

Tip-3 Bulanık Mantık ile Düşüş Kontrollü İnverter Tabanlı Mikro Şebekelerin İkincil Gerilim ve Frekans Restorasyon Kontrolü

Muhammed Serhat DÜZDAĞ^{1*}, Heybet KILIÇ², Cem HAYDAROĞLU³

¹ Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye

² Elektrik ve Enerji Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye

³ Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye

*¹ sduzdag@hotmail.com, ² heybet.kilic@dicle.edu.tr, ³ cem.haydaroglu@dicle.edu.tr

(Geliş/Received: 09/11/2023;

Kabul/Accepted: 05/02/2024)

Öz: Geleneksel enerji kaynaklarının çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik sorunları, enerji sektörünü bir takım değişimlere zorlamaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle güneş, rüzgar ve hidroelektrik gibi doğal kaynaklardan elde edilen enerji, giderek artan bir öneme sahiptir. Bu kaynaklar, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji üretimi sağlayarak, geleneksel enerji kaynaklarının dezavantajlarını aşma potansiyeli taşımaktadır. Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılabilmesi için, enerji sektöründeki değişken dinamiklere odaklanmak gerekmektedir. Bu dinamikler arasında, geleneksel enerji kaynaklarının çevre dostu olmayan yapısı, enerji güvenliği ve çevresel düzen gibi konular bulunmaktadır. Bu noktada, mikro şebekeler devreye girmekte ve enerji üretimi, depolama ve tüketimi entegre eden bir yapı sunmaktadır. Mikro şebekeler, yerel enerji üretiminin artırılması ve enerji verimliliğinin artırılması gibi avantajlar sağlamakla birlikte, beraberinde bir takım dezavantajları da getirmektedir. Bu bağlamda, makale, mikro şebekelerin temel bir bileşeni olan gerilim ve frekans kontrolünü detaylı bir şekilde ele alarak, bu konunun mikro şebekelerin istikrarlı çalışması için kritik önemini vurgulamaktadır. Mikro şebekelerde gerilim ve frekans kontrolünün iyileştirilmesi için tip-3 bulanık kontrol (T3-BMK) yöntemi öne çıkmaktadır. T3-BMK, özellikle çok dağıtık üretim sahip mikro şebekelerde etkili bir kontrol yapısı sunarak paralel çalışma olanağı tanımaktadır. Bu makale, mikro şebekelerin enerji sektöründeki rolünü derinlemesine anlamak ve sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlamak adına önemli bir kaynak olarak öne çıkmaktadır.

Anahtar kelimeler: Tip-3 Bulanık Mantık Kontrol, Mikro Şebekeler, Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Geleneksel Enerji Kaynakları, Gerilim ve Frekans Kontrolü

Type-3 Fuzzy Based Secondary Voltage and Frequency Restoration Control of Inverter Based Microgrids with Droop Control

Abstract: The environmental impacts and sustainability problems of traditional energy sources force the energy sector to make some changes. In this context, renewable energy sources, especially energy obtained from natural sources such as solar, wind and hydroelectricity, are of increasing importance. These resources have the potential to overcome the disadvantages of traditional energy sources by providing environmentally friendly and sustainable energy production. However, in order to use renewable energy resources effectively, it is necessary to focus on the changing dynamics in the energy sector. These dynamics include issues such as the environmentally unfriendly nature of traditional energy sources, energy security and environmental order. At this point, microgrids come into play and offer a structure that integrates energy production, storage and consumption. Although microgrids provide advantages such as increasing local energy production and increasing energy efficiency, they also bring some disadvantages. In this context, the article discusses in detail voltage and frequency control, a fundamental component of microgrids, emphasizing the critical importance of this issue for the stable operation of microgrids. Type-3 fuzzy control (T3-FLC) method stands out for improving voltage and frequency control in microgrids. T3-FLC provides parallel operation by providing an effective control structure, especially in microgrids with highly distributed generation. This article stands out as an important resource to deeply understand the role of microgrids in the energy sector and contribute to sustainable energy production.

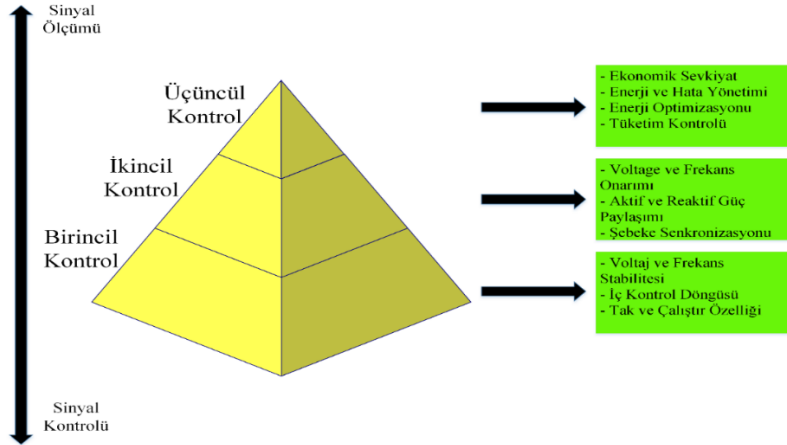
Key words: Type-3 Fuzzy Logic Control, Microgrids, Renewable Energy Sources, Conventional Energy Sources, Control of Voltage and Frequency

1. Giriş

Günümüzde geleneksel enerji kaynakları yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak doğaya çok fazla sera gazı salması nedeniyle küresel ısınma ve daha birçok probleme neden olmaktadır. Son zamanlarda bu problemleri azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim ciddi oranda artış göstermektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları

* Sorumlu yazar: serhatduzdag@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0009-0006-9892-3242, ² 0000-0002-6119-0886, ³ 0000-0003-0830-5530

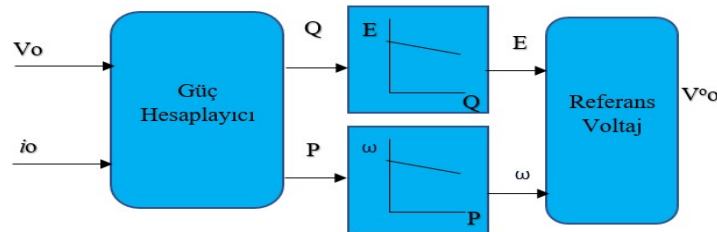
şebekeye dahil olduktan sonra hayatımıza mikro şebeke kavramında girmeye başlamıştır [1]. Enerji üretimi ve dağıtımını için tek bir merkeze ihtiyaç duymaması mikro şebekenin ev büyük avantajlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Mikro şebekelerin en büyük dezavantajı olarak ta, yenilenebilir enerji kaynakları doğa şartlarına bağlı değişkenlik gösterebildiğinden mikro şebekelerde üretilen enerji değerlerinde sık bir şekilde dalgalanmalar meydana gelebilmekte ve bu dalgalanmaların giderilememesi durumunda enerji kesintileri baş gösterebilmesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Mikro şebekelerin bu tip dezavantajlarından dolayı mikro şebekelerde hiyerarşik kontrol son derece önemlidir. Çünkü hiyerarşik kontrol sağlanırsa gerilim ve frekans kontrolü sağlanır ve enerji değerindeki dalgalanmalar giderilerek enerji sürekliliği sağlanır. Hiyerarşik kontrol üç basamaktan meydana gelmektedir. Bunlar primary (birincil) kontrol, secondary (ikincil) kontrol ve tertiary (üçüncül) kontrol basamaklarıdır [2]. Şekil 1’de Hiyerarşik kontrol katmanları gösterilmiştir.



Şekil 1. Hiyerarşik kontrol katmanları

1.1 Birincil kontrol

Birincil kontrol seviyesinin amacı, dağıtık enerji kaynaklarında önemli noktaların belirlenmesidir. Bu noktalar gerilim ve akım kontrol döngüleri için son derece önem arz etmektedir. İç kontrol döngülerinde sıfır noktası genel olarak referans olarak kabul edilir. Birincil seviye kontrolünün kullanıldığı alanlar PQ veya voltaj kontrol alanlarıdır. Birincil kontrol seviyesinin temel hedefleri, mikro şebekelerdeki gerilim ve frekans dengelemesini sağlamak, dağıtık enerji kaynakları (DEK) arasında kesintisiz iletişim aracılığıyla aktif ve reaktif güç paylaşımını gerçekleştirmek ve aşırı akım olaylarına müdahale ederek güç elektroniği cihazlarının sağlıklı çalışmasını temin etmektir. DEK'lerde, aktif ve reaktif güç paylaşımı PQ kontrol modunda önceden belirlenmiş referans değerlere dayanmaktadır. Gerilim kontrol modunda ise DEK, bir voltaj kontrolörü olarak işlev görmektedir. Bu görevi de birincil kontrolörün, referans geriliminin düşüş karakteristikleriyle belirlediği sınırlar içerisinde gerçekleştirmektedir [3]. Şekil 2’de voltaj kontrol modunda referans voltaj tayini gösterilmiştir.



Şekil 2. Voltaj kontrol modunda referans voltaj tayini[3]

Tablo-1’de birincil kontrol seviyesine ait hiyerarşik kontrol yöntemlerinin bir takım avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir.

Tablo1. Birincil yöntemlerin avantajları ve dezavantajları

Kaynakça	Yıl	Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
[4]	2020	Düşüş Kontrol Teknikleri	-Uygulanabilirliği oldukça basit ve kolaydır. - Şebeke bağlı ya da şebekeden bağımsız çalışması mümkündür.	Gerilim ve frekansta sapmalara yol açar.
[5]	2023	V/f Kontrolü	Meydana gelebilecek frekans ve gerilim sapmalarının önüne geçer.	Şebeke bağlı moda çalışması mümkün değildir.
[6]	2020	Açma-Kapama Kontrolü	Hızlı yanıt vermesine karşın oldukça düşük maliyetlidir.	Histerizis etkisine maruz kalabilir bu durumda dalgalanmalar meydana gelebilir.
[7]	2021	Faz Kilitli Döngü Kontrolü	Frekans kontrolünde son derece hassas bir yapıya sahiptir.	Yapısı oldukça karmaşıktır ve maliyeti oldukça fazladır.
[8]	2021	Empedans Kontrolü	Yükte meydana gelebilecek herhangi bir etkinin önüne geçilir ve stabilize devamı sağlanır.	İyi düzeyde ayarlama ve kalibrasyon durumu gerekebilir.
[9]	2020	Zaman Tabanlı Kontrol	Belli süre çerçevesinde sistemin hiçbir sapma meydana gelmeden çalışmasını sağlar.	Bazı anlık dalgalanmalar meydana geldiğinde hassaslığı bu durumu algılamaya yetmeyebilir.
[10]	2021	Eşik Kontrolü	Anlık dalgalanmalara karşı hassasiyeti son derece yüksektir.	Eşik değeri çok büyük bir titizlikle doğru ayarlanmalıdır.

1.2 İkincil kontrol

Birincil kontrolde, frekans değerlerinde sapmalar, kontrol sabit durumda olsa bile meydana gelme ihtimali yüksektir [11]. Merkezi kontrol içerisinde ikincil kontrol son derece önemli bir rol üstlenmektedir. Sapma meydana geldiği zaman frekans ve gerilim değerini yeniden yükler ve birincil kontrol nedeniyle meydana gelen dalgalanmaları giderebilir. Bu kontrol hiyerarşisi, birincil kontrol hiyerarşisinden daha yavaş dinamik tepkiye sahiptir. Bir mikro şebekenin açılma frekansının referans değeri ω_{ref} ve terminal gerilim değerinin referans değeri E_{ref} şeklindedir. Bu mikro şebekede ortaya çıkan hata sinyalleri sırasıyla X_{ω} ve X_E şeklindedir. Ortaya çıkan bu hatalar birincil kontrolöre gönderilerek giderilir [12]. Denklem 1 ve Denklem 2'de meydana gelen bu hata sapmalarının eşitlikleri verilmiştir.

$$X_{\omega} = L_{P\omega}(\omega_{ref} - \omega) + L_{I\omega} \int (\omega_{ref} - \omega) dt + \Delta_{\omega s} \quad (1)$$

$$X_E = L_{PE}(Y_{ref} - Y) + L_{IE} \int (Y_{ref} - Y) dt \quad (2)$$

Tablo 2'de ikincil kontrol seviyesine ait hiyerarşik kontrol yöntemlerinin bir takım avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir.

Tablo 2. İkincil yöntemlerin avantajları ve dezavantajları

Kaynakça	Yıl	Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
[13]	2021	Aktif-Reaktif Güç Kontrolü	Meydana gelebilecek frekans ve gerilim sapmalarının önüne geçer.	Aktif ve reaktif güç açısından paylaşım mümkün değildir.
[14]	2020	Orantılı İntegral Kontrolü	İstenen gerilim ve frekans değerlerine çok yakın bir değer mümkün kılar.	Sistem parametreleri sürekli ayarlanmalıdır.
[15]	2020	Orantılı İntegral-Türev Kontrolü	Sistem dinamiğini en iyi modda tutar.	Bu yöntemde oran integral kontrolünün dezavantajları mevcuttur.
[16]	2021	Geri Bildirim Kontrolü	Geri bildirim özelliği aracılığıyla meydana gelen tüm sapmaları tespit eder ve sapmalar giderilir.	Geri bildirim mekanizmaların ayarlarında en ufak bir kusur dahi bulunmamalıdır.
[17]	2022	Merkezi Kontrol	Tek bir merkez tarafında kaynaklar yönetilir.	Tek bir merkeze bağlı olduğundan merkezdeki sorun sistemi etkiler.
[18]	2021	Merkezi Olmayan Kontrol	Tek bir merkez bulunmaz. Yani sistem elemanları bağımsız çalışır.	Elemanlar bağımsız çalıştığı için sistem bileşenleri arasındaki uyum oldukça güçtür.

1.3 Üçüncül kontrol

Üçüncül kontrol tekniği, elektrik enerjisinin yenilenebilir enerji kaynaklarından üretildiği durumlarda yaygın olarak kullanılır ve her türlü talebi karşılayabilecek güçtedir. Bu tür durumlarda iki yöntemin kullanılması söz konusu olabilir. Bunların ilki, fazla gücün yüksek ataletli bir doğru akım (DA) sistemine gönderilmesidir, diğer bir yöntem ise fazla miktardaki gücün invertör sayesinde alternatif akım (AA) şebekesine gönderilmesidir [19]. Mikro şebekelerde güç, gerekli talep seviyesinin altında bir seviyede üretilirse eksik kalan miktar yüksek ataletli bir DA sistem veya AA sistem tarafından karşılanır. Üçüncül kontrolün seviyesinin temel amacı mikro şebekede o an bulunan frekans değerini en uygun değere olabildiğince yaklaştırma görevini üstlenir. Bunu da iki güç şebekesi arasındaki güç değerinin referans değerle kıyaslamasını yaparak gerçekleştirir. Üçüncül kontrol, mikro şebekenin en ideal düzeyde çalışmasını sağlamak amacıyla gereken ekonomik kriterleri göz önünde bulundurur. Aynı zamanda mikro şebeke ile ana şebeke arasındaki güç sirkülasyonunu sağlar. Aşağıdaki eşitliklerde sırasıyla açılal frekans değerinin referans değeri ve voltaj frekans değerlerinin denklemleri verilmiştir. Bu denklemlerin çözümlenmesi için ilk olarak aktif ve reaktif çıktı güçler (C_T ve D_T) ölçülür. Sonrasında bu değerler, referans değerler ($(C_T)^{ref}$ ve $(D_T)^{ref}$) esasları çerçevesinde açılal frekans değeri ve voltaj değerini elde etmek amacıyla kullanılır. Bu değerler ω^{ref} ve N^{ref} ile sembolize edilir [20]. Denklem 3 ve Denklem 4'te sırasıyla bu değerlerin eşitlikleri verilmiştir.

$$\omega^{ref} = K_{CC} ((C_T)^{ref} - C_T) + K_{IC} \int ((C_T)^{ref} - C_T) dt \quad (3)$$

$$N^{ref} = K_{CD} ((D_T)^{ref} - D_T) + K_{ID} \int ((D_T)^{ref} - D_T) dt \quad (4)$$

Tablo 3'de üçüncül kontrol seviyesine ait hiyerarşik kontrol yöntemlerinin bir takım avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir.

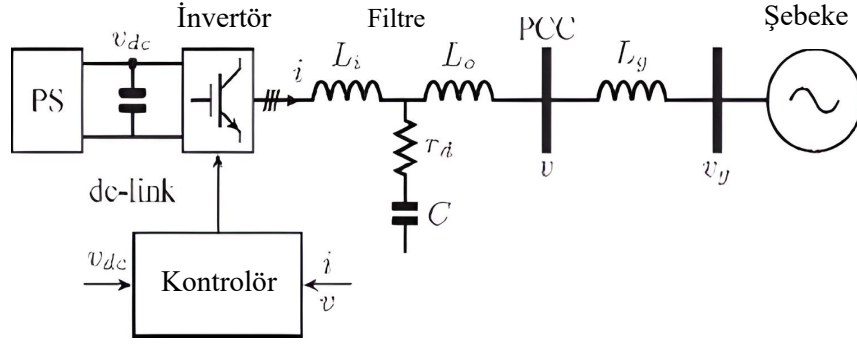
Tablo 3. Üçüncül yöntemlerin avantajları ve dezavantajları

Kaynakça	Yıl	Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
[21]	2021	Yapay Sinir Ağları	Sistem performansına katkıda bulunmasının yanı sıra karmaşık sistemleri modelleme konusunda da katkı sağlar.	Hesaplaması maliyetli olabilir
[22]	2022	Genetik Algoritmalar	Sistemde var olan sınırlara göre işlevini gerçekleştirir.	Yakınsama olayı erken gerçekleşebilir.
[23]	2020	Parçacık Sürü Optimizasyonu	Sistem performansını en ideal kıvama getirebilir.	Denetleyicinin tasarımında zorluklar yaşanabilir.
[24]	2021	Karınca kolonisi optimizasyonu	Kullanım esnekliği sunmasının yanı sıra kompleks sorunları çözme konusunda da yeteneklidir.	Kompleks problemler için parametre belirlemek oldukça zordur.
[25]	2021	Yapay Bağışıklık Sistemi	Birçok parametre ve probleme karşı adapte olma özelliği sayesinde birçok probleme çözüm bulabilir.	Yapısı gereği modellemesi oldukça zordur.
[26]	2023	Yapay Arı Kolonisi Algoritması	Optimum fonksiyonuna bağlı bir şekilde çeşitli problemler için kullanılabilir.	Mekanizmasının yapısı nedeniyle kesin bir çözüm sunamaz.
[27]	2023	Diferansiyel Evrim	Algoritmasının güçlü olması nedeniyle uygulanabilirliği yüksektir. Aynı zamanda parametrelerin düzenlenmesi son derece kolaydır.	Değişik ve zorlu problemlerde çalışma hızı oldukça düşük olabilmektedir.

Bu makalede önerilen yöntem T3-BMK tabanlı gerilim ve frekans kontrolü yöntemidir. Geleneksel tip-1 bulanık mantık kontrol sistemleri, belirli bir çıkışa karşılık gelen kesin kurallar içermekte ve bu kurallar genellikle belirli çalışma koşullarına dayanmaktadır. Tip-2 bulanık mantık kontrolü, daha karmaşık koşulları ele alabilir, ancak T3-BMK, sistem içindeki belirsizlik seviyelerini daha geniş bir perspektiften ele alarak, mikro şebeke sistemlerindeki gerilim ve frekans kontrolü için daha yüksek bir derecede esneklik sağlar. T3-BMK, mikro şebeke sistemlerindeki dinamik ve ani değişikliklere hızlı bir şekilde uyum sağlayabilir. Bu makalede düşüş kontrollü inverter tabanlı mikro şebekelerin tip-3 bulanık tabanlı ikincil gerilim ve frekans restorasyon kontrolü yapılmıştır. Bunun için öncelikle İki dağıtık üreteç ve yükün bulunduğu ada modu durumu ve Tek dağıtık üreteçli şebekeye bağlı sistem Matlab/Simulink modellenmiştir. T3-BMK ile farklı durumlar için gerilim ve frekans kontrolü yapılmıştır [28].

2. Mikro Şebekeler

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının popüler hale gelmesiyle birlikte mikro şebekelerde gün geçtikçe önem kazanmaya başlamıştır. Bu makalede, gerilim ve frekans kontrolünü sağlamak amacıyla T3-BMK yöntemi üzerinde duracağız. P-Q kontrolü gerilim ve frekans kontrolü yöntemlerinin geleneksel kontrol yöntemleri arasındadır. T3-BMK yaklaşımıyla P-Q kontrol yönteminin hassasiyetinin daha da artırılması amaçlanmaktadır. Matlab/Simulinkte oluşturulan iki dağıtık üreteç ve yükün bulunduğu ada modu, tek dağıtık üreteç ve yükün bulunduğu ada modu, tek dağıtık üreteçli şebekeye bağlı mikro şebekenin, P-Q kontrolünde aktif güç (P), reaktif güç (Q), faz açısı (ph), frekans (f) ve farklı fazlardaki gerilim değerlerinin nasıl değişiklik gösterdiğini derinlemesine analiz edeceğiz. Bu değişiklikleri dört farklı durumda inceleyeceğiz. Şekil 3'te yöntemi test etmek amacıyla kullanılan devre verilmiştir [29].



Şekil 3. Kontrol devresi

3. Bulanık Mantık Tabanlı Kontrolör Yapısı

Günümüzde geleneksel enerji kaynaklarının doğaya saldıkları sera gazı nedeniyle çevresel kirlilik ciddi derecede ilerleme kaydetmiştir. Çevre kirliliği ve küresel ısınma kaynaklı sorunları gidermek amacıyla karbon emisyonunu azaltmak için yenilenebilir enerji kaynakları tek çözüm haline gelmiştir [30]. Dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı arttıkça mikro şebekelerde popüler hale gelmeye başlamıştır. Geleneksel enerji kaynaklarının çabuk tükenmesine karşın yenilenebilir enerji kaynakları uzun vadeli kullanılabilirdiği için enerji sürekliliği sağlanır. Yenilenebilir enerji kaynakları doğal olduğu için doğa şartlarına bağlı olarak sık sık değişimler meydana gelmektedir. Bu durum neticesinde mikro şebekelerde üretilen enerji değerlerinde sık bir şekilde dalgalanmalar meydana gelmektedir. Meydana gelen dalgalanmalar elektrik enerjisinde sağlıklı olmayan bir durum teşkil etmektedir. Bu nedenle mikro şebekelerde gerilim-frekans kontrolü son derece önemlidir. Bu kontrolü sağlamak amacıyla literatürde çalışılan yöntemlerden bazıları bulanık mantık yöntemine dayalı yöntemlerdir. Bulanık mantık 1965 yılında Lotfi Zadeh tarafından ortaya atılan bir kontrol yöntemidir. Aynı zaman Japon matematikçi ve mühendis olan Zadeh tarafından geliştirilip “Fuzzy Sets” makalesinde bu yöntem değinmiştir. Bu yöntemi çıkarmasındaki temel sebep aşırı derece karmaşık gerilim-frekans dalgalanmalarına karşın bulanık mantık yöntemleriyle soruna yapay zeka bakış açısıyla bir yaklaşım sunmuştur [31].

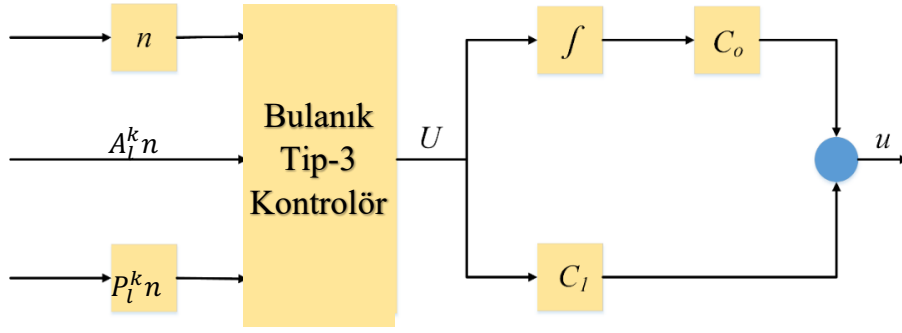
Genel olarak bulanık mantık yöntemine dayalı tüm yöntemlerde önemli olan kriter giriş değerlerinin doğru ve sağlıklı bir şekilde ayarlanmış olmasıdır. Yani diğer bir deyişle gerilim ve frekansın önceki değerlerinin net bir şekilde belirlenmesi gerekir. Çünkü dalgalanma meydana geldiği zaman sistem önceki değerleri hafızasına kaydederek müdahalede bulunabilir. Bulanık mantık yöntemine dayalı yöntemlerin en temel aşamalarından biri kümeleme yöntemidir [32].

Tip-1 bulanık mantık kontrolü (T1-BMK) ve tip-2 bulanık mantık kontrolüne (T2-BMK) dayalı yöntemler bu yöntemler arasında kullanılan en popüler yöntemlerdir. Ancak bu makalemizde kullanacağımız T2-BMK dayalı yöntem bu iki yöntemin daha geliştirilmiş versiyonudur [33]. T3-BMK yöntemi daha da geliştirilerek üyelik fonksiyonları daha yüksek mertebeli hale getirilip çözülmesi en zor karmaşık problemleri rahatlıkla çözebilecek hale getirilmiştir. Yapılan birçok testten başarıyla geçen bu yöntem T1-BMK ve T2-BMK yönteminin çözemediği birçok problemi çözme konusunda son derece başarılı olmuştur. Karmaşık ve doğrusal olmayan birçok sorunun üstesinden oldukça rahat bir şekilde gelmeyi başarmıştır [34].

Bu yöntemi daha detaylı bir şekilde analiz etmek amacıyla yöntem içerisinde bulunan eşitliklere göz atacağız. Bu eşitliklerde n , kontrol edilen parametrenin hatası ve $A_l^k n$ ve $P_l^k n$ ise bu hata üzerine yapılan işlemlerdir. X değişkeni, farklı bölümlerde meydana gelen hata değerleridir [35]. Şekil 4’te bulanık tip-3 kontrolün blok diyagramı gösterilmiştir. Denklem 5 ve Denklem 6’da ise giriş değerinin hata değerleri verilmiştir.

$$A_l^k n(l) = \frac{\int_0^l n(x)(l-x)^{-k} dx}{\gamma(1-k)} \quad (5)$$

$$P_l^k n(l) = \frac{\int_0^l n(x)(l-x)^{k-1} dx}{\gamma(k)} \quad (6)$$



Şekil 4. Bulanık tip-3 kontrol blok diyagramı

$\tilde{T}_n^1 - \tilde{T}_n^2$, $T_{P_l^k n}^1 - \tilde{T}_{P_l^k n}^2$ ve $T_{A_l^k n}^1 - \tilde{T}_{A_l^k n}^2$ üyelik fonksiyonları, n , $A_l^k n$ ve $P_l^k n$ giriş değerleri için referans olarak görülebilir. Aşağıdaki denklemlerde üyelik fonksiyonlarının daha iyi çözümlenebilmesi adına fonksiyonlar belli bölümlere ayrılmıştır. Devrelerde kullanılan sensörlerde hatalar veya ufak sapmalar meydana gelebilir. Denklem 7, Denklem 8, Denklem 9 ve Denklem 10'da bu hatalar ve β_h değeri, ayrılan her bir bölüm için hesaplanmıştır:

$$\bar{t}_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h} = \exp\left(-\frac{(\bar{n}\bar{\beta}_h - c_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h})^2}{\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}^2}\right), \quad (7)$$

$$\bar{t}_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h} = \exp\left(-\frac{(\bar{n}\underline{\beta}_h - c_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h})^2}{\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h}^2}\right), \quad (8)$$

$$\underline{t}_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h} = \exp\left(-\frac{(\underline{n}\bar{\beta}_h - c_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h})^2}{\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}^2}\right), \quad (9)$$

$$\underline{t}_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h} = \exp\left(-\frac{(\underline{n}\underline{\beta}_h - c_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h})^2}{\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h}^2}\right), \quad (10)$$

Sisteme giren n hata değerlerini gidermek için Denklem 11, Denklem 12, Denklem 13 ve Denklem 14'deki sadeleştirme işlemlerinin yapılı:

$$\bar{t}_{\bar{\beta}_h} = \frac{n\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}^2 + \sigma_s^2 c_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}}{\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}^2 + \sigma_s^2}, \quad (11)$$

$$\bar{t}_{\underline{\beta}_h} = \frac{n\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h}^2 + \sigma_s^2 c_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h}}{\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h}^2 + \sigma_s^2}, \quad (12)$$

$$\underline{t}_{\bar{\beta}_h} = \frac{n\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}^2 + \sigma_s^2 c_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}}{\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}^2 + \sigma_s^2}, \quad (13)$$

$$\underline{t}_{\underline{\beta}_h} = \frac{n\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h}^2 + \sigma_s^2 c_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h}}{\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h}^2 + \sigma_s^2}, \quad (14)$$

h ve m değerleri merkez değerlerdir ve bu merkezi değerler $\bar{\vartheta}_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}$, $\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}$ değerleri için standart değerlerdir. $\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h$ değeri sistemdeki üyelik fonksiyonudur. Denklem 15, Denklem 16, Denklem 17 ve Denklem 18'de girdi değeri $P_l^k n$ 'dir.

$$\bar{t}_{P_l^k n}^m |\bar{\beta}_h = \exp\left(-\frac{\left(P_l^k \bar{n}_{\bar{\beta}_h} - c_{T_l^k n}^m |\bar{\beta}_h\right)^2}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\bar{\beta}_h}\right), \quad (15)$$

$$\bar{t}_{P_l^k n}^m |\underline{\beta}_h = \exp\left(-\frac{\left(P_l^k \bar{n}_{\underline{\beta}_h} - c_{T_l^k n}^m |\underline{\beta}_h\right)^2}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\underline{\beta}_h}\right), \quad (16)$$

$$\underline{t}_{P_l^k n}^m |\bar{\beta}_h = \exp\left(-\frac{\left(P_l^k \underline{n}_{\bar{\beta}_h} - c_{T_l^k n}^m |\bar{\beta}_h\right)^2}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\bar{\beta}_h}\right), \quad (17)$$

$$\underline{t}_{P_l^k n}^m |\underline{\beta}_h = \exp\left(-\frac{\left(P_l^k \underline{n}_{\underline{\beta}_h} - c_{T_l^k n}^m |\underline{\beta}_h\right)^2}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\underline{\beta}_h}\right), \quad (18)$$

$P_l^k n$ girdisinin n hata değeri üzerinde işlem yapabilmesi için $P_l^k n$ değerlerinin Denklem 19, Denklem 20, Denklem 21 ve Denklem 22'deki gibi daha sade bir hale getirilmelidir.

$$P_l^k \bar{n}_{\bar{\beta}_h} = \frac{P_l^k n \vartheta_{T_l^k n}^2 |\bar{\beta}_h + \sigma_s^2 c_{T_l^k n}^m |\bar{\beta}_h}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\bar{\beta}_h + \sigma_s^2}, \quad (19)$$

$$P_l^k \bar{n}_{\underline{\beta}_h} = \frac{P_l^k n \vartheta_{T_l^k n}^2 |\underline{\beta}_h + \sigma_s^2 c_{T_l^k n}^m |\underline{\beta}_h}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\underline{\beta}_h + \sigma_s^2}, \quad (20)$$

$$P_l^k \underline{n}_{\bar{\beta}_h} = \frac{P_l^k n \vartheta_{T_l^k n}^2 |\bar{\beta}_h + \sigma_s^2 c_{T_l^k n}^m |\bar{\beta}_h}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\bar{\beta}_h + \sigma_s^2}, \quad (21)$$

$$P_l^k \underline{n}_{\underline{\beta}_h} = \frac{P_l^k n \vartheta_{T_l^k n}^2 |\underline{\beta}_h + \sigma_s^2 c_{T_l^k n}^m |\underline{\beta}_h}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\underline{\beta}_h + \sigma_s^2}, \quad (22)$$

$\vartheta_{P_l^k n}^m |\bar{\beta}_h$ ve $\vartheta_{P_l^k n}^m |\underline{\beta}_h$ üyelik fonksiyonunun standart değerleri ve h ve m değerleri merkezi değerlerdir. $\tilde{T}_{P_l^k n}^m |\bar{\beta}_h$ değeri ise sistemdeki üyelik fonksiyonudur. Girdi değeri $A_l^k n$ için Denklem 23, Denklem 24, Denklem 25 ve Denklem 26'da verilmiştir.

$$\bar{t}_{A_l^k n}^m |\bar{\beta}_h = \exp\left(-\frac{\left(A_l^k \bar{n}_{\bar{\beta}_h} - c_{T_l^k n}^m |\bar{\beta}_h\right)^2}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\bar{\beta}_h}\right), \quad (23)$$

$$\bar{t}_{A_l^k n}^m |\underline{\beta}_h = \exp\left(-\frac{\left(A_l^k \bar{n}_{\underline{\beta}_h} - c_{T_l^k n}^m |\underline{\beta}_h\right)^2}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\underline{\beta}_h}\right), \quad (24)$$

$$\underline{t}_{A_l^k n}^m | \bar{\beta}_h = \exp \left(- \frac{\left(A_l^k \underline{n}_{\bar{\beta}_h} - c_{T_{A_l^k n}^m} | \bar{\beta}_h \right)^2}{\vartheta_{T_{A_l^k n}^m}^2 | \bar{\beta}_h} \right), \quad (25)$$

$$\underline{t}_{A_l^k n}^m | \beta_h = \exp \left(- \frac{\left(A_l^k \underline{n}_{\beta_h} - c_{T_{A_l^k n}^m} | \beta_h \right)^2}{\vartheta_{T_{A_l^k n}^m}^2 | \beta_h} \right), \quad (26)$$

$A_l^k n$ girdisinin n hata değeri üzerinde işlem yapabilmesi için $P_l^k n$ değerlerinin Denklem 27, Denklem 28, Denklem 29 ve Denklem 30'daki gibi daha sade bir hale getirilmesidir.

$$A_l^k \bar{n}_{\bar{\beta}_h} = \frac{A_l^k n \bar{\vartheta}_{T_n^m}^2 | \bar{\beta}_h + \sigma_s^2 c_{T_n^m} | \bar{\beta}_h}{\bar{\vartheta}_{T_n^m}^2 | \bar{\beta}_h + \sigma_s^2}, \quad (27)$$

$$A_l^k \bar{n}_{\beta_h} = \frac{A_l^k n \bar{\vartheta}_{T_n^m}^2 | \beta_h + \sigma_s^2 c_{T_n^m} | \beta_h}{\bar{\vartheta}_{T_n^m}^2 | \beta_h + \sigma_s^2}, \quad (28)$$

$$A_l^k \underline{n}_{\bar{\beta}_h} = \frac{A_l^k n \underline{\vartheta}_{T_n^m}^2 | \bar{\beta}_h + \sigma_s^2 c_{T_n^m} | \bar{\beta}_h}{\underline{\vartheta}_{T_n^m}^2 | \bar{\beta}_h + \sigma_s^2}, \quad (29)$$

$$A_l^k \underline{n}_{\beta_h} = \frac{A_l^k n \underline{\vartheta}_{T_n^m}^2 | \beta_h + \sigma_s^2 c_{T_n^m} | \beta_h}{\underline{\vartheta}_{T_n^m}^2 | \beta_h + \sigma_s^2}, \quad (30)$$

$\bar{\vartheta}_{T_{A_l^k n}^m} | \bar{\beta}_h$ ve $\underline{\vartheta}_{T_{A_l^k n}^m} | \bar{\beta}_h$ üyelik fonksiyonunun standart değerleri ve h ve m değerleri merkezi değerlerdir. $\bar{T}_{A_l^k n}^m | \bar{\beta}_h$ değeri sistemin üyelik fonksiyonudur. $\bar{\beta}_h$ değeri için:

$$\bar{Z}_{\bar{\beta}_h}^1 = \bar{t}_{T_n^1 | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{P_l^k n | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{A_l^k n | \bar{\beta}_h} \quad (31)$$

$$\bar{Z}_{\bar{\beta}_h}^2 = \bar{t}_{T_n^1 | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{P_l^k n | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{A_l^k n | \bar{\beta}_h} \quad (32)$$

$$\bar{Z}_{\bar{\beta}_h}^3 = \bar{t}_{T_n^1 | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{P_l^k n | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{A_l^k n | \bar{\beta}_h} \quad (33)$$

$$\bar{Z}_{\bar{\beta}_h}^4 = \bar{t}_{T_n^1 | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{P_l^k n | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{A_l^k n | \bar{\beta}_h} \quad (34)$$

$$\bar{Z}_{\bar{\beta}_h}^5 = \bar{t}_{T_n^2 | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{P_l^k n | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{A_l^k n | \bar{\beta}_h} \quad (35)$$

$$\bar{Z}_{\bar{\beta}_h}^6 = \bar{t}_{T_n^2 | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{P_l^k n | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{A_l^k n | \bar{\beta}_h} \quad (36)$$

$$\bar{Z}_{\bar{\beta}_h}^7 = \bar{t}_{T_n^2 | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{P_l^k n | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{A_l^k n | \bar{\beta}_h} \quad (37)$$

$$\bar{Z}_{\bar{\beta}_h}^8 = \bar{t}_{T_n^2 | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{P_l^k n | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{A_l^k n | \bar{\beta}_h} \quad (38)$$

$\underline{\beta}$ değeri için:

$$\underline{Z}_{\underline{\beta}_h}^1 = \underline{t}_{T_n^1 | \underline{\beta}_h} \underline{t}_{P_l^k n | \underline{\beta}_h} \underline{t}_{A_l^k n | \underline{\beta}_h} \quad (39)$$

$$\bar{Z}_{\beta_h}^2 = \bar{t}_{T_n^1|\beta_h} \bar{t}_{P_n^k|\beta_h} \bar{t}_{A_n^k|\beta_h} \quad (40)$$

$$\bar{Z}_{\beta_h}^3 = \bar{t}_{T_n^1|\beta_h} \bar{t}_{P_n^k|\beta_h} \bar{t}_{A_n^k|\beta_h} \quad (41)$$

$$\bar{Z}_{\beta_h}^4 = \bar{t}_{T_n^1|\beta_h} \bar{t}_{P_n^k|\beta_h} \bar{t}_{A_n^k|\beta_h} \quad (42)$$

$$\bar{Z}_{\beta_h}^5 = \bar{t}_{T_n^2|\beta_h} \bar{t}_{P_n^k|\beta_h} \bar{t}_{A_n^k|\beta_h} \quad (43)$$

$$\bar{Z}_{\beta_h}^6 = \bar{t}_{T_n^2|\beta_h} \bar{t}_{P_n^k|\beta_h} \bar{t}_{A_n^k|\beta_h} \quad (44)$$

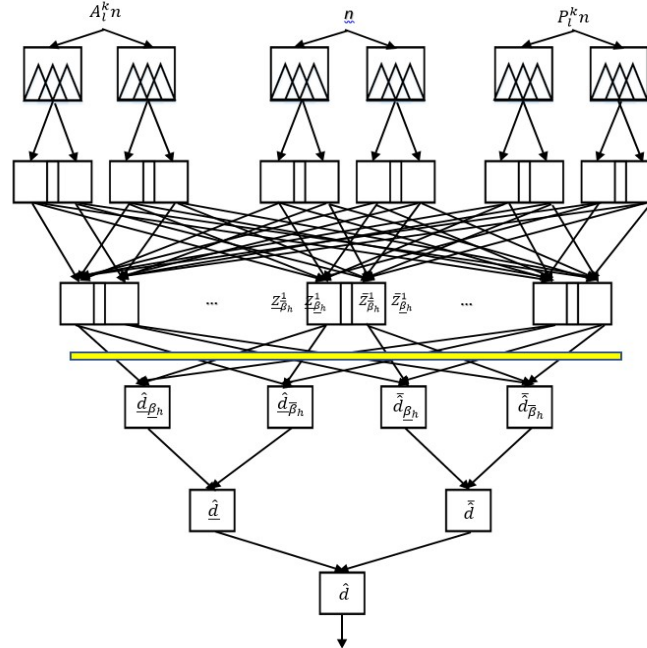
$$\bar{Z}_{\beta_h}^7 = \bar{t}_{T_n^2|\beta_h} \bar{t}_{P_n^k|\beta_h} \bar{t}_{A_n^k|\beta_h} \quad (45)$$

$$\bar{Z}_{\beta_h}^8 = \bar{t}_{T_n^2|\beta_h} \bar{t}_{P_n^k|\beta_h} \bar{t}_{A_n^k|\beta_h} \quad (46)$$

Z değerleri, sadeleştirme işlemleri sonucunda elde edilen değerlerin sonuca ulaştırılması için kullanılan bir fonksiyondur. P_n^k ve A_n^k fonksiyonları Z türünden elde edilir. Böylelikle hata giderilir ve sonuç elde edilir [36]. Elde edilen \bar{Z} ve \underline{Z} değerleriyle yapılan sadeleştirme işlemleri sonucunda \hat{d} çıkış sinyali Denklem 47’de verilmiştir:

$$\hat{d} = \frac{\bar{d} + \underline{d}}{2} \quad (47)$$

Şekil 5’de \hat{d} üyelik fonksiyonunun gösterilmiştir.

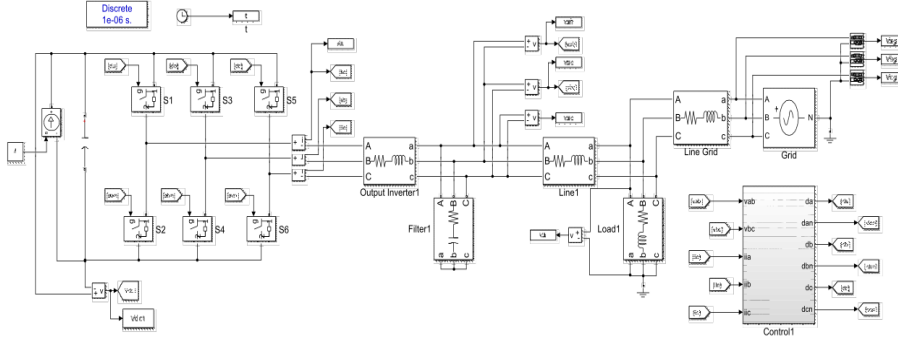


Şekil 5. Üyelik fonksiyonlarının şeması [37].

4. Bulgular ve Sonuç

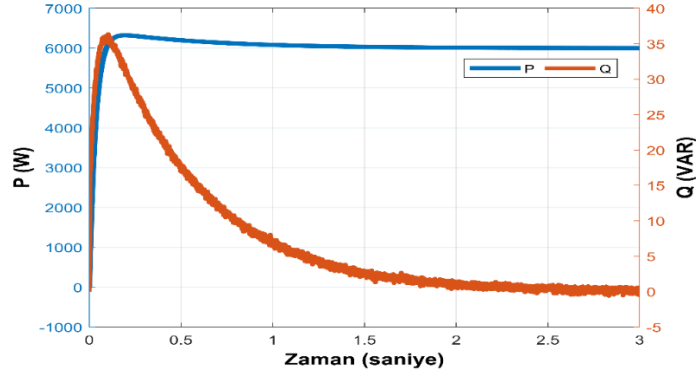
4.1 Tek dağıtık üreteçli şebekeye bağlı mikro şebeke P= 6 kW, Q= 0 kVAR

Bu durumda yükün doğa şartlarına karşı nasıl değişkenlik göstereceğini inceleyeceğiz. Şekil 6’da tek dağıtık üreteçli şebekeye bağlı mikro şebekenin simülank modeli verilmiştir.



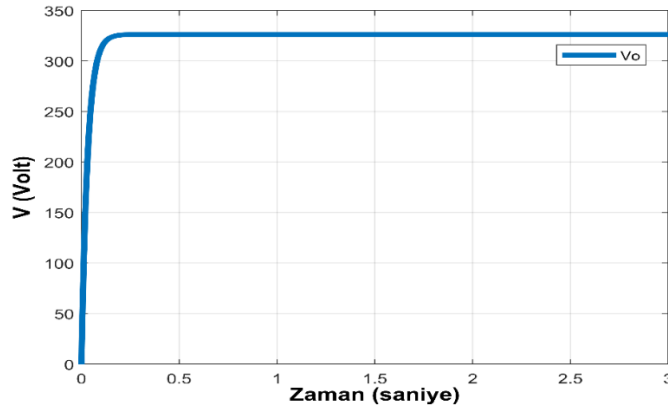
Şekil 6. Tek dağıtık üreteçli şebekeye bağlı mikro şebekenin simulink modeli

Şekil 7’de aktif ve reaktif gücün zaman göre değişimi verilmiştir. Görüldüğü üzere 0 – 0,2 saniye aralığında aktif güç ritmik bir şekilde yükseliş rotası izlemektedir. Ardından 0,2 saniyeden itibaren T3-BMK sayesinde ideal değerde sabit rota seyretmektedir. Ancak reaktif gücü sıfır olarak aldığımız için Q değeri 0 – 0,2 aralığında keskin bir artış gösterdikten sonra aynı şekilde keskin bir azalış göstererek 0,2 – 3 aralığında 0 (sıfır) kVar seviyesine düşüş göstermiştir.



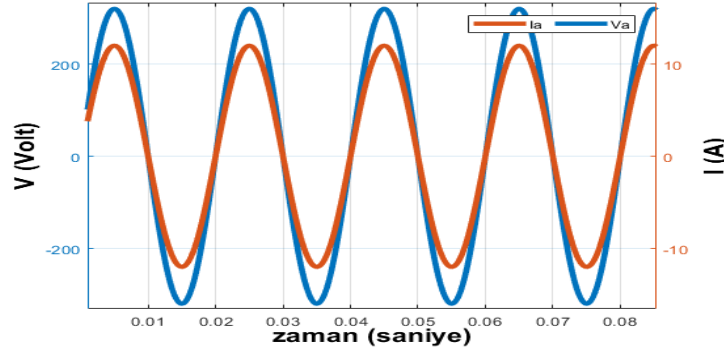
Şekil 7. Aktif ve reaktif güç değişimi

Şekil 8’de T3-BMK sayesinde 0 – 0,2 aralığında hızlı bir şekilde nominal gerilime ulaşıldığı görülmüştür.



Şekil 8. Çıkış geriliminin değişimi

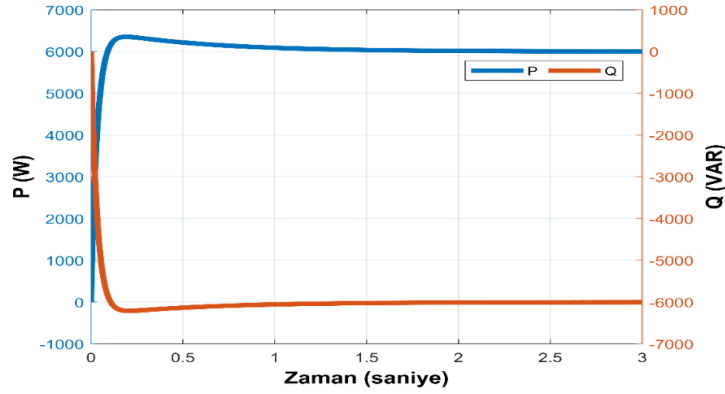
Şekil 9’da ise akım ve gerilim değerinin zamana göre değişimi gösterilmiştir. Grafikte akım değeri yaklaşık olarak her 20 milisaniyede bir -12A ile 12A aralığında değer almaktadır. Ancak akım değeri gerilime göre çok düşük kaldığından daha görünür olması adına belli oranda genişletildi. Gerilimde aynı şekilde 20 milisaniyede bir yaklaşık -320 ile 320V aralığında değer almaktadır.



Şekil 9. Akım ve gerilimin değişimi

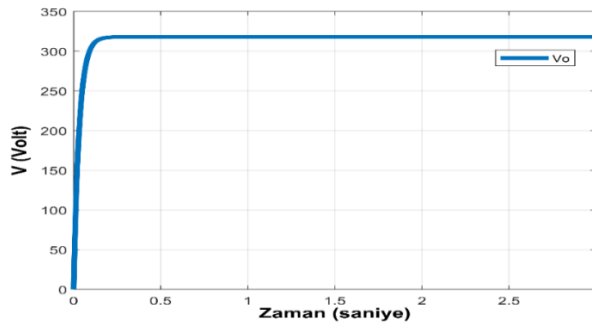
4.2 Tek dağıtık üreteçli şebekeye bağlı mikro şebeke $P=6$ kW, $Q=-6$ kVAR

Bu durumda yükün aktif gücü 6 kW ve reaktif gücü -6 kVAR olarak ele alacağız. Şekil 10'da görüldüğü üzere 0 – 0,2 saniye aralığında aktif güç ritmik bir şekilde yükseliş rotası izlemektedir. Reaktif güç ise aktif gücün tersi yönünde rota izlemektedir. Bunun nedeni reaktif gücü -6 kVAR aldığımız için başlangıçtan itibaren -6kVAR değerine ulaşma eğiliminden kaynaklıdır. Aktif güç 0,2 - 3 saniye aralığında T3-BMK sayesinde yavaşça azalış rotası izleyerek 6 kW değerinde sabitlenmektedir. Reaktif güç ise yine aktif gücün tersi yönünde bir rota izleyerek -6 kVAR değerinde sabitlenmektedir.



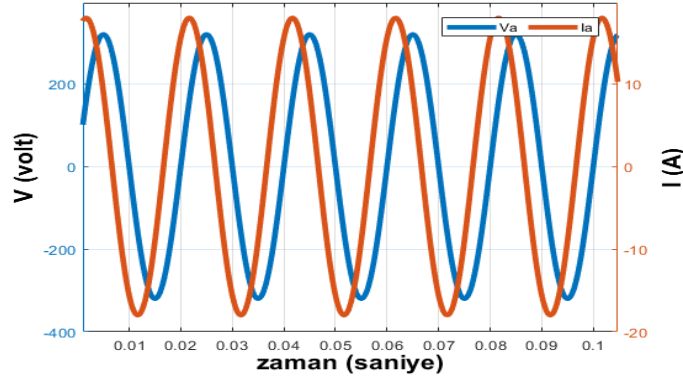
Şekil 10. Aktif ve reaktif güç

Şekil 11'de T3-BMK sayesinde 0 – 0,2 Vo gerilimine hızlıca ulaşmaktadır.



Şekil 11. Çıkış geriliminin değişimi

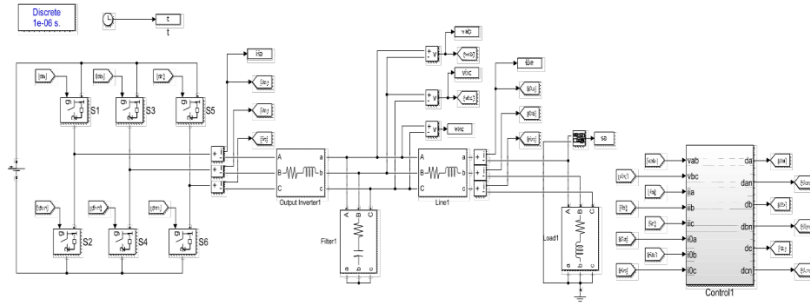
Şekil 12'de ise akım ve gerilim değerinin zaman göre değişimi gösterilmiştir ve akım değeri yaklaşık olarak her 20 milisaniyede bir -280 ile 280A aralığında değer almaktadır. Ancak akım değeri gerilime göre çok düşük kaldığından daha görünür olması adına belli oranda genişletildi. Gerilimde aynı şekilde 0,7 milisaniyede bir yaklaşık -380 ile 380V aralığında değer almaktadır.



Şekil 12. Akım ve gerilimin değişimi

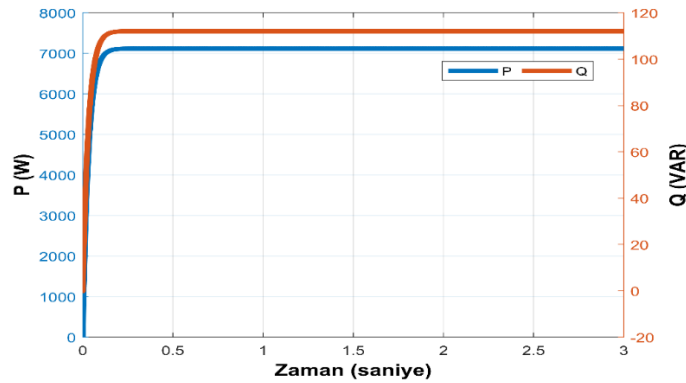
4.3 Tek dağıtık üretic ve yükün bulunduğu ada modu durumu

Bu durumda $P = 7 \text{ kW}$ ve $Q=110 \text{ kVAR}$ olarak alınmıştır ve tek dağıtık üreticinin ve yükün doğa şartlarına karşı nasıl değişkenlik göstereceğini inceleyeceğiz. Şekil 13'te tek dağıtık üreticili ve ada modunda mikro şebekenin simulink modeli verilmiştir.



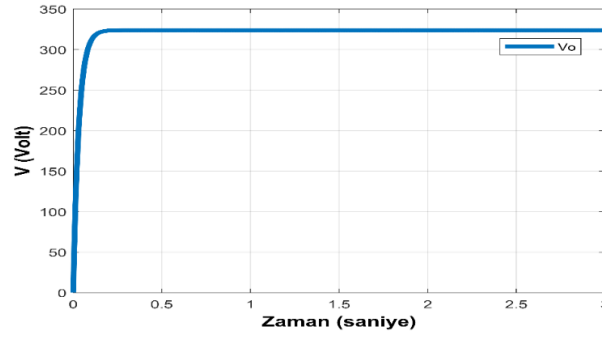
Şekil 13. Tek dağıtık üreticili ada modunda mikro şebekenin simulink modeli

Şekil 14'te aktif ve reaktif gücün zaman göre değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde şebekeden bağımsız olan ada mod durumunda 0 – 0,2 saniye aralığında T3-BMK sayesinde yükün ihtiyacı olan P ve Q hızlıca ulaşılmıştır.



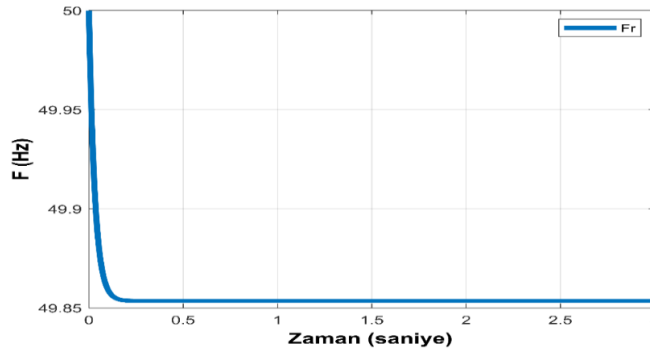
Şekil 14. Aktif ve reaktif güç değişimi

Şekil 15'te ise 0 – 0,2 aralığında V_o değerine çok hızlı ulaşıldığı ve sistem geriliminin sabit kaldığı görülmüştür.



Şekil 15. Çıkış geriliminin değişimi

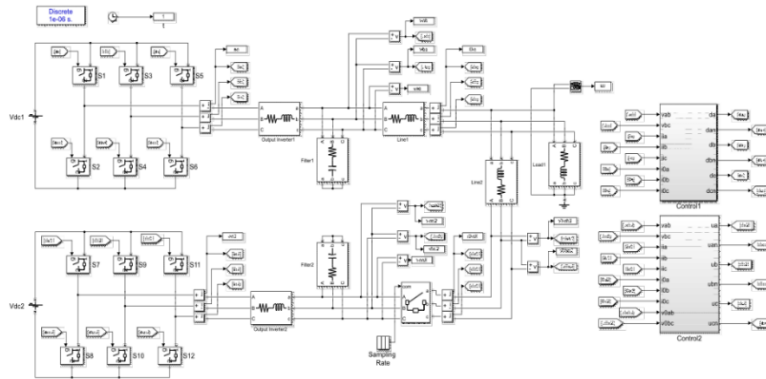
Şekil 16'da ise sistemin frekans değerinin zamana göre değişimi gösterilmiştir. Frekans değerinde hiç sapma olmaması veya çok küçük ölçekte sapma meydana gelmesi sistemin son derece sağlıklı bir şekilde çalıştığını gösterir. Aynı şekilde ufak sapmaların meydana gelmesi sistemin gerilim ve frekans kontrolünün başarılı bir şekilde sağlandığını gösterir. 0 – 0,2 aralığında sistemin frekans değeri 0,14 Hz değer kaybederek 50 Hz değerinden 49,86 Hz değerine gerilemiştir. T3-BMK sayesinde meydana gelen sapmalar minimize edilmiştir.



Şekil 16. İkinci durumda frekansın değişimi

4.4 İki dağıtık üreteç ve yükün bulunduğu ada modu durumu

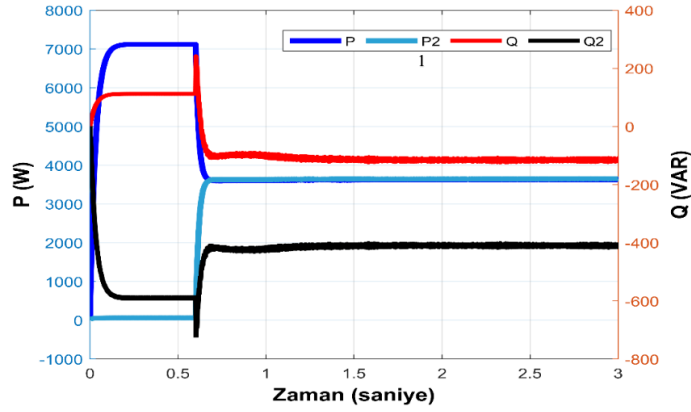
Bu durumda yükün $P = 7kW$ $Q = 110 Kvar$ durumu için hem birincil hem de ikincil kontrol durumu inceleyeceğiz. Şekil 17'de iki dağıtık üreteçli ada modu durumunda mikro şebekenin simulink modeli verilmiştir.



Şekil 17. İki dağıtık üreteçli ada modunda mikro şebekenin simulink modeli

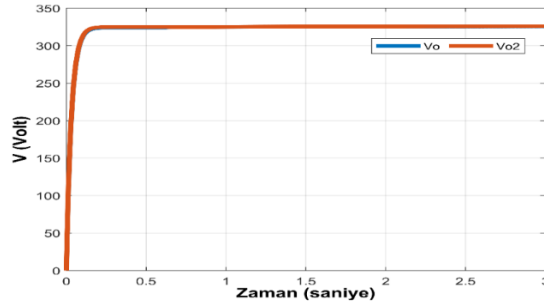
Şekil 18'de aktif ve reaktif gücün zaman göre değişimi verilmiştir. Aynı güç değerlerinde iki dağıtık üreteç ve sabit bir yükün hem birincil hem de ikincil kontrolünün sistemin çalışma esnasında dengeye gelmesi durumu verilmiştir. Birinci üreticinin aktif gücü ($P1$) ile İkinci üreticinin aktif gücü ($P2$) 0,5 sn gibi kısa sürede sisteme dengeye gelmiş aktif güçler ortak paylaşılmıştır. Ancak Birinci üreticinin reaktif gücü ($Q1$) ile ikinci üreticinin reaktif gücü

(Q2) 0,5 sn yükün reaktif gücünü ortak olarak paylaşım yapılmıştır. Sistem dengesine yaklaşık birazcık daha geç ulaşmıştır.



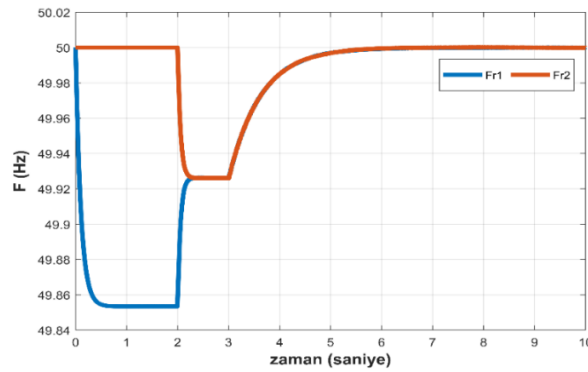
Şekil 18. İlk durumda aktif ve reaktif güç

Şekil 19'da ise T3-BMK yöntemi sayesinde V_o ve V_{o2} değişmeden hızlıca aynı görüneyi takip ettiği görülmüştür.



Şekil 19. V_o ve V_{o2} gerilimleri

Bu dağıtık üreteçlerde frekans değerleri de mevcuttur ve bunlarında kontrolünü sağlamak dağıtık üreteçler açısından son derece önemlidir. Şekil 20'de bu iki dağıtım şebekesine ait frekans değerlerinin zamana göre değişimi gösterilmiştir. T3-BMK aracılığıyla çok hızlı bir şekilde sistem frekansına ulaşmıştır.



Şekil 20. İki dağıtık üreticinin frekans değişimi

5. Sonuçlar

Bu makalede düşüş kontrollü inverter tabanlı mikro şebekelerin tip-3 bulanık tabanlı ikincil gerilim ve frekans restorasyon kontrolü yapılmıştır. Bu önerilen T3-BMK kontrol yöntemi İki dağıtık üreteç ve yükün bulunduğu ada modu durumu, Tek dağıtık üreteç ve yükün bulunduğu ada modu durumu, Tek dağıtık üreteçli şebekeye bağlı mikro şebeke $P=6$ kW, $Q=-6$ kVAR ve Tek dağıtık üreteçli şebekeye bağlı mikro şebeke $P=6$ kW, $Q=0$ kVAR

dört ayrı modelde test edilmiştir. Bu dört ayrı durumda aktif ve reaktif güce ulaşma, şebeke gerilimi ulaşma ve şebeke frekansını yakalaması incelenmiştir. Bu makalede T3-BMK kontrol ile ikincil kontrol durumunda çok hızlı ve stabil bir şekilde sistem nominal çalışma şartlarına ulaştığı görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Kilic, H. "Distributed cooperative fault tolerant optimal active power control in AC microgrid." *ISA transactions* 142 (2023): 98-111.
- [2] Vandoorn, TL, Vasquez JC, De Kooning J, Guerrero, JM, Vandevelde L. (2013). Microgrids: Hierarchical control and an overview of the control and reserve management strategies. *IEEE industrial electronics magazine*, 7(4), 42-55.
- [3] Abhishek, A, Ranjan A, Devassy S, Kumar Verma B, Ram SK, Dhakar AK. (2020). Review of hierarchical control strategies for DC microgrid. *IET Renewable Power Generation*, 14(10), 1631-1640.
- [4] Bhatt N, Sondhi Arora, S. (2022). Droop control strategies for microgrid: A review. *Advances in Renewable Energy and Electric Vehicles: Select Proceedings of AREEV 2020*, 149-162.
- [5] Ghasemi N, Ghanbari M, Ebrahimi R. (2023). Intelligent and optimal energy management strategy to control the Micro-Grid voltage and frequency by considering the load dynamics and transient stability. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 145, 108618.
- [6] Mendieta W, Cañizares CA. (2020). Primary frequency control in isolated microgrids using thermostatically controllable loads. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(1), 93-105.
- [7] Shang L, Dong X, Liu C, Gong Z. (2021). Fast grid frequency and voltage control of battery energy storage system based on the amplitude-phase-locked-loop. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(2), 941-953.
- [8] Rathore B, Chakrabarti S, Srivastava L. (2021). A Self-Regulated Virtual Impedance control of VSG in a microgrid. *Electric Power Systems Research*, 197, 107289.
- [9] Worku MY, Hassan MA, Abido MA. (2020). Real time-based under frequency control and energy management of microgrids. *Electronics*, 9(9), 1487.
- [10] Xie X, Xu W, Huang C, Fan X. (2021). New islanding detection method with adaptively threshold for microgrid. *Electric Power Systems Research*, 195, 107167.
- [11] Adineh B, Keypour R, Davari P, Blaabjerg F. (2020). Review of harmonic mitigation methods in microgrid: From a hierarchical control perspective. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(3), 3044-3060.
- [12] Lakshmi MB, Saravanan S, Düzdağ S, Kılıç MH, Anuradha T., Deepak K, Malla SG. (2022, December). Voltage and Frequency Control of a PV-Battery-Diesel Generator based Standalone Hybrid System. In *2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)* (pp. 1-7). IEEE.
- [13] Wang Z, Mu L, Xu Y, Zhang F, Zhu J. (2021). The fault analysis method of islanded microgrid based on the U/f and PQ control strategy. *International transactions on electrical energy systems*, 31(7), e12919.
- [14] Jan MU, Xin A, Abdelbaky MA, Rehman HU, Iqbal S. (2020). Adaptive and fuzzy PI controllers design for frequency regulation of isolated microgrid integrated with electric vehicles. *IEEE Access*, 8, 87621-87632.
- [15] Mohamed R, Helaimi M, Taleb R, Gabbar HA, Othman AM. (2020). Frequency control of microgrid system based renewable generation using fractional PID controller. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 19(2), 745-755.
- [16] Huang Q, Chen H, Xiang X, Li C., Li W, He X. (2021). Islanding detection with positive feedback of selected frequency for DC microgrid systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(10), 11800-11817.
- [17] Heins T, Joševski M, Gurumurthy S, Monti A. (2022). Centralized Model Predictive Control for Transient Frequency Control in Islanded Inverter-Based Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*.
- [18] Alhasnawi BN, Jasim BH, Sedhom BE, Hossain E, Guerrero JM. (2021). A new decentralized control strategy of microgrids in the internet of energy paradigm. *Energies*, 14(8), 2183.
- [19] Lu X, Guerrero JM, Sun K, Vasquez JC, Teodorescu R, Huang L. (2013). Hierarchical control of parallel AC-DC converter interfaces for hybrid microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2), 683-692.
- [20] Malla P, Yilmaz M, Devi GR, Asker ME, Kılıç H, Malla SG. (2023). Neuro-Fuzzy Controller-based Standalone PV-Battery System. In *Renewable Resources and Energy Management* (pp. 107-115). CRC Press.
- [21] Khan HS, Mohamed IS, Kauhaniemi K, Liu L. (2021, November). Artificial neural network-based voltage control of DC/DC converter for dc microgrid applications. In *2021 6th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID)* (pp. 1-6). IEEE.

- [22] Saxena NK, Gao WD, Kumar A, Mekhilef S, Gupta V. (2022). Frequency regulation for microgrid using genetic algorithm and particle swarm optimization tuned STATCOM. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 50(9), 3231-3250.
- [23] Regad M, Helaimi M, Taleb R, Othman AM, Gabbar HA. (2020). Frequency Control in Microgrid Power System with Renewable Power Generation Using PID Controller Based on Particle Swarm Optimization. In *Smart Energy Empowerment in Smart and Resilient Cities: Renewable Energy for Smart and Sustainable Cities* (pp. 3-13). Springer International Publishing.
- [24] Kreishan MZ, Zobia AF. (2021). Allocation of dump load in islanded microgrid using the mixed-integer distributed ant colony optimization. *IEEE Systems Journal*, 16(2), 2568-2579.
- [25] Kong X, Liu D, Sun F, Wang C, Huo X, Li S. (2021). Operation Strategy of Park Microgrid with Multi-stakeholder Based on Artificial Immune System. In *Design, Control, and Operation of Microgrids in Smart Grids* (pp. 121-150). Cham: Springer International Publishing.
- [26] Zaid SA, Kassem AM, Alatwi AM, Albalawi H, AbdelMeguid H, Elemery A. (2023). Optimal Control of an Autonomous Microgrid Integrated with Super Magnetic Energy Storage Using an Artificial Bee Colony Algorithm. *Sustainability*, 15(11), 8827.
- [27] Mishra D, Maharana MK, Kar MK, Nayak A, Cherukuri M. (2023). Modified Differential Evolution Algorithm for Governing Virtual Inertia of an Isolated Microgrid Integrating Electric Vehicles. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2023.
- [28] Taghieh A, Mohammadzadeh A, Zhang C, Kausar N, Castillo O. (2022). A type-3 fuzzy control for current sharing and voltage balancing in microgrids. *Applied Soft Computing*, 129, 109636.
- [29] Malla SG, Kılıç H, Kalantri S, Yilmaz M, Rao BK, Kiran KB, Asker ME. (2023). Takagi–Sugeno–Kang Fuzzy Controller-based Single-Stage Grid-Connected PV System. In *Renewable Resources and Energy Management* (pp. 127-135). CRC Press.
- [30] Fan W, Mohammadzadeh A, Kausar N, Pamucar D, Ide NAD. (2022). A new type-3 fuzzy PID for energy management in microgrids. *Advances in Mathematical Physics*, 2022.
- [31] Liu Z, Mohammadzadeh A, Turabieh H, Mafarja M, Band SS, Mosavi A. (2021). A new online learned interval type-3 fuzzy control system for solar energy management systems. *IEEE Access*, 9, 10498-10508.
- [32] Türk İ, Kılıç H. (2023). Bulanık Mantık Tip-3 Kullanılarak Mikro Şebeke Frekans Regülasyonu. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 14(3), 421-436.
- [33] Gheisarnejad M, Mohammadzadeh A, Khooban MH. (2021). Model Predictive Control Based Type-3 Fuzzy Estimator for Voltage Stabilization of DC Power Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(12), 13849-13858.
- [34] Aly AA, Felemban BF, Mohammadzadeh A, Castillo O, Bartoszewicz A. (2021). Frequency regulation system: a deep learning identification, type-3 fuzzy control and LMI stability analysis. *Energies*, 14(22), 7801.
- [35] Nabipour N, Qasem SN, Jermisittiparsert K. (2020). Type-3 fuzzy voltage management in PV/hydrogen fuel cell/battery hybrid systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(56), 32478-32492.
- [36] Sibtain D, Rafiq T, Bhatti MH, Shahzad S, Kilic H. (2023). Frequency stabilization for interconnected renewable based power system using cascaded model predictive controller with fractional order PID controller. *IET Renewable Power Generation*, 17(16), 3836-3855.
- [37] Singh M, Basak P. (2020). Identification and nature detection of series and shunt faults in types I, III and IV wind turbines and PV integrated hybrid microgrid with a fuzzy logic-based adaptive protection scheme. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(22), 4989-4999.
- [38] Shi J. (2023). An interval type-3 fuzzy PID control system design and its application in solid oxide fuel cells power plant. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, (Preprint), 1-14.
- [39] Vinothkumar J, Hamizhselvan D. (2023). Enhancing controller efficiency in hybrid power system using interval type 3 fuzzy controller with bacterial foraging optimization algorithm. *J. Theor. Appl. Inf. Technol*, 101, 12.
- [40] Gheisarnejad M, Mohammadzadeh A, Farsizadeh H, Khooban MH. (2021). Stabilization of 5G telecom converter-based deep type-3 fuzzy machine learning control for telecom applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 69(2), 544-548.
- [41] Fan W, Mohammadzadeh A, Kausar N, Pamucar D, Ide NAD. (2022). Research Article A New Type-3 Fuzzy PID for Energy Management in Microgrids.
- [42] Qasem SN, Ahmadian A, Mohammadzadeh A, Rathinasamy S, Pahlevanzadeh B. (2021). A type-3 logic fuzzy system: Optimized by a correntropy based Kalman filter with adaptive fuzzy kernel size. *Information sciences*, 572, 424-44