



Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)

Cilt 8 - Sayı 4: 927-936 / Temmuz 2025
(Volume 8 - Issue 4: 927-936 / July 2025)

DOĞRU AKIM MİKRO ŞEBEKELERİ İÇİN KONTROLÖR TASARIMI VE SİMÜLASYONU

Ahmet Alperen ÖZBEK¹, Tuncay ALTUN², Kenan ALTUN^{3*}

¹Sivas Cumhuriyet University, Institute of Science, 58070, Sivas, Türkiye

²Yozgat Bozok University, Faculty of Engineering- Architecture, Department of Electrical And Electronics Engineering, 66100, Yozgat, Türkiye

³Sivas Cumhuriyet University, Sivas Technical Sciences Vocational School, Department of Electronics and Automation, 58140, Sivas, Türkiye

Özet: Bu çalışma, doğru akım (DA) mikro şebekelerde yük paylaşım dengesizliklerini gidermek, voltaj regülasyonunu iyileştirmek ve sistem kararlılığını artırmak amacıyla bir kontrol yöntemi önerilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve dağıtık üretim sistemlerinin yaygınlaşması DA mikro şebekeleri modern enerji altyapısında önemli bir konuma taşımıştır. Ancak, sabit eğim (droop) katsayılarına dayalı geleneksel yöntemler, değişen işletme koşullarına uyum sağlayamadığı için yük paylaşımında dengesizlikler ve voltaj sapmaları meydana gelmektedir. Bu kapsamda, geliştirilen model, adaptif droop kontrol algoritması ile donatılmış olup, voltaj regülasyonu, yük paylaşım doğruluğu ve sistem güvenilirliğini artırmak üzere tasarlanmıştır. Önerilen kontrol yöntemi, birincil ve ikincil kontrol seviyelerinden oluşan hiyerarşik bir yapı kullanmaktadır. Birincil kontrol, iç döngü ve geleneksel droop kontrol stratejileri ile yerel kararlılığı sağlarken, ikincil kontrol voltaj sapmalarını düzelterek yük paylaşım hassasiyetini artırmaktadır. Adaptif droop algoritması, sistem yük koşullarına bağlı olarak droop katsayılarını gerçek zamanlı güncelleyerek voltaj regülasyonunda daha hassas ve dengeli bir güç paylaşımı sunmaktadır. Geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı ve esnek bir tepki verebilen bu yaklaşım, değişen işletme koşullarına uyum sağlayarak mikro şebekenin genel kararlılığını iyileştirmektedir. Geliştirilen kontrol yöntemi, IEEE tarafından standartları belirlenen 14-baralı alternatif akım (AA) sisteminin DA mikro şebekeye dönüştürülmüş modeli üzerinde test edilmiş ve performansı detaylı simülasyonlarla doğrulanmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen kontrol algoritmasının voltaj dalgalanmalarını azalttığını, yük paylaşım doğruluğunu artırdığını ve değişen sistem koşullarına hızlı uyum sağladığını göstermektedir. Sonuçlar, adaptif droop kontrol yönteminin DA mikro şebekelerde güvenilirlik ve enerji verimliliğini artıran yenilikçi bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Adaptif droop kontrolü, DA mikro şebekeler, Voltaj regülasyonu, Orantısız yük paylaşımı, Hiyerarşik kontrol.

Controller Design and Simulation for Direct Current Microgrids

Abstract: This study presents a control method to eliminate load-sharing imbalances, improve voltage regulation, and enhance system stability in direct current (DC) microgrids. The integration of renewable energy sources and the widespread adoption of distributed generation have made DC microgrids a crucial component of modern energy infrastructure. However, traditional methods based on fixed droop coefficients cannot dynamically adapt to varying operating conditions, leading to load-sharing inaccuracies and voltage deviations. To address these challenges, the developed model is equipped with an adaptive droop control algorithm designed to improve voltage regulation, enhance load-sharing accuracy, and ensure system reliability. The proposed control method employs a hierarchical structure consisting of primary and secondary control levels. The primary control level ensures local stability using inner-loop and conventional droop control strategies, while the secondary control level corrects voltage deviations and enhances load-sharing precision. The adaptive droop algorithm dynamically updates droop coefficients in real time based on system load conditions, providing more precise voltage regulation and balanced power distribution. Compared to conventional methods, this approach offers faster and more flexible responses, adapting to varying operating conditions and improving overall microgrid stability. The developed control method was tested on a DC microgrid version of the 14-bus alternating current (AC) system standardized by the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), and its performance was verified through detailed simulations. Simulation results demonstrate that the proposed control algorithm reduces voltage fluctuations, improves load-sharing accuracy, and adapts quickly to changing system conditions. The findings reveal that the adaptive droop control approach provides a reliable and efficient solution for enhancing voltage stability and energy efficiency in DC microgrids.

Keywords: Adaptive droop control, DC microgrids, Voltage regulation, Proportional load sharing, Hierarchical control

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Sivas Cumhuriyet University, Sivas Technical Sciences Vocational School, Department of Electronics and Automation, 58140, Sivas, Türkiye

E mail: kaltun@cumhuriyet.edu.tr (K. ALTUN)

Ahmet Alperen ÖZBEK  <https://orcid.org/0009-0006-0525-5274>

Tuncay ALTUN  <https://orcid.org/0000-0003-1499-3384>

Kenan ALTUN  <https://orcid.org/0000-0001-7419-1901>

Gönderi: 03 Mart 2025

Kabul: 16 Nisan 2025

Yayınlanma: 15 Temmuz 2025

Received: March 03, 2025

Accepted: April 16, 2025

Published: July 15, 2025

Cite as: Özbek AA, Altun T, Altun K. 2025. Controller design and simulation for direct current microgrids. BSJ Eng Sci, 8(4): 927-936.



1. Giriş

Enerji, ekonomik kalkınma ve sürdürülebilirlik açısından kritik bir unsurdur. Küresel enerji talebi hızla artarken, fosil yakıtların çevresel etkileri ve sınırlı rezervleri, yenilenebilir enerjiye yönelimi zorunlu kılmaktadır (Dechamps, 2023). Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, 2050 yılına kadar enerji talebinin %40 artması beklenmektedir, bu da enerji dönüşümünü kaçınılmaz hale getirmektedir (Küçük ve Yüce Dural, 2022). Türkiye'de sanayileşme ve nüfus artışı nedeniyle enerji tüketimi sürekli artmaktadır. Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'na (EPDK) göre, enerji tüketimi son on yılda %5 oranında artış göstermiştir. Bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik ederek dışa bağımlılığı azaltmayı hedefleyen politikaların önemini artırmaktadır (Saygin vd., 2021). Yenilenebilir enerji yatırımları, enerji güvenliği sağlamanın yanı sıra ekonomik büyümeye de katkıda bulunmaktadır (Bulut ve Muratoglu, 2018).

Enerji yönetiminde verimliliği artırmak ve güç kayıplarını azaltmak için gelişmiş kontrol stratejilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Doğru akım (DA) mikro şebekeler, düşük kayıpları ve yüksek verimlilikleriyle bu alanda önemli bir çözüm sunmaktadır (Kirtay, 2010). DA mikro şebekeler, yenilenebilir enerji entegrasyonunu kolaylaştırarak karbon emisyonlarını azaltmaktadır (Wang vd., 2024). Ancak, bu sistemlerin güvenilir çalışabilmesi için uygun kontrol stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

DA mikro şebekelerde kontrol yapıları genellikle birincil (primary) ve ikincil (secondary) kontrol seviyeleri altında ele alınmaktadır (Gao vd., 2019). Birincil kontrol, hızlı ve yerel seviyede çalışan bir mekanizma olup, ani yük değişimlerine anında tepki vermek amacıyla tasarlanmıştır. En yaygın kullanılan yöntemlerden biri droop kontrolüdür. Droop kontrolü, merkezi bir kontrol gerektirmeden gerilim regülasyonu ve güç paylaşımını yönetir. Ancak, sabit droop katsayıları kullandığı için uzun vadeli gerilim kararlılığını tam olarak sağlayamamakta ve yük paylaşımında hassasiyet eksiklikleri yaşanmaktadır (Biglarahmadi vd., 2024). İkincil kontrol, birincil kontrolün eksikliklerini gidermek için geliştirilmiş olup, voltaj sapmalarını düzelterek sistemin genel kararlılığını artırmayı amaçlamaktadır. Ancak, merkezi veya dağıtılmış algoritmalar gerektirdiğinden haberleşme altyapısına bağımlıdır (Ghanimi vd., 2024).

Günümüzde, merkezi ve dağıtılmış kontrol yaklaşımlarını entegre eden hibrit modeller üzerine çalışmalar artmakta ve mikro şebeke kararlılığını iyileştirmeye yönelik yeni algoritmalar geliştirilmektedir (Hou vd., 2024). Orantısal yük paylaşımı, her enerji kaynağının kapasitesine uygun güç sağlamasını hedefleyerek gerilim kararlılığını ve sistem güvenilirliğini artırmaktadır. Literatürde bu amaca ulaşmak için droop kontrolü, sanal empedans teknikleri, haberleşme tabanlı merkezi/dağıtılmış kontrol sistemleri ve yapay zekâ destekli optimizasyon yöntemleri gibi yaklaşımlar önerilmektedir (Rashad vd.,

2018).

Droop kontrolü, haberleşme gerektirmedikinden yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ancak, hat empedanslarından kaynaklanan voltaj sapmaları ve güç paylaşımında hassasiyet eksiklikleri bulunmaktadır (Dam ve Lee, 2016). Sanal empedans yöntemleri, hat karakteristiklerini düzenleyerek daha doğru yük paylaşımı sağlamayı amaçlamaktadır (Fang vd., 2019). Haberleşme tabanlı merkezi kontrol, yüksek doğruluk sağlamasına rağmen, haberleşme gecikmeleri ve tek hata noktasına bağımlılık gibi sorunlarla karşı karşıyadır. Dağıtılmış kontrol sistemleri, merkezi birime bağımlılığı azaltarak daha esnek ve güvenilir bir yük paylaşımı sunmaktadır (Cucuzzella vd., 2019). Son yıllarda yapay zekâ tabanlı kontrol sistemleri, sistemin adaptif hale gelmesini sağlamak için öğrenme mekanizmalarını kullanmaktadır (Taye ve Choudhury, 2023).

DA mikro şebekelerde ikincil kontrol, birincil kontrol seviyesinin eksikliklerini gidermek ve uzun vadeli sistem kararlılığını sağlamak için kritik bir bileşendir. Literatürde, ikincil kontrol için merkezi (centralized), merkezi olmayan (decentralized) ve dağıtılmış (distributed) kontrol olmak üzere üç temel yaklaşım bulunmaktadır (Aluko vd., 2022). Merkezi kontrol, tüm mikro şebekenin tek bir merkezden yönetildiği yapıdır ve yüksek doğruluk sağlamasına rağmen haberleşme gecikmeleri ve tek hata noktasına bağımlılık gibi dezavantajları vardır (Jasim vd., 2022). Merkezi olmayan kontrol, her bir enerji kaynağının yerel ölçümlere dayanarak bağımsız kararlar aldığı bir yapıdır ve haberleşme altyapısına bağımlılığı azaltarak sistem güvenilirliğini artırsa da yük paylaşımı açısından merkezi kontrol kadar hassas değildir (Adhikari vd., 2016).

Bu eksiklikleri gidermek amacıyla geliştirilen dağıtılmış kontrol yöntemleri, merkezi kontrolün hassasiyetini ve merkezi olmayan kontrolün esnekliğini birleştirerek daha ölçeklenebilir ve güvenilir bir yapı sunmaktadır. Dağıtılmış sistemlerde, her enerji kaynağı komşularıyla haberleşerek optimum yük paylaşımı ve sistem kararlılığı sağlamaktadır (Moradi vd., 2023). Özellikle bağımsız mikro şebekelerde ve yenilenebilir enerji entegrasyonu gerektiren sistemlerde büyük avantajlar sunmaktadır (da Silva vd., 2020). Literatürdeki çalışmalar, farklı kontrol stratejilerinin avantaj ve dezavantajlarını ortaya koyarak, en uygun yöntemin sistem gereksinimlerine bağlı olarak seçilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Kumar vd., 2019). Bu çalışma, dağıtılmış kontrol yaklaşımını benimseyerek merkezi ve merkezi olmayan kontrol stratejilerinin eksikliklerini gidermeyi hedeflemektedir. Adaptif droop kontrolünü kullanarak orantısal yük paylaşımı ve voltaj regülasyonu hassasiyetini artırmayı amaçlamaktadır. Literatürde sabit droop katsayısı kullanılırken, bu çalışmada dinamik olarak uyum sağlayan bir adaptif droop stratejisi geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin kararlılığı artırarak enerji kayıplarını minimize ettiğini ve geleneksel yaklaşımlara kıyasla daha etkili bir güç paylaşımı sunduğunu göstermektedir.

Bu makalede, 14 baralı ve 5 kontrolcü ile bir DA mikro

şebeke modelinde birincil ve ikincil kontrol mekanizmalarının kullanımıyla orantısal yük paylaşımının sağlanması ve adaptif droop kontrol stratejisinin etkinliği incelenmektedir. Makalenin devamında, materyal ve yöntemler, simülasyon sonuçları, adaptif droop kontrolünün avantajları ve geleceğe yönelik öneriler detaylandırılacaktır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, IEEE 14-baralı bir DA mikro şebeke modeli oluşturularak adaptif droop kontrol algoritmasının etkinliği incelenmiştir. Beş kontrolörden oluşan sistem, yük paylaşımı ve voltaj düzenlemesi görevlerini üstlenmektedir. Çalışmanın temel amacı, adaptif droop kontrol yönteminin sistem kararlılığı üzerindeki etkisini analiz etmektir.

DA mikro şebekelerde hiyerarşik kontrol, enerji kaynaklarının koordinasyonunu ve sistemin kararlılığını sağlamak için kullanılmaktadır (Vasquez vd., 2010). Şebekenin dinamik davranışlarını incelemek için gerçekleştirilen modelleme ve simülasyon, sistemin enerji paylaşımını ve voltaj düzenlemesini en iyi hale getirmiştir.

Adaptif droop kontrol algoritması, geleneksel droop kontrolünün eksikliklerini gidermek üzere tasarlanmıştır. Nasirian vd. (2014) adaptif kontrolün mikro şebekelerde voltaj sapmalarını azaltıp enerji verimliliğini artırdığını belirtmiştir. Bu yöntem, her bara için voltaj ayar noktalarını dinamik olarak belirleyerek yük paylaşım hassasiyetini artırmaktadır. Simülasyon sonuçları, adaptif droop kontrol algoritmasının mikro şebekede voltaj ve akım düzenleme performansını optimize ettiğini göstermiştir. Shaffee vd. (2014) bu kontrol algoritmasının enerji kaynakları arasında daha hassas bir dengenin kurulmasını sağladığını vurgulamıştır. Mikro şebekenin dinamik performansı, çeşitli çalışmaların ışığında değerlendirilmiştir (Dragicevic vd., 2016; Gao vd., 2019; Nahata vd., 2020). Bu yöntemlerin uygulanması, enerji kayıplarının azalması ve genel sistem stabilitesinin artırılması açısından kritik bir rol oynamıştır.

2.1. DA Mikro Şebekeler ve Kontrol Yöntemleri

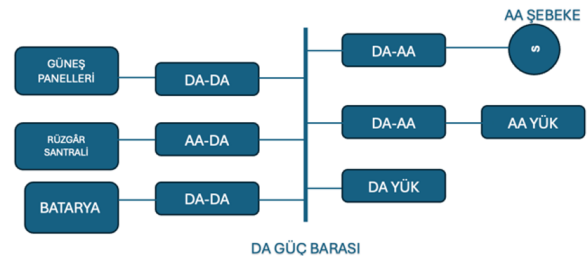
Mikro şebekeler, enerji sistemlerini yerleştirme ve modernleştirme amacı taşıyan küçük ölçekli enerji sistemleridir. Hem bağımsız ada modunda hem de merkezi şebekeye bağlı olarak çalışabilmeleri, onlara esneklik ve güvenilirlik kazandırmaktadır. İlk olarak 1960'lı yıllarda kırsal bölgelerde uygulanmaya başlayan mikro şebekeler, Kythnos Adası'ndaki yenilenebilir enerji temelli sistem gibi erken başarılı örneklerle dikkat çekmiştir (Hatziaargyriou, 2014; Hatziaargyriou vd., 2020). Başlangıçta yüksek maliyetler ve şebeke kararlılığı gerekliliği gibi teknik zorluklarla karşılaşan mikro şebekeler yaygın olarak benimsenmemiştir (Choudhury, 2020). Ancak, teknolojik ilerlemeler ve akıllı kontrol sistemleri, bu sorunları büyük ölçüde aşmayı sağlamıştır (Polleux vd., 2022).

Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonları sayesinde, mikro şebekeler enerji güvenliğini artırırken karbon emisyonlarını azaltmaktadır. Güneş panelleri, rüzgâr türbinleri ve gerektiğinde dizel jeneratörler, sistemin sürdürülebilirliğini destekleyen başlıca enerji kaynaklarıdır (Zia vd., 2018). Alternatif akım (AA), doğru akım (DA) veya hibrit yapılarla çalışabilen mikro şebekeler arasında DA sistemler enerji dönüşüm kayıplarını azaltmaları ve verimliliği artırmaları nedeniyle öne çıkmaktadır (Mosa ve Ali, 2021).

Mikro şebekeler, ada modunda bağımsız çalışabilmenin yanı sıra, şebeke bağlantılı modda güç akışı yönetimiyle merkezi şebekeyle senkronize olabilir. Ayrıca, kullanıcı katılımını teşvik ederek tüketicilerin aktif bir rol üstlenmesini sağlar. Bu bağlamda mikro şebekeler, artarak yaygınlaşan yenilenebilir enerji kullanımına uyum sağlayarak enerji sistemlerinde kritik bir rol oynamaktadır. DA mikro şebekelerin sunduğu avantajlar, enerji altyapılarının daha esnek ve uyarlanabilir hale gelmesini desteklemektedir (Kaysal, 2023).

Bu bağlamda, enerji sistemlerinin artan yenilenebilir enerji kullanımına uyum sağlaması için mikro şebekeler kritik bir rol oynamaya devam etmektedir. Geleneksel şebeke altyapılarına nazaran daha esnek ve uyarlanabilir olan bu sistemler DA mikro şebekelerin sunduğu avantajlarla daha da etkin bir enerji geleceğine kapı açmaktadır.

DA mikro şebekeler, Şekil 1'de de görüleceği üzere sade tasarımı ve daha düşük başlangıç maliyetleri sayesinde yatırım ve işletim giderlerini azaltır (Planas vd., 2015). Doğru akım kaynaklarının doğrudan entegrasyonu ile enerji dönüşüm süreçleri daha uyumlu bir yapı kazanır (Brusso ve Bose, 2014). Ayrıca DA mikro şebekelerin harmonik bozulma ve reaktif güç sorunlarını ortadan kaldırması, hassas endüstriyel uygulamalar ve veri merkezleri gibi alanlarda kritik öneme sahiptir (Lotfi ve Khodaei, 2017).



Şekil 1. DA mikro şebeke blok diyagramı.

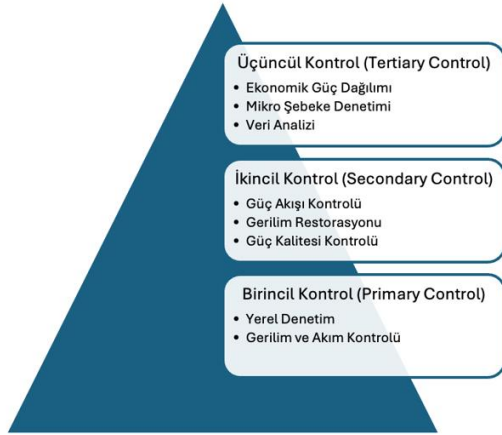
Bu sistemler, hibrit (AA/DA birlikte) yapılarda enerji akışını kararlı bir şekilde düzenleme kapasitesine sahiptir (Pourbehzadi vd., 2019). Ancak bu avantajların tam anlamıyla gerçekleştirilebilmesi için kararlılık ve verimlilik sağlamaya yönelik teknik gerekliliklerin yerine getirilmesi gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken doğası, enerji sistemlerinin entegrasyonu ve orantısal güç paylaşımı gibi faktörler gelişmiş kontrol stratejilerini zorunlu kılmaktadır.

DA mikro şebekelerde uygulanan hiyerarşik kontrol

yaklaşımları, gerilim regülasyonu ve yük paylaşımı gibi kritik alanlarda etkin yönetim sağlamaktadır. Güç elektroniği altyapısının yaygınlaşmasıyla birlikte DA mikro şebekeler, gelecekte akıllı enerji sistemlerinin çekirdeği olma potansiyelini taşımaktadır (Elmouatamid vd., 2020).

2.2.DA Mikro Şebekelerde Hiyerarşik Kontrol

DA mikro şebekelerde hiyerarşik kontrol, enerji yönetiminde kararlılığı sağlamak ve sistem performansını en iyi hale getirmek için geliştirilen yenilikçi bir kontrol metodolojisidir. Hiyerarşik kontrol yapısı, Şekil 2’de gösterildiği üzere birincil, ikincil ve üçüncül seviyelerden oluşur. Birincil kontrol seviyesi, dağıtık enerji kaynaklarının (DEK) dönüştürücüler aracılığıyla kontrol edilmesini sağlayarak sistemin yerel kararlılığını güvence altına alır. İkincil kontrol seviyesi, voltaj düzenlemesi ve akım paylaşımı doğruluğunu artırmayı hedeflerken, üçüncül kontrol seviyesi ekonomik optimizasyon ve veri analizi süreçlerini içerir. Üçüncül seviyede uygulanan kontrol mekanizmaları, enerji piyasasına katılım ve ideal güç paylaşım oranlarının belirlenmesi gibi daha geniş ölçekli süreçleri kapsamaktadır. Bu seviyeler, farklı zaman ölçeklerinde eş zamanlı olarak çalışarak sistemin genel kararlılığını sağlar.



Şekil 2. DA Mikro şebekelerde hiyerarşik kontrol.

Yapılan çalışmalar, hiyerarşik kontrol sistemlerinin DA mikro şebekelerin kararlılığını artırmada etkili olduğunu göstermektedir. Varquez vd. (2010) yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu için hiyerarşik kontrol stratejilerinin önemine dikkat çekmiş ve bu sistemlerin esneklik ve adaptasyon yeteneklerini artırdığını ortaya koymuştur. Gao vd. (2019).ise birincil ve ikincil kontrol mekanizmalarının enerji kayıplarını azaltma üzerindeki olumlu etkilerini vurgulamıştır.

Dağıtık kontrol sistemlerinin hiyerarşik kontrol yapısına entegrasyonu, geleneksel merkezi kontrol mekanizmalarına olan bağımlılığı azaltmakta ve sistemin değişken yenilenebilir enerji kaynaklarına uyum sağlama kapasitesini artırmaktadır (Guerrero vd., 2011).

Sonuç olarak DA mikro şebekelerde hiyerarşik kontrol, enerji sistemlerinin kararlılığı ve verimliliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Gelişmiş kontrol stratejilerinin uygulanması, bu sistemlerin sürdürülebilirlik ve esneklik hedeflerini karşılayarak modern enerji ihtiyaçlarına uyum sağlamasını mümkün kılmaktadır.

2.3.DA Mikro Şebekelerde Birincil Kontrol

Birincil kontrol DA mikro şebekelerde sistem kararlılığını sağlamak, doğru voltaj seviyelerini korumak ve dağıtık enerji kaynakları (DEK’ler) arasında güç paylaşımını dengelemek için merkezi olmayan bir strateji olarak çalışır. Bu kontrol seviyesi, özellikle şebekeye bağlı veya ada modunda çalışan mikro şebekelerde kritik önem taşır ve Inner Loop ile Droop Control yöntemlerini içerir (Al-Ismael, 2021).

Birincil kontrol seviyesi Şekil 2’de de gösterildiği gibi DA mikro şebekelerin kontrol hiyerarşisinde ilk basamağını oluşturur ve hızlı dinamik tepkilerle akım ve gerilim regülasyonu gibi temel işlevleri yerine getirir (Shuai vd., 2018). Voltaj regülasyonu ve güç paylaşımı için genellikle droop kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Shafiee vd. (2014) birincil kontrolün hızlı dinamik tepkiler sağlamada etkili olduğunu ve DA mikro şebekelerde voltaj stabilitesini artırdığını göstermiştir. Droop kontrolünün ve droop katsayısının temel eşitliği “Eşitlik 1-2” şu şekildedir:

$$V_o = V_{ref} - m_p \cdot I_o \quad (1)$$

$$m_p = \frac{\Delta V}{P_{max}} \quad (2)$$

burada: V_o , kaynağın çıkış voltajını, V_{ref} nominal voltajı, m_p droop kazanç katsayısını ve I_o kaynağın çıkış akımını temsil eder. Voltaj sapması ΔV ve maksimum güç P_{max} arasındaki ilişki ile belirlenir. Bu katsayı, güç kaynaklarının yük paylaşımındaki davranışlarını doğrudan etkiler. Örneğin, paralel bağlanan iki güç kaynağı, biri daha fazla yük beslemeye başladığında voltajını düşürerek diğer kaynağın devreye girmesini ve yük paylaşımına katkıda bulunmasını sağlar (Guarnieri, 2018). Ancak büyük yük değişikliklerinde voltaj sapsmaları ve akım paylaşımında doğruluk kaybı yaşanabilir.

Birincil kontrol, eğim kontrol yöntemiyle akım paylaşımını ve voltaj regülasyonunu ayarlar. Paralel bağlanan güç dönüştürücülerinin çıkış akımları arasındaki oran “Eşitlik 3” ile belirlenir:

$$\frac{I_{o1}}{I_{o2}} = \frac{R_{d2}}{R_{d1}} + \frac{R_{l2} - \frac{R_{d2}}{R_{d1}} \cdot R_{l1}}{R_{d1} + R_{l1}} \quad (3)$$

burada: R_{d1} , R_{d2} ; sanal direnç değerleri (droop katsayıları), R_{l1} , R_{l2} ; hat dirençleridir. I_{o1} ve I_{o2} ise Kontrolör 1 ve 2’nin çıkış akımlarını temsil eder.

Birincil kontrolde hat direncinin etkisiyle akım paylaşımı doğruluğunda sapsmalar oluşabilir ve yük ile DA bara gerilimi arasında voltaj sapsması meydana gelebilir. Bu durum, birincil kontrolün sınırlarını gösterir ve sistemde ikincil kontrol katmanının gerekliliğini ortaya koyar

(Kaysal vd., 2023).

Sanal direnç mantığına dayalı olan Geleneksel droop kontrolü voltaj ve akım arasında doğrusal bir ilişki kurarak bağımsız güç paylaşımını mümkün kılar (Liu vd., 2020). Droop kontrolü ile çıkış voltajı ve akım arasındaki ilişki "Eşitlik 4-5" ile tanımlanır:

$$V_{pcc} = V_{ref} - R_{dk} \cdot I_O - r_k \cdot I_O \quad (4)$$

$$I_O = \frac{V_{ref} - V_{pcc}}{R_{dk} + r_k} \quad (5)$$

burada: V_{pcc} , sistemde ortak bağlantı noktası olan PCC'deki (Point of Common Coupling) DA voltajını gösterirken V_{ref} , kontrolcünün referans voltajıdır. R_{dk} , droop katsayısı (veya sanal direnç) olarak tanımlanırken, r_k , hat direncini, I_O ise sırasıyla sanal direnç üzerinde harcanan akımı ve hat direnci üzerinde harcanan akımı temsil etmektedir.

Droop katsayısı R_{dk} her dönüştürücünün yük paylaşımındaki davranışını belirler. Daha yüksek bir droop katsayısı, daha büyük bir voltaj düşüşüne ve daha hassas bir akım paylaşımına yol açar. İki paralel dönüştürücü arasındaki akım paylaşımı, "Eşitlik 6" ile açıklanır:

$$\frac{I_o^k}{I_o^j} = \frac{R_d^j + r_j}{R_d^k + r_k} \quad (7)$$

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

Daha yüksek bir droop katsayısı, akım paylaşımında hassasiyeti artırırken, voltaj düşüşlerini de beraberinde getirir. Ancak bu durum, sistemde voltaj sapmalarının artmasına neden olabilir. Bu nedenle, droop kontrolünün temel amacı, akım paylaşım doğruluğu ile voltaj sapması arasında bir denge kurmaktır.

Geleneksel droop kontrolü, büyük yük değişikliklerinde voltaj kararlılığını korumada ve akım paylaşım doğruluğunda yetersizlikler gösterebilir. Bu sınırlamalar, mikro şebekelerde daha gelişmiş kontrol stratejilerinin uygulanmasını gerekli kılmıştır. Doğrusal olmayan droop kontrol, adaptif droop kontrol ve ölü bantlı droop kontrol gibi yöntemler, sistemin daha kararlı ve hassas çalışmasını sağlamak için geliştirilmiştir.

Sonuç olarak, birincil kontrol, mikro şebekelerde yerel kararlılığı sağlarken, yük değişimleri ve hat dirençlerinden kaynaklanan sorunlar, birincil kontrol seviyesinin ötesine geçerek daha ileri düzey kontrol stratejilerine duyulan ihtiyacı açıkça ortaya koymaktadır.

2.4.DA Mikro Şebekelerde İkincil Kontrol

İkincil kontrol, mikro şebekelerde voltaj sapmalarını düzelterek enerji kaynaklarının daha hassas bir şekilde paylaşımını sağlamayı amaçlayan bir kontrol katmanıdır. Sistemin genel koordinasyonu iletişim ağı üzerinden sağlanır. İkincil kontrol, güç dağıtımı, ada modu tespiti gibi işlevleri yerine getirir ve milisaniyeden dakikaya kadar değişen bir zaman ölçeğinde çalışır (Yamashita vd.,

2020).

İkincil kontrol, özellikle DA mikro şebekelerde voltaj regülasyonu ve güç paylaşımı gibi kritik işlevleri gerçekleştirir. Hamad vd. (2024). çalışmasında, PI tabanlı kontrol mekanizmalarının voltaj ve güç paylaşım hatalarını en aza indirdiği gösterilmiştir (Hamad vd., 2024). İkincil kontrolün temel eşitliği "Eşitlik 6-7" ile ifade edilir:

$$u_{sc,i} = K_{p,i}(\beta_i u_{v_i} + u_{p_i}) + K_{I,i} \int (\beta_i u_{v_i} + u_{p_i}) dt. \quad (8)$$

$$v_{sc,i}^* = v_{pri,i}^* + u_{sc,i} \quad (9)$$

burada: $u_{sc,i}$; ikincil kontrol katmanı tarafından üretilen kontrol sinyalıdır ve sistemin voltaj regülasyonu ile güç paylaşımını yapmak için kullanılır. $K_{p,i}$; orantısız kazançtır ve sistemin dinamik değişimlere hızlı bir şekilde tepki vermesini sağlar. $K_{I,i}$; integral kazançtır ve sistemde zamanla biriken uzun vadeli hataların ortadan kaldırılmasına yardımcı olur. u_{v_i} ; voltaj regülasyon hatasıdır ve bir DG'nin voltajının nominal referans voltajından olan sapmasını ifade eder. u_{p_i} ; güç paylaşım hatasıdır ve dağıtık jeneratörlerin yük paylaşımı performansındaki sapmaları temsil eder. β_i ; voltaj regülasyonu için kullanılan bir ağırlık faktörüdür ve her bir DG'nin voltaj düzenlemesine katkısını belirler. Bu sinyal, birincil kontrol seviyesindeki referans voltajına eklenerek yeni bir referans voltaj oluşturur, bu işlem "Eşitlik 8" ile ifade edilir. Burada belirlenen referans voltajına $v_{pri,i}^*$ eklenir ve yeni bir referans voltaj $v_{sc,i}^*$ oluşturulur.

Adaptif droop kontrolü, geleneksel droop kontrolünün sınırlamalarını aşmak için geliştirilmiştir. Bu yöntem, sabit bir droop katsayısı yerine, her enerji kaynağının mevcut kapasitesine ve sistem koşullarına göre droop katsayısını dinamik olarak ayarlar (Vu vd., 2017). Adaptif kontrol, değişken yük koşullarında daha hassas voltaj regülasyonu ve dengeli güç paylaşımı sağlar.

Adaptif droop kontrolü, Şekil 3'te gösterildiği gibi düşük bant genişliğine sahip bir haberleşme ağı ile çalışarak dönüştürücülerin çıkış gerilimlerini ve akımlarını paylaşır. Sistem, bu verilere dayalı olarak yaklaşık orantılı bir akım paylaşımı sağlar. Akım paylaşım oranları "Eşitlik 9" ile aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\frac{i_{o1}}{i_{o2}} = \frac{k_1}{k_2} \quad (10)$$

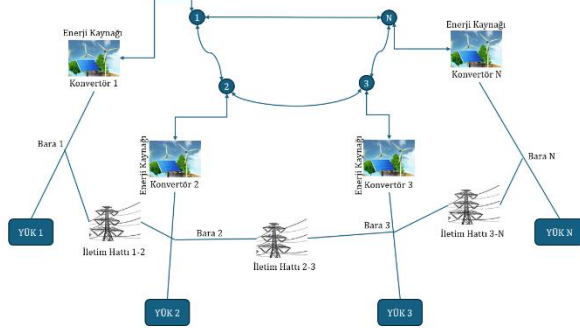
Burada, k_1 ve k_2 sırasıyla birinci ve ikinci dönüştürücünün akım paylaşım oranlarını ifade eder.

Adaptif droop kontrolünün temel eşitliği:

$$V_O = V_{ref} - m(t) \cdot I_O \quad (11)$$

"Eşitlik 10" ile burada, diğer droop kontrol denklemlerine benzer şekilde V_O , çıkış voltajını, I_O , çıkış akımını, V_{ref} , referans voltajını temsil ederken $m(t)$, zamanla değişen ve sistemin koşullarına göre ayarlanan adaptif droop katsayısıdır. Bu katsayı, şebeke durumu,

yük durumu veya enerji kaynağının mevcut kapasitesine göre dinamik olarak güncellenir (Nasirian vd., 2014). Adaptif droop kontrolü, sistemin yük değişikliklerine daha hızlı ve esnek yanıt vermesini sağlar. Voltaj sapmalarını hassas bir şekilde düzenler, sistem kararlılığını artırır ve enerji kaynaklarının aşırı yüklenmesini önler. Ayrıca, hat empedanslarını dikkate alarak voltaj düşüşlerini ve hat kayıplarını en aza indirir. Bu sayede mikro şebekelerde daha dengeli bir güç paylaşımı mümkün olur (Hu vd., 2018).

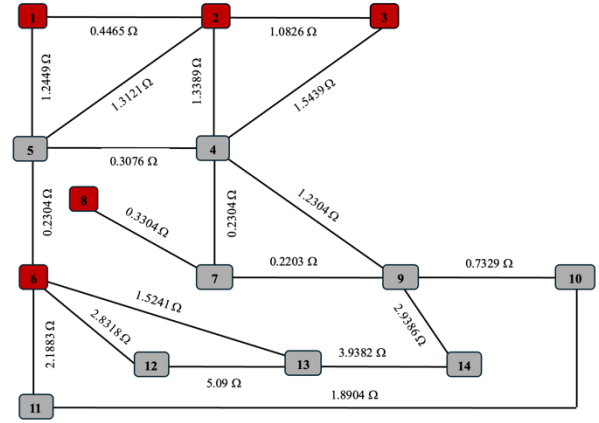


Şekil 3. DA Mikro şebekelerde ikincil kontrol seviyesinde iletişim ağı.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, 14 baralı ve 5 kontrolörlü bir DA mikro şebeke modeli MATLAB üzerinde PLECS tabanlı tasarlanarak, birincil ve ikincil kontrol seviyelerinin sistem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. IEEE standartlarına uygun olarak geliştirilen modelde, geleneksel droop kontrol ve adaptif droop kontrol stratejileri karşılaştırılmış ve adaptif droop kontrolünün sistem kararlılığı ve enerji verimliliği açısından sunduğu avantajlar ortaya konulmuştur.

Çalışmanın kapsamında kullanılan IEEE standartlarından geliştirilen 14 baralı DA mikro şebeke sistemi, Şekil 4'te şebeke diyagramı şeklinde gösterilmiştir. Bu sistemde, 1, 2, 3, 6 ve 8 numaralı baralara bağlı olan 5 kontrolör, kırmızı renkle gösterilmiştir. Bu kontrolörler, baralar arasında gücün düzenlenmesini sağlayan ve voltaj dengesini koruyan temel bileşenlerdir. Diğer 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14 numaralı gri renkle gösterilen noktalar ise sistemde kontrolör bulunmasa da belirli yüklerin yer aldığı baralardır.



Şekil 4. IEEE standartlarından geliştirilen 14 baralı DA mikro şebeke modeli.

Baralar arasındaki direnç değerleri şebekenin elektriksel karakteristiğini belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Direnç değerleri, mikro şebekedeki gücün belirli yollar boyunca nasıl akacağını ve voltaj düşümünü etkileyen temel parametrelerden biridir. Simülasyon modelinde, her bir bara arasındaki direnç değerleri detaylı olarak belirlenerek sistemin gerçek şartlar altında nasıl çalışacağı analiz edilmiştir. Bu nedenle ise model, enerji yönetimi ve gücün dağıtımı açısından büyük öneme sahiptir ve mikro şebekelerde kontrol mekanizmalarının etkinliğini değerlendirirken temel bir referans oluşturmaktadır.

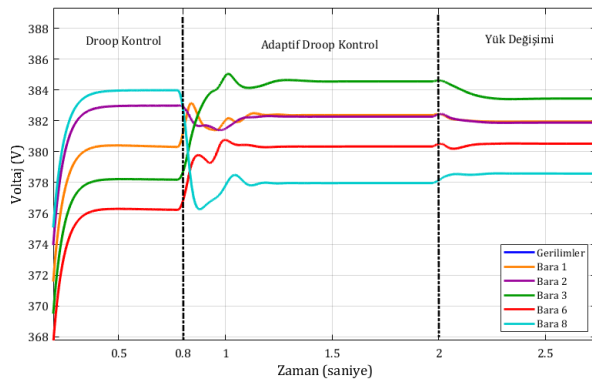
Tablo 1, şebekeye bağlı kaynakların belirli baralar üzerindeki referans gerilim V_{ref} ve maksimum güç kapasitesi P_{max} değerlerini göstermektedir. Verilere göre, şebekeye bağlı konvertör gerilim seviyeleri 376V ile 384V arasında değişmekte olup, bu durum mikro şebekenin voltaj regülasyonu açısından belirli bir dengeye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Güç kapasitesi açısından incelendiğinde, 1. bara üzerinde 165.80 kW ile en yüksek değer gözlemlenirken, diğer baralarda bu değer 9.48 kW ile 100 kW arasında değişmektedir. Özellikle üzerinde kontrolcü olmayan baralar üzerindeki yük profili, mikro şebeke içerisinde farklı bölgelere dağıtılmış güç taleplerini yansıtmaktadır. Bu durum, yük paylaşım stratejilerinin ve kontrol mekanizmalarının etkinliğini değerlendirmek açısından önemli bir veri sağlamaktadır.

Tablo 1. Kaynak ve yüklerin karakteristikleri.

	V_{ref} (V)	V_{out} (V)	P_{max} (kW)
Bara 1	380	380	165,80
Bara 2	383	383	50
Bara 3	378	378	100
Bara 4	-	380,85	48,35
Bara 5	-	378,15	55,83
Bara 6	376	376	100
Bara 7	-	377	-
Bara 8	384	384	50
Bara 9	-	378,95	30
Bara 10	-	378,10	9,48
Bara 11	-	377,34	30
Bara 12	-	377,45	11,38
Bara 13	-	370,40	14,75
Bara 14	-	378,52	-

Tabloda “-” ile gösterilen noktalarda yük veya kaynak bağlantısı olmadığından değer gözlemlenmemiştir.

Simülasyon çalışmalarında, Şekil 5’te gösterilen konvertör gerilimleri grafiği sistemin voltaj dengesini ve adaptif droop kontrolünün etkinliğini göstermek amacıyla incelenmiştir. İlk olarak 0-0,8 saniye arasında birincil kontrol mekanizması devreye girerek baralar arasındaki gerilim seviyelerini belirlenen referans değerlerine yaklaştırmıştır. Ardından, 0,8-2,0 saniyeleri arasında ikincil kontrol mekanizması devreye alınarak gerilim farklılıkları minimize edilerek şebekeye bağlı yüklerin ihtiyacına göre ayarlanmıştır. Kontrolcülerin simülasyon çalışmasında gösterilen 0.8 sn ile 2 sn arasında orantısal yük paylaşımının adaptive droop kontrol ile sağlandığı grafikten görülmektedir. 2,0 saniyeden itibaren ise sistem tamamen kararlı bir duruma geçmiş, adaptif droop kontrolü sayesinde orantısal yük paylaşımı yapılarak gerilim dalgalanmaları minimum düzeye indirgenmiştir. Adaptive droop 2. Saniyeden sonra yük değişimine karşı orantısal yük paylaşımı koruduğu ve konvertör gerilimleri arasında da gerilim seviyesini buna göre ayarladığı görülmektedir.

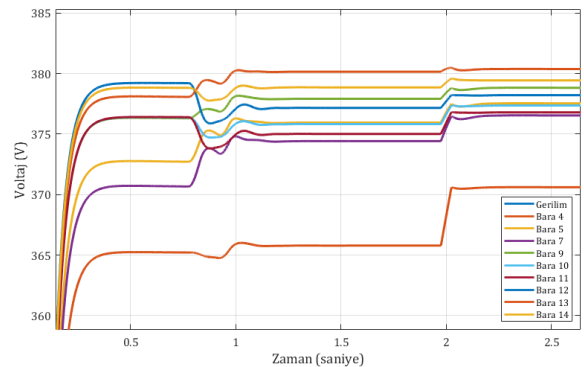


Şekil 5. DA mikro şebekeye bağlı 5 adet konvertörün çıkış gerilim değişimi.

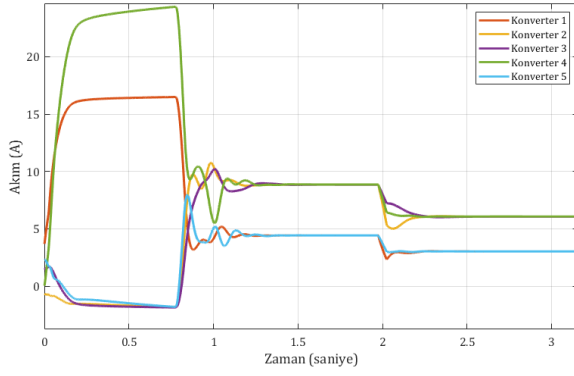
Grafik incelendiğinde, adaptif droop kontrolünün sistemdeki gerilim regülasyonu üzerindeki olumlu etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Birincil kontrol sistemindeki geleneksel droop kontrolün aksine, gerilim sapmalarını minimuma indirerek enerji kaynakları arasındaki gerilim dengesinin daha hassas bir şekilde sağlanmasına olanak tanımaktadır. Bu da mikro şebekenin değişen yük koşullarına daha hızlı ve verimli bir şekilde adapte olmasını sağlamaktadır.

Şekil 6’da gösterilen grafik, girişinde konvertör bağlı olmayan baraların gerilim seviyelerinin zaman içindeki değişimini göstermektedir. Konvertör bağlantısı olmayan baraların da kontrol süreçlerine dahil olduğu ve sistemin genel stabilizasyon sürecine nasıl tepki verdiği bu grafik aracılığıyla gözlemlenmektedir. Adaptif droop kontrolünün etkisiyle gerilim dalgalanmalarının azaldığı ve mikro şebekenin genelinde değişken yük koşullarına daha dengeli bir şekilde uyum sağladığı görülmektedir.

Şekil 7’de gösterilen grafik, konvertörlerin çıkış akımlarının zaman içindeki değişimini göstermektedir. 2. saniyenin sonunda, sistemde oransal yük paylaşımı aktif hale gelmiş ve yüklerin taleplerine göre konvertörler tarafından çıkış akımları sağlanmıştır. 0- 0,8 saniye aralığında, sistem birincil kontrol aşamasında olup, her bir konvertör iç kontrolcüsü tarafından denetlenerek hedeflenen akım değerlerine ulaşmaya çalışmaktadır. Bu süreçte dalgalanmalar gözlemlense de kontrol mekanizması sayesinde sistem hızla dengeye oturmaktadır. 0,8- 2,0 saniyeleri arasında, ikincil kontrol sistemi devreye girmekte ve yüklerin ihtiyacına göre konvertörlerin çıkış akımları ayarlanmaktadır. Bu süreçte, yüklerin türüne ve dinamik taleplerine bağlı olarak her bir konvertörün çıkış akımında değişiklikler meydana gelmektedir. 2,0 saniyesinden itibaren, oransal yük paylaşımı uygulanmış ve her konvertör, bağlı olduğu bara ve yük karakteristiğine göre çıkış akımını sabitlemiştir. Bu noktada, enerji kaynakları arasındaki güç paylaşımı dengelenmiş ve sistemin kararlı hale geldiği gözlemlenmiştir.



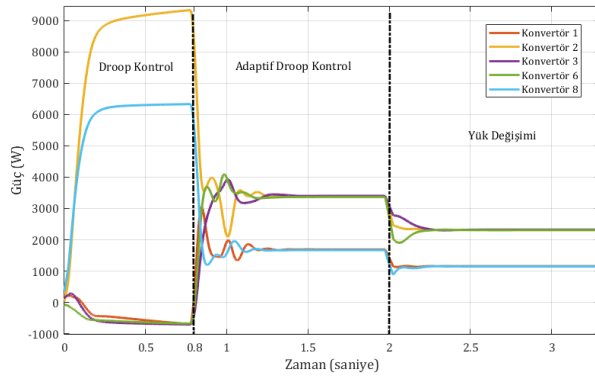
Şekil 6. Girişinde konvertör bağlı olmayan noktaların üzerine düşen gerilimlerin değişimi.



Şekil 7. DA mikro şebekeye bağlı 5 adet konvertörün çıkış akımlarının değişimi.

Şekil 8'de gösterilen grafik, adaptif droop kontrolü ile sağlanan dinamik güç paylaşım mekanizmasının etkinliğini göstermektedir. Yüklerin türüne bağlı olarak konvertörlerden sağlanan akım değerleri değişmekte ve sistemin değişen yük koşullarına uyum sağlayarak stabil hale geldiği görülmektedir. Son aşamada, yük paylaşımının başarılı bir şekilde tamamlandığı ve her bir konvertörün kendisine düşen yük miktarına göre akım sağladığı doğrulanmıştır.

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



Şekil 8. DA mikro şebekeye bağlı 5 adet konvertörün çıkış güçlerinin değişimi.

Grafik analizleri, mikro şebekenin adaptif droop kontrol ile daha hızlı ve stabil bir şekilde dengeye ulaştığını göstermektedir. P Konvertör Gücü grafiğinde, her bir konvertörün güç transferinin zamanla stabilize olduğu ve ikincil kontrol mekanizmasının etkin çalıştığı görülmüştür. Bara gerilimleri incelendiğinde, ilk düzenleme aşamasında belirli dalgalanmalar olduğu,

ancak adaptif droop kontrolünün sistemde gerilim farklılıklarını düzenleyerek stabil bir gerilim profili oluşturduğu tespit edilmiştir. Akım değişimleri incelendiğinde ise, mikro şebekenin dengesiz yük koşullarına hızlı uyum sağladığı ve ikincil kontrol mekanizması sayesinde akım paylaşımının dengeli hale geldiği gözlemlenmiştir.

4. Sonuç

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

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	A.A.Ö.	T.A.	K.A.
K	20	40	40
T	30	50	20
Y	30	50	20
VTI	70	20	10
VAY	30	40	30
KT	80	10	10
YZ	80	10	10
KI	20	70	10
GR	20	20	60

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

Adhikari S, Tang Y, Wang P. 2016. Secondary control for DC microgrids: A review. In: Proceedings of the 2016 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT), 25-28 October 2016, Singapore, Singapore, pp: 1-6.

Al-Ismael FS. 2021. DC microgrid planning, operation, and control: A comprehensive review. IEEE Access, 9: pp: 36154-36172.

Aluko A, Buraimoh E, Oni OE, Davidson IE. 2022. Advanced distributed cooperative secondary control of islanded DC microgrids. Energies, 15(11): pp: 3988.

Biglarahmadi M, Ketabi A, Baghaee HR, Guerrero JM. 2024. Two-layer distributed control of hybrid AC/DC microgrids supplying nonlinear, unbalanced and constant-power loads. Int J Electr Power Energy Syst, 162: pp: 110298.

Brusso B, Bose B. 2014. Power electronics—historical perspective and my experience [history]. IEEE Ind Appl Mag, 20(2): pp: 7-81.

Bulut U, Muratoglu G. 2018. Renewable energy in Türkiye: Great potential, low but increasing utilization, and an empirical analysis on renewable energy-growth nexus. Energy Policy, 123: pp: 240-250.

Choudhury S. 2020. A comprehensive review on issues, investigations, control and protection trends, technical challenges and future directions for microgrid technology. Int Trans Electr Energy Syst, 30(9): pp: e12446.

Cucuzzella M, Trip S, De Persis C, Cheng X, Ferrara A, Van der Schaft A. 2019. A robust consensus algorithm for current sharing and voltage regulation in DC microgrids. IEEE Trans Control Syst Technol, 27(4): pp: 1583-1595.

Da Silva WWAG, Oliveira TR, Donoso-Garcia PF. 2020. Hybrid distributed and decentralized secondary control strategy to attain accurate power sharing and improved voltage restoration in DC microgrids. IEEE Trans Power Electron, 35(6): pp: 6458-6469.

Dam DH, Lee HH. 2016. An adaptive power distributed control method to ensure proportional load power sharing in DC microgrid considering equivalent line impedances. In: Proceedings of the 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 18-22 September 2016, Milwaukee, WI, USA, USA, pp: 1-6.

Dechamps P. 2023. The IEA World Energy Outlook 2022 – a brief analysis and implications. Eur Energy Clim J, 11(3): pp: 100-103.

Dragicevic T, Lu X, Vasquez JC, Guerrero JM. 2016. DC microgrids- Part I: A review of control strategies and stabilization techniques. IEEE Trans Power Electron, 31(7): pp: 4876-4891.

Elmouatamid A, Ouladsine R, Bakhouya M, El Kamoun N, Khaidar M, Zine-Dine K. 2020. Review of control and energy management approaches in micro-grid systems. Energies, 14(1): pp: 168.

Fang J, Shuai Z, Zhang X, Shen X, Shen ZJ. 2019. Secondary power sharing regulation strategy for a DC microgrid via maximum

loading factor. IEEE Trans Power Electron, 34(12): pp: 11856-11867.

Gao F, Kang R, Cao J, Yang T. 2019. Primary and secondary control in DC microgrids: a review. J Mod Power Syst Clean Energy, 7(2): pp: 227-242.

Ghanimi HMJ, Ghoreishy H, Mirimani SM. 2024. Enhancing DC microgrids cluster performance with distributed event-triggered consensus protocols. e-Prime Adv Electr Eng Electron Energy, 10: pp: 100773.

Guarnieri M. 2018. Revolving and evolving—early DC machines [historical]. IEEE Ind Electron Mag, 12(3): pp: 38-43.

Guerrero JM, Vasquez JC, Matas J, De Vicuña LG, Castilla M. 2011. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids- a general approach toward standardization. IEEE Trans Ind Electron, 58(1): pp: 158-172.

Hamad B, Al-Durra A, Zeineldin H, Mohamed YARI. 2024. Robust distributed secondary control for DC microgrids enhancing stability and communication delay tolerance. IEEE Trans Energy Convers, Early Access: pp: 1-16.

Hatzigiargyriou N, Dimeas A, Vasilakis N, Lagos D, Kontou A. 2020. The Kythnos microgrid: a 20-year history. IEEE Electr Mag, 8(4): pp: 46-54.

Hatzigiargyriou N. 2014. Microgrids: architectures and control. Wiley-IEEE Press, Chichester, UK, pp: 317.

Hou Y, Liu M, Shen N. 2024. A simulation research method for data injection attacks on DC microgrids. In: Proceedings of the 2024 China Automation Congress (CAC), November 2024, Beijing, China, China, pp: 2460-2465.

Hu J, Duan J, Ma H, Chow MY. 2018. Distributed adaptive droop control for optimal power dispatch in DC microgrid. IEEE Trans Ind Electron, 65(1): pp: 778-789.

Jasim AM, Jasim BH, Bureš V, Mikulecký P. 2022. A new decentralized robust secondary control for smart islanded microgrids. Sensors (Basel), 22(22): pp: 8709.

Kaysal A, Köroğlu S, Oğuz Y. 2023. Adaptive droop controller design for energy management system in DC microgrid architectures. Pamukkale Univ J Eng Sci, 29(7): pp: 692-700.

Kaysal A. 2023. Mikro şebekeler için hiyerarşik enerji yönetim sistemi tasarımı ve uygulaması. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, Türkiye, pp: 149.

Kirtay E. 2010. Current status and future prospects of renewable energy use in Türkiye. Energy Explor Exploit, 28(5): pp: 411-431.

Kumar J, Agarwal A, Agarwal V. 2019. A review on overall control of DC microgrids. J Energy Storage, 21: pp: 113-138.

Küçük G, Yüce Dural B. 2022. Avrupa Yeşil Mutabakatı ve yeşil ekonomiye geçiş: enerji senaryoları üzerinden bir değerlendirme. Anadolu Univ J Soc Sci, 22(1): pp: 137-156.

Liu HP, Hu J, Li Z, Chan KW, Guerrero JM. 2020. A novel droop control method based on virtual frequency in DC microgrid. IEEE Trans Ind Electron, 67(10): pp: 8446-8456.

Lotfi H, Khodaei A. 2017. AC versus DC microgrid planning. IEEE Trans Smart Grid, 8(1): pp: 296-304.

Moradi M, Heydari M, Zarei SF. 2023. An overview on consensus-based distributed secondary control schemes in DC microgrids. Electr Power Syst Res, 225: pp: 109870.

Mosa MA, Ali AA. 2021. Energy management system of low voltage DC microgrid using mixed-integer nonlinear programming and a global optimization technique. Electr Power Syst Res, 192: pp: 106971.

Nahata P, La Bella A, Scattolini R, Ferrari-Trecate G. 2020. Hierarchical control in islanded DC microgrids with flexible structures. IEEE Trans Control Syst Technol, 29(6): pp: 2379-2392.

Nasirian V, Davoudi A, Lewis FL, Guerrero JM. 2014. Distributed

- adaptive droop control for DC distribution systems. *IEEE Trans Energy Convers*, 29(4): pp: 944-956.
- Planas E, Andreu J, Gárate JI, Martínez De Alegría I, Ibarra E. 2015. AC and DC technology in microgrids: a review. *Renew Sustain Energy Rev*, 43: pp: 726-749.
- Polleux L, Guerassimoff G, Marmorat JP, Sandoval-Moreno J, Schuhler T. 2022. An overview of the challenges of solar power integration in isolated industrial microgrids with reliability constraints. *Renew Sustain Energy Rev*, 155: pp: 111955.
- Pourbehzadi M, Niknam T, Aghaei J, Mokryani G, Shafie-khah M, Catalão JPS. 2019. Optimal operation of hybrid AC/DC microgrids under uncertainty of renewable energy resources: a comprehensive review. *Int J Electr Power Energy Syst*, 109: pp: 139-159.
- Rashad M, Raoof U, Ashraf M, Ashfaq Ahmed B. 2018. Proportional load sharing and stability of DC microgrid with distributed architecture using SM controller. *Math Probl Eng*, 2018: pp: 1-16.
- Saygin D, Tör OB, Cebeci ME, Teimourzadeh S, Godron P. 2021. Increasing Türkiye's power system flexibility for grid integration of 50% renewable energy share. *Energy Strategy Rev*, 34: pp: 100625.
- Shafiee Q, Dragičević T, Vasquez JC, Guerrero JM. 2014. Hierarchical control for multiple DC-microgrids clusters. *IEEE Trans Energy Convers*, 29(4): pp: 922-933.
- Shafiee Q, Nasirian V, Guerrero JM, Lewis FL, Davoudi A. 2014. Team oriented adaptive droop control for autonomous AC microgrids. In: *Proceedings of the 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2014)*, October 2014, Dallas, TX, USA, USA, pp: 1861-1867.
- Shuai Z, Fang J, Ning F, Shen ZJ. 2018. Hierarchical structure and bus voltage control of DC microgrid. *Renew Sustain Energy Rev*, 82: pp: 3670-3682.
- Taye BA, Choudhury NBD. 2023. A dynamic droop control for a DC microgrid to enhance voltage profile and proportional current sharing. *Electr Power Syst Res*, 221: pp: 109438.
- Vasquez J, Guerrero J, Miret J, Castilla M, Garcia De Vicuna L. 2010. Hierarchical control of intelligent microgrids. *IEEE Ind Electron Mag*, 4(4): pp: 23-29.
- Vu TV, Perkins D, Diaz F, Gonsoulin D, Edrington CS, El-Mezyani T. 2017. Robust adaptive droop control for DC microgrids. *Electr Power Syst Res*, 146: pp: 95-106.
- Wang P, Qin Z, Yuan J, Blaabjerg F. 2024. Dual active bridge converter and its control. In: *Control of Power Electronic Converters and Systems: Volume 4*, Elsevier Academic Press, Burlington, MA, USA, pp: 71-100.
- Yamashita DY, Vechiu I, Gaubert JP. 2020. A review of hierarchical control for building microgrids. *Renew Sustain Energy Rev*, 118: pp: 109523.
- Zia MF, Elbouchikhi E, Benbouzid M. 2018. Microgrids energy management systems: a critical review on methods, solutions, and prospects. *Appl Energy*, 222: pp: 1033-1055.
- .