



## A new objective function design for optimization of secondary controllers in load frequency control

Zümre Yenen Yılmaz<sup>1\*</sup>, Güngör Bal<sup>2</sup>, Emre Çelik<sup>1</sup>, Nihat Öztürk<sup>2</sup>, Uğur Güvenç<sup>1</sup>, Yogendra Arya<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Duzce University, Engineering Faculty, Department of Electrical and Electronics Engineering, Düzce, 81620, Turkey

<sup>2</sup>Gazi University, Technology Faculty, Electrical and Electronics Engineering Department, Ankara, 06570, Turkey

<sup>3</sup>J.C. Bose University of Science and Technology, YMCA, Electrical Engineering Department., 121006, Faridabad, Haryana, India

### Highlights:

- Load-frequency control in power systems
- Secondary controller optimization
- Objective function design

### Keywords:

- Load frequency control
- PID controller
- Objective function
- Two-area thermal power system
- multi-source power system

### Article Info:

Research Article  
Received: 16.12.2020  
Accepted: 05.04.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.841751

### Correspondence:

Author: Zümre Yenen Yılmaz  
e-mail:  
zumreyenen@gmail.com  
phone: +90 541 457 7238

### Graphical/Tabular Abstract

Electric power systems are designed with reference to the flow diagram of load frequency control loops. In order to show the effects of advocated approach on different systems, 5 systems have been studied.

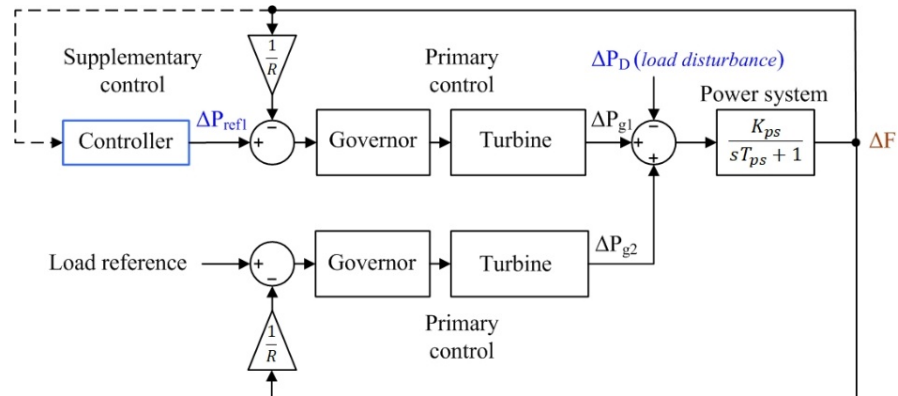


Figure A. Load frequency system loop

**Purpose:** In this study, it is aimed to determine the most appropriate values of PID controller parameters by symbiotic organisms search algorithm via proposing a new objective function.

### Theory and Methods:

A new objective function has been proposed for performance amelioration of PID controller. Unlike other traditional objective functions, time derivatives and settling times of frequency and tie-line power deviations are added to the proposed objective function. Symbiotic organisms search algorithm is used to find out the optimal values of the controller parameters.

### Results:

The results have showcased that the proposed approach is more effective than the methods reported in previous studies.

### Conclusion:

The proposed objective function enables to boost the capability of PID controller.



## Yük frekans kontrolünde kullanılan ikincil denetleyicilerin optimizasyonuna yönelik yeni bir hedef fonksiyonu tasarımı

Zümre Yenen Yılmaz<sup>1\*</sup>, Güngör Bal<sup>2</sup>, Emre Çelik<sup>1</sup>, Nihat Öztürk<sup>2</sup>, Uğur Güvenç<sup>1</sup>, Yogendra Arya<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06560, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>J.C. Bose Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, YMCA, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 121006, Faridabad, Haryana, Hindistan

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Güç sistemlerinde yük-frekans kontrolü
- İkincil denetleyici optimizasyonu
- Hedef fonksiyonu tasarımı

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 16.12.2020

Kabul: 05.04.2021

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.841751

#### Anahtar Kelimeler:

Yük frekans kontrolü,  
PID denetleyici,  
hedef fonksiyonu,  
iki bölge termal güç  
sistemi,  
çok kaynaklı güç sistemi

#### ÖZ

Bu çalışmada, iki bölge ara-ısıtmasız termal güç sistemi ile çok kaynaklı güç sistemlerinin yük frekans kontrolü (YFK) ele alınmıştır. Bu sistemlerde ikincil denetleyici olarak basit yapılı PID denetleyicisi tercih edilmiştir. Denetleyici performansını artırmak amacıyla yeni bir çoklu hedef fonksiyonu tasarlanmıştır ve bu hedef fonksiyonunun değeri simbiyotik organizmalar arama algoritması (SOAA) ile azaltılarak PID denetleyici parametreleri elde edilmiştir. Benzetimi gerçekleştirilen tüm elektrik güç sistemleri MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş, optimizasyon tekniği ise MATLAB/M-file ortamında kodlanmıştır. Çalışmanın literatüre katkısının ispatı için her bir güç sisteminden elde edilen sonuçlar iyi dergilerde yayımlanan popüler sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre önerilen hedef fonksiyonu ile ayarlanan SOAA:PID denetleyicinin, basit yapısına rağmen, frekans ve bağlantı hattı güç değişim eğrilerindeki salınım (oscillation), oturma zamanı (settling time), maksimum pozitif aşım (maximum overshoot) ve maksimum negatif aşım (maximum undershoot) zaman alanı göstergeleri bakımından diğer yaklaşımlardan daha iyi performans sergilediği gözlenmiştir.

## A new objective function design for optimization of secondary controllers in load frequency control

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

- Load-frequency control in power systems
- Secondary controller optimization
- Objective function design

#### Article Info

Research Article

Received: 16.12.2020

Accepted: 05.04.2021

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.841751

#### Keywords:

Load frequency control,  
PID controller,  
objective function,  
two-area thermal power  
system,  
multi-source power system

#### ABSTRACT

In this study, load frequency control (LFC) of two-area non-reheat thermal power system and multi-source power systems is addressed. A simple PID-structured controller is used as a secondary controller in these systems. To raise the performance of PID controller, a new multi-objective function is designed and PID controller parameters are acquired by minimizing the value of this function with symbiotic organisms search (SOS) algorithm. All electrical power systems simulated are modeled in MATLAB/Simulink environment and the optimizer is coded in MATLAB/M-file platform. In order to affirm the contribution of the work, results collected from each power system are compared with popular results published in prestigious journals. As per the comparative results, despite its simplicity, SOS:PID controller tuned via the proposed objective function is observed to result in better performance than other approaches in terms of oscillations, settling time, maximum overshoot and maximum undershoot time domain indicators of the frequency and tie-line power change curves.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir bölgenin elektrik enerjisini temin etmek için, bölgenin tüm elektrik santralleri, trafoları ve aboneleri arasında kurulan sisteme enterkonnekte sistem denir. Güç sistemleri birçok enterkonnekte bölgeden oluşur. Güç sistemlerini optimum çalışma durumunda tutmak için, sistemlerin kontrol edilmesi gerekmektedir. Bütün elektrik enerjisi üretim merkezleri birbirine ve sisteme senkronize şekilde bağlı olduğu için her bir sistem aynı frekansa sahiptir. Bundan dolayı güç sistemlerinin verimli ve kararlı çalışabilmesi için frekans sabit kalmalıdır. Güç sistemlerinin kararlı bir şekilde çalışabilmesi için uluslararası sınırlar içinde (UCTE için 49,2-50,8 Hz) daha önceden belirlenmiş sabit frekans değerinde (Türkiye için 50Hz) ve üretilen güç ile tüketilen güç dengesinin sağlanmış olması gerekmektedir [1].

Güç sistemlerinin sabit frekansta çalışabilmesi güç dengesi ile mümkündür. Güç dengesinde üretilen aktif güç toplamı, sistemdeki kayıp ve bağlantı hatları üzerinden geçen güç toplamına eşit olmalıdır. Frekansı etkileyen en önemli parametrelerden biri aktif güçtür. Kastedilen güç dengesi, aslında aktif güç dengesini sağlayarak olacaktır. Üretilen güç ile tüketilen güç arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Üretilen enerji fazla ise frekans değeri artacaktır. Tüketilen enerji fazla ise frekans değeri azalacaktır. Üretilen ve tüketilen güç ile frekans arasındaki dengeyi sağlayabilmek için yük frekans kontrolüne ihtiyaç vardır.

İki veya daha fazla bölge birbirlerine bağlı/enterkonnekte güç sistemlerinde sistem frekansında meydana gelen değişimlerin kontrol edilmesi ve bağlantı hatlarındaki yüklenmelerin belirlenen değerler içinde kalacak şekilde generatörlerin aktif güç çıkışlarının ayarlanması yük frekans kontrolü (YFK) veya otomatik üretim kontrolü (OÜK) olarak adlandırılır [2]. Dolayısıyla YFK'nın görevi, sistemde yük talebinin değişmesi durumunda veya meydana gelen herhangi bir küçük bozucu etki anında veya sistemsel parametre belirsizliklerine karşın sistem frekansını önceden belirlenmiş nominal seviyede tutmak ve önceden programlanmış değerlerde bölgeler arasındaki güç akışını kontrol etmektedir [3]. Bu sayede üretilen gücün kalitesi artarak güç sisteminin güvenilirliği ile kararlılığı iyileştirilmiş olacaktır. Çalışmada beş farklı güç sistemi incelenmiştir. Bu sistemler sırasıyla doğrusal iki bölge ara-ısıtmasız termal güç sistemi, ölü banlı nonlinear iki bölge ara-ısıtmasız termal güç sistemi, çok kaynaklı tek bölge güç sistemi, iki bölge çok kaynaklı güç sistemi ve yüksek gerilim doğru akım (DA) baralı iki bölge çok kaynaklı güç sistemidir. Tüm sistemler MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. Bu sistemlerde ikincil denetim organı olarak PID denetleyici kullanılmıştır. Bu denetleyicinin parametreleri özgün bir yaklaşımla ayarlanarak literatürdeki diğer karmaşık yapıları denetleyicilere göre daha iyi bir performans sergilemesi sağlanmıştır. Denetleyici parametrelerinin optimizasyonu için güçlü yapısı ile tanınan simbiyotik organizmalar arama algoritması (SOAA) tercih

edilmiştir. 2014 yılında önerilmiş olan SOAA, ekosistemdeki organizmaların yaşamlarını devam ettirmek ve çoğalmak için simbiyotik ilişkiyi modeller. YFK çalışmalarında denetleyici parametrelerinin optimizasyonu sürecinde aday çözümlerin uygunluğunu/kalitesini değerlendirmek için genelde dört hedef fonksiyonunun kullanıldığı göze çarpmaktadır. Bunlar; zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali (Integral Time-Weighted Absolute Error (ITAE)), hata karelerinin integrali (Integral Squared Error (ISE)), zaman ağırlıklı hata karelerinin integrali (Integral Time-Weighted Squared Error (ITSE)), ve mutlak hatanın integrali (Integral Absolute Error (IAE)) olarak sayılabilir. Bu hedef fonksiyonları içerisinde ITAE'nin en küçük değeri sistem cevabında yerleşme zamanı ve aşım bakımından iyileşme sağlamaktadır [4]. Bundan dolayı çalışmada ITAE referans alınarak yeni bir hedef fonksiyonu tasarlanmıştır. Önerilen hedef fonksiyonu çok hedeflidir. Bu manada ITAE'nin yanı sıra cevap eğrilerinin türevleri ile oturma zamanlarının birlikte en aza indirilmesi amaçlanmıştır.

Literatürde YFK ile ilgili çok çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, bakteriyel besin arama algoritması (BBAA) [5], hibrit bakteriyel besin arama algoritması-parçacık sürü optimizasyonu (hBBAA-PSO) [6] ve diferansiyel gelişim algoritmasında (DGA) [7] ITAE hedef fonksiyonu kullanılarak PI denetleyici parametrelerinin uygun değerleri elde edilmiştir. Hibrit stokastik fraktal arama algoritması-desen arama tekniği (hSFAA-DA) [8] ve DGA'da [9, 10] ITAE hedef fonksiyonu kullanılarak PID denetleyici parametreleri elde edilmiştir. Geliştirilmiş stokastik fraktal arama algoritması (GSFAA) [11] tekniklerinde ITAE hedef fonksiyonundan farklı olarak yeni bir hedef fonksiyonu önerilerek PID denetleyici parametreleri elde edilmiştir. Öğretme-öğrenmeye dayalı optimizasyon algoritmasında (ÖÖOA) [12, 13] ITAE hedef fonksiyonu kullanılarak PID denetleyici parametreleri ve iki serbestlik dereceli PID (2SD PID) denetleyicinin parametreleri optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Hibrit parçacık sürü optimizasyonu-desen arama tekniği (hPSO-DA) [14] tekniğinde yine ITAE hedef fonksiyonu kullanılarak bulanık mantık PID denetleyici parametreleri elde edilmiştir. Çılgınlığa dayalı parçacık sürüsü optimizasyonu (CRAZY-PSO) [15] tekniğinde ISE ve ITSE hedef fonksiyonu kullanılarak PI denetleyici parametreleri elde edilmiştir. Geliştirilmiş gri kurt optimizasyonu (GGKO) [16] tekniğinde ise ITAE hedef fonksiyonu kullanılarak PI, PID ve eklemeli PIPD denetleyici parametrelerinin en uygun değerleri bulunmuştur. Bu algoritmaların birbirlerine göre üstünlükleri olduğu gibi dezavantajları da vardır. Bu üstünlükler ve dezavantajlar, uygulanan probleme göre değişmektedir [17]. Çözülme istenen probleme uygun optimizasyon tekniği seçildiği takdirde, problemin çözülmesi daha hızlı olacaktır ve daha doğru sonuçlar elde edilecektir [18]. Ayrıca literatür çalışmalarında elde edilen sonuçların optimum sonuçlar olduğu kesin değildir ve hedef fonksiyonu değerinin azaltılabildiği ölçüde sistem performansı daha da iyileştirilebilir.

Bu çalışmada güç sistemlerinde YFK performansını artırmak amacıyla SOAA ve tasarlanan hedef fonksiyonu kullanılarak PID denetleyici parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre önerilen yaklaşımın diğer çalışmalara göre daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Sonuç olarak PID denetleyicinin parametreleri kontrol sisteminin gereksinimlerine cevap verebilecek uygun bir hedef fonksiyonu ile ayarlandığında başarımının ciddi şekilde artabileceği bu araştırma makalesi ile gözler önüne serilmiştir.

## 2. GÜÇ SİSTEMLERİ VE TRANSFER FONKSİYONU MODELLERİ (POWER SYSTEMS AND TRANSFER FUNCTION MODELS)

Bu çalışmada beş farklı güç sistemi incelenmiştir. Yük frekans kontrolüne uygun olarak tüm sistemlerin transfer fonksiyonu modelleri MATLAB/Simulink ortamında tasarlanmıştır. Bu sistemler alt başlıklar halinde aşağıda incelenecektir.

### 2.1. Doğrusal İki Bölge Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi (Linear Two-Area Non-Reheat Thermal Power System)

Bu bölümde birinci sistem olan bağlantı hattı üzerinden birbirine bağlanmış ara-ısıtmasız doğrusal iki termal güç ünitesinin dinamik modeli işlenmiştir. Şekil 1’de modelin yük frekans kontrolü tasarımı ve analizi için yaygın olarak kullanılan transfer fonksiyonu modeli verilmiştir [12, 19]. Sistem parametreleri iki bölge için de eşit kabul edilmiştir. Sistemin parametrelerinin sayısal değerleri şu şekildedir:  $f = 60$  Hz,  $B = 0,425$  p.u MW/Hz,  $R = 2,4$  Hz/p.u,  $T_g = 0,03$  s,  $T_t = 0,3$  s,  $K_{ps} = 120$  Hz/p.u,  $T_{ps} = 20$  s,  $T_{12} = 0,545$  p.u MW/rad.

Sistemdeki her kontrol alanının üç girişi iki çıkışı vardır. Girişler, denetleyici çıkışı  $\Delta P_{ref}$ , yük değişimi  $\Delta P_D$  ve iki bölge arasındaki bağlantı hattı güç değişimi  $\Delta P_{tie}$ ’dir. Çıktılar ise Eş. 1’de görüleceği gibi frekans değişimi  $\Delta f$  ve

alan kontrol hatasıdır (AKH). B ise frekans yönelim faktörüdür.

$$AKH = -B\Delta f \pm \Delta P_{tie} \quad (1)$$

Ara-ısıtmasız türbin,  $T_t$  buhar türbininin zaman sabiti olduğu transfer fonksiyonu Eş. 2 ile modellenir.

$$G_t(s) = \frac{\Delta P_t}{\Delta P_g} = \frac{1}{sT_t + 1} \quad (2)$$

$T_g$  hız regülatörü zaman sabitidir ve Eş. 3’te doğrusal olarak kabul edilen hız regülatörünün transfer fonksiyonu verilmiştir.

$$G_g(s) = \frac{\Delta P_w}{\Delta P_g} = \frac{1}{sT_g + 1} \quad (3)$$

Hız regülatörünün girişi Eş. 4’teki gibi  $\Delta P_{ref}$ ’den  $\frac{1}{R}\Delta f$  çıkartılarak elde edilir. R, hız regülatörü sabitidir.

$$\Delta P_v = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R}\Delta f \quad (4)$$

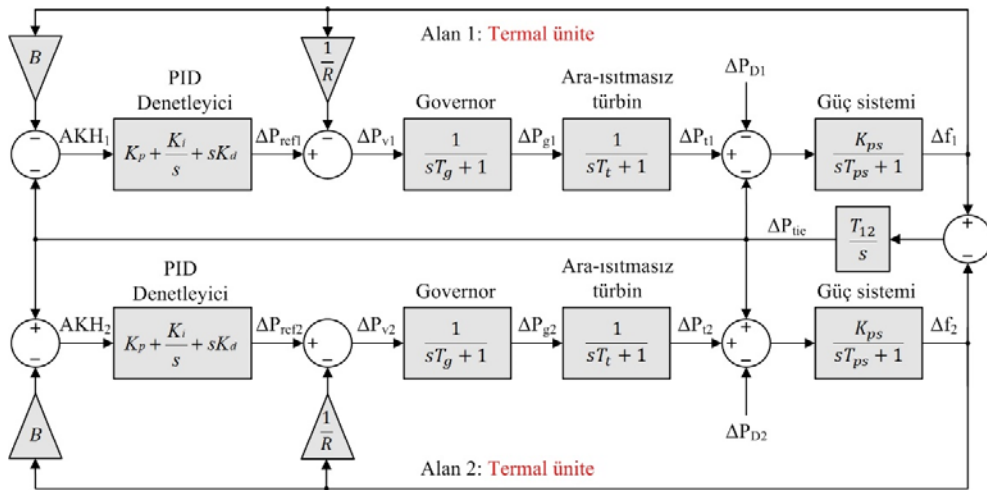
$G_p$ , güç sistemi transfer fonksiyonudur ve Eş. 5 ile ifade edilir.

$$G_p(s) = \frac{K_{ps}}{sT_{ps} + 1} \quad (5)$$

Sistemdeki  $\Delta P_L$  kadarlık bir yük sonucunda frekans değişimi ve bağlantı hattındaki güç değişiminin Eş. 6 ve Eş. 7’deki gibidir. Buradaki D, yük sönmüleme sabitidir.

$$\Delta f = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (6)$$

$$\Delta P_{tie} = \frac{-\Delta P_L \left( \frac{1}{R_2} + D_1 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (7)$$



Şekil 1. Doğrusal İki Bölge Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi Modeli (Linear Two-Area Non-Reheat Thermal Power System Model)

**2.2. Ölü Bantlı Nonlineer İki Bölge Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi (Non-linear Two-Area Non-Reheat Thermal Power System with Dead Band)**

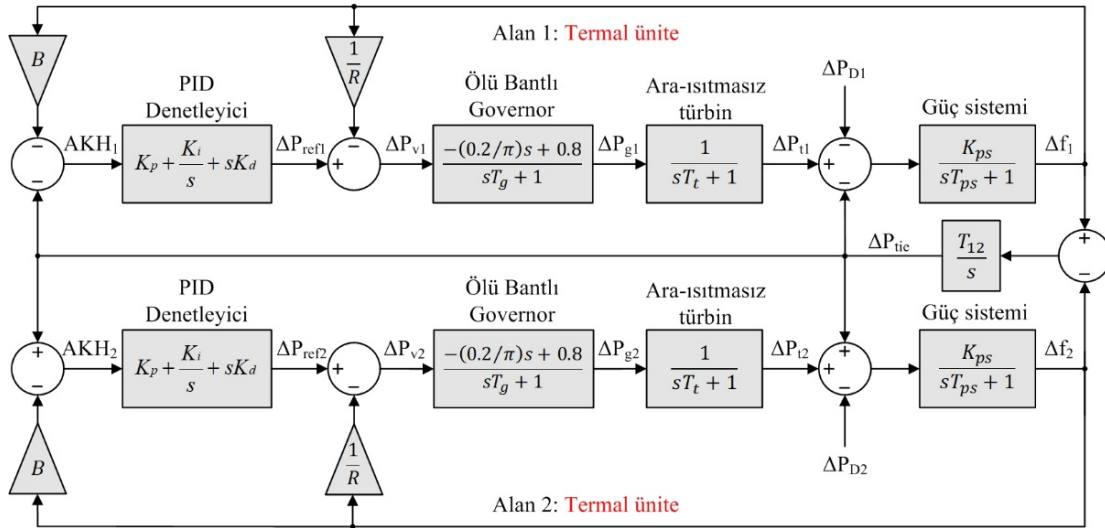
İkinci sistem olan ölü bantlı nonlineer iki bölge ara-ısıtmasız termal güç sisteminin dinamik modeli bu bölümde işlenmiştir. Sistem parametreleri yine iki bölge için de eşit kabul edilmiştir. Sistemin yük frekans kontrolü tasarımı ve analizi için yaygın olarak kullanılan transfer fonksiyonu modeli Şekil 2’de verilmiştir. Sistem parametrelerinin sayısal değerleri şu şekildedir:  $f = 60$  Hz,  $B = 0,425$  p.u MW/Hz,  $R = 2,4$  Hz/p.u,  $T_g = 0,2$  s,  $T_t = 0,3$  s,  $K_{ps} = 120$  Hz/p.u,  $T_{ps} = 20$  s,  $T_{12} = 0,444$  p.u MW/rad.

İlk sistem ile aynı çalışma prensibine sahip olan bu sistemde regülatör transfer fonksiyonuna, farklı olarak ölü bant karakteristiği eklenmiştir. Ölü bant özelliğe sahip regülatör, sistemin yaklaşık  $f_0 = 0,5$  Hz doğal frekansta salınmasını sağlar ve transfer fonksiyonu Eş. 8’deki gibidir.

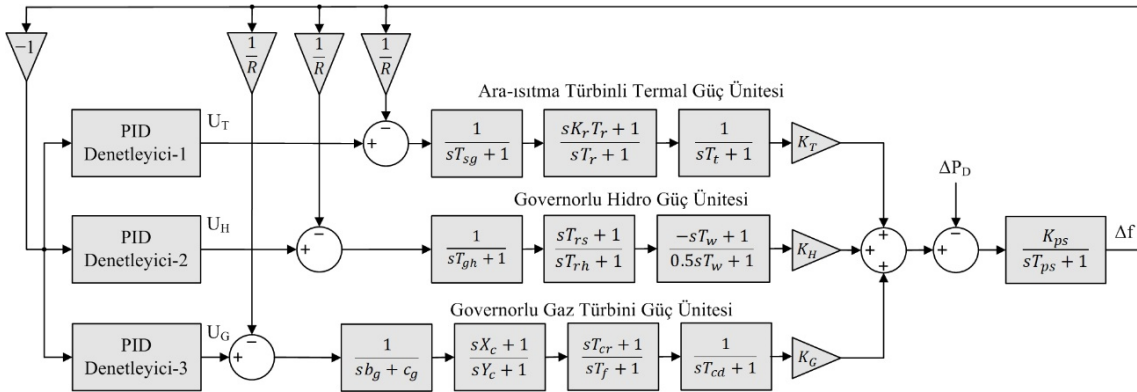
$$G_g = \frac{-(0,2/\pi)s + 0,8}{sT_g + 1} \quad (8)$$

**2.3. Çok Kaynaklı Tek Bölge Güç Sistemi (Multi-Source Single-Area Power System)**

Bu bölümde üçüncü sistem olan çok kaynaklı güç ünitesinin dinamik modeli işlenmiştir. Şekil 3’te bu modelin yük frekans kontrolü tasarımı ve analizi için yaygın olarak kullanılan transfer fonksiyonu modeli verilmiştir. Bu sistem termal ünite, hidro ünite ve gaz ünitesi olmak üzere üç farklı üniteye sahiptir. Her ünitenin üretilen güce katkı miktarı  $K_T$ ,  $K_H$  ve  $K_G$  sabitleriyle belirlenmektedir. Termal ünite için sistem parametreleri şu şekildedir: R hız regülatör sabiti,  $K_T$  ünitenin katılım faktörü,  $T_{sg}$  hız regülatörü süresi,  $K_r$  ara-ısıtma kazancı,  $T_r$  ara-ısıtma zaman sabiti ve  $T_t$  buhar türbini zaman sabitidir. Hidro ünite için sistem parametreleri şu şekildedir: R hız regülatör sabiti,  $K_H$  ünitenin katılım faktörü,  $T_{gh}$  hidro-türbin hız regülatörünün ana servo zaman sabiti,  $T_{rs}$  hidro türbin hız regülatörünün sıfırlama süresi,  $T_{rh}$  geçici düşüş zaman sabiti ve  $T_w$  cebri borudaki suyun nominal başlangıç zamanıdır. Gaz ünitesi için sistem parametreleri şu şekildedir: R hız regülatörü sabiti,  $K_G$  ünitenin katılım faktörü,  $c_g$  gaz türbini valfi konumlandırıcısı,  $b_g$  valf



**Şekil 2. Ölü Bantlı Nonlineer İki Bölge Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi Modeli (Non-linear Two-Area Non-Reheat Thermal Power System Model with Dead Band)**



**Şekil 3. Çok Kaynaklı Tek Bölge Güç Sistemi Modeli (Multi-Source Single-Area Power System Model)**

konumlandırıcının gaz türbini sabiti,  $X_c$  ve  $Y_c$  sırasıyla gaz türbini hız regülatörünün sağlama ve gecikme süresi sabiti,  $T_{cr}$  gaz türbininin yanma reaksiyonu zaman gecikmesi,  $T_f$  yakıt zaman sabiti ve  $T_{cd}$  ve kompresör deşarj hacmi zaman sabitidir. Bu parametrelerin sayısal değerleri şu şekildedir:  $f = 60$  Hz,  $R = 2,4$  Hz/p.u,  $T_{sg} = 0,08$  s,  $K_r = 0,3$ ,  $T_r = 10$  s,  $T_t = 0,3$  s,  $T_{gh} = 0,2$  s,  $T_{rs} = 5$  s,  $T_{rh} = 28,75$  s,  $T_w = 1$  s,  $b_g = 0,05$  s,  $c_g = 1$ ,  $X_c = 0,6$  s,  $Y_c = 1$  s,  $T_{cr} = 0,01$  s,  $T_f = 0,23$  s,  $T_{cd} = 0,2$  s,  $K_T = 0,543478$  p.u,  $K_H = 0,326084$  p.u,  $K_G = 0,130438$  p.u,  $K_{ps} = 68,9566$  Hz/p.u,  $T_{ps} = 11,49$  s

**2.4. İki Bölge Çok Kaynaklı Güç Sistemi (Two-Area Multi-Source Power System)**

Bu bölümde dördüncü sistem olan iki bölge çok kaynaklı güç ünitesinin dinamik modeli işlenmiştir. Şekil 4'te bu modelin yük frekans kontrolü tasarımı ve analizi için yaygın olarak kullanılan transfer fonksiyonu modeli görülmektedir.

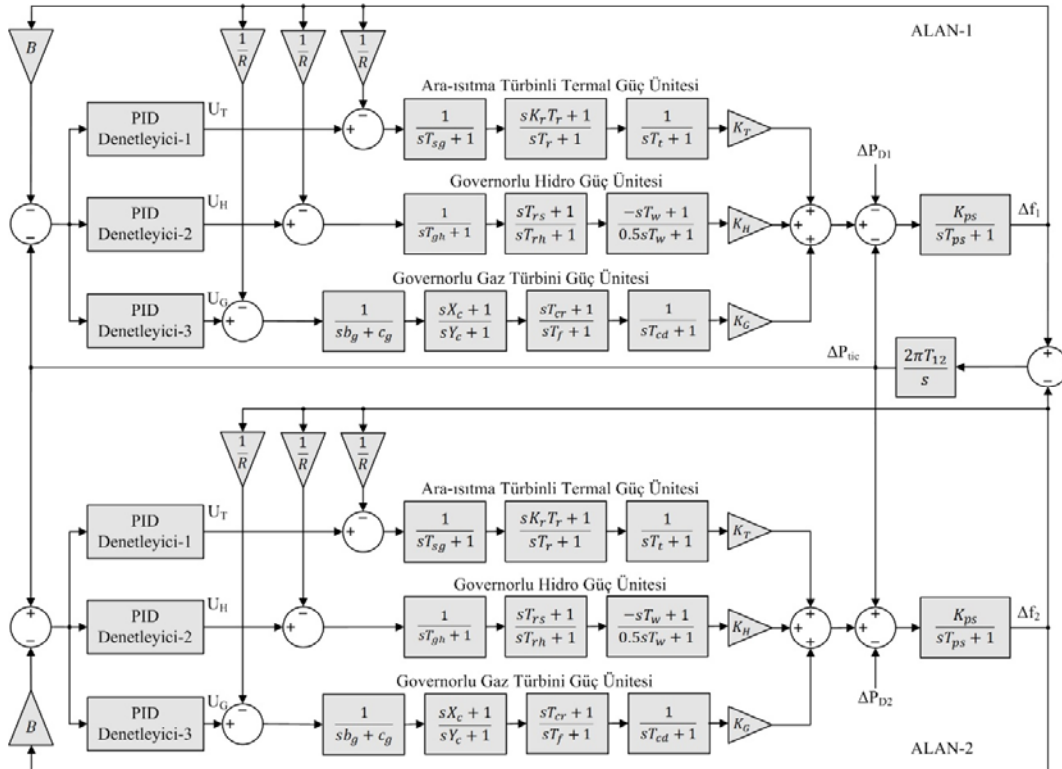
Bu sistem iki ayrı çok kaynaklı tek bölge güç sisteminin birbirlerine AA bağlantı hattı ile bağlanmasıyla oluşturulur. Çalışma mantığı tek bölge ile aynıdır. Yine her bölgenin termal, hidro ve gaz tabanlı olmak üzere üçer adet elektrik üretim ünitesi vardır. Bu sistemde de iki bölge birbirine benzerdir. Sistemsel parametreler ile değerleri şu şekildedir:  $f = 60$  Hz,  $B = 0,4312$  p.u MW/Hz,  $R = 2,4$  Hz/p.u,  $T_{sg} = 0,08$  s,  $K_r = 0,3$ ,  $T_r = 10$  s,  $T_t = 0,3$  s,  $T_{gh} = 0,2$  s,  $T_{rs} = 5$  s,  $T_{rh} = 28,75$  s,  $T_w = 1$  s,  $b_g = 0,05$  s,  $c_g = 1$ ,  $X_c = 0,6$  s,  $Y_c = 1$  s,  $T_{cr} = 0,01$  s,  $T_f = 0,23$  s,  $T_{cd} = 0,2$  s,  $K_T = 0,543478$  p.u,  $K_H = 0,326084$  p.u,  $K_G = 0,130438$  p.u,  $K_{ps} = 68,9566$  Hz/p.u,  $T_{ps} = 11,49$  s,  $T_{12} = 0,0433$  p.u MW/rad.

**2.5. Yüksek Gerilim Doğru Akım Baralı İki Bölge Çok Kaynaklı Güç Sistemi (Two-Area Multi-Source Power System with High-Voltage Direct Current Link)**

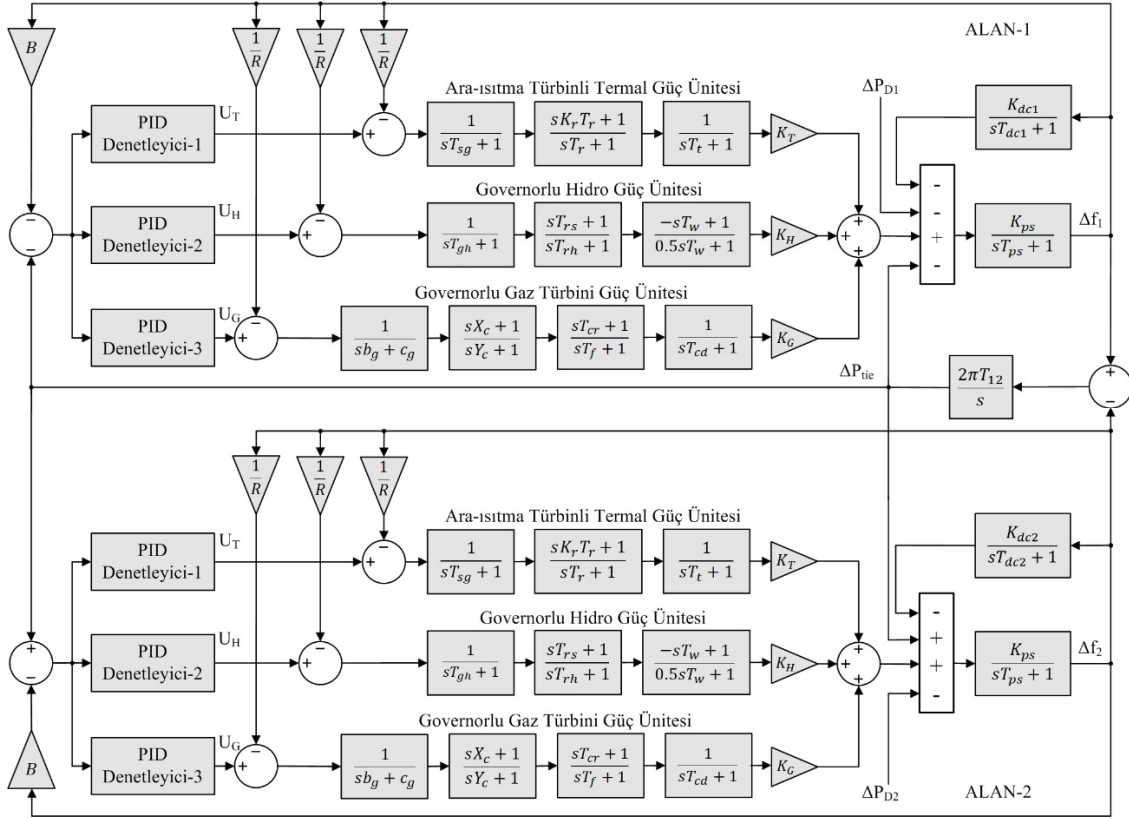
Bu bölümde beşinci sistem olan yüksek gerilim doğru akım (DA) baralı iki bölge çok kaynaklı güç ünitesinin dinamik modeli işlenmiştir. Şekil 5'te bu modelin yük frekans kontrolü tasarımı ile analizi için yaygın olarak kullanılan transfer fonksiyonu modeli verilmiştir. Sistemin çalışma mantığı tamamıyla iki bölge çok kaynaklı güç sistemi ile aynıdır. Yine her bölgenin termal, hidro ve gaz olmak üzere üç farklı elektrik üretim tesisi bulunmaktadır. Önceki sistemden farklı olarak bu sistemde iki komşu bölgeyi birbirine bağlayan AA bağlantı hattına paralel olarak yüksek gerilim DA iletim hattı bulunmaktadır. Bu baranın transfer fonksiyonu Eş. 9'daki gibidir.

$$U_{HVDC} = \frac{K_{dc}}{sT_{dc} + 1} \tag{9}$$

Burada, yüksek gerilim DA baranın kazancı ve zaman sabiti  $K_{dc}$  ve  $T_{dc}$  ile verilmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler ile değerleri şu şekildedir:  $f = 60$  Hz,  $B = 0,4312$  p.u MW/Hz,  $R = 2,4$  Hz/p.u,  $T_{sg} = 0,08$  s,  $K_r = 0,3$ ,  $T_r = 10$  s,  $T_t = 0,3$  s,  $T_{gh} = 0,2$  s,  $T_{rs} = 5$  s,  $T_{rh} = 28,75$  s,  $T_w = 1$  s,  $b_g = 0,05$  s,  $c_g = 1$ ,  $X_c = 0,6$  s,  $Y_c = 1$  s,  $T_{cr} = 0,01$  s,  $T_f = 0,23$  s,  $T_{cd} = 0,2$  s,  $K_T = 0,543478$  p.u,  $K_H = 0,326084$  p.u,  $K_G = 0,130438$  p.u,  $K_{ps} = 68,9566$  Hz/p.u,  $T_{ps} = 11,49$  s,  $T_{12} = 0,0433$  p.u MW/rad.,  $a_{12} = -1$ ,  $K_{dc} = 1$ ,  $T_{dc} = 0,2$  s.



**Şekil 4. İki Bölge Çok Kaynaklı Güç Sistemi Modeli (Two-Area Multi-Source Power System Model)**



Şekil 5. Yüksek Gerilim Doğru Akım Baralı İki Bölge Çok Kaynaklı Güç Sistemi Modeli  
(Two-Area Multi-Source Power System Model with High-Voltage Direct Current Link)

### 3. SİMBİYOTİK ORGANİZMALAR ARAMA ALGORİTMASI (SYMBIOTIC ORGANISMS SEARCH ALGORITHM)

Simbiyotik organizmalar arama algoritması (SOAA), 2014 yılında Cheng ve Prayoga tarafından geliştirilen yeni, etkili ve güçlü yapıya sahip metasezgisel bir optimizasyon tekniğidir [20]. Popülasyon tabanlı, doğadan ilham alan SOAA'da çözüm kümesi ekosistem olarak adlandırılır ve ekosistemdeki her bir çözüme organizma adı verilir. Ekosistemdeki iki organizma arasındaki biyolojik etkileşim taklit edilerek yeni çözümler üretilir. Bir organizmanın ekosistemde hayatta kalabilmek için diğer organizmalarla kurduğu simbiyotik ilişkiler sırayla ortak yaşam (mutualism), fayda (commensalism) ve asalaklık (parasitism) olarak verilmektedir [20-22].

Ortak yaşam fazı; karşılıklı yarar sağlanan iki farklı organizmanın simbiyotik ilişkisini gösterir. Bu fazın çalışma mantığı Eş. 10 ve Eş. 11'de verilmiştir.  $X_i$ , ekosistemdeki organizma,  $X_j$  ise  $X_i$  ile etkileşime girecek ekosistemden rastgele seçilen bir başka organizmadır.  $BF_1$  ve  $BF_2$  fayda faktörleri,  $X_{best}$  ise ekosistemde adaptasyon derecesi en yüksek olan en iyi bireydir.

$$X_{i_{new}} = X_i + \text{rand}(0,1) * (X_{best} - \text{Mutual\_Vector} * BF_1) \quad (10)$$

$$X_{j_{new}} = X_j + \text{rand}(0,1) * (X_{best} - \text{Mutual\_Vector} * BF_2) \quad (11)$$

Fayda fazı; iki farklı organizmadan birinin yarar sağladığı, diğerinin ise etkilenmediği simbiyotik ilişkiyi gösterir. Bu fazın çalışması Eş. 12 ile tanımlanmıştır.

$$X_{i_{new}} = X_i + \text{rand}(-1,1) * (X_{best} - X_j) \quad (12)$$

Son olarak asalaklık fazı organizmalardan birinin yarar sağladığı, diğerinin zarar gördüğü simbiyotik ilişkidir. [20] no'lu kaynaktaki blok diyagramı kullanılarak SOAA, MATLAB/M-file ortamında kodlanmıştır. Algoritmada ekosistemi oluşturan organizma sayısı ile maksimum iterasyon sayısı 50 olarak seçilmiştir. Optimizasyon probleminde kısıtlar PID denetleyici parametrelerinin sınırları olup, bu sınırlar sırasıyla -3 ve 3 olarak seçilmiştir ve denetleyicinin  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  parametrelerinin en iyi değerleri [-3, 3]'da aranmıştır.

### 4. TÜRETİLEN HEDEF FONKSİYONU (OBJECTIVE FUNCTION DERIVED)

Optimizasyon işlemlerinde probleme özgü çalışan tek kısım hedef fonksiyonudur ve bu fonksiyonun tanımı elde edilen sonuçların amaca uygunluğunu ciddi derece etkiler. Literatürde dört tür hedef fonksiyonu vardır. Sırasıyla; mutlak hatanın integrali (Integral Absolute Error (IAE)), hata karelerinin integrali (Integral Squared Error (ISE)), zaman ağırlıklı hata karelerinin integrali (Integral Time-weighted Squared Error (ITSE)) ve zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali (Integral Time-weighted Absolute Error

(ITAE))’dir. Hedef fonksiyonlarının matematiksel ifadeleri Eş. 13, Eş. 14, Eş. 15 ve Eş. 16’da verilmiştir. YFK çalışmalarında ITAE’nin diğer integral tabanlı hata kriterlerine göre daha iyi sonuçlar ürettiği kabul edilmektedir [23, 24].

$$IAE = \int_0^T (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|).dt \quad (13)$$

$$ISE = \int_0^T [(\Delta f_1)^2 + (\Delta f_2)^2 + (\Delta P_{tie})^2].dt \quad (14)$$

$$ITSE = \int_0^T [(\Delta f_1)^2 + (\Delta f_2)^2 + (\Delta P_{tie})^2].t.dt \quad (15)$$

$$ITAE = \int_0^T (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|).t.dt \quad (16)$$

Sistem frekansı ile bağlantı hattındaki güç değişim eğrilerindeki salınımı bastırmak, bu manada kararlılığı artırmak ve eğrilerin oturma zamanı, maksimum pozitif aşım ve maksimum negatif aşım değerlerini en aza indirmek için Eş. 17’de yeni bir çoklu hedef fonksiyonu tanımlanmış ve önerilmiştir.

$$J = \int_0^{t_{sim}} [(w_1 \cdot (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|) + w_2 \cdot (\frac{d|\Delta f_1|}{dt} + \frac{d|\Delta f_2|}{dt} + \frac{d|\Delta P_{tie}|}{dt})] .t.dt + w_3 \cdot T_s \quad (17)$$

Dikkat edilirse J hedef fonksiyonunda birinci terim ITAE kriteridir. İkinci terim  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$  ve  $\Delta P_{tie}$  tepkilerinin zamana göre türevlerinin toplamıdır. Bu terim ile cevap eğrilerindeki salınım miktarı ölçülmekte ve azaltılmaktadır. Üçüncü terim ise frekans ve bağlantı hattı güç sapmalarının oturma zamanlarının toplamıdır.  $t_{sim}$  benzetim süresi olup,  $w_1$ ,  $w_2$  ve  $w_3$  parametreleri optimizasyon sırasında her bir terimin J üzerindeki önemini belirleyen ağırlık katsayılarıdır. Bu çalışmada ağırlık katsayıları deneme-yanılma yoluyla  $w_1=0,7$ ,  $w_2=0,15$  ve  $w_3=0,15$  olarak seçilmiştir. Tüm sistemler için aynı ağırlık katsayıları kullanılmıştır. Yürütülen algoritmada J değeri küçültüldüğünden türetilen hedef fonksiyonu ile salınım miktarı küçük, 0,0 p.u referans değere minimum oturma zamanı ile çabucak yerleşen cevap eğrilerinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

## 5. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Bu bölümde yükün belirli bir oranda değişmesi sonucunda frekans ve bağlantı hattı güç değişimleri elde edilmiş ve sonuçlar literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Tüm test sistemlerinde önerilen J hedef fonksiyonu ve SOAA kullanılarak PID denetleyici parametrelerinin en uygun değerleri elde edilmiştir. Benzetim çalışmalarında benzetim süresi, cevap eğrilerinin oturma süresine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örnekleme aralığı tüm sistemlerde 1 ms olarak kabul edilmiştir.

### 5.1. Doğrusal İki Bölgeci Ara-Isıtmasız Termal Güç Sisteminin Benzetim Sonuçları (Simulation Results of Linear Two-Area Non-Reheat Thermal Power System)

1. bölgede %10’luk basamak yük değişimi olduğu durumda elde edilen denetleyici parametreleri ve frekans ile bağlantı hattı güç değişim eğrilerinin oturma zamanları Tablo 1’de verilmiştir. Görüldüğü gibi elde edilen sonuçlar literatürdeki 7 farklı çalışma ile karşılaştırılmıştır. Bu teknikler BBAA [5], hBBAA-PSO [6] ve DGA [7] ile ayarlanan PI denetleyici, ÖÖOA [12] tabanlı PID ve iki serbestlik dereceli PID (2SD PID), hPSO-DA [14] tekniği ile elde edilen bulanık mantık PID denetleyicisi ve son olarak GSFAA [11] tabanlı PID denetleyicisidir. Oturma zamanları incelendiğinde SOAA:PID yaklaşımının önemli derecede iyileşme sağladığı açıktır. Bu şartlarda elde edilen  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$  ve  $\Delta P_{tie}$  tepkileri Şekil 6’da yukarıda sayılan çalışmalarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

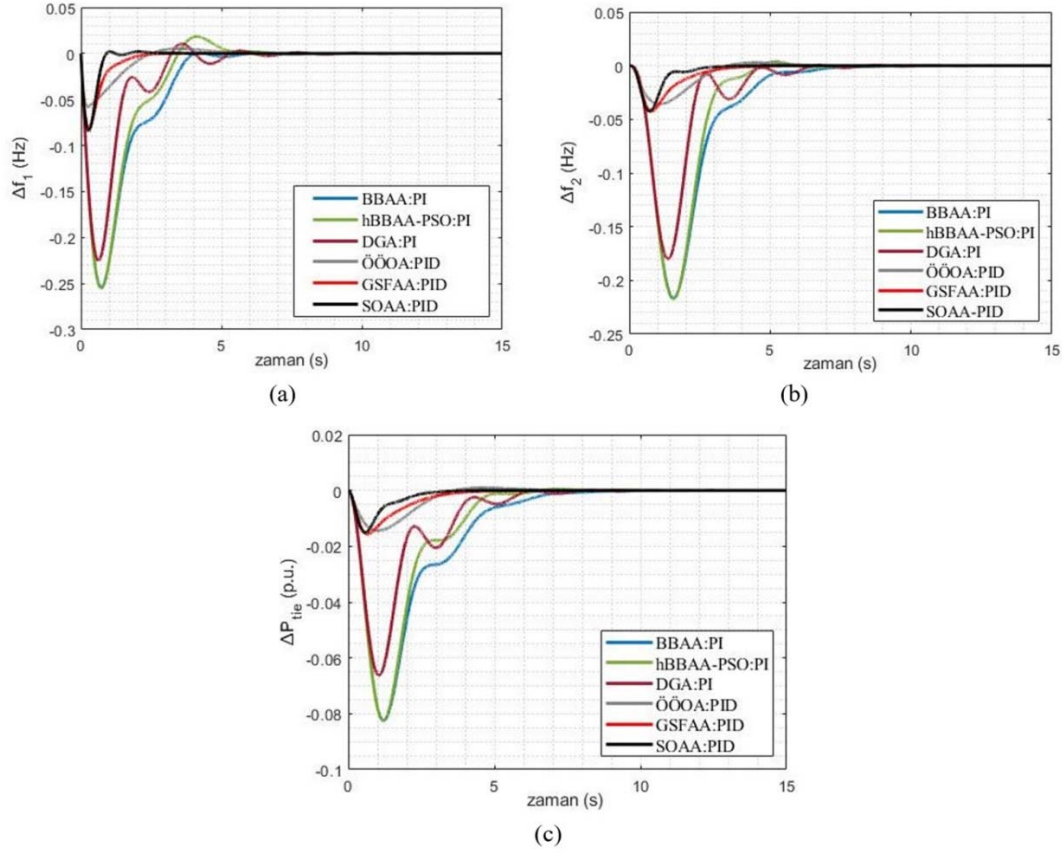
Cevap eğrilerinin maksimum negatif aşım ( $U_s$ ) ve maksimum pozitif aşım ( $O_s$ ) gibi diğer zaman alanı performans göstergeleri Şekil 6 üzerinden ölçülmüş ve Tablo 2’de verilmiştir.

$U_s$  kriteri dikkate alındığında en iyi cevap eğrisi ÖÖOA:PID ile elde edilmiştir. Ancak bu tepkinin yavaş olduğu görülmektedir. Sonuçta GSFAA:PID ile SOAA:PID tekniklerinin benzer ve diğer çalışmalardan daha iyi sonuçlar verdiği açıktır.

**Tablo 1.** İlk test sistemi için elde edilen denetleyici parametreleri ve cevap eğrilerinin oturma zamanları  
(The controller parameters obtained for the first test system and the respective settling times)

Optimizasyon Tekniği: Denetleyici	BBAA:PI [5]	hBBAA-PSO: PI [6]	DGA:PI [7]	ÖÖOA:PID [12]	ÖÖOA:2DS PID [12]	hPSO-DA:bulanık PID [14]	GSFAA:PID [11]	SOAA:PID
Denetleyici Parametreleri	$K_p = -0,4207$ $K_i = 0,2795$	$K_p = -0,4207$ $K_i = 0,2795$	$K_p = -0,2146$ $K_i = 0,4345$	$K_p = 1,1726$ $K_i = 1,9370$ $K_d = 1,1635$	$K_p = 1,8920$ $K_i = 1,7471$ $K_d = 0,2266$ $N=112,8251$ $PW= 0,4839$ $DW= 1,1207$	$K_1 = -0,9852$ $K_2 = 0,5595$ $K_p = 0,9336$ $K_i = 0,7203$	$K_p = 1,6293$ $K_i = 2,0000$ $K_d = 0,5882$	$K_p = 1,9578$ $K_i = 2,9999$ $K_d = 0,4836$
$\Delta f_1$	5,52	5,17	8,96	4,84	2,41	2,26	2,15	0,867
$\Delta f_2$	7,09	6,81	8,16	5,13	2,13	3,74	3,66	2,654
$\Delta P_{tie}$	6,35	4,59	5,75	3,03	2,56	2,94	3,01	2,209





**Şekil 6.** İlk test sistemi için elde edilen cevap eğrileri (a) 1. bölgenin frekans değişimi (b) 2. bölgenin frekans değişimi (c) Bağlantı hattı güç değişimi

(Response curves obtained for the first test system (a) Frequency change of the 1st area (b) Frequency change of the 2nd area (c) Tie-line power change)

**Tablo 2.** İlk test sistemi için ölçülen  $U_s$  ve  $O_s$  değerleri ( $U_s$  and  $O_s$  values measured for the first test system)

Optimizasyon Tekniği: Denetleyici	$U_s$ (Hz)		$U_s$ (puMW)	$O_s$ (Hz)		$O_s$ (puMW)
	$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{tie}$	$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{tie}$
BBAA:PI [5]	-0,254	-0,216	-0,082	$5 \times 10^{-4}$	0	0
hBBAA-PSO:PI [6]	-0,255	-0,217	-0,082	0,018	0,004	$4 \times 10^{-4}$
DGA:PI [7]	-0,225	-0,18	-0,066	0,01	$5 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-5}$
ÖÖOA:PID [12]	-0,058	-0,036	-0,014	0,005	0,003	$9 \times 10^{-4}$
GSFAA:PID [11]	-0,08	-0,042	-0,016	0	0	0
SOAA:PID	-0,084	-0,043	-0,015	0,001	0	0

### 5.2. Ölü Bantlı Nonlineer İki Bölge Ara-Isıtmasız Termal Güç Sisteminin Benzetim Sonuçları

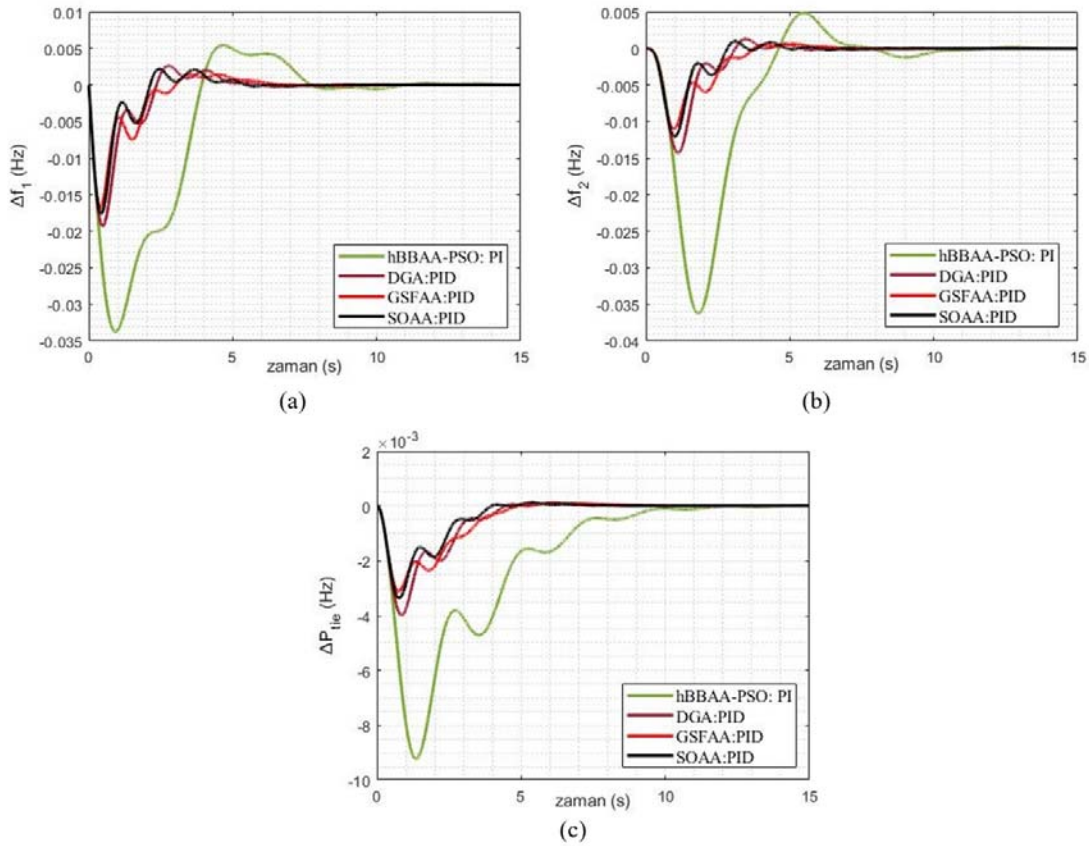
(Simulation Results of Non-linear Two-Area Non-Reheat Thermal Power System with Dead Band)

Birinci bölgeye %1'lik basamak yük değişimi uygulanmış ve bu koşullarda denetleyici parametreleri elde edilmiştir. Bu parametreler ile frekans ve bağlantı hattı güç değişim eğrilerinin oturma zamanları Tablo 3'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki 5 farklı çalışma ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar hBBAA-PSO [10] ve CRAZY-PSO [15] ile ayarlanan PI denetleyici, DGA [9] ve

GSFAA [11] tabanlı PID denetleyici ile hPSO-DA [14] ile ayarlanan bulanık mantık PID denetleyicisidir. [15] no'lu çalışmada önerilen hedef fonksiyonundaki ağırlık katsayılarının ( $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$ ) da optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma sonuçlarına göre en küçük oturma zamanı önerilen yaklaşım sayesinde elde edilmiştir. Elde edilen  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$  ve  $\Delta P_{tie}$  tepkileri karşılaştırmalı Şekil 7'de verilmiştir. Tablo 4'te cevap eğrilerinin  $U_s$  ve  $O_s$  değerleri verilmiştir. Bu sonuçlara göre SOAA ve GSFAA ile ayarlanan PID denetleyicilerinin performansları birbirlerine benzer ve diğerlerinden daha iyidir.

**Tablo 3.** İkinci test sistemi için elde edilen denetleyici parametreleri ve cevap eğrilerinin oturma zamanları  
(The controller parameters obtained for the second test system and the respective settling times)

Optimizasyon Tekniği: Denetleyici	hBBAA-PSO: PI [10]	hPSO-DA: bulanık mantık PID [14]	CRAZY-PSO: PI [15]	DGA: PID [9]	GSFAA: PID [11]	SOAA: PID
Denetleyici parametreleri	$K_p = -0,5484$ $K_i = 0,2277$	$K_1 = n/a$ $K_2 = n/a$ $K_p = n/a$ $K_i = n/a$	$K_p = -0,5762$ $K_i = 0,1962$ $w_1 = 0,7300$ $w_2 = 0,6848$ $w_3 = 0,7879$	$K_p = 0,2383$ $K_i = 0,9718$ $K_d = 0,4922$	$K_p = 0,3898$ $K_i = 1,0113$ $K_d = 0,7695$	$K_p = 0,4690$ $K_i = 1,2278$ $K_d = 0,6501$
$T_s$ (s)	$\Delta f_1$ 10,85	10,11	11,08	6,87	6,25	5,317
(%2 bant)	$\Delta f_2$ 10,95	10,13	11,99	6,89	6,48	4,772
	$\Delta P_{tie}$ 9,43	9,01	11,12	4,40	4,40	3,725



**Şekil 7.** İkinci test sistemi için elde edilen cevap eğrileri (a) 1. bölgenin frekans değişimi (b) 2. bölgenin frekans değişimi (c) Bağlantı hattı güç değişimi (Response curves obtained for the second test system (a) Frequency change of the 1st area (b) Frequency change of the 2nd area (c) Tie-line power change)

**Tablo 4.** İkinci test sistemi için ölçülen  $U_s$  ve  $O_s$  değerleri ( $U_s$  and  $O_s$  values measured for the second test system)

Denetleyici Tipi	$U_s$ (Hz)			$O_s$ (Hz)		
	$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{tie}$	$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{tie}$
hBBAA-PSO:PI [10]	-0,034	-0,036	-0,009	0,005	0,005	0
DGA:PID [9]	-0,019	-0,014	-0,004	0,003	$13 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
GSFAA:PID [11]	-0,017	-0,011	-0,003	0,015	$6 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
SOAA: PID	-0,018	-0,012	-0,003	0,002	0,001	$1 \times 10^{-5}$

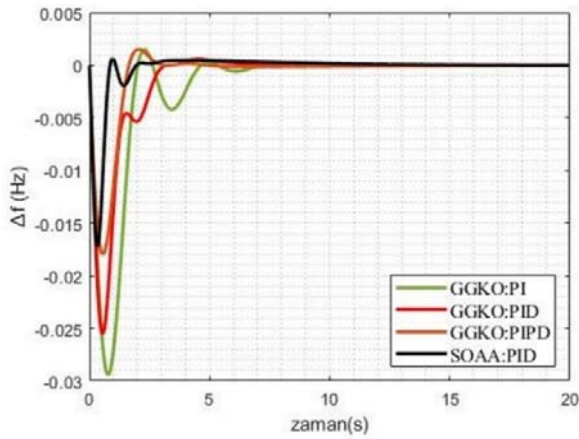
**Tablo 5.** Üçüncü test sistemi için elde edilen denetleyici parametreleri ve cevap eğrilerinin oturma zamanları  
(The controller parameters obtained for the third test system and the respective settling times)

Optimizasyon Tekniği: Denetleyici	GGKO:PI [16]	GGKO:PID [16]	GGKO:PIPD [16]	SOAA:PID
Denetleyici Parametreleri	Ünite 1: Termal $K_p = 1,9995$ $K_i = 0,2391$	Ünite 1: Termal $K_p = 1,9995$ $K_i = 0,1637$	Ünite 1: Termal $K_{p1} = -0,2828$ $K_{p2} = 0,0084$ $K_i = -1,7898$ $K_d = -1,9978$	Ünite 1: Termal $K_p = 2,8249$ $K_i = 2,9966$ $K_d = 2,9910$
	Ünite 2: Hidro $K_p = 0,0189$ $K_i = 0,0048$	Ünite 2: Hidro $K_p = 0,4779$ $K_i = 0,0906$	Ünite 2: Hidro $K_{p1} = 0,1610$ $K_{p2} = -0,6917$ $K_i = -0,5022$ $K_d = -0,4581$	Ünite 2: Hidro $K_p = 2,9882$ $K_i = -1,0179$ $K_d = 2,1781$
	Ünite 3: Gaz $K_p = 0,0507$ $K_i = 0,9633$	Ünite 3: Gaz $K_p = 0,1918$ $K_i = 1,9995$ $K_d = 0,1192$	Ünite 3: Gaz $K_{p1} = 0,0115$ $K_{p2} = -1,9978$ $K_i = -1,9978$ $K_d = -0,1134$	Ünite 3: Gaz $K_p = 2,6764$ $K_i = 2,9950$ $K_d = -2,3833$
$T_s$ (s) (%2 bant)	$\Delta f$ 6,85	6,10	2,83	1,38

### 5.3. Çok Kaynaklı Tek Bölgeli Güç Sisteminin Benzetim Sonuçları

(Simulation Results of Multi-Source Single-Area Power System)

Tek bölgeye sahip bu sistemde %1'lik basamak yük değişimi dikkate alınarak denetleyici parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen parametreler ve tepkilerin oturma zamanı diğer yaklaşımlarla karşılaştırmalı Tablo 5'te sunulmuştur. Elde edilen cevap eğrileri ise Şekil 8'de gösterilmiştir. Burada 3 farklı yaklaşım ile karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bunlar GGKO [16] ile ayarlanan PI, PID ve eklemeli PIPD denetleyicileridir.

**Şekil 8.** Üçüncü test sistemi için elde edilen frekans değişim eğrileri

(Frequency change curves obtained for the third test system)

Cevap eğrilerinin  $U_s$  ve  $O_s$  değerleri Şekil 8'den ölçülerek, Tablo 6'ya kaydedilmiştir. Bu sonuçlara göre SOAA:PID denetleyici,  $U_s$  ve  $O_s$  değerleri en küçük olan tepkiyi sunmuştur.

### 5.4. İki Bölgeli Çok Kaynaklı Güç Sisteminin Benzetim Sonuçları

(Simulations Results of Two-Area Multi-Source Power System)

Bu sistemde denetleyici parametreleri 1. bölge %2'lik basamak yük değişimine maruz bırakıldığında elde edilmiştir. Tablo 7'de elde edilen denetleyici parametreleri ile cevap eğrilerinin oturma zamanları görülmektedir. Tablo 7'de görüldüğü üzere elde edilen sonuçlar literatürdeki 3 farklı çalışmada önerilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar DGA [10], GGKO [16] ve hSFAA-DA [8] algoritmaları ile ayarlanan PID denetleyicileridir. Tablodaki oturma süreleri değerlendirildiğine ortaya konulan yaklaşımda oturma zamanının diğerlerinden çok daha kısa olduğu görülmektedir. Bu şartlarda  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$  ve  $\Delta P_{tie}$  tepkileri Şekil 9'da karşılaştırmalı verilmiştir.

Şekil 9'daki eğrilerden ölçülen  $U_s$  ve  $O_s$  değerleri Tablo 8'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre SOAA ile ayarlanan PID denetleyicinin iyi bir performans sergilediği söylenebilir.

### 5.5. Yüksek Gerilim DA Baralı İki Bölgeli Çok Kaynaklı Güç Sistemi Benzetim Sonuçları

(Simulation Results of Two-Area Multi-Source Power System With High Voltage Direct Current Link)

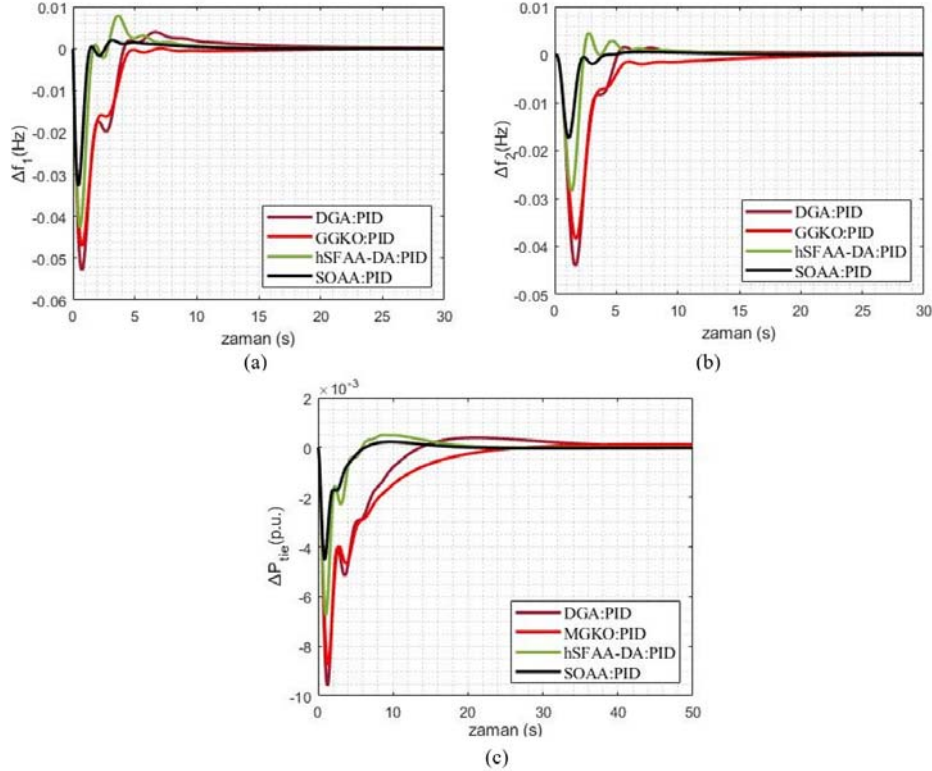
Bu güç sisteminde iki bölgeyi birbirine bağlayan AA bağlantı hattına paralel şekilde çalışan yüksek gerilim DA bara hattının güç sistemi üzerindeki etkisi incelenmiştir. 1. bölge %1'lik basamak yük değişiminin etkisi altındayken elde edilen sonuçlar literatürdeki iki farklı teknik ile karşılaştırılmıştır ve sonuçlar Tablo 9'da verilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçları ise Şekil 10'da görülmektedir. Karşılaştırma amacıyla kullanılan teknikler DGA [10] ve ÖÖOA [13] ile ayarlanan PID denetleyicileridir. Tablo 9'da

**Tablo 6.** Üçüncü test sistemi için ölçülen  $U_s$  ve  $O_s$  değerleri ( $U_s$  and  $O_s$  values measured for the third test system)

Denetleyici Tipi	$U_s$ (Hz)	$O_s$ (Hz)
	$\Delta f$	$\Delta f$
GGKO:PI [16]	-0,029	$15 \times 10^{-4}$
GGKO:PID [16]	-0,025	$6 \times 10^{-4}$
GGKO:PIPD [16]	-0,018	$15 \times 10^{-4}$
SOAA:PIPD	-0,017	$6 \times 10^{-4}$

**Tablo 7.** Dördüncü test sistemi için elde edilen denetleyici parametreleri ve cevap eğrilerinin oturma zamanları (The controller parameters obtained for the fourth test system and the respective settling times)

Optimizasyon Tekniği: Denetleyici	DGA:PID [10]	GGKO:PID [16]	hSFAA- DA:PID [8]	SOAA:PID	
Denetleyici Parametreleri	Ünite 1: Termal	Ünite 1: Termal	Ünite 1: Termal	Ünite 1: Termal	
	$K_p = 0,7790$	$K_p = 1,7502$	$K_p = -1,7074$	$K_p = 2,9774$	
	$K_i = 0,2762$	$K_i = -0,0087$	$K_i = -1,9589$	$K_i = 2,9966$	
	$K_d = 0,6894$	$K_d = 0,7499$	$K_d = -1,3934$	$K_d = 2,5646$	
	Ünite 2: Hidro	Ünite 2: Hidro	Ünite 2: Hidro	Ünite 2: Hidro	
	$K_p = 0,5805$	$K_p = 0,3110$	$K_p = -0,7453$	$K_p = 2,9857$	
	$K_i = 0,2291$	$K_i = 0,3102$	$K_i = 0,1375$	$K_i = -2,7853$	
	$K_d = 0,7079$	$K_d = 0,0034$	$K_d = -0,9896$	$K_d = 1,2536$	
	Ünite 3: Gaz	Ünite 3: Gaz	Ünite 3: Gaz	Ünite 3: Gaz	
	$K_p = 0,5023$	$K_p = 0,0091$	$K_p = -1,8253$	$K_p = 2,9090$	
	$K_i = 0,9529$	$K_i = 1,2409$	$K_i = -1,6813$	$K_i = 2,9977$	
	$K_d = 0,6569$	$K_d = 0,6901$	$K_d = -0,1628$	$K_d = 0,5403$	
$T_s$ (s)	$\Delta f_1$	20,91	15,69	11,47	1,238
$(\%2$ bant)	$\Delta f_2$	20,80	20,05	13,66	2,048
	$\Delta P_{tie}$	11,54	17,82	12,28	1,71



**Şekil 9.** Dördüncü test sistemi için elde edilen cevap eğrileri (a) 1. bölgenin frekans değişimi (b) 2. bölgenin frekans değişimi (c) Bağlantı hattı güç değişimi (Response curves obtained for the fourth test system (a) Frequency change of the 1st area (b) Frequency change of the 2nd area (c) Tie-line power change)

verilen oturma zamanları ile Şekil 10’da görülen tepkiler değerlendirildiğinde önerilen yaklaşımın diğerlerinden daha etkin olduğu söylenebilir.

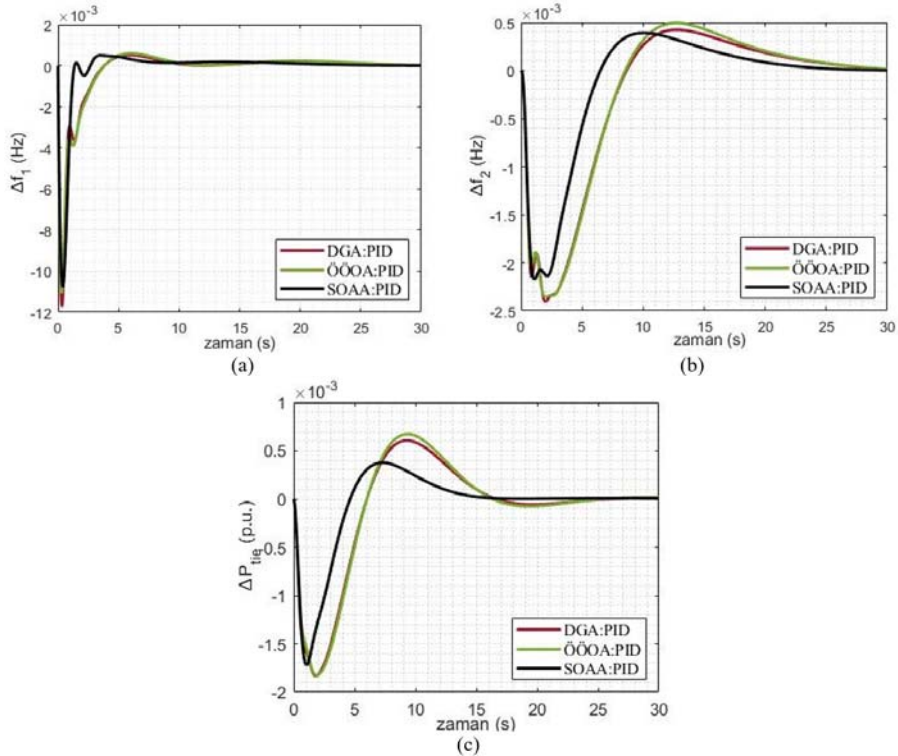
Şekil 10’da verilen tepkilerin  $U_s$  ve  $O_s$  değerleri ölçülmüş ve Tablo 10’da verilmiştir. Ortaya konulan SOAA:PID yaklaşımında bu değerlerin daha küçük ve dolayısıyla

**Tablo 8.** Dördüncü test sistemi için ölçülen  $U_s$  ve  $O_s$  değerleri ( $U_s$  and  $O_s$  values measured for the fourth test system)

Denetleyici Tipi	$U_s$ (Hz)		$U_s$ (puMW)	$O_s$ (Hz)		$O_s$ (puMW)
	$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{tie}$	$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{tie}$
DGA: PID [10]	-0,053	-0,044	$-96 \times 10^{-4}$	0,004	$16 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$
GGKO: PID [16]	-0,047	-0,038	$-88 \times 10^{-4}$	0	0	$13 \times 10^{-5}$
hSFAA- DA: PID [8]	-0,043	-0,028	$-67 \times 10^{-4}$	0,008	0,004	$5 \times 10^{-4}$
SOAA: PID	-0,033	-0,017	-0,004	0,002	$5 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$

**Tablo 9.** Beşinci test sistemi için elde edilen denetleyici parametreleri ve cevap eğrilerinin oturma zamanları (The controller parameters obtained for the fifth test system and the respective settling times)

Optimizasyon Tekniği: Denetleyici	DGA: PID [10]	ÖÖOA: PID [13]	SOAA: PID	
Denetleyici Parametreleri	Ünite 1: Termal $K_p = 1,6929$ $K_i = 1,9923$ $K_d = 0,8269$	Ünite 1: Termal $K_p = 1,6124$ $K_i = 1,9382$ $K_d = 1,0485$	Ünite 1: Termal $K_p = 2,9991$ $K_i = 2,9994$ $K_d = 1,3314$	
	Ünite 2: Hidro $K_p = 1,77731$ $K_i = 0,7091$ $K_d = 0,4355$	Ünite 2: Hidro $K_p = 0,2257$ $K_i = 1,3005$ $K_d = 0,3818$	Ünite 2: Hidro $K_p = 2,9987$ $K_i = 2,7105$ $K_d = -1,5287$	
	Ünite 3: Gaz $K_p = 0,9094$ $K_i = 1,9425$ $K_d = 0,2513$	Ünite 3: Gaz $K_p = 1,7139$ $K_i = 1,8857$ $K_d = 0,2069$	Ünite 3: Gaz $K_p = 2,9983$ $K_i = 2,4081$ $K_d = -2,7640$	
	$T_s$ (s)	$\Delta f_1$	3,15	3,23
(%2 bant)	$\Delta f_2$	7,09	7,11	5,166
	$\Delta P_{tie}$	4,95	5,00	3,473



**Şekil 10.** Beşinci test sistemi için elde edilen cevap eğrileri (a) 1. bölgenin frekans değişimi (b) 2. bölgenin frekans değişimi (c) Bağlantı hattı güç değişimi (Response curves obtained for the fifth test system (a) Frequency change of the 1st area (b) Frequency change of the 2nd area (c) Tie-line power change)

tepkilerin arzu edilen referans değerden daha az saptığı anlaşılmıştır. Ayrıca Şekil 10, Şekil 9 ile karşılaştırıldığında

yüksek gerilim DA iletim hattının sistemin dinamik davranışını iyileştirdiği sonucuna varılır.

**Tablo 10.** Beşinci test sistemi için ölçülen  $U_s$  ve  $O_s$  değerleri ( $U_s$  and  $O_s$  values measured for the fifth test system)

Denetleyici Tipi	$U_s$ (Hz)		$U_s$ (puMW)	$O_s$ (Hz)		$O_s$ (puMW)
	$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{tie}$	$\Delta f_1$	$\Delta f_2$	$\Delta P_{tie}$
DGA: PID [10]	-0,012	$-24 \times 10^{-4}$	$-18 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-4}$
ÖÖOA: PID [13]	-0,011	$-23 \times 10^{-4}$	$-18 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$67 \times 10^{-5}$
SOAA: PID	-0,010	$-21 \times 10^{-4}$	$-17 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$	$39 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-4}$

## 6. SİMGELER (SYMBOLS)

B	: Frekans yönelim faktörü
$b_g$	: Valf konumlandırıcının gaz türbini sabiti
$c_g$	: Gaz türbini valfi konumlandırıcısı
D	: Yük sönmüleme sabiti
f	: Frekans
$G_g$	: Regülatör transfer fonksiyonu
$K_d$	: Türev kazanç parametresi
$K_{dc}$	: Yüksek gerilim kazanç sabiti
$K_G$	: Gaz ünitenin katılımcı faktörü
$K_H$	: Hidro ünitenin katılımcı faktörü
$K_i$	: İntegral kazanç parametresi
$K_p$	: Oransal kazanç parametresi
$K_{ps}$	: Güç sistemi kazanç sabiti
$K_r$	: Termal ünite yeniden ısıtma kazancı
$K_T$	: Termal ünitenin katılımcı faktörü
$P_{Gn}$	: Regülatörün nominal çıkış gücü
R	: Hız regülasyon sabiti
$T_{12}$	: Bağlantı hattı senkronize edici moment katsayısı
$T_{cd}$	: Gaz türbini kompresör deşarj hacmi-zaman sabiti
$T_{cr}$	: Gaz türbininin yanma reaksiyonu zaman gecikmesi
$T_{dc}$	: Yüksek gerilim kazanç zaman sabiti
$T_e$	: Elektriksel moment
$T_f$	: Gaz türbini yakıt zaman sabiti
$T_g$	: Generatör zaman sabiti
$T_{gh}$	: Hidro türbin hız regülatörünün ana servo zaman sabiti
$T_m$	: Mekanik moment
$T_r$	: Termal ünite yeniden ısıtma zaman sabiti
$T_{rh}$	: Hidro ünite geçici düşüş zaman sabiti
$T_{rs}$	: Hidro türbin hız regülatörünün sıfırlama süresi
$T_s$	: Oturma zamanı
$T_{sg}$	: Hız regülatörü süresi
$T_t$	: Türbin zaman sabiti
$T_w$	: Cebri borudaki suyun nominal başlangıç zamanı
$T_{ps}$	: Güç sistemi zaman sabiti
$U_G$	: Gaz ünitenin denetleyici çıkışı
$U_H$	: Hidro ünitenin denetleyici çıkışı
$U_T$	: Termal ünitenin denetleyici çıkışı
w	: Amaç fonksiyonu ağırlık katsayısı
$X_c$	: Gaz türbini hız regülatörünün sağlama sabiti
$Y_c$	: Gaz türbini gecikme süresi sabiti
$\omega$	: Açısal hız
$\Delta f$	: Frekans değişimi
$\Delta P_D$	: Frekansa duyarlı yük değişimi
$\Delta P_e$	: Elektriksel güç çıkış değişimi
$\Delta P_g$	: Regülatör valfi pozisyonundaki değişiklik

$\Delta P_h$	: Hata sinyali
$\Delta P_L$	: Frekansa duyarlı güç değişimi
$\Delta P_{ref}$	: Hız-yük referansı
$\Delta P_t$	: Türbin çıkış gücünün değişmesi
$\Delta P_{tie}$	: Bağlantı hattı güç değişimi
$\Delta \omega$	: Açısal hızdaki değişim

## 7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Güç sistemlerindeki yükler sürekli devreye girip çıkarak kararlılığı etkileyen büyüklüklerde farklı değişimlere neden olmaktadır. Bu değişimlerden kaynaklı oluşan yük frekans problemi olabildiğince hızlı çözümlenmelidir. Bu ise YFK'de kullanılan denetleyici parametrelerin uygun şekilde ayarlanmasıyla mümkündür. Bu problem bu çalışmada bir optimizasyon problemi olarak ele alınmış ve amaca uygun yeni bir hedef fonksiyonu kullanılarak çözülmeye çalışılmıştır. Tasarlanan çoklu hedef fonksiyonunda sistemsel tepkilerin ITAE değeri, salınım miktarı ile oturma zamanı en aza indirilmeye çalışılmıştır.

Denetleyici olarak basit yapısı ve hafif işlemsel yükünden dolayı PID denetleyici seçilmiş ve bu denetleyici parametrelerinin optimizasyonu SOAA yaklaşımı ile tasarlanan hedef fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yaklaşımın performansını test etmek ve katkısını ortaya koymak amacıyla beş farklı güç sistemi incelenmiş ve elde edilen benzetim sonuçları her bir sistem için literatürde bulunan sonuçlarla ayrı ayrı benzer şartlarda karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan önerilen yaklaşımın basit yapısına rağmen diğer düşük ve yüksek mertebeli denetleyicilere kıyasla daha iyi sonuçlar sunduğu görülmüştür. Bu manada bu çalışma ile PID denetleyicinin, parametreleri uygun bir hedef fonksiyonu ile ayarlandığında kontrol sisteminin gereksinimlerine daha sağlıklı ve üretken cevaplar oluşturabileceği gösterilmiştir. Önerilen hedef fonksiyonu diğer denetleyicilerin optimizasyonunda kullanılarak performans iyileşmeleri sağlanabilir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Yalçın E., Vardar T., Lüy M., PID kontrolör ile iki bölge gücü sistemlerinde yük frekans kontrolünün incelenmesi, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 5 (2), 7–11, 2013.
2. Ramakrishna K.S.S., Bhatti T.S., Sampled-data automatic load frequency control of a single area power system with multi-source power generation, Electrical Power Components and Systems, 35 (8), 955–980, 2007.

3. Sönmez Ş., Ayasun S., Gain and phase margin based stability analysis of time delayed single area load frequency control system with fractional order PI controller, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 945-959, 2019.
4. Ekinci S., Optimal design of power system stabilizer using sine cosine algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 34 (3), 1329-1350, 2019.
5. Ali E.S., Abd-Elazim S.M., Bacteria foraging optimization algorithm based load frequency controller for interconnected power system, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 33 (3), 633–638, 2011.
6. Panda S., Mohanty B., Hota P.K., Hybrid BFOA-PSO algorithm for automatic generation control of linear and nonlinear interconnected power systems, *Applied Soft Computing*, 13 (12), 4718–4730, 2013.
7. Rout U.K., Sahu R.K., Panda S., Design and analysis of differential evolution algorithm based automatic generation control for interconnected power system, *Ain Shams Engineering Journal*, 4 (3), 409–421, 2013.
8. Padhy S., Panda S., A hybrid stochastic fractal search and pattern search technique based cascade PI-PD controller for automatic generation control of multi-source power systems in presence of plug in electric vehicles, *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, 2 (1), 12–25, 2017.
9. Mohanty B., Panda S., Hota P.K., Differential evolution algorithm based automatic generation control for interconnected power systems with non-linearity, *Alexandria Engineering Journal*, 53 (3), 537–552, 2014.
10. Mohanty B., Panda S., Hota P.K., Controller parameters tuning of differential evolution algorithm and its application to load frequency control of multi-source power system, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 54 (1), 77–85, 2014.
11. Çelik E., Improved stochastic fractal search algorithm and modified cost function for automatic generation control of interconnected electric power systems, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 88, 103407, 2020.
12. Sahu R.K., Panda S., Rout U.K., Sahoo D.K., Teaching learning based optimization algorithm for automatic generation control of power system using 2-DOF PID controller, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 77 (5), 287–301, 2016.
13. Barisal A.K., Comparative performance analysis of teaching learning based optimization for automatic load frequency control of multi-source power systems, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 66 (3), 67–77, 2015.
14. Sahu R.K., Panda S., Chandra Sekhar G.T., A novel hybrid PSO-PS optimized fuzzy PI controller for AGC in multi area interconnected power systems, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 64 (1), 880–893, 2015.
15. Gozde H., Taplamacioglu M. C., Automatic generation control application with craziness based particle swarm optimization in a thermal power system, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 33 (1), 8–16, 2011.
16. Padhy S., Panda S., Mahapatra S., A modified GWO technique based cascade PI-PD controller for AGC of power systems in presence of Plug in Electric Vehicles, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20 (2), 427–442, 2017.
17. Çimen M.E., Boz A.F., Parameter identification of a non-minimum phase second order system with time delay using relay test and PSO, CS, FA algorithms, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 34 (1), 461-477, 2019.
18. Yang, X.-S., *Nature-inspired optimization algorithms*, 1st edition, Elsevier, 2014.
19. Guha D., Roy P.K., Banerjee S., Application of backtracking search algorithm in load frequency control of multi-area interconnected power system, *Ain Shams Engineering Journal*, 9(2), 257–276, 2018.
20. Cheng M.Y., Prayogo D., *Symbiotic Organisms Search: A new metaheuristic optimization algorithm*, *Computers and Structures*, 139, 98–112, 2014.
21. Çelik E., Öztürk N., A hybrid symbiotic organisms search and simulated annealing technique applied to efficient design of PID controller for automatic voltage regulator, *Soft Computing*, 22, 8011–8024, 2018.
22. Çelik E., A powerful variant of symbiotic organisms search algorithm for global optimization, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87, 103294, 2020.
23. Çelik E., Design of new fractional order PI–fractional order PD cascade controller through dragonfly search algorithm for advanced load frequency control of power systems, *Soft Computing*, 25, 1193–1217, 2021.
24. Çelik E., Öztürk N., Arya Y., Ocak C., (1+PD)-PID cascade controller design for performance betterment of load frequency control in diverse electric power systems, *Neural Computing and Applications*, <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06168-3>.

