



Bulanık Mantık Tip-3 Kullanılarak Mikro Şebeke Frekans Regülasyonu

Microgrid Frequency Regulation Using Fuzzy Logic Type-3

İsmail Türk^{1*}, Heybet Kılıç²¹ Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş., ismailtrk5253@gmail.comORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0686-6769>² Dicle Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, heybet.kilic@dicle.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6119-0886>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 21 Haziran 2023
Revizyon 4 Temmuz 2023
Kabul 5 Temmuz 2023
Online 30 Eylül 2023

Anahtar Kelimeler:

Dağıtık Üreteçler, PV, Rüzgar,
Yakıt hücresi, Batarya, Tip-3
Bulanık Mantık, Frekans
Kontrol, Mikro şebekeler

ÖZ

Geleneksel enerji kaynaklarının tükenmesi ve çevreye zarar vermesi gibi dezavantajlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artmasına neden olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynakları süreksizlik sorunuyla karşı karşıyadır. Bu sorunu çözmek için mikro şebeke sistemleri önerilmektedir. Mikro şebekeler güç dengesizliği, jeneratör hızı ve yük değişiklikleri gibi durumlarda frekans problemleri yaşayabilir, bu da teknik ve ekonomik sorunlara yol açar. Bu makalede, güç dengesizliği sorununu çözmek için tip-3 bulanık mantık kontrolör (T3-BMK) temelli bir kontrol şeması sunulmaktadır. Bu kontrol şeması, matematiksel modellere dayanmaz ve değişken hava koşulları ve üretim ve tüketimdeki değişimi hesaba katarak kontrol etme imkanı sağlar. Önerilen kontrol şeması, kurallara ek olarak bulanık kümelerin parametrelerini hızlı bir şekilde ayarlamak için tasarlanmıştır. Ayrıca, önerilen T3-BMK tabanlı kontrol şeması, güç dengesizliklerini etkin bir şekilde çözebilir ve mikro şebekelerin istikrarını artırabilir. Bu çalışmada, önerilen yöntem, bir mikro şebeke üzerinde gerçekleştirilen bir vaka çalışmasıyla test edilmiş ve T1-BMK, T2-BMK ve klasik PID yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen şemanın frekans stabilizasyon performansının diğer yöntemlere göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Ayrıca, değişken yük, bilinmeyen dinamikler ve yenilenebilir enerji kaynaklarındaki değişiklikler gibi zorlu koşullar altında da başarılı bir şekilde frekans stabilizasyonu sağlayabilmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 June 2023
Received in revised form 4 July 2023
Accepted 5 July 2023
Available online 30 September 2023

Keywords:

Distributed generations, PV, Wind,
Fuel cell, Battery, Type-3 fuzzy logic,
Frequency control, Microgrids

Doi: 10.24012/dumf.1318132

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

The rise in use of renewable energy sources can be attributed to the presence of drawbacks, such as the depletion of conventional energy sources and the adverse impact on the environment. Renewable energy sources have the challenge of intermittency. In order to address this issue, the implementation of microgrid systems is suggested. Frequency issues can arise in microgrids due to factors such as power imbalances, fluctuations in generator speed, and changes in load. These issues can lead to both technical and economic challenges. This article presents a control strategy that utilizes a type-3 fuzzy logic controller (FLC) to address the issue of power imbalance. The control technique in question does not rely on mathematical models and offers the potential to incorporate changeable weather conditions as well as fluctuations in production and consumption. The control technique that has been proposed is specifically designed to efficiently modify the parameters of fuzzy sets, as well as the associated rules. Additionally, the control method based on T3-FLC that has been suggested demonstrates the capacity to efficiently address power imbalances and enhance the stability of microgrids. The suggested methodology has undergone testing through a case study conducted on a microgrid, and has been compared to T1-FLC, T2-FLC, and standard PID approaches. The results collected from the study demonstrate that the proposed system exhibits superior frequency stabilization performance compared to alternative techniques. Furthermore, it has the capability to effectively ensure frequency stabilization in demanding scenarios characterized by fluctuating loads, uncertain dynamics, and variations in renewable energy sources.

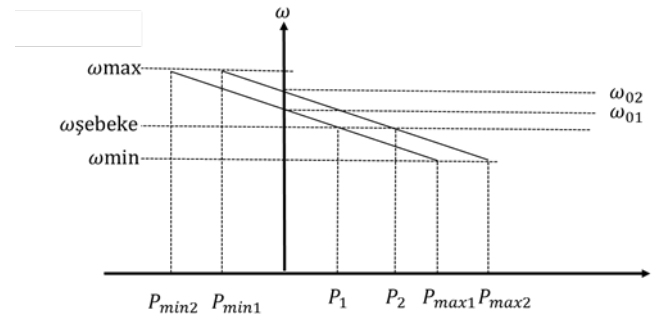
Giriş

Fosil yakıtların sınırlı kaynaklara sahip olması, çevresel zararlar yaratması, aynı zamanda dünya genelinde artan petrol fiyatları gibi nedenler, ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarına (YEK'lere) yönelmeye itmiştir [1]. Özellikle fosil yakıt rezervlerinin sürekli azalması ve karbon emisyonlarının artışı, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçiş hızını her geçen gün artırmaktadır [2],[3]. YEK'lerin geleneksel enerji kaynaklarına kıyasla daha temiz ve son yıllardaki teknolojik gelişmelerin katkısıyla daha ekonomik olması, bu geçişi daha da hızlandırmıştır [4]. Bu noktada, YEK'lerin kullanımı hem ekonomik hem de çevresel açıdan elde edilen faydalara işaret etmektedir. Bu faydalar, fosil yakıtlarda olduğu gibi sera gazı emisyonlarına yol açmadan enerji üretimi sağlayarak hava kirliliğini azaltmayı içerir. Ayrıca, enerji arzını çeşitlendirerek ithal yakıtlara olan bağımlılığı azaltır. YEK'lerin üretimi, kurulumu ve farklı sektörlerde uygulanması, ekonomik büyümeyi ve istihdamı destekleme potansiyeli taşır. Ayrıca, yenilenebilir enerji (YE) kullanımının daha düşük termal, taşıma ve dönüşüm kayıpları nedeniyle enerji verimliliğini artırdığını belirtmektedir [7]. Bu olumlu etkilerin ötesinde, ulusal hükümetler de YEK yatırımlarını teşvik etmektedir. Örneğin, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Sözleşmesi, 2030 yılına kadar emisyonları 1990 seviyelerinin en az %40 altına indirme hedefini ortaya koymuştur [5].

Mikro şebekeler (MŞ'ler), YEK'lerin artan kullanımı ve enerji talebinin sürekli yükselmesi sebebiyle günümüzde önemli bir enerji dağıtım stratejisi olarak öne çıkmaktadır [6]. MŞ'ler, depolama cihazları (volanlar, enerji kapasitörleri ve piller) ile esnek yüklerin birleştiği, dağıtılmış enerji kaynaklarına (DEK) (örneğin mikro türbinler, yakıt hücreleri, fotovoltaik paneller vb.) dayalı sistemlerdir. Bu sistemler hem şebekeye bağlı (on-grid) hem de bağımsız şebekeden (off-grid) işleyebilme kapasitesine sahiptirler [7]. MŞ'lerin genel faydaları, güvenilirlik, düşük enerji maliyetleri, enerji güvenliği, temiz enerji kullanımı ve esnek çalışma yapısı gibi faktörlerden oluşmaktadır [8],[9]. Ancak, MŞ'lerin YEK'lerin şebekeye entegrasyonunu kolaylaştırmasına rağmen, bazı teknik zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu zorlukların büyük bir kısmı, YEK'lerin kesintili bir doğaya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. MŞ'ler, enerji depolama çözümleriyle kısmen bu sorunları aşmaya çalışsa da sistemin kararlılığını etkileyen kritik teknik problemler hala varlığını sürdürmektedir. Bir mikro şebekede iki tür kararlılık vardır: kararlı durum kararlılığı ve dinamik kararlılık. Kararlı durum kararlılığı, MŞ'nin normal ve anormal koşullar altında bile belirli sınırlar içinde sabit bir voltaj ve frekansı koruma yeteneğini ifade eder [10]. Dinamik kararlılık ise, yük veya üretimdeki değişiklik gibi bir bozulmadan sonra sistemin kararlı duruma geri dönme yeteneğini içerir. MŞ'lerin kararlılık seviyesini ve arıza olasılığını etkileyen ve sürekli izlenmesi gereken en önemli meselelerden biri, frekans dalgalanmalarıdır

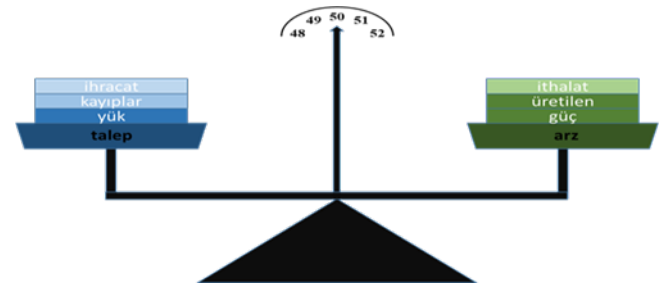
Geleneksel güç sistemlerinde olduğu gibi, MŞ'lerde de enerji arzı (üretim) ve enerji talebi (yük) olmak üzere iki temel unsur büyük önem taşımaktadır. Bu iki bileşen, şebeke frekansını direkt olarak etkiler ve frekans regülasyonunun temelini oluşturur. MŞ'lerde enerji arzı ve talebi, sürekli değişen koşullar altında dinamik bir yapı sergiler. Enerji

üretimindeki dalgalanma, örneğin güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi veya diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı jeneratörlerin etkisinden kaynaklanabilir. Yük azaldığında veya üretim arttığında, jeneratör hızı/frekansı artma eğiliminde olurken, artan yük ve üretim talebi durumunda ise jeneratör hızı/frekansı düşer. Aynı şekilde, enerji talebi, kullanıcıların tüketim alışkanlıkları ve etkinlikleri nedeniyle zaman içinde değişiklik gösterebilir. Yük ve üretimdeki değişiklikler, jeneratör hızı veya frekansı üzerinde anlık değişikliklere yol açar. Frekans regülasyonunun amacı, enerji arzı ve talebini sürekli olarak dengeleyerek frekansın nominal değerinde kalmasını ve şebekenin kesintisiz işleyişini sağlamaktır. Bu, MŞ sistemlerinin kararlılığı ve güvenilirliği için son derece kritik bir önem taşır. Sonuç olarak, MŞ sistemleri istikrarlı ve güvenilir bir şekilde faaliyet gösterebilir ve enerji verimliliği ile sürdürülebilirliği artırılabilir.



Şekil 1. Güç ve frekans grafiği

Şekil 1'deki grafiğe baktığımızda, enerji arzı ve talebinin birbirine eşit olduğu durumda mikro şebeke frekansı (ω_{grid}) nominal değerinde bulunmaktadır. Ancak, zaman içinde enerji talebi artış gösterir ve enerji arzı ile dengesizlik meydana gelir. Enerji talebi, enerji arzını aştığında (artan yük durumunda), enerji arzı talebi karşılayamaz ve frekans düşüş göstermeye başlar. Tersine, enerji talebi azalmışsa (azalan yük ile beraber), frekans artış göstermeye başlar.



Şekil 2. Arz-talep frekans etkisi

Şekil 2 incelendiğinde, başlangıçta enerji arzı ve talebinin birbirine eşit olduğu ve frekansın nominal değeri olan 50 Hz seviyesinde olduğu görülmektedir. Ancak, zaman içinde enerji talebinde artış meydana gelir ve enerji arzı ile dengesizlik ortaya çıkar. Enerji talebi, enerji arzını aştığında

(artan yük durumunda), enerji arzı talebi karşılayamaz ve frekans düşmeye başlar. Bu durumda, frekans nominal değeri olan 50 Hz'nin altına düşer. Diğer yandan, enerji talebinde azalma gerçekleştiğinde ve enerji arzı talebi aşan bir seviyeye yükseldiğinde (azalan yük durumunda), enerji arzı fazladan güç üretmek zorunda kalır ve frekans artış göstermeye başlar. Bu durumda, frekansın nominal değeri olan 50 Hz'nin üstüne çıkar.

MŞ sistemlerinde, dağıtılmış üretime dayalı yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek payıyla birlikte yerel enerji talebi yönetimi, genel güç güvenliği, kalitesi ve güvenilirliğinin artırılması gibi hedefler için çeşitli yük frekans kontrol (LFC) yöntemleri üzerine yapılan araştırmalar öne çıkmaktadır [11]. Bu çalışmalar genellikle geleneksel kontrol ve akıllı kontrol yöntemleri olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Tablo 1'e bakınız). Geleneksel yöntemlerde farklı stratejiler benimsenmiştir. MŞ'nin voltajı ve frekans regülasyonunun temel teorilerine dayalı bir kontrol şeması [12]'de sunulmuştur. Bu kontrol şeması, enerji depolama sistemlerinin (BESS) tepkisini içermektedir. [13]'te hızlı yanıt veren invertör tabanlı dağıtık enerji kaynaklarının yavaş etkili jeneratör setleri ile koordineli çalışmasını sağlamak amacıyla bir yöntem önerilmiştir. Frekans düzenlemesi, farklı dağıtık enerji kaynakları arasında yük paylaşımını içermektedir. Çift beslemeli endüksiyon generatörünün güç kontrol yöntemi [14]'te ele alınmıştır. Güç sarkması sorununu aşmak için, jeneratör güç marjı ayrılmıştır. [15]'de, beklenmedik durumlar sırasında elektrik şebekesinin sistem frekansını stabilize etmek için rastgele talep yanıt algoritması önerilmiştir. MŞ için çevresel koşulların göz önünde bulundurulduğu bir frekans tabanlı talep yönetim sistemi [16]'da sunulmuştur. [17]'de, rüzgâr enerjisi santrallerinin birincil frekans kontrolüne katılımının değerlendirilmesi yapılmış ve volan tabanlı bir depolama sistemi ile donatılmıştır. MŞ'de daha fazla atalet sağlamak amacıyla geleneksel senkron jeneratörün dinamik davranışını taklit eden bir birincil kontrolör önerilmiştir [18]. Adalı bir MŞ'ye entegre edilmiş elektrikli araçların (EV) yük frekans kontrolüne (LFC) katılacakları şekilde kontrol etmek için bir yöntem [19]'da önerilmiştir. Yakıt hücreli MŞ'nin istenen dinamik özellikleri sağlayacak bir kontrolör parametrelerinin belirlenmesi esasına dayandırılmış ve kontrolörün kararlı parametreleri, kazanç ve faz marjı kararlılık sınır konumu yöntemi ile belirlenmiştir [20].

Akıllı (intelligent) veya yumuşak hesaplamalı (soft computing) yöntemlerin kullanıldığı çalışmalarda ise, daha özgün ve sofistike yaklaşımlar görülmektedir. [21]'de, sensör tabanlı hataya dayanıklı bir kontrol şeması önerilmiştir. Bu çalışmada ayrıca kayan kipli kontrol yöntemi ile siber saldırılara da karşı koruma sağlanmıştır. Frekansa duyarlı sanal atalet kontrol teknikleri tartışılmış ve atalet kazançlarını modüle etmek temelinde iki kontrol şeması [22]'de önerilmiştir. Bulanık potansiyel fonksiyonu temelleri, mikro şebeke ikincil seviye kontrolünde her bir dağıtık enerji kaynağı ünitesinin ayar noktasının belirlenmesi için gradyan düzgün yöntemiyle minimize edilen potansiyel fonksiyonunu tanımlamak için kullanılmıştır [23]. Kontrol edilebilir kaynaklar için frekans salınımlarını sönmölemek amacıyla PI kontrolörlerinin uygulandığı bir yöntem önerilmiştir. Ayrıca, sistemin kontrolü için Particle Swarm Optimization ile Optimal Lineer Kuadratik Regülatör (LQR) kontrol

algoritması [24]'te kullanılmıştır. [25]'te, genel Tip II Bulanık Mantık Kümeleri (GT2FLS) ve Değiştirilmiş Harmony Arama Algoritması (MHSA) tekniğinin birleştirilerek orantılı-integral (PI) denetleyicinin uyarlamalı ayarına odaklanılmıştır. Adalı modda çalışan MŞ'nin yük frekans kontrolünün doğrusal ikinci dereceden diferansiyel oyunlar teorisi temelinde incelenmiştir [26]. MŞ'nin yük değişikliği sonrasında en uygun çalışma noktasını belirlemek için optimizasyon temelli bir PI kontrolör [27]'de tasarlanmıştır. [28]'de, gemi güç sistemindeki adalı mikro şebekeler için bir optimal kesirli sıralı bulanık PD+I yük frekans kontrolörü tasarlanmıştır. Ada modunda çalışan bir MŞ'nin yük frekans kontrolü için Sinüs Lojistik haritası tabanlı kaotik sinüs kosinüs algoritması (2D-SLCSA) ile optimize edilmiş klasik PID denetleyici [29]'da önerilmiştir. [30]'da, bir bulanık düşün denetleyicisinde yapay arı kolonisi (ABC) algoritmasının kullanıldığı görülmüştür. [31]'de frekans regülasyonu için derin öğrenme tabanlı bir yöntem önerilmiştir. [32]'de, tamsayı derece yaklaşımlı kesir dereceli PID kontrolörünün (IOA FOPID) farklı optimizasyon algoritmaları kullanılarak tasarlandığı gözlemlenmiştir. Çift giriş aralıklı tip-2 bulanık kesir dereceli PI (SIT2-FFOPI) denetleyicisinin önerildiği ve çevrimdışı bir yöntemle denetleyici parametrelerinin belirlendiği görülmüştür [33]. [34]'te, kademeli çift giriş aralığı tip 2 bulanık mantık denetleyicisinin (C-DIT2-FLC) frekans regülasyonu için tasarlandığı bulunmuştur.

Bu çalışmada, daha yüksek kapasiteli hesaplamalar kullanılarak T3-BMK tabanlı bir denetleyici önerilmektedir. Bu yaklaşım, daha karmaşık sistem dinamiklerini etkin bir şekilde modellemeye imkân tanır. Önerilen yöntem, özellikle MŞ'nin dinamiklerine özgü gereksinimleri göz önünde bulundurarak tasarlanmıştır, bu nedenle dinamikler hakkında derinlemesine bilgi gereksinimi azaltılmıştır. Bu da denetleyicinin geniş bir uygulama yelpazesi için kullanılabilirliğini artırır. Geleneksel BMK tabanlı denetleyicilerden farklı olarak, önerilen yöntem doğrusal olmayan özellikleri içerir ve bu sayede MŞ sistemlerindeki belirsizliklere daha iyi uyum sağlayabilir. Kural tabanının yanı sıra, üyelik fonksiyonları da hızlandırılmış öğrenme algoritmaları ile ayarlanır. Bu özellik, denetleyicinin hızlı ve etkili bir şekilde öğrenme yeteneğini artırır. Ayarlar çevrimiçi bir yaklaşımla sürekli olarak güncellenir ve her örnekleme zamanında adaptasyon sağlanır. Bu da değişken koşullar altında bile denetleyicinin performansını optimize etmeyi mümkün kılar. Tüm kazançlar aynı anda ayarlanarak denge ve kararlılık sağlanır. Tekil olmayan bulanıklaştırma, hatalarının etkisini azaltarak daha güvenilir bir kontrol sağlar. Yük değişiklikleri, rüzgâr/güneş güçlerinin dalgalanmaları ve diğer dinamik bozulmalar gibi farklı zorlu koşullarda önerilen yöntemin daha etkili olduğu gösterilmiştir.

Tablo 1. Kontrol yöntemleri avantaj ve dezavantajları

Referanslar	Yıl	Grup	Avantajlar/Faydalar	Dezavantajlar/Sınırlamalar
[12]	2017	Geleneksel	(i) sarkma tabanlı yöntemin zayıf geçici yanıt zayıflıklarının önüne geçilmesi	(i) iletişim için yüksek bant aralığı gerekli olması
[13]	2018	Geleneksel	(i) jeneratörler arasında eşit olmayan geçici yük paylaşımı	(i) geçici yüklenmenin aşırı olması durumunda DEK' ler zarar görebilmesi ve tüm sistemin çökebilmesi
[14]	2016	Geleneksel	(i) Her bir mikro kaynağın çalışma özellikleri dikkate alınması	(i) arıza anında rüzgâr türbin frekans düzenlenmesine en uygun garanti sağlanmıyor olması
[15]	2014	Geleneksel	(i) merkezi kontrol gerektirmesi (ii) üst üste bindirilmiş iletişim altyapısı gerektirmesi	(i) ekonomik uygulanabilirlik sorunu
[16]	2014	Geleneksel	(i) yüklerin kategorizasyonu (ii) yük frekans kontrolü olmayan sistemlere uygulanabilirliği	(i) müşteri memnuniyetsizliği
[17]	2015	Geleneksel	(i) rüzgâr türbin ve volan güç rezervlerinin koordinasyonu	(i) diğer dağıtık kaynakların ve depolama sistemlerinin kararlılık ve salınıma etkisine değinilmemesi
[18]	2015	Geleneksel	(i) dizel tahrikli jeneratör ve PV koordinasyonu	(i) her kontrolör yerel olarak çalışsa da kontrolörler ve parametreler merkezi olarak tasarlanması
[19]	2018	Geleneksel	(i) elektrikli araçların (EV) yük frekans kontrolüne katılması	(i) K sabitesi büyüdüğünde sistem kararlılığı garanti edilemeyebilir.
[20]	2021	Geleneksel	(i) Yakıt hücrelerinin yedek jeneratör olarak kullanımı	(i) matematiksel tabanlı denklemler de GPM değeri belirlenen sınırın üzerine çıkması durumunda frekans bozunumu.
[21]	2018	Akıllı	(i) kayan kipli kontrol ile siber saldırı ve hata etkisinin azaltılması	(i) sensör tabanlı yaklaşımda sensör başarısız olursa tüm kontrol ve veriler kaybolabilmesi
[22]	2018	Akıllı	(i) bulamak tabanlı şema kullanımı (ii) rüzgâr türbini stabilitesi	(i) PV gibi diğer üretim kaynaklarının sistem etkileri değerlendirilmemesi
[23]	2013	Akıllı	(i) ikincil seviye kontrolünde dağıtılan her bir enerji kaynağı birimi için ayar noktası hesaplanması	(i) hesaplamada K sabitesi artarsa, eigen değerler kararsız bölgeye doğru hareket eder, bu da sistemde salınım yapması ve kararsızlığa yol açılabilir
[24]	2014	Akıllı	(i) mikro şebekedeki bozulmadan kaynaklanan frekans salınımını en aza indirecek kontrol matrislerini bulmak için PSO tekniği uygulanması	(i) sistem transient zaman durumundayken kontrolör ilk anda harekete geçip frekans salınımları oluşturabilmesi

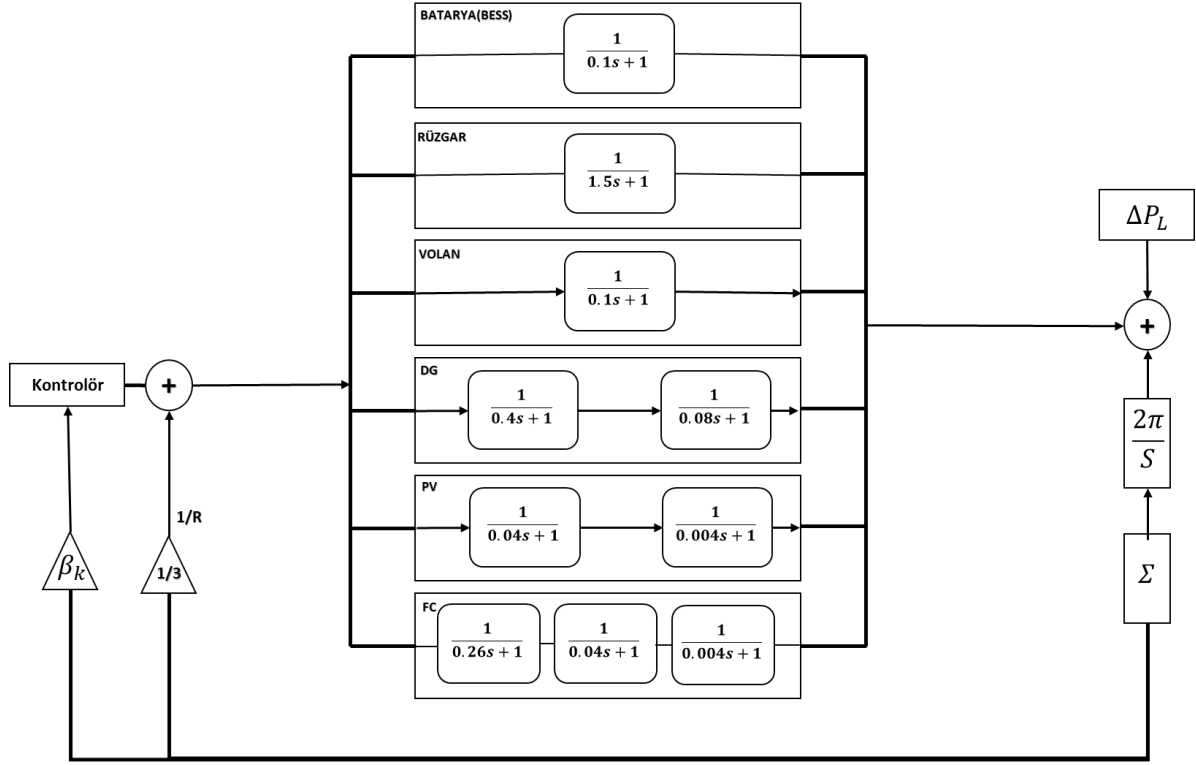
Tablo 1. Kontrol yöntemleri avantaj ve dezavantajları devamı

Referanslar	Yıl	Grup	Avantajlar/Faydalar	Dezavantajlar/Sınırlamalar
[25]	2016	Akallı	(f) yöntemin farklı şebeke topolojileri, yenilenebilir kaynaklar ve farklı yükler için kullanılabilirliği (i) Her bir mikro kaynağın çalışma özellikleri dikkate alınması	(i) uzun süreli durumlarda sistem kararlılığını sağlayamayabilmesi
[26]	2018	Akallı	(ii) Mikro şebeke sistemindeki mikro DG'lerin koordinasyonu düzenlemesinin gerçekleştirilebilmesi için tüm bileşenlerin faydası göz önünde bulundurulması	(i) bu yöntem yalnızca merkezi olmayan kontrol yöntemi için geçerli olması
[27]	2017	Akallı	(i) amaç fonksiyonları, bulanık üyelikler kullanılarak birleştirilmiştir (ii) Optimizasyon problemini çözmek için Hybrid Big Bang-Big Crunch algoritması (HBB-BC) kullanılması (iii) yöntem yük değişimleri sırasında sistem voltaj/frekansını düzenlemesi	(i) büyük reaktif güç değişimlerinde, diğer arızalardan daha fazla salınım görülmesi
[28]	2017	Akallı	(i) tamsayı olmayan bulanık PD+H denetleyicisi katsayılarının ayarı için değiştirilmiş bir kara delik optimizasyon algoritması kullanılması (ii) yöntemde denetleyici, Fractional-Order Fuzzy adlı iki seviyeden ve geleneksel bir PD+H denetleyiciden oluşturulması	(i) diğer dağıtık kaynakların ve depolama sistemlerinin kararlılık ve salınıma etkisine değinilmemiştir (ii) farklı mikro şebeke organizasyonlarında şebekeye bağlı olma durumunda ki sorunlara değinilmemesi
[29]	2021	Akallı	(i) iki boyutlu bir Sinüs Lojistik haritası tabanlı kaotik sinüs kosinüs algoritması (2D-SLSCA) ile optimize edilmiş klasik PID denetleyici kullanımı (ii) hibrit izole bir mikro şebekenin yük frekans kontrolü (LFC) şemasında FESS, DEG, FC ve WTG dahil edilmesi	(i) ESS veya DEG gibi MG bileşenlerinin güç çıkışı sınırlamaları dikkate alınmamıştır
[30]	2019	Akallı	(ii) Bulanık düşün denetleyicisinde ise, yapay arı kolonisi (ABC) algoritması, çok amaçlı bir işleme dayalı üyelik fonksiyonlarının parametrelerini belirlemekte kullanılması	(i) diğer dağıtık kaynakların ve depolama sistemlerinin kararlılık ve salınıma etkisine değinilmemiştir
[31]	2023	Akallı	(i) spike sinir ağı (SNN) ile entegre geri adımlama (NIB) denetleyicisi (ii) redoks akışlı akü (RFB)	(i) farklı mikro şebeke tasarımlarında örneğin FC varlığında yöntemin etkisi tartışılmamıştır.
[32]	2021	Akallı	(i) lig şampiyonası algoritması (LCA), karmaşık koloni optimizasyonu (ACO) ve optikten esinlenen optimizasyon (OIO) üç farklı optimizasyon kullanımı	(i) ağırlık faktörü w' 'nin belirlenen aralıklar dışına çıkması durumunda istenilen özelliklerin dışına çıkması
[33]	2021	Akallı	(i) tip-2 bulanık kesirli sıralı PI (SIT2-FFOPI) denetleyici	(i) diğer dağıtık kaynakların ve depolama sistemlerinin kararlılık ve salınıma etkisine değinilmemiştir (ii) farklı mikro şebeke organizasyonlarında şebekeye bağlı olma durumunda ki sorunlara değinilmemesi
[34]	2022	Akallı	(i) Kademeli Çift Giriş Aralığı Tip 2 Bulanık Mantık Denetleyicisi (C-DIT2-FLC)	(i) daha yüksek dereceli bulanık sistemlerin kullanımı
[önerilen yöntem]	2023	Akallı	(i) Tip-3 BMK, model bağımsız olması, üyelik fonksiyonu sınırlaması olmaması, (ii) BESS, FESS, DEG, FC, PV ve WTG dahil edilmesi	(i) Rüzgar güneş ve yük için stokastik değişimlerin dikkate alınmaması

Mikro Şebekenin Modellenmesi

Farklı MŞ'lerde, tasarımlarına, nasıl çalıştıklarına ve hangi nesil teknolojileri devreye aldıklarına bağlı olarak farklı DEK'ler kullanılabilir. DEK'ler hem rüzgar türbini jeneratörleri (WTG'ler) ve fotovoltaik sistemler (PV'ler) gibi YEK'leri hem de dizel jeneratörler (DEG'ler) gibi geleneksel enerji kaynaklarını içerebilir. WTG ve PV aralıklı güç üretirken çıkışları kontrol edilemez, dolayısıyla DEG gibi bir

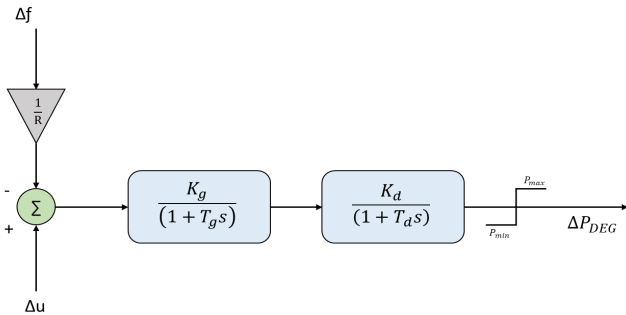
üreteç kullanılması sistem güvenilirliğini artırabilir. Ayrıca, yakıt hücreleri (FC'ler) de MŞ'lerde kullanılan en yaygın enerji üretim birimleri arasındadır. Bu çalışmada WTG, PV, BESS, FESS, DEG ve FC gibi üretim kaynakları ve depolama sistemlerinin bağlı olduğu bir mikro şebeke modellenmiştir. Modellenen mikro şebeke Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Mikro şebeke modeli

Dizel jeneratör

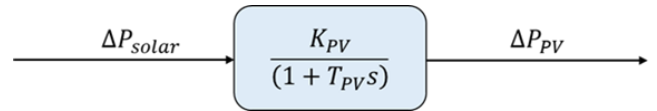
Şekil 3'ta verilen MŞ'de, DEG katsayıları verilmiştir. Ayrıca Şekil 1'de kullanılan DEG sistem modeli gösterilmiştir.



Şekil 4. Dizel jeneratör modeli

Fotovoltaik sistem (PV)

Son yıllarda PV sistemlerin temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları olması nedeniyle şebeke entegrasyonu ciddi oranda artmıştır. [35]. PV sistemlerde elektrik üretiminde güneş ışınımı kullanılmaktadır. Çalışılan MŞ'de PV ve invertör cihazından oluşmaktadır. Şekil 2'de PV'nin Sistem modeli verilmiştir.

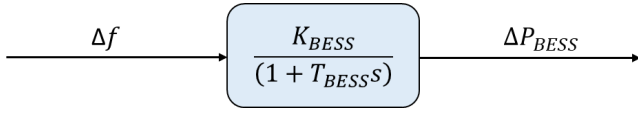


Şekil 5. PV sistem modeli

Batarya enerji depolama sistemi

Güç şebekelerinde batarya enerji depolama sistemleri (BESS) entegrasyonu dünya çapında artmaktadır. Popülariteleri, bunlarla sınırlı olmayan geniş boyut

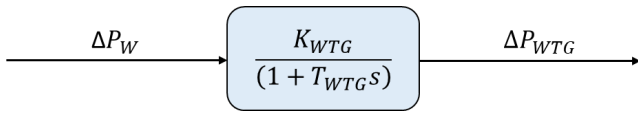
aralıklarından kaynaklanmaktadır. Topografya ve tek bir tesis olarak veya dağıtılmış kaynaklar olarak entegre edilebilme yeteneği, onları neredeyse her tür sistem için ideal kılar [36]. Çalışılan MŞ'deki BESS modeli Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 6. Batarya enerji depolama sistem modeli

Rüzgâr türbin sistemleri

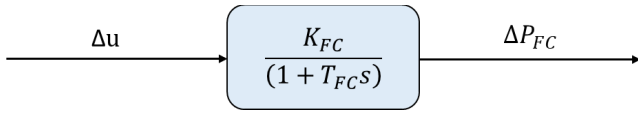
Rüzgâr türbin jeneratörü(WTG) sistem modeli şekil 5'te transfer fonksiyonu verilmiştir.



Şekil 7. Rüzgâr türbin jeneratörü sistem modeli

Yakıt pili

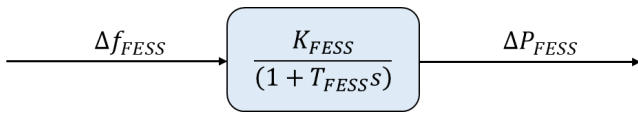
FC'ler, hidrojen veya diğer yakıtların kimyasal enerjisini kullanarak elektrik üretirler, ayrıca depolama sistemi gibi davranırlar. Şekil 3'te verilen MŞ'de FC katsayıları verilmiştir. Ayrıca Şekil 8'de FC sistem modeli gösterilmiştir.



Şekil 8. Yakıt pili sistem modeli

Volan enerji depolama sistemi

Çalışılan MŞ'deki FESS modeli Şekil 7'te verilmiştir.



Şekil 9. Volan enerji depolama sistem modeli

Bulanık Mantık Kontrol (BMK)

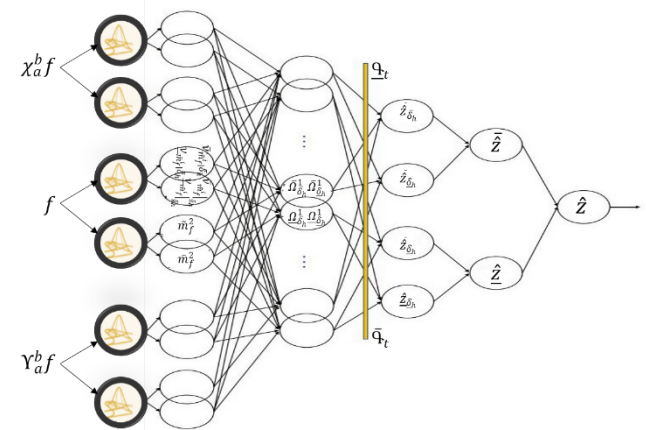
PID aslında bir kontrol geri bildirim mekanizmasıdır. Bir PID denetleyici ölçülü bir süreç içinde değişen ve istenilen ayar noktası ile arasındaki farkı olarak bir "hata" değerini hesaplar. Kontrol giriş ayarı yapılarak bu hata en aza indirilmesi sağlanır. PID'ler, basitlikleri ve kapasiteleri nedeniyle çoğu endüstriyel kontrol sisteminde yaygın olarak kullanılır. Geleneksel PID'lerin kontrol performansı, doğrusal

olmayan değerler, belirsizlikler ve parametre değişiklikleri altında düşer.

Geleneksel BMK tabanlı PID'lerde, BMK'lar PID kazançlarını değiştirmek için kullanılır. Kapalı döngü hatası ve türevi genellikle BMK'ların girdileri olarak kullanılır. BMK'nın çıktısı, PID'lerin kazançlarını belirler. Tip-2 BMK'lar MŞ'de nadiren kullanılmıştır [37]. T2-BMK tabanlı kontrol tekniğinin etkinliği doğrulanmıştır. PID'yi optimize etmek için T2-BMK'lar formüle edilmiş ve performansı, MŞ'lerde stabilizasyon problemi için PID denetleyicisinin parametrelerini ayarlamak için kullanılmıştır. T2-BMK'lar kullanılarak PID geliştirilmiştir ve yüksek dereceli BMK'ların doğruluğu arttırdığı gösterilmiştir [38].

Tip-3 bulanık mantık kontrol

Tip-3 BMK'lar ve genelleştirilmiş BMK'lar gibi yüksek dereceli BMK'ların gerçek dünya mühendislik problemlerinde daha iyi verimlilik sağladığı gösterilmiştir. Bulanık sistemlerin genel yeteneği yaklaşık olarak yeteneğidir, bulanık sistemler doğrusal olmayan bir fonksiyonu tahmin etmek veya bir veri setinden dinamik bir model üretmek için kullanılır. Tip-1 ve tip-2 bulanık mantık kontrolörler(T1-BMK, T2-BMK) geniş çapta incelenmiştir [37],[38]. Son yıllarda ise bulanık sistemlerin yaklaşım kabiliyetini geliştirmek için bazı girişimlerde bulunulmuştur. Bu motivasyona dayalı olarak, daha fazla düzeydeki belirsizliği ele almak için bir Tip-3 BMK önerilmiştir. Tip-3 bulanık sistemler oldukça nadiren çalışılmıştır. N tipi bulanık kümeler için bulanık alt küme tanımı geliştirilmiştir. Bu makalede,klasik PID, tip-1 ve tip-2 bulanık sistemlerin (T1-BMK, T1-BMK) kavramları ve uygulamaları gözden geçirilmiş ve tip-3 daha yüksek seviyeli bulanık kümelerin başarısı hakkında bir tartışma sunulmuştur. Kullanılan bulanık mantık kontrolör giriş değişkenleri ve çıkışı şekil 10'da verilmiştir.



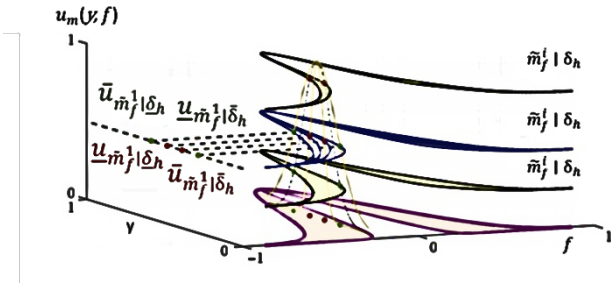
Şekil 10. Bulanık mantık kontrolör

Şekil 10'da ki gösterilen giriş değişkenlerimiz f , $x_a^b f$ ve $y_a^b f$ dir.

Burada;

$$\chi_a^b f(a) = \frac{\int_0^a (f(t)/(a-t)^b) dt}{\tau(1-b)} \quad (1)$$

$$\Upsilon_a^b f(a) = \frac{\int_0^a (a-t)^{b-1} f(t) dt}{\tau(b)} \quad (2)$$



Şekil 11. T3-bulanık mantık üyelik fonksiyonları

$f, \chi_a^b f,$ ve $\Upsilon_a^b f,$ girişleri için üyelik fonksiyonları şu şekilde kabul edilmiştir. Sırasıyla $\tilde{m}_f^1 - \tilde{m}_f^2, m_{\chi_a^b f}^1 - \tilde{m}_{\chi_a^b f}^2,$ ve $m_{\Upsilon_a^b f}^1 - \tilde{m}_{\Upsilon_a^b f}^2$ dir. Şekil 11’de gösterildiği gibi, her bir üyelik fonksiyonu yatay olarak n seviye bölünmüştür. Yatay dilim düzeyi üyelikleri, δ_h Şekil 11’te gösterildiği gibi her bir girdi için hesaplanmıştır. δ_h seviyesinde üst ve alt üyelikler f girişi için aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\bar{v}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h} = \exp \left(- \frac{(\bar{f}_{\delta_h} - p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h})^2}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2} \right) \quad (3)$$

$$\bar{v}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h} = \exp \left(- \frac{(\bar{f}_{\delta_h} - p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h})^2}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2} \right) \quad (4)$$

$$\bar{v}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h} = \exp \left(- \frac{(\bar{f}_{\delta_h} - p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h})^2}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2} \right) \quad (5)$$

$$\bar{v}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h} = \exp \left(- \frac{(\bar{f}_{\delta_h} - p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h})^2}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2} \right) \quad (6)$$

Burada;

$$\bar{f}_{\delta_h} = \frac{f \bar{u}_{\tilde{m}_f^i}^2 | \delta_h + \alpha_s^2 c_{\tilde{m}_f^i} | \delta_h}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2 + \alpha_s^2} \quad (8)$$

$$\bar{f}_{\delta_h} = \frac{f \bar{u}_{\tilde{m}_f^i}^2 | \delta_h + \alpha_s^2 p_{\tilde{m}_f^i} | \delta_h}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2 + \alpha_s^2} \quad (9)$$

$$\bar{f}_{\delta_h} = \frac{f \bar{u}_{\tilde{m}_f^i}^2 | \delta_h + \alpha_s^2 p_{\tilde{m}_f^i} | \delta_h}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2 + \alpha_s^2} \quad (10)$$

$$\bar{f}_{\delta_h} = \frac{f \bar{u}_{\tilde{m}_f^i}^2 | \delta_h + \alpha_s^2 p_{\tilde{m}_f^i} | \delta_h}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2 + \alpha_s^2} \quad (11)$$

burada, $h = 1, \dots, n, i = 1, 2, p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}$ değerleri $\tilde{m}_f^i | \delta_h$ üyelik fonksiyonunun merkezidir. $\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}$ ve $\underline{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}$ ise $\tilde{m}_f^i | \delta_h$ üyelik fonksiyonunun üst ve alt standart bölümlerdir. δ_h seviyesinde üst ve alt üyelikler $\chi_a^b f$ girişi için ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\bar{v}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h} = \exp \left(- \frac{(\chi_a^b \bar{f}_{\delta_h} - p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h})^2}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2} \right) \quad (12)$$

$$\bar{v}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h} = \exp \left(- \frac{(\chi_a^b \bar{f}_{\delta_h} - p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h})^2}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2} \right) \quad (13)$$

$$\bar{v}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h} = \exp \left(- \frac{(\chi_a^b \bar{f}_{\delta_h} - p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h})^2}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2} \right) \quad (14)$$

$$\bar{v}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h} = \exp \left(- \frac{(\chi_a^b \bar{f}_{\delta_h} - p_{\tilde{m}_f^i | \delta_h})^2}{\bar{u}_{\tilde{m}_f^i | \delta_h}^2} \right) \quad (15)$$

Burada;

$$\chi_{af}^b \bar{f}_{\delta_h} = \frac{\chi_{af}^b \bar{u}_{\chi_{af}^b}^2 \left| \bar{\delta}_h + \alpha_s^2 c_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} \right| \bar{\delta}_h}{\bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 + \alpha_s^2} \quad (16)$$

$$\chi_{af}^b \underline{f}_{\delta_h} = \frac{\chi_{af}^b \underline{u}_{\chi_{af}^b}^2 \left| \bar{\delta}_h + \alpha_s^2 p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} \right| \bar{\delta}_h}{\underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 + \alpha_s^2} \quad (17)$$

$$\chi_{af}^b \bar{f}_{\delta_h} = \frac{\chi_{af}^b \bar{u}_{\chi_{af}^b}^2 \left| \underline{\delta}_h + \alpha_s^2 p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} \right| \underline{\delta}_h}{\bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 + \alpha_s^2} \quad (18)$$

$$\chi_{af}^b \underline{f}_{\delta_h} = \frac{\chi_{af}^b \underline{u}_{\chi_{af}^b}^2 \left| \underline{\delta}_h + \alpha_s^2 p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} \right| \underline{\delta}_h}{\underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 + \alpha_s^2} \quad (19)$$

burada, $h = 1, \dots, n, i = 1, 2, p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h$ değerleri $\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i | \bar{\delta}_h$ üyelik fonksiyonunun merkezidir. $\bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h$ ve $\underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h$ ise $\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i | \bar{\delta}_h$ üyelik fonksiyonunun üst ve alt standart bölümlerdir. δ_h seviyesinde üst ve alt üyelikler Y_{af}^b girişi için ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\bar{v}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h = \exp \left(- \frac{\left(Y_{af}^b \bar{f}_{\delta_h} - p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h \right)^2}{\bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2} \right) \quad (20)$$

$$\bar{v}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \underline{\delta}_h = \exp \left(- \frac{\left(Y_{af}^b \underline{f}_{\delta_h} - p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \underline{\delta}_h \right)^2}{\bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2} \right) \quad (21)$$

$$\underline{v}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h = \exp \left(- \frac{\left(Y_{af}^b \bar{f}_{\delta_h} - p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h \right)^2}{\underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2} \right) \quad (22)$$

$$\underline{v}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \underline{\delta}_h = \exp \left(- \frac{\left(Y_{af}^b \underline{f}_{\delta_h} - p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \underline{\delta}_h \right)^2}{\underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2} \right) \quad (23)$$

Burada;

$$Y_{af}^b \bar{f}_{\delta_h} = \frac{Y_{af}^b \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 \left| \bar{\delta}_h + \alpha_s^2 c_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} \right| \bar{\delta}_h}{\bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 + \alpha_s^2} \quad (24)$$

$$Y_{af}^b \underline{f}_{\delta_h} = \frac{Y_{af}^b \underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 \left| \bar{\delta}_h + \alpha_s^2 p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} \right| \bar{\delta}_h}{\underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 + \alpha_s^2} \quad (25)$$

$$Y_{af}^b \bar{f}_{\delta_h} = \frac{Y_{af}^b \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 \left| \underline{\delta}_h + \alpha_s^2 p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} \right| \underline{\delta}_h}{\bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 + \alpha_s^2} \quad (26)$$

$$Y_{af}^b \underline{f}_{\delta_h} = \frac{Y_{af}^b \underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 \left| \underline{\delta}_h + \alpha_s^2 p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} \right| \underline{\delta}_h}{\underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i}^2 + \alpha_s^2} \quad (27)$$

burada, $h = 1, \dots, n, i = 1, 2, p_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h$ değerleri $\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i | \bar{\delta}_h$ üyelik fonksiyonunun merkezidir. $\bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h$ ve $\underline{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i} | \bar{\delta}_h$ ise $\bar{m}_{\chi_{af}^b}^i | \bar{\delta}_h$ üyelik fonksiyonunun üst ve alt standart bölümlerdir.

$\bar{\delta}_h$ şu şekilde elde edilir:

$$\begin{aligned} \bar{\Omega}_{\delta_h}^1 &= \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \\ \bar{\Omega}_{\delta_h}^2 &= \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \\ \bar{\Omega}_{\delta_h}^3 &= \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \\ \bar{\Omega}_{\delta_h}^4 &= \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \\ \bar{\Omega}_{\delta_h}^5 &= \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \\ \bar{\Omega}_{\delta_h}^6 &= \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \\ \bar{\Omega}_{\delta_h}^7 &= \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^1} | \bar{\delta}_h \\ \bar{\Omega}_{\delta_h}^8 &= \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \bar{u}_{\bar{m}_{\chi_{af}^b}^2} | \bar{\delta}_h \end{aligned} \quad (28)$$

$\underline{\delta}_h$ şu şekilde elde edilir:

$$\begin{aligned}
 \bar{\Omega}_{\delta_h}^1 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \bar{\Omega}_{\delta_h}^2 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \bar{\Omega}_{\delta_h}^3 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \bar{\Omega}_{\delta_h}^4 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \bar{\Omega}_{\delta_h}^5 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \bar{\Omega}_{\delta_h}^6 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \bar{\Omega}_{\delta_h}^7 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \bar{\Omega}_{\delta_h}^8 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h}
 \end{aligned} \tag{29}$$

Üst ve alt değerlendirme seviyelerinde kuralların alt derecesi şu şekilde elde edilir:

$$\begin{aligned}
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^1 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^2 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^3 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^4 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^5 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^6 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^7 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^8 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h}
 \end{aligned} \tag{30}$$

$$\begin{aligned}
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^1 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^2 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^3 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^4 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^5 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^6 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^1|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^7 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^1|\delta_h} \\
 \underline{\Omega}_{\delta_h}^8 &= \bar{u}_{\tilde{m}_f^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\chi_{af}}^2|\delta_h} \bar{u}_{\tilde{m}_{\gamma_{af}}^2|\delta_h}
 \end{aligned} \tag{31}$$

Tip indirgeme dikkate alınarak, kontrol sinyalinin üst ve alt sınırları şu şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned}
 \bar{\hat{z}}_{\delta_h} &= \frac{\sum_{n=1}^k \bar{\Omega}_{\delta_h}^t \bar{Q}_k}{\sum_{n=1}^k (\bar{\Omega}_{\delta_h}^k + \underline{\Omega}_{\delta_h}^k)}, \\
 \bar{\hat{z}}_{\delta_h} &= \frac{\sum_{l=1}^k \bar{\Omega}_{\delta_h}^k \bar{Q}_t}{\sum_{n=1}^k (\bar{\Omega}_{\delta_h}^k + \underline{\Omega}_{\delta_h}^k)}, \\
 \bar{\hat{z}}_{\delta_h} &= \frac{\sum_{t=1}^k \bar{\Omega}_{\delta_h}^k \underline{Q}_t}{\sum_{n=1}^k (\bar{\Omega}_{\delta_h}^k + \underline{\Omega}_{\delta_h}^k)}, \\
 \hat{z}_{\delta_h} &= \frac{\sum_{l=1}^k \bar{\Omega}_{\delta_h}^k \underline{Q}_t}{\sum_{n=1}^k (\bar{\Omega}_{\delta_h}^k + \underline{\Omega}_{\delta_h}^k)},
 \end{aligned} \tag{32}$$

Burada k kural sayısını belirtir ve \bar{Q}_t ve \underline{Q}_t , t dereceden kural parametrelerinin alt ve üst değeridir. İkinci tip indirgeme şu şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned}
 \bar{\hat{z}} &= \frac{\sum_{r=1}^l \bar{\delta}_h \bar{\hat{z}}_{\delta_h}}{\sum_{r=1}^l (\bar{\delta}_h + \underline{\delta}_h)} + \frac{\sum_{r=1}^l \underline{\delta}_h \bar{\hat{z}}_{\delta_h}}{\sum_{r=1}^l (\bar{\delta}_h + \underline{\delta}_h)}, \\
 \hat{z} &= \frac{\sum_{r=1}^l \bar{\delta}_h \hat{z}_{\delta_h}}{\sum_{r=1}^l (\bar{\delta}_h + \underline{\delta}_h)} + \frac{\sum_{r=1}^l \underline{\delta}_h \hat{z}_{\delta_h}}{\sum_{r=1}^l (\bar{\delta}_h + \underline{\delta}_h)}.
 \end{aligned} \tag{33}$$

Çıkış \hat{z} (kontrol sinyali) şu şekilde hesaplanır:

$$\hat{z} = \frac{\bar{\hat{z}} + \hat{z}}{2} \tag{34}$$

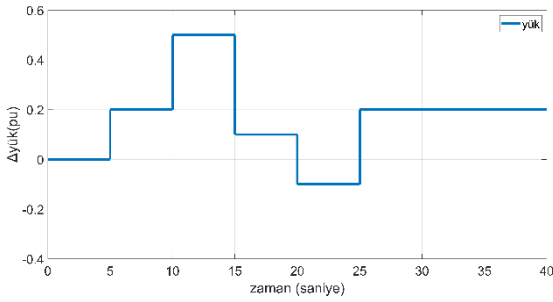
Çalışılan denklemlerin çıkışları Şekil 10’da gösterilmiştir.

Bulgular

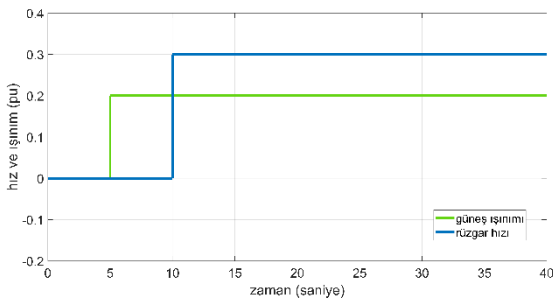
Bu bölümde MATLAB/Simulink ortamında Şekil 3'te verilen mikro şebeke modeli gerçekleştirilmiştir. Ayrıca PID, Tip-1, Tip-2, Tip-3 kontroller de MATLAB/simulink ortamında tasarlanmıştır. Kontrolörler farklı yük-güç değişimlerin yanı sıra batarya enerji depolama sistemi (BESS), volan enerji depolama sistemi (FESS), yakıt pili (FC) ve dizel jeneratör (DG) gibi farklı mikro şebeke elemanlarının devreden çıkarılması gibi senaryolar altında da denenmiştir.

Deneysel sonuçlar

Tüm durumlar için şekil 12'deki yük değişimi ve şekil 13'te güneş ve rüzgâr santrallerindeki sırasıyla güneş ışınımı ve rüzgâr hızı değişimleri geçerlidir.



Şekil 12. Mikro şebeke yük değişimi

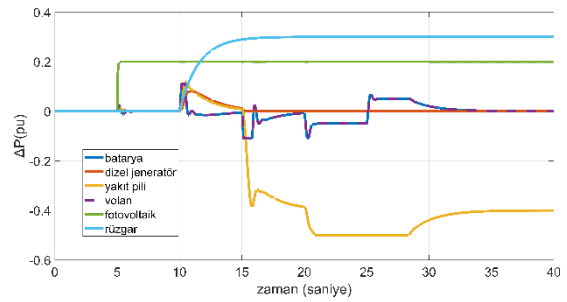


Şekil 13. Solar ışınım ve rüzgâr hızı değişimi

Durum 1: yakıt pili, volan, batarya ve dizel jeneratörün devrede olduğu durum

Şekil 14'te Tip-3 BMK uygulamasının mikro şebekenin güç değişimini nasıl etkilediği gösterilmektedir. Şekil 14'ün analizi, 5. saniyede fotovoltaiik (PV) sistemin devreye girişi ve Şekil 12'deki yük artışı durumunda, volan, batarya ve yakıt hücresi gibi enerji depolama sistemlerinin kısa bir süreliğine (0.5 saniye) devreye girdiğini gösterir. Bu hızlı değişimin sebebi, artan yüke ek olarak aynı anda PV sisteminin ışınımının artmasıdır. PV sistemdeki güç değişikliği, yük artışıyla dengelediği için FESS, BESS ve FC gibi enerji depolama ve dönüşüm sistemleri devre dışı kalmıştır. 10. saniyede yük 3 pu artarken aynı zamanda rüzgâr santralının devreye girmesiyle üretim de 3 pu artmıştır. Rüzgârın

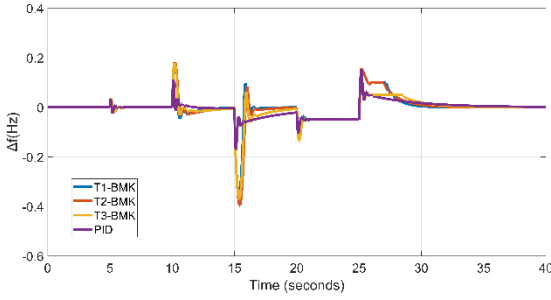
dinamik yapısından kaynaklanan bu artış, 15. saniyede 3 pu seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, rüzgârın sistemdeki güç dengesini sağlamak amacıyla FESS, BESS, FC ve DG gibi enerji depolama ve dönüşüm sistemlerinin 15 saniyeye kadar devreye girmesine neden olmuştur. Rüzgâr tam olarak devreye girdiği 15. saniyede, bu sistemler tekrar devre dışı bırakılmıştır. 15. saniyede yükün 4 pu azalması sonucunda mikro şebekede 4 pu enerji fazlası oluşmuş ve bu nedenle FC yük olarak devreye girmiş, sonuç olarak hidrojen üretimini başlatmış ve depolamıştır. 20. saniyede yük 2 pu azalmasıyla FC tam kapasiteyle yük olarak çalışmış ve hidrojen üretimi gerçekleştirmiştir. Bu süreçte BESS ve FESS, 0.05 pu enerji depolamıştır. 25. saniyede yükün 3 pu artması nedeniyle öncelikle BESS ve FESS yük artışıyla dengelemiştir. FC ise 28. saniyede mikro şebekeye enerji üretmeye başlamış ve BESS ile FESS tekrar devre dışı kalmıştır.



Şekil 14. Tip-3 bulanık mantık kontrolünde güç değişimi

Şekil 15 'te Tip-1, Tip-2, Tip-3 BMK ve PID kontrol stratejilerinin uygulandığı senaryolarda mikro şebekenin frekans değişimleri incelenmektedir. Şekil 15'in analizi, 5. saniyede kısa süreli bir frekans değişiminin meydana geldiğini göstermektedir. Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 Bulanık Mantık Kontrol (BMK) yöntemlerinde, 5. saniyede sistem frekans tepkisi hızla dengelenmektedir. Bununla birlikte, Şekil 15'te görüldüğü üzere, 10. saniyede sistem frekansındaki salınımlar yükselmiş ve dengeye ulaşması yaklaşık bir saniye sürmüştür. Bu bağlamda, Tip-3 BMK'nın salınımların daha az olduğu bir denge sağladığı gözlemlenmektedir. 15. saniyede yükün 4 pu azalması nedeniyle mikro şebekede 4 pu'luk bir enerji fazlalığı oluşmuş ve bu durum, FC'nin yük olarak devreye girmesine yol açmış, sonucunda hidrojen üretilip depolanmıştır. Aynı zamanda, 15. saniyede sistem frekansındaki salınım negatif yönlü olup bir frekans düşüşü gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, Tip-3 BMK yöntemi daha düşük salınım seviyelerini sağlamıştır. 20 saniyede meydana gelen 2 pu'luk yük azalışı, FC'nin tam kapasiteyle yük olarak işlemesine ve hidrojen üretimine yol açmıştır. Bu esnada, BESS ve FESS enerji depolama sistemleri de toplamda 0.5 pu enerji depolamışlardır. Tüm uygulanan yöntemlerde, frekans salınımı minimum düzeyde olup sistem, nominal değer altında bir dengeye ulaşmıştır. 25. saniyede yükün 3 pu artması nedeniyle öncelikle BESS ve FESS, yük artışıyla dengelemiştir; bu aşamada frekanslar nominal değer üzerine çıkmıştır. Tip-3 (BMK) yöntemi ise daha düşük

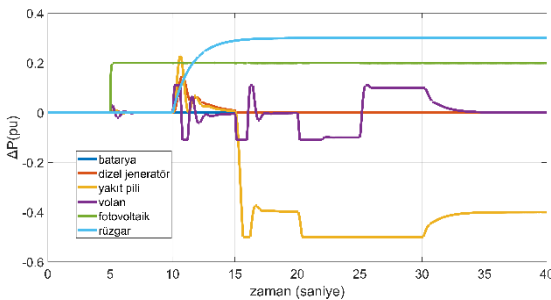
seviyede ve daha uzun bir süre boyunca frekans dengelemesi sağlamıştır. 30. saniyede her dört kontrol yönteminde de frekans, nominal değere ulaşarak dengeye gelmiştir.



Şekil 15. Frekans değişimi

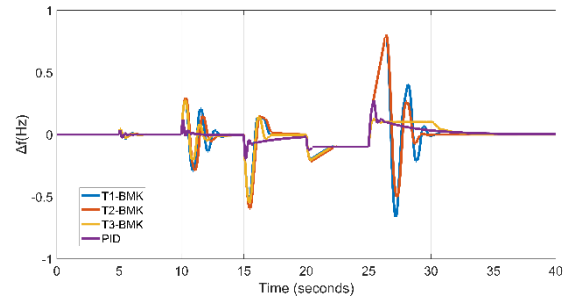
Durum 2: yakıt pili, volan ve dizel jeneratörün devrede olduğu bataryanın devreden çıkarıldığı durum

Şekil 16'da Tip-3 BMK uygulamasının BESS'in devrede olmadığı durumda mikro şebekenin güç değişimini nasıl etkilediği gösterilmektedir. Şekil 16'nın analizi, 5. saniyede fotovoltaik (PV) sistemin devreye girişi ve Şekil 12'deki yük artışı durumunda, volan ve yakıt hücresi gibi enerji depolama sistemlerinin kısa bir süreliğine (0,5 saniye) devreye girdiğini gösterir. Bu hızlı değişimin sebebi, artan yüke ek olarak aynı anda PV sisteminin ışınımının artmasıdır. PV sistemdeki güç değişikliği, yük artışını dengelediği için FESS ve FC gibi enerji depolama ve dönüşüm sistemleri devre dışı kalmıştır. 10. saniyede yük 3 pu artarken aynı zamanda rüzgâr santralinin devreye girmesiyle üretim de 3 pu artmıştır. Rüzgârın dinamik yapısından kaynaklanan bu artış, 15. saniyede 3 pu seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, rüzgârın sistemdeki güç dengesini sağlamak amacıyla FESS, FC ve DG gibi enerji depolama ve dönüşüm sistemlerinin 15 saniyeye kadar devreye girmesine neden olmuştur. Rüzgâr tam olarak devreye girdiği 15. saniyede, bu sistemler tekrar devre dışı bırakılmıştır. 15. saniyede yükün 4 pu azalması sonucunda mikro şebekede 4 pu enerji fazlası oluşmuş ve bu nedenle FC yük olarak devreye girmiş, sonuç olarak hidrojen üretimini başlatmış ve depolamıştır. 20. saniyede yük 2 pu azalmasıyla FC tam kapasiteyle yük olarak çalışmış ve hidrojen üretimi gerçekleştirmiştir. Bu süreçte FESS, 0.1 pu enerji depolamıştır. 25. saniyede yükün 3 pu artması nedeniyle öncelikle FESS yük artışını dengelemiştir. FC ise 30. saniyede mikro şebekeye enerji üretmeye başlamış ve FESS tekrar devre dışı kalmıştır.



Şekil 16. Tip-3 bulanık mantık kontrolünde güç değişimi

Şekil 17 'de Tip-1, Tip-2, Tip-3 BMK ve PID kontrol stratejilerinin uygulandığı senaryolarda mikro şebekenin frekans değişimleri incelenmektedir. Şekil 17'nin analizi, 5. saniyede kısa süreli bir frekans değişiminin meydana geldiğini göstermektedir. Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 Bulanık Mantık Kontrol (BMK) yöntemlerinde, 5. saniyede sistem frekans tepkisi hızla dengelenmektedir. Bununla birlikte, Şekil 17'de görüldüğü üzere, 10. saniyede sistem frekansındaki salınımlar yükselmiş ve dengeye ulaşması yaklaşık bir saniye sürmüştür. Bu bağlamda, Tip-3 BMK'nın salınımların daha az olduğu bir denge sağladığı gözlemlenmektedir. 15. saniyede yükün 4 pu azalması nedeniyle mikro şebekede 4 pu'luk bir enerji fazlalığı oluşmuş ve bu durum, FC'nin yük olarak devreye girmesine yol açmış, sonucunda hidrojen üretilip depolanmıştır. Aynı zamanda, 15. saniyede sistem frekansındaki salınım negatif yönlü olup bir frekans düşüşü gözlenmiştir. Bu bağlamda, Tip-3 BMK yöntemi daha düşük salınım seviyelerini sağlamıştır. 20 saniyede meydana gelen 2 pu'luk yük azalışı, FC'nin tam kapasiteyle yük olarak işlemesine ve hidrojen üretimine yol açmıştır. Bu esnada, FESS enerji depolama sistemleri de toplamda 0.1 pu enerji depolamışlardır. Tüm uygulanan yöntemlerde, frekans salınımı minimum düzeyde olup sistem, nominal değer altında bir dengeye ulaşmıştır. 25. saniyede yükün 3 pu artması nedeniyle öncelikle FESS, yük artışını dengelemiştir; bu aşamada frekanslar nominal değer üzerine çıkmıştır. Tip-3 (BMK) yöntemi ise daha düşük seviyede ve daha uzun bir süre boyunca frekans dengelemesi sağlamıştır. 30. Saniyeden sonra her dört kontrol yönteminde de frekans, nominal değere ulaşarak dengeye gelmiştir.

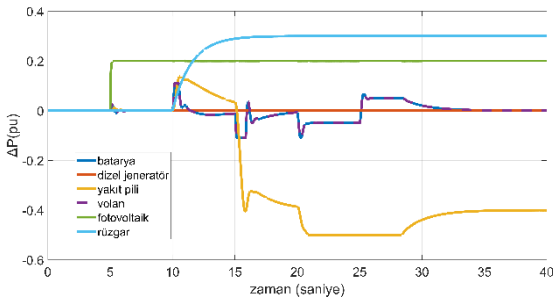


Şekil 17. Frekans değişimi

Durum 3: yakıt pili, volan ve bataryanın devrede olduğu dizel jeneratörün devreden çıkarıldığı durum

Şekil 18'de Tip-3 BMK uygulamasının DEG'in devrede olmadığı durumda mikro şebekenin güç değişimini nasıl etkilediği gösterilmektedir. Şekil 18'in analizi, 5. saniyede fotovoltaik (PV) sistemin devreye girişi ve Şekil 12'deki yük artışı durumunda, volan, batarya ve yakıt hücresi gibi enerji depolama sistemlerinin kısa bir süreliğine (0.5 saniye) devreye girdiğini gösterir. Bu hızlı değişimin sebebi, artan yüke ek olarak aynı anda PV sisteminin ışınımının artmasıdır. PV sistemdeki güç değişikliği, yük artışını dengelediği için FESS, BESS ve FC gibi enerji depolama ve dönüşüm sistemleri devre dışı kalmıştır. 10. saniyede yük 3 pu artarken

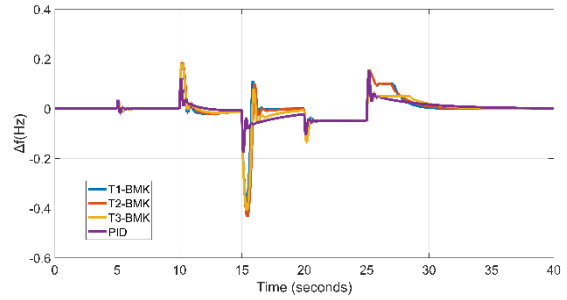
aynı zamanda rüzgâr santralının devreye girmesiyle üretim de 3 pu artmıştır. Rüzgârın dinamik yapısından kaynaklanan bu artış, 15. saniyede 3 pu seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, rüzgârın sistemdeki güç dengesini sağlamak amacıyla FESS, BESS, FC gibi enerji depolama ve dönüşüm sistemlerinin 15 saniyeye kadar devreye girmesine neden olmuştur. Rüzgâr tam olarak devreye girdiği 15. saniyede, bu sistemler tekrar devre dışı bırakılmıştır. 15. saniyede yükün 4 pu azalması sonucunda mikro şebekede 4 pu enerji fazlası oluşmuş ve bu nedenle FC yük olarak devreye girmiş, sonuç olarak hidrojen üretimini başlatmış ve depolamıştır. 20. saniyede yük 2 pu azalmasıyla FC tam kapasiteyle yük olarak çalışmış ve hidrojen üretimi gerçekleştirmiştir. Bu süreçte BESS ve FESS, 0.05 pu enerji depolamıştır. 25. saniyede yükün 3 pu artması nedeniyle öncelikle BESS ve FESS yük artışı dengelemiştir. FC ise 28. saniyede mikro şebekeye enerji üretmeye başlamış ve 32. Saniyeden sonra BESS ile FESS tekrar devre dışı kalmıştır.



Şekil 18. Tip-3 bulanık mantık kontrolünde güç değişimi

Şekil 19 'da Tip-1, Tip-2, Tip-3 BMK ve PID kontrol stratejilerinin uygulandığı senaryolarda mikro şebekenin frekans değişimleri incelenmektedir. Şekil 19'un analizi, 5. saniyede kısa süreli bir frekans değişiminin meydana geldiğini göstermektedir. Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 Bulanık Mantık Kontrol (BMK) yöntemlerinde, 5. saniyede sistem frekans tepkisi hızla dengelenmektedir. Bununla birlikte, Şekil 19'da görüldüğü üzere, 10. saniyede sistem frekansındaki salınımlar yükselmiş ve dengeye ulaşması yaklaşık bir saniye sürmüştür. Bu bağlamda, Tip-3 BMK'nın salınımların daha az olduğu bir denge sağladığı gözlemlenmektedir. 15. saniyede yükün 4 pu azalması nedeniyle mikro şebekede 4 pu'luk bir enerji fazlalığı oluşmuş ve bu durum, FC'nin yük olarak devreye girmesine yol açmış, sonucunda hidrojen üretilip depolanmıştır. Aynı zamanda, 15. saniyede sistem frekansındaki salınım negatif yönlü olup bir frekans düşüşü gözlenmiştir. Bu bağlamda, Tip-3 BMK yöntemi daha düşük salınım seviyelerini sağlamıştır. 20 saniyede meydana gelen 2 pu'luk yük azalışı, FC'nin tam kapasiteyle yük olarak işlemesine ve hidrojen üretimine yol açmıştır. Bu esnada, BESS ve FESS enerji depolama sistemleri de toplamda 0.5 pu enerji

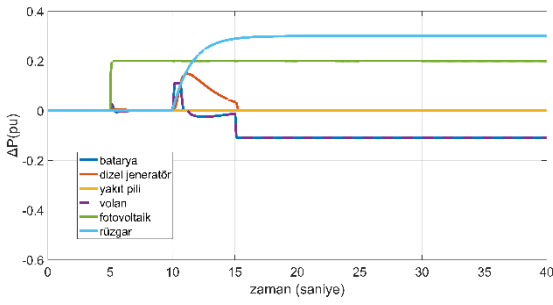
depolamışlardır. Tüm uygulanan yöntemlerde, frekans salınımı minimum düzeyde olup sistem, nominal değer altında bir dengeye ulaşmıştır. 25. saniyede yükün 3 pu artması nedeniyle öncelikle BESS ve FESS, yük artışı dengelemiştir; bu aşamada frekanslar nominal değer üzerine çıkmıştır. Tip-3 BMK yöntemi ise daha düşük seviyede bir salınım göstermiş ve daha uzun bir süre boyunca frekans dengelemesi sağlamıştır. 30. saniyede her dört kontrol yönteminde de frekans, nominal değere ulaşarak dengeye gelmiştir.



Şekil 19. Frekans değişimi

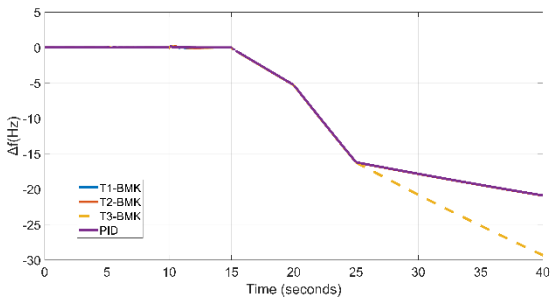
Durum 4: dizel jeneratör, volan ve bataryanın devrede olduğu yakıt pilinin devreden çıkarıldığı durum

Şekil 20'de Tip-3 BMK uygulamasının FC'nin devrede olmadığı durumda mikro şebekenin güç değişimini nasıl etkilediği gösterilmektedir. Şekil 20'in analizi, 5. saniyede fotovoltak (PV) sistemin devreye girişi ve Şekil 12'deki yük artışı durumunda, volan ve batarya gibi enerji depolama sistemlerinin kısa bir süreliğine (0,5 saniye) devreye girdiğini gösterir. Bu hızlı değişimin sebebi, artan yüke ek olarak aynı anda PV sisteminin ışınımının artmasıdır. PV sistemdeki güç değişikliği, yük artışı dengelediği için FESS ve BESS gibi enerji depolama sistemleri devre dışı kalmıştır. 10 saniyede yük 3 pu artmıştır. Aynı zamanda rüzgâr santralının devreye girmesiyle üretim de 3 pu artmıştır. Rüzgârın dinamik yapısından kaynaklanan bu artış, 15. saniyede 3 pu seviyesine ulaşmıştır. Bunun sonucunda rüzgârın sistemdeki güç dengesini sağlayana kadar FESS, DEG ve BESS devreye girmiştir. Rüzgâr tam devreye girdiği 15. den itibaren BESS ve FESS 0.1 pu depolama yapmıştır. Bu noktadan sonra yükün azalması veya yapılan üretim sistem davranışında herhangi bir değişime neden olmamakla beraber arz-talep dengesi sağlanamamıştır.



Şekil 20. Tip-3 bulanık mantık kontrolünde güç değişimi

Şekil 21 'de Tip-1, Tip-2, Tip-3 BMK ve PID kontrol stratejilerinin uygulandığı senaryolarda mikro şebekenin frekans değişimleri incelenmektedir. Şekil 21'in analizi 15. Saniye ye kadar frekans sabit görünmektedir. Bunun nedeni yükün azalıp artması veya yapılan üretim sistem davranışında herhangi bir değişime neden olmaması ve arz-talep dengesi sağlanamamasıdır. Sistem senkronizasyonu sağlanamayıp frekansta çökme meydana gelmiştir.

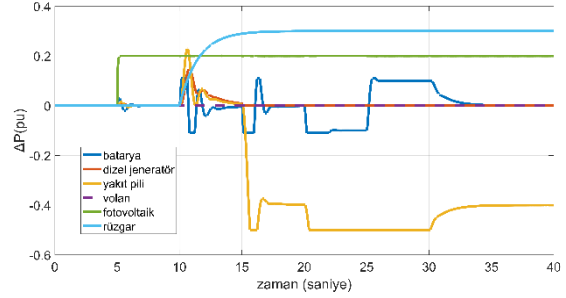


Şekil 21. Frekans değişimi

Durum 5: dizel jeneratör, batarya ve yakıt pilinin devrede olduğu volanın devreden çıkarıldığı durum

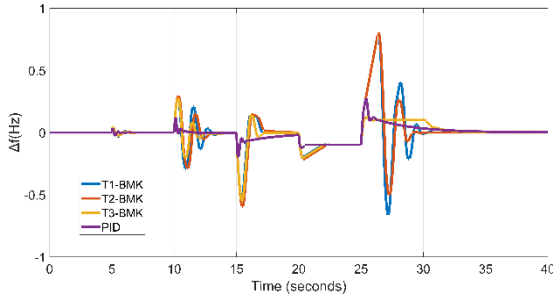
Şekil 22'de Tip-3 BMK uygulamasının FESS'in devrede olmadığı durumda mikro şebekenin güç değişimini nasıl etkilediği gösterilmektedir. Şekil 22'nin analizi, 5. saniyede fotovoltaik (PV) sistemin devreye girişi ve Şekil 12'deki yük artışı durumunda, volan ve yakıt hücresi gibi enerji depolama sistemlerinin kısa bir süreliğine (0,5 saniye) devreye girdiğini gösterir. Bu hızlı değişimin sebebi, artan yüke ek olarak aynı anda PV sisteminin ışınımının artmasıdır. PV sistemdeki güç değişikliği, yük artışını dengelediği için BESS ve FC gibi enerji depolama ve dönüşüm sistemleri devre dışı kalmıştır. 10. saniyede yük 3 pu artarken aynı zamanda rüzgâr santralının devreye girmesiyle üretim de 3 pu artmıştır. Rüzgârın dinamik yapısından kaynaklanan bu artış, 15. saniyede 3 pu seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, rüzgârın sistemdeki güç dengesini sağlamak amacıyla BESS, FC ve DEG gibi enerji depolama ve dönüşüm sistemlerinin 15 saniyeye kadar devreye girmesine neden olmuştur. Rüzgâr tam olarak devreye girdiği 15. saniyede, bu sistemler tekrar devre dışı bırakılmıştır. 15. saniyede yükün 4 pu azalması sonucunda mikro şebekede 4 pu enerji fazlası oluşmuş ve bu

nedenle FC yük olarak devreye girmiş, sonuç olarak hidrojen üretimini başlatmış ve depolamıştır. 20. saniyede yük 2 pu azalmasıyla FC tam kapasiteyle yük olarak çalışmış ve hidrojen üretimi gerçekleştirmiştir. Bu süreçte BESS, 0.1 pu enerji depolamıştır. 25. saniyede yükün 3 pu artması nedeniyle öncelikle BESS yük artışı dengelemiştir. FC ise 30. saniyede mikro şebekeye enerji üretmeye başlamış ve BESS tekrar devre dışı kalmıştır.



Şekil 22. Tip-3 bulanık mantık kontrolünde güç değişimi

Şekil 23 'te Tip-1, Tip-2, Tip-3 BMK ve PID kontrol stratejilerinin uygulandığı senaryolarda mikro şebekenin frekans değişimleri incelenmektedir. Şekil 23'ün analizi, 5. saniyede kısa süreli bir frekans değişiminin meydana geldiğini göstermektedir. Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 Bulanık Mantık Kontrol (BMK) yöntemlerinde, 5. saniyede sistem frekans tepkisi hızla dengelenmektedir. Bununla birlikte, Şekil 23'te görüldüğü üzere, 10. saniyede sistem frekansındaki salınımlar yükselmiş ve dengeye ulaşması yaklaşık bir saniye sürmüştür. Bu bağlamda, Tip-3 BMK'nın salınımların daha az olduğu bir denge sağladığı gözlemlenmektedir. 15. saniyede yükün 4 pu azalması nedeniyle mikro şebekede 4 pu'luk bir enerji fazlalığı oluşmuş ve bu durum, FC'nin yük olarak devreye girmesine yol açmış, sonucunda hidrojen üretilip depolanmıştır. Aynı zamanda, 15. saniyede sistem frekansındaki salınım negatif yönlü olup bir frekans düşüşü gözlenmiştir. Bu bağlamda, Tip-3 BMK yöntemi daha düşük salınım seviyelerini sağlamıştır. 20 saniyede meydana gelen 2 pu'luk yük azalışı, FC'nin tam kapasiteyle yük olarak işlemesine ve hidrojen üretimine yol açmıştır. Bu esnada, BESS enerji depolama sistemleri de toplamda 0.1 pu enerji depolamışlardır. Tüm uygulanan yöntemlerde, frekans salınımı minimum düzeyde olup sistem, nominal değer altında bir dengeye ulaşmıştır. 25. saniyede yükün 3 pu artması nedeniyle öncelikle BESS, yük artışını dengelemiştir; bu aşamada frekanslar nominal değer üzerine çıkmıştır. Tip-3 (BMK) yöntemi ise daha düşük seviyede ve daha uzun bir süre boyunca frekans dengelemesi sağlamıştır. 30. Saniyeden sonra her dört kontrol yönteminde de frekans, nominal değere ulaşarak dengeye gelmiştir.



Şekil 23. Frekans değişimi

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, şebekeden bağımsız hibrit mikro şebekeler için Tip-3 BMK tabanlı bir frekans regülasyon yöntemi önerilmiştir. Zaman içinde değişen dinamik faktörler, farklı enerji sistemlerinin güç değişimleri ve güneş ışınımı, rüzgâr hızı gibi etkiler ile frekans regülasyonunun sistem performansına etkileri bu çalışmada değerlendirilmiştir. Ayrıca yük değişimleri de dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, rüzgâr hızı ve güneş ışınımındaki değişimlerin sistem frekansına olan etkileri T1-BMK, T2-BMK, T3-BMK ve PID denetleyici sistemleri kullanılarak incelenmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, PID, Tip-1 bulanık mantık kontrol ve tip-2 bulanık mantık kontrol ile karşılaştırıldığında önerilen yaklaşımın genel performans ve doğruluk açısından üstün olduğu tespit edilmiştir. Önerilen denetim sistemi, güneş ve rüzgâr güç değişiklikleri ile yük dalgalanmalarına karşı etkili bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca, önerilen yaklaşımın frekans regülasyonundaki salınımların diğer denetleyicilere kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Stabilité süresi açısından yapılan incelemeler, önerilen yaklaşımın diğer tekniklere göre daha hızlı bir şekilde dengeye ulaştığını göstermektedir. Bu çalışma, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının arttığı günümüzde mikro şebekelerin frekans regülasyonu ihtiyacına yönelik bir öneri sunmaktadır. İlerleyen çalışmalarda, sabit yük, ışınım ve rüzgâr hızı yerine stokastik değişimleri göz önünde bulunduran ve gerçek dünya koşullarına daha yakın senaryolar içeren analizlerin yapılması önerilmektedir. Bu sayede kontrol stratejilerinin daha gerçekçi ve genelleyici bir perspektifle değerlendirilmesi mümkün olacaktır.

Kaynaklar

[1] Razmjoo, A., Kaigutha, L. G., Rad, M. V., Marzband, M., Davarpanah, A., & Denai, M. (2021). A Technical analysis investigating energy sustainability utilizing reliable renewable energy sources to reduce CO₂ emissions in a high potential area. *Renewable Energy*, 164, 46-57.

[2] Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and sustainable energy reviews*, 39, 748-764.

[3] Karunathilake, H., Perera, P., Ruparathna, R., Hewage, K., & Sadiq, R. (2018). Renewable energy integration into community energy systems: A case study of new urban residential development. *Journal of Cleaner Production*, 173, 292-307.

[4] Anwar, A., Siddique, M., Dogan, E., & Sharif, A. (2021). The moderating role of renewable and non-renewable energy in environment-income nexus for ASEAN countries: Evidence from Method of Moments Quantile Regression. *Renewable Energy*, 164, 956-967.

[5] Holzleitner, M., Moser, S., & Puschnigg, S. (2020). Evaluation of the impact of the new Renewable Energy Directive 2018/2001 on third-party access to district heating networks to enforce the feed-in of industrial waste heat. *Utilities Policy*, 66, 101088.

[6] Hatziargyriou, Nikos, ed. *Microgrids: architectures and control*. John Wiley & Sons, 2014.

[7] Mondal A, Illindala MS. Improved frequency regulation in an islanded mixed source microgrid through coordinated operation of DERs and smart loads. *IEEE Trans Ind Appl*. 2018;54:112–120.

[8] Shahzad, S., Abbasi, M. A., Ali, H., Iqbal, M., Munir, R., & Kilic, H. (2023). Possibilities, Challenges, and Future Opportunities of Microgrids: A Review. *Sustainability*, 15(8), 6366.

[9] R. Majumder, "MODELING, STABILITY ANALYSIS AND CONTROL OF MICROGRID," Doctor of Philosophy Dissertation, Faculty of Build and Environment Engineering, Queensland University of Technology, Queensland, Australia, 2010.

[10] Gulzar, M. M., Iqbal, M., Shahzad, S., Muqet, H. A., Shahzad, M., & Hussain, M. M. (2022). Load frequency control (LFC) strategies in renewable energy-based hybrid power systems: A review. *Energies*, 15(10), 3488.

[11] Pepermans, Guido, et al. "Distributed generation: definition, benefits and issues." *Energy policy* 33.6 (2005): 787-798.

[12] Zhao H, Hong M, Lin W, et al. Voltage and frequency regulation of microgrid with battery energy storage systems. *IEEE Trans Smart Grid*. 2017;99:1–12

[13] Mondal A, Illindala MS. Improved frequency regulation in an islanded mixed source microgrid through coordinated operation of DERs and smart loads. *IEEE Trans Ind Appl*. 2018;54:112–120.

[14] Zhao J, Lyu X, Fu Y, et al. Coordinated frequency regulation strategy of wind/photovoltaic/diesel microgrid based on DFIG variable coefficient combined virtual inertia and primary frequency control. *IEEE Trans Energy Conver*. 2016;8969:1–1.

[18] V. A. K. Pappu, B. H. Chowdhury, and R. Bhatt, "Implementing frequency regulation capability in a solar photovoltaic power plant," in *North American Power Symposium (NAPS)*, 2010, 2010, pp. 1-6.

[19] R. Majumder, "MODELING, STABILITY ANALYSIS AND CONTROL OF MICROGRID," Doctor of Philosophy

Dissertation, Faculty of Build and Environment Engineering, Queensland University of Technology, Queensland, Australia, 2010.

[15] Moghadam, Mohammad R. Vedady, Richard TB Ma, and Rui Zhang. "Distributed frequency control in smart grids via randomized demand response." *IEEE Transactions on Smart Grid* 5.6 (2014): 2798-2809.

[16] Lekshmi, R. R., et al. "Frequency based demand management system in residential context." *Bonfring Internation Journal of Industrial Engineering and Management Science* 4.2 (2014): 57-61.

[22] Rafiee, A., Batmani, Y., Ahmadi, F., & Bevrani, H. (2021). Robust load-frequency control in islanded microgrids: Virtual synchronous generator concept and quantitative feedback theory. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(6), 5408-5416.

[17] Díaz-González, F., Hau, M., Sumper, A., & Gomis-Bellmunt, O. (2015). Coordinated operation of wind turbines and flywheel storage for primary frequency control support. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 68, 313-326.

[18] Gong, K., Lenz, E., & Konigorski, U. (2015, June). Decentralized frequency control of a DDG-PV microgrid in islanded mode. In *2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)* (pp. 292-297). IEEE.

[19] Kiliç, H., Khaki, B., Gumuş, B., Yilmaz, M., & Asker, M. E. (2018, November). Stability analysis of islanded microgrid with EVs. In *2018 Smart Grid Conference (SGC)* (pp. 1-5). IEEE.

[20] Yildirim, B. (2021). Advanced controller design based on gain and phase margin for microgrid containing PV/WTG/Fuel cell/Electrolyzer/BESS. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(30), 16481-16493.

[21] Gholami S, Saha S, Aldeen M. Fault tolerant control of electronically coupled distributed energy resources in microgrid systems. *Int J Electrical Power Energy Syst.* 2018;95:327–340.

[22] Pradhan C, Bhende CN, Samanta AK. Adaptive virtual inertia-based frequency regulation in wind power systems. *Renewable Energy.* 2018;115:558–574

[23] Sanjari MJ, Gharehpetian GB. Small signal stability based fuzzy potential function proposal for secondary frequency and voltage control of islanded microgrid. *Electr Power Compon Sys.* 2013;41:485–499.

[24] Keshtkar, H., Mohammadi, F. D., Ghorbani, J., Solanki, J., & Feliachi, A. (2014, May). Proposing an improved optimal LQR controller for frequency regulation of a smart microgrid in case of cyber intrusions. In *2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)* (pp. 1-6). IEEE.

[25] Khooban, M. H., Niknam, T., Blaabjerg, F., Davari, P., & Dragicevic, T. (2016). A robust adaptive load frequency control for micro-grids. *ISA transactions*, 65, 220-229.

[26] Zhang, J., Gao, Y., Yu, P., Li, B., Yang, Y., Shi, Y., & Zhao, L. (2018). Coordination control of multiple micro sources in islanded microgrid based on differential games

theory. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 97, 11-16.

[27] Sedighzadeh, M., Esmaili, M., & Eisapour-Moarref, A. (2017). Voltage and frequency regulation in autonomous microgrids using Hybrid Big Bang-Big Crunch algorithm. *Applied Soft Computing*, 52, 176-189.

[28] Khooban, M. H., Dragicevic, T., Blaabjerg, F., & Delimar, M. (2017). Shipboard microgrids: A novel approach to load frequency control. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(2), 843-852.

[29] Khokhar, B., Dahiya, S., & Parmar, K. S. (2021). Load frequency control of a microgrid employing a 2D Sine Logistic map based chaotic sine cosine algorithm. *Applied Soft Computing*, 109, 107564.

[30] Abazari, A., Monsef, H., & Wu, B. (2019). Coordination strategies of distributed energy resources including FESS, DEG, FC and WTG in load frequency control (LFC) scheme of hybrid isolated micro-grid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 109, 535-547.

[31] Yildirim, B., Razmi, P., Fathollahi, A., Gheisarnejad, M., & Khooban, M. H. (2023). Neuromorphic deep learning frequency regulation in stand-alone microgrids. *Applied Soft Computing*, 144, 110418.

[32] YILDIRIM, B. (2021). Bir Mikro Şebekenin Yük Frekans Kontrolü için Tamsayı Derece Yaklaşımli Kesir Dereceli PID Kontrolörün Optimizasyonu. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 12(1), 79-87.

[33] Yildirim, B., Gheisarnejad, M., & Khooban, M. H. (2021). A robust non-integer controller design for load frequency control in modern marine power grids. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 6(4), 852-866.

[34] Yıldız, S., Gunduz, H., Yildirim, B., & Özdemir, M. T. (2022). An islanded microgrid energy system with an innovative frequency controller integrating hydrogen-fuel cell. *Fuel*, 326, 125005.

[35] Kiliç, Heybet, et al. "A Robust Data-Driven Approach for Fault Detection in Photovoltaic Arrays." *Proceedings of the 10th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, ISGT-Europe* (2020).

[36] Heidary, J., Gheisarnejad, M., Rastegar, H., & Khooban, M. H. (2022). Survey on microgrids frequency regulation: Modeling and control systems. *Electric Power Systems Research*, 213, 108719.

[37] Fan, W., Mohammadzadeh, A., Kausar, N., Pamucar, D., & Id, N. A. D. (2022). A New Type-3 Fuzzy PID for Energy Management in Microgrids. *Advances in Mathematical Physics*, 2022.

[38] Shakibjoo, A. D., Moradzadeh, M., Din, S. U., Mohammadzadeh, A., Mosavi, A. H., & Vandeveld, L. (2021). Optimized type-2 fuzzy frequency control for multi-area power systems. *IEEE access*, 10, 6989-7002.