



## Automatic generation controller based on whale optimization algorithm in PV-thermal power systems

Özay Can<sup>1\*</sup>, Hasan Eroğlu<sup>2</sup>, Ali Öztürk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronics and Automation, Technical Sciences Vocational School, Recep Tayyip Erdogan University, 53100, Rize, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Electrical-Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Recep Tayyip Erdogan University, 53100, Rize, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Electrical-Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Düzce University, 81620, Düzce, Türkiye

### Highlights:

- WOA based on the foraging process of whales
- BA-PID controller for AGC in PV-thermal power system
- Remarkable performance of the WOA method

### Keywords:

- Automatic generation control
- Whale optimization algorithm
- PID controller
- PV system
- Frequency deviation

### Article Info:

Research Article

Received: 17.08.2021

Accepted: 23.04.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.984019

### Correspondence:

Author: Özay Can

e-mail:

ozay.can@erdogan.edu.tr

phone: +90 535 926 5013

### Graphical/Tabular Abstract

Automatic generation control (AGC) or load frequency control (LFC) is the process of eliminating the deviations in the system frequency and tie-line power variations due to variable load demands as soon as possible. The schematic diagram for AGC process of PV-thermal power system is shown in Figure A.

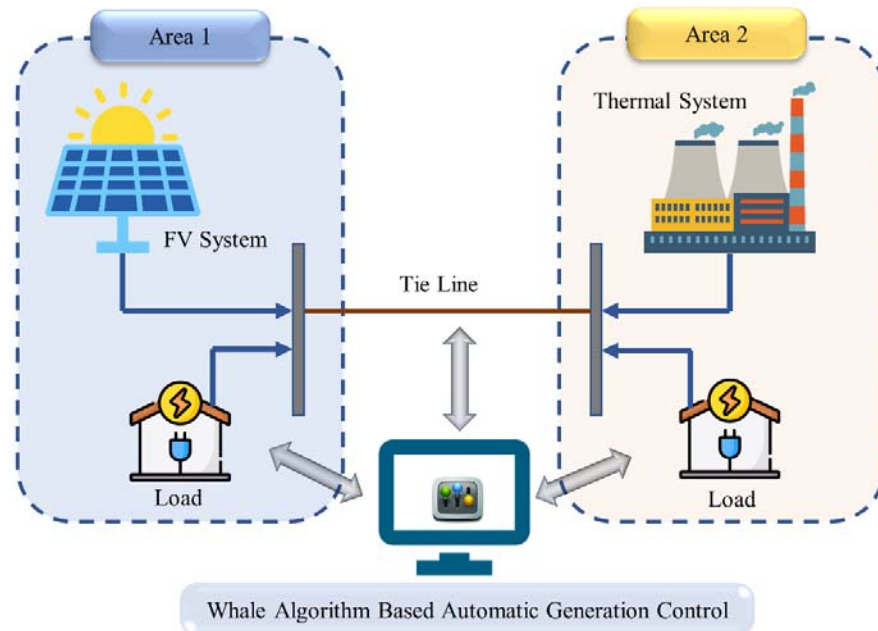


Figure A. The schematic diagram of PV-thermal power system

### Purpose:

In this study, it has been aimed to determine the parameters of the PID controller by using the whale optimization algorithm (WOA) for AGC process in a hybrid system consisting of photovoltaic (PV) system and thermal generator.

### Theory and Methods:

The WOA has been used for the purpose of determining the parameters of the PID controller for the AGC operation of a power system consisting of PV plant and thermal generator.

### Results:

The WOA tuned PID controller achieved an improvement of 75% for both areas in overshoot values and it provided a decrease in settling time by 50% in both areas.

### Conclusion:

Since the proposed controller gives better results than other methods in the literature, this controller can be considered as a reliable method for the AGC operation in such power systems.



## FV-termal güç sistemlerinde balina optimizasyon algoritması tabanlı otomatik üretim kontrolörü

Özay Can<sup>1\*</sup>, Hasan Eroğlu<sup>2</sup>, Ali Öztürk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 53100, Rize, Türkiye

<sup>2</sup>Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 53100, Rize, Türkiye

<sup>3</sup>Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Balinaların avlanma süreci temelli BA
- FV-termal güç sisteminde OÜK için BA-PID kontrolör
- BA yönteminin dikkate değer performansı

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 17.08.2021

Kabul: 23.04.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.984019

### Anahtar Kelimeler:

Otomatik üretim kontrolü,  
balina algoritması,  
PID kontrolör,  
FV sistem,  
frekans sapması

### ÖZ

Güç sistemlerinde üretilen güç ile tüketilen güç arasında denge sağlanması amacıyla otomatik üretim kontrolü (OÜK) adı verilen bir kontrol sürecinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Rüzgâr türbinleri (RT) ve fotovoltaik (FV) paneller gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) kullanımının artması bu süreci daha zor hale getirmektedir. Bu nedenle, OÜK sürecinin daha hassas bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, fotovoltaik (FV) sistem ve termal generatörden meydana gelen hibrit bir güç sisteminde OÜK işlemi için balina algoritması (BA) kullanılarak PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Alan 1 ve Alan 2’de meydana gelen yük değişimleri durumunda amaçlanan BA ayarlı PID kontrolör performansının yeterliliği incelenmiştir. Ayrıca, ateşböceği algoritması (ABA), genetik algoritma (GA) ve aşırı nüfus optimizasyonu (ANO) gibi optimizasyon tekniklerinin performanslarıyla bir karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, çalışmada önerilen BA ayarlı PID kontrolörün, sistem frekansının aşma değeri ve oturma süresi bakımından diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği göstermiştir.

## Automatic generation controller based on whale optimization algorithm in PV-thermal power systems

### H I G H L I G H T S

- WOA based on the foraging process of whales
- BA-PID controller for AGC in PV-thermal power system
- Remarkable performance of the WOA method

### Article Info

Research Article

Received: 17.08.2021

Accepted: 23.04.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.984019

### Keywords:

Automatic generation control,  
whale optimization algorithm,  
PID controller,  
PV system,  
frequency deviation

### ABSTRACT

To ensure a balance between the power generated and the consumed power in power systems, a control process namely automatic generation control (AGC) must be carried out. This process becomes more challenging due to increasing use of renewable energy sources (RES) such as wind turbines (WT) and photovoltaic (PV) panels. Therefore, AGC needs to be performed more sensitively. In this study, it has been aimed to determine the parameters of the PID controller by using the whale optimization algorithm (WOA) for the AGC in a hybrid power system consisting of photovoltaic (PV) system and thermal generator. The performance of WOA tuned PID controller is tested under load change in area-1 and area-2. Additionally, comparisons have been made with the performances of other optimization techniques such as firefly algorithm (FA), genetic algorithm (GA) and population extremal algorithm (PEO). The results obtained indicated that the WOA tuned PID controller proposed in the study gave better results than the other methods in terms of overshoot values and settling time of system frequency.

## 1. Giriş (Introduction)

Çok alanlı enterkonnekte güç sistemlerinde, üretim ve tüketim arasındaki dengenin sağlanması amacıyla hassas bir kontrol sisteminin gerçekleştirilmesi sürecine otomatik üretim kontrolü (OÜK) veya yük frekans kontrolü (YFK) adı verilmektedir. Başka bir ifadeyle, OÜK işleminin ana amacı; tüketici talepleri veya başka bir bozucu etken nedeniyle sistem frekansında ve birbirine bağlı kontrol alanları arasındaki bağlantı hattı güç değişimlerinde meydana gelen salınımları mümkün olan en kısa sürede minimuma indirmektir. Bir enterkonnekte güç sistemi genel olarak, çeşitli enerji kaynaklarının ve kontrol alanlarının bağlantı hatlarıyla birbirine bağlanmasıyla meydana gelmektedir. Dağıtım sistemleri, iletim hatları ve üretim sistemleri güç şebekesinin temel bileşenleridir. Bu bileşenlerin gerçek zamanlı entegrasyonu ve çalışması güç taleplerinde farklılıklara neden olmaktadır. Generatörler tarafından üretilen güç ile tüketici tarafından talep edilen güç arasında bir uyumsuzluk olması durumunda sistem frekansında ve bağlantı hattı gücünde bir değişim meydana gelir. Meydana gelen bu değişimlerin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Aksi takdirde, güç sisteminin çalışması olumsuz etkilenebilir ve hatta sistemde çökmeler meydana gelebilir [1, 2].

Fosil yakıt rezervinin azalması ve yakıt fiyatlarının artması gibi sebeplerden dolayı geleneksel enerji kaynaklarının artan enerji ihtiyacını karşılamak noktasında yetersiz olacağı öngörülmektedir. Bu nedenle, yük talebini karşılamak amacıyla yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) ile geleneksel enerji kaynaklarının entegre edilmesi gerekmektedir. Rüzgâr türbinleri (RT) ve fotovoltaik (FV) paneller başta olmak üzere YEK'ler günümüz güç sisteminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, değişken güneş ışınımı ve rüzgâr hızı gibi YEK'lerin yapısı kaynaklı belirsizlikler sistem frekansının nominal değerinden sapmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, sistem frekansında ve bağlantı hattı güç değişimlerinde meydana gelen sapmaları belirlenen değerler arasında tutmak için OÜK adı verilen bir kontrol süreci gerekmektedir.

Güç sistemlerinde sistem kararlılığını sağlamak amacıyla OÜK konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde, çeşitli evrimsel algoritmaların kullanıldığı görülmektedir. Klasik PI ve PID kontrolörlerin kazançlarının belirlenmesi amacıyla, bakteri arama algoritması (BAA) [3], genetik algoritma (GA) [4], karga arama algoritması (KAA) [5], ateşböceği algoritması (ABA) [4, 6], denge algoritması (DA) [7], balina optimizasyonu (BA) [8], parçacık sürü optimizasyonu (PSO) [9, 10], gri kurt optimizasyonu (GKO) [11], Jaya algoritması [12, 13], yıldırım flaş algoritması (YFA) [14], emperyalist rekabet algoritması (EKA) [15], aşırı nüfus optimizasyonu (ANO) [16] gibi sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Klasik kontrolörlerin yanı sıra alan kontrol hatasını (AKH) azaltmak amacıyla kesir dereceli (FO)PID [17, 18], TIDN [5], I – TD [19], IPD – (1 + I) [20], bulanık mantık [21, 22] gibi kontrolör çeşitleri kullanılmıştır. Abd-Elazim ve Ali tarafından yapılan çalışmada [4] FV ve termal santralin bulunduğu bir güç sisteminde ateşböceği algoritması (ABA) ile PI kontrolör parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kullanılan güç sisteminde OÜK için amaçlanan kontrolör performansı genetik algoritma (GA) ayarlı PI kontrolör performansı ile kıyaslanmıştır. Bilindiği üzere oransal kontrol yükselme zamanını azaltırken sürekli durum hatasını sınırlayamamaktadır. Bunun yanında integral kontrol, sürekli durum hatasını ortadan kaldırırken sistemin geçici cevabını daha zayıf hale getirmektedir. Türev kontrol ise geçici durumu iyileştirme ve aşma değerini azaltma gibi özelliklere sahiptir [23]. Bu nedenle, sistemin geçici cevabını iyileştirme, basit yapısı, düşük maliyeti olması, kararlılık ve hızlı cevap [24] gibi avantajları nedeniyle bu çalışmada PI kontrolör yerine PID kontrolör kullanılmıştır. Yukarıda bahsedilen literatürdeki çalışmalar incelendiğinde OÜK için hassas ve hızlı sonuç

üretiminde daha iyi çözümlerin elde edilmesi önemli bir ihtiyaç olarak karşımıza çıkmaktadır. Literatürde son yıllarda sıklıkla kullanılan BA algoritması basit yapıya sahip oluşu [25], yerel optimumdan kaçınması (local optima avoidance) ve düşük parametre sayısı kullanımı [26] gibi avantajlara sahip olduğu için bu çalışmada tercih edilmiştir. Daha hassas bir kontrol için parametreleri BA ile belirlenen PID tabanlı bir OÜK gerçekleştirilmesi bu çalışmanın ortaya çıkarılmasındaki en önemli motivasyon kaynağıdır.

Bu doğrultuda bu çalışmada, literatürde oldukça yeni olan FV sistem ve ara-ısıtmalı termal generatörden oluşan iki alanlı güç sisteminde OÜK gerçekleştirmek amacıyla PID kontrolör kullanılmıştır. Bu güç sisteminin seçilmesinin nedeni, son yıllarda YEK uygulamalarının güç sistemlerinde kullanımının artması nedeniyle bu alanda yapılan literatürdeki çalışmalara katkı sağlamaktır. Güç sistemindeki kontrolör parametrelerini ayarlamak için BA, amaç fonksiyonu olarak ise integral mutlak hata (IAE) kriteri kullanılmıştır. İlk olarak, FV sistem ve ara-ısıtmalı termal sistemden oluşan iki alanlı bir güç sistemi ele alınmıştır. Kullanılan algoritmanın performansını incelemek amacıyla, sisteme değişken yük talebi uygulanmıştır. Ayrıca, Alan 1 ve Alan 2'deki yük talebinde değişiklik olması durumunda sistem davranışı incelenmiştir. Ayrıca literatürdeki benzer güç sisteminde OÜK için ABA, GA ve ANO gibi yöntemlerin sonuçlarıyla bu çalışma ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile, FV sistem ve ara-ısıtmalı termal sistemden oluşan iki alanlı bir güç sisteminde OÜK işlemi için PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesi amacıyla BA daha güvenilir ve hassas bir alternatif yöntem olarak önerilmiştir. Bu çalışmanın bölümleri şu şekilde organize edilmiştir: Giriş Bölümünden sonra, çalışmada kullanılan güç sistemini oluşturan bileşenler Bölüm 2'de açıklanmıştır. Bölüm 3'te, amaçlanan kontrolör hakkında bilgi verilmiştir. OÜK işlemi için kullanılan optimizasyon yöntemi ise Bölüm 4'te tanıtılmıştır. Yapılan simülasyonların sonuçları Bölüm 5'te gösterilmiştir. Son olarak, Bölüm 6'da çalışma sonuçlandırılmıştır.

## 2. Fv-Termal Güç Sistemi (Pv-Thermal Power System)

Kullanılan optimizasyon yönteminin ve kontrolörün etkinliğini incelemek amacıyla, iki alanlı bir enterkonnekte güç sistemi MATLAB/SIMULINK programı üzerinde oluşturulmuştur. Sistemdeki Alan 1'de bir FV sistem bulunurken Alan 2'de ise ara-ısıtmalı termal sistem bulunmaktadır. Çalışılan güç sisteminin şematik diyagramı ve sistemde yer alan temel bileşenler Şekil 1'de gösterilmiştir. Alan 1'deki FV sistem, panel, maksimum güç noktası takibi (MGNT), evirici ve filtre gibi bileşenlerden meydana gelmektedir. Alan 2'de bulunan termal sistem ise düzenleyici (governer), türbin, ara-ısıtıcı ve güç sistemi olmak üzere dört farklı bileşen içermektedir [13].

FV sistemin transfer fonksiyonu Eş. 1'de verilmiştir [4, 9].

$$G_{PV}(s) = \frac{a+bs}{s^2+cs+d} = \frac{-18s+900}{s^2+100s+50} \quad (1)$$

FV paneller kullanılarak elde edilebilecek gerilim değeri çevresel etkenler nedeniyle değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, FV panellerin tek başına enerji kaynağı olarak kullanılması yük talebinin karşılanamaması ve dolayısıyla frekans değerinde salınımlar meydana gelmesi gibi problemlere neden olmaktadır. Bu problemler, üretilen enerjinin bataryalar yardımıyla depolanması veya başka bir üretim kaynağı ile bağlantılı çalışmasıyla ortadan kaldırılabilir. Mevcut çalışmada batarya kullanmak yerine FV sistem ile termal sistem bağlantılı hale getirilerek olası yük ihtiyaçlarının birbirleri arasında karşılanması sağlanmıştır.

FV sistemi ve maksimum güç noktası takibi ile ilgili eşdeğer modeli Şekil 2’de gösterilmiştir.

Şekil 2a’da  $I_{ph}$  referans akımını,  $R_s$  seri direnci,  $R_{sh}$  ise paralel direnci ifade etmektedir. Çalışmada kullanılan FV modeli bağıntıları Eş. 2 ve Eş. 3 ile verilmiştir.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{sat} \left( e^{\frac{q(V_{PV} + I_{PV}R_s)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + I_{PV}R_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

$$I_{ph} = \left( \frac{\lambda}{1000} \right) [I_{SC} + k_1(T - 25)] \quad (3)$$

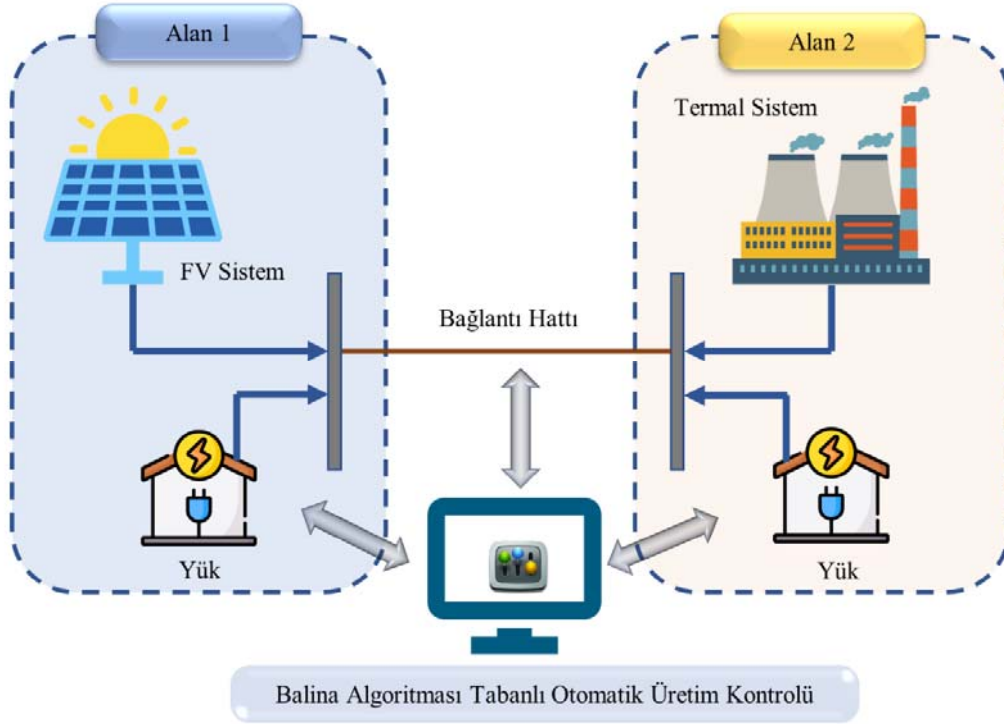
Burada;  $I_{SC}$  kısa devre akımını (A),  $I_{PV}$  fotovoltaik akımı (A),  $I_{ph}$  foto akımı (A),  $I_{sat}$  doyum akımını (A),  $q = 1,602 \times 10^{-19}$  (C),  $R_s$  direnci ( $\Omega$ ),  $\lambda$  ışınım değeri ( $W/m^2$ ) ve T güneş panelinin sıcaklığını ( $^{\circ}C$ ) ifade etmektedir.  $\lambda$  ışınım değerinin  $1000 W/m^2$  olduğu kabul edilmiştir. A idealite faktörü, K Boltzmann katsayısı, KT ( $0,0017 A/^{\circ}C$ ) kısa devre akım sıcaklık katsayısıdır. Sistemde kullanılan

MGNT, Şekil 2b’deki gibi bir arttıran (boost) dönüştürücü kullanılmaktadır. Burada kullanılan U anahtarı açık ve kapalı konumuna sahip bir IGBT diyotundan oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan FV, MGNT sistemi, sıcaklık ve ışınımın I-V ve P-V eğrileri literatürdeki ilgili çalışmalarda [3-5] verilen bilgilere göre kurgulanmıştır.

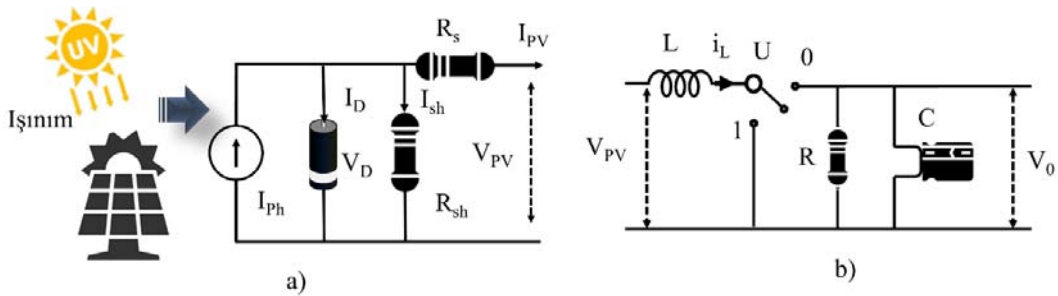
Güç sisteminin transfer fonksiyonu modeli oluşturulurken, kolaylık olması açısından tüm sistem bileşenleri doğrusal bir sistem olarak ele alınır ve birinci dereceden transfer fonksiyonları ile ifade edilmektedir. Termal sistemi oluşturan bileşenlere ait transfer fonksiyonları aşağıda verilmiştir.

Düzenleyiciye ait transfer fonksiyonu Eş. 4’te verilmiştir. Burada;  $K_G$  düzenleyici kazancını;  $T_G$  ise düzenleyicinin zaman sabitini ifade etmektedir.

$$G_G(s) = \frac{K_G}{1+sT_G} \quad (4)$$



Şekil 1. Güç sisteminin şematik diyagramı (The schematic diagram of power system)



Türbin ve ara-ısıtıcıya ait transfer fonksiyonları sırasıyla Eş. 5 ve Eş. 6'da verilmiştir.

$$G_T(s) = \frac{K_T}{1+sT_T} \quad (5)$$

$$G_R(s) = \frac{1+sK_R T_R}{1+sT_R} \quad (6)$$

Burada;  $K_T$  ve  $K_R$  sırasıyla türbinin ve ara-ısıtıcının kazancını;  $T_T$  ve  $T_R$  ise sırasıyla türbinin ve ara-ısıtıcının zaman sabitini ifade etmektedir.

Güç sistemine ait transfer fonksiyonu Eş. 7'de verilmiştir.

$$G_{PS}(s) = \frac{K_{PS}}{1+sT_{PS}} \quad (7)$$

Burada;  $K_{PS}$  güç sisteminin kazancını;  $T_{PS}$  ise güç sisteminin zaman sabitini ifade etmektedir.

Alan 1 için ve Alan 2 için ACE değerleri sırasıyla Eş. 8 ve Eş. 9 ile hesaplanır.

$$ACE_1 = B_1 \cdot \Delta f_1 + \Delta P_{hat} \quad (8)$$

$$ACE_2 = B_2 \cdot \Delta f_2 + \Delta P_{hat} \quad (9)$$

Burada;  $B_1$  ve  $B_2$  frekans bias parametrelerini;

$ACE_1$  ve  $ACE_2$  sırasıyla Alan 1 ve Alan 2 için alan kontrol hatasını;  $\Delta f_1$  ve  $\Delta f_2$  Alan 1 ve Alan 2 için frekans sapmasını ifade etmektedir.

İncelenen iki alanlı güç sisteminin transfer fonksiyonu modeli Şekil 3'te, sistem parametreleri ise Tablo 1'de verilmiştir. Burada;  $R$  Alan 2 için termal santralin regülasyon parametresini;  $\Delta P_{hat}$  bağlantı hattı güç değişimini;  $T_{12}$  ise senkronizasyon katsayısını ifade etmektedir.

**Tablo 1.** Sistem parametreleri [4, 9, 16]  
(System parameters)

Parametre	Değer
$K_{PS}$	120 Hz / pu.MW
$K_R$	0,33 Hz / pu.MW
$T_{PS}$	20 s
$T_R$	10 s
$T_G$	0,08 s
$T_T$	0,3 s
$T_{12}$	0,54 pu.MW / Hz
$B$	0,8 pu.MW / Hz
$R$	2,5 Hz / pu.MW

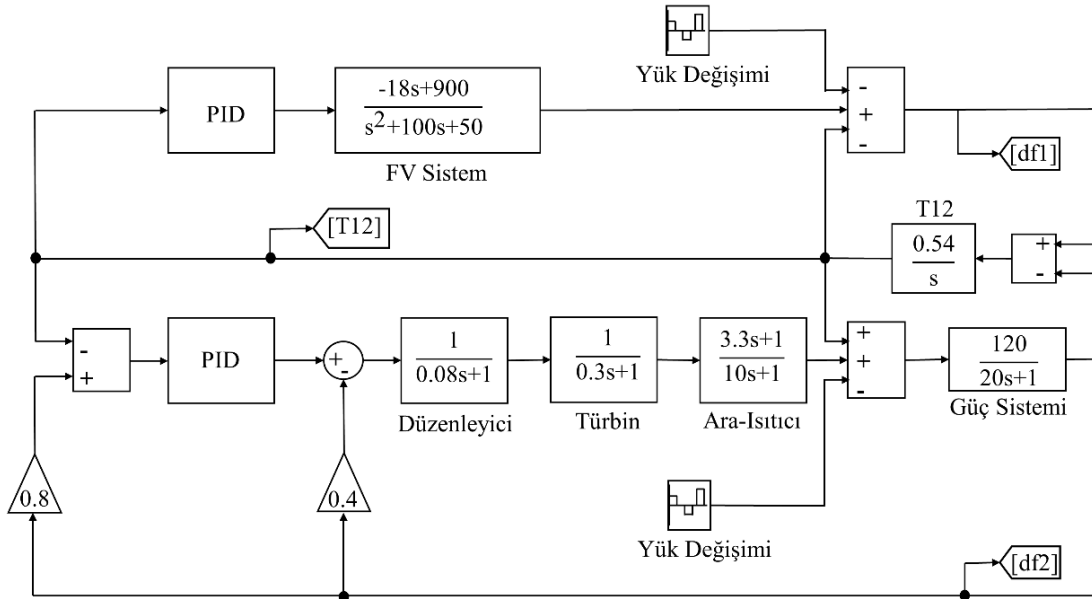
### 3. Optimizasyon Problemi (Optimization Problem)

OÜK işleminin temel amacı, yük değişimleri veya farklı bozucu durumlar nedeniyle sistem frekansında ve kontrol alanları arasındaki yük değişiminde meydana gelen dalgalanmaları mümkün olan en kısa sürede nominal değerler arasına getirmektir. Bu amaca ulaşmak için, maksimum aşma, minimum aşma ve oturma zamanı gibi değerlerin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, frekans sapmalarını daha iyi kontrol edebilmek amacıyla sekonder kontrol döngüsüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, frekans dalgalanmalarının kontrolü için geleneksel PID kontrolör kullanılmıştır.

PID kontrolörün temel yapısı Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, bu kontrolör  $K_P, K_I, K_D$  olmak üzere üç adet ayarlanabilir kazançla sahiptir. Kontrolöre ait transfer fonksiyonu Eş. 10'da verilmiştir.

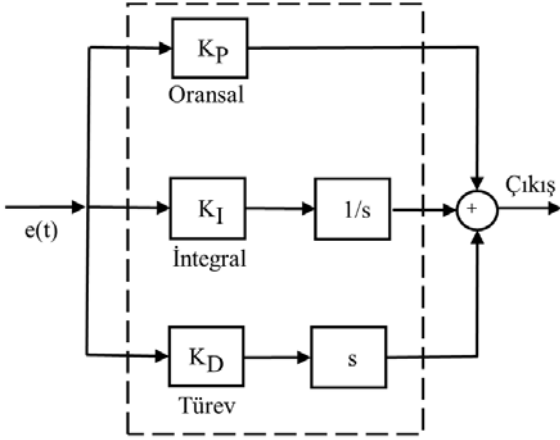
$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (10)$$

Bir optimizasyon problemi çözümlenirken en iyi çözüme ulaşmak adına problem kısıtları belirlenmelidir. Bu çalışmada, [4] numaralı çalışmadaki sonuçlarla daha doğru bir karşılaştırma yapabilmek adına söz konusu çalışmada olduğu gibi minimum ve maksimum sınırlar [-1,1] olmak üzere aşağıdaki kısıtlar dikkate alınır:



**Şekil 3.** Güç sisteminin MATLAB/SIMULINK üzerinde transfer fonksiyonu modeli  
(The transfer function model of power system on MATLAB/SIMULINK)

$$\begin{aligned} K_{Pmin} &\leq K_P \leq K_{Pmax} \\ K_{Imin} &\leq K_I \leq K_{Imax} \\ K_{Dmin} &\leq K_D \leq K_{Dmax} \end{aligned}$$



Şekil 4. PID kontrolörün yapısı (The structure of PID controller)

Kontrol parametrelerini optimize etmek amacıyla kullanılan yöntemlerin etkin performans göstermesi için, amaç fonksiyonun belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada, amaç fonksiyonu olarak her iki alandaki frekans sapmaları ve bağlantı hattı gücü değişiminin mutlak değerinin integrali (IAE) kullanılmıştır. Buna göre, amaç fonksiyonu Eş. 11 ile ifade edilir.

$$J_{obj} = \int_0^{\infty} (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{hat}|) \cdot dt \quad (11)$$

#### 4. Optimizasyon Yöntemi (Optimization Method)

Bu çalışmada, PID kontrolöre ait ayarlanabilir üç adet kontrolör kazancının belirlenmesi amacıyla kullanılan balina algoritması (BA) hakkında bilgi verilmiştir.

##### 4.1 Balina Algoritması – BA (Whale Optimization Algorithm – WOA)

BA, balinaların “kabarcık ağı” adı verilen avlanma metoduyla yiyecek arama sürecini temel alan sürü tabanlı bir optimizasyon algoritmasıdır [27]. Balinalar, avlarının yerini belirleme ve onları çevreleme özelliğine sahiptirler. Başlangıçta, optimum çözüm hakkında bir bilgi olmadığı için algoritma mevcut en iyi aday çözümü hedef veya optimuma yakın olarak kabul eder. En iyi arama ajamı belirlendikten sonra diğer arama ajanları en iyi ajana göre konumlarını güncellerler. Bu davranış Eş. 12 ve Eş. 13 ile ifade edilir.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (12)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (13)$$

Burada;  $t$  mevcut iterasyonu,  $\vec{A}$  ve  $\vec{C}$  katsayı vektörlerini,  $\vec{X}^*(t)$  en iyi çözümün konum vektörünü ve  $\vec{X}$  konum vektörünü temsil etmektedir.

$\vec{A}$  ve  $\vec{C}$  katsayı vektörleri ise Eş. 14 ve Eş. 15 ile hesaplanır.

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (14)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (15)$$

Burada;  $\vec{a}$ 'nın bileşenleri iterasyon ilerledikçe 2'den 0'a doğru lineer olarak azaltılır,  $\vec{r}$  ise [0,1] arasında rastgele bir vektördür.

Balinalar, eşzamanlı olarak spiral şeklinde bir yol boyunca ve küçülen bir daire içinde avının etrafında yüzmektedirler. Bu davranışı

modellemek için, balinaların konum güncellemesi için küçülen daire ile spiral yol arasında seçim olasılığı %50 olarak kabul edilmektedir. Matematiksel model Eş. 16'da gösterilmiştir.

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{if } p < 0,5 \\ \vec{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & \text{if } p \geq 0,5 \end{cases} \quad (16)$$

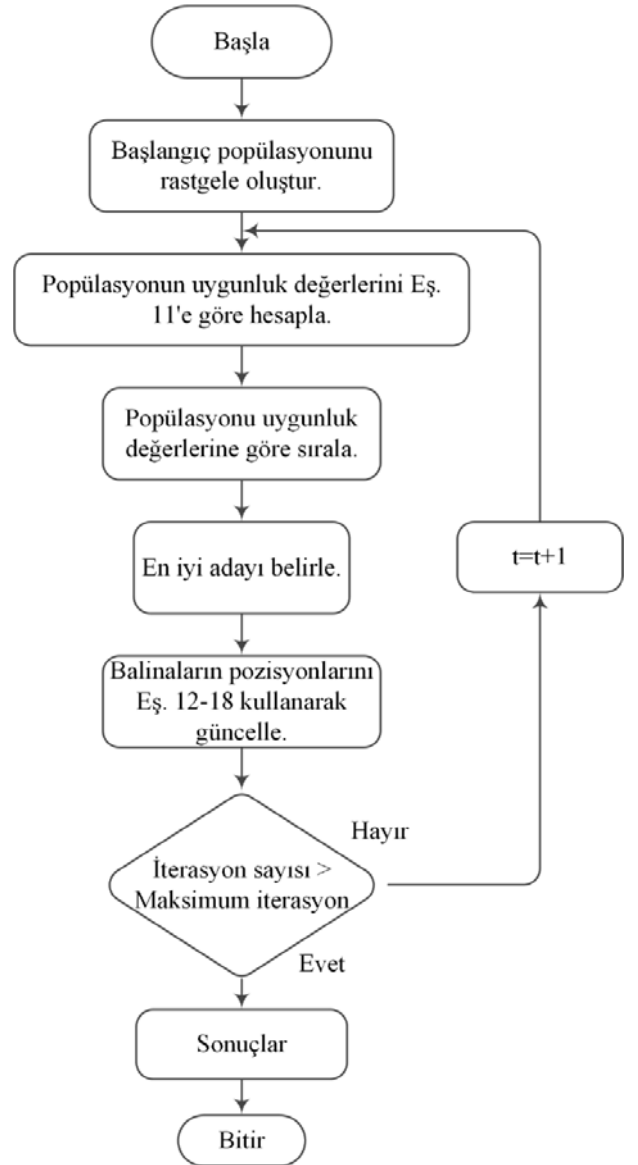
Burada;  $p$  [0,1] aralığında rastgele bir sayıdır.

Bir arama ajanının konumu, o ana kadar bulunan en iyi arama ajanı yerine rastgele seçilen bir arama ajanının konumuna göre güncellenir. Bu durumun matematiksel modeli Eş. 17 ve Eş. 18'de verilmiştir.

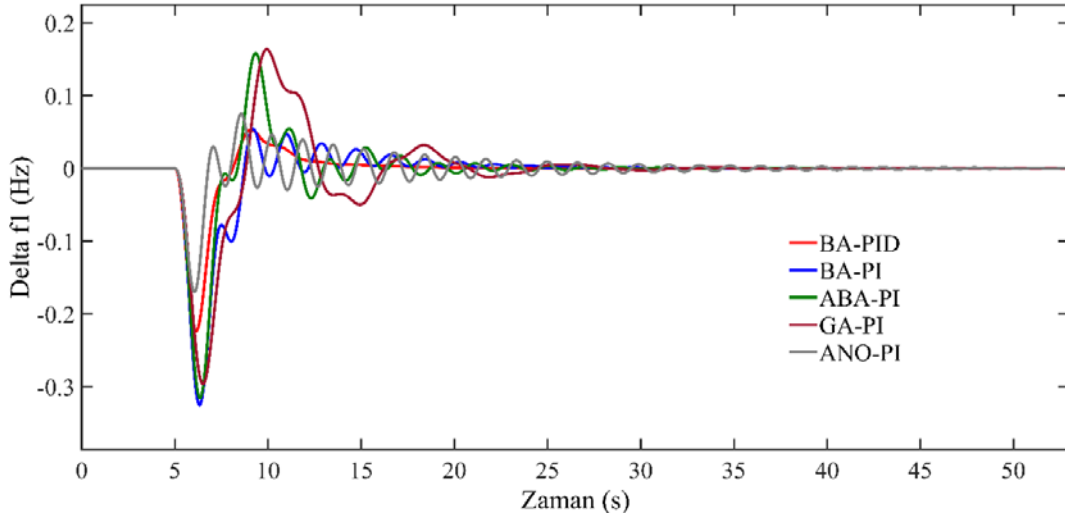
$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{rand} - \vec{X}| \quad (17)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (18)$$

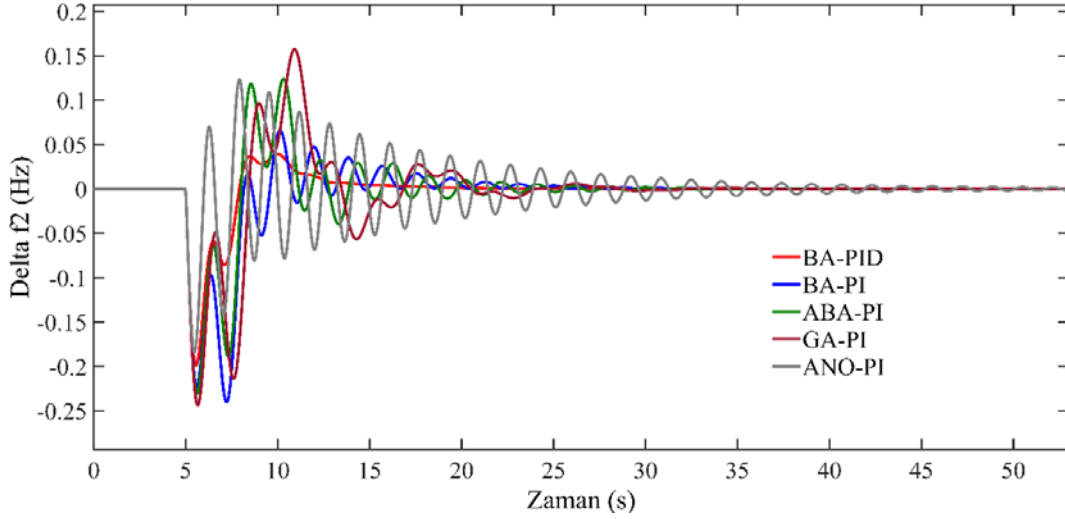
Burada;  $\vec{X}_{rand}$  popülasyon arasından rastgele seçilen konum vektörünü (balinanın konumu) temsil etmektedir. BA algoritmasına ait akış diyagramı Şekil 5'te verilmiştir [25].



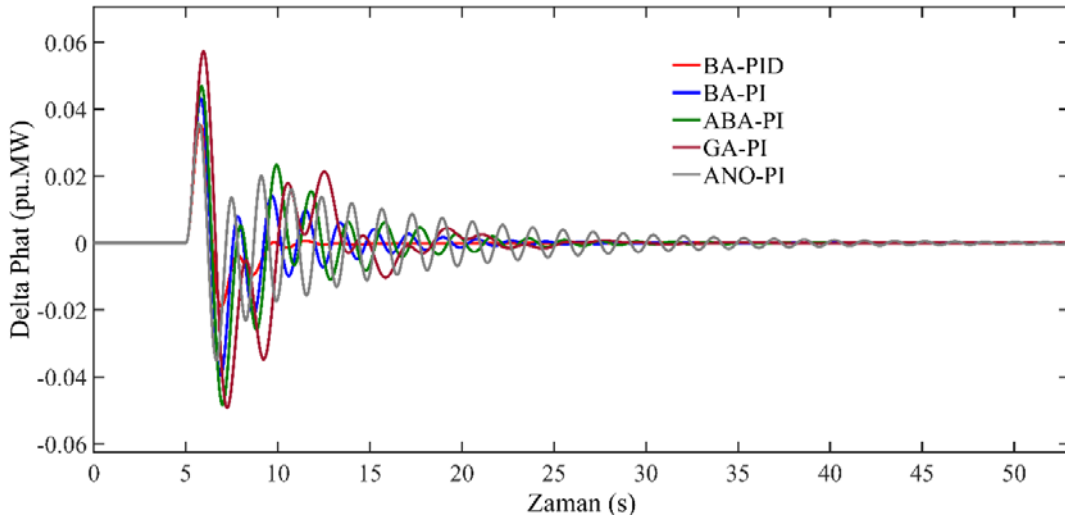
Şekil 5. BA akış diyagramı (The flowchart of the WOA)



Şekil 6. Senaryo I için Alan 1'deki frekans değişimi (The frequency deviation in area-1 for scenario I)



Şekil 7. Senaryo I için Alan 2'deki frekans değişimi (The frequency deviation in area-2 for scenario I)



Şekil 8. Senaryo I için bağlantı hattı güç değişimi (The tie-line power deviation for scenario I)

## 5. Benzetim Çalışmaları ve Bulgular (Simulation Studies and Results)

Çalışmanın bu bölümünde, kullanılan kontrolör ve algoritmanın performansları üç farklı senaryo ele alınarak gerçekleştirilen simülasyon sonuçları kullanılarak değerlendirilecektir. Bu amaçla, PID kontrolör ve iki alanlı güç sistemi MATLAB/SIMULINK programında modellenmiştir. Birinci senaryoda, termal sistemde 0,1 pu değerinde bir yük değişimi olduğu varsayılmıştır. İkinci senaryoda ise termal sistemde 150 s boyunca değişken yük talebi olduğu varsayılmıştır. İlk iki senaryo incelendiğinde sadece yükte değişim olduğu görülmektedir. Daha doğru bir analiz yapmak amacıyla FV sistemde meydana gelen değişimin incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle üçüncü senaryoda, termal sistemdeki yük değişiminin yanı sıra FV sistemde de 0,1 pu'lık bir değişim olduğu varsayılmıştır. Simülasyon, iterasyon sayısı 100, popülasyon sayısı 50 ve kontrolör parametrelerinin alt ve üst sınırları  $[-1,1]$  olacak şekilde çalıştırılmıştır.

### 5.1. Senaryo I: Alan 2'de 0,1 pu Yük Değişimi (Scenario I: 0.1 pu Load Change in Area-2)

Bu senaryoda, simülasyonun 5. saniyesinde termal sistemde 0,1 pu değerinde bir yük değişimi uygulanmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda, Senaryo I için Alan 1'de meydana gelen frekans değişimi, Alan 2'de meydana gelen frekans değişimi ve bağlantı hattı güç değişimi sırasıyla Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere, kullanılan BA-PID yöntemi parametreleri BA, ABA, GA ve ANO gibi yöntemlerle ayarlanmış PI kontrolöre göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

Optimizasyon işleminin sonunda, Senaryo I için belirlenen kontrolör kazanç değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Elde edilen kontrolör kazançlarına göre Senaryo I için performans değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Tablodaki veriler incelendiğinde, kullanılan yöntemin sistem frekansı ve bağlantı hattı güç değişimindeki dalgalanma için daha küçük aşma değerleri ( $M^+$ ,  $M^-$ ) ve daha kısa oturma süresi ( $t_s$ ) sağladığı görülmektedir.

**Tablo 2.** Senaryo I için belirlenen kontrolör kazançları (Obtained controller gains for scenario I)

	Parametre	BA-PID	BA-PI	ABA-PI [4]	GA-PI [4]	ANO-PI [16]
ALAN 1	$K_P$	-1	-1	-0,8811	-0,5663	-0,8749
	$K_I$	-0,108	-0,72066	-0,5765	-0,4024	-0,1373
	$K_D$	-0,103	---	---	---	---
ALAN 2	$K_P$	-1	-1	-0,7626	-0,5127	-1,999
	$K_I$	-1	-0,38964	-0,8327	-0,7256	-1,9487
	$K_D$	-0,134	---	---	---	---

**Tablo 3.** Senaryo I için sistem performans değerleri (Performance values for Scenario I)

Kontrolör Tipi	$t_s$ (s)			$M^+$ (Hz)		$M^+$ (pu. MW)		$M^-$ (Hz)		$M^+$ (pu. MW)
	$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{hat}$	$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{hat}$	$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{hat}$	
BA-PID	9,56	9,9	8,18	0,053	0,039	0,034	0,22	0,19	0,019	
BA-PI	19,87	22,21	21,4	0,0543	0,0657	0,0428	0,325	0,24	0,039	
ABA-PI [4]	25,76	26,91	20,58	0,1495	0,115	0,0459	0,3109	0,2308	0,0460	
GA-PI [4]	30,33	30,25	23,19	0,1576	0,1499	0,0565	0,2941	0,2437	0,0474	
ANO-PI [16]	42,84	49,53	35,2	0,074	0,12	0,073	0,169	0,18	0,035	

### 5.2. Senaryo II: Alan 2'de Değişken Yük Talebi (Scenario II: Random Load Change in Area-2)

Yapılan benzer çalışmada [4], kullanılan algoritmaların performansının değişken yük talebi altındaki davranışının incelenmediği görülmektedir. Bu nedenle, Senaryo II'de, Alan 2'de 150 s boyunca değişken yük talebi olması durumunda sistem davranışı incelenmiştir.

Senaryo II için Alan 1'de meydana gelen frekans değişimi, Alan 2'de meydana gelen frekans değişimi ve bağlantı hattı güç değişimi sırasıyla Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere, kullanılan BA-PID yöntemi BA-PI kontrolöre göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

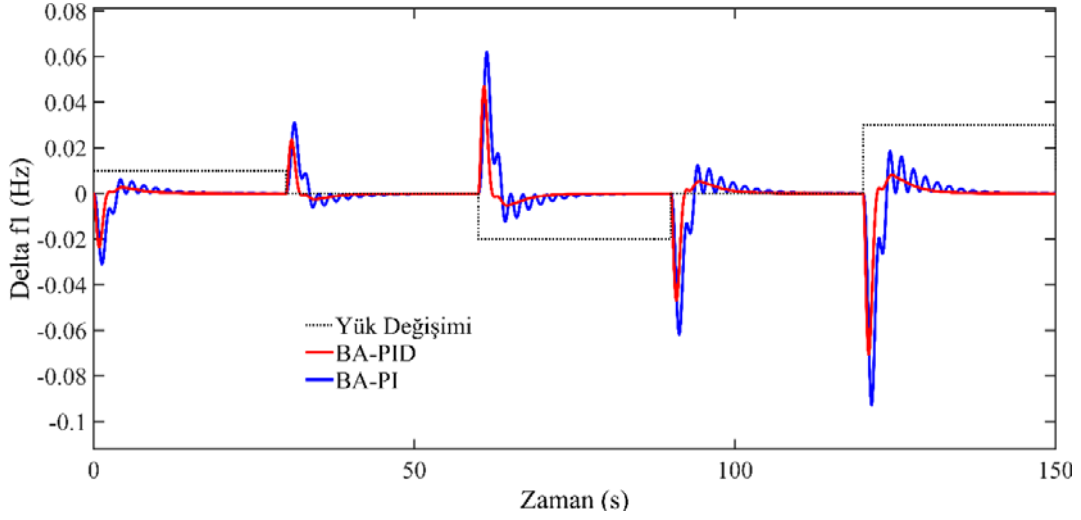
Optimizasyon işleminin sonunda, Senaryo II için belirlenen kontrolör kazanç değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Senaryo II için belirlenen kontrolör kazançları (Obtained controller gains for scenario II)

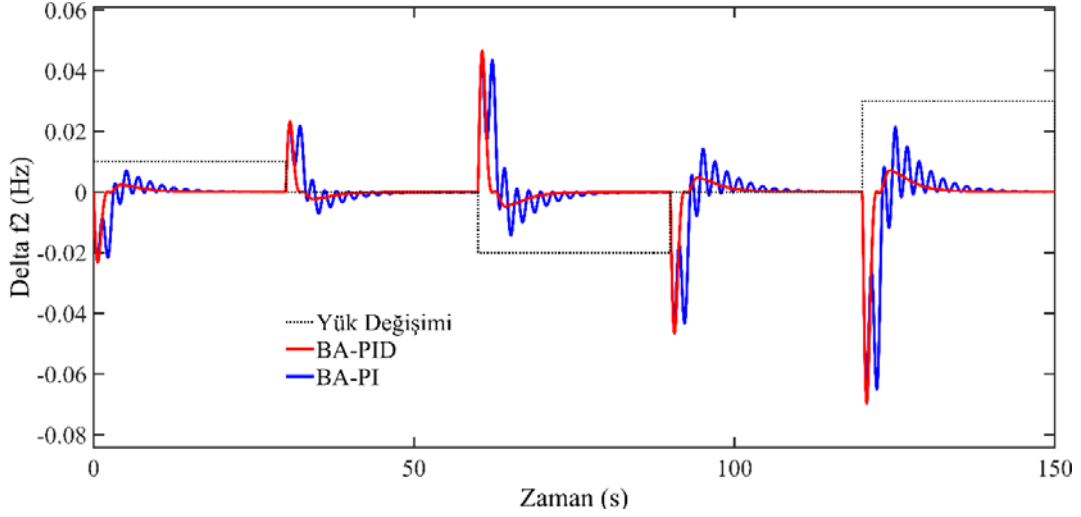
	Parametre	BA-PID	BA-PI
ALAN 1	$K_P$	-1	-1
	$K_I$	-0,14	-0,56351
	$K_D$	-0,84	---
ALAN 2	$K_P$	-1	-1
	$K_I$	-1	-0,4762
	$K_D$	-0,026	---

Elde edilen kontrolör kazançlarına göre Senaryo II için BA yönteminin performans değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Veriler incelendiğinde, değişken yük talebi altında BA-PID kontrolörün BA-PI kontrolöre kıyasla frekans ve bağlantı hattı güç değişimlerinde meydana gelen dalgalanmalarda daha az aşma sağladığı ve bu dalgalanmaları daha kısa sürede sönmülediği görülmektedir.

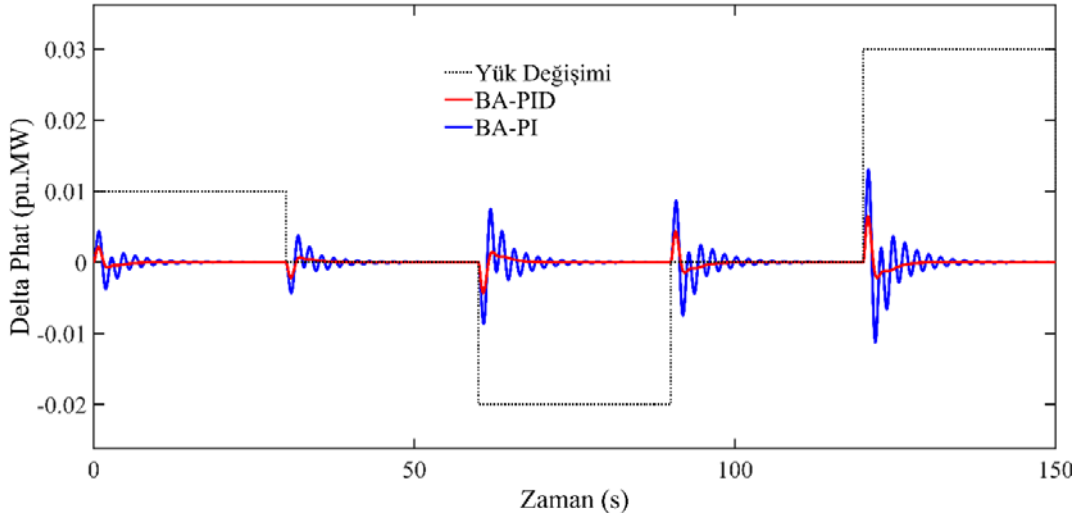




Şekil 9. Senaryo II için Alan 1'deki frekans değişimi (The frequency deviation in area-1 for scenario II)



Şekil 10. Senaryo II için Alan 2'deki frekans değişimi (The frequency deviation in area-2 for scenario II)



Şekil 11. Senaryo II için bağlantı hattı güç değişimi (The tie-line power deviation for scenario II)

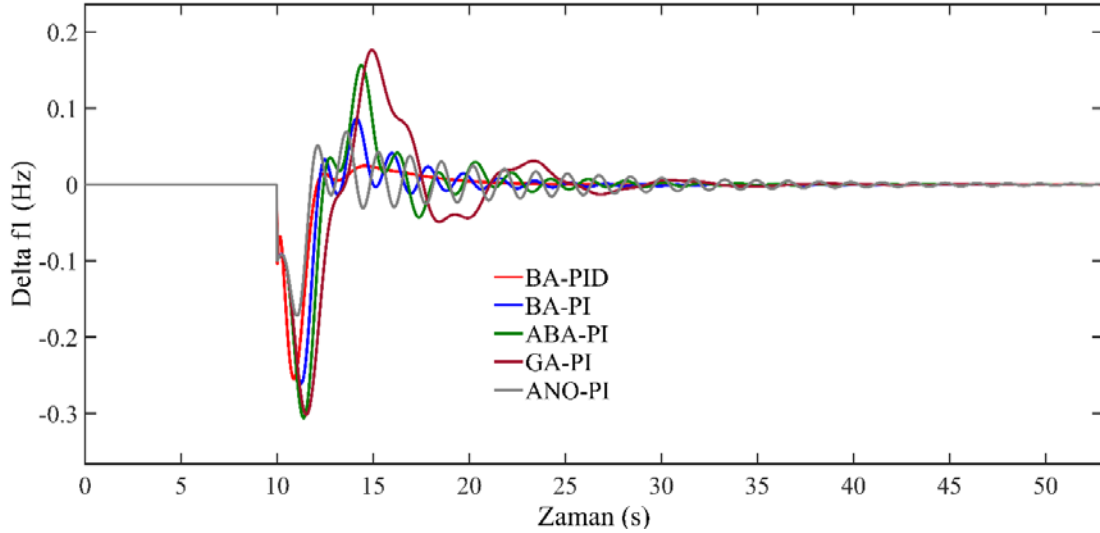
### 5.3. Senaryo III: Her İki Alanda 0,1 pu Yük Değişimi (Scenario III: 0.1 pu Load Change in both areas)

Yapılan analizin daha etkili olması amacıyla FV sistemin ışınım değerinde meydana gelen değişimin incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, simülasyonun 10. saniyesinde termal sistemdeki yük değişiminin yanı sıra FV sistemde de 0,1 pu'lık bir değişim olduğu varsayılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda, Senaryo III için Alan 1'de meydana gelen frekans değişimi, Alan 2'de meydana gelen frekans değişimi ve bağlantı hattı güç değişimi sırasıyla Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'te verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere, kullanılan BA-PID yöntemi parametreleri BA, ABA, GA ve ANO

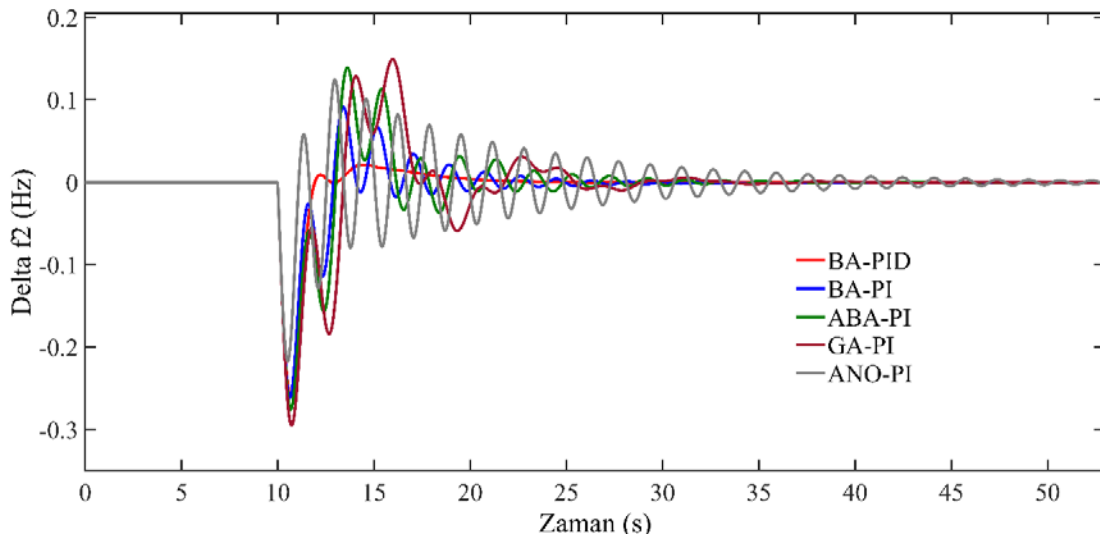
gibi yöntemlerle ayarlanmış PI kontrolöre göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Optimizasyon işleminin sonunda, Senaryo III için belirlenen kontrolör kazanç değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Elde edilen kontrolör kazançlarına göre Senaryo III için performans değerleri Tablo 7'de verilmiştir. Tablodaki veriler incelendiğinde, kullanılan yöntemin sistem frekansı ve bağlantı hattı güç değişimindeki dalgalanma için daha küçük aşma değerleri ( $M^+$ ,  $M^-$ ) ve daha kısa oturma süresi ( $t_s$ ) sağladığı görülmektedir. Kullanılan algoritmanın başarılı olarak nitelendirilebilmesi için iterasyon boyunca belli bir değere yakınsaması gerekmektedir. Aşağıda verilen Şekil 15'te görüldüğü üzere, BA algoritması 100 iterasyon sonunda belli bir değere yakınsamaktadır.

**Tablo 5.** Senaryo II için sistem performans değerleri (Performance values for Scenario II)

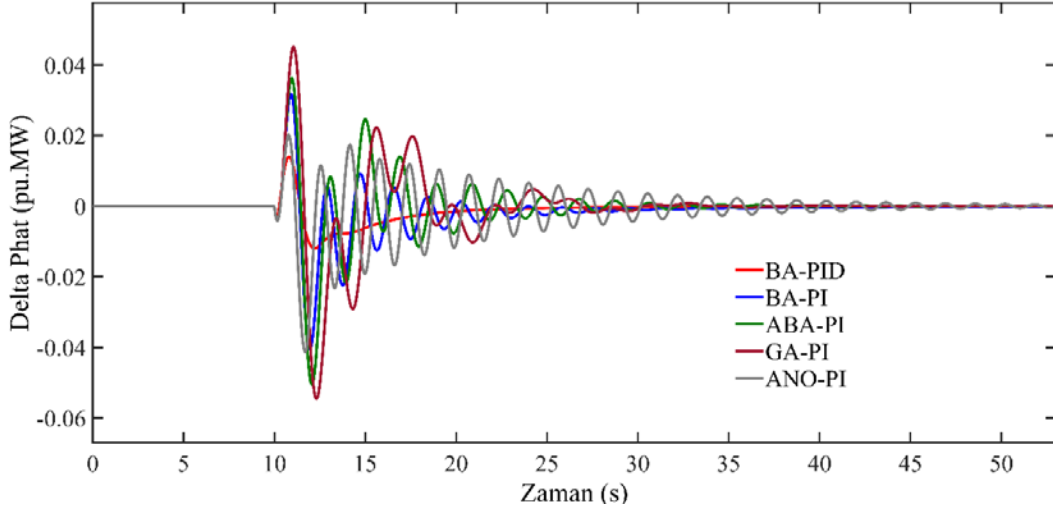
Kontrolör Tipi	$t_s$ (s)			$M^+$ (Hz)		$M^+$ (pu. MW)	$M^-$ (Hz)		$M^+$ (pu. MW)
	$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{hat}$	$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{hat}$	$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{hat}$
BA-PID	9,2	10,51	8,13	0,046	0,046	0,0065	0,07	0,069	0,004
BA-PI	16,75	18,16	19,66	0,062	0,043	0,013	0,092	0,066	0,011



**Şekil 12.** Senaryo III için Alan 1'deki frekans değişimi (The frequency deviation in area-1 for scenario III)



**Şekil 13.** Senaryo III için Alan 2'deki frekans değişimi (The frequency deviation in area-2 for scenario III)



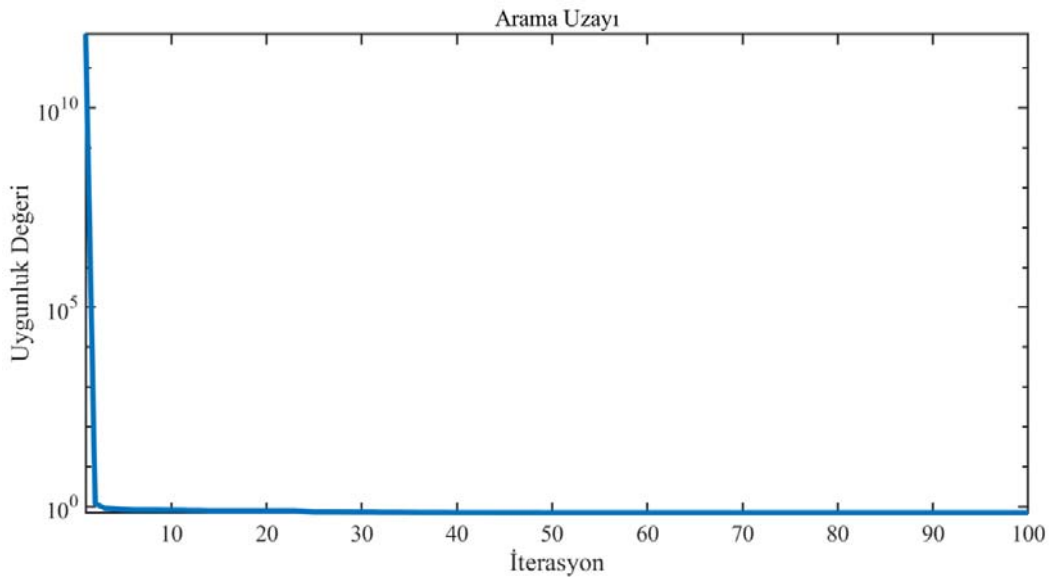
Şekil 14. Senaryo III için bağlantı hattı güç değişimi (The tie-line power deviation for scenario III)

Tablo 6. Senaryo III için belirlenen kontrolör kazançları (Obtained controller gains for scenario III)

	Parametre	BA-PID	BA-PI	ABA-PI [4]	GA-PI [4]	ANO-PI [16]
ALAN 1	$K_P$	-0,9	-1	-0,8811	-0,5663	-0,8749
	$K_I$	-0,128	-0,089845	-0,5765	-0,4024	-0,1373
	$K_D$	-0,98	---	---	---	---
ALAN 2	$K_P$	-1	-1	-0,7626	-0,5127	-1,999
	$K_I$	-1	-0,96702	-0,8327	-0,7256	-1,9487
	$K_D$	-0,02	---	---	---	---

Tablo 7. Senaryo III için sistem performans değerleri (Performance values for Scenario III)

Kontrolör Tipi	$t_s$ (s)	$M^+$ (Hz)			$M^+$ (pu. MW)			$M^-$ (Hz)		$M^+$ (pu. MW)
		$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{hat}$	$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{hat}$	$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{hat}$
BA-PID	11,54	11,66	12,02	0,0244	0,0212	0,014	0,25	0,26	0,012	
BA-PI	19,04	20,7	20,9	0,086	0,09	0,031	0,26	0,26	0,04	
ABA-PI [4]	23,8	23,99	23,83	0,155	0,138	0,036	0,3	0,276	0,05	
GA-PI [4]	23,95	25,93	24,67	0,176	0,149	0,045	0,3	0,294	0,0544	
ANO-PI [16]	37,58	40,65	45,7	0,068	0,123	0,02	0,17	0,217	0,041	



Şekil 15. BA-PID yakınsama eğrisi (The convergence plot of WOA-PID)

## 6. Sonuçlar ve Tartışmalar (Conclusion and Discussions)

Bu çalışmada, biri FV sistem diğeri ara-ısıtmalı termal sistem olmak üzere iki alanlı güç sisteminde OÜK işlemi için PID kontrolör parametrelerinin BA yöntemi ile belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, çalışılacak güç sistemi MATLAB/SIMULINK ortamında modellenmiştir. Kullanılan kontrolör ve algoritmanın etkinliğini incelemek amacıyla, FV sistemde ve termal sistemin yük talebinde değişiklik olması gibi durumlar için sistem davranışları incelenmiştir. Üç farklı senaryoya göre yapılan simülasyon sonuçlarından, çalışmada kullanılan BA ayarlı PID kontrolörün, sistem frekans değişiminin ve bağlantı hattı güç değişiminin aşma değeri ile değişimin oturma süresi bakımından diğer yöntemlere göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Son olarak, bu çalışmada önerilen yöntemin etkinliği farklı durumlar göz önüne alınarak doğrulanmıştır.

Bu çalışmanın temel bulguları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- FV sistem ve ara-ısıtmalı termal sistemden oluşan iki alanlı güç sisteminde OÜK işlemi gerçekleştirmek amacıyla, BA ayarlı PID kontrolör önerilmiştir.
- BA yönteminin performansı ABA, GA ve ANO gibi optimizasyon teknikleri ile karşılaştırılmıştır.
- Kullanılan yöntem, sistem frekansının maksimum aşma değerlerinde her iki alan için yaklaşık %80, bağlantı hattı güç değişiminin maksimum aşma değerinde ise yaklaşık %65 azalma sağlamıştır.
- Sistem frekansının minimum aşma değerlerinde ise Alan 1 için yaklaşık %15, Alan 2 için yaklaşık %10 ve bağlantı hattı güç değişiminin minimum aşma değerinde ise yaklaşık %75 azalma sağlanmıştır.
- Buna ek olarak, frekans değişiminin ve bağlantı hattı güç değişiminin oturma süresinde her iki alan için yaklaşık %45 oranında bir iyileşme sağlanmıştır.

Bu çalışma ile, FV sistem ve ara-ısıtmalı termal sistemden oluşan iki alanlı bir güç sisteminde OÜK işlemi için PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesi amacıyla BA yöntemi güvenilir alternatif bir yöntem olarak önerilmiştir.

## Kaynaklar (References)

1. Saadat H., Power System Analysis, McGraw-Hill, New-York, A.B.D., 1999.
2. Kundur P., Power System Stability and Control, McGraw-Hill, New-York, A.B.D., 1994.
3. Civelek Z., Gorel G., Luy M., Barisci N., Cam E., Effects on Load-Frequency Control of a Solar Power System with a Two-Area Interconnected Thermal Power Plant and its Control with a New BFA Algorithm, *Elektronika ir Elektrotehnika*, 24 (6), 3-10, 2018.
4. Abd-Elazim S.M., Ali E.S., Load frequency controller design of a two-area system composing of PV grid and thermal generator via firefly algorithm, *Neural Computing and Applications*, 30 (2), 607-616, 2018.
5. Babu N.R., Saikia L.C., Bhagat S.K., Ramoji S.K., Dekaraja B., Behra M.K., LFC of a Solar Thermal Integrated Thermal System Considering CSO Optimized TI-DN Controller, Modeling, Simulation and Optimization, Cilt: 206, Editör: Das B., Patgiri R., Bandyopadhyay S., Balas V.E., Springer, Singapore, 2021.
6. Pilla R., Botcha N., Gorripotu T.S., Azar A.T., Fuzzy PID Controller for Automatic Generation Control of Interconnected Power System Tuned by Glow-Worm Swarm Optimization, *International Conference on Application of Robotics in Industry using Advanced Mechanisms*, Springer, Cham, 140-149, 2019.
7. Agwa A.M., Equilibrium optimization algorithm for automatic generation control of interconnected power systems, *Przełąd Elektrotechniczny*, 96, 2020.
8. Mohanty D., Panda S., Frequency control of hybrid power system by sine function adapted improved whale optimisation technique, *International Journal of Ambient Energy*, 1-18, 2020.
9. Davtalab S., Tousei B., Nazarpour D., Optimized Intelligent Coordinator for Load Frequency Control in a Two-Area System with PV Plant and Thermal Generator, *IETE Journal of Research*, 1-11, 2020.
10. Ghosh A., Ray A.K., Nurujjaman M., Jamshidi M., Voltage and frequency control in conventional and PV integrated power systems by a particle swarm optimized Ziegler-Nichols based PID controller, *SN Applied Sciences*, 3 (3), 1-13, 2021.
11. Padhy S., Panda S., Application of a simplified Grey Wolf optimization technique for adaptive fuzzy PID controller design for frequency regulation of a distributed power generation system, *Protection and Control of Modern Power Systems*, 6 (1), 1-16, 2021.
12. Abubakr H., Hussein M.M., Mohamed T.H., Frequency Stabilization of Two Area Power System Interconnected by AC/DC Links using Jaya Algorithm, *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29 (1), 548-559, 2020.
13. Sharma G., Krishnan N., Arya Y., Panwar A., Impact of ultracapacitor and redox flow battery with JAYA optimization for frequency stabilization in linked photovoltaic-thermal system, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31 (5), e12883, 2021.
14. Kheshti M., Ding L., Askarian-Abyaneh H., Singh A.R., Zare S., Terzija V., Improving frequency regulation of wind-integrated multi-area systems using LFA-fuzzy PID control, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31 (3), e12802, 2021.
15. Arya Y., Automatic generation control of two-area electrical power systems via optimal fuzzy classical controller, *Journal of the Franklin Institute*, 355 (5), 2662-2688, 2018.
16. Zeng G.Q., Xie X.Q., Chen M.R., An Adaptive Model Predictive Load Frequency Control Method for Multi-Area Interconnected Power Systems with Photovoltaic Generations, *Energies*, 10 (11), 1840, 2017.
17. Ramachandran R., Satheesh Kumar J., Madasamy B., Veerasamy V., A hybrid MFO-GHNN tuned self-adaptive FOPID controller for ALFC of renewable energy integrated hybrid power system, *IET Renewable Power Generation*, 15 (7), 1582-1595, 2021.
18. Mohamed E.A., Ahmed E.M., Elmelegi A., Aly M., Elbaksawi O., Mohamed A.A.A., An optimized hybrid fractional order controller for frequency regulation in multi-area power systems, *IEEE Access*, 8, 213899-213915, 2020.
19. Babu N.R., Saikia L.C., Bhagat S.K., Ramoji S.K., Raja D., Behera M.K., Impact of Wind System and Redox Flow Batteries on LFC Studies under Deregulated Scenario, *3rd International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Clean Energy Technologies*, 1-6, IEEE, 2021.
20. Latif A., Hussain S.M.S., Das D.C., Ustun T.S., Optimization of Two-Stage IPD-(1+I) Controllers for Frequency Regulation of Sustainable Energy Based Hybrid Microgrid Network, *Electronics*, 10, 919, 2021.
21. Pradhan P.C., Sahu R.K., Panda S., Analysis of hybrid fuzzy logic control based PID through the filter for frequency regulation of electrical power system with real-time simulation, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 32 (2), 439-457, 2021.
22. Arya Y., AGC of PV-thermal and hydro-thermal power systems using CES and a new multi-stage FPIDF-(1+PI) controller, *Renewable energy*, 134 (C), 796-806, 2019.
23. Mohanty P., Sahu R.K., Panda S., A novel hybrid many optimizing liasisons gravitational search algorithm approach for AGC of power systems, *Automatika*, 61 (1), 158-178, 2020.
24. Sahoo P.K., Mohapatra S., Gupta D.K., Panda S., Multi Verse Optimized Fractional Order PDPI Controller for Load Frequency Control, *IETE Journal of Research*, 2020.
25. Li Y., Han T., Han B., Zhao H., Wei Z., Whale Optimization Algorithm with Chaos Strategy and Weight Factor, *Journal of Physics: Conference Series*, 1213, 2019.
26. Nasiri J., Khiyabani F.M., A whale optimization algorithm (WOA) approach for clustering, *Cogent Mathematics & Statistics*, es, 5:1, :1482565, 2018.
27. Mirjalili S., Lewis A., The Whale Optimization Algorithm, *Advances in Engineering Software*, 95, 51-67, 2016.