anlaşılır hale getirmek amacıyla verilmiştir. Araştırma sürecinde kullanılan teknik terimler bu çerçevede değerlendirilecek ve rapor boyunca tutarlı bir dil kullanılması sağlanacaktır.

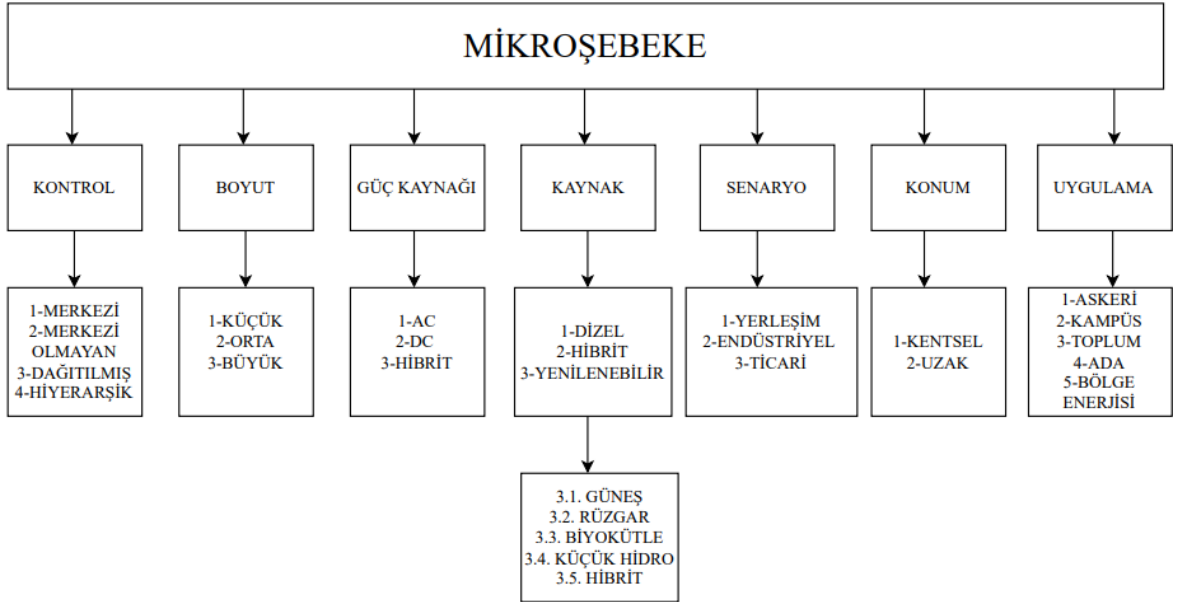
2. GENEL BİLGİLER

2.1. Mikroşebeke

Mikroşebeke, elektrik enerjisinin üretim, dağıtım ve tüketiminin yerel olarak yönetildiği küçük ölçekli bir enerji sistemidir. Hem AC (alternatif akım) hem DC (doğru akım) hem de Hibrit mikroşebekeler olarak kategorize edilebilir. Mikroşebekeler, bağımsız olarak çalışabildikleri gibi ana şebekeye de bağlı (ada modu) olabilirler. Bu sistemler, yenilenebilir enerji kaynakları, enerji depolama sistemleri ve geleneksel enerji kaynaklarını entegre ederek enerji sürekliliği ve verimliliği sağlar (Lasseter, 2002; Hatziargyriou et al., 2007).

Mikro şebekeler, farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasından dolayı olası sorunlar ile ilgili başa çıkmak ve enerji üretim alanından uzak bölgelere elektrik sağlamak amacıyla etkili bir yöntem olarak kabul edildikleri için çok fazla ilgi görüyorlar (Marnay et al., 2015; Mariam, Basu & Conlon, 2013).

Mikroşebeke oluşumunun bir seçenek olarak ortaya çıkması dağıtık üretimin sunduğu avantajlardan yararlanmak içindir. Mikroşebekelerin tipik olarak sınıflandırılması Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1. Mikroşebekelerin tipik sınıflandırılması (Kaynak: Uddin vd., 2023; Al-Tameemi vd., 2021)

Mikroşebekelerin tipik sınıflandırılması, yedi kategoriye ayrılarak incelenmektedir. Bu kategoriler kontrol, boyut, güç kaynağı(tür), kaynak, senaryo, konum ve uygulama olarak adlandırılmaktadır. Kontrol; merkezi, merkezi olmayan, dağıtılmış ve hiyerarşik olmak üzere dört sınıfa ayrılmaktadır. Bu stratejiler, mikroşebekenin ihtiyaçlarına ve ölçeğine göre

seçilir veya bir arada kullanılır. Örneğin, hiyerarşik kontrol yapılarında bu stratejiler birleştirilebilir. Boyut; Küçük, orta ve büyük olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Güç kaynağı yani tür olarak; AC, DC ve hibrit olarak üç sınıfa ayrılmaktadır. DEK (Dağıtılmış enerji kaynakları) birimleri kaynak kategorisindedir. Bunlar; Dizel, hibrit ve yenilenebilir olarak üç sınıfa ayrılmaktadır. Yenilenebilir kendi içerisinde; Güneş, rüzgar, biyokütle, küçük hidro ve hibrit olarak beş sınıfa ayrılmaktadır. Senaryo; Yerleşim, endüstriyel ve ticari olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Uygulama; Askeri, kampüs, toplum, ada ve bölge enerjisi olmak üzere beş sınıfa ayrılmaktadır (Uddin vd., 2023; Al-Tameemi vd., 2021).

2.2. Mikroşebekenin Tanımı

"Mikroşebeke" terimi, tek bir güç alt birimine bağlı olan az sayıda dağıtılmış enerji kaynağını (DEK) ifade eder. DEK'ler, hem yenilenebilir enerji kaynaklarını hem de geleneksel enerji kaynaklarını kapsar (Mariam, Basu & Conlon, 2013). Günümüzde elektrik şebekesi, 20. yüzyıldaki tek yönlü sistem yapısından farklı bir hal almıştır (Thirunavukkarasu, 2022). Dağıtılmış enerji kaynakları, mikroşebekelerin önemini artırmış ve bu alandaki gelişmelerin önünü açmıştır (Grimley, & Farrell, 2016; Lidula, & Rajapakse, 2011). Mikroşebekeler, ada modunda (şebekeden bağımsız) veya şebekeye bağlı olarak çalışabilen, iyi düzenlenmiş tek bir şebeke düzeyinde varlık olarak faaliyet gösterebilir (Gong, vd., 2020). Bu sistemler, güç kalitesini iyileştirme, kritik yükler için enerji güvenliğini artırma ve genel sistem verimliliğini maksimum düzeye çıkarma potansiyeline sahiptir (Gui, vd., 2018; Hatziargyriou, vd., 2007).

Son yıllarda, küçük ölçekli güç üretimindeki teknolojik ilerlemeler, mikroşebekelerin popülerlik kazanmasına yol açmıştır (Jafari vd., 2018). Ayrıca, merkezi elektriğin üretiminin çevresel etkilerine yönelik artan endişeler de mikroşebekelerin geliştirilmesini teşvik eden önemli bir faktör olmuştur (Göransson, vd., 2017; Wouters, 2015).

Mikroşebeke kavramı, farklı kaynaklarda çeşitli şekillerde tanımlanmaktadır. Lasseter'e (2002) göre, bir mikroşebeke, iletim şebekesinin bütünlüğünü koruyarak kesintiler sırasında standart hizmeti sürdürmek amacıyla ana şebekeye bağlanıp bağlantısını kesebilen, yerel kontrol mekanizmalarına sahip üretim birimleri ve ilişkili yüklerden oluşan bir alt sistemdir. Dimeas ve Hatziargyriou (2005) ise mikroşebekeleri, mikro türbinler, yakıt hücreleri, fotovoltaik (PV) sistemler gibi küçük ve modüler üretim birimlerinin, depolama cihazlarının (volanlar, enerji kapasitörleri, piller) ve alçak gerilim dağıtım sistemlerindeki kontrol edilebilir yüklerin birleşiminden oluşan, geleceğin enerji sistemi paradigması olarak

tanımlar. Bu sistemler, şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız (ada modu) olarak çalışabilir.

Katiraei ve Iravani'nin (2006) çalışmalarında ise mikroşebeke, şebekeye bağlı modda, ada modunda veya bu iki mod arasında geçiş yapabilen bir dağıtım sistemi tarafından desteklenen dağıtılmış kaynak birimleri ve yüklerin bir kümesi olarak ifade edilir. ABD Enerji Bakanlığı Mikroşebeke Değişim Grubu, mikroşebekeyi, açıkça tanımlanmış elektrik sınırları içinde birbirine bağlı yükler ve dağıtılmış enerji kaynaklarından oluşan, şebekeye göre tek bir kontrol edilebilir varlık gibi davranan bir sistem olarak tanımlar (Ton & Smith, 2012). Bu sistem, hem şebekeye bağlı hem de ada modunda çalışabilme esnekliğine sahiptir.

CIGRÉ C6.22 Mikroşebeke Evrim Yol Haritası Çalışma Grubu ise mikroşebekeleri, ana şebekeye bağlı veya ada modunda kontrollü ve koordineli bir şekilde çalıştırılabilen, dağıtılmış jeneratörler, depolama cihazları ve kontrol edilebilir yükler gibi bileşenleri içeren elektrik dağıtım sistemleri olarak tanımlar (Marnay vd., 2015).

Yukarıdaki tanımlar, mikroşebekelerin tanımlanmış bir alanda kontrol edilebilir bir varlık olarak şebekeye bağlı veya ada modunda çalışabileceği konusunda ortak bir görüş birliğine sahiptir. Ancak, bu tanımlar sistemin özelliklerini kolaylaştırmak için bir kontrol ünitesinden açıkça bahsetmez. Örneğin, kesintisiz geçiş ve ada modu çalışması sırasında ek güç kaynağı sağlama gibi işlevler için bir kontrol ünitesine ihtiyaç duyulabilir. Ayrıca, dönüştürücü arayüzlü jeneratörlere sahip ada mikroşebekeleri için saniyeden saniyeye güç dengesi ve kaynakların optimum kullanımını sağlamak amacıyla merkezi bir kontrol ünitesi gereklidir.

Bu tanımlardan hareketle, bir mikroşebekenin temel özellikleri şu şekilde özetlenebilir:

- **Entegrasyon:** Mikroşebeke, yerel bir dağıtım şebekesinde bulunan mikrokaynakların (yenilenebilir ve geleneksel kaynaklar), depolama birimlerinin ve kontrol edilebilir yüklerin entegrasyonunu sağlar.
- **Esneklik:** Mikroşebeke, şebekeye bağlı olarak çalışabileceği gibi, şebekeden bağımsız (adalanmış modda) da işletilebilir.
- **Koordinasyon ve Yönetim:** Mikroşebeke, kaynaklar arasında enerji yönetimi ve koordinasyon sağlayarak sistem verimliliğini artırır ve güvenilirliği destekler.

Bu özellikler, mikroşebekelerin modern enerji sistemlerinde önemli bir rol oynadığını ve gelecekteki enerji altyapısının temel bileşenlerinden biri haline geldiğini göstermektedir.

2.3. DC Mikroşebeke Yapısı

Mikro şebeke yapısının analizi, mikro şebekenin kurulumu, işletimi, kontrolü ve korunması için temel bir öneme sahiptir. AC mikro şebekelerinden farklı olarak, DC mikro şebekeleri, dönüştürücü cihazların sayısını önemli ölçüde azaltır ve faz, harmonikler ile reaktif güç kaybı gibi sorunları ortadan kaldırır. Kentsel dağıtım şebekelerinin sürekli gelişimi ve DC yüklerinin (örneğin, çeşitli elektronik cihazlar ve elektrikli araçlar) önemli ölçüde artmasıyla birlikte, DC mikro şebekeleri, gelecekte mikro şebeke teknolojisinin önemli gelişim alanlarından biri haline gelecektir (Altun, 2024).

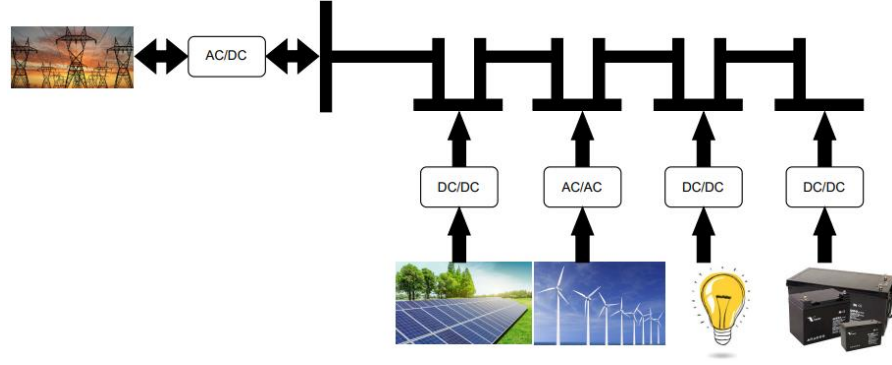
DC mikroşebekelerinin yapısı genel olarak dört ana tipe ayrılabilir: besleyici yapı, radyal yapı, halka yapısı ve ağ yapısı. Bu yapılar, farklı uygulama alanlarına ve ihtiyaçlara uygun çözümler sunar.

Tablo 2.1. Mikroşebe yapı sınıfları

Yapı Türü			İşletme Modu	Ölçek	Güvenilirlik	Güç Türü	Uygulanabilir Durumlar	Mikroşebeke Türü
Besleyici (Feeder)			Şebekeye Bağlı/Ada	Küçük	Düşük	Rüzgâr/Fotovoltaik/ Depolama/Dizel	Uzak Dağlık Alanlar / Deniz Adaları	AC/DC
Radyal	Tek Hat		Şebekeye Bağlı/Ada	Küçük	Orta	Rüzgâr/Fotovoltaik/ Depolama/Yakıt Hücresi	Endüstriyel ve Ticari Alanlar	AC/DC
	Çoklu Hat	Bölümlenmemiş	Şebekeye Bağlı	Büyük	Yüksek	Rüzgâr/Fotovoltaik/ Depolama/Kojenerasyon	Hastane / Okul / Endüstriyel ve Ticari Alanlar	AC / DC / AC-DC
		Bölümlenmiş	Şebekeye Bağlı	Büyük	Yüksek	Rüzgâr/Fotovoltaik/ Depolama/Yakıt Hücresi	Hastane / Okul / Endüstriyel ve Ticari Alanlar	AC / DC / AC-DC
Halka (Ring)		Tek Halka	Şebekeye Bağlı	Büyük	Yüksek	Rüzgâr/Fotovoltaik/ Depolama/Yakıt Hücresi	Büyük Endüstriyel ve Ticari Alanlar	DC / AC-DC
		Çoklu Halka	Şebekeye Bağlı	Büyük	Yüksek	Rüzgâr/Fotovoltaik/ Depolama/ Kojenerasyon/Yakıt Hücresi	Büyük Endüstriyel ve Ticari Alanlar	DC / AC-DC
Ağ (Mesh)			Ada	Küçük	Yüksek	Rüzgâr/Fotovoltaik/ Depolama/ Kojenerasyon/Yakıt Hücresi	Elektrikli Gemiler	DC

2.3.1.Besleyici Yapı

Besleyici tipi DC mikro şebekesi, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi basit bir sistem mimarisine sahiptir. Bu tür mikro şebekeler, düşük yatırım maliyetleriyle dikkat çeker ve bir arıza durumunda ilgili koruma cihazını tespit etmek ve devreye almak kolaydır. Ancak, bu yapının güç kaynağı güvenilirliği nispeten zayıftır. Bu özellikleri nedeniyle, besleyici tipi DC mikro şebekeleri özellikle uzak bölgeler için uygun bir seçenek olarak değerlendirilir (Cai vd., 2017).

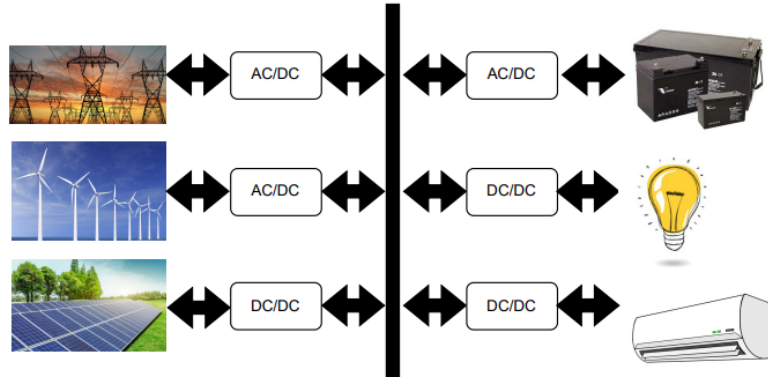


Şekil 2.2. Besleyici tipi DC mikroşebeke

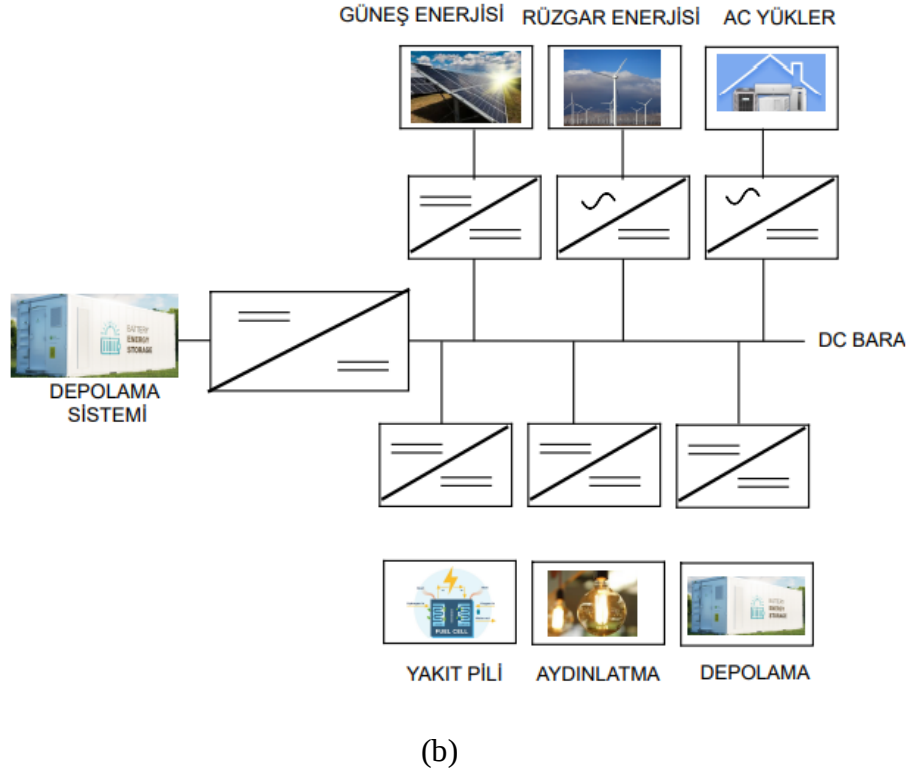
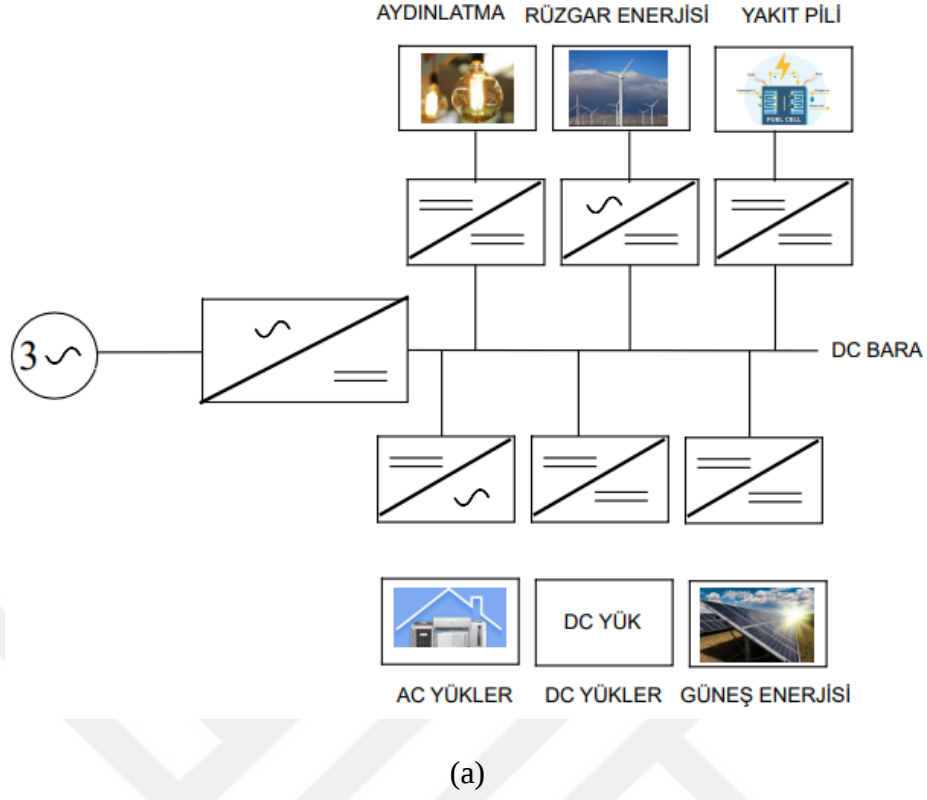
2.3.2. Tek Bara (Tek Hat) Yapı (Radyal Yapı)

Şekil 2.3'te gösterilen tipik bir tek baralı DC mikroşebeke yapısı, bir baradan, fotovoltaiik sistemden, rüzgar türbini sisteminden, enerji depolama biriminden ve AC/DC yüklerinden oluşmaktadır. Bu sistem, büyük güç şebekesine bağlanarak hem şebekeye bağlı çalışma hem de ada modunda işletme özelliklerini destekler. Bu özellikleriyle, geleceğin akıllı evleri ve küçük ölçekli endüstriyel ve ticari alanlar için ideal bir çözüm sunar.

Bu topoloji, tek bir DC baradan oluştuğu için en basit yapıya sahiptir. Bu durum, tüm jeneratörlerin, depolama sistemlerinin ve yüklerin aynı noktaya (baraya) bağlanmasını sağlar. Şekil 2.4, bu topolojinin iki tipik örneğini göstermektedir: biri elektrik şebekesine bağlı çalışma, diğeri ise ada modunda işletme. Bu yapı, basitliğinin yanı sıra düşük bakım gereksinimleri ve düşük maliyetlerle de öne çıkmaktadır.



Şekil 2.3. Tek bara (tek hat) tipi DC mikroşebeke

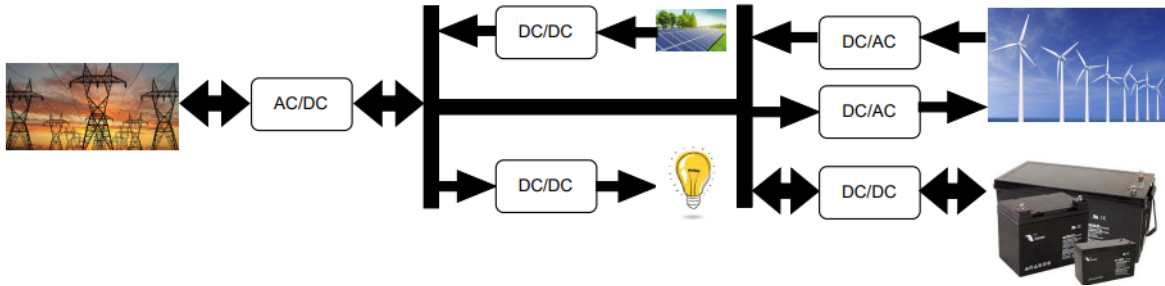


Şekil 2.4. Tek bara topolojisinin tipik bir örneğinin şeması: (a) şebekeye bağlı ve (b) ada modunda çalışma.

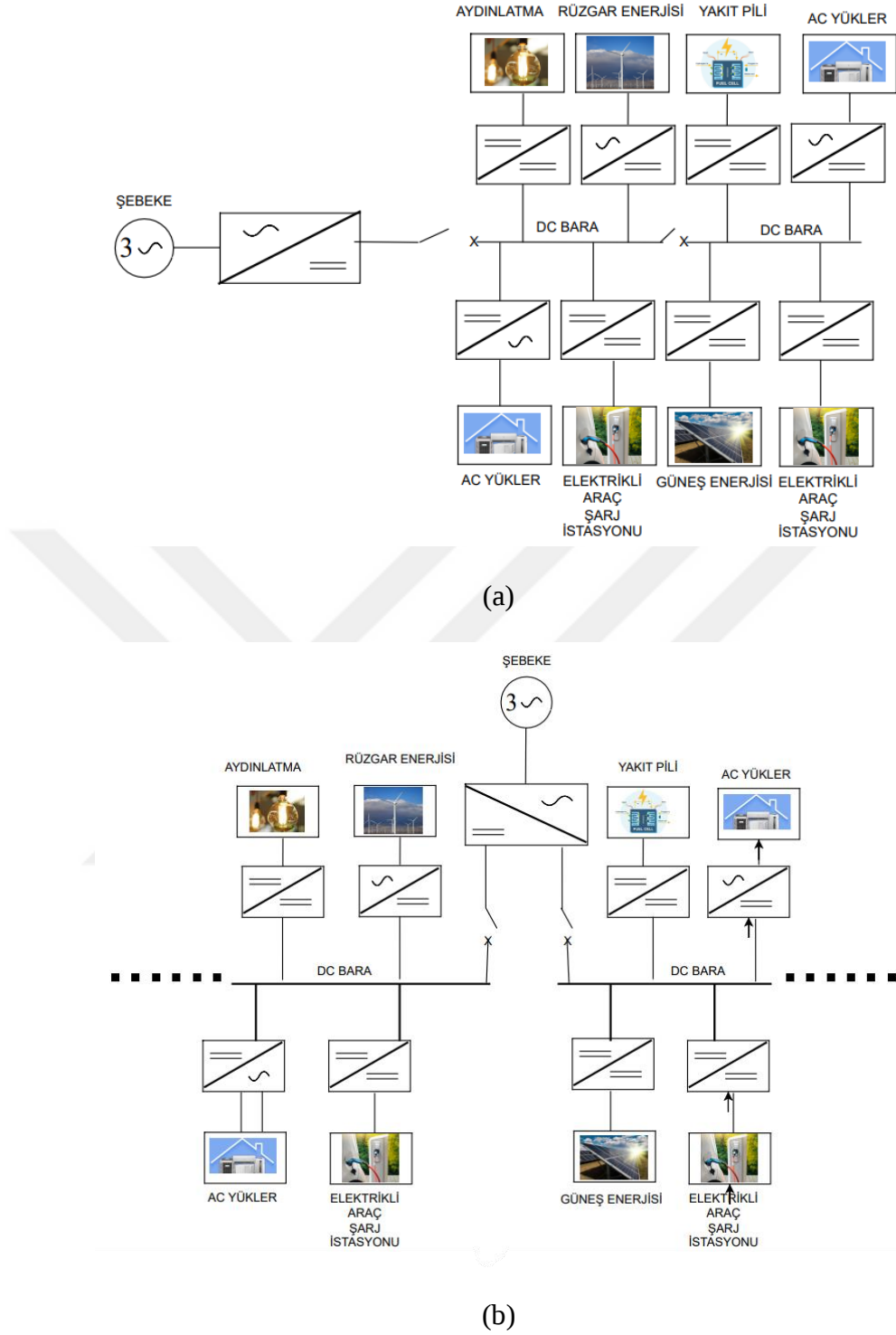
2.3.3. Çoklu Bara (Çoklu Hat) Yapı (Radyal Yapı)

Mikro şebekelerin ölçeğinin sürekli olarak büyümesiyle birlikte, güç kaynağı güvenilirliğini daha da artırmak amacıyla, Şekil 2.5'te gösterilen çoklu bara yapılı DC mikro şebeke yapısı tercih edilebilir. Bu yapı, dağıtılmış güç erişim noktalarının esnekliğinden tam olarak yararlanabilme ve farklı voltaj seviyelerindeki yükleri entegre edebilme avantajına sahiptir. Sistem, arızaları tespit etme ve bunlarla başa çıkma açısından nispeten kolaydır, ancak güç kaynağı güvenilirliği düşük seviyededir (Cai vd., 2017), (Altun, Madani & Davoudi, 2021).

Bu topoloji, tek baranın genişletilmiş bir versiyonu olarak düşünülebilir. Şekil 2.5'te gösterildiği gibi, bu yapıda birden fazla DC bara bulunur ve her bir bara; jeneratörleri, depolama sistemlerini ve yükleri bağlamak için kullanılır. Genellikle iki temel konfigürasyon mevcuttur: seri ve paralel. İlk konfigürasyonda, iki veya daha fazla DC mikro şebekesi seri olarak birbirine bağlanabilir (Şekil 2.6a), ikinci konfigürasyonda ise paralel olarak bağlanabilir (Şekil 2.6b). Bu topoloji, basitliğini büyük ölçüde korurken, farklı voltaj seviyelerini destekler ve sistemin genel güvenilirliğini artırır. Bununla birlikte, ada modu sırasında ortaya çıkabilecek kararsızlık sorunları, bu yapının dikkate alınması gereken bir dezavantajıdır (Altun, Madani & Davoudi, 2021).



Şekil 2.5. Çoklu bara tipi DC mikroşebeke



Şekil 2.6. Radyal topolojinin tipik bir örneğinin şeması: (a) seri yapılandırma ve (b) paralel yapılandırma.

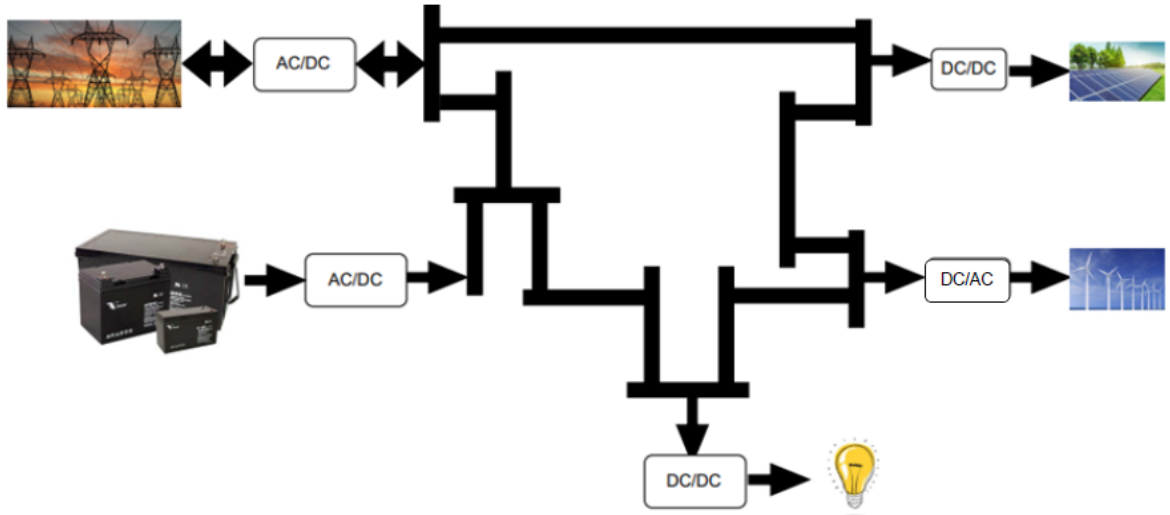
2.3.4. Halka (Ring) Yapı

Dağıtılmış güç üretimine erişim, dağıtım şebekesinin güç tedarik modunu tek yönlü güç akışı ve radyal yapıdan, daha esnek ve genişletilebilir olan iki yönlü güç akışı ve halka yapısına

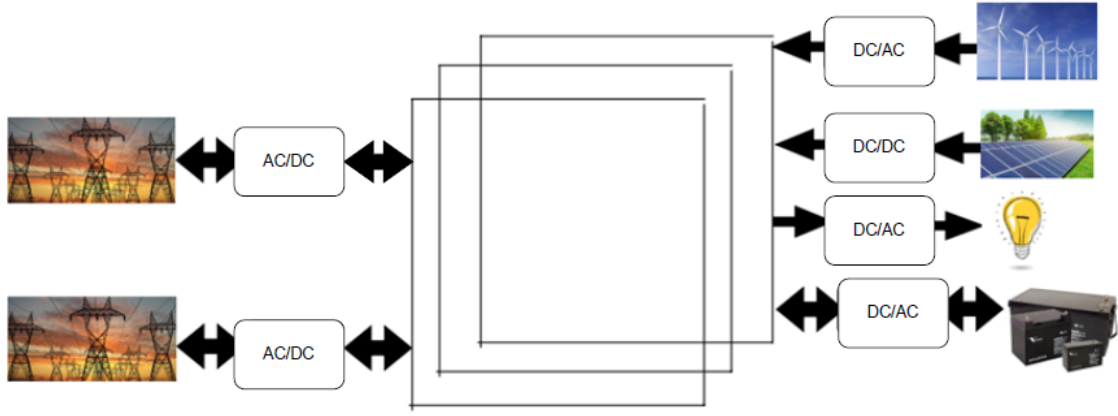
dönüştürür. Halka yapısı, tek halka ve çok halka DC mikro şebekeler olarak ikiye ayrılabilir. Tipik tek halka ve çok halka DC mikro şebeke yapıları, sırasıyla Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de gösterilmiştir.

Tek halka yapısıyla karşılaştırıldığında, çok halkalı yapı daha fazla güç kaynağı devresine sahiptir ve güç kaynağı güvenilirliği daha yüksektir. Bu özellikleri nedeniyle, büyük ölçekli kapsamlı binalar, endüstriyel alanlar ve güç kalitesi için özel gereksinimleri olan diğer uygulamalar için uygundur. Ancak, bu yapının dezavantajı, arıza tespiti ve koruma kontrolünün nispeten zor olmasıdır (Cai vd., 2017; Huang vd., 2012).

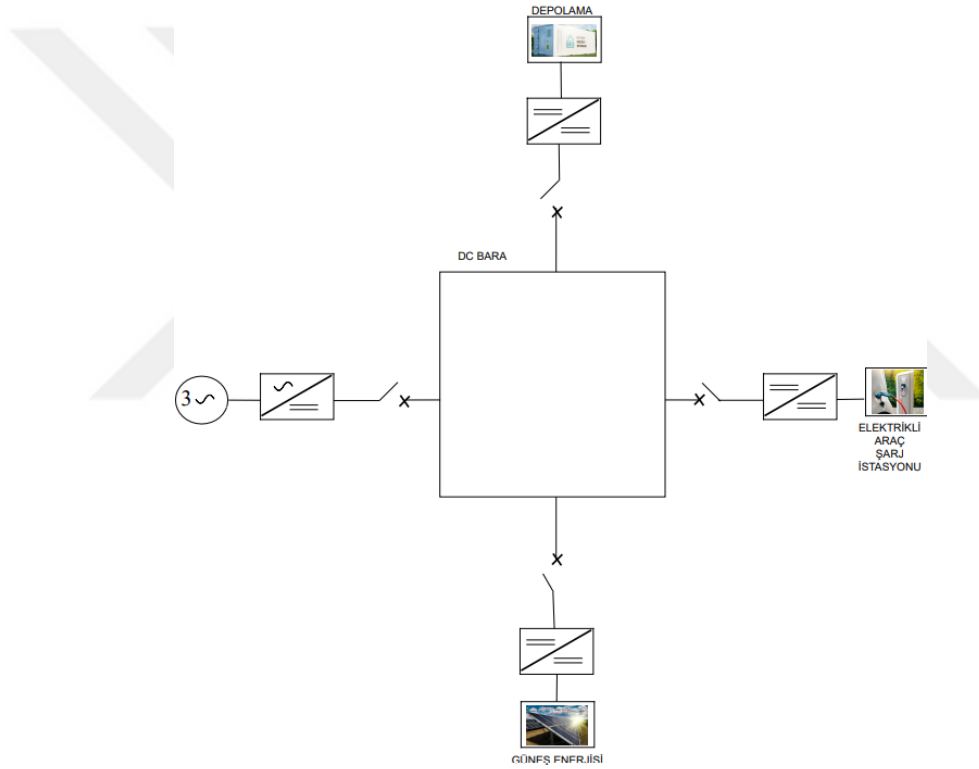
Bu topolojide, tüm jeneratörler, depolama sistemleri ve yükler, iki taraftan beslemeye olanak tanıyan bir döngü yoluyla aynı DC barasına bağlanır (Şekil 2.9). Bu nedenle, bu yapı önceki konfigürasyonlara kıyasla daha güvenilirdir, çünkü DC barasında bir arıza oluşması durumunda, tek bir bara konfigürasyonu ile çalışmak mümkündür. Bununla birlikte, bu topolojinin temel sorunu, artan sistem karmaşıklığıdır.



Şekil 2.7. Tekli halka tipi DC mikroşebeke



Şekil 2.8. Çoklu halka tipi DC mikroşebeke

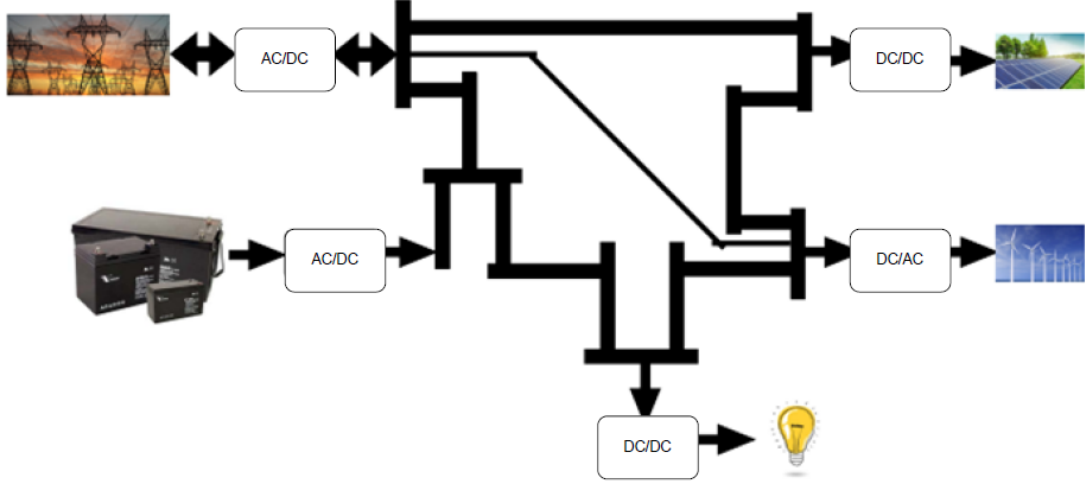


Şekil 2.9. Halka topolojisinin tipik bir örneğinin şeması

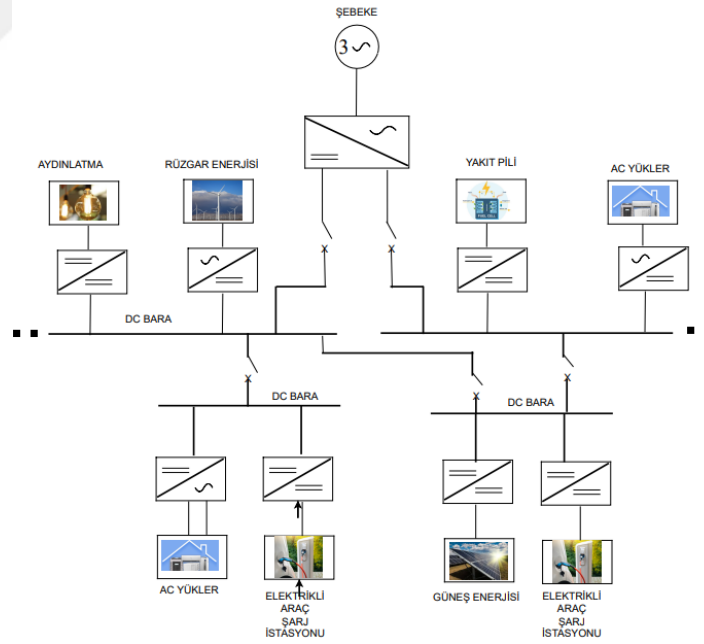
2.3.5. Ağ (Mesh) Yapı

Şekil 2.10'da gösterildiği gibi, tipik bir örgü DC mikro şebekesi, yüksek esneklik, üstün güvenilirlik ve iyi yedeklilik avantajlarına sahiptir (Nian & Kong, 2020). Gelecekte, mikro şebeke içindeki kaynak, yük ve depolama birimlerinin sayısının artmaya devam edeceği düşünüldüğünde, ağ yapılı DC mikro şebekeleri, inşaat ve planlama açısından önemli bir yapı haline gelecektir.

Bu topoloji, ağ yapılandırması ile karakterize edilir ve radyal topolojilerle entegre halka (veya halkalar) içermeye potansiyeline sahiptir (Şekil 2.11). Önceki topolojilerle karşılaştırıldığında, daha iyi güvenilirlik ve esneklik sunan karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu özellikleri, ağ yapılı DC mikro şebekelerini geleceğin enerji sistemleri için önemli bir seçenek haline getirmektedir.



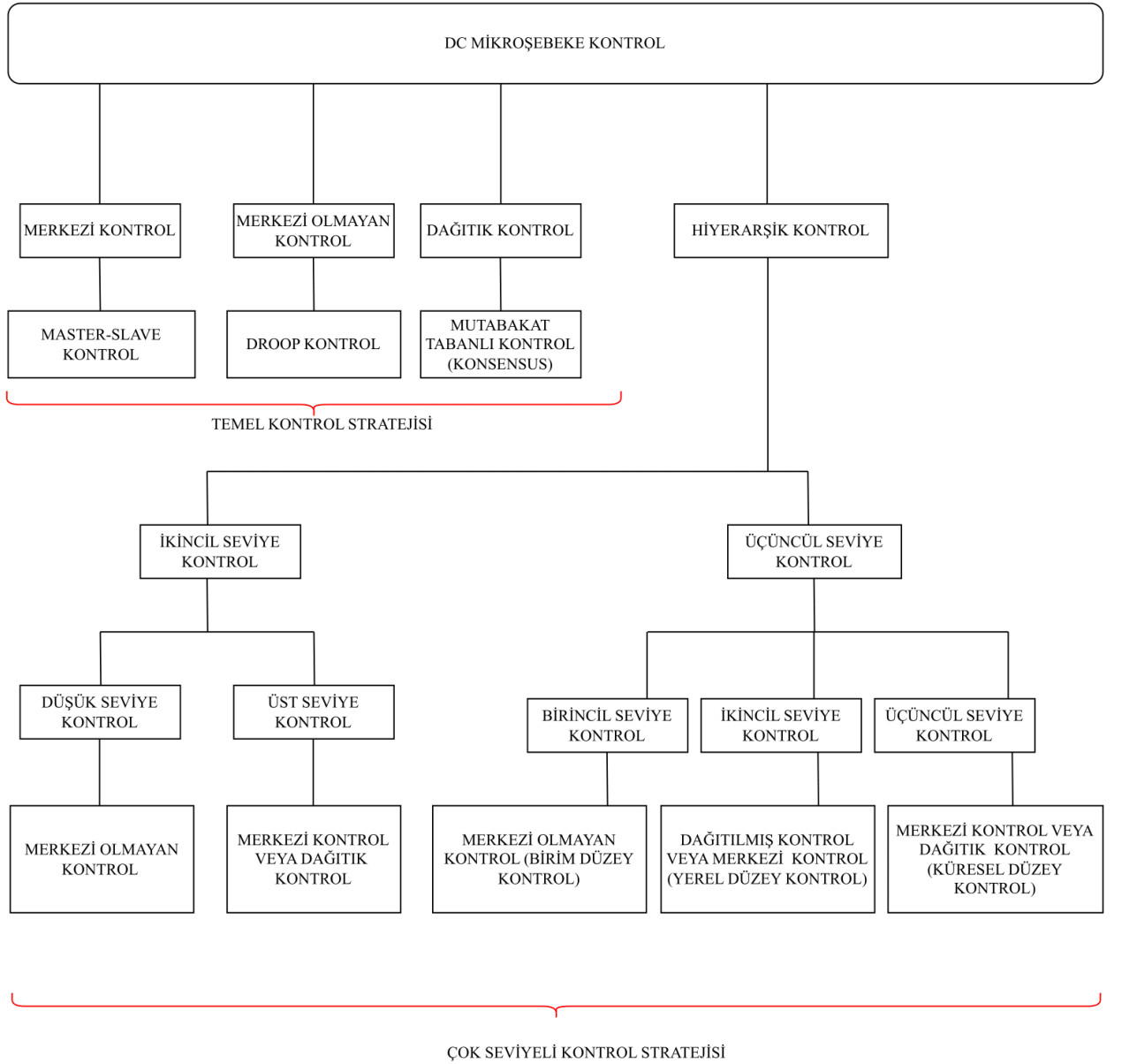
Şekil 2.10. Ağ yapılı DC mikro şebeke



Şekil 2.11. Ağ topolojisinin tipik bir örneğinin şeması.

3. DC MİKROŞEBEKE KONTROLÜ

DC mikroşebeke (DCMG) sistemlerinin verimli bir şekilde çalışması ve kararlılığının sağlanması için etkili kontrol stratejilerinin uygulanması gereklidir. Arayüzlü dönüştürücüler, DCMG'nin işleyişinde kilit bir rol oynar. Bu dönüştürücüler, yalnızca yerel işletimin uygun şekilde gerçekleştirilmesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda DCMG'nin farklı bileşenleri arasında koordineli bir bağlantı kurulmasına da olanak tanır. DCMG'lerde, farklı üniteler paralel olarak bağlandığından, esnek voltaj ve akım kontrolü ile paralel bağlı dönüştürücüler arasında hassas güç paylaşımının sağlanması büyük önem taşır.



Şekil 3.1. DC mikroşebeke kontrol diyagramı

Yük görevi gören dönüştürücüler, sistemde sabit güç davranışından kaynaklanan ve sistemi kararsız hale getirebilen doğrusal olmayan bir etki yaratır. Bu durum, kontrol stratejileri tasarlanırken dikkate alınması gereken önemli bir faktördür (Liu vd., 2018).

DC mikroşebeke kontrolü, mikroşebekenin kararlı, verimli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla kullanılan yöntemler ve teknolojileri kapsar. DC mikroşebekeler, doğru akım (DC) tabanlı enerji kaynakları, depolama sistemleri ve yükleri içerdiğinden, kontrol sistemleri bu bileşenler arasındaki enerji akışını optimize etmek ve sistemin kararlılığını korumak açısından kritik bir rol oynar. Bu nedenle, etkili kontrol stratejileri, DCMG'lerin performansını artırmak ve sistemin güvenilirliğini sağlamak için vazgeçilmezdir.

3.1. Kontrol Hedefleri

Dağıtılmış enerji üretiminin artması ve doğrusal olmayan yüklerin yaygınlaşması, kontrol yapılarını büyük ölçüde önemli hale getirmiştir. Bir DC Mikroşebeke (DCMG) sisteminin temel kontrol hedefleri aşağıda özetlenmiştir (Shuai vd., 2018), (Altun, 2020):

DC Mikroşebeke Kontrolünün Temel Unsurları ve Yaklaşımları olarak;

- **Enerji Dengesini Sağlamak:** Üretilen enerji ile tüketilen enerji arasında denge kurmak ve enerji depolama sistemlerini etkin bir şekilde yönetmek.
- **Gerilim ve Akım Seviyelerini Sabit Tutmak:** DC mikroşebeke içinde gerilim ve akım seviyelerini kontrol ederek, aşırı yüklenme veya kısa devre gibi durumlara karşı koruma sağlamak.
- **Verimliliği Artırmak:** Enerji kayıplarını minimize ederek ve kaynakları en uygun şekilde kullanarak sistem verimliliğini en üst düzeye çıkarmak.
- **Ada Modunda Enerji Sağlamak:** Şebeke bağlantısı kesildiğinde bile enerji sağlamak (ada modu) ve farklı enerji kaynakları ile yükler arasında uyum sağlayarak güvenilirlik ve esneklik sunmak.
- **Verimli Voltaj:** Hem şebekeye bağlı hem de ada modunda voltajın etkin bir şekilde kontrol edilmesi.
- **Orantılı Yük Paylaşımı:** Paralel bağlı dönüştürücüler arasında yükün adil ve dengeli bir şekilde paylaşılması.

- **Sabit Güç Yüğü ve Doğrusal Olmayan Yüğülerle Kararlı Çalışma:** Sabit güç yüğüleri ve doğrusal olmayan yüğülerle sistemin kararlı bir şekilde çalışmasını sağlamak.
- **DEK'ler ve ESD'ler Arasında Koordinasyon:** Dağıtılmış Enerji Kaynakları (DEK'ler) ve Enerji Depolama Cihazları (ESD'ler) arasında etkili koordinasyon sağlamak.
- **Şebeke ile Senkronizasyon:** DCMG'nin ana şebeke ile senkronize bir şekilde çalışmasını sağlamak.
- **Güç Akışı Kontrolü:** DCMG içinde ve şebeke ile (şebekeye bağlıysa) güç akışının etkin bir şekilde kontrol edilmesi.
- **Sorunsuz Mod Geçişi:** Şebekeye bağlı moddan ada moduna sorunsuz bir şekilde geçiş yapabilmek.
- **DEK'lerin Potansiyelini Maksimize Etmek:** Dağıtılmış enerji kaynaklarının potansiyelini en üst düzeyde kullanarak sistem performansını artırmak.

Bu hedefler, DC mikroşebeke sistemlerinin kararlı, verimli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir. Kontrol stratejileri, bu hedeflere ulaşmak için tasarlanır ve uygulanır.

3.2. Kontrol Stratejileri

DC Mikroşebeke (DCMG) kontrol stratejileri, genel olarak iki ana kategoriye ayrılabilir:

Temel Kontrol Stratejileri, üç farklı yaklaşım üzerinden uygulanabilir:

- **Merkezi Kontrol:** Tüm kontrol kararlarının merkezi bir birim tarafından alındığı yapı.
- **Merkezi Olmayan Kontrol:** Kontrolün birden fazla birim tarafından bağımsız olarak yönetildiği yapı.
- **Dağıtılmış Kontrol:** Kontrolün sistemdeki farklı birimler arasında koordineli bir şekilde paylaşıldığı yapı (Sahoo vd., 2018).

Çok Seviyeli Kontrol Stratejileri ise, hiyerarşik bir yapıda farklı kontrol seviyeleri üzerinden uygulanır. Her kontrol seviyesi, temel kontrol stratejilerinden birini kullanır. Önerilen veya geliştirilen hiyerarşik kontrol stratejilerinin neredeyse tamamı, iki seviyeli veya üç seviyeli kontrol yapıları altında incelenebilir (Sahoo vd., 2018).

Bu sınıflandırma, DCMG sistemlerinin kontrol yapılarını daha iyi anlamak ve uygulamak için temel bir çerçeve sunar.

3.3. Temel Kontrol Stratejileri

Kontrol stratejilerinin temelinde iletişim önemli bir rol oynar. Temel kontrol stratejileri, iletişim düzeyine göre üç ana yöntemle sınıflandırılır:

- **Merkezi Kontrol:** Tüm kontrol kararlarının merkezi bir birim tarafından alındığı ve uygulandığı yöntemdir. Bu yapıda, sistemin tüm bileşenleri merkezi bir kontrol birimiyle iletişim halindedir.
- **Merkezi Olmayan Kontrol:** Kontrolün birden fazla bağımsız birim tarafından yönetildiği yöntemdir. Bu yaklaşımda, her birim kendi kontrol kararlarını alır ve merkezi bir otoriteye ihtiyaç duymaz.
- **Dağıtılmış Kontrol:** Kontrolün sistemdeki farklı birimler arasında koordineli bir şekilde paylaşıldığı yöntemdir. Bu yapıda, birimler birbirleriyle iletişim kurarak ortak kararlar alır ve uygular.

Bu üç yöntem, DC Mikroşebeke (DCMG) sistemlerinin kontrol yapılarını anlamak ve uygulamak için temel bir çerçeve sunar.

3.3.1. Merkezi Kontrol

Merkezi kontrol stratejisinde, dağıtılmış üniteler merkezi bir kontrol birimi tarafından yönetilir. Bu yöntemde, DC Mikroşebeke (DCMG) sistemindeki dağıtılmış ünitelerden gelen veriler toplanır, işlenir ve Dijital İletişim Bağlantıları (DCL'ler) aracılığıyla bu ünitelere komutlar gönderilir. İletişim, merkezi kontrol sisteminin temelini oluşturur.

3.3.1.1. Avantajlar

- **Güçlü Gözlemlenebilirlik ve Kontrol Edilebilirlik:** Tüm sistemin durumu tek bir noktadan izlenebilir ve yönetilebilir.
- **Yüksek Doğruluk:** Merkezi kontrol, sistemin genel durumunu daha hassas bir şekilde optimize etme imkânı sunar.
- **Kolay Optimizasyon:** Enerji yönetimi ve kaynak paylaşımı merkezi olarak planlanabilir.
- **Basit Yapı:** Kontrol mantığı tek bir birimde toplandığı için uygulaması nispeten kolaydır.

3.3.1.2. Dezavantajlar

- **Tek Noktada Arıza Riski:** Merkezi kontrolör arızalandığında tüm sistem etkilenir.
- **Azaltılmış Güvenilirlik ve Esneklik:** Sistemin güvenilirliği ve esnekliği, merkezi yapı nedeniyle sınırlıdır.
- **Ölçeklenebilirlik Sorunu:** Büyük ölçekli sistemlerde merkezi kontrolörün işlem yükü artar ve sistemin ölçeklenebilirliği zorlaşır.
- **İletişim Altyapısı Gerekliliği:** Tüm bileşenlerin merkezi kontrolörle sürekli iletişim halinde olması gerekir, bu da iletişim altyapısına bağımlılık yaratır.

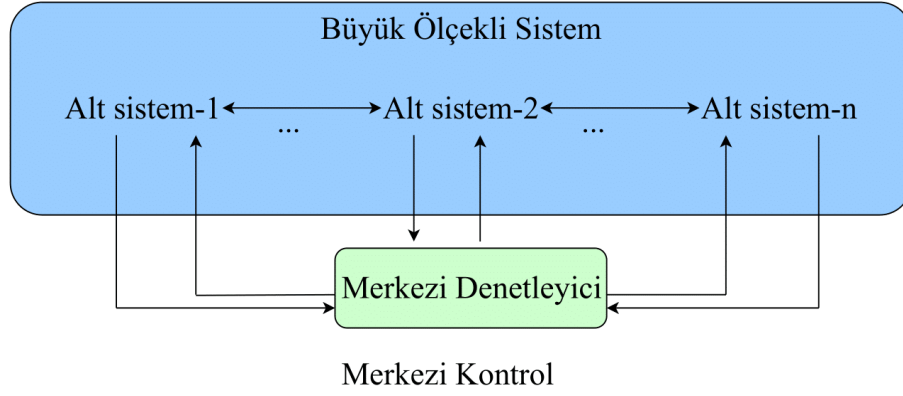
3.3.1.3. Kullanım Alanları

Merkezi kontrol şeması, özellikle toplanacak bilgilerin sınırlı olduğu ve kontrolün Düşük Bant Genişliği İletişimi (LBC) yapısıyla gerçekleştirilebildiği küçük ölçekli DCMG sistemleri için uygundur (Tsikalakis & Hatziargyriou, 2008). Bu tür sistemler genellikle şebekeye bağlı küçük mikroşebekelerde kullanılır.

3.3.1.4. Çalışma Prensipleri

- **Veri Toplama:** Tüm bileşenlerden (enerji kaynakları, depolama sistemleri, yükler) gerilim, akım ve güç durumu gibi veriler merkezi kontrolöre iletilir.
- **Veri İşleme ve Karar Alma:** Kontrolör, toplanan verilere dayanarak enerji akışını optimize eder ve gerekli komutları bileşenlere gönderir.
- **Komut Uygulama:** Örneğin, enerji kaynaklarının ne zaman devreye gireceği, depolama sistemlerinin ne zaman şarj/deşarj olacağı gibi kararlar alınır ve uygulanır.

Merkezi kontrol şemasının temel yapılandırması Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bu yapı, küçük ölçekli sistemlerde etkili olmakla birlikte, büyük ve karmaşık sistemlerde bazı sınırlamalara sahiptir.



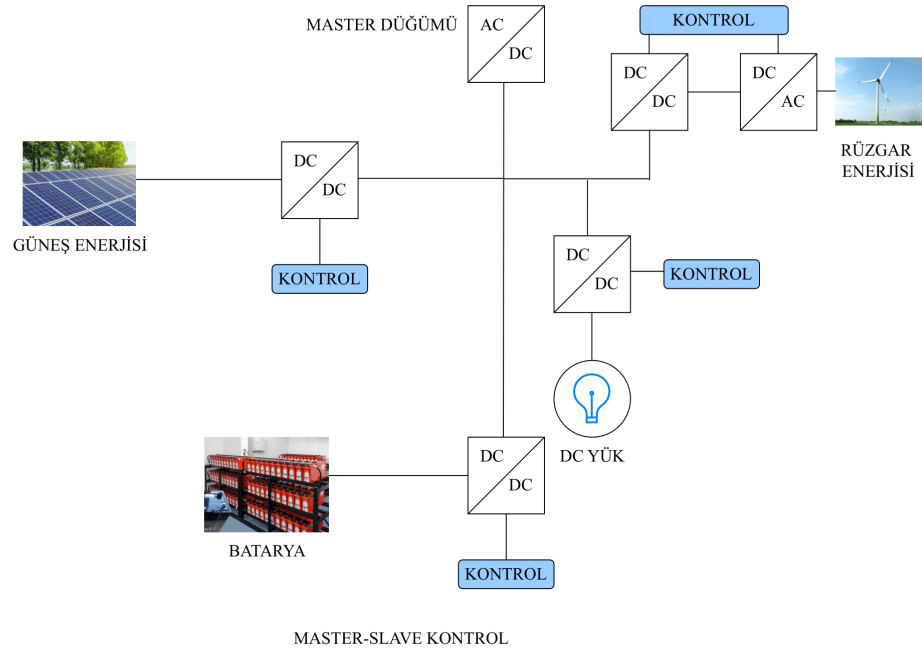
Şekil 3.2. Merkezi kontrol şemasının şematik diyagramı.

Efendi-köle kontrol stratejisi, Şekil 3.3'te gösterildiği gibi merkezi bir kontrol yapısının tipik bir örneğidir (Ferreira vd., 2012). Bu stratejide, birincil (efendi) rolündeki bir dönüştürücü, Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü (VSC) olarak çalışır ve DC bara voltajının düzenlenmesinden sorumludur. Diğer dönüştürücüler ise Sabit Kaynaklı İnvertör (CSI) olarak görev yapar ve ana dönüştürücünün modelini takip eder. Bu kontrol stratejisi, Yüksek Bant Genişliği İletişimi (HBC) gerektirir (Wang vd., 2012).

Dezavantajlar:

- **Tek Nokta Arızası Riski:** Sistemin güvenilirliği büyük ölçüde ana dönüştürücüye bağlıdır. Ana dönüştürücüde bir arıza meydana gelirse, tüm sistem etkilenebilir.
- **Denetleyici Kontrol Gereksinimi:** Sistemin düzgün çalışması için sürekli denetleyici kontrol gereklidir.
- **Zayıf Ölçeklenebilirlik:** Sistemin büyümesi veya genişlemesi durumunda kontrol yapısının ölçeklenmesi zorlaşır.

Bu kontrol stratejisi, özellikle ana dönüştürücünün performansına bağlı olarak çalıştığı için, sistemin güvenilirliği ve esnekliği açısından bazı sınırlamalara sahiptir.



Şekil 3.3. Şematik diyagram Master-slave kontrolü.

3.3.2. Merkezi Olmayan Kontrol

Merkezi olmayan kontrol stratejisinde, sistemdeki dağıtılmış birimler arasında iletişim bağlantısı bulunmaz. Her birim, yerel değişkenlere dayalı olarak bağımsız denetleyiciler tarafından yönetilir. Bu kontrol şeması, sistemin diğer birimleri hakkında yetersiz bilgi nedeniyle bazı performans sınırlamalarına sahip olsa da iletişim bağlantılarına ihtiyaç duymaması nedeniyle en güvenilir kontrol yöntemlerinden biri olarak kabul edilir (Tsikalakis & Hatziargyriou, 2008). Merkezi olmayan kontrol şemasının temel yapılandırması Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

3.3.2.1. Droop Kontrolü

Droop kontrol stratejisi, dönüştürücülerin DC Mikroşebeke (DCMG) ile paralel bağlandığı bir yöntemdir (Wu, Tang, Dragicevic, Guerrero & Vasquez, 2015). Bu strateji, genellikle Dijital İletişim Bağlantıları (DCL'ler) kullanılmadan dönüştürücüler arasında dolaşan akımları önlemek için benimsenir. Droop kontrol stratejisinde, geri besleme sinyali olarak çıkış gücü veya çıkış akımı kullanılır (Ferreira vd., 2012):

- **Çıkış Gücü:** Sabit Güç Yükleri (CPL'ler) için geri besleme sinyali olarak kullanılır.
- **Çıkış Akımı:** CPL'ler dışındaki yükler için geri besleme sinyali olarak kullanılır.

Çalışma Prensipleri:

- **Yerel Karar Alma:** Her bileşen, kendi durumuna göre kararlar alır (örneğin, droop kontrolü).
- **Örnek Uygulama:** Bir enerji kaynağı, kendi gerilim seviyesini yük durumuna göre ayarlar.
- **İletişim Gereksinimi:** İletişim altyapısına ihtiyaç duyulmaz.

Avantajlar:

- **Basitlik:** İletişim altyapısı gerektirmediğinden uygulaması kolaydır.
- **Güvenilirlik:** İletişim hatası riski olmadığı için sistem daha güvenilirdir.
- **Hızlı Tepki:** Yerel kararlar hızlı bir şekilde alınır ve uygulanır.

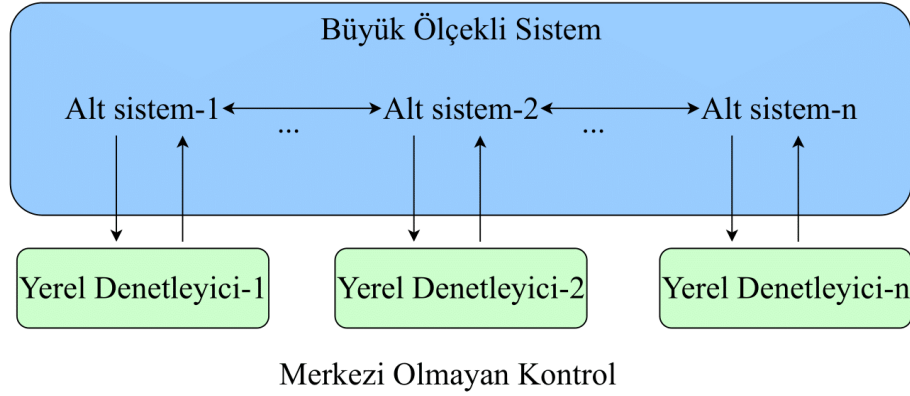
Dezavantajlar:

- **Optimal Olmayan Çözümler:** Sistem genelinde en uygun çözümler sağlanamayabilir.
- **Sınırlı Koordinasyon:** Bileşenler arasında koordinasyon eksikliği olabilir, bu da sistem performansını sınırlayabilir.

Kullanım Alanları:

- **Küçük Ölçekli ve Bağımsız Mikroşebekeler:** Özellikle iletişim altyapısının kurulamadığı veya gerekli olmadığı durumlarda tercih edilir.
- **Acil Durum Sistemleri:** Hızlı karar alma ve güvenilirlik gerektiren acil durum uygulamaları için uygundur.

Merkezi olmayan kontrol stratejisi, özellikle iletişim altyapısının sınırlı olduğu veya olmadığı durumlarda etkili bir çözüm sunar. Ancak, sistem genelinde optimal performans sağlamak için koordinasyon eksikliği gibi bazı sınırlamalara sahiptir.



Şekil 3.4. Merkezi olmayan kontrol şemasının şematik diyagramı.

3.3.2.1. Droop Kontrol

Droop Kontrolü (Droop Control), DC mikroşebekelerde ve diğer elektrik sistemlerinde birden fazla enerji kaynağı arasında dengeli yük paylaşımı sağlamak için yaygın olarak kullanılan bir kontrol yöntemidir. Bu yöntem, özellikle paralel bağlı enerji kaynaklarının (örneğin, güneş panelleri, bataryalar, jeneratörler) bulunduğu sistemlerde etkili bir şekilde çalışır. Droop kontrol, iletişim altyapısı gerektirmez ve her bir enerji kaynağı kendi yerel bilgilerine dayanarak bağımsız şekilde çalışır.

Droop Control genellikle aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$V_{out} = V_{ref} - R_{droop} \cdot I_{out}$$

Denklem 3.1. Droop kontrol çıkış gerilimi

- V_{out} = Enerji Kaynağının Çıkış Gerilimi
- V_{ref} = Referans Gerilim (Yüksüz Durumdaki Gerilim)
- R_{droop} = Droop Direnci (Yük Paylaşımını Belirleyen Parametre)
- I_{out} = Enerji Kaynağının Çıkış Akımı

Temel Prensipte:

- **Gerilim Düşüşü (Droop Eğrisi):** Enerji kaynakları, yük arttıkça çıkış gerilimlerini düşürür. Bu gerilim düşüşü, kaynaklar arasında otomatik olarak yük paylaşımını sağlar.
- **Yük Paylaşımı:** Paralel bağlı enerji kaynakları, droop eğrisi sayesinde yükü dengeli bir şekilde paylaşır.

- Her dönüştürücü için belirlenen voltaj referans noktası, dönüştürücüler arasındaki iş birliği ile sağlanan iki terimle genişletilmiştir. Bu terimler, voltaj regülatörü tarafından üretilmektedir. Tek bir dönüştürücü için yerel voltaj referans noktası şu şekilde ifade edilebilir:

$$v_{i^*} = V_i^{ref} - V_i^d + \delta_{v_i}$$

$$v_{i^*} = V_i^{ref} - r_i i_i + \delta_{v_i}$$

Denklem 3.2. Yerel Gerilimi

Burada:

- V_i^{ref} : Küresel (global) referans voltajı
- V_i^d : Droop (gerilim düşüşü) voltajı
- δ_{v_i} : Voltaj düzeltme terimi
- r_i : i'nci dönüştürücünün sanal empedansı
- i_i : i'nci dönüştürücünün çıkış akımı

Bu voltaj referans noktası, Şekil 2(a)'da gösterildiği gibi bir voltaj sınırlayıcı (voltage limiter) ile daha da ayarlanır. Voltaj sınırlayıcı, mikro şebeke baralarındaki voltaj seviyelerinin kabul edilebilir bir aralıkta kalmasını sağlar.

Şekil 2(b), voltaj düzeltme terimi δ_{v_i} ve sanal empedans r_i değerlerinin nasıl değiştirilebileceğini ve dönüştürücünün çalışma noktasını nasıl yönlendirebileceğini detaylandırmaktadır.

Droop Mekanizması ve Yük Paylaşımı:

- Denklemde yer alan $r_i i_i$ terimi, droop mekanizması tarafından üretilir.
- Bu mekanizma, dönüştürücülerin çıkış empedanslarını belirler ve yük paylaşımını dengeler.
- Yük paylaşımı nedeniyle mikro şebekede bir voltaj düşüşü oluşur.

Voltaj Düzeltme Terimi δ_{v_i} ve Mikro Şebeke Voltajı:

- δ_{v_i} terimi, mikro şebeke voltajını artırmak için yerel referans voltajlarına eklenir.
- Böylece, droop mekanizmasının neden olduğu voltaj düşüşü dengelenir ve mikro şebekenin genel voltaj seviyesi korunur.

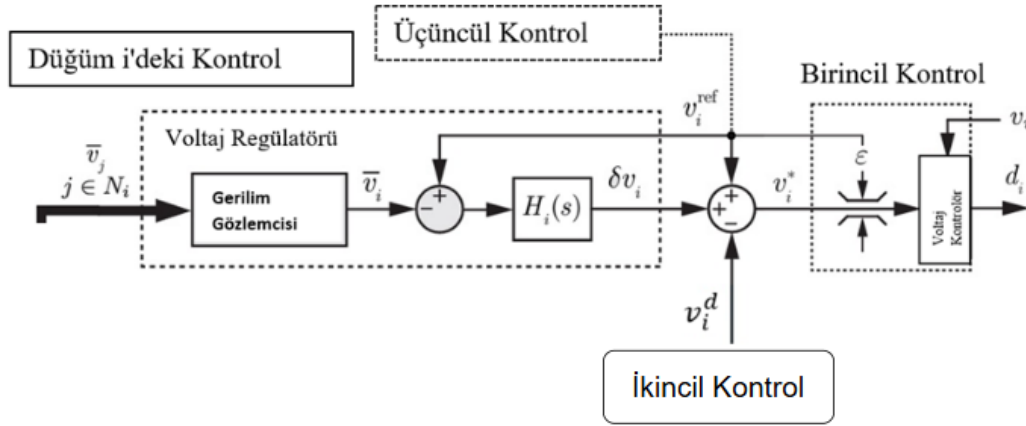
İki Ana Kontrol Modülü:

Dönüştürücüde iki ana kontrol bileşeni bulunmaktadır:

- Voltaj Regülatörü: Mikro şebeke voltajını kararlı bir seviyede tutmak için kullanılır.

Özetle;

- Bu sistem, mikro şebekenin voltaj seviyelerini stabilize etmek ve daha iyi yük paylaşımı sağlamak için droop kontrolü ile birlikte voltaj ve akım regülatörlerini kullanmaktadır.
- Droop mekanizması, yük paylaşımını düzenler ancak voltaj düşüşüne neden olur.
- Voltaj düzeltme terimi δv_i , bu voltaj düşüşünü telafi ederek mikro şebeke voltaj seviyesini yükseltir.
- Sanal empedans r_i , sistemin yük değişimlerine karşı daha esnek hale gelmesini sağlar.
- Voltaj ve akım regülatörleri, sistemin kararlı ve dengeli çalışmasını garanti eder.



Şekil 3.5. Önerilen dağıtılmış kontrol politikası: tek bir etken (dönüştürücü) için işbirlikçi adaptif droop kontrolü

Droop kontrol'ün Avantajları:

- **İletişim Gerektirmez:** Her birim kendi yerel bilgilerine dayanarak çalışır.
- **Basit ve Güvenilir:** Karmaşık iletişim altyapısına ihtiyaç duyulmaz.
- **Esneklik:** Yeni enerji kaynakları kolayca sisteme entegre edilebilir.
- **Hızlı Tepki:** Yük değişimlerine hızlı bir şekilde uyum sağlar.

Droop Control'ün Dezavantajları:

- **Gerilim Sapmaları:** Yük arttıkça sistem genelinde gerilim düşüşü meydana gelir.

- **Orantısız Olmayan Yük Paylaşımı:** Kaynakların özellikleri farklıysa yük paylaşımı dengesiz olabilir.
- **Droop Direncinin Ayarlanması:** Droop direncinin doğru ayarlanması gereklidir, aksi takdirde sistem kararsız hale gelebilir.

Droop kontrolünün DC mikro şebekelerde iyileştirilmesi, sistemin kararlılığını, verimliliğini ve güvenilirliğini artırmak için gereklidir. Geleneksel droop kontrol yöntemleri, yük paylaşımı doğruluğu, gerilim regülasyonu ve ölçeklenebilirlik açısından bazı sınırlamalar taşımaktadır. Bu nedenle, mevcut yöntemlerin iyileştirilmesi, enerji yönetimini optimize etmek ve mikro şebekelerin daha verimli çalışmasını sağlamak açısından kritik öneme sahiptir.

Aşağıdaki tabloda, droop kontrolün neden iyileştirilmesi gerektiği ve iyileştirme yöntemleri detaylandırılmıştır:

Tablo 3.1. Droop kontrolünün iyileştirilmesi için kullanılan yöntemler

Sorun / İyileştirme Gereksinimi	İyileştirme Yöntemi	Açıklama
Güç Paylaşım Hataları	Adaptif Droop Kontrolü	Yük değişimlerine ve hat empedanslarına bağlı olarak droop katsayıları dinamik olarak ayarlanarak güç paylaşımı daha doğru hale getirilir.
Gerilim Regülasyonu Problemleri	Geri Besleme ve Telif Mekanizmaları	Gerilim düşümlerinin etkisini azaltmak için gelişmiş geri besleme mekanizmaları ve hat empedansı telif yöntemleri kullanılabilir.
Merkezi Kontrol Bağımlılığı	Dağıtılmış Kontrol Stratejileri	Merkezi kontrol yerine, her dönüştürücünün komşularıyla haberleştiği dağıtılmış sistemler kullanılarak ölçeklenebilirlik artırılabilir.
Haberleşme Bağımlılığı ve Gecikmeler	Haberleşme Destekli Optimizasyon	Koordineli haberleşme algoritmaları kullanarak, haberleşme gereksinimi minimize edilir ve düşük gecikmeli veri paylaşımı sağlanır.
Yüksek Anahtarlama Kayıpları ve Verimsizlik	Güç Elektronik Optimizasyonu	Daha verimli dönüştürücüler ve gelişmiş anahtarlama teknikleri ile kayıplar azaltılır.
Dinamik Yük ve Kaynak Değişimlerine Uyum Sağlama Güçlüğü	Yapay Zeka ve Öğrenme Algoritmaları	Makine öğrenmesi ile sistemin yük ve üretim değişimlerini analiz ederek kontrol stratejileri optimize edilebilir.

Droop kontrol, özellikle iletişim altyapısının sınırlı olduğu veya olmadığı durumlarda etkili bir çözüm sunar. Ancak, gerilim sapmaları ve yük paylaşımı dengesizlikleri gibi sınırlamaları nedeniyle, bu yöntem genellikle iyileştirme teknikleriyle birlikte kullanılır.

DC mikroşebekeler, özellikle yenilenebilir enerji kaynakları (güneş panelleri, bataryalar) ve elektronik yükler için uygun bir seçenektir. Ancak, bu sistemlerde iki temel kontrol problemi vardır:

- **Voltaj Regülasyonu:** Mikroşebeke içindeki voltajın belirli bir referans değerinde tutulması.
- **Yük Paylaşımı:** Yükün, kaynakların kapasitelerine göre adil bir şekilde paylaşılması.

Geleneksel olarak, bu problemler *merkezi kontrol* yöntemleriyle çözülür. Ancak merkezi kontrol, tek noktada arıza riski taşır ve ölçeklenebilirlik açısından sınırlıdır. Bu nedenle, *dağıtılmış kontrol* yöntemleri önerilir.

3.3.3. Dağıtılmış Kontrol Yöntemi

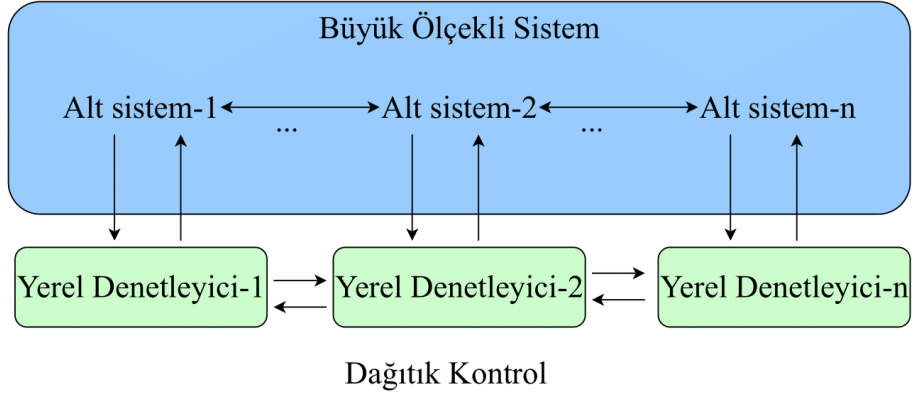
Dağıtılmış kontrol, her bir enerji kaynağının (örneğin, DC-DC dönüştürücüler) kendi kontrol kararlarını almasını sağlar. Bu yöntemde, kaynaklar arasında sınırlı bir iletişim ağı kurulur ve her kaynak, sadece komşularıyla bilgi alışverişi yapar. Merkezi kontrol gerektirmeden mikro şebekenin kararlı çalışmasını mümkün kılar.

Avantajları:

- **Ölçeklenebilirlik:** Yeni dönüştürücüler eklendiğinde sistem kolayca genişleyebilir.
- **Hata Dayanıklılığı:** Tek bir merkezi kontrol ünitesine bağlı olmadığı için, sistem arızalara karşı daha dirençlidir.
- **Esneklik:** Ani yük değişikliklerine daha hızlı tepki verebilir.

Dağıtılmış kontrol, üç temel kontrol katmanına ayrılır:

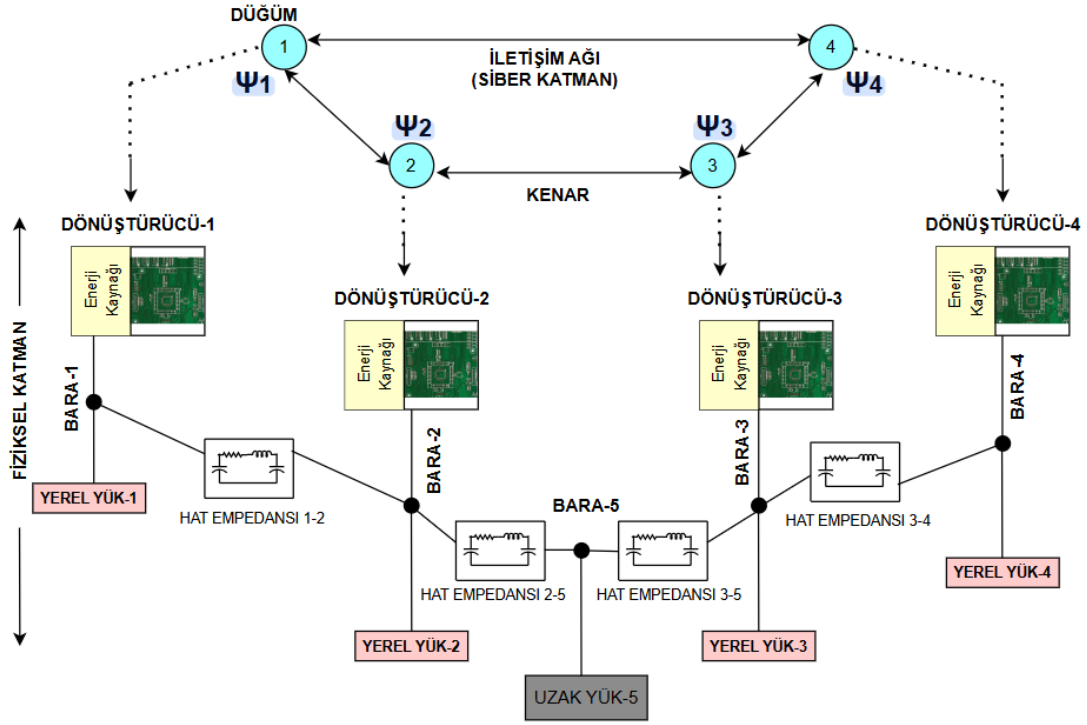
- **Birincil Kontrol (Primary Control) - Droop Kontrolü:** Birincil kontrol, mikro şebekedeki voltaj ve akım seviyelerinin stabilitesini sağlamak için kullanılır. En yaygın kullanılan yöntemlerden biri droop kontrolüdür.
- **İkincil Kontrol (Secondary Control) – Voltaj Regülasyonu:** İkincil kontrol, birincil kontrolün neden olduğu voltaj sapmalarını düzelterek mikro şebekedeki nominal voltaj seviyesini geri kazandırmayı hedefler.
- **Üçüncül Kontrol (Tertiary Control) – Güç Yönetimi:** Üçüncül kontrol, mikro şebekenin üst düzey enerji yönetimini sağlar.



Şekil 3.6. Dağıtık kontrol şemasının şematik diyagramı.

4. DC MİKRO ŞEBEKELERİN DAĞITIK KOOPERATİF KONTROL ÇERÇEVESİ

Bu bölümde, DC mikro şebekelerin dağıtılmış işbirlikçi kontrol çerçevesi ele alınmaktadır. Geleneksel merkezi kontrol yerine dağıtılmış bir yapı benimsenerek, her dönüştürücünün yalnızca komşularıyla veri paylaşarak karar vermesi sağlanmaktadır



Şekil 4.1. Şebekeyi besleyen enerji kaynakları ve kaynaklar arasında veri alışverişini kolaylaştıran siber ağ da dahil olmak üzere bir DC mikro şebekesinin genel düzeni.

Mikro şebekelerde birincil ve ikincil kontroller, sistem genelinde voltaj düzenlemesi ve yük paylaşımı gibi kritik görevleri üstlenir. Yük paylaşımının doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi, yükün katılımcı dönüştürücüler arasında anma güçlerine orantılı olarak dağıtılmasını sağlar. Bu sayede, tüm kaynakların birim başına akımları eşitlenir ve dolaşan akımların önüne geçilerek herhangi bir kaynağın aşırı yüklenmesi engellenir (Loh vd., 2013; Lu vd., 2014). Yük paylaşımı için yaygın olarak kullanılan droop kontrol yöntemi, her dönüştürücüye sanal bir çıkış empedansı uygulanması prensibine dayanır (Lopes vd., 2006). Sarkma kontrolünün statik ve dinamik performansı ile kararlılık analizleri, literatürde detaylı bir şekilde incelenmiştir (Mohamed & El-Saadany, 2008). Ancak, basitliği ve uygulama kolaylığına rağmen, geleneksel sarkma yöntemi, özellikle hat empedanslarının ihmal edilebilir düzeyde olduğu durumlarda, zayıf voltaj düzenlemesi ve yük paylaşımı

sorunlarıyla karşı karşıya kalır (Anand, & Fernandes, 2011). Bu sorunların temel nedeni, sanal empedansın neden olduğu voltaj düşüşüdür. Ayrıca, farklı dönüştürücüler arasındaki çıkış voltajı uyumsuzluğu da voltaj düzenlemesini olumsuz etkileyen bir diğer faktördür. Bu uyumsuzluk, DC sistemlerindeki doğal güç akışı için önemli olsa da voltaj düzenleme sorununu daha da karmaşık hale getirir.

Bu sorunlara yönelik olası çözümler, literatürde çeşitli şekillerde ele alınmıştır (Anand vd., 2013). Bu çözümler genellikle merkezi bir kontrol yapısına dayanır (Guerrero vd., 2011) veya mikro şebeke boyunca herhangi iki düğümün doğrudan bağlandığı tam bağlı bir iletişim ağı gerektirir (Ferreira vd., 2012; Vandoorn vd., 2011). Örneğin Guerrero vd. (2011)'de önerilen merkezi ikincil kontrol yöntemi, mikro şebeke voltajını ölçer, bir voltaj restorasyon terimi hesaplar ve bu terimi tüm kaynaklara gönderir. Bu yöntem, mikro şebeke boyunca tüm dönüştürücülerin voltajlarının eşit olduğu varsayımına dayanır; ancak bu varsayım, DC mikro şebekeler için pratikte geçerli değildir. Meng vd. (2013) ve Dragicevic vd. (2014)'de önerilen adaptif sarkma kontrol yöntemi, performansı daha da iyileştirmekle birlikte, hat empedansını ihmal eder. Anand vd. (2013)'te ise yüksek sarkma kazanımları kullanılarak hat empedanslarının neden olduğu güç paylaşımı tutarsızlığı azaltılmaya çalışılmıştır. Shafiee vd. (2014)'te ise tüm mikro şebekeye yayılmış bir iletişim ağı kullanılarak merkezi ikincil kontrolün işlevselliği her dönüştürücüye yerleştirilmiştir. Ancak bu yöntem, tüm kaynaklar arasında noktadan noktaya iletişim bağlantıları gerektirir ve herhangi bir bağlantı arızası durumunda tüm mikro şebekenin çalışması sekteye uğrar. Hat empedansının etkisi, tam bağlı bir iletişim ağı ile Lu vd. (2014)'te dikkate alınmıştır. Ancak bu tür sistemler, herhangi bir bağlantı arızasının tüm kontrol işlevselliğini bozması nedeniyle arızaya karşı oldukça hassastır. Ayrıca, gelecekteki genişletme çalışmaları da bir diğer zorluktur; herhangi bir yapısal veya elektriksel yükseltme sonrasında, kaynak sayısı gibi kontrol ayarlarının güncellenmesi ve tüm dönüştürücülere yeniden yerleştirilmesi gerekir.

Voltaj düzenleme gereksinimi, Lu vd. (2014) ve Nasirian vd. (2014)'te hat empedansı etkisini de içerecek şekilde yeniden tanımlanmıştır. Bu yaklaşıma göre, mikro şebeke boyunca ortalama voltajın (yalnızca belirli bir bara voltajının değil), üçüncül kontrol tarafından belirlenen küresel voltaj ayar noktasında düzenlenmesi gerekmektedir. Bu yöntem, küresel voltaj düzenlemesi olarak adlandırılır ve bu çalışmada da bu yaklaşım benimsenmiştir. Küresel voltaj düzenlemesi, mikro şebekenin genelinde daha tutarlı bir voltaj seviyesi sağlayarak sistemin kararlılığını ve verimliliğini artırmayı hedefler. Bu

sayede, hem voltaj düzenleme hem de yük paylaşımı sorunları daha etkin bir şekilde çözülebilir.

Önerilen dağıtılmış işbirlikçi kontrol yönteminin temel özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- **Dönüştürücüler Arasında İş Birliği:** Bir iletişim ağı üzerinden dönüştürücüler arasında kurulan iş birliği, her bir dönüştürücü için ek düzeltme terimleri sağlar ve yerel voltaj ayar noktasının hassas bir şekilde ayarlanmasına olanak tanır. Bu sayede, sistem genelinde daha tutarlı bir voltaj seviyesi elde edilir.
- **Voltaj Regülatörü ile Güçlendirme:** Her dönüştürücü, bir voltaj regülatörü ile donatılmıştır. Bu regülatör, yerel voltaj ayar noktasını optimize etmek ve küresel voltaj düzenlemesini sağlamak için voltaj gözlemcisi tarafından üretilen tahminleri kullanır. Bu yaklaşım, mikro şebeke genelinde voltaj stabilitesini artırır.
- **Voltaj ve Akım Regülatörlerinin Uyum:** Voltaj ve akım regülatörlerinin iş birliği, özellikle hat empedanslarının ihmal edilemeyecek düzeyde olduğu durumlarda hem küresel voltaj düzenlemesini hem de orantılı yük paylaşımını etkili bir şekilde gerçekleştirir. Bu uyum, sistemin genel performansını önemli ölçüde artırır.
- **Ölçeklenebilirlik ve Tak-Çalışır Özelliği:** Önerilen kontrol şeması, kaynak sayısı gibi küresel parametrelerin önceden bilinmesini gerektirmez. Bu nedenle, sistem kolayca ölçeklenebilir ve tak-çalışır özelliğine sahiptir. Bu, mikro şebekenin genişletilmesi veya yapısal değişiklikler yapılması durumunda büyük bir esneklik sağlar.
- **Seyrek İletişim Ağı:** Mikro şebeke boyunca yayılan seyrek bir iletişim ağı, dönüştürücüler arasında sınırlı veri alışverişine olanak tanır. Her dönüştürücü yalnızca komşularıyla iletişim kurar, bu da yüksek bant genişliği ve tam bağlı iletişim ağı gerektiren merkezi kontrol yaklaşımlarına kıyasla daha düşük maliyetli ve daha az karmaşık bir çözüm sunar.

Bu özellikler, önerilen dağıtılmış işbirlikçi kontrol yönteminin, mikro şebekelerde voltaj düzenlemesi ve yük paylaşımı konularında etkili, esnek ve güvenilir bir çözüm olduğunu göstermektedir.

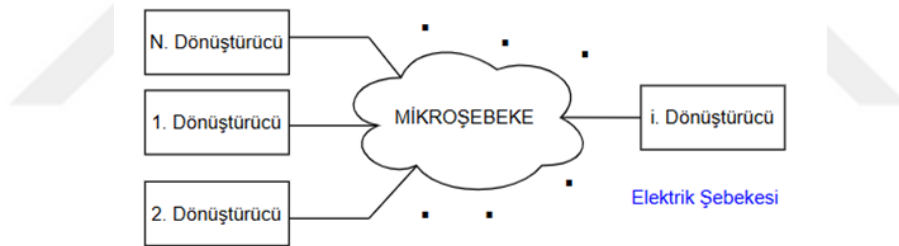
4.1. Mikro Şebeke ve Siber Katman

Şekil 4.1’de gösterildiği gibi, mikro şebeke kaynakları (güç dönüştürücüleri) bir siber ağa eşlenmektedir. Her düğüm (node), bir dönüştürücüyü temsil ederken, kenarlar (edges) komşu dönüştürücüler arasında veri alışverişini sağlayan iletişim bağlantılarıdır.

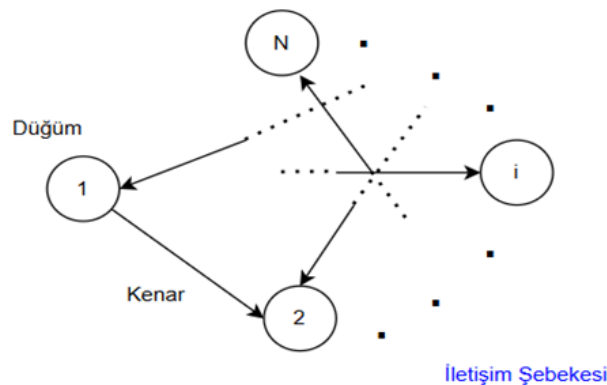
Önemli noktalar:

- İletişim ağı, fiziksel mikro şebeke topolojisiyle birebir aynı olmak zorunda değildir.
- Düğüm (converter) yalnızca komşularıyla veri paylaşır, bu da sistemin ölçeklenebilirliğini artırır.
- Bu yapı, işbirlikçi kontrol paradigmasını mümkün kılar ve küresel bir uzlaşma (consensus) mekanizması oluşturur.

Şekil 4.2 ve 4.3'te görüldüğü gibi dağıtılmış kontrol sistemlerinde, her dönüştürücü (converter), komşularından gelen verileri ve kendi ölçümlerini kullanarak kontrol değişkenlerini günceller.



Şekil 4.2. Bir DC mikro şebekesinin genel düzeni: şebekeyi besleyen dönüştürücüler



Şekil 4.3. Bir DC mikro şebekesinin genel düzeni: veri değişimi için kaynaklar arasında uzanan iletişim ağı.

Şekil 4.3., bir siber ağı fiziksel bir mikro şebeke üzerine nasıl eşlendiğini göstermektedir. Bu eşlemede, düğümler dönüştürücüleri, kenarlar ise veri alışverişi için kullanılan iletişim bağlantılarını temsil eder. Bu siber bağlantı yapısı, komşu dönüştürücüler arasındaki etkileşimlerin küresel bir uzlaşmaya (konsensüs) ulaşmasına olanak tanıyan işbirlikçi kontrol paradigmasının temelini oluşturur. Bu yaklaşım sayesinde, büyük ölçekli dinamik bir sistemdeki tüm ajanların (dönüştürücülerin) doğrudan birbirleriyle iletişim kurması gerekmez. Bunun yerine, her bir ajan yalnızca kendi komşularıyla kontrol değişkenlerini paylaşır. Daha sonra, komşularından gelen verileri ve kendi yerel ölçümlerini kullanarak, kontrol değişkenlerini günceller ve sistem genelinde uyumlu bir davranış sağlar.

Bu yapı, mikro şebeke kontrolünde merkezi olmayan bir yaklaşım benimsenmesine imkân tanır. Her bir dönüştürücü, yalnızca kendi komşularıyla sınırlı bir iletişim kurarak, sistemin genelinde dengeli bir voltaj düzenlemesi ve yük paylaşımı sağlar. Bu durum, özellikle büyük ölçekli sistemlerde iletişim yükünü azaltır ve sistemin daha esnek ve ölçeklenebilir olmasını sağlar. Ayrıca, bu dağıtık yapı, herhangi bir iletişim bağlantısının arızalanması durumunda bile sistemin kararlılığını koruyabilme avantajını sunar. Bu nedenle, işbirlikçi kontrol paradigması, mikro şebeke yönetiminde güvenilir ve etkili bir çözüm olarak öne çıkar. İletişim grafiğinin doğru bir şekilde tasarlanması halinde, işbirlikçi kontrol mekanizması, sistemdeki istenilen kontrol değişkenleri üzerinde küresel bir uzlaşma (konsensüs) sağlayabilir. Bu, dönüştürücüler arasında etkili bir koordinasyon kurulmasını ve mikro şebekenin genelinde dengeli bir voltaj düzenlemesi ile yük paylaşımının gerçekleştirilmesini mümkün kılar. Doğru tasarlanmış bir iletişim ağı, her bir dönüştürücünün yalnızca komşularıyla sınırlı iletişim kurarak sistem genelinde uyumlu bir davranış sergilemesine olanak tanır. Bu sayede hem iletişim yükü azaltılır hem de sistemin kararlılığı ve ölçeklenebilirliği artırılır.

4.2. İletişim Grafiği ve Matris Modellenmesi

Şekil 4.1., tipik bir DC mikro şebekenin fiziksel, siber ve kontrol katmanlarını gösteren yapısını sunmaktadır. Fiziksel katman, dağıtılabılır kaynakları (güç elektroniği dönüştürücüleri dahil), iletim hatlarını ve yükleri içerir. Siber katman ise, tüm iletişim bağlantılarından oluşur ve kaynaklar arasında veri alışverişini kolaylaştırmak için yayılmıştır. Bu, en az bir kapsayan ağaç (spanning tree) içeren seyrek bir iletişim ağıdır ve herhangi bir bağlantı arızası durumunda bile kalan ağın hala bir kapsayan ağaç içerecek

şekilde tasarlanmıştır. Şekil 4.1’de gösterilen graf yönsüz (çift yönlü) olsa da genel durumlarda yönlendirilmiş graflar da kullanılabilir.

Bu yapı, mikro şebekenin fiziksel bileşenleri ile iletişim ve kontrol sistemleri arasındaki entegrasyonu göstermektedir. Fiziksel katman, enerji üretim ve dağıtımının temelini oluştururken, siber katman, kaynaklar arasında bilgi paylaşımını sağlayarak sistemin koordineli bir şekilde çalışmasını mümkün kılar. Seyrek iletişim ağı hem maliyet hem de karmaşıklık açısından avantaj sağlarken, aynı zamanda sistemin güvenilirliğini artırmak için arıza durumlarında bile bağlantıyı koruyacak şekilde tasarlanmıştır. Bu, mikro şebekenin esnekliğini ve dayanıklılığını artıran önemli bir özelliktir.

İletişim grafiği (digraph), mikro şebekenin siber katmanı ile ilişkilidir ve aşağıdaki şekilde modellenir.

- **Düğüm Kümesi (V_G):** $V_G = \{v_1^g, v_2^g, \dots, v_n^g\}$ şeklinde ifade edilir ve her bir düğüm bir aktif kaynağı veya dönüştürücüyü temsil eder. Bu ifadede V_G , mikro şebekedeki tüm düğümleri ifade eder.

Bu düğümler arasındaki bağlantılar ise E_G kümesi ile gösterilir.

- **Kenar Kümesi (E_G):** $E_G \subset V_G \times V_G$ şeklinde tanımlanır ve düğümler arasındaki iletişim bağlantılarını gösterir.
- **Komşuluk Matrisi (A_G):** $A_G = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ şeklinde ifade edilir ve düğümler arasındaki iletişim ağırlıklarını gösterir.

Burada;

- $a_{ij} > 0$ ise, v_j^g düğümünden v_i^g düğümüne bilgi akışı vardır.
- $a_{ij} = 0$ ise, bu iki düğüm arasında doğrudan bağlantı yoktur.

Bu matris, sistemde hangi düğümlerin veri paylaşımı yaptığını belirler.

Giriş Derece Matrisi (D_G^{in} ,) ve Çıkış Derece Matrisi (D_G^{out})

$$D_G^{\text{in}} = \text{diag}\{d_i^{\text{in}}\}, \text{ burada } d_i^{\text{in}} = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$$

Denklem 4.1. Giriş derece matrisi

$$D_G^{\text{out}} = \text{diag}\{d_i^{\text{out}}\}, \text{ burada } d_i^{\text{out}} = \sum_{j \in N_j} a_{ji}$$

Denklem 4.2. Çıkış derece matrisi

Önemli olarak;

- Eğer giriş derece matrisi ile çıkış derece matrisi eşitse ($D_G^{\text{in}} = D_G^{\text{out}}$) Laplacian matrisi dengeli olarak kabul edilir.
- Graf yönsüzse (bidirectional), Laplacian matrisi dengelidir.

Laplacian matrisi, mikro şebekenin küresel dinamiklerini belirleyen ana unsurlardan biridir

$$L = D_G^{\text{in}} - A_G$$

Denklem 4.3. Laplacian matrisi (L)

Bu matrisin özdeğerleri, sistemin küresel dinamiklerini ve kararlılığını belirler.

İletişim ağının tasarımında dikkat edilmesi gereken kritik nokta: Grafın en az bir kapsayan ağaç (spanning tree) içermesi gerekmektedir.

- Bir düğümden diğer tüm düğümlere en az bir yol varsa, graf kapsayan ağaç içerir.
- Bu özellik, sistemin veri akışını ve kararlılığını sağlar.

4.3. Mikro Şebekede Veri Paylaşımı ve Kontrol Yapısı

Her dönüştürücü yalnızca komşularıyla veri paylaşarak kendi kontrol değişkenlerini günceller. Her dönüştürücü (converter) verileri komşularına iletir ve i düğümü tarafından iletilen veri seti Ψ_i , üç temel unsurdan oluşur:

1-Tahmini ortalama voltaj değeri $\bar{v}_i$

2-Ölçülen yerel voltaj v_i

3-Per-unit akım değeri i_i^{pu}

Bu veri seti, sistemin küresel gerilim regülasyonu ve yük paylaşımı sağlamasına yardımcı olur. Burada birim değer (per-unit) terimi, dönüştürücünün sağladığı akımın, anma (rated) akımına bölünmesiyle elde edilir, yani $i_i^{pu} \triangleq i_i / I_i^{\text{rated}}$. Burada I_i^{rated} , i -inci dönüştürücünün anma akımını ifade eder. Dolayısıyla, geleneksel birim değer terminolojisinden farklı olarak, her bir dönüştürücü farklı taban akım değerleri (anma akımları) kullanabilir. Geleneksel yaklaşımda, aynı voltaj bölgesindeki dönüştürücüler aynı taban akım değerlerini paylaşırlarken, burada her dönüştürücünün yüklenme yüzdesini temsil etmek için birim değer akım terminolojisi kullanılmaktadır.

İletişim bağlantılarının diğer ucunda, her bir j düğümü, tüm komşularından Ψ^k , $k \in N_j$ verilerini belirli iletişim ağırlıkları α_{jk} ile alır. Bu iletişim ağırlıkları, tasarım parametreleri olup veri transfer kazançları olarak düşünülebilir. Bu ağırlıklar, komşu dönüştürücülerden gelen verilerin ne ölçüde dikkate alınacağını belirler ve sistemin kontrol dinamiklerini optimize etmek için kullanılır.

Sonuç olarak;

- Dağıtılmış kontrol sayesinde, merkezi bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç duyulmaz.
- Her dönüştürücü sadece komşularıyla veri paylaşarak küresel bir uzlaşmaya ulaşabilir.
- İletişim ağı kesintileri, sistemin genel performansını etkilemeden yönetilebilir.

Özetle;

- Mikro şebekede güç dönüştürücüler, siber bir ağ üzerinde modellenir.
- Her dönüştürücü yalnızca komşularıyla veri paylaşarak küresel bir uzlaşmaya ulaşır.
- İletişim grafiği Laplacian matrisi ile modellenir ve sistemin kararlılığını belirler.
- İletişim bağlantıları minimal olsa bile, sistem kararlı şekilde çalışabilir.

4.4. Adaptif Droop Kontrol

Bu bölümde, dağıtılmış adaptif droop kontrolünün nasıl çalıştığı, gerilim regülasyonu ve yük paylaşımını nasıl optimize ettiği detaylı olarak ele alınmaktadır.

4.4.1. Adaptif Droop Kontrolünün Amacı

Droop kontrolünün iki temel hedefi vardır:

1-Küresel gerilim regülasyonu sağlamak

2-Orantılı yük paylaşımını gerçekleştirmek

- Geleneksel yöntemlerde, droop katsayısı sabit tutulduğundan hassasiyet azalır.
- Önerilen adaptif droop kontrolü, sanal empedansı dinamik olarak güncelleyerek sistemin esnekliğini artırır.

Bu yöntem, her dönüştürücünün yalnızca komşularıyla veri paylaşarak karar almasına dayanır.

4.4.2. Adaptif Droop Kontrolünün Matematiksel Modeli

Bu yapı, mikro şebeke içindeki dönüştürücülerin voltaj ve akım bilgilerini paylaşarak, sistem genelinde dengeli bir voltaj düzenlemesi ve yük paylaşımı sağlamasına olanak tanır. Ayrıca, her dönüştürücünün kendi anma akımına göre yüklenme durumunu ifade etmesi, sistemin daha esnek ve ölçeklenebilir olmasını sağlar. Bu yaklaşım, özellikle farklı güç kapasitelerine sahip dönüştürücülerin bir arada çalıştığı karmaşık mikro şebeke sistemlerinde etkili bir çözüm sunar. Küresel voltaj düzenlemesi ve orantılı yük paylaşımı, birincil/ikincil kontrolün iki temel hedefidir ve bu hedefler, bireysel dönüştürücüler için uygun voltaj ayar noktalarının belirlenmesini gerektirir. Önerilen ikincil kontrolör, Şekil 2'de vurgulanmıştır ve burada yerel ve komşu bilgileri işlenerek yerel voltaj ayar noktası v_i^* ayarlanır. Başlangıç noktası, dönüştürücünün çıkış empedansını sanal bir empedans r_i kullanarak karakterize eden geleneksel sarkma (droop) mekanizmasıdır. Sarkma kontrolörü, birincil kontrol seviyesinde yerel bilgiler üzerinde çalışır. Çalışma koşulları değiştiğinde, sarkma mekanizması hızla voltaj ayarlamasını başlatır. Ancak, bu yerel kontrolün performansı sınırlıdır. İkincil kontrol seviyesinde dönüştürücüler arasındaki iş birliği, voltaj ayar noktalarının v_i^* hassas bir şekilde ayarlanmasına ve akım ile voltaj artıklarının azaltılmasına yardımcı olur.

Sarkma kontrolü için voltaj ayar noktası, iki düzeltme terimiyle genişletilmiştir. Bu düzeltme terimleri, dönüştürücüler arasındaki iş birliği yoluyla sağlanır. Voltaj ve akım regülatörleri tarafından üretilen bu terimler, yerel voltaj ayar noktalarının v_i^* hassas bir şekilde ayarlanmasına yardımcı olarak küresel voltaj düzenlemesi ve orantılı yük paylaşımını sağlar. Bir dönüştürücü için yerel voltaj ayar noktası aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

4.4.2.1. Yerel Gerilim Set Noktası (Voltage Set Point)

$$v_i^* = V_i^{ref} - v_i^d + \delta v_i$$

$$v_i^* = V_i^{ref} - r_i i_i + \delta v_i^1 + \delta v_i^2$$

Denklem 4.4. Yerel gerilim set noktası

Bu ayar noktası, daha sonra bir voltaj sınırlayıcı tarafından ayarlanarak bara voltajlarının kabul edilebilir bir aralıkta kalması sağlanır.

Burada;

- v_i^* = Dönüştürücünün güncellenmiş voltaj set noktası

- V_i^{ref} = Global referans voltajı
- $v_i^d = r_i i_i$ = Droop voltajı
- δ_{v_i} = Voltaj düzeltme terimi
- r_i = Sanal empedans (droop katsayısı)
- i_i = Dönüştürücünün çıkış akımı

Bu denklem, gerilim ve akım regülatörlerinin nasıl çalıştığını gösterir.

4.4.3 Adaptif Droop Kontrolünün Performans Avantajları

Tablo 4.1. Geleneksel droop kontrolü ve önerilen adaptif droop kontrolü karşılaştırılması

Ölçüt	Geleneksel Droop Kontrolü	Önerilen Adaptif Droop Kontrolü
Yük paylaşımı hassasiyeti	Düşük	Yüksek
Hat empedans etkisi	Dikkate alınmaz	Dikkate alınır
Gerilim regülasyonu	Zayıf	Daha iyi
Bağlantı arızası dayanıklılığı	Düşük	Yüksek

Özetle;

- Droop kontrolünün iki temel hedefi vardır: Küresel voltaj regülasyonu ve orantılı yük paylaşımı.
- Önerilen adaptif droop kontrolü, sanal empedansı dinamik olarak güncelleyerek bu hedefleri gerçekleştirir.
- Gerilim regülatörü, voltaj gözlemcisi kullanarak mikro şebekenin ortalama voltajını hesaplar.
- Akım regülatörü, sanal empedansı güncelleyerek yük paylaşımını optimize eder.

4.5. Gerilim Regülatörü (Voltage Regulator)

Gerilim regülatörü, voltaj gözlemcisi (observer) ve bir PI kontrolcüsünden oluşur.

Adımlar:

1-Voltaj gözlemcisi, komşu dönüştürücülerden gelen verileri işler ve mikro şebekenin ortalama voltajını tahmin eder.

2-Bu tahmin, global referans voltajı ile karşılaştırılır ve hata oluşursa, gerilim düzeltme terimi δv_i üretilir.

3-Gerilim düzeltme terimi, gerilim set noktasına eklenerek voltaj regülasyonu sağlanır.

4.5.1. Gerilim Düzeltme Denklemi

Bu yapı, mikro şebekenin küresel gerilim seviyesini sabit tutmaya yardımcı olur.

$$\delta v_i = H_i(s)(v_i^{ref} - \bar{v}_i)$$

Denklem 4.5. Gerilim düzeltme denklemi

Burada;

- $H_i(s)$: Gerilim regülatörünün transfer fonksiyonu
- $\bar{v}_i$: Düğüm i 'de tahmin edilen ortalama voltaj

4.6. Voltaj Gözlemcisi (Voltage observer)

Bu bölümde, DC mikro şebekelerde voltaj gözlemcisinin işlevi, dinamik konsensüs protokolü ve gürültü engelleme modülü ele alınmaktadır. Voltaj regülatörü, bir voltaj gözlemcisi ve bir PI kontrolörü H_i içerir. Her bir düğümdeki voltaj gözlemcisi, mikro şebeke genelindeki ortalama voltajı tahmin eder; burada $\bar{v}_i$, i düğümündeki tahmini temsil eder. Bu tahmin daha sonra küresel referans voltaj V_i^{ref} ile karşılaştırılarak ilk voltaj düzeltme terimi δv_i^1 üretilir. Eğer $\bar{v}_i$ ile V_i^{ref} arasında bir uyumsuzluk varsa, kontrolör bu farkı ortadan kaldırmak için δv_i^1 'i ayarlar. Ada modunda çalışırken, küresel referans voltaj V_i^{ref} genellikle mikro şebekenin anma voltajına eşittir. Ancak, mikro şebekenin ana şebeke ile güç alışverişi yaptığı şebeke bağlantılı modda, üçüncül kontrol yeni bir voltaj seviyesi belirler ve bu yeni referans değerini bireysel dönüştürücülere iletir. İşbirlikçi bir gözlemci, yerel voltaj ölçümlerini ve komşuların tahminlerini işleyerek mikro şebeke genelindeki ortalama voltajı hesaplar.

4.6.1. Voltaj Gözlemcisinin Amacı ve İşleyişi

Voltaj gözlemcisi, mikro şebeke genelinde ortalama voltaj seviyesini tahmin etmek için kullanılan bir araçtır. Bu tahmini yapmak için iki tür veri kullanılır:

- Yerel ölçüm (v_i)
- Komşu düğümlerden gelen tahmini voltaj değerleri ($\bar{v}_j$)

Bu süreç, her düğümün yalnızca komşularıyla veri paylaşmasına olanak tanır.

4.6.2. Voltaj Gözlemcisinin Matematiksel Modeli

Her düğüm i , voltaj gözlemcisi aracılığıyla aşağıdaki güncelleme protokolünü uygular

$$\bar{v}_{i(t)} = v_i(t) + \int_0^t \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\bar{v}_{j(t)}(\tau) - \bar{v}_i(\tau)) d\tau$$

Denklem 4.6. Voltaj gözlemci denklemi

Burada;

- $\bar{v}_{i(t)}$: Düğüm i 'nin tahmin ettiği ortalama voltaj
- $v_i(t)$: Düğüm i 'nin yerel voltaj ölçümü
- a_{ij} : Düğüm i ve komşu düğüm j arasındaki iletişim ağırlığı
- τ : Önceki zaman adımları boyunca yapılan güncellemeleri gösterir

Bu yöntem, dinamik konsensüs (dynamic consensus) olarak adlandırılmaktadır ve mikro şebekenin genel voltaj seviyesini hesaplamada kullanılır.

4.6.3. Dinamik Konsensüs Protokolü

Voltaja bağlı güncelleme denklemi türev alınarak aşağıdaki formda yazılabilir:

$$\dot{\bar{v}}_i = \dot{v}_i + \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\bar{v}_j - \bar{v}_i)$$

$$\dot{\bar{v}}_i = \dot{v}_i + \sum_{j \in N_i} a_{ij} \bar{v}_j - d_i^{\text{in}} \bar{v}_i$$

Denklem 4.7. Dinamik konsensus denklemi

Burada;

- $\dot{\bar{v}}_i$: Düğüm i 'nin tahmin edilen voltajının zamana bağlı değişimi
- d_i^{in} : Düğüm i 'nin giriş derece değeri ($d_i^{\text{in}} = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$)

Bu denklem, mikro şebeke genelindeki voltaj gözlemcisinin dinamik davranışını tanımlar.

Global formda yazarsak:

$$\dot{\bar{v}} = \dot{v} - (D_G^{\text{in}} - A_G)\bar{v}$$

$$\dot{\bar{v}}_i = \dot{v} - L\bar{v}$$

Denklem 4.8. Dinamik Konsensus Global Denklemi

Burada;

- $\bar{v}$: Tahmin edilen voltaj vektörü
- D_G^{in} : Giriş derece matrisi
- A_G : Komşuluk Matrisi
- L : Laplacian Matrisi

Bu model, sistemdeki voltaj değişimlerinin nasıl yayıldığını analiz etmek için kullanılır.



5. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu bölümde, DC mikro şebekelerde dağıtılmış adaptif droop kontrolü uygulamasında kullanılan donanım, yazılım araçları detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Simülasyon çalışmaları yardımıyla sistemin performansı değerlendirilecektir.

5.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan başlıca materyaller aşağıda sıralanmıştır:

Yazılım:

- MATLAB/Simulink: Simülasyon modellerinin oluşturulması ve analizler
- PLECS: Güç elektroniği devre simülasyonları

Simülasyon Ortamı:

- Mikro şebeke topolojisinin modellenmesi
- Dönüştürücülerin adaptif droop kontrol algoritmaları ile modellenmesi
- İletişim ağı modellemesi (komşu tabanlı veri alışverişi)

5.2. Metot

Bu çalışmada simülasyon yöntemi kullanılmıştır.

5.2.1. Simülasyon Yöntemi

Simülasyon çalışmaları MATLAB/Simulink ve PLECS ortamlarında gerçekleştirilmiştir. Simülasyon modellemesinde aşağıdaki adımlar takip edilmiştir:

DC mikro şebeke mimarisi oluşturulmuş, sistem çoklu dönüştürücü ve farklı yük senaryoları ile modellenmiştir. Her dönüştürücüye, çevresindeki komşularla haberleşerek yük paylaşımı ve voltaj regülasyonu yapabilen bir adaptif droop kontrol mekanizması entegre edilmiştir. Gerilim regülatörü, voltaj gözlemcisi ve dinamik konsensüs protokolü simülasyon ortamında uygulanmıştır. Farklı yük değişimleri, arıza durumları ve haberleşme kesintileri gibi senaryolar altında sistemin performansı test edilmiştir.

5.2.2. Performans Değerlendirme

Yöntemin etkinliği aşağıdaki kriterlere göre değerlendirilmiştir:

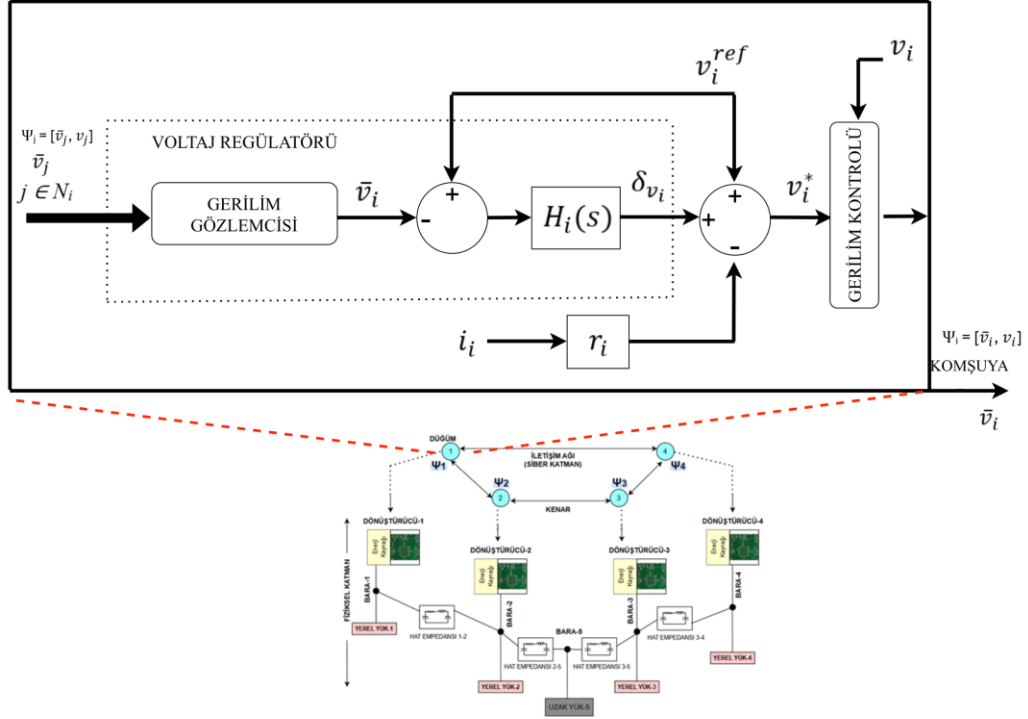
- **Gerilim Regülasyonu Başarımı:** Sistem voltajının yük değişimlerine rağmen referans değere yakın kalıp kalmadığı ölçülmüştür.

- **Yük Paylaşım Doğruluğu:** Dönüştürücüler arasındaki yük paylaşım oranlarının hedeflenen değerlere ne kadar yakın olduğu analiz edilmiştir.
- **Ölçeklenebilirlik ve Güvenilirlik:** Farklı dönüştürücü sayılarında ve haberleşme kayıplarında sistemin kararlı çalışıp çalışmadığı test edilmiştir.



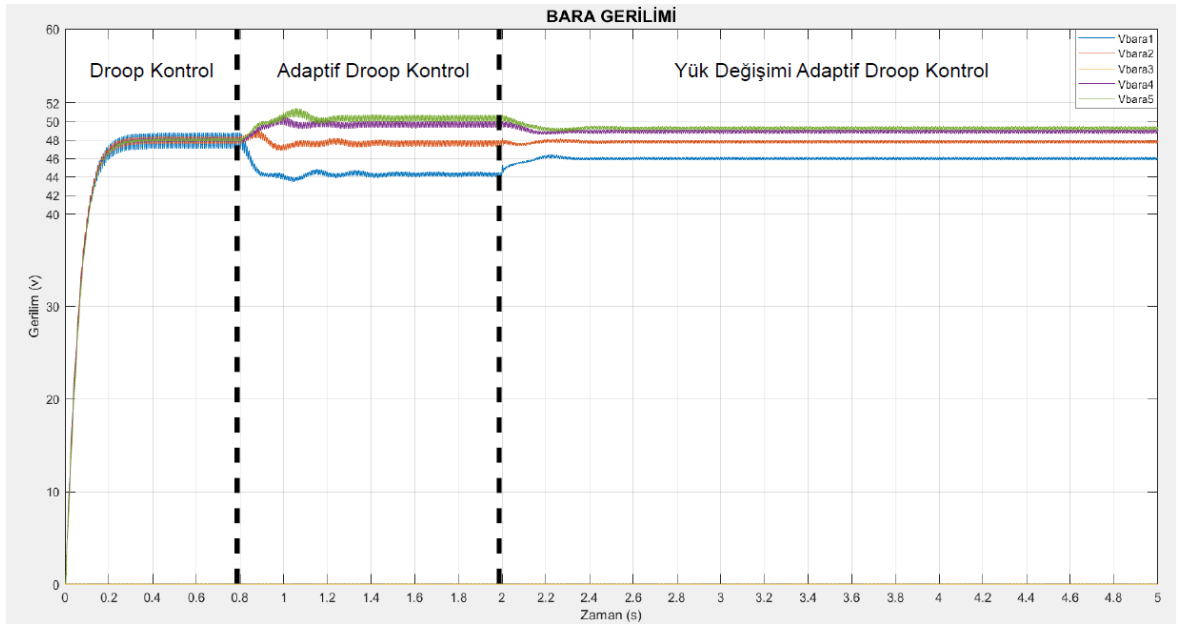
6. BULGULAR

6.1. Simülasyon



Şekil 6.1. Simülasyon devresi

6.2. Simülasyon

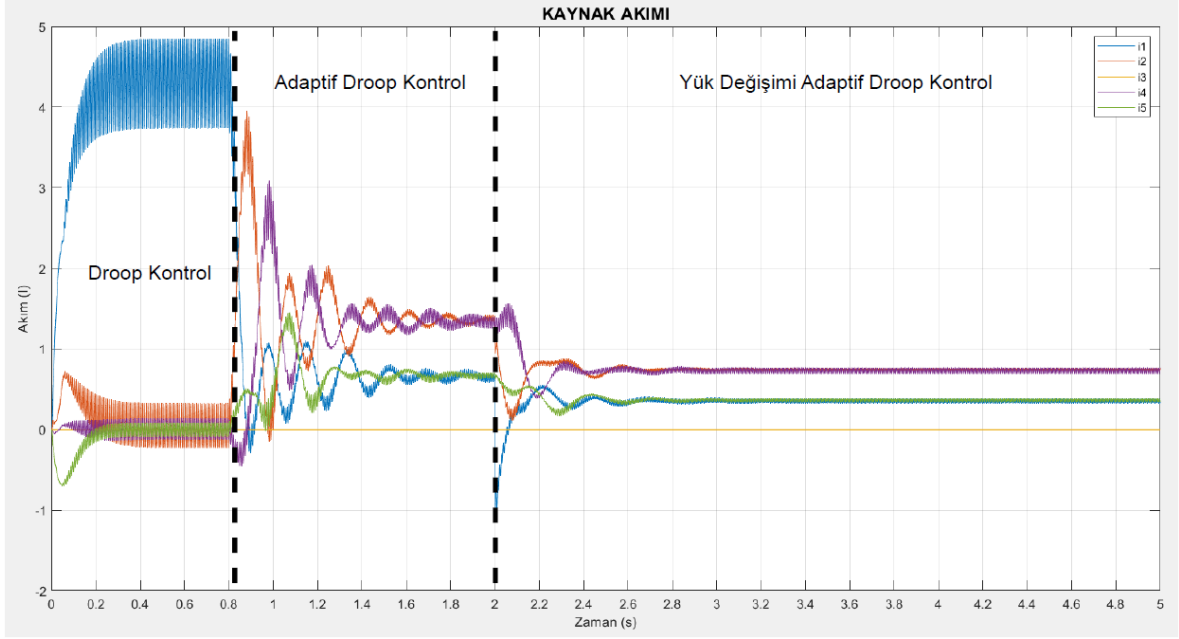


Şekil 6.2. Bara gerilimleri

6.2.1. Bara Gerilimlerinin Zamanla Değişimi

Şekil 6.2'de, DC mikroşebekede gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen baralara ait gerilim değişimleri gözlemlenmektedir. Simülasyon süresi boyunca sistemin farklı kontrol stratejilerine verdiği tepkiler analiz edilmiştir. Simülasyon üç ana zaman dilimine ayrılmıştır:

- **0 – 0.8 saniye aralığı (Droop Kontrol):** Bu zaman aralığında sistemde yalnızca klasik droop kontrol mekanizması aktif olarak çalışmaktadır. Bu kontrol yöntemi sayesinde üreticiler arasında yük paylaşımı gerçekleştirilmekte, ancak baralar arasında belirli bir gerilim farkı oluşmaktadır. Grafik üzerinde bu durum, baraların farklı gerilim seviyelerinde dengelenmesiyle gözlemlenmektedir.
- **0.8 – 2 saniye aralığı (Adaptif Kontrol):** 0.8. saniyede adaptif droop aktif hale getirilmesiyle kısa bir osilasyondan sonra sistem kararlı hale ulaşmaktadır. Bununla beraber hem orantısal yük paylaşımı hem de gerilim regülasyonu sağlanmaktadır. Adaptif kontrol sayesinde sistemdeki gerilim farkları minimize edilmeye çalışılmış, her bara için daha kararlı ve yakın gerilim seviyeleri elde edilmiştir. Bu süreçte geçici salınımlar gözlemlense de sistemin daha dengeli bir yapıya kavuştuğu görülmektedir.
- **2 – 5 saniye aralığı (Yük Paylaşımı – Kararlı Durum):** 2. saniyede şekil 6.4'te görüldüğü üzere adaptif droop kontrolörünün yük değişimlerine göre performansı görülmektedir. Kontrolör kısa süre içerisinde hem gerilim regülasyonunu (Şekil 6.2) hem de yük paylaşımını (Şekil 6.3) gerçekleştirebilmektedir. 2. saniyeden itibaren sistem kararlı duruma geçmiştir. Bu aşamada yük paylaşımı tamamlanmış ve tüm baraların gerilimleri birbirine oldukça yakın seviyelerde sabitlenmiştir. Sistem, bu noktadan itibaren gerilim açısından dengelenmiş ve kararlı bir çalışma profili sergilemiştir. Sonuç olarak, uygulanan kontrol stratejileriyle DC mikroşebekede hem gerilim dengelemesi hem de etkili yük paylaşımı başarıyla sağlanmıştır. Özellikle adaptif kontrol algoritmasının etkisiyle droop kontrol kaynaklı gerilim farklarının azaltıldığı ve sistemin daha senkronize hale getirildiği gözlemlenmiştir.



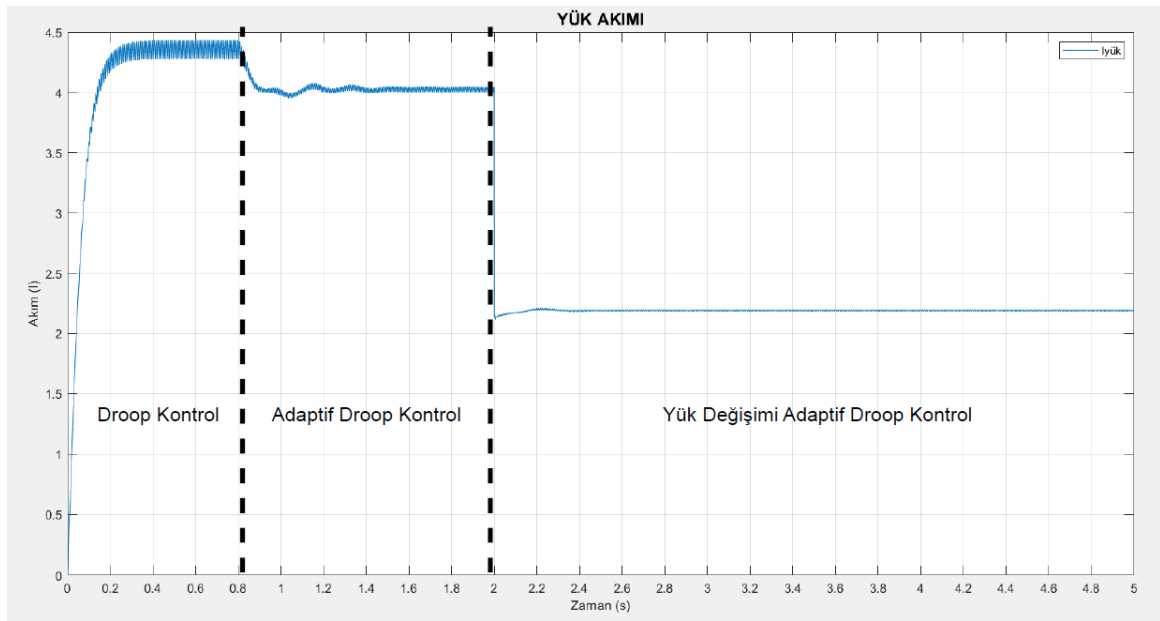
Şekil 6.3. Kaynak akımları

6.2.2. Kaynak Akımlarının Zamanla Değişimi

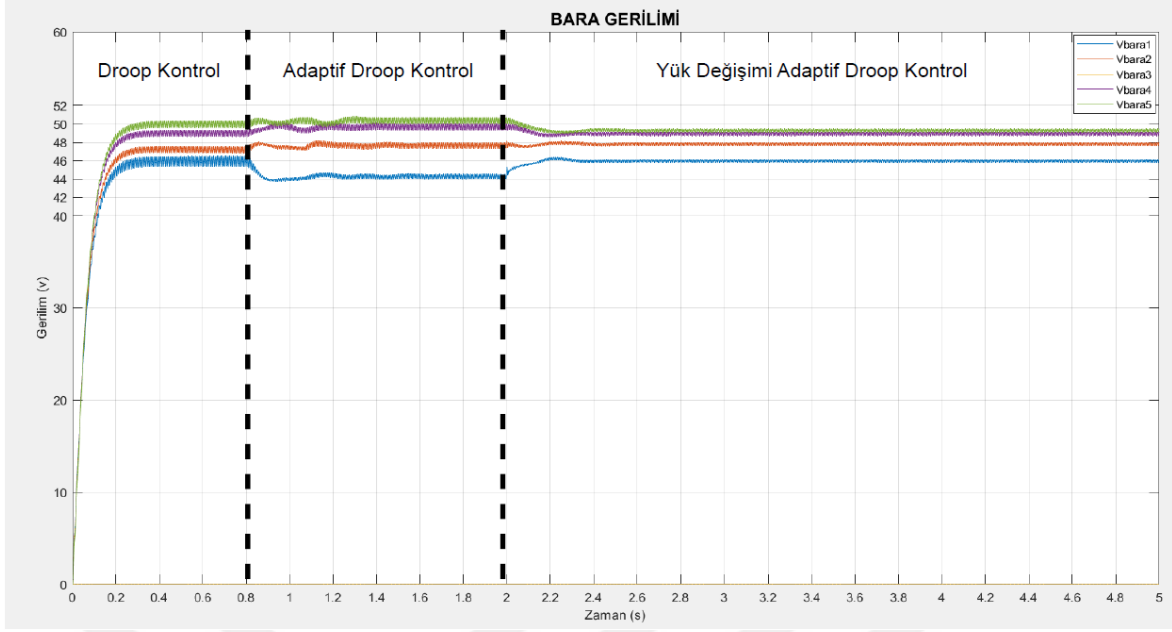
Şekil 6.3.'de DC mikroşebekedeki beş farklı kaynağa ait akım değişimleri gösterilmektedir. Simülasyon üç farklı zaman aralığında gerçekleştirilmiş olup, her bir aralıkta farklı kontrol stratejileri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, sistemin kontrol stratejilerine verdiği tepkiyi ve yük paylaşım performansını analiz etmek açısından önemlidir.

- **0 – 0.8 saniye aralığı (Droop Kontrol):** Bu zaman aralığında sistem klasik droop kontrol stratejisi ile çalışmaktadır. Droop kontrol, baralara bağlı üreticilerin yük paylaşımını kendi lokal ölçümlerine göre gerçekleştirdiği merkeziyetsiz bir kontrol yöntemidir. Bu nedenle kaynaklar arasında yük paylaşımında dengesizlik oluşabilmektedir. Grafik üzerinde özellikle i_1 akımının yüksek seviyede seyrettiği, diğer kaynakların ise daha düşük katkılarda bulunduğu görülmektedir. Bu durum, droop kontrolün yapısı gereği oluşan gerilim-akım dengesizliğini yansıtmaktadır.
- **0.8 – 2 saniye aralığı (Adaptif Kontrol):** Bu sürede adaptif kontrol algoritması devreye alınmıştır. Adaptif kontrol, her bir kaynağın dinamik davranışına göre kontrol parametrelerini güncelleyerek daha dengeli bir yük paylaşımı sağlamayı hedefler. Grafik üzerinde bu süreçte tüm kaynak akımlarında geçici salınımlar olduğu ve sistemin yeni kontrol stratejisine adaptasyon süreci yaşadığı gözlemlenmektedir. Ancak zamanla akımların birbirine yakınsaması ve daha dengeli bir profile oturması, adaptif kontrolün yük paylaşım performansını artırdığını göstermektedir.

- **2 – 5 saniye aralığı (Yük Paylaşımı – Kararlı Durum):** 2. saniyeden itibaren sistem kararlı duruma geçmiştir. Bu aşamada tüm kaynaklar arasında dengeli bir yük paylaşımı sağlanmıştır. Her bir kaynağın sabit bir akım değeriyle çalıştığı görülmekte ve bu durum sistemin kararlılığa ulaştığını göstermektedir. Sonuç olarak, uygulanan kontrol yapılarının her biri sistemin davranışında belirgin değişiklikler oluşturmuştur. Droop kontrol ile başlayan sistem, adaptif kontrol sayesinde daha dengeli bir yapıya ulaşmış, nihayetinde kararlı ve verimli bir yük paylaşımı sağlanmıştır. Bu durum, adaptif kontrol yapısının DC mikroşebekelerde yük paylaşım etkinliğini artırmada etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.4. Yük akımı



Şekil 6.5. Bara gerilimlerinin zamanla değişimi

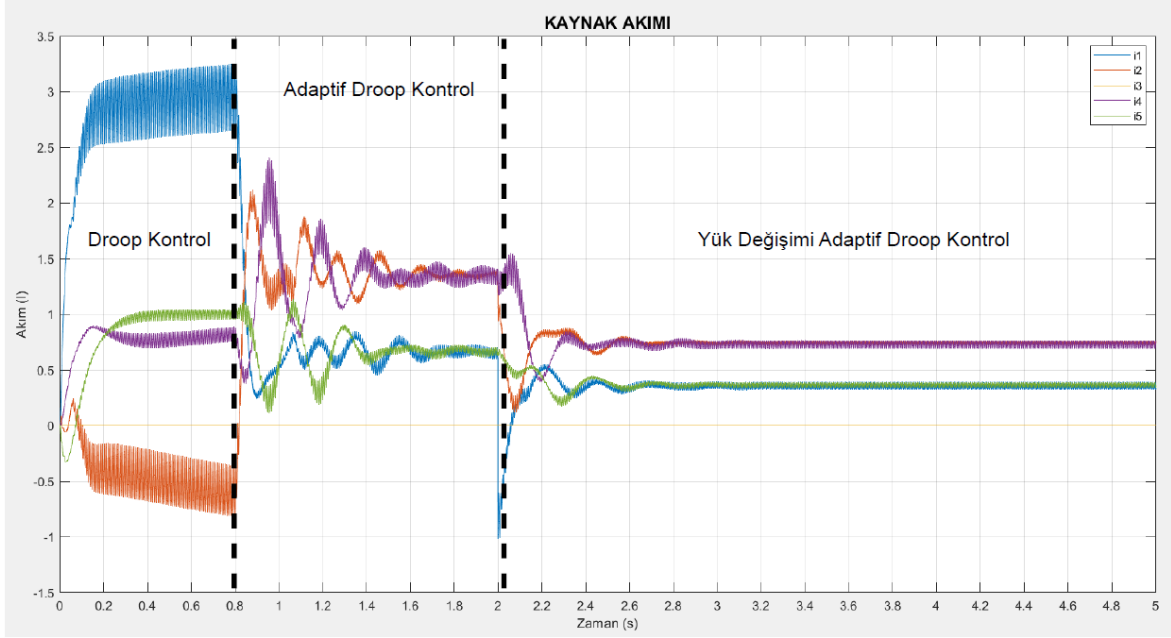
Şekil 6.5'te, DC mikroşebekeye ait beş farklı bara geriliminin ($V_{\text{bara1}}-V_{\text{bara5}}$) zamanla değişimi gösterilmiştir. Simülasyon başlangıcında her bir bara için referans gerilim değerleri farklı olarak atanmıştır: $V_{\text{rated}} = [46, 47, 48, 49, 50]$ V. Bu farklılık sayesinde başlangıç anında sistemde gerilim eşitsizliği oluşturulmuş ve kontrol stratejilerinin bu eşitsizliğe tepkisi gözlemlenmiştir.

Simülasyonun ilk 0.8 saniyelik sürecinde klasik *droop kontrol* stratejisi uygulanmıştır. Bu dönemde her bir bara, kendisine ait droop eğrisine göre çalışmış ve sabit referans gerilimleri nedeniyle baralar arası bir gerilim farkı gözlemlenmiştir. Bu durum yük paylaşımında oransızlığa neden olmaktadır.

0.8 ile 2.0 saniye arasında *adaptif droop kontrol* devreye alınmıştır. Bu kontrol stratejisi, baralar arası gerilim farklarını azaltarak daha düzgün bir yük paylaşımı hedeflemektedir. Bu sürede baralar arasındaki gerilimler birbirine yakınsamış, sistem daha dengeli bir yapıya geçiş yapmıştır.

2.0 saniyeden itibaren sistemde *yük paylaşımı* gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, adaptif kontrol algoritması sayesinde baraların gerilimleri dengeye gelmiş ve sistem kararlı hâle ulaşmıştır. Gerilim değerleri V_{bara1} 'den V_{bara5} 'e doğru artmakla birlikte, aralarındaki fark minimal seviyelere inmiştir. Bu durum, sistemin hem dinamik performans hem de yük paylaşımı açısından başarılı şekilde kontrol edildiğini göstermektedir.

Bu sonuçlar, önerilen adaptif kontrol yapısının DC mikroşebeke uygulamalarında klasik droop kontrole kıyasla daha etkin bir gerilim regülasyonu ve yük paylaşımı sağladığını göstermektedir.



Şekil 6.6. Kaynak akımlarının zamanla değişimi (DC mikroşebeke)

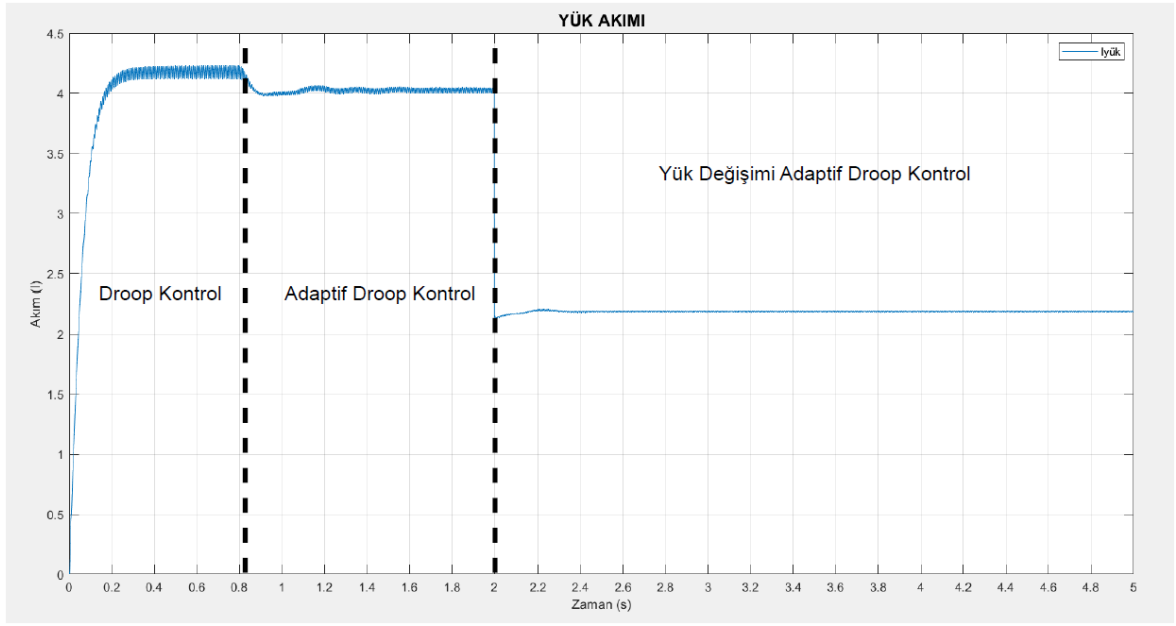
Yukarıdaki grafikte, DC mikroşebekedeki beş farklı kaynağın çıkış akımı (i_1 – i_5) zamanla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Simülasyon öncesinde her bir kaynağa ait maksimum çıkış akımı sınırı $I_{\max}$ değeri yarı yarıya düşürülerek tanımlanmıştır: $I_{\max} = [1, 2, 0, 2, 1]$ A. Bu farklılık sayesinde kaynaklar arasında kapasite bazlı farklar oluşturulmuş ve kontrol algoritmalarının bu duruma tepkisi gözlemlenmiştir.

Simülasyonun ilk 0.8 saniyelik süresinde klasik *droop kontrol* stratejisi kullanılmıştır. Bu dönemde her bir kaynak kendi droop karakteristiğine göre çalışmış ve gerilim-ağırlıklı bir akım paylaşımı gerçekleşmiştir. Bu süreçte bazı kaynaklar (örneğin i_1 ve i_2) maksimum sınırlarına oldukça yaklaşarak sistem yükünü taşıma eğiliminde olmuştur.

0.8 ile 2.0 saniye arasındaki ikinci fazda, sistemde *adaptif droop kontrol* uygulanmıştır. Bu kontrol yöntemi, klasik droop kontrolün sınırlamalarını aşmak amacıyla, kaynak kapasitelerini göz önünde bulundurarak droop eğrilerini dinamik şekilde yeniden düzenlemiştir. Bu sayede kaynaklar arasında daha dengeli bir yük paylaşımı sağlanmıştır. Ancak bu geçiş sürecinde kısa süreli salınımlar ve kararsızlıklar gözlemlenmiştir, bu da sistemin yeniden dengeleme süreciyle ilişkilidir.

2.0 saniyeden itibaren sistem *kararlı yük paylaşımı rejimine* geçmiştir. Bu aşamada, adaptif kontrol algoritması sayesinde her bir kaynak kapasitesi oranında yük paylaşımına katılmıştır. Akım değerleri, sistemin dengelenmesiyle birlikte sabitlenmiş ve kaynaklar arası paylaşım uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.

Bu sonuçlar, önerilen adaptif kontrol yaklaşımının kaynakların kapasite farklarını dikkate alarak yük paylaşımını iyileştirdiğini ve sistemin kararlılığını artırdığını göstermektedir. Ayrıca, yüksek geçici rejim koşullarında dahi sistemin kontrol altında tutulabildiği görülmektedir.



Şekil 6.7. DC Şebekede yük akımının zamanla değişimi

7. TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında geliştirilen dağıtılmış adaptif droop kontrol yöntemi, DC mikro şebekelerde orantısal güç paylaşımı ve gerilim regülasyonunun iyileştirilmesi amacıyla önerilmiş ve simülasyon analizlerle test edilmiştir. Simülasyonlar sonucunda elde edilen veriler, önerilen yöntemin, geleneksel sabit droop kontrol yöntemlerine kıyasla önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Tartışma bölümünde, bu avantajlar literatürle kıyaslanarak değerlendirilecek ve sistemin performansına yönelik çıkarımlar yapılacaktır.

Geleneksel sabit droop kontrol mekanizmaları, genellikle sistemdeki güç paylaşımı doğruluğunu sağlamak amacıyla yüksek droop katsayıları kullanmaktadır. Ancak bu durum, gerilim regülasyonunun bozulmasına ve mikro şebeke stabilitesinin olumsuz etkilenmesine yol açmaktadır. Bu çalışmada önerilen adaptif droop kontrol mekanizması ise, her bir dönüştürücünün çevresel parametrelere göre droop katsayısını dinamik olarak ayarlamasına olanak tanımaktadır. Böylelikle, düşük droop katsayısıyla gerilim regülasyonu korunurken, aynı zamanda orantısal yük paylaşımı daha hassas bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon bulguları göstermiştir ki, dağıtılmış adaptif droop kontrol yöntemi uygulandığında, sistemdeki her bir dönüştürücü, yalnızca komşu dönüştürücülerle haberleşerek yüksek doğrulukta orantısal yük paylaşımı gerçekleştirmiştir. Bu durum, haberleşme altyapısının karmaşıklığını azaltmakla kalmamış, aynı zamanda sistemin ölçeklenebilirliğini de ciddi anlamda artırmıştır. Ayrıca, merkezi bir kontrol ünitesine duyulan ihtiyaç ortadan kaldırıldığından, sistemin tek noktadan arıza (single point of failure) riskine karşı dayanıklılığı artmıştır.

Literatürdeki merkezi kontrol yaklaşımlarının genellikle yüksek bant genişliği gereksinimi ve iletişim arızalarına duyarlılığı, gerçek zamanlı sistemlerde sınırlayıcı bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, önerilen kontrol yönteminin yalnızca sınırlı haberleşme ihtiyacı ile çalışabilmesi, özellikle büyük ölçekli mikro şebeke uygulamalarında ciddi bir avantaj olarak değerlendirilebilir.

Öte yandan, bu çalışmada kullanılan simülasyon senaryoları belirli varsayımlar altında yürütülmüştür. Özellikle iletişim gecikmeleri, veri kayıpları veya gerçek zamanlı işlemci sınırlamaları gibi unsurlar simülasyonlarda dikkate alınmamıştır. Bu durum, yöntemin gerçek sistemlerde uygulanabilirliğini sınırlayabilecek faktörlerin gelecekte daha ayrıntılı analiz edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Ayrıca, önerilen yöntemin çoklu topolojiler (örneğin halka, ağ, çoklu bara yapıları) üzerindeki etkisi, farklı yük profilleri ve kaynak tipleriyle daha da genişletilerek araştırıldığında daha kapsamlı sonuçlara ulaşılabilecektir. Mevcut çalışmada yalnızca belirli bir yapı üzerinde değerlendirme yapılmış olsa da önerilen kontrol yönteminin adaptif yapısı gereği farklı yapılarla da uyumlu çalışabileceği düşünülmektedir.

Tüm bu değerlendirmeler ışığında, çalışmanın literatürde önemli bir boşluğu doldurduğu ve özellikle mikro şebekelerde merkezi olmayan, ölçeklenebilir ve dinamik kontrol mekanizmaları açısından yeni bir yaklaşım sunduğu ifade edilebilir.



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, DC mikroşebekelerde karşılaşılan en temel kontrol problemlerinden biri olan gerilim regülasyonu ve yük paylaşımı sorununa yenilikçi bir çözüm sunmayı hedeflemiştir. Geliştirilen dağıtılmış adaptif droop kontrol yöntemi, mikroşebeke bileşenlerinin yalnızca komşularıyla iletişim kurarak merkezi bir denetleyiciye ihtiyaç duymadan sistem kararlılığı ve doğruluğunu artırabilecek bir yapı önermektedir.

Başlıca sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- **Orantısal Yük Paylaşımında Yüksek Doğruluk:** Önerilen kontrol yöntemi, sistemdeki dönüştürücülerin yükleri orantılı şekilde paylaşmasını sağlamış ve hat empedanslarının olumsuz etkilerini minimize etmiştir.
- **Gerilim Regülasyonunun Korunması:** Sabit droop yöntemlerinde sıkça karşılaşılan gerilim saptmaları, adaptif yapının devreye girmesiyle kontrol altında tutulmuş, sistemin nominal çalışma koşullarına daha yakın kalması sağlanmıştır.
- **Ölçeklenebilirlik ve Güvenilirlik:** Komşu tabanlı iletişim mimarisi, haberleşme altyapısının basitleştirilmesini sağlamış, bu da büyük ölçekli uygulamalarda sistemin kolayca genişletilebilir hale gelmesini sağlamıştır. Ayrıca merkezi kontrol ünitesi ihtiyacı ortadan kaldırılarak sistemin güvenilirliği artırılmıştır.
- **Dinamik Uyumluluk:** Sistem yük değişikliklerine hızlı ve stabil tepkiler verebilmiş, geçici rejimlerde dahi kararlılık korunmuştur. Bu özellik, sistemin gerçek zamanlı enerji yönetim ihtiyaçlarına uygun olduğunu göstermektedir.
- **Simülasyon Doğrulaması:** MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen simülasyonlarda, önerilen yöntemin geleneksel yöntemlere kıyasla daha kısa geçici rejim süresi, daha düşük gerilim salınımları ve daha dengeli akım dağılımı sunduğu gözlemlenmiştir.

Öneriler:

- **Gerçek Zamanlı Donanım Testleri:** Simülasyon ortamında test edilen kontrol algoritması, gelecekte donanım tabanlı deney sistemlerinde test edilerek gerçek uygulamalara daha yakın sonuçlar elde edilmelidir.

- İletişim Gecikmeleri ve Hataları ile Gelişmiş Modelleme: Önerilen yöntemin dayanıklılığı, gerçek haberleşme altyapılarındaki veri gecikmeleri, paket kayıpları ve ağ topolojisi değişiklikleri dikkate alınarak yeniden değerlendirilmelidir.
- Farklı Topolojiler Üzerinde Deneysel Çalışmalar: Bu çalışmada kullanılan yapı dışında, halka, ağ veya çoklu bara yapıları gibi daha karmaşık topolojilerde de kontrol yapısının uygulanabilirliği incelenmelidir.
- Yenilenebilir Enerji ve Akıllı Şebeke Entegrasyonu: Geliştirilen yöntem, güneş, rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ve enerji depolama sistemleriyle birlikte test edilerek akıllı şebeke senaryolarına entegre edilmelidir.
- Güç Kalitesi ve Arıza Toleransı Analizleri: Gerilim dalgalanmaları, harmonik bozulmalar ve ani yük değişimleri gibi durumlarda sistemin performansı detaylı biçimde incelenmelidir.

Bu tez çalışması, DC mikro şebekelerde kararlılığın sağlanması ve orantısal güç paylaşım doğruluğunun artırılması amacıyla önerilen adaptif ve dağıtılmış kontrol mekanizması ile literatürde önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Yöntemin, mevcut sistemlere kolayca entegre edilebilecek bir yapıya sahip olması, haberleşme maliyetini azaltması ve yüksek performans sunması, bu kontrol stratejisini hem akademik hem de endüstriyel uygulamalar için cazip hale getirmektedir.

9. KAYNAKLAR

- Al-Awami, A. T., Memon, J. A., & Abido, M. A. (2020). Optimal reconfiguration of DC networks with minimum losses and enhanced reliability using a hybrid GA-PSO algorithm. *IEEE Access*, 8, 90144–90156. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2994004>
- Al-Tameemi, Z. H. A., Lie, T. T., Foo, G., & Blaabjerg, F. (2021). Control strategies of DC microgrids cluster: a comprehensive review. *Energies*, 14(22), 7569. <https://doi.org/10.3390/en14227569>
- Altun, T. (2020). *High-performance optimization methods for emerging power systems* (Doctoral dissertation). The University of Texas at Arlington.
- Altun, T., Madani, R., & Davoudi, A. (2021). Topology-cognizant optimal power flow in multi-terminal DC grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(5), 4588–4598.
- Altun, T., Madani, R., Yadav, A. P., Nasir, A., & Davoudi, A. (2020). Optimal reconfiguration of DC networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(6), 4272–4284.
- Anand, S., & Fernandes, B. G. (2011). Steady state performance analysis for load sharing in DC distributed generation system. In *Proceedings of the 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)* (pp. 1–4). IEEE.
- Anand, S., Fernandes, B. G., & Guerrero, J. M. (2013). Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(4), 1900–1913.
- Cai, B., Jia, L., Zhu, Y., & Wang, Y. (2017). Structural design of a new hybrid AC-DC microgrid. *Power System Protection and Control*, 45(2), 147–154.
- Dimeas, A. L., & Hatziaargyriou, N. D. (2005). Operation of a multiagent system for microgrid control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), 1447–1455. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.852060>
- Dragicevic, T., Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., & Skrllec, D. (2014). Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(2), 695–706.

- Dragicevic, T., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2016). A distributed control strategy for coordination of an autonomous LVDC microgrid based on power-line signaling. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(12), 7663–7673.
- Eltawil, M. A., Mohamed, A., & Mohammed, O. A. (2020). A distributed secondary control for DC microgrids based on consensus algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(6), 4725–4735. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.2994962>
- Ferreira, R. A. F., Braga, H. A. C., Ferreira, A. A., & Barbosa, P. G. (2012). Analysis of voltage droop control method for DC microgrids with Simulink: Modeling and simulation. In *Proceedings of the 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)* (pp. 1–6). IEEE.
- Gong, X., Dong, F., Mohamed, M.A., Abdalla, O.M., & Ali, Z.M. (2020). A secured energy management architecture for smart hybrid microgrids considering PEM-fuel cell and electric vehicles. *IEEE Access*, 8, 47807–47823.
- Göransson, M., Göransson, M., Larsson, N., Tuan, L.A., & Steen, D. (2017). Cost-benefit analysis of battery storage investment for microgrid of Chalmers university campus using μ -OPF framework. In *2017 IEEE Manchester PowerTech* (pp. 1–6). IEEE.
- Grimley, M., & Farrell, J. (2016). *Mighty Microgrids*. Institute for Local Self-Reliance.
- Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., de Vicuna, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158–172. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534>
- Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., De Vicuña, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158–172.
- Gui, Y., Wei, B., Li, M., Guerrero, J.M., Vasquez, J.C. (2018). Passivity-based coordinated control for islanded AC microgrid. *Applied Energy*, 229, 551–561.
- Hatziargyriou, N., Asano, H. Iravani, R. & Marnay, C. (2007). Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(4), 78–94. <https://doi.org/10.1109/MPAE.2007.376583>

- Hatziargyriou, N., Asano, H., Iravani, R., & Marnay, C. (2007). Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(4), 78–94.
- Huang, W., et al. (2012). Analysis and design of microgrid structure characteristics. *Power System Protection and Control*, 40(18), 149–155.
- Jafari, M., Malekjamshidi, Z., & Zhu, J. (2018). Copper loss analysis of a multiwinding high-frequency transformer for a magnetically-coupled residential microgrid. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(1), 283–297.
- Katiraei, F., & Iravani, M. R. (2006). Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(4), 1821–1831.
- Lasseter, R. H. (2002). Microgrids. In *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting* (Vol. 1, pp. 305–308). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PESW.2002.985003>
- Lasseter, R. H. (2002). MicroGrids. In *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 1, pp. 305–308.
- Lidula, N., & Rajapakse, A. (2011). Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 186–202. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.041>
- Liu, Z., Su, M., Sun, Y., Han, H., Hou, X., M. Guerrero J.M. (2018). Stability analysis of DC microgrids with constant power load under distributed control methods. *Automatica*, 90, 62–72.
- Loh, P. C., Li, D., Chai, Y. K., & Blaabjerg, F. (2013). Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(5), 2214–2223.
- Lopes, J. A. P., Moreira, C. L., & Madureira, A. G. (2006). Defining control strategies for microgrids islanded operation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2), 916–924. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.873018>
- Lu, W., Guerrero, J. M., Sun, K., Vasquez, J. C., & Huang, L. (2020). Hierarchical control of parallel AC–DC converters for optimal power sharing in interlinked AC and DC microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(3), 2525–2537. <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2973035>

- Lu, X., Guerrero, J. M., Sun, K., & Vasquez, J. C. (2014). An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(4), 1800–1812.
- Lu, X., Sun, K., Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., & Huang, L. (2014). State-of-charge balance using adaptive-droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(6), 2804–2815.
- Mariam, L., Basu, M., & Conlon, M. F. (2013). A review of existing microgrid architectures. *Journal of Engineering*, 937614. <https://doi.org/10.1155/2013/937614>
- Mariam, L., Basu, M., & Conlon, M. F. (2013). A review of existing microgrid architectures. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 6(3), 175–180.
- Marnay, C., et al. (2015). Microgrid evolution roadmap. In *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)* (pp. 139–144). IEEE.
- Marnay, C., Venkataramanan, G., Stadler, M., Siddiqui, A. S., Firestone, R. M., & Chandran, B. (2015). Optimal technology selection and operation of commercial-building microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(3), 975–982.
- Altun, T. (2024). Optimal allocation of distributed generation on DC networks. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 57, 101817.
- Meng, L., Dragicevic, T., Guerrero, J. M., & Vasquez, J. C. (2013). Optimization with system damping restoration for droop controlled DC-DC converters. In *Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 65–72). IEEE.
- Mohamed, Y., & El-Saadany, E. F. (2008). Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(6), 2806–2816.
- Nasirian, V., Davoudi, A., & Lewis, F. L. (2014). Distributed adaptive droop control for DC microgrids. In *Proceedings of the 29th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 1147–1152). IEEE.
- Nian, H., & Kong, L. (2020). A review of fault protection technology for DC microgrids. *High Voltage Technology*, 46(7), 2241–2254.

- Sahoo, S. K., Sinha, A. K., & Kishore, N. K. (2018). Control techniques in AC, DC, and hybrid AC–DC microgrid: A review. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(2), 738–759.
- Shafiee, Q., Guerrero, J. M., & Vasquez, J. C. (2014). Distributed secondary control for islanded microgrids—A novel approach. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(2), 1018–1031.
- Shuai, Z., Fang, J., Ning, F., & Shen, Z. J. (2018). Hierarchical structure and bus voltage control of DC microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3670–3682.
- Thirunavukkarasu, G. S., Seyedmahmoudian, M., Jamei, E., Horan, B., Mekhilef, S., Stojcevski, A. (2022). Role of optimization techniques in microgrid energy management systems—A review. *Energy Strategy Reviews*, 43, 100899. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100899>
- Ton, D. T., & Smith, M. A. (2012). The U.S. Department of Energy’s Microgrid Initiative. *The Electricity Journal*, 25(8), 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.013>
- Tsikalakis, A. G., & Hatziargyriou, N. D. (2008). Centralized control for optimizing microgrids operation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(1), 241–248.
- Tsikalakis, A. G., & Hatziargyriou, N. D. (2008). Centralized control for optimizing microgrids operation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(1), 241–248.
- Uddin, M., Mo, H., Dong, D., Elsayah, S., Zhu, J., & Guerrero, J. M. (2023). Microgrids: A review, outstanding issues and future trends. *Energy Strategy Reviews*, 49, 101127. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101127>
- Vandoorn, T. L., Meersman, B., Degroote, L., Renders, B., & Vandevelde, L. (2011). A control strategy for islanded microgrids with DC-link voltage control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(2), 703–713.
- Wang, B., Sechilariu, M., Locment, F., Wang, A., Sechilariu, M., & Locment, F. (2012). Intelligent DC microgrid with smart grid communications: Control strategy consideration and design. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 2148–2156.
- Wouters, C. (2015). Towards a regulatory framework for microgrids—The Singapore experience. *Sustainable Cities and Society*, 15, 22–32.

- Wu, D., Tang, F., Dragicevic, T., Guerrero, J. M., & Vasquez, J. C. (2015). Coordinated control based on bus-signaling and virtual inertia for islanded DC microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(6), 2627–2638.
- Zhao, Y., Zhang, J., & Li, H. (2015). Adaptive droop control of a grid-supporting inverter based on fuzzy inference system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, 761–768.



EKLER

Ek-1. Simülasyondaki Veriler ve Değerleri

VERİLER	DEĞERLER
Anma Gerilim Vektörü (V_{rated})	[48,48,48,48,48]
Bitişiklik Matrisi (A)	$A = 25 \times \begin{bmatrix} 0,1,0,0,1;... \\ 1,0,0,1,0;... \\ 0,0,0,0,0;... \\ 0,1,0,0,1;... \\ 1,0,0,1,0; \end{bmatrix}$
NC İntegral Kazanç Matrisi (K)	$K = \begin{bmatrix} 1,0,0,0,0;... \\ 0,2,0,0,0;... \\ 0,0,3,0,0;... \\ 0,0,0,4,0;... \\ 0,0,0,0,5; \end{bmatrix}$
Orantılı Kazanç Matrisi (P)	$P = 0.5 \times \begin{bmatrix} 0,1,0,0,0;... \\ 0,0,1,0,0;... \\ 0,0,0,1,0;... \\ 0,0,0,0,1;... \\ 0,0,0,0,0.1; \end{bmatrix}$
İntegral Kazanç Matrisi (I)	$I = 3 \times \begin{bmatrix} 1,0,0,0,0;... \\ 0,1,0,0,0;... \\ 0,0,1,0,0;... \\ 0,0,0,1,0;... \\ 0,0,0,0,1; \end{bmatrix}$
Droop Katsayısı Matrisi (RD)	$RD = \begin{bmatrix} 1,0,0,0,0;... \\ 0,0.5,0,0,0;... \\ 0,0,0,0,0;... \\ 0,0,0,0.5,0;... \\ 0,0,0,0,1; \end{bmatrix}$
Anma Akımı Vektörü (I_{max})	[2,4,0,4,2];

Ek-2. Simülasyondaki Veriler ve Değerleri

VERİLER	DEĞERLER
Anma Gerilim Vektörü (V_{rated})	[46,47,48,49,50]
Bitişiklik Matrisi (A)	$A = 25 \times$ [0,1,0,0,1;... 1,0,0,1,0;... 0,0,0,0,0;... 0,1,0,0,1;... 1,0,0,1,0];
NC İntegral Kazanç Matrisi (K)	$K =$ [1,0,0,0,0;... 0,2,0,0,0;... 0,0,3,0,0;... 0,0,0,4,0;... 0,0,0,0,5];
Orantılı Kazanç Matrisi (P)	$P = 0.5 \times$ [0.1,0,0,0,0;... 0,0,1,0,0,0;... 0,0,0,1,0,0;... 0,0,0,0,1,0;... 0,0,0,0,0,1];
İntegral Kazanç Matrisi (I)	$I = 3 \times$ [1,0,0,0,0;... 0,1,0,0,0;... 0,0,1,0,0;... 0,0,0,1,0;... 0,0,0,0,1];
Droop Katsayısı Matrisi (RD)	$RD =$ [1,0,0,0,0;... 0,0,5,0,0,0;... 0,0,0,0,0;... 0,0,0,0,5,0;... 0,0,0,0,1];
Anma Akımı Vektörü (I_{max})	[2,4,0,4,2];



**T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

