

Araştırma Makalesi / Research Article

Biyoyenilenebilir Enerji Tabanlı Mikro Şebekenin Yük Frekansı Kontrolü İçin Fuzzy PID Kontrolör

Dursun ÖZTÜRK^{1*}, Burak YILDIRIM², Gizem DOĞAN³

¹ Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bingöl, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0335-8118>, dozturk@bingol.edu.tr

² Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bingöl, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2118-4297>, byildirim@bingol.edu.tr

³ Çevre ve Şehircilik Bakanlığı İLBANK Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9286-4479>, gyalin23@gmail.com

Geliş/ Received: 19.04.2022;

Kabul / Accepted: 28.08.2022

ÖZET: Günümüzde enerji tüketiminin giderek arttığı, çevre koruma bilincinin geliştiği ve enerji piyasalarındaki serbestleşmenin istikrarlı şekilde ilerlediği görülmektedir. Bu nedenle, yeni teknolojiler yardımı ile yenilenebilir enerji kaynaklarından (YEK) daha fazla yararlanmaya yönelik politikalar üretilmekte ve dağıtılmış üretim sistemlerine olan ilginin artması sağlanmaktadır. Mikro şebekeler YEK'lerin şebekeye entegrasyonunda önemli avantajlar sağlayan bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Mikro şebekelerin yapılarında bulunan YEK'lerin değişken üretim yapıları gibi bazı belirsizliklere sahip olması, bu sistemlerde frekans kararlılığını önemli problemlerden biri haline getirir. Bir mikro şebeke modeline etkin bir yük frekansı kontrolünün (YFK) sağlanması, bu sistemlerin kararlılığı ile ilgili iyileştirmelere önemli ölçüde katkıda bulunur. Bu çalışmada, mikro şebekede, YFK'de karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmek için bir fuzzy oransal integral türev (PID - Proportional-Integral-Derivative) kontrolör yapısı önerilmiştir. En uygun kontrolör parametrelerinin belirlenmesi için lig şampiyonası algoritması (LŞA), karınca koloni algoritması (KKA) ve parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritmaları kullanılmıştır. Aynı zamanda, fuzzy PID kontrolörünün kazançlarının en uygun değerlerinin elde edilmesi için zaman ağırlıklı mutlak hatanın toplamı (ITAE - Integral Time-weighted Absolute Error) maliyet fonksiyonu kullanılmıştır. Çalışma sonucunda önerilen kontrolörün performansı klasik PID kontrolör ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Biyoyenilenebilir Enerji, Mikro Şebeke, Yük Frekans Kontrol, Fuzzy PID Kontrolör.

*Sorumlu yazar / Corresponding author: dozturk@bingol.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Öztürk, D., Yıldırım, B., Doğan, G. (2022). Biyoyenilenebilir Enerji Tabanlı Mikro Şebekenin Yük Frekansı Kontrolü İçin Fuzzy PID Kontrolör. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 3(2), 206-224.

Fuzzy PID Controller for Load Frequency Control of Biorenewable Energy Based Micro Grid

ABSTRACT: Today, it is seen that energy consumption is gradually increasing, environmental protection awareness is developing and liberalization in energy markets is progressing steadily. For this reason, with the help of new technologies, policies are produced to benefit more from renewable energy resources (RES) and the interest in distributed generation systems is increased. Micro grids have emerged as a solution that provides significant advantages in the integration of RES to the grid. The fact that RES in the structures of micro grids have some uncertainties, such as variable generation structures, makes frequency stability one of the important problems in these systems. Providing effective load frequency control (LFC) to a micro grid model contributes significantly to improvements in the stability of these systems. In this study, a fuzzy proportional-integral-derivative (PID) controller structure is proposed to overcome the difficulties encountered in LFC in micro grid. League championship algorithm (LCA), ant colony algorithm (ACA) and particle swarm optimization (PSO) algorithms were used to determine the most suitable controller parameters. At the same time, the integral time-weighted absolute error (ITAE), cost function is used to obtain the optimal values of the gains of the fuzzy PID controller. As a result of the study, the performance of the proposed controller was compared with the classical PID controller.

Keywords: Biorenewable Energy, Micro Grids, Load Frequency Control, Fuzzy PID Controller.

1. GİRİŞ

Artan nüfus, sanayileşme ve modern yaşam tarzındaki değişiklikler nedeniyle dünya çapında meydana gelen aşırı enerji talebi, ekosistemimizi tahrip eden zararlı atıkları çoğaltmaktadır. Bu durum, atıkları kullanan biyoenerji gibi yenilenebilir yeşil enerji üretimine yönelik bazı alternatif çözümlere yönelimi zorunlu kılmaktadır. Mevcut yenilenebilir enerji/biyoenerji kapasitesi, şu anki devasa güç talebine kıyasla çok küçük olmakla beraber atıkları azaltmak ve yeşil enerji üretmek için tüm olası yenilenebilir-biyoenerji kojenerasyon tabanlı hibrit mikro şebekeler ile küresel enerji talebi karşılanabilir (Tucho ve Nonhebel, 2017). Uzak ve küçük yerleşim yerleri, rüzgar/güneş-biyoenerji kojenerasyon tabanlı hibrit mikro şebekeler ile kendi güç gereksinimlerini üretebilirler. Günümüzde başta Hindistan olmak üzere bazı ülkelerde yenilenebilir/biyoelektrik kojenerasyonunu teşvik etmeye yönelik bazı programlar başlatılmıştır (Barik ve Das, 2020).

Dağıtılmış enerji kaynakları, mikro şebeke içerisinde hem dağıtılmış üretim hem de dağıtılmış depolama enerji şeklinde olabilmektedir. Dağıtılmış üretim teknolojileri; içten yanmalı motorlar, gaz türbinleri, kombine çevrim gaz türbinleri, hidrolik türbinler, yakıt hücreleri, rüzgâr türbinleri, PV güneş panelleri, ısı, jeotermal enerjisi, biokütle, gel-git enerjisi ve dalga enerjisi gibi üretim birimleri olarak sıralanmaktadır. Bu üretim birimleri incelendiğinde rüzgâr türbinleri, PV, küçük hidrolik türbinler, jeotermal enerji ve yakıt pillerinin dünyada toplam güç üretiminde piyasa payını artırması beklenmektedir (Al-Dhaifallah ve ark., 2018). Enerji depolama birimleri ise volanlar/uçan tekerlekler, süper kapasitörler, süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri ve elektrokimyasal piller olarak sıralanmaktadır (Parmar ve ark., 2012).

Temel şebekenin bir parçası olan ve endüstriyel/ticari tüketici uygulamalarından oluşan bir mikro şebeke, şebekeden bağımsız veya şebeke bağlantılı mod olarak çalışabilir (Kocaman, 2014). Mikro şebekelerin yapısında rüzgâr türbinleri, hidrolik türbinler, yakıt hücreleri ve PV (Photovoltaic) modüller gibi kaynaklar yer almaktadır. Mikro şebekeler, güç elektroniğine dayalı dönüştürücülerle bir arayüz birimi üzerinden şebekeye bağlanırlar. Güç elektroniği dönüştürücüleri incelendiğinde,

bunların sisteme girmesinin hem bağlı olduğu sistemin güç kalitesini etkilediği hem de yeni kontrol düzenlemeleri gerektirdiği belirlenmiştir (Baykal ve Beyan, 2004; Subramanyam ve ark., 2014).

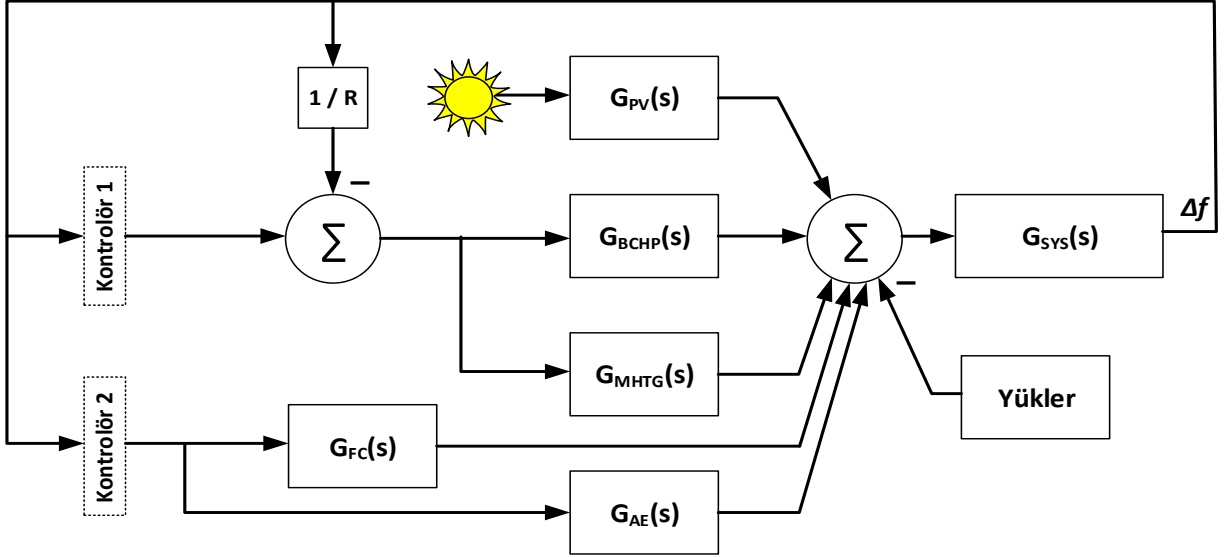
Elektrik güç sistemlerinde ve mikro şebekelerde üretim ve tüketim arasındaki uyum önemlidir. Bu ikisi arasındaki uyumun bozulması, sistemde frekans sapmalarına neden olur (Mordjaoui ve ark., 2017). Üretim ve tüketim arasındaki dengeyi koruyarak frekans sapmalarını sınırlamak için gereken mekanizma, yük frekansı kontrolü (YFK) olarak adlandırılır (Elkawafi ve ark., 2016; Yıldırım ve ark., 2021). Adalı modda çalışan mikro şebeke ana şebekeden yardım almadığından, YFK bu modda en temel operasyonel gereksinimlerden biri haline gelecektir (Yıldırım, 2021). Adalı biyoyenilebilir enerji tabanlı mikro şebekenin YFK'sı için şimdiye kadar çeşitli kontrol yaklaşımları geliştirilmiştir. Barik ve Das'ın yaptığı çalışmada biyoyenilebilir enerji tabanlı mikro şebeke sistemin YFK'da PID kontrolör kullanılmış ve bu kontrolörün parametre değerlerini belirlemek için QSHO (quasi-oppositional selfish herd optimization) optimizasyon algoritması kullanılmıştır (Barik ve Das, 2020). Barik ve Das'ın yaptıkları başka bir çalışmada ise, biyoyenilebilir enerji tabanlı mikro şebeke sistemin YFK'da PID kontrolör kullanılmış ve bu kontrolörün parametre değerlerini belirlemek için GOA (Grasshopper Optimisation Algorithm) optimizasyon algoritması kullanılmıştır (Barik ve Das, 2018). Barik ve arkadaşlarının yaptıkları diğer bir çalışmada ise, biyoyenilebilir enerji tabanlı mikro şebeke sistemin YFK'da PID kontrolör kullanılmış ve bu kontrolörün parametre değerlerini belirlemek için PSO optimizasyon algoritması kullanılmıştır (Barik ve ark., 2019).

Bu çalışmanın amacı; biyoyenilebilir enerji tabanlı mikro şebekenin YFK için Fuzzy PID kontrolör kullanmak ve bu kontrolör parametrelerinin en uygun değerlerini LŞA, KKA ve PSO optimizasyon algoritmaları vasıtasıyla belirlemektir. Her ne kadar literatürde farklı güç sistemleri ve mikro şebeke sistemlerde YFK için bu algoritmalar kullanılmışsa da (Bevrani ve ark., 2012; Özdemir ve ark., 2017; Özdemir ve Öztürk, 2017; Yıldırım, 2021) bu çalışma biyoyenilebilir enerji kaynaklarına dayalı mikro şebeke sistemlerin YFK için literatürde bir ilk olma özelliğini taşımaktadır. Ayrıca bu biyoyenilebilir mikro şebeke sistem için Fuzzy PID kontrolör yapısının kullanımı bu çalışmanın diğer yeniliğidir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Mikro Şebeke Modeli

Bu çalışmada kullanılan çok birimli izole yenilenebilir mikro şebeke modeli, yenilenebilir kaynakların optimum kullanımı ile ekolojik yönler ve ekonomik operasyon göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. Bu mikro şebeke sistemi MHTG (Micro-Hydro Turbine Generator) ünitesine, B CHP (Biomass Fired Combined Heat and Power) ünitesine, AE (Aqua elektrolizer) ünitesine, FC (Fuel Cell) ünitesine, PV ünitesine ve lineer yüklere sahiptir. Optimal YFK için mikro şebekenin doğrusallaştırılmış modeli Şekil 1'de görülmektedir. Ayrıca bu bölümde her birimin matematiksel modellenmesi kısaca sunulmuştur (Barik ve Das, 2018).



Şekil 1. YFK için önerilen yenilenebilir mikro şebekenin blok diyagramı

2.1.1 PV ünitesi

PV ünitesi, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren PV panel dizilerinden oluşmaktadır. PV ünitesinin düşük frekans alan analizi için doğrusallaştırılmış transfer fonksiyonu Eşitlik 1. de verilmiştir.

$$G_{PV}(s) = \frac{1}{1 + sT_{PV}} \quad (1)$$

2.1.2 MHTG ünitesi

Atık su bazlı MHTG ünitesinin doğrusallaştırılmış transfer fonksiyon modeli, hız regülatörü, cebri boru ve hidro türbin fonksiyonları göz önünde bulundurularak geleneksel düşük düşü hidroelektrik üretim sistemine referansla Eşitlik 2. de verilmiştir.

$$G_{MHTG}(s) = \left(\frac{1}{1 + sT_{HG}} \right) \left(\frac{1 + sT_{RS}}{1 + sT_{RH}} \right) \left(\frac{1 - sT_{HT}}{1 + 0.5sT_{HT}} \right) \quad (2)$$

2.1.3 BCHP ünitesi

Katı atık bazlı BCHP ünitesinin doğrusallaştırılmış transfer fonksiyonu modeli, hız regülatörü, yeniden ısıtıcı ve buhar türbini fonksiyonları göz önünde bulundurularak geleneksel fosil yakıtlı termik üretim sistemine referansla Eşitlik 3. de gösterilmiştir.

$$G_{BCHP}(s) = \left(\frac{1}{1 + sT_{BSG}} \right) \left(\frac{1 + sK_{BR}T_{BR}}{1 + sT_{BR}} \right) \left(\frac{1}{1 + 0.5sT_{BCT}} \right) \quad (3)$$

2.1.4 AE ve FC üniteleri

AE ünitesi, Hidrojen (H₂) gazları üretmek için yoğun olmayan saatlerde mikro şebekenin fazla gücünü çeker. Bu H₂ gazları, yoğun saatlerde güç üretmek için FC ünitesinde yakıt olarak kullanılmak

üzere depolanır. AE ve FC birimlerinin doğrusallaştırılmış transfer fonksiyon modelleri sırasıyla Eşitlik 4. ve Eşitlik 5. de verilmiştir.

$$G_{AE}(s) = \frac{1}{1 + sT_{AE}} \quad (4)$$

$$G_{FC}(s) = \frac{1}{1 + sT_{FC}} \quad (5)$$

2.2 Sistem Dinamiği ve Generatör Modeli

Önerilen sistem için herhangi bir anda güçteki net değişim, Eşitlik 6. daki gibi ifade edilebilir;

$$\Delta P_e = P_{PV} + P_{MHTG} + P_{BCHP} + P_{FC} - P_{AE} - P_L \quad (6)$$

Burada, karşılık gelen alt simge, ilgili birimler için gücü tanımlar ve mikro şebekenin genel sistemi için eşdeğer generatör dinamiği modeli Eşitlik 7. ile formüle edilebilir.

$$\frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{1}{D + sM} = G_{SYS}(s) \quad (7)$$

2.3 Amaç Fonksiyonu

Güç sistemleri incelendiğinde bunların analiz ve tasarımı içerisinde kontrolörün performansını belirleyen indeksler kullanılmaktadır. Burada özellikle sistem değişkenlerinin farklı kombinasyonlarının kullanılmasıyla birçok performans indeksi oluşturulabilmektedir. Bunların içerisinde en yaygın olarak kullanılanları ise ISE, IAE, ITSE ve ITAE indeksleridir (Kılıç ve Özdemir, 2019). ITAE'ye ait hesaplama formülü Eşitlik 8.de verilmiştir.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (8)$$

Önerilen sistem iki kontrolörden oluşmaktadır; Kontrolör1, MHTG ve BCHP birimlerinin güç çıkışını kontrol ederken, Kontrolör2, AE ve FC birimlerinin işlevlerini kontrol etmektedir. Amaç fonksiyonu, önerilen sistem için PID kontrolör parametrelerini ayarlamak için ITAE kriteri dikkate alınarak formüle edilmiştir.

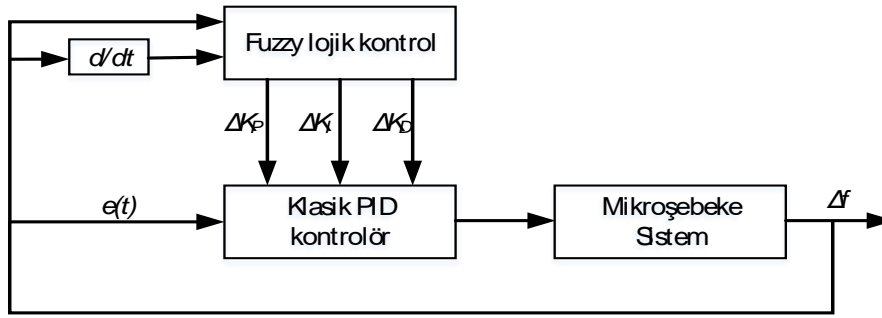
Önerilen mikro şebeke sisteme ait parametre değerleri aşağıdaki Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Önerilen biyoyenilenebilir mikro şebeke sisteme ait parametre değerleri

Semboller	Değerleri
T_{PV}	1.8s
T_{HG}, T_{HT}	0.2s, 1.0s
T_{RS}, T_{RH}	5s, 28.75s
T_{BSG}, T_{BCT}	0.08s, 0.3s
K_{BR}, T_{BR}	0.3, 10s
T_{FC}, T_{AE}	4s, 0.5s
M, D, R	0.2, 0.012, 2.4

2.4 Kontrolör Yapısı

Kural tabanlı fuzzy küme teorisi, sistemleri tasarlamada ve takip etmesi kolay dilsel gösterimde gözlemleri ifade etmede daha fazla esneklik sağlar. Ayrıca, girişleri ve çıkışları arasında doğrusal ilişki olmayan sistemler için fuzzy mantık kapalı çevrim kontrol uygulamalarında kontrolör parametrelerinin ayarlanmasında daha iyi performans gösterir. Klasik kontrolörler, orantısal, integral ve türev terimleri için sabit kazanç değerine sahip hataların girdileri temelinde çalışır. Bu nedenle, doğrusal olmayan ve karmaşık sistemler için kontrolör performansı beklenen düzeyde değildir. Sabit kazanç yerine orantısal, integral ve türev terimleri için dinamik kazanç değeri dahil edilmeye çalışılabilir. Bir klasik PID kontrol yapısındaki kazancı dinamik olarak değiştirmek, kontrolör performansını artıracak ve yük değişimi ve harici rahatsızlıklar sırasında sistem çıkışını hızlı bir şekilde kararlı duruma getirecektir. Bu hususlar göz önünde bulundurularak, bu çalışmada, klasik PID kontrol şeması ile birleştirilmiş bir fuzzy mantık yapısı önerilmiştir. FPID (Fuzzy PID) kontrol yapısı, PID kontrolör ile kural tabanlı fuzzy denetimin bir birleşimidir. Bu kontrol stratejisinde FLC (Fuzzy Logic Control), orantısal, integral ve türev terimlerinin ölçekleme faktörünü elde etmek için sistem hatası ve türev hatası girdilerini kullanmak üzere tasarlanmıştır. Bu ölçekleme faktörlerini kullanarak, kontrolör kazanç büyüklüğü her örnekleme periyodunda güncellenecektir. Tipik bir FPID kontrol yapısının çerçevesi Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Fuzzy PID kontrolörünün blok diyagramı

Önerilen kontrol yapısında FLC, hata ve hatanın türevi girdilerini kullanır ve orantısal, integral ve türev terimleri için ölçekleme faktörünü hesaplar ve daha sonra bu değerler klasik PID kontrolörünün kazanç parametrelerini güncellemek için kullanılır. Dolayısıyla, klasik PID denetleyicisi için k_p , k_I ve k_D 'nin nihai kazanç değerleri aşağıdaki ifadeden hesaplanır:

$$k_p = K_p + \Delta K_p \quad (9)$$

$$k_I = K_I + \Delta K_I \quad (10)$$

$$k_D = K_D + \Delta K_D \quad (11)$$

Burada K_p , K_I ve K_D klasik PID kontrolörün başlangıç değerleridir. ΔK_p , ΔK_I ve ΔK_D ise fuzzy lojik kontrol tarafından hesaplanan ölçeklendirme faktörleridir. Giriş ve çıkış fuzzy kümeleri için üçgen üyelik fonksiyonları kullanılmış ve Mamdani tipi fuzzy çıkarım sistemi uygulanmıştır. Girdiler ve kesin çıktı üretmek için üç üyelik fonksiyonu, çıktılar için ise beş üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Her bir çıktı için kullanılan kural tabanı Çizelge 2'de gösterilmektedir. Bu çizelgede N (Negatif), S (Sıfır), P (Pozitif), NK (Negatif küçük), NB (Negatif büyük), PK (Pozitif küçük) ve PB (Pozitif büyük) dil değişkenlerini ifade eder. Her bir durumun girdileri ve çıktıları arasındaki ilişki, Şekil 3'te yüzey

görünümünde gösterilmektedir. Yüzey görünümü, ölçekleme faktörü değerinin giriş hatasına ve hata büyüklüğündeki değişikliğe bağlı olarak nasıl değişebileceğini belirtir (Al-Dhaifallah ve ark., 2018).

Çizelge 2. Fuzzy dilsel kural tabanı ve yüzey görünümü

		Δe		
$\Delta K_p e$		N	S	P
N		NB	NK	S
S		NB	NK	NK
P		PK	PK	PB

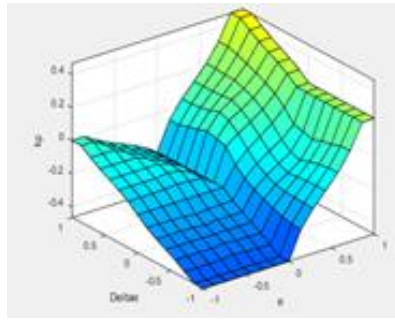
a)

		Δe		
$\Delta K_I e$		N	S	P
N		NB	NK	NK
S		NK	S	PK
P		S	PK	PB

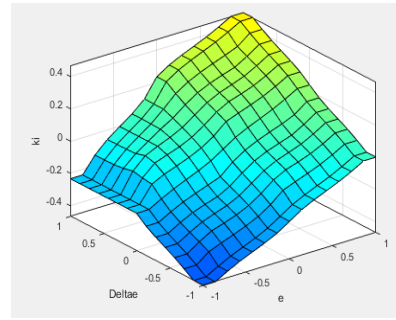
b)

		Δe		
$\Delta K_D e$		N	S	P
N		NK	NK	S
S		S	S	PK
P		S	PK	PK

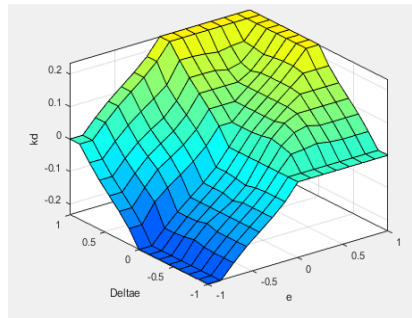
c)



a)



b)



c)

Şekil 3. Girişe karşı çıkış için yüzey görünümleri. a) ΔK_p b) ΔK_I c) ΔK_D

2.5 Sezgisel Optimizasyon Algoritmaları

Dünyada teknolojinin gelişmesiyle birlikte bilgi kullanım miktarının arttığı ve buna bağlı olarak problemlerin çok boyutlu hale geldikleri görülmektedir. Bu nedenle problemleri çözme hızı büyük önem kazanmıştır. Bilim adamları problemlerin en uygun ve hızlı çözümünü bulmak için sürekli

çalışmakta ve yeni yöntemler geliştirmektedir. Optimizasyon kavramı bu çalışmalar sonucu ortaya çıkmış ve kullanılmaya başlanmıştır.

Klasik optimizasyon algoritmalarının çok boyutlu çalışmalarda ve karmaşık problemlerin çözümünde yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu nedenlerden dolayı sezgisel algoritmalara yönelim söz konusu olmuş ve çalışmalar yapılmıştır. Sezgisel algoritmalar kullanılan metaforlara göre farklı açılardan sınıflandırılabilir. Bu metaforlara örnekler şu şekilde sıralanabilir;

- Doğadan ilham alan algoritmalar (PSO, KKA)
- Sosyal olaylardan esinlenen algoritmalar (Tabu arama, LŞA)
- Politik olarak esinlenen algoritmalar (Yayılmacı rekabet algoritması)

Doğadan esinlenilmiş olan algoritmalar incelendiğinde bunlarda genel yakınsama, doğadaki fiziksel ve ekolojik işlemler ile algoritmanın kendi optimizasyon mekanizmalarının simülasyonu yoluyla gerçekleştirilmektedir. Bunun sonucunda da etkin sonuçlar elde edilmektedir (Karaboga, 2005; Husseinzadeh, 2009).

2.5.1 Lig Şampiyonası Algoritması (LŞA)

Bir metasezgisel algoritma olan LŞA, spor liglerindeki şampiyonluk sürecinden esinlenerek geliştirilmiştir (Husseinzadeh, 2009). Yapay spor takımları, yapay bir ligde sezon sonuna kadar mücadele ederler (iterasyon). Numaralandırılan takım çiftleri haftalık lig programına bağlı olarak oynarlar ve sonuçlar kazanan, kaybeden ve beraberlik olarak belirlenir. Her takımın geliştirilmeyi hedeflediği oyun gücü, takımın kazanıp kaybetmesini yakından belirleyen bir faktördür. Takımlar, belirli takım formasyonuna/düzenlemesine (çözüme) sahiptirler ve bir sonraki oyunu kazanabilmek için bir önceki oyun tarzında yapılması gereken değişiklikleri (yeni bir çözüm) yaparlar. Böylece şampiyona sezon sonuna (durma koşuluna) kadar devam eder. Popülasyona dayalı bir algoritma olan LŞA'da takımlar PSO'daki parçacıklara benzemekle beraber çok farklı arama yoluna sahiptirler. Bireylerin karşılaştırılmasına odaklanan LŞA, arama fikrini içeriye ve dışarıya doğru etkileyerek kazanacak veya kaybedecek bireyleri belirler. Böylece daha iyi çözüme sahip takımın kazanma oranının daha büyük olması sağlanır. Bu şekilde arama doğrultusunun kazanan takıma yaklaşması ve kaybeden takımdan uzaklaşması beklenir (Husseinzadeh, 2009; Özdemir ve ark., 2017; Bingöl ve Alataş, 2015; Yıldırım, 2021).

2.5.2 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

PSO 1995 yılında James Kennedy ve Russel Eberhart tarafından kuş ve balık sürülerinin besin bulma davranışlarından esinlenerek geliştirilen sürü zekâsına dayalı bir optimizasyon algoritması olarak tanımlanmaktadır (Kennedy ve Eberhard, 1995).

Bu optimizasyonda sürünün her bir bireyinin çözüm uzayında dolaştığı görülmektedir. Burada görülen her bir parçacığın optimizasyon probleminin birer aday çözümünü gösterdiği belirlenmiştir. Optimizasyonun, arama uzayında tüm parçacıkların rasgele bir konum alması sonucunda başladığı görülmektedir. Burada devam eden adımlar incelendiğinde parçacıkların, komşularının en iyi koordinatları ile kendi en iyi koordinatlarına göre pozisyonlarını güncellendikleri görülmektedir. Burada en iyi sonucun bulunması için arama işleminin bu şekilde devam edeceği belirlenmiştir.

2.5.3 Karınca Koloni Algoritması

KKA; meta sezgisel bir algoritma olup popülasyon temelli bir yaklaşım olarak görülmektedir. Karınca kolonisi algoritmasının temel ilkeleri ilk olarak Marco Dorigo ve arkadaşları tarafından özellikle ayrık optimizasyon problemlerini çözmek için ortaya konulmuştur. Bu algoritma, karınca kolonilerinin salgıladıkları feromon hormonu yardımıyla yiyecek kaynakları ile yuvaları arasındaki en kısa yolu bulmalarından esinlenerek oluşturulmuş olan bir tekniktir (Dorigo ve ark., 1999).

Dorigo; karınca kolonilerinin davranışlarının matematiksel modelleri üzerine dayandığı algoritmasını ilk kez gezgin satıcı problemi üzerinde uygulayarak olumlu sonuçlar elde ettiğini göstermiştir. Bunun sonucunda karınca kolonisi algoritmaları diğer araştırmacılar tarafından kullanılmaya başlanılmış ve günümüzde yaygın olarak kullanılan bir yapay zekâ tekniği haline gelmiştir (Dorigo ve Gambardella, 1997).

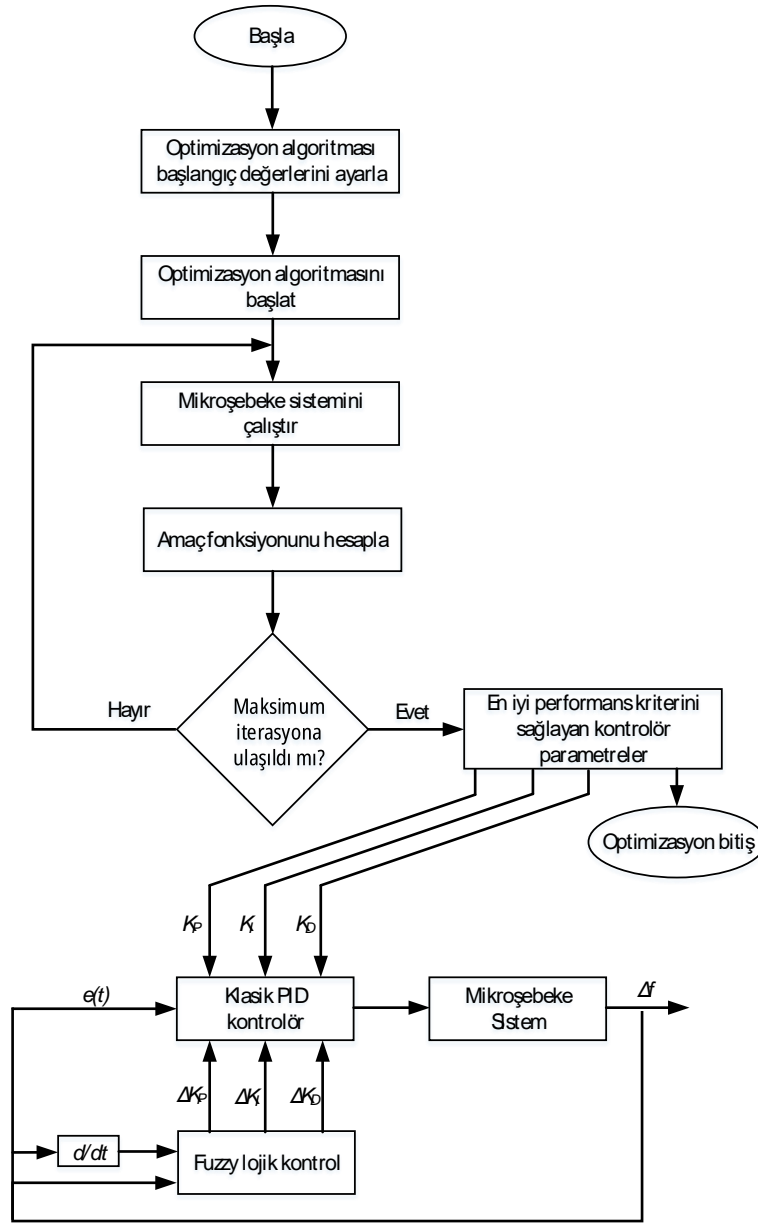
Bu makalede mikro şebeke sistemin YFK işlemini gerçekleştiren kontrol yapısına ait genel akış şeması şekil 4'te verilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 PSO ile Optimize Edilen Klasik PID ve Fuzzy PID Kontrolör

Bu bölümde PSO kullanılarak mikro şebeke sistemde YFK için kullanılan Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörlerin en iyi frekans yanıtını veren parametre değerlerinin hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar yardımı ile mikro şebeke sistemde YFK'de klasik PID kontrolör ve fuzzy PID kontrolörün sonuçları karşılaştırılmıştır. Analiz çalışmalarında sisteme $t=30$ sn.'de $\Delta P=0.1$ p.u.'luk bir yük değişikliği uygulanmıştır. Mikro şebeke sistem için klasik PID ve fuzzy PID kontrolörlere ait elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.'de PSO ile optimizasyon işlemi gerçekleştirilen Klasik PID kontrolör için mikro şebeke sisteme ait frekansın zamana göre değişimi gösterilmiştir. Burada optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen en iyi ITAE performans kriteri için elde edilen PID kontrolör parametrelerine ait değerler Çizelge 3.'de verilmiştir. Benzer biçimde Şekil 5'te ise PSO ile optimizasyon işlemi gerçekleştirilen hem klasik PID hem de Fuzzy PID kontrolör için mikro şebeke sisteme ait frekansın zaman göre değişimleri gösterilmiştir.

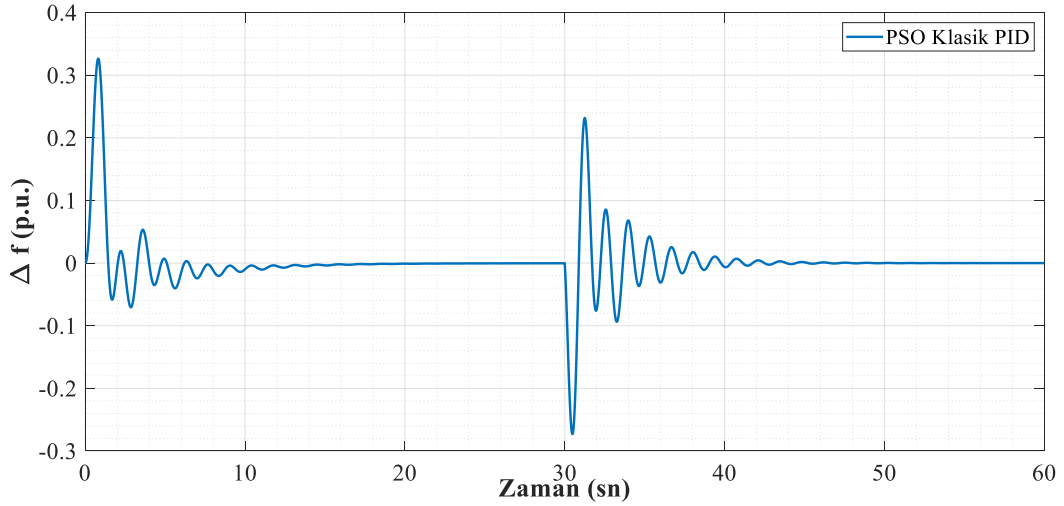


Şekil 4. Mikro şebeke sistem YFK şeması

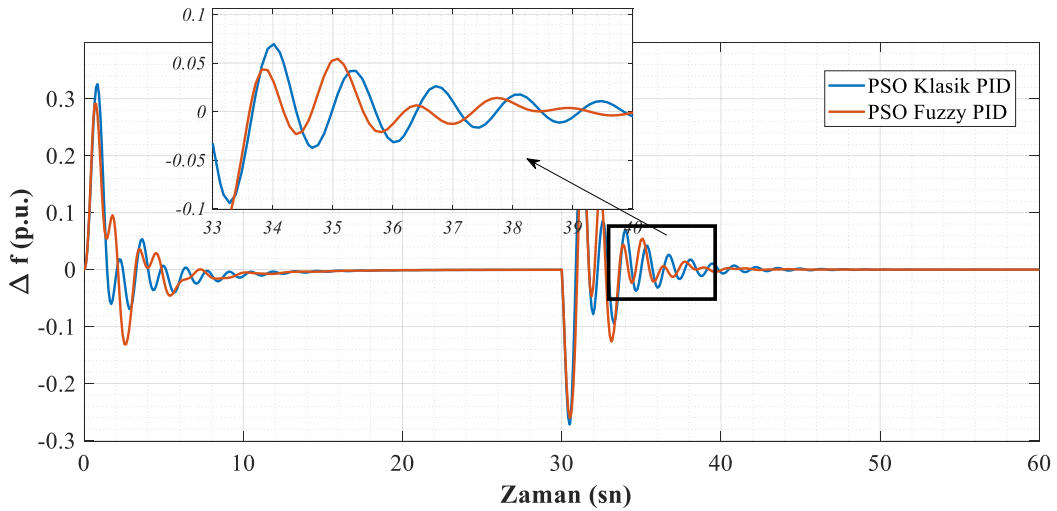
Çizelge 3. PSO için Kontrolör 1 ve Kontrolör 2 ye ait parametre değerleri

Kp1	1.38668534	1. kontrolör Kp değeri
Ki1	3.00947908	1. kontrolör Ki değeri
Kd1	0.85619338	1. kontrolör Kd değeri
Kp2	8.28458295	2. kontrolör Kp değeri
Ki2	-35.11750388	2. kontrolör Ki değeri
Kd2	-24.19755357	2. kontrolör Kd değeri

Şekil 5. ve Şekil 6.'da verilen frekansın zamana göre değişimleri karşılaştırıldığı zaman genel olarak Fuzzy PID kontrolör bulunan sistemin frekans yanıtı dinamik olarak daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Şekiller incelendiğinde Fuzzy PID kontrolörlü sistemin hem maksimum aşma yönünden hem de sürekli duruma erişme zamanı açısından daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir.



Şekil 5. PSO klasik PID için frekansın zamana göre değişimi



Şekil 6. PSO klasik PID ve fuzzy PID için frekansın zamana göre değişimi

Çizelge 4. PSO için Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörler ile elde edilen performans verilerinin karşılaştırılması

Kontrolör	Tepe değeri	Yerleşme zamanı	ITAE	Sürekli durum hatası
Klasik PID	0.2731	40.92	17.8984	0.0073
Fuzzy PID	0.2637	38.05	17.4987	0.002

Çizelge 4.'de Klasik PID kontrolöre sahip mikro şebeke sistem ile Fuzzy PID kontrolöre sahip mikro şebeke sistemlerde frekans değişimi için hesaplanan performans verilerine ait değerler verilmiştir. Burada tepe değeri, yerleşme zamanı ve sürekli durum hata değeri 30. sn'de gerçekleştirilen yük değişimi sonrasında ait değerlerdir. ITAE değeri ise t=0'dan simülasyon sonuna kadar süredeki hataya aittir. Yerleşme zamanı, frekans yanıtının sürekli durum değerinin belirli bir yüzdesine ulaşması için geçen süreyi ifade eder ve bu değer küçük olması sistemin dinamik yanıtının daha iyi olduğunu göstermektedir. Tepe değeri, yanıtın sürekli durum değeri ile ulaştığı maksimum değer arasındaki farkı gösterir ve bu değer küçük olması istenmektedir. Sürekli durum hatası ise analiz sonunda yanıtın sürekli durum değerinde hata değerini gösterir ve yine bu değer küçük olması sistemin yanıtının iyi olduğunu göstermektedir. ITAE performans kriter değerleri karşılaştırıldığı zaman Fuzzy PID kontrolöre sahip sistemin ITAE performans kriter

değerinin daha küçük olduğu görülmüştür. Performans kriter değerinin küçük olması bu kontrolöre sahip mikro şebeke sistemin performansının daha iyi olduğunu göstermektedir. Burada elde edilen değerler ayrıca yukarıda açıklanan maksimum aşma ve yerleşme zamanı gibi diğer dinamik analiz sonuçları ile uygundur. Ayrıca sürekli durumdaki hata değerleri karşılaştırıldığı zaman Fuzzy PID kontrolör kullanılması durumunda daha düşük bir sürekli durum hatası elde edildiği görülmektedir. Yukarıda gösterilen veriler sonucunda mikro şebeke sistemde PSO ile parametre değerleri belirlenen Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörlerin kullanımı açısından Fuzzy PID kontrolör kullanımının sistemde daha iyi bir dinamik yanıt sağlayacağı sonucuna varılmıştır. Bulanık mantık kullanan Fuzzy PID kontrol şemasındaki çevrimiçi kazanç modifikasyonu nedeniyle, oransal, integral ve türev terimlerinin kazanç faktörü, kontrolörün daha iyi performans göstermesini sağlayacak şekilde her örnekleme zamanında güncellenir. Buradaki analiz sonuçlarından, Fuzzy PID kontrolörünün bu çalışmada verilen mikro şebeke sistemin YFK için daha uygun olduğu rahatlıkla söylenebilir.

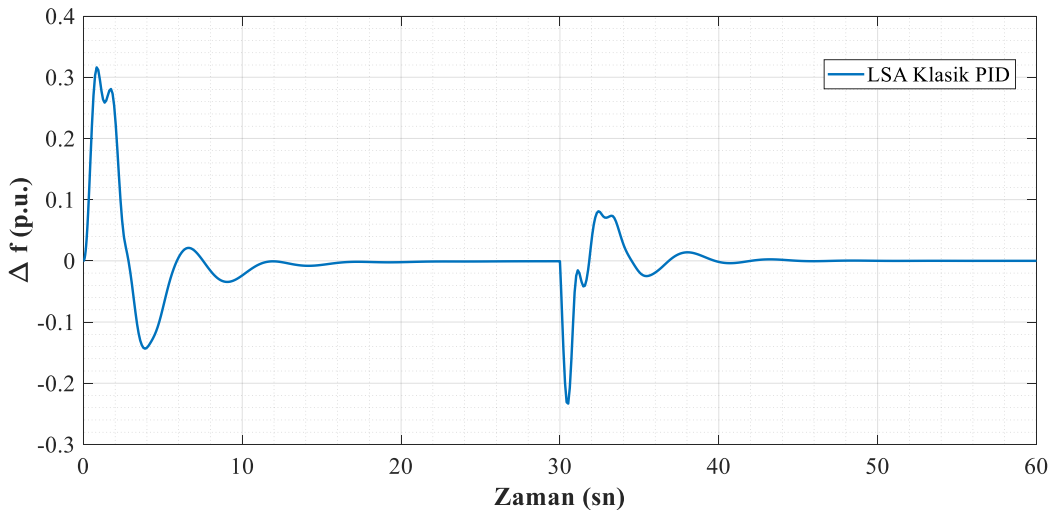
3.2 LŞA ile Optimize Edilen Klasik PID ve Fuzzy PID Kontrolör

Bu bölümde biyoyenilebilir mikro şebeke sistemin YFK için kullanılan kontrolörlerin parametre değerlerinin belirlenmesinde LŞA kullanılmıştır. Yapılan analizlere ait elde edilen sonuçlar yukarıda verilen bölüme uygun şekilde LŞA için de gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5 de kontrolörlere ait parametre değerleri verilirken Çizelge 6'da ITAE performans kriteri için elde edilen sonuçlar verilmiştir.

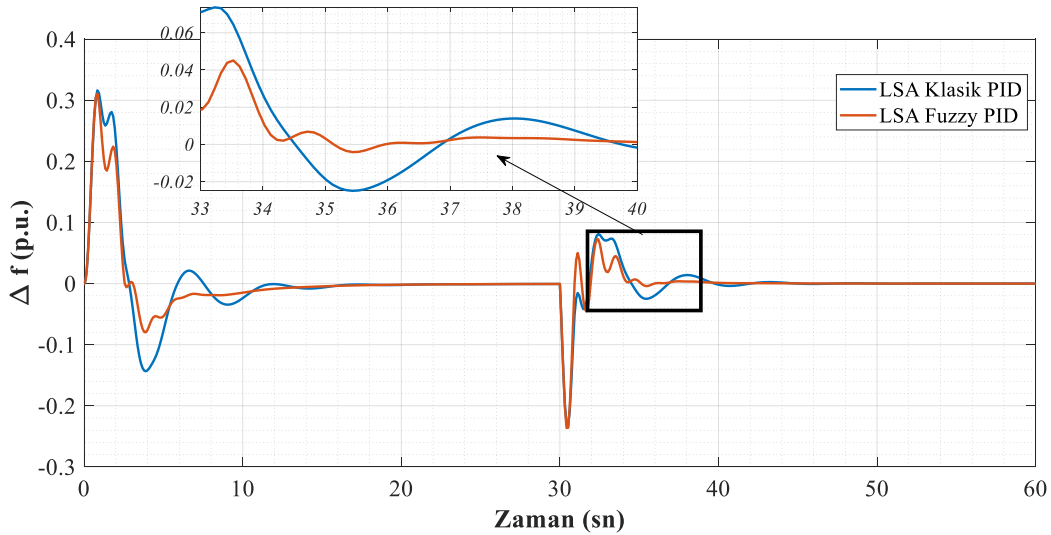
Çizelge 5. LŞA için Kontrolör 1 ve 2 ye ait parametre değerleri

Kp1	0.65980542	1. kontrolör Kp değeri
Ki1	1.54979079	1. kontrolör Ki değeri
Kd1	0.90730012	1. kontrolör Kd değeri
Kp2	1.54664092	2. kontrolör Kp değeri
Ki2	5.78725279	2. kontrolör Ki değeri
Kd2	-6.99802265	2. kontrolör Kd değeri

Şekil 7 ve 8'de verilen frekansın zamana göre değişimleri karşılaştırıldığı zaman genel olarak Fuzzy PID kontrolör bulunan sistemin frekans yanıtı dinamik olarak daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Şekiller incelendiğinde Fuzzy PID kontrolörlü sistemin hem maksimum aşma yönünden hem de sürekli duruma erişme zamanı açısından daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir.



Şekil 7. LŞA Klasik PID için frekansın zamana göre değişimi



Şekil 8. LŞA Klasik PID ve fuzzy PID için frekansın zamana göre değişimi

Çizelge 6. LŞA için Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörler ile elde edilen performans verilerinin karşılaştırılması

Kontrolör	Tepe değeri	Yerleşme zamanı	ITAE	Sürekli durum hatası
Klasik PID	0.2333	39.2628	15.9513	0.0004
Fuzzy PID	0.2362	34.92	11.3876	0.00006

Çizelge 6.'da Klasik PID kontrolöre sahip mikro şebeke sistem ve Fuzzy PID kontrolöre sahip mikro şebeke sistemlerde frekans değişimi için hesaplanan performans verilerine ait değerler verilmiştir. Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolöre sahip sistemlere ait ITAE performans kriter değerleri karşılaştırıldığı zaman Fuzzy PID kontrolöre sahip sistemin ITAE performans kriter değerinin daha küçük olduğu görülmüştür. Burada Fuzzy PID kontrolör yapısı kullanılması maksimum aşma yönünden klasik PID kontrolöre göre daha kötü bir performansa sahip iken yerleşme zamanı açısından sisteme önemli bir iyileştirme gerçekleştirmiştir. Ayrıca sürekli durum hatası değerleri incelendiği zaman sistemde bu açıdan da Fuzzy PID kontrolör yapısının kullanılması önemli bir iyileştirme sağlamıştır. Yukarıda elde edilen veriler sonucunda mikro şebeke sistemde LŞA ile parametre değerleri belirlenen Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörlerin kullanımı açısından Fuzzy PID kontrolör kullanımının sistemde daha iyi bir dinamik yanıt sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

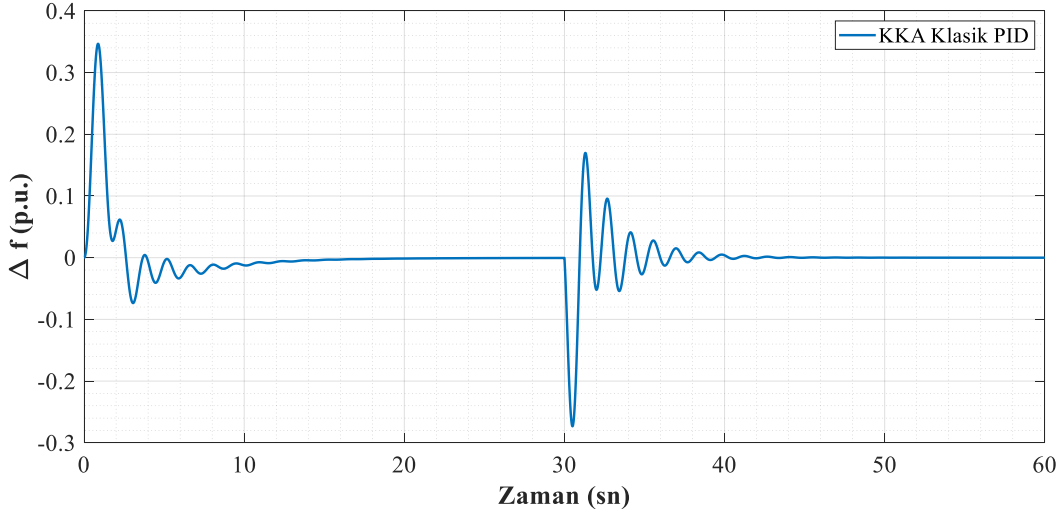
3.3 KKA ile Optimize Edilen Klasik PID ve Fuzzy PID Kontrolör

Bu bölümde biyoyenilebilir mikro şebeke sistemin YFK için kullanılan kontrolörlerin parametre değerlerinin belirlenmesinde KKA kullanılmıştır. Yapılan analizlere ait elde edilen sonuçlar yukarıda verilen bölüme uygun şekilde KKA için de gerçekleştirilmiştir. Çizelge 7'de kontrolörlere ait parametre değerleri verilirken Çizelge 8'de ITAE performans kriteri için elde edilen sonuçlar verilmiştir.

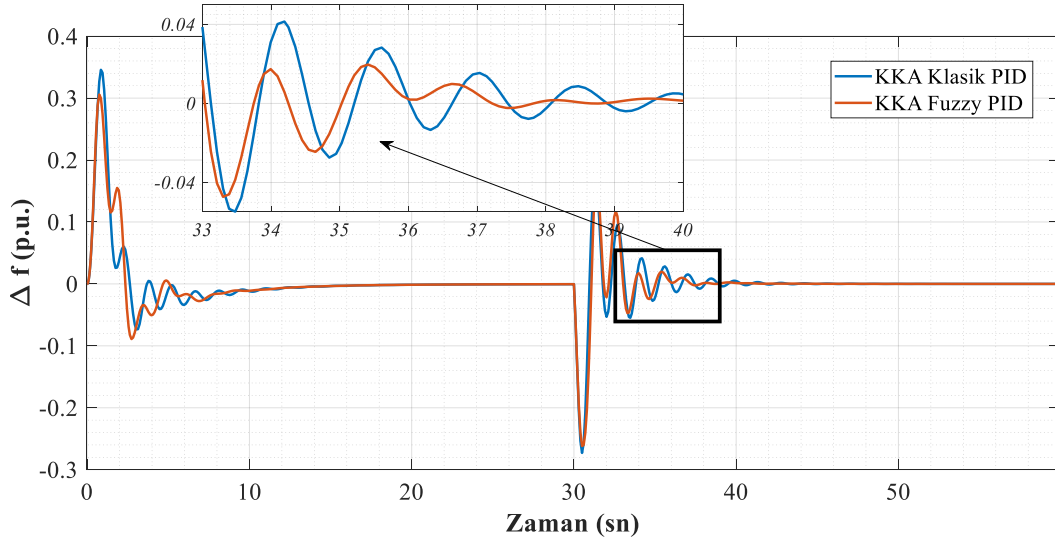
Çizelge 7. KKA için Kontrolör 1 ve 2 ye ait parametre değerleri

Kp1	1.24242424	1. kontrolör Kp değeri
Ki1	2	1. kontrolör Ki değeri
Kd1	0.75757575	1. kontrolör Kd değeri
Kp2	2	2. kontrolör Kp değeri
Ki2	2	2. kontrolör Ki değeri
Kd2	-1	2. kontrolör Kd değeri

Şekil 9 ve 10’da verilen frekansın zamana göre değişimleri karşılaştırıldığı zaman genel olarak Fuzzy PID kontrolör bulunan sistemin frekans yanıtı dinamik olarak daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Şekiller incelendiğinde Fuzzy PID kontrolörlü sistemin hem maksimum aşma yönünden hem de sürekli duruma erişme zamanı açısından daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir.



Şekil 9. KKA Klasik PID için frekansın zamana göre değişimi



Şekil 10. KKA Klasik PID ve fuzzy PID için frekansın zamana göre değişimi

Çizelge 8. KKA için Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörler ile elde edilen performans verilerinin karşılaştırılması

Kontrolör	Tepe değeri	Yerleşme zamanı	ITAE	Sürekli durum hatası
Klasik PID	0.2733	38.64	15.1015	0.0021
Fuzzy PID	0.2604	36.95	14.6865	0.00026

Çizelge 8.'de Klasik PID kontrolöre sahip mikro şebeke sistem ve Fuzzy PID kontrolöre sahip mikro şebeke sistemlerde frekans değişimi için hesaplanan performans verilerine ait değerler verilmiştir. Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolöre sahip sistemlere ait ITAE performans kriter değerleri karşılaştırıldığı zaman Fuzzy PID kontrolöre sahip sistemin ITAE performans kriter değerinin daha küçük olduğu görülmüştür. Burada elde edilen değerler ayrıca yukarıda açıklanan maksimum aşma

ve yerleşme zamanı gibi diğer dinamik analiz sonuçları ile uygundur. Sürekli durum hatası performans değerine göre karşılaştırma yapıldığı zaman Fuzzy PID kontrolör kullanımı sistemi önemli ölçüde iyileştirmektedir. Yukarıda elde edilen veriler sonucunda mikro şebeke sistemde KKA ile parametre değerleri belirlenen Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörlerin kullanımı açısından Fuzzy PID kontrolör kullanımının sistemde daha iyi bir dinamik yanıt sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

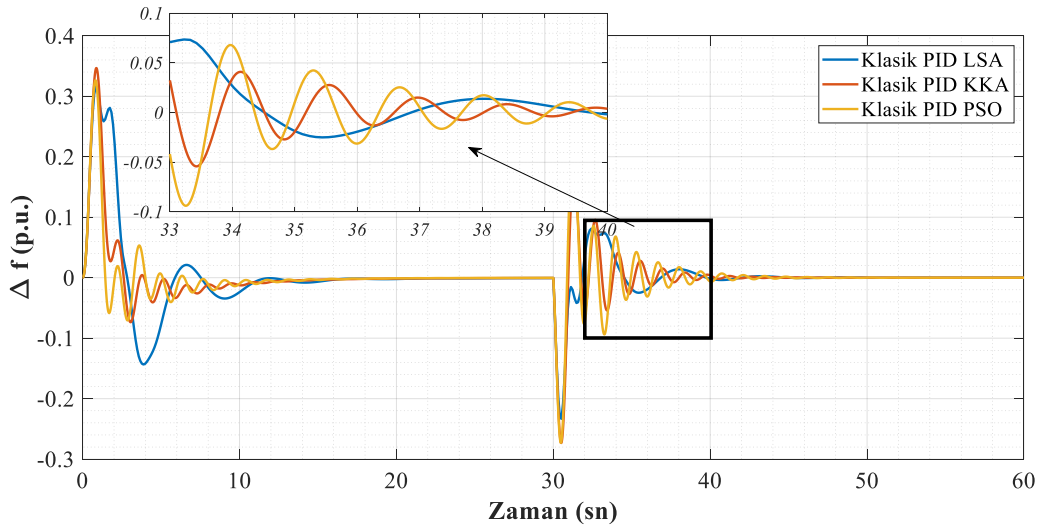
3.4 PSO, LŞA ve KKA için Klasik ve Fuzzy PID Kontrolör Yanıtlarının Karşılaştırılması

Biyoyenilebilir mikro şebeke sistemi, ITAE maliyet fonksiyonu kullanılarak hem Klasik PID kontrolör hem de Fuzzy PID kontrolör durumları için 3 farklı optimizasyon algoritması ile ayrı ayrı optimize edilmiştir. Bu bölümde bu işlemlere ait elde edilen şekiller ve değerler verilmiştir. Burada çizelge 9 ve 10'daki tepe değeri, yerleşme zamanı ve sürekli durum hata değerleri 30. sn'de gerçekleştirilen yük değişimi sonrasında ait değerlerdir. ITAE değeri ise t=0'dan simülasyon sonuna kadar süredeki hataya aittir.

Çizelge 9. Klasik PID için LŞA, KKA ve PSO ile elde edilen performans verilerinin karşılaştırılması

Optimizasyon yöntemi	Tepe değeri	Yerleşme zamanı	ITAE	Sürekli durum hatası
LŞA	0.2333	39.2628	15.9513	0.0004
KKA	0.2733	38.64	15.1015	0.0021
PSO	0.2731	40.92	17.8984	0.0073

Çizelge 9'da mikro şebeke sistemde YFK işleminin bir klasik PID kontrolör tarafından gerçekleştirildiği duruma ait performans veri değerleri verilmiştir. Çizelge 9'un verileri incelendiği zaman en iyi maliyet değeri KKA için elde edilirken en kötü sonuç PSO algoritmasında elde edilmiştir. En iyi tepe ve sürekli durum hata değeri LŞA ile elde edilirken en iyi yerleşme zamanı değeri ise KKA ile elde edilmiştir.



Şekil 11. Klasik PID LŞA, KKA ve PSO için frekansın zamana göre değişimi

Şekil 11'de 3 farklı optimizasyon yöntemleri ile parametre değerleri optimize edilen klasik PID kontrolör için mikro şebekenin frekansının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde ilk 10 sn. lik frekans değişimi esnasında her ne kadar LŞA ile optimize edilmiş sistemin frekans

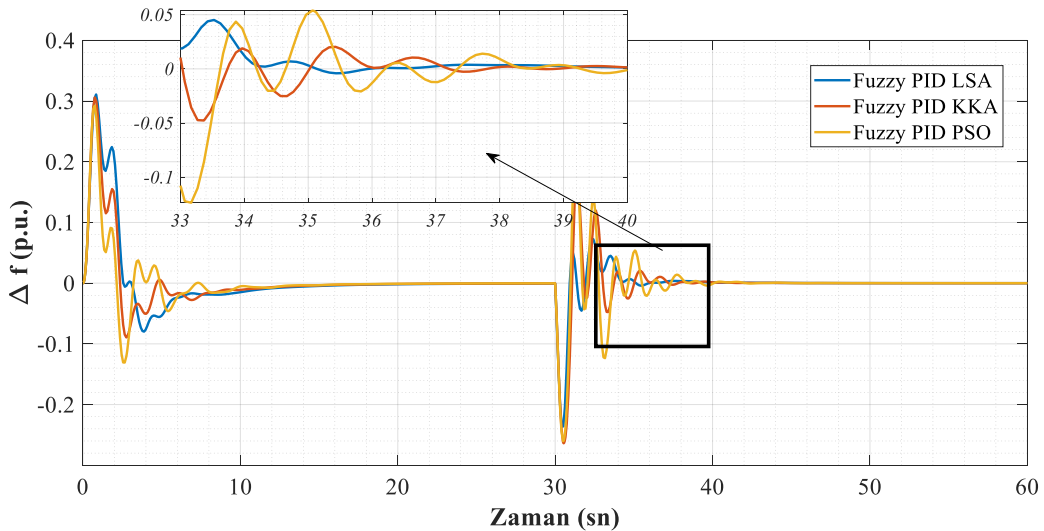
değişimi negatif yönde büyük bir aşma gerçekleştirmişse de genel olarak sistemin daha az salınma sahip olması ve özellikle 30. sn'de meydana gelen yük değişimi sonrası göstermiş olduğu daha iyi bir dinamik cevap nedeniyle PSO'ya göre daha düşük bir ITAE performans değerine sahiptir. Şekilde ayrıca KKA ve PSO ile optimize edilen sistemler için frekans değişimleri incelendiği zaman elde edilen sonuçların Çizelge 9 değerleri ile uygun olduğu görülmektedir. Şekil 11'de görüleceği üzere klasik PID kontrolörler KKA algoritması ile elde edilen değerlere sahip iken en iyi dinamik zaman yanıtına sahiptir.

Çizelge 10. Fuzzy PID için LŞA, KKA ve PSO ile elde edilen performans verilerinin karşılaştırılması

Optimizasyon yöntemi	Tepe değeri	Yerleşme zamanı	ITAE	Sürekli durum hatası
LŞA	0.2362	34.92	11.3876	0.00006
KKA	0.2604	36.95	14.6865	0.00026
PSO	0.2637	38.05	17.4987	0.002

Çizelge 10'da mikro şebeke sistemde YFK işleminin bir Fuzzy PID kontrolör tarafından gerçekleştirildiği duruma ait ITAE performans kriter değerleri verilmiştir. Çizelge 10'un verileri incelendiği zaman en iyi maliyet değeri LŞA için elde edilirken en kötü sonuç PSO için elde edilmiştir. En iyi tepe, sürekli durum hata değeri ve yerleşme zamanı değeri LŞA ile elde edilmiştir.

Şekil 12'de 3 farklı optimizasyon yöntemleri ile parametre değerleri optimize edilen Fuzzy PID kontrolör için mikro şebekenin frekansının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Şekil incelendiği zaman hem ilk 10 sn. lik frekans değişimi esnasında hem de 30. sn'de meydana gelen yük değişimi sonrasında en iyi dinamik cevap LŞA ile optimize edilen sisteme aittir. Şekilde ayrıca KKA ve PSO ile optimize edilen sistemler için frekans değişimleri incelendiği zaman elde edilen sonuçların Çizelge 10 değerleri ile uygun olduğu görülmektedir. Şekil 12'de görüleceği üzere Fuzzy PID kontrolör LŞA ile elde edilen değerlere sahip iken en iyi dinamik zaman yanıtına sahiptir.



Şekil 12. Fuzzy PID LŞA, KKA ve PSO için frekansın zamana göre değişimi

4. SONUÇ

Yapmış olduğumuz bu çalışmada biyoyenilenebilir enerji tabanlı mikro şebekelerde YFK için klasik PID kontrolör ile fuzzy PID kontrolör sonuçları karşılaştırılarak incelenmiştir. Bu çalışmada, klasik PID kontrolör ve fuzzy PID kontrolörün en uygun parametre değerlerinin belirlenmesi için

LŞA, KKA ve PSO algoritmaları kullanılmıştır. Farklı optimizasyon algoritmaları ile en uygun parametre değerlerinin belirlenmesi için ITAE maliyet fonksiyonundan yararlanılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, klasik PID ve fuzzy PID kontrolöre sahip sistemlerin frekans yanıtları karşılaştırıldığında 3 farklı optimizasyon algoritması için fuzzy PID kontrolör daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlar hem frekansın zamana göre değişimleri hem de performans veri değerleriyle gösterilmiştir. Fuzzy PID kontrol yapısı klasik PID kontrol yapısına göre LŞA ile elde edilen kontrolör parametre değerleri durumunda ITAE performans kriterinde %28,61, PSO optimizasyon değerleri için %2.23 ve KKA optimizasyon değerleri için %2.74 oranında daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Fuzzy PID kontrol yapısının bulanık mantık sistemi, çevrimiçi kazanç ayarlama mekanizması aracılığıyla kontrolör performansını artırmaktadır. Ayrıca çalışma sonuçlarında fuzzy PID kontrolörün parametre değerlerini ayarlamak için en uygun optimizasyon algoritmasının LŞA olduğu belirlenmiştir.

5. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

6. YAZAR KATKISI

Dursun ÖZÜRK, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikirsel içeriğin eleştirel incelenmesi ve son onay ve tam sorumluluk, Burak YILDIRIM, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, makale taslağının oluşturulması, fikirsel içeriğin eleştirel incelenmesi ve son onay ve tam sorumluluk, Gizem DOĞAN, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, fikirsel içeriğin eleştirel incelenmesi ve son onay ve tam sorumluluk kısmında katkıda bulunmuştur.

7. KAYNAKLAR

- Al-Dhaifallah M., Kanagaraj N., Nisar K. S., Fuzzy Fractional-Order PID Controller for Fractional Model of Pneumatic Pressure System. *Mathematical Problems in Engineering* 2018, 5478781, 2018.
- Barik A. K., Das D. C., Active power management of isolated renewable microgrid generating power from Rooftop solar arrays, sewage waters and solid urban wastes of a smart city using Salp swarm algorithm, *Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP)*, Bhubaneswar, India, March 28-30, 2018, pp: 1-6.
- Barik A. K., Das D. C., Muduli R., Demand Response Supported Optimal Load-Frequency Regulation of Sustainable Energy based Four-Interconnected Unequal Hybrid Microgrids, 2019 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies and Systems (ICSETS), Bhubaneswar, India, March 26-01, 2019, pp: 273-278.
- Barik A. K., Das, D.C., Expeditious frequency control of solar photovoltaic/biogas/biodiesel generator based isolated renewable microgrid using grasshopper optimisation algorithm, *IET Renewable Power Generation* 12(14), 1659-1667, 2018.
- Barik A. K., Das D.C., Coordinated regulation of voltage and load frequency in demand response supported biorenewable cogeneration-based isolated hybrid microgrid with quasi-oppositional

- selfish herd optimization, *International Transactions on Electrical Energy Systems* 30(1), 12176, 2020.
- Baykal N., Beyan T., Bulanık Mantık İlke ve Temelleri, Bıçaklar Kitabevi, Ankara, 2004.
- Bevrani H., Habibi F., Babahajyani P., Watanabe M., Mitani Y., Intelligent frequency control in an AC microgrid: Online PSO-based fuzzy tuning approach, *IEEE Transactions Smart Grid* 3(4), 1935-1944, 2012
- Bingöl H., Alataş B., Metasezgisel Optimizasyon Tekniklerine Spor Tabanlı Yeni Bir Yaklaşım: Lig Şampiyonası Algoritması, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 27(1): 1-11, 2015.
- Dorigo M., Gambardella L. M., Ant Colonies for the Travelling Salesman Problem, *Biosystems*, 43 (2), 73-81, 1997.
- Dorigo M., DiCaro G., Gambardella L. M., Ant Algorithms for Discrete Optimization, in *Artificial Life* 5(2), 137-172, 1999.
- Elkawafi S., Khalil A., Elgaiyar AI., Wang J., Delay-dependent stability of LFC in Microgrid with varying time delays, *22nd International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, Colchester, UK, September 07-08, 2016, pp: 354-359.
- Husseinzadeh K. A., League Championship Algorithm: A New Algorithm for Numerical Function Optimization, *International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition*, Malacca, Malaysia, December 04-07, 2009, pp: 43-48.
- Karaboga D., An idea based on honeybee swarm for numerical optimization, *Technical Report TR06*, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
- Kennedy J., Eberhard R. C., Particle swarm optimization, *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, Australia, November 27-01, 1995, pp: 1942-1948.
- Kılıç E., Özdemir M. T., Güç Sistemlerindeki Optimum Otomatik Gerilim Regülasyonu için Çoklu Amaç Fonksiyonunun Belirlenmesi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi* 10(1), 1-12, 2019.
- Kocaman B., Mikro Şebekeler İçin Örnek Bir Enerji Yönetimi Uygulaması, *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 35-52, 2014.
- Mordjaoui M., Haddad S., Medoued A., Laouafi A., Electric load forecasting by using dynamic neural network. *International Journal of Hydrogen Energy* 42(28), 17655-17663, 2017.
- Özdemir M. T., Öztürk D., Comparative performance analysis of optimal PID parameters tuning based on the optics inspired optimization methods for automatic generation control. *Energies* 10(12), 2134, 2017.
- Özdemir M. T., Yıldırım B., Gülan H., Gençoğlu M. T., Automatic generation control in an AC isolated microgrid using the league championship, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 29(1), 109-120, 2017.
- Parmar K. P. S., Majhi S., Kothari D. P., Load Frequency Control of a realistic power system with multi-source power generation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 42(1), 426-433, 2012.
- Subramanyam M. V., Satyaprasad K., Gopi Krishna Rao P. V., Study on PID Controller Design and Performance Based on Tuning Techniques, *International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, Kanyakumari, India, July 10-11, 2014, pp:1411-1417.
- Tucho G.T., Nonhebel S., Alternative energy supply system to a rural village in Ethiopia, *Energy Sustainability and Society* 7:33, 2017.

- Yıldırım B., Bir Mikro Şebekenin Yük Frekans Kontrolü İçin Tamsayı Derece Yaklaşımlı Kesir Dereceli PID Kontrolörün Optimizasyonu. DÜMF Mühendislik Dergisi 12(1), 79-87, 2021.
- Yıldırım B., 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, 2021.
- Yıldırım B., Gheisarnejad M., Khooban M. H., Delay-Dependent Stability Analysis of Modern Shipboard Microgrids, IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers 68(4), 1693-1705, 2021.