



Robust fractional order PID stabilizer design for multi-machine power system using grasshopper optimization algorithm

Baran Hekimoğlu

Department of Electrical & Electronics Engineering, Batman University, Batman, 72100, Turkey

Highlights:

- The GOA technique is an efficient and a new meta-heuristic algorithm.
- PSS with FOPID is more robust than conventional PSS.
- The GOA-based controller has superior performances over GA- and ABC-based controllers.

Keywords:

- Grasshopper optimization algorithm (GOA)
- Fractional order PID (FOPID)
- Power system stabilizer (PSS) design
- Genetic algorithm (GA)
- Artificial bee colony algorithm (ABC)

Article Info:

Research Article
Received: 31.07.2018
Accepted: 16.03.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.449685

Correspondence:

Author: Baran Hekimoğlu
e-mail:
baran.hekimoglu@batman.edu.tr
phone: +90 532 464 6529

Graphical/Tabular Abstract

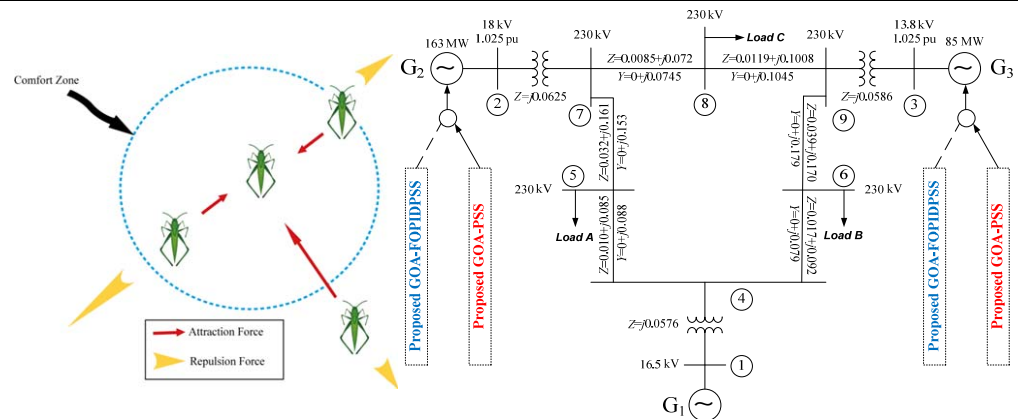


Figure A. Conceptual process of the proposed GOA-based PSS design

Purpose: To overcome the deficiencies of traditional gradient-based methods and other meta-heuristic algorithms, in this study, a new meta-heuristic technique, grasshopper optimization algorithm (GOA), is proposed to use in the robust design of PSS with fractional order proportional-integral-derivative (FOPID) controller structure.

Theory and Methods:

The design problem of the proposed controller was considered as a nonlinear optimization problem. Then, GOA, as a powerful optimization technique inspired by the behavior of grasshoppers in nature, and having excellent exploration and exploitation capabilities as opposed to other algorithms, was successfully applied to find the optimal solution to the problem with the help of a multi-objective function. To demonstrate the robustness and effectiveness of the designed controller (GOA-FOPIDPSS), simulation studies were conducted under different configurations (light, nominal and heavy loading cases) and severe disturbance scenarios.

Results:

Simulation results confirm that the dynamic performance of the proposed GOA-FOPIDPSS is more effective than the other three algorithm-based classical PSSs (GA-PSS, ABC-PSS and the proposed GOA-PSS) both in terms of controller structure and algorithm. Furthermore, the proposed controller was found to be more robust because of having lower settling time and overshoot values even under different scenarios.

Conclusion:

The superiority, potential and robustness of the proposed stabilizer are confirmed through nonlinear simulation studies and some dynamic performance indices. The analysis results show that the proposed GOA-FOPIDPSS controller gives excellent damping performance to low frequency oscillations under different faults and wide operating conditions.



Çekirge optimizasyon algoritması kullanılarak çok makinalı güç sistemi için gürbüz kesir dereceli PID kararlı kılıcısı tasarımı

Baran Hekimoğlu*

Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Batı Raman, Batman, 72060, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- GOA tekniği etkin ve yeni bir sezgisel-üstü algoritmadır
- FOPID yapılı PSS, klasik yapılı PSS'ye nazaran daha gürbüzdür
- GOA-tabanlı kontrolör, GA- ve ABC-tabanlı kontrolörlere göre daha üstün performansa sahiptir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 31.07.2018

Kabul: 16.03.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.449685

Anahtar Kelimeler:

Grasshopper optimization algorithm (GOA), fractional order PID (FOPID), power system stabilizer (PSS) design, genetic algorithm (GA), artificial bee colony algorithm (ABC)

ÖZET

Geleneksel türev-tabanlı metotların ve diğer sezgisel-üstü algoritmaların eksiklerini gidermek amacıyla, bu çalışmada yeni bir sezgisel-üstü teknik olan çekirge optimizasyon algoritmasının (GOA) kesir dereceli oransal-integral-türev (FOPID) kontrolör yapılı güç sistemi kararlı kılıcısının (PSS) gürbüz tasarımında kullanılması önerilmiştir. FOPID tipi PSS parametrelerinin ayarlama problemi, zaman tanım bölgesi tabanlı bir amaç fonksiyonu ile bir optimizasyon problemine dönüştürüldü ve GOA ile çözüldü. Önerilen yaklaşım farklı yüklenme koşulları ve arızalara maruz kalan çok makinalı güç sistemine uygulandı. Önerilen GOA-tabanlı yeni tasarlanan FOPID yapılı kararlı kılıcının (GOA-FOPIDPSS) performansı GA-, ABC- ve ayrıca önerilen GOA-tabanlı klasik yapılı kararlı kılıcılar ile karşılaştırıldı. Önerilen kararlı kılıcının üstünlüğü, potansiyeli ve gürbüzlüğü lineer olmayan simülasyon çalışmaları ve bazı dinamik performans indeksleri vasıtasıyla doğrulandı. Analiz sonuçları, önerilen GOA-FOPIDPSS kontrolörünün farklı arızalar ve geniş çalışma koşullarında düşük frekanslı salınımlara mükemmel sönümleme performansı verdiğini göstermiştir.

Robust fractional order PID stabilizer design for multi-machine power system using grasshopper optimization algorithm

HIGHLIGHTS

- The GOA technique is an efficient and a new meta-heuristic algorithm
- PSS with FOPID is more robust than conventional PSS
- The GOA-based controller has superior performances over GA- and ABC-based controllers

Article Info

Research Article

Received: 31.07.2018

Accepted: 16.03.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.449685

Keywords:

Grasshopper optimization algorithm (GOA), fractional order PID (FOPID), power system stabilizer (PSS) design, genetic algorithm (GA), artificial bee colony algorithm (ABC)

ABSTRACT

To overcome the deficiencies of traditional gradient-based methods and other meta-heuristic algorithms, in this study, a new meta-heuristic technique, grasshopper optimization algorithm (GOA), is proposed to use in the robust design of power system stabilizer (PSS) with fractional order proportional-integral-derivative (FOPID) controller structure. The problem of setting the FOPID type PSS parameters has been transformed into an optimization problem with a time domain based objective function and solved with GOA. The proposed approach was applied to a multi-machine power system exposed to different loading conditions and faults. The performance of the proposed GOA-based newly designed FOPID structured stabilizer (GOA-FOPIDPSS) is compared with GA-, ABC- and also proposed GOA-based conventional structured stabilizers. The superiority, potential and robustness of the proposed stabilizer are confirmed through nonlinear simulation studies and some dynamic performance indices. The analysis results show that the proposed GOA-FOPIDPSS controller gives excellent damping performance to low frequency oscillations under different faults and wide operating conditions.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: baran.hekimoglu@batman.edu.tr / Tel: +90 532 464 6529

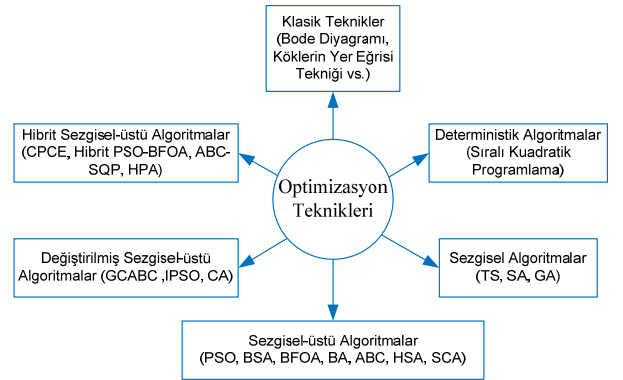
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güç sisteminin kararlılığı, güç sistemi çalışma alanında önemli bir rol oynar. Frekans ve gerilim seviyesi, yüklenme koşullarında değişiklik, üretim kaybı veya bağlantı hatlarının kaybı gibi rahatsızlıklar meydana gelirken uygun bir aralıkta tutulmalıdır [1]. Yerel ve bölgeler arası salınımlara ayrılan düşük frekanslı salınımlar 0,1 ve 3,0 Hz aralığındadır [2]. Bu salınımlar devam ederse, bağlantı hatlarının elektrik enerjisini iletme kabiliyeti azalır ve güç sistemi kararsızlık yaşayabilir. Bu salınımlar genellikle bir sistem bozukluğu esnasında veya sonrasında ortaya çıkar. Bu nedenle, düşük frekanslı salınımları ortadan kaldırmak için kontrol yöntemlerini kullanmak esastır. Esnekliği, kolay uygulanması ve düşük maliyeti nedeniyle, güç sistemi kararlı kılıcılar (PSS), küçük işaret salınımlarını azaltmak ve güç sisteminin dinamik kararlılığını arttırmak için en çok kullanılan aygıtlardır [3]. Alternatif bir seçenek olarak, düşük frekanslı salınımları söndürmek ve tam sistem kararlılığını sağlamak için FACTS tabanlı sönümleme denetleyicisinin eklenmesi de önerilmiştir [4]. Açıkçası, bu ekleme sistemin toplam maliyetini artırır ve güç sisteminde diğer türden sorunların ortaya çıkmasına neden olabilir. Ancak, yapılan bir araştırma, PSS parametrelerinin gürbüz bir şekilde ayarlanmasıyla bölgeler arası salınım modlarının başarılı şekilde sönümlendirilebildiğini göstermiştir [5]. Bu nedenle, tüm sistemin kararlılığını güçlendirmek için en temel zorluk PSS parametrelerinin gürbüz tasarımıdır.

PSS parametrelerinin gürbüz tasarıma göre ayarlanması çeşitli optimizasyon teknikleriyle sağlanır. Son yıllarda gürbüz PSS tasarımı için çeşitli optimizasyon yaklaşımları düşünülmüştür ve bu optimizasyon tekniklerinin sınıflandırılması Şekil 1'de gösterilmiştir. Köklerin yer eğrisi, Bode diyagramı çizimi gibi frekans domeni tabanlı klasik optimizasyon tekniklerinin ve sıralı kuadratik programlama (SQP) gibi bir deterministik tekniğin PSS tasarımı için sırasıyla [6-8]'de uygulandığı bulunmuştur. Bu tekniklerin doğrusal olmayan ve diferansiyel olmayan optimizasyon problemlerini çözmedeki zorlukları ve kısıtlamaları nedeniyle, bu alanda sezgisel tekniklerin uygulanması popüler olmuştur. Tabu arama (TS) [9], benzetimli tavlama (SA) [10] ve genetik algoritma (GA) [11] gibi çeşitli sezgisel algoritmalar son yıllarda en yaygın kullanılan algoritmalarlardır. Bununla birlikte, sezgisel algoritmalarda, yerel minimumda takılı kalma, erken yakınsama, kontrol parametresi seçimi zorlukları gibi bazı eksiklikler tespit edilmiştir [12]. Daha sonra, sezgisel-üstü teknikler olarak bilinen sezgisel algoritmanın daha yüksek bir versiyonu geliştirilmiş ve PSS'lerin tasarımı için uygulanmıştır. Örneğin, [12]'de geriye dönük arama algoritması (BSA), [13]'te parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), [14]'te yarasa algoritması (BA), [15]'te yapay arı kolonisi algoritması (ABC), [16]'da bakteriyel besin arama optimizasyon algoritması (BFOA), [17]'de armoni arama algoritması (HSA) ve [18]'de sinüs kosinüs algoritması (SCA) gibi en popüler sezgisel-üstü algoritmaların tek makinalı sonsuz-baralı ve/ya çok makinalı güç

sistemlerindeki PSS'leri ayarlamak için kullanıldıkları bildirilmiştir. Ancak, çok makinalı büyük bir güç sistemi için çok sayıda parametrenin optimize edilmesi gerektiğinde daha önce önerilen algoritmaların çoğunun performansı bozulur. Ayrıca, PSS parametre optimizasyonu karmaşık bir çok-modlu optimizasyon problemidir ve parametreleri optimize etmek çok zordur. Bu tip sınırlamaların üstesinden gelebilmek için optimizasyon algoritmalarının değiştirilmiş veya geliştirilmiş versiyonları [19-21]'de ve hibrit versiyonları [22-25]'de PSS tasarımı için önerilmiştir. Her ne kadar, farklı algoritmaların bir araya getirilmesi ya da birlikte kullanılması ile kısmi başarıya ulaşılsa da genel hesaplama yükü ve karmaşıklığı artar.

Göreceli olarak yeni bir sezgisel-üstü arama algoritması olan çekirge optimizasyon algoritması (GOA), Saremi vd. tarafından önerilen, çekirge sürülerinin doğadaki davranışını taklit eden popülasyona dayalı stokastik bir optimizasyon tekniğidir [26]. GOA yukarıda belirtilen sorunlara ve dezavantajlara çözüm olarak önerilmiştir. GOA'nın en göze çarpan özellikleri mükemmel keşif ve sömürme yetisine sahip olması, yerel optimuma yakalanmaması, global optimum çözüme hızlıca yakınsaması ve problemin karmaşıklığından etkilenmemesidir. Bu özelliklerinden dolayı, GOA ilk önerildiğinden bu yana birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. GOA; proton değişim zarı yakıt hücreleri yığınının elektrik karakterizasyonu [27], kanser sınıflandırması [28], dağıtılmış yörünge optimizasyonu [29], veri kümelenmesi [30], kısa süreli güç yükü tahmini [31] ve özellik seçimi [32] gibi gerçek mühendislik problemlerinin çözümünde başarıyla kullanılmıştır. Yeni bir algoritma olması hasebiyle bu algoritmanın henüz bir çok gerçek optimizasyon problemine uygulanması henüz yapılmamıştır.



Şekil 1. Güç sistemi kararlı kılıcısı tasarımı için kullanılan çeşitli optimizasyon tekniklerinin sınıflandırılması
(Classification of various optimization techniques used for power system stabilizer design)

Son zamanlarda, PID kontrolörün performansını arttırmak için türev ve integral derecelerinin tamsayı olmadığı kesirli hesaplama kavramının kullanımına dair artan bir ilgi bulunmaktadır [33]. Podlubny tarafından önerilen kesirli dereceli PID (FOPID) kontrolör [34, 35], PID kontrolörün

kesirli hesaplama kullanılarak genelleştirilmesidir. Bir FOPID kontrolörü beş parametreyle yani oransal kazanç, integral kazancı, türev kazancı, integral derecesi ve türev derecesi ile karakterize edilir. Son yıllarda FOPID kontrolörler; sıcaklık izleme, doğru akım (DA) motor hareket kontrolü, DA-DA yükseltici dönüştürücü kontrolü, hipersonik uçuş aracı kontrolü, otomatik gerilim regülatörü, servo pres kontrol sistemi gibi birçok uygulamada kullanılmıştır [34, 35]. Bu araştırma sonuçları FOPID kontrolörün klasik PID kontrolörüne kıyasla daha iyi bir performansa ve gürbüzlüğe sahip olduğunu göstermiştir. [6-25] referanslarına bakıldığında PSS tasarımı için literatürde genellikle faz ilerlemeli-gerilemeli kontrolör yapısı tercih edilmiştir. Yer yer PID yapılarına da rastlanılmaktadır [17, 20]. Ancak çok makinalı güç sistemlerinde PSS tasarımında FOPID kontrolör yapısı hiç kullanılmamıştır.

Bu makalede, çok makinalı bir güç sisteminde güç sistemindeki istenmeyen salınımları etkin bir şekilde bastırma amacıyla PSS parametrelerinin optimum tasarımı için GOA olarak bilinen yeni bir optimizasyon algoritmasının uygulanması ilk kez önerilmektedir. Ayrıca, literatürde yaygın görülen geleneksel faz ilerlemeli-gerilemeli ve henüz uygulaması yapılmayan FOPID tabanlı iki tip PSS yapısı önerilmiştir. Önerilen kararlı kılıcıların tasarım problemi bir çeşit optimizasyon problemine çevrildi ve kararlı kılıcılarının en uygun parametrelerinin elde edilmesi için GOA tekniğinden yararlanıldı. Önerilen çoklu amaç fonksiyonunu minimuma indirgeyerek sistemin kararlılık performansının iyileştirilmesi hedeflendi. Önerilen kontrolörlerin (GOA-PSS ve GOA-FOPIDPSS) etkinliği ve gürbüzlüğü farklı türden arızalara maruz kalan IEEE 3-makinalı 9-baralı sistem üzerinde GA-tabanlı PSS (GA-PSS) [36] ve ABC-tabanlı PSS (ABC-PSS) [36] ile karşılaştırmalar yapılarak başarıyla test edildi. Simülasyon sonuçları, önerilen GOA-FOPIDPSS kontrolörün, GA-PSS, ABC-PSS ve önerilen GOA-PSS kontrolörlerine kıyasla farklı çalışma koşulları ve arızalar altında sistem salınımlarını daha iyi sönümlediğini göstermiştir.

Bu çalışmanın ana katkıları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

En göze çarpan özgünlük, yeni bir optimizasyon algoritması olan GOA tekniğinin, PSS tasarımına ilk kez uygulanmasıdır.

Önceki çalışmalarda [6-25] kullanılmayan FOPID tabanlı PSS kontrolör önerilerek literatürde çokça tercih edilen faz ilerlemeli-gerilemeli (klasik) PSS kontrolörü ile performans karşılaştırması yapılmıştır. Bu bakımdan özgünlük içermektedir.

PSS parametreleri GOA ile optimize edilen sistemin dinamik performansı, gürbüzlüğü ve etkinliği; sezgisel optimizasyon sınıfına giren GA ve sezgisel-üstü optimizasyon sınıfına giren ABC ile optimize edilen sistemlerle [36] karşılaştırılmıştır.

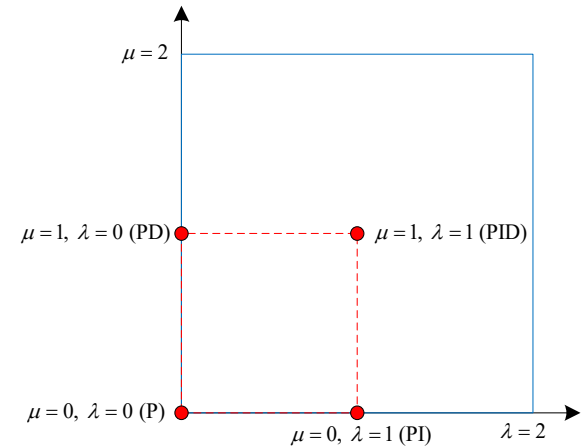
Önceki çalışmalardan [6-25] farklı olarak daha etkili bir çoklu amaç fonksiyonu PSS tasarımında ilk kez önerilmiştir.

2. KESİR DERECELİ PID (FOPID) KONTROLÖR (FRACTIONAL ORDER PID (FOPID) CONTROLLER)

Bir FOPID kontrolör klasik PID kontrolörün genişletilmiş halidir. Kesir dereceli kontrolörler, denetlenen sistemin ve kontrolörün parametrelerindeki değişikliklere daha az duyarlıdır [37, 38]. Kesir dereceli bir kontrolör, çok kolay bir şekilde eş-sönümleme (belirli bir frekans aralığında sistem cevabının aynı faz payına sahip olması) özelliğini elde edebilir. FOPID'in genelleştirilmiş transfer fonksiyonu şu şekilde verilir [33, 38]:

$$G_{FOPID}(s) = K_p + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu, (\lambda, \mu > 0) \quad (1)$$

Burada K_p , K_I ve K_D sırasıyla oransal, integral ve türev kazançlarını, λ integral teriminin kesirli derecesini ve μ türev teriminin kesirli derecesini temsil eder. Genel olarak, ele alınan kesirli derecenin aralığı 0 ile 2 arasındadır [38]. Eğer $\lambda=1$ ve $\mu=1$ ise klasik PID kontrolör, eğer $\lambda=0$ ve $\mu=1$ ise PD kontrolör, eğer $\lambda=1$ ve $\mu=0$ ise PI kontrolör ve eğer $\lambda=0$ ve $\mu=0$ ise P kontrolör elde edilir. Tüm bu klasik tip kontrolörler, FOPID kontrolörün özel durumlarıdır. FOPID kontrolörün grafiksel temsili Şekil 2'de gösterilmektedir. Burada x eksenini kontrolörün integral derecesini gösterirken y eksenini de türev derecesini gösterir. Şekil 2, FOPID kontrolör ile standart PID kontrolör arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Şekilden görülebileceği gibi FOPID kontrolör, tamsayı dereceli PID kontrolörü genelleştirerek onu noktadan düzleme doğru genişletir. Bu genişletme, kontrolör tasarımına daha fazla esneklik katarken gerçek hayattaki proseslerin de daha doğru denetlenmesine olanak sağlar [34].



Şekil 2. FOPID kontrolör düzlemi (The plane of FOPID controller).

Şekil 3, FOPID kontrolörün kullanıldığı bir kapalı çevrim sisteminin genel yapısını göstermektedir. FOPID kontrolörlerin geleneksel PID kontrolörlere göre fazladan iki parametresinin olması, fazladan iki koşulun daha yerine getirilmesiyle sistem performansının genel olarak daha iyileştirilebilmesi demektir. Böylece FOPID ($PI^\lambda D^\mu$)

kontrolörden sistem performansını artırması beklenebilir. FOPID kontrolör parametrelerinin ayarlanması, kontrolör tasarımındaki temel sorunlardan biridir. Araştırmacılar, Ziegler-Nichols benzeri bir ayar yöntemi, parçacık sürüsü optimizasyonu, sınır ağları, vb. farklı ayar yöntemleri kullanmışlardır [38].

3. ÇEKİRGE OPTİMİZASYON ALGORİTMASI (GOA) (GRASSHOPPER OPTIMIZATION ALGORITHM (GOA))

GOA, çekirge sürülerinin doğadaki davranışını taklit eden ve bu davranışları çok değişkenli optimizasyon problemlerini çözmek için matematiksel olarak modelleyen tek amaçlı popülasyona dayalı yeni bir sezgisel algoritmadır [26]. Algoritma, çekirgeler arasındaki itme ve çekim kuvvetlerini simüle eder. İtme kuvvetleri, çekirgelerin arama alanını keşfetmelerine izin verirken, çekim kuvvetleri onları gelecek vaat eden bölgelerden yararlanmaya zorlar. GOA, optimizasyon süreci boyunca arama (küresel arama) ve sömürme (yerel arama) aşamalarını dengelemek için çekirgelerin konfor bölgesini azaltan bir katsayıyla donatılmıştır. Bu, GOA'nın yerel optimumda sıkışıp kalmasını önleyerek küresel optimumun doğru bir yaklaşımını bulmasına yardımcı olur. Sürünün şimdiye kadar elde ettiği en iyi çözüm, sürü tarafından takip edilecek hedef olarak görüldüğünden çekirgelerin optimizasyon adımları boyunca hedefin iyileştirilmesi yoluyla küresel optimumu bulma şansı çok yüksektir. GOA'nın pozisyon güncelleme denklemi aşağıdaki gibidir [26].

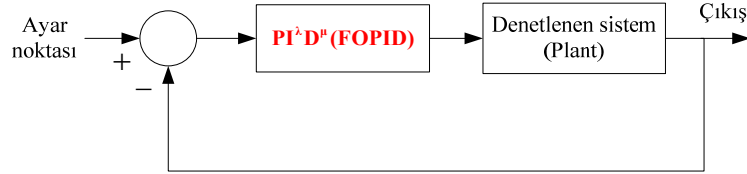
$$X_i^d = r \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N r \frac{ub_d - lb_d}{2} s(|x_j^d - x_i^d|) \frac{x_j - x_i}{d_{ij}} \right) + T_d \quad (2)$$

Burada, X_i^d d -inci boyutta şimdiki çözümün konumunu, r konfor bölgesini, itme bölgesini ve çekim bölgesini daraltan bir azalan katsayıyı, ub_d d -inci boyutun üst sınırını, lb_d d -inci boyutun alt sınırını, s çekirgeler arasındaki sosyal kuvvetleri tanımlayan fonksiyonu, d_{ij} j -inci çekirge x_j ve i -inci çekirge x_i arasındaki mesafenin mutlak değerini, T_d şimdiye kadar bulunan en iyi çözüm olan d -inci boyuttaki hedefin değerini temsil eder. Eş. 2, bir çekirgenin bir sonraki pozisyonunun; mevcut pozisyonuna, diğer tüm çekirgelerin pozisyonuna ve hedefin konumuna bağlı olduğunu gösterir. Eş. 2'deki sosyal kuvvetler fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır [26].

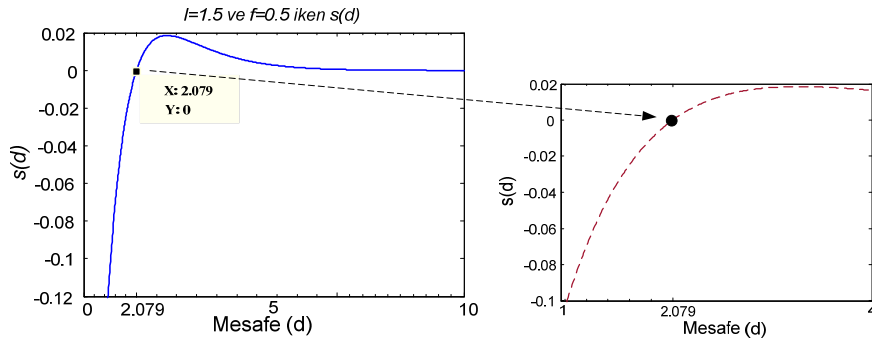
$$s = f e^{\frac{-d}{l}} - e^{-d} \quad (3)$$

Burada, f çekim kuvvetinin şiddetini ve l çekici uzunluk skalasını gösterir. Şekil 4'te s fonksiyonunun çekirgeler arasındaki sosyal etkileşim (çekim ve itme) üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Bu şekilde, 0 ile 10 arasındaki mesafeler dikkate alınmıştır. İtme, [0, 2,079] aralığında gerçekleşir. Bir çekirge başka bir çekirgenin 2,079 birim uzağında olduğunda aralarında çekim veya itme oluşmaz. Bu mesafe konfor bölgesi veya konforlu mesafe olarak adlandırılır. Şekil 4, aynı zamanda 2,079 ile 4 arasında çekimin yükseldiğini ve daha sonra kademeli olarak azaldığını göstermektedir. Eş. 3'te f ve l parametrelerini değiştirmenin yapıy çekirgelerde farklı sosyal davranışlara neden olacağı açıktır, ancak bu çalışmada sırasıyla 0,5 ve 1,5 olarak seçilmiştir. Şekil 4'ün gösterdiği gibi bu fonksiyon 4'ten daha büyük mesafeler için sıfıra yakın değerler verdiği için çekirgelerin mesafesi [1, 4] aralığında planlanmıştır. Bu aralıktaki fonksiyonun şekli Şekil 4'te (sağda) gösterilmiştir.

Eş. 2'deki r parametresinin, keşif ve sömürüyü dengelemek için iterasyonların sayısı ile orantılı olarak azaltılması



Şekil 3. FOPID kontrolörün genel blok diyagramı (General block diagram of FOPID controller).



Şekil 4. Sosyal kuvvetler fonksiyonu s , $l=1,5$ ve $f=0,5$ iken (sol), ve d mesafesi [1, 4] aralığında iken aldığı değer aralığı (sağ) [26] (Social forces function s when $l=1.5$ and $f=0.5$ (Left), and its range when distance d is in a range of [1, 4] (right) [26])

gerekmektedir. Bu, iterasyon sayısı arttıkça sömürmeyi (yerel aramayı) teşvik eder. Bu parametre aynı zamanda konfor bölgesini iterasyonların sayısı ile orantılı olarak azaltır ve aşağıda verilmiştir.

$$r = r_{\max} - t \frac{r_{\max} - r_{\min}}{T} \quad (4)$$

Burada, r_{\max} maksimum değeri, r_{\min} minimum değeri, t şimdiki iterasyonu ve T toplam iterasyon sayısını gösterir. Bu makalede, r_{\max} ve r_{\min} sırasıyla 1 ve 0,00001 seçilmiştir [26].

4. ÇOK-MAKİNALI GÜÇ SİSTEMİ MODELİ (MULTI-MACHINE POWER SYSTEM MODEL)

4.1. Doğrusal Olmayan Makina Modeli (Nonlinear Machine Model)

Bu çalışmada, senkron generatörler iki eksenli model olarak kabul edilmektedir. i -inci senkron makinanın modelini tanımlayan doğrusal olmayan diferansiyel denklemler aşağıdaki gibi ifade edilir [39, 40]:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_0(\omega_i - 1) \quad (5)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = (T_{mi} - T_{ei} - D_i(\omega_i - 1)) / M_i \quad (6)$$

$$\frac{dE'_{qi}}{dt} = (-E'_{qi} + E_{fdi} - (X_{di} - X'_{di})I_{di}) / T'_{doi} \quad (7)$$

$$\frac{dE'_{di}}{dt} = (-E'_{di} + (X_{qi} - X'_{qi})I_{qi}) / T'_{qoi} \quad (8)$$

$$T_{ei} = (E'_{qi} - X'_{di}I_{di})I_{qi} + (E'_{di} + X'_{qi}I_{qi})I_{di} \quad (9)$$

4.2. Uyarma Sistemi Modeli (Excitation System Model)

Bu çalışmada, Şekil 5'te gösterilen *IEEE Type-ST1* uyarma sistemi dikkate alınmıştır. Aşağıdaki eşitlik uyarma sisteminin doğrusal olmayan modelini tanımlar [39]:

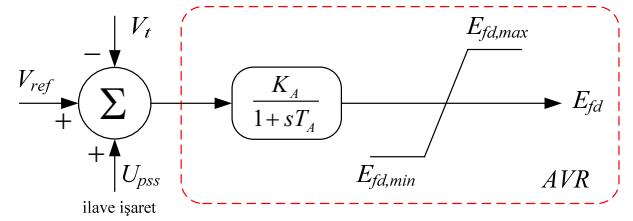
$$\frac{dE_{fdi}}{dt} = (-E_{fdi} + K_{Ai}(V_{refi} - V_{ti} + U_{pssi})) / T_{Ai} \quad (10)$$

Eş. 10'da i -inci senkron makina için K_{Ai} ve T_{Ai} sırasıyla otomatik gerilim regülatör kazancı ve zaman sabiti; U_{pssi} PSS kontrol gerilimi; V_{ti} ve V_{refi} sırasıyla generatör uç ve referans gerilimleri olarak tanımlanır.

5. ÖNERİLEN TASARIM YAKLAŞIMI (PROPOSED DESIGN APPROACH)

5.1. Önerilen Kararlı Kılıcılar (Proposed Stabilizers)

Bir PSS'nin işlevi, uyarım girişi ile makina elektriksel momenti arasındaki faz gecikmesi kompanze edilecek şekilde ilgili makinanın rotoru üzerinde bir moment üretmektir [36]. Burada, bu çalışmada kullanılmış olan iki tür PSS tartışılmıştır.



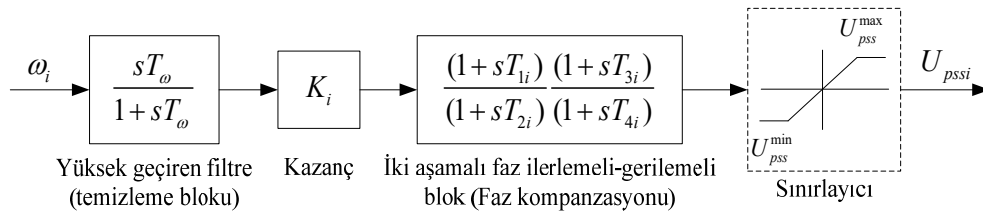
Şekil 5. Uyarma sistemi modeli (Excitation system model)

5.1.1. Faz ilerlemeli-gerilemeli güç sistemi kararlı kılıcısı (Lead-Lag power system stabilizer)

Bu çalışmada kullanılan geleneksel PSS'nin yapısı Şekil 6'da gösterilmiş ve transfer fonksiyonu aşağıda verilmiştir [41].

$$U_{pssi}(s) = K_i \frac{sT_\omega}{1 + sT_\omega} \left[\frac{(1 + sT_{1i})(1 + sT_{3i})}{(1 + sT_{2i})(1 + sT_{4i})} \right] \Delta\omega_i(s) \quad (11)$$

Burada, $\Delta\omega_i$ i -inci makinadaki senkron hızdan sapma miktarıdır. Bu kararlı kılıcı türü, bir temizleme filtresi ile dinamik bir dengeleyiciden oluşur. Çıkış sinyali, uyarım sisteminin regülatörüne bir ek giriş sinyali, U_{pssi} , olarak beslenir. Esasen bir yüksek geçiren filtre olan temizleme filtresi, PSS'nin çıkışındaki kararlı hal saptmasını sıfırlamak için kullanılır. Zaman sabitinin değeri, T_ω genellikle kritik değildir ve 0,5 ila 20 s arasında değişebilir [42]. Bu çalışmada 10 s'ye sabitlenmiştir. Dinamik dengeleyici iki adet faz ilerlemeli-gerilemeli kattan ve ek bir kazançtan ibarettir. Ayarlanabilen PSS parametreleri, PSS kazancı, K_i ve zaman sabitleri $T_{1i}-T_{4i}$ 'dir. Sistemde bulunan faz



Şekil 6. Faz ilerlemeli-gerilemeli PSS'nin yapısı (Structure of lead-lag PSS).

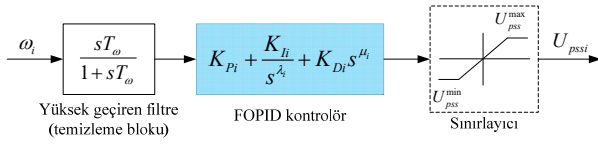
ilerlemeli-gerilemeli blok ise uyarım girişiyle elektriksel moment arasındaki devrede oluşan faz gecikmesinin kompanse edilmesi için gerekli faz ilerlemesini sağlar [36].

5.1.2. FOPID tipi güç sistemi kararlı kılıcısı (FOPID type power system stabilizer)

Çok makinalı güç sistemleri açısal kararlılık literatüründe hiç kullanılmayan FOPID tipi kararlı kılıcının transfer fonksiyonu aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$U_{pssi}(s) = \frac{sT_\omega}{1+sT_\omega} \left(K_{Pi} + \frac{K_{Ii}}{s^{\lambda_i}} + K_{Di} s^{\mu_i} \right) \Delta\omega_i(s) \quad (12)$$

Burada K_P , K_I , K_D PID kazançları ve λ ve μ ise kesirli dereceli operatörlerdir. Bu tür PSS bir temizleme filtresi ile bir FOPID kontrolörden oluşur. Tamsayı dereceli PID kontrolüne kıyasla fazladan 2 serbestlik derecesi olan FOPID tabanlı PSS'nin yapısı Şekil 7'de gösterilmiştir. λ ve μ 'nun 1 olması durumunda FOPID PSS paralel yapılı klasik tam sayı dereceli PID kontrolöre indirgenir.



Şekil 7. FOPID PSS'nin yapısı (Structure of FOPID PSS).

5.2. Önerilen Optimizasyon Problemi (Proposed Optimization Problem)

Literatürde PSS tasarımında amaç fonksiyonu olarak çeşitli performans indeksleri bulunmaktadır. En popüler performans indekslerinden bazıları, mutlak hatanın integrali (IAE), karesel hatanın integrali (ISE) ve zamanla karesel hatanın çarpımının integrali (ITSE)'dir. Fakat bu kriterlerin kendilerine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. Örneğin, IAE ve ISE kullanılarak küçük aşımara ulaşılabilir ancak yerleşim zamanı feda edilir, ITSE bu problemi çözebilir ancak gerekli bir kararlılık sınırını garanti etmez [35]. Bu nedenle, bu makalede daha önce Gaing vd. tarafından [43] önerilen ve zaman cevabıyla ilgili spesifikasyonların dâhil edildiği bir zaman domeni performans kriteri seçilmiştir. Performans kriteri $F(k, \Delta\omega)$ ve önerilen $J_{gürbüz}$ çoklu amaç fonksiyonu şu şekilde ifade edilir:

$$F(k, \Delta\omega) = (1 - e^{-\beta})(M_p + e_{ss}) + e^{-\beta}(t_s - t_r) \quad (13)$$

$$J_{gürbüz} = \sum_{j=1}^{NS} \sum_{i=1}^{NG} F(k, \Delta\omega_i) \quad (14)$$

Burada NS toplam senaryo sayısı; NG toplam generatör sayısı; k optimize edilecek kontrolör parametreleri (faz ilerlemeli-gerilemeli PSS için K ve T_1-T_4 ; FOPID PSS için K_P , K_I , K_D , λ ve μ); β , 0,8 ve 1,5 aralığında olan ağırlık faktörüdür. Bu çalışmada β , 1 olarak seçilmiştir [43]. M_p , e_{ss} ,

t_s ve t_r sırasıyla maksimum aşım, sürekli hal hatası, yerleşme zamanı ve yükselme zamanı olarak tanımlanır. $J_{gürbüz}$ çoklu amaç fonksiyonunun en düşük değeri alması halinde sistem yerleşme zamanı, aşım, yükselme zamanı ve sürekli hal hatası açısından tüm senaryo durumları için en iyi dinamik kararlılık performansı gösterir. Bu çalışmada önerilen $J_{gürbüz}$ çoklu amaç fonksiyonu PSS tasarımına ilk kez uygulanmıştır. $J_{gürbüz}$ minimum hale getirilmek suretiyle faz ilerlemeli-gerilemeli kontrolör tabanlı PSS için tasarım probleminin aşağıdaki yapısal kısıtlamaları vardır.

$$K_i^{\min} \leq K_i \leq K_i^{\max} \quad (15)$$

$$T_{1i}^{\min} \leq T_{1i} \leq T_{1i}^{\max} \quad (16)$$

$$T_{2i}^{\min} \leq T_{2i} \leq T_{2i}^{\max} \quad (17)$$

$$T_{3i}^{\min} \leq T_{3i} \leq T_{3i}^{\max} \quad (18)$$

$$T_{4i}^{\min} \leq T_{4i} \leq T_{4i}^{\max} \quad (19)$$

Burada $i=1,2,\dots,n$ olmak üzere n , çok makinalı güç sistemindeki PSS sayısını göstermektedir. Bu parametrelerin aralıkları K_i için $[0,01-100]$ ve T_{1i} , T_{2i} , T_{3i} ve T_{4i} için ise $[0,01-1]$ 'dir. Önerilen yaklaşım GOA tekniğini kullanmak suretiyle bu optimizasyon problemini çözerek optimal PSS parametre kombinasyonunu (K_i , T_{1i} , T_{2i} , T_{3i} ve T_{4i}) bulmaya çalışır. Benzer şekilde, $J_{gürbüz}$ minimum hale getirilmek suretiyle FOPID kontrolör tabanlı PSS için tasarım probleminin aşağıdaki kısıtlamaları vardır.

$$K_{Pi}^{\min} \leq K_{Pi} \leq K_{Pi}^{\max} \quad (20)$$

$$K_{Ii}^{\min} \leq K_{Ii} \leq K_{Ii}^{\max} \quad (21)$$

$$K_{Di}^{\min} \leq K_{Di} \leq K_{Di}^{\max} \quad (22)$$

$$\lambda_i^{\min} \leq \lambda_i \leq \lambda_i^{\max} \quad (23)$$

$$\mu_i^{\min} \leq \mu_i \leq \mu_i^{\max} \quad (24)$$

K_{Pi} , K_{Ii} ve K_{Di} parametrelerinin alt ve üst limitleri sırasıyla 0,001 ve 15; λ_i ve μ_i için ise sırasıyla 0 ve 2 olarak alınmıştır [38]. FOPID PSS tasarımı için de önerilen yaklaşımla GOA tekniği çalıştırılmak suretiyle bu optimizasyon problemi çözümlenerek optimal PSS parametre kombinasyonu ($i=1,2,\dots,n$ için K_{Pi} , K_{Ii} , K_{Di} , λ_i ve μ_i) elde edilir. Yukarıdaki bölüm ve eşitliklerde görüleceği üzere literatürde çokça kullanılan faz ilerlemeli-gerilemeli ve çok makinalı güç sistemlerinde henüz uygulaması yapılmayan FOPID kontrolör tabanlı PSS'ler aynı yüksek geçiren filtreye sahiptir, giriş işaretleri ($\Delta\omega$) aynıdır ve optimize edilecek parametre sayıları da eşittir. Böylece bu iki tip PSS'nin uygun performans karşılaştırması yapılabilir. Sonraki bölümde ise yeterince büyük olan örnek bir güç sistemi ele alınarak çeşitli analizler

yoluyla hangi tip PSS'nin güç sistemine daha iyi sönüm sağladığı gösterilecektir.

6. DURUM ÇALIŞMASI (CASE STUDY)

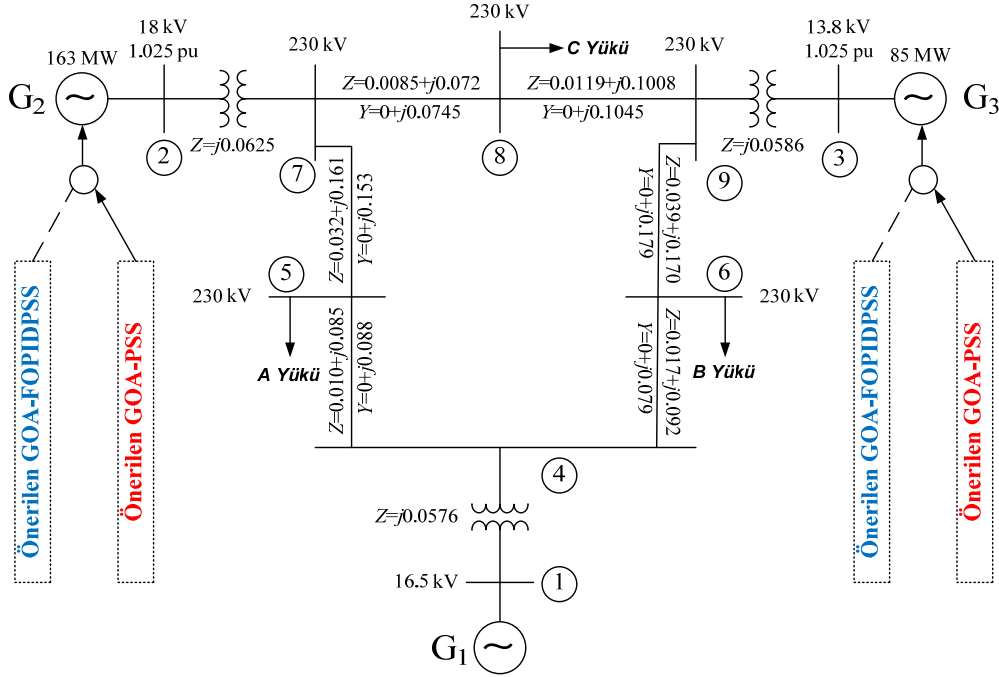
6.1. Test Sistemi ve PSS'siz Sistem Analizi (Test System and System Analysis Without PSS)

Bu çalışmada, pratik bir sistem olan ve literatürde yaygın olan WSCC (Western System Coordinated Council) üç-makinalı dokuz-baralılı güç sistemi göz önüne alınmıştır. Örnek güç sisteminin empedans diyagramı Şekil 8'de verilmiştir. Temel güç 100 MVA ve sistem frekansı 60 Hz'dir. Tüm generatörler için basitleştirilmiş IEEE Type-ST1A statik uyarma sistemi düşünüldü. Detaylı sistem verileri için [36, 39] referanslarına bakılabilir. Bu çalışmada ayrı ayrı tasarlanan önerilen GOA-PSS ile önerilen GOA-FOPIDPSS kontrolörlerinin etkinliğini ve dayanıklılığını kanıtlamak; ilaveten literatürdeki metotlarla (GA-PSS [36]

ve ABC-PSS [36]) ve birbirine karşı performanslarını karşılaştırmak amacıyla 5 farklı senaryo durumu ele alındı. Farklı hatlardaki üç-fazlı arızalar, farklı arıza temizleme zamanları ve farklı yüklenme koşulları bu senaryolar kapsamındadır. Üç farklı (nominal, ağır ve hafif) yüklenme koşulu için generatör ve sistem yüklenme seviyeleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de listelenmiştir.

Bu çalışmada ele alınan ana senaryolar:

Senaryo 1 (En ciddi arıza yeri, nominal yüklenme durumu): Örnek güç sistemi için en ciddi arıza yeri 2. generatöre yakın olan 7 nolu baranın sonundaki 5-7 hattıdır [13]. $t=1$ s esnasında 6 periyotluk ($t_{arıza}=0,10$ s) bir üç-fazlı arızanın olduğu varsayımı yapıldı. Arıza temizlendikten sonra arızalı 5-7 hattı yeniden devreye alınmak suretiyle sistemin eski haline döndüğü kabul edildi.



Şekil 8. WSCC üç-makinalı dokuz-baralılı güç sistemi (WSCC three-machine nine-bus power system)

Tablo 1. Generatör çalışma koşulları (Generator operating conditions)

Generatör	Nominal Yüklenme		Ağır Yüklenme		Hafif Yüklenme	
	P	Q	P	Q	P	Q
G ₁	0,7164	0,2705	2,2073	1,0878	0,3623	0,1620
G ₂	1,6300	0,0665	1,9200	0,5635	0,8000	-0,1085
G ₃	0,8500	-0,1086	1,2800	0,3587	0,4500	-0,2042

Tablo 2. Sistem yüklenme koşulları (System loading conditions)

Yük	Nominal Yüklenme		Ağır Yüklenme		Hafif Yüklenme	
	P	Q	P	Q	P	Q
A	1,25	0,50	2,00	0,80	0,65	0,55
B	0,90	0,30	1,80	0,60	0,45	0,35
C	1,00	0,35	1,50	0,60	0,50	0,25

Senaryo 2 (Arıza temizleme süresinin artırılması durumu): Bu senaryoda, yalnızca ilk senaryodaki arıza süresinin değiştiği ve iki katına ($t_{ariza}=0,20$ s) çıktığı düşünüldü.

Senaryo 3 (Başka arıza yeri seçme durumu): Bu senaryoda, ilk senaryodaki en ciddi arıza yeri yerine 3. generatöre yakın olan 9 nolu baranın sonundaki 8-9 hattı ele alındı. $t=1$ s esnasında 9 periyotluk ($t_{ariza}=0,15$ s) bir üç-fazlı arızanın olduğu varsayımı yapıldı. Arıza temizlendikten sonra arızalı 8-9 hattı yeniden devreye alınmak suretiyle sistemin eski haline döndüğü kabul edildi.

Senaryo 4 (Ağır yüklenme durumu): Bu senaryoda, ikinci senaryodaki nominal yüklenme koşulu yerine verileri Tablo 1 ve Tablo 2’de verilen ağır yüklenme koşulu ele alındı.

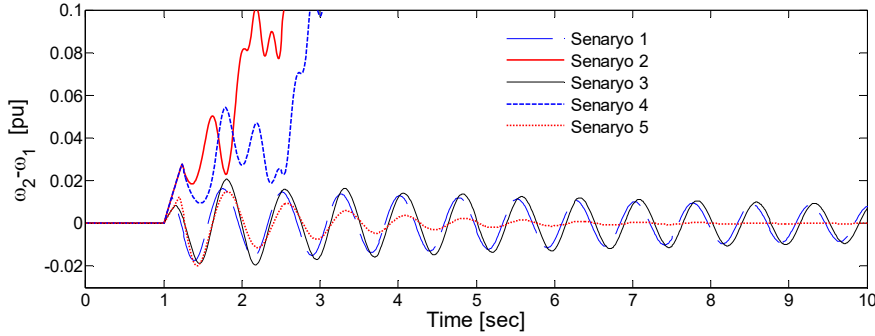
Senaryo 5 (Hafif yüklenme durumu): Son senaryoda ise ikinci senaryodaki nominal yüklenme koşulu yerine verileri Tablo 1 ve Tablo 2’de verilen hafif yüklenme koşulu ele alındı.

Ayrıca sisteme çoklu arıza verilmesi istenilirse bu 5 temel senaryo üzerinden hareket edilebilir ve çoklu arıza durumlarındaki sistem davranışı, bu 5 temel senaryo için elde edilen sonuçlarla paralellik gösterecektir. Bu senaryoların benzerlerini içeren çalışmalar [44] nolu inceleme makalesinde genişçe ele alınarak verilmiştir. Sistemin tüm arızalara verdiği $\omega_2-\omega_1$ ve $\omega_3-\omega_1$ hız sapmaları cevapları sırasıyla Şekil 9-10’da verilmiştir. İki şekilden görüleceği üzere 5 arıza senaryosunun 2’sinde (*Senaryo 2* ve *Senaryo 4*) sistem kararsızdır ve diğer 3’ünde (*Senaryo 1*, *Senaryo 3* ve *Senaryo 5*) ise kararlı olmasına rağmen güç sistemi salınımları çok yetersiz sönüme sahiptir. Sistemin

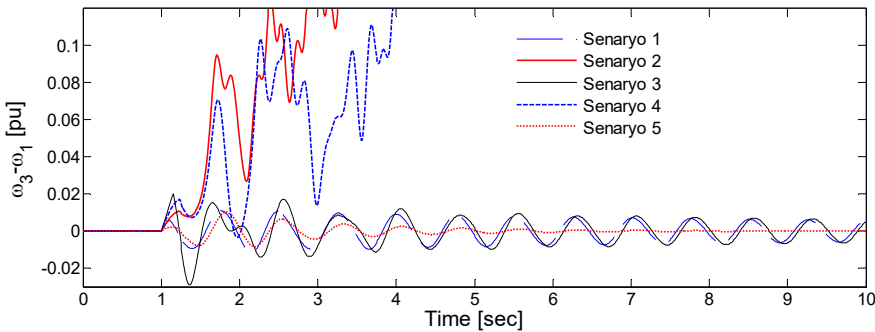
tüm senaryolarda kararlı ve salınımların en kısa sürede bastırılması açısından kontrolör tasarımının yapılması zorunludur.

6.2. PSS Tasarımı İçin GOA Tekniğinin Uygulanması (Application of GOA Technique for PSS Design)

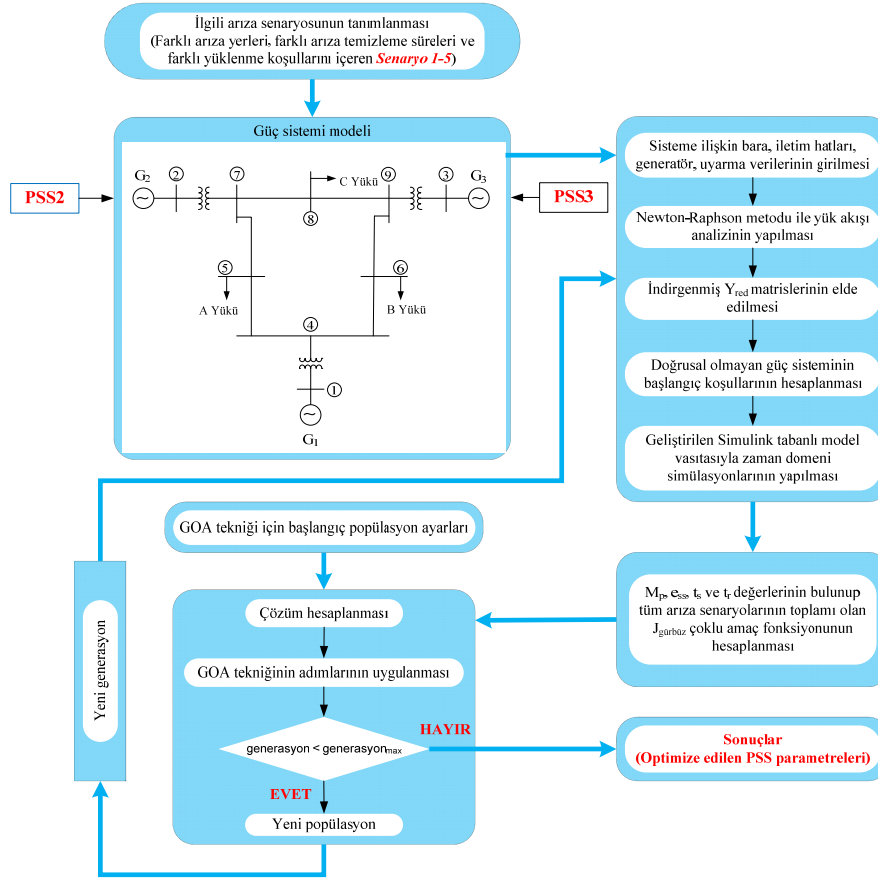
PSS’lerin optimum yerlerinin öğrenilmesi için katılım faktörü metodu ve PSS etkisinin hassaslığı metodu kullanılır [36]. Her iki metot da PSS’lerin yüklenmesi için optimum yer olarak G_2 ve G_3 ’ü göstermektedir. Bu çalışmada 3-makinalı 9-baralı güç sistemi için toplamda $2 \times 5 = 10$ parametrenin optimize edilmesi gerekmektedir. GOA için popülasyon büyüklüğü 30 ve iterasyon sayısı 100 seçilmiştir. Optimizasyon probleminin çözülmesi ve kararlı kılıcılarının parametrelerinin optimal takımlarının bulunması için MATLAB programı dilinde GOA algoritması uygulandı. PSS parametrelerinin optimizasyonu, Eş. 14’te verilen ve tüm senaryo durumlarını içeren $J_{gümbüz}$ çoklu amaç fonksiyonunun değerlendirilmesi yoluyla yürütülür. Şekil 11, optimal kararlılık probleminin çözümünün belirlenmesi için GOA metodunun hesaplamalı akış diyagramını göstermektedir. Optimizasyon süreci iterasyon sayısının maksimum iterasyon sayısına erişmesi durumunda durur ve böylece optimal PSS parametreleri elde edilmiş olur. Önerilen iki tip kararlı kılıcının (GOA-PSS ve GOA-FOPIDPSS), GOA algoritması kullanılarak optimize edilen PSS parametreleri sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 4’te verilmiştir. $J_{gümbüz}$ çoklu amaç fonksiyonunun iterasyon sayısına göre yakınsama grafiği ise Şekil 12’de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere GOA-FOPIDPSS’nin daha az iterasyonla yakınsama yaparak daha iyi bir performans sergilediği söylenebilir.



Şekil 9. Tüm senaryolar için $\omega_2-\omega_1$ ’in cevabı (Response of $\omega_2-\omega_1$ for all scenarios)



Şekil 10. Tüm senaryolar için $\omega_3-\omega_1$ ’in cevabı (Response of $\omega_3-\omega_1$ for all scenarios)



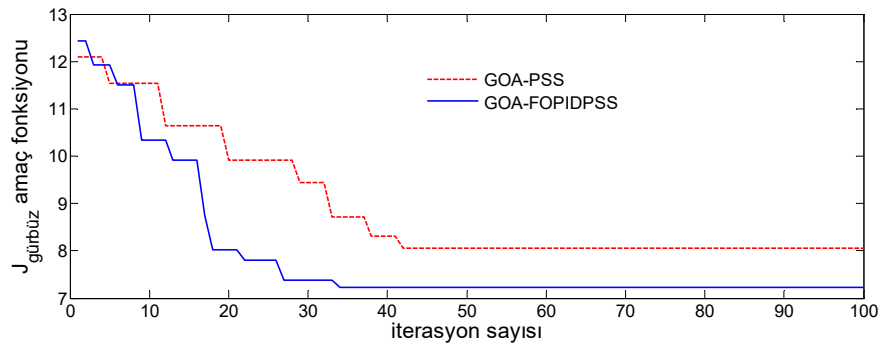
Şekil 11. Önerilen GOA tabanlı PSS tasarımının kavramsal süreci
(Conceptual process of the proposed GOA based PSS design)

Tablo 3. GOA-PSS için optimal PSS parametreleri (The optimal PSS parameters for GOA-PSS)

Önerilen Metot	Generatör	K	T_1	T_2	T_3	T_4
GOA-PSS	G_2	36,4986	0,9753	0,0836	0,4801	0,9579
	G_3	81,9544	0,0100	0,2563	0,6639	0,4194

Tablo 4. GOA-FOPIDPSS için optimal PSS parametreleri (The optimal PSS parameters for GOA-FOPIDPSS)

Önerilen Metot	Generatör	K_P	K_I	K_D	λ	μ
GOA-FOPIDPSS	G_2	2,9003	6,6594	2,3220	1,9274	0,0823
	G_3	13,4883	4,3957	14,8833	0,3643	1,2709



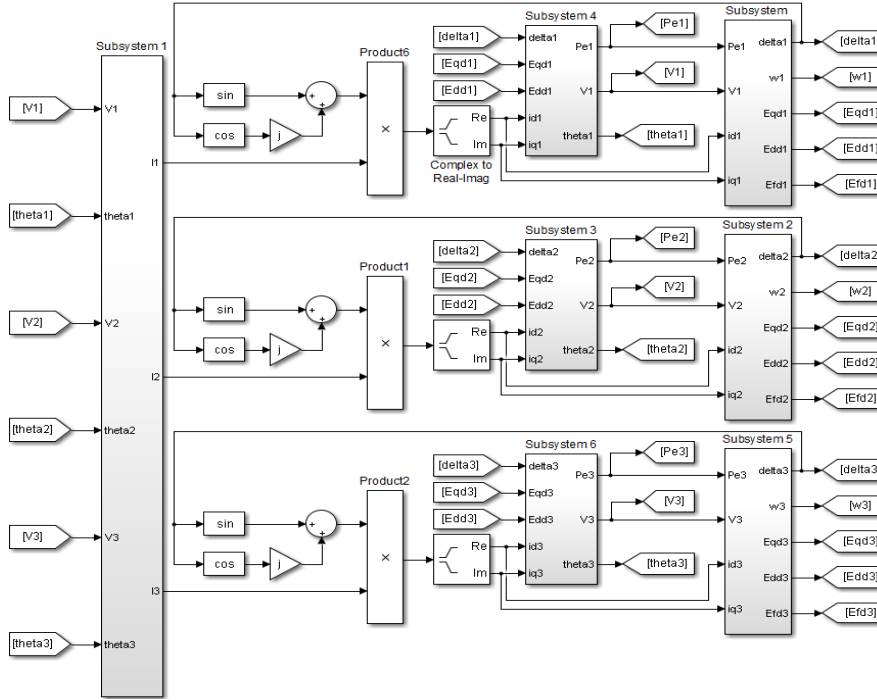
Şekil 12. Amaç fonksiyonunun yakınsama hızı (Convergence rate of the objective function)

6.3. *Linear Olmayan Simülasyon Sonuçları*
(Nonlinear Simulation Results)

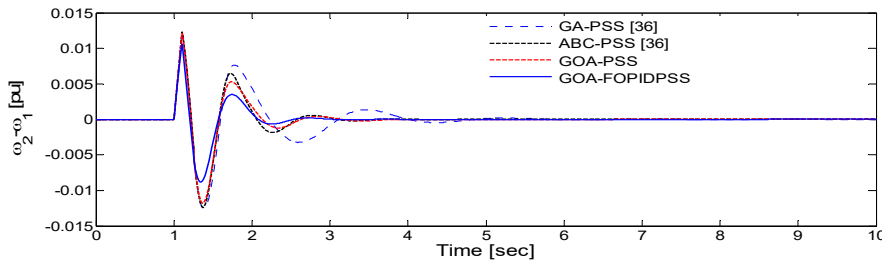
Linear olmayan örnek güç sisteminin geçici hal kararlılık analizleri Şekil 13'te verilen Simulink ortamında geliştirilen model üzerinden yapılmıştır.

Senaryo 1 ve daha ciddi bir arıza durumu olan Senaryo 2'ye ilişkin hız sapması cevapları ($\omega_2-\omega_1$ ve $\omega_3-\omega_1$) sırasıyla Şekil 14-15 ve Şekil 16-17'de gösterilmiştir. Şekillerden görüleceği gibi önerilen GOA-FOPIDPSS, sahip olduğu

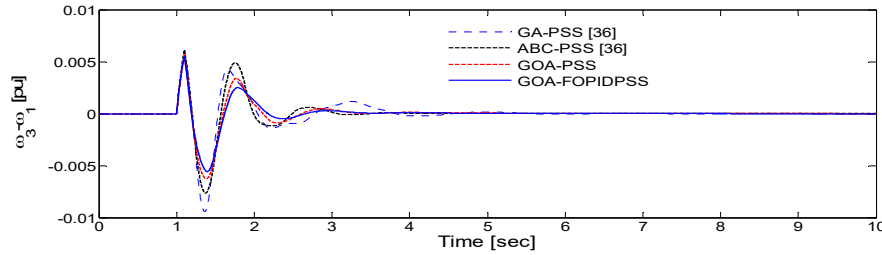
kontrolör yapısı ve kullandığı algoritmanın sağladığı avantajdan dolayı daha iyi bir performans göstermektedir ve diğer üç kontrolörlere (GA-PSS, ABC-PSS ve önerilen GOA-PSS) kıyasla üstün sönümleme sağlamaktadır. Ayrıca, GOA-FOPIDPSS ilaveli sistem daha az aşım ve kısa süreli yerleşme zamanına sahip olduğundan daha kararlıdır. Şekil 18-19, Senaryo 3'ün gerçekleşmesi durumundaki $\omega_2-\omega_1$ ve $\omega_3-\omega_1$ hız sapması cevaplarını göstermektedir. Şekillerden anlaşılacağı üzere, arıza yerinin değişmesi durumunda bile önerilen GOA tabanlı kontrolörler (GOA-PSS ve GOA-FOPIDPSS) diğer iki metoda dayalı kontrolörlere kıyasla



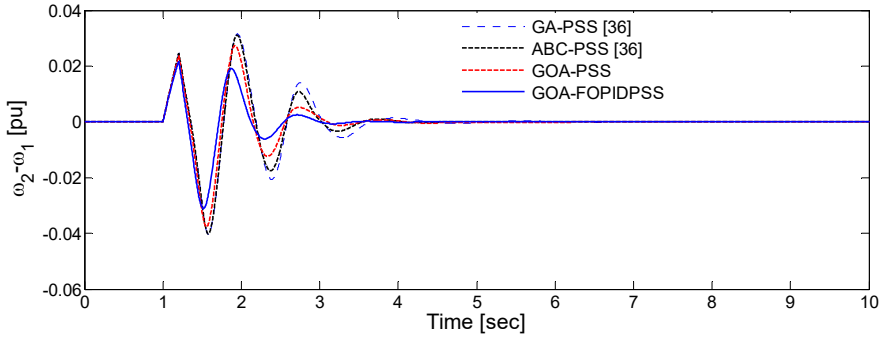
Şekil 13. WSCC üç-makinalı dokuz-baral güç sistemi için tüm simülasyon modeli
(Complete simulation model for WSCC three-machine nine-bus power system)



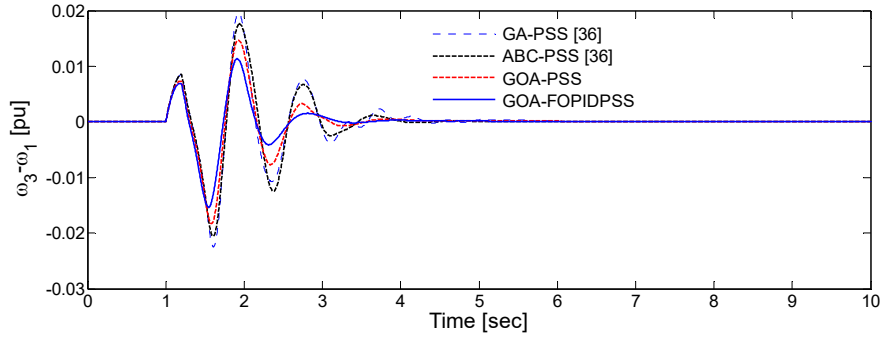
Şekil 14. Senaryo 1 için $\omega_2-\omega_1$ hız sapması cevabı (Speed deviation response of $\omega_2-\omega_1$ for scenario 1)



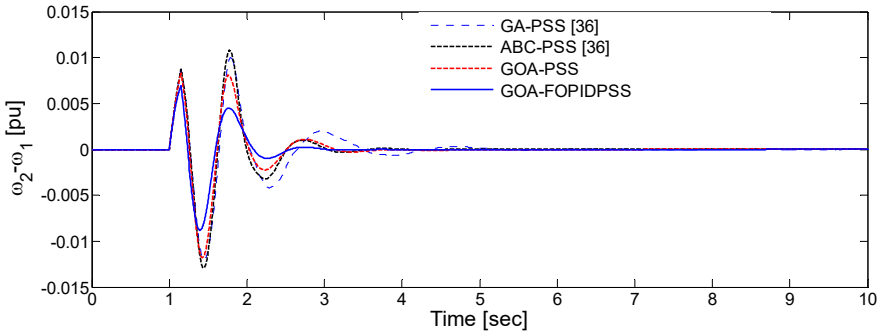
Şekil 15. Senaryo 1 için $\omega_3-\omega_1$ hız sapması cevabı (Speed deviation response of $\omega_3-\omega_1$ for scenario 1)



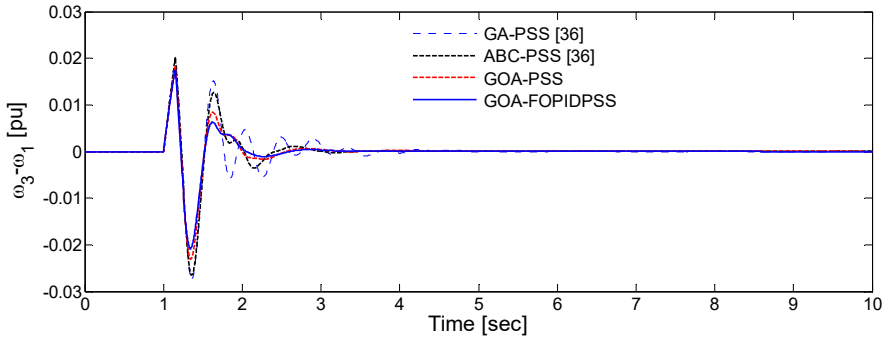
Şekil 16. Senaryo 2 için $\omega_2-\omega_1$ hız sapması cevabı (Speed deviation response of $\omega_2-\omega_1$ for scenario 2)



Şekil 17. Senaryo 2 için $\omega_3-\omega_1$ hız sapması cevabı (Speed deviation response of $\omega_3-\omega_1$ for scenario 2)



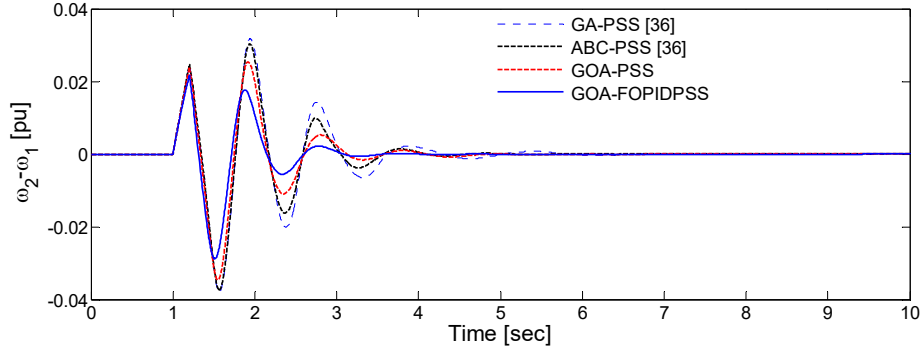
Şekil 18. Senaryo 3 için $\omega_2-\omega_1$ hız sapması cevabı (Speed deviation response of $\omega_2-\omega_1$ for scenario 3)



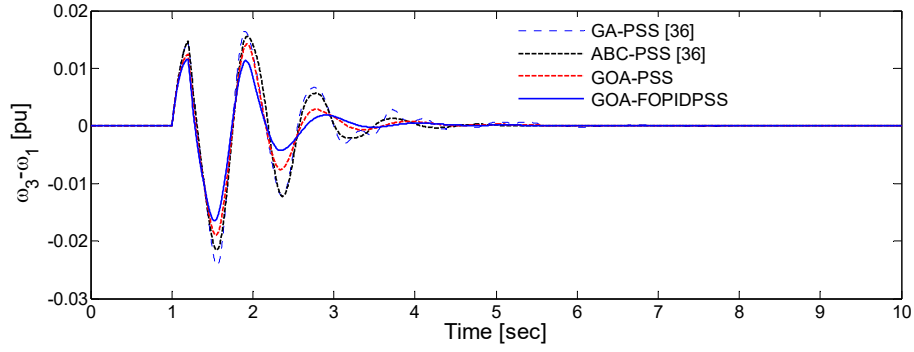
Şekil 19. Senaryo 3 için $\omega_3-\omega_1$ hız sapması cevabı (Speed deviation response of $\omega_3-\omega_1$ for scenario 3)

düşük frekanslı salınımların sönümlenmesinde daha iyi bir performans gösterir ve sistemi hızlıca kararlı hale getirir. Ayrıca, önerilen GOA-FOPIDPSS kesirli kontrolör yapısı nedeniyle en etkili olanıdır.

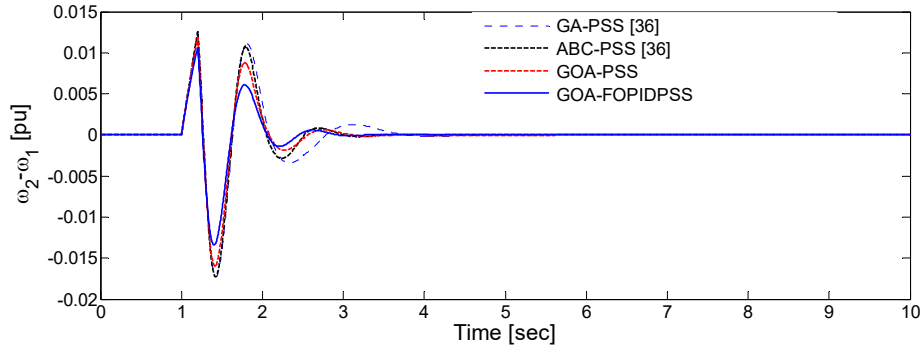
Farklı yüklenme durumları olan *Senaryo 4* (ağır yüklenme) ve *Senaryo 5* (hafif yüklenme) için $\omega_2-\omega_1$ ve $\omega_3-\omega_1$ hız sapmalarının verdiği tepkiler sırasıyla Şekil 20-21 ve Şekil 22-23'te verilmiştir.



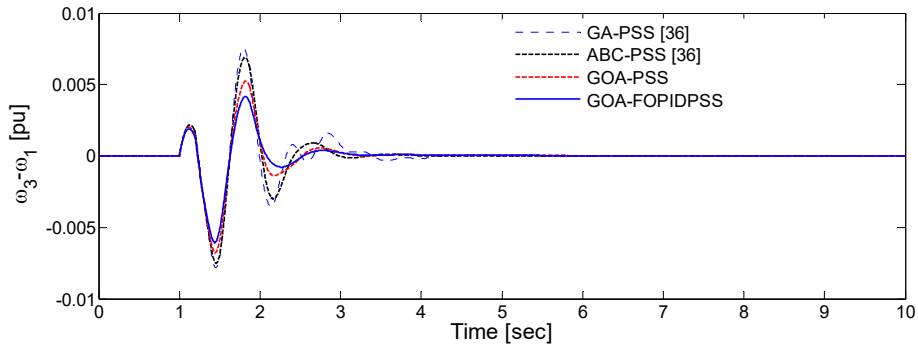
Şekil 20. Senaryo 4 için $\omega_2-\omega_1$ hız sapması cevabı (Speed deviation response of $\omega_2-\omega_1$ for scenario 4)



Şekil 21. Senaryo 4 için $\omega_3-\omega_1$ hız sapması cevabı (Speed deviation response of $\omega_3-\omega_1$ for scenario 4)



Şekil 22. Senaryo 5 için $\omega_2-\omega_1$ hız sapması cevabı (Speed deviation response of $\omega_2-\omega_1$ for scenario 5)



Şekil 23. Senaryo 5 için $\omega_3-\omega_1$ hız sapması cevabı (Speed deviation response of $\omega_3-\omega_1$ for scenario 5)

Bu şekillerden görüleceği gibi önerilen GOA-FOPIDPSS; GA-PSS, ABC-PSS ve önerilen GOA-PSS ile karşılaştırıldığında, düşük frekanslı salınımlara iyi bir sönümlenme karakteristiği sağlamaktadır, farklı yüklenme koşullarında bile gürbüzdür ve güç sisteminin dinamik kararlılığını önemli ölçüde artırmaktadır.

6.4. Performans İndeksleri Açısından Karşılaştırma (Comparison in Terms of Performance Indices)

Önerilen GOA-tabanlı iki kontrolörün tüm senaryolardaki dinamik performanslarını ve gürbüzlüklerini ispatlamak için bazı performans indeksleri aşağıdaki şekilde tanımlandı.

$$PI_1 = \int_0^{t_{sim}=10} (|\Delta\omega_1| + |\Delta\omega_2| + |\Delta\omega_3|) \cdot dt \quad (25)$$

$$PI_2 = \int_0^{t_{sim}=10} t \cdot (|\Delta\omega_1| + |\Delta\omega_2| + |\Delta\omega_3|) \cdot dt \quad (26)$$

$$PI_3 = \int_0^{t_{sim}=10} [(\Delta\omega_1)^2 + (\Delta\omega_2)^2 + (\Delta\omega_3)^2] \cdot dt \quad (27)$$

$$PI_4 = \int_0^{t_{sim}=10} [(t\Delta\omega_1)^2 + (t\Delta\omega_2)^2 + (t\Delta\omega_3)^2] \cdot dt \quad (28)$$

Tüm senaryolara ilişkin bu indekslerin sayısal değerleri Tablo 5'te listelenmiştir. Bu değerler ne kadar küçük olursa sistem cevabı; yerleşme zamanı ve aşım açısından daha iyi sonuçlar verir. Tabloya bakıldığında önerilen GOA-tabanlı iki kontrolörün performans indeksi değerleri, GA- ve ABC-tabanlı klasik yapıli PSS'lerden daha düşüktür. Bununla birlikte tablodaki değerlere bakılarak önerilen GOA-FOPIDPSS, önerilen GOA-PSS'den daha iyi bir performansa sahip olarak tüm generatörlerdeki hız sapmalarına daha az aşım yaptırtarak en kısa sürede sönümlenme sağladığı görülmüştür.

Tablo 5. Tüm senaryolar için farklı performans indekslerinin değerleri
(Values of different performance indices for all scenarios)

Arıza Cinsi	Sistem çalışma tipi	Performans indeksleri			
		PI_1	PI_2	PI_3	PI_4
Senaryo 1	Kontrolsüz	0,1137	0,4566	$0,9625 \times 10^{-3}$	$0,1773 \times 10^{-1}$
	GA-PSS [36]	$0,1582 \times 10^{-1}$	$0,1542 \times 10^{-1}$	$0,8699 \times 10^{-4}$	$0,4363 \times 10^{-4}$
	ABC-PSS [36]	$0,1133 \times 10^{-1}$	$0,6948 \times 10^{-2}$	$0,6767 \times 10^{-4}$	$0,1621 \times 10^{-4}$
	Önerilen GOA-PSS	$0,9996 \times 10^{-2}$	$0,6742 \times 10^{-2}$	$0,5392 \times 10^{-4}$	$0,1172 \times 10^{-4}$
	Önerilen GOA-FOPIDPSS	$0,7066 \times 10^{-2}$	$0,3524 \times 10^{-2}$	$0,3230 \times 10^{-4}$	$0,5432 \times 10^{-5}$
Senaryo 2	Kontrolsüz	Sistem kararsız	Sistem kararsız	Sistem kararsız	Sistem kararsız
	GA-PSS [36]	$0,5243 \times 10^{-1}$	$0,5775 \times 10^{-1}$	$0,8944 \times 10^{-3}$	$0,8208 \times 10^{-3}$
	ABC-PSS [36]	$0,4748 \times 10^{-1}$	$0,4692 \times 10^{-1}$	$0,8127 \times 10^{-3}$	$0,6413 \times 10^{-3}$
	Önerilen GOA-PSS	$0,3978 \times 10^{-1}$	$0,3954 \times 10^{-1}$	$0,6196 \times 10^{-3}$	$0,3779 \times 10^{-3}$
	Önerilen GOA-FOPIDPSS	$0,2845 \times 10^{-1}$	$0,2048 \times 10^{-1}$	$0,3946 \times 10^{-3}$	$0,1674 \times 10^{-3}$
Senaryo 3	Kontrolsüz	0,1318	0,5104	$0,1369 \times 10^{-2}$	$0,2192 \times 10^{-1}$
	GA-PSS [36]	$0,2273 \times 10^{-1}$	$0,1888 \times 10^{-1}$	$0,2315 \times 10^{-3}$	$0,7753 \times 10^{-4}$
	ABC-PSS [36]	$0,1912 \times 10^{-1}$	$0,1172 \times 10^{-1}$	$0,2142 \times 10^{-3}$	$0,5016 \times 10^{-4}$
	Önerilen GOA-PSS	$0,1721 \times 10^{-1}$	$0,1221 \times 10^{-1}$	$0,1594 \times 10^{-3}$	$0,3458 \times 10^{-4}$
	Önerilen GOA-FOPIDPSS	$0,1032 \times 10^{-1}$	$0,5194 \times 10^{-2}$	$0,6897 \times 10^{-4}$	$0,1729 \times 10^{-4}$
Senaryo 4	Kontrolsüz	Sistem kararsız	Sistem kararsız	Sistem kararsız	Sistem kararsız
	GA-PSS [36]	$0,5582 \times 10^{-1}$	$0,6522 \times 10^{-1}$	$0,9084 \times 10^{-3}$	$0,8413 \times 10^{-3}$
	ABC-PSS [36]	$0,4862 \times 10^{-1}$	$0,4798 \times 10^{-1}$	$0,7934 \times 10^{-3}$	$0,5897 \times 10^{-3}$
	Önerilen GOA-PSS	$0,4123 \times 10^{-1}$	$0,3992 \times 10^{-1}$	$0,6037 \times 10^{-3}$	$0,3656 \times 10^{-3}$
	Önerilen GOA-FOPIDPSS	$0,2798 \times 10^{-1}$	$0,2033 \times 10^{-1}$	$0,3609 \times 10^{-3}$	$0,1455 \times 10^{-3}$
Senaryo 5	Kontrolsüz	$0,3732 \times 10^{-1}$	$0,6762 \times 10^{-1}$	$0,2597 \times 10^{-3}$	$0,4752 \times 10^{-3}$
	GA-PSS [36]	$0,1650 \times 10^{-1}$	$0,1344 \times 10^{-1}$	$0,1231 \times 10^{-3}$	$0,5306 \times 10^{-4}$
	ABC-PSS [36]	$0,1441 \times 10^{-1}$	$0,9799 \times 10^{-2}$	$0,1118 \times 10^{-3}$	$0,3927 \times 10^{-4}$
	Önerilen GOA-PSS	$0,1167 \times 10^{-1}$	$0,8086 \times 10^{-2}$	$0,8247 \times 10^{-4}$	$0,2355 \times 10^{-4}$
	Önerilen GOA-FOPIDPSS	$0,9653 \times 10^{-2}$	$0,5756 \times 10^{-2}$	$0,5883 \times 10^{-4}$	$0,1488 \times 10^{-4}$

7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, geçici hal kararlılığını artırmak, düşük frekanslı salınımları bastırmak ve arızadan sonra sistemi hızlı şekilde kararlı hale getirebilmek için çok makinalı ortamda gürbüz PSS optimal tasarımı sunulmuştur. PSS tasarımında [6-25] referanslarında kullanılan ve literatürde yaygın olan klasik faz ilerlemeli-gerilemeli yapıli kontrolör ile birlikte henüz çok makinalı güç sistemlerinde uygulaması yapılmayan FOPID kontrolör yapısı önerilmiştir. Önerilen kontrolörün tasarım problemi, lineer olmayan optimizasyon problemi olarak düşünüldü. Daha sonra, çekirge sürülerinin doğadaki davranışlarından ilham alan ve diğer algoritmaların aksine mükemmel keşif ve sömürge yetilerine sahip olan güçlü bir optimizasyon tekniği olan GOA, önerilen çoklu bir amaç fonksiyonu yardımıyla problemin optimal çözümünü bulmak için başarıyla uygulandı. Tasarlanan kontrolörün (GOA-FOPIDPSS) gürbüzlüğünü ve etkinliğini göstermek için simülasyon çalışmaları farklı konfigürasyonlar (hafif, nominal ve ağır yüklenme durumları) ve ciddi arıza senaryoları altında yapıldı. Simülasyon sonuçları ve performans indeksi çalışmalarından, önerilen GOA-FOPIDPSS'nin hem kontrolör yapısı hem de algoritma açısından dinamik performansının diğer üç algoritma tabanlı klasik yapıli PSS'lere (GA-PSS [36], ABC-PSS [36] ve önerilen GOA-PSS) oranla daha üstün olduğu doğrulandı. Ayrıca önerilen kontrolörün farklı senaryo durumlarında bile yerleşme zamanı ve aşım değerlerinin az olması nedeniyle daha gürbüz olduğu sonucuna varıldı. Böylece, çok makinalı güç sistemlerinde önerilen fikir (kontrolör parametreleri GOA ile optimize edilen FOPID tipi PSS) ile sistem kararlılığı, verimliliği, güvenilirliği ve gürbüzlüğü önemli ölçüde artmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Shokouhandeh H., Jazaeri M., An enhanced and auto-tuned power system stabilizer based on optimized interval type-2 fuzzy PID scheme, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 28(1), e2469, 2018.
- Shakarami M.R., Davoudkhani I.F., Wide-area power system stabilizer design based on grey wolf optimization algorithm considering the time delay, *Electric Power Systems Research*, 133, 149-159, 2016.
- Taşar B., Özdemir M., Sonsuz güçlü baraya bağlı çift senkron jeneratörden oluşan dinamik sistemin küçük işaret kararlılık analizi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(2), 353-366, 2012.
- Rogers G., *Power system oscillations*. Springer Science & Business Media, 2012.
- Kundur P., Klein M., Rogers G.J., Zywno M.S., Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability, *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(2), 614-626, 1989.
- Bollinger K., Laha A., Hamilton R., Harras T, Power stabilizer design using root locus methods, *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, 94(5), 1484-1488, 1975.
- Larsen E.V., Swann D.A., Applying Power System Stabilizers Part II: Performance objectives and tuning Concepts, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 100(6), 3025-3033, 1981.
- Cai L.J., Erlich I., Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(1), 294-300, 2005.
- Abido M.A., Abdel-Magid Y.L., Eigenvalue assignments in multimachine power systems using tabu search algorithm, *Computers & Electrical Engineering*, 28(6), 527-545, 2002.
- Abido M.A., Robust design of multimachine power system stabilizers using simulated annealing, *IEEE Transactions on Energy conversion*, 15(3), 297-304, 2000.
- Hassan L.H., Moghavvemi M., Almurib H.A., Muttaqi K.M., Ganapathy V.G., Optimization of power system stabilizers using participation factor and genetic algorithm, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 55, 668-679, 2014.
- Islam N.N., Hannan M.A., Shareef H., Mohamed A., An application of backtracking search algorithm in designing power system stabilizers for large multi-machine system, *Neurocomputing*, 237, 175-184, 2017.
- Ekinci S., Demiroren A., PSO based PSS design for transient stability enhancement, *IU-Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 15(1), 1855-1862, 2015.
- Sambariya D.K., Prasad R., Robust tuning of power system stabilizer for small signal stability enhancement using metaheuristic bat algorithm, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 61, 229-238, 2014.
- Eke İ., Taplamacioğlu M.C., Kocaarslan İ., Design of robust power system stabilizer based on Artificial Bee Colony Algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26(3), 683-690, 2011.
- Abd-Elazim S.M., Ali E.S., Power system stability enhancement via bacteria foraging optimization algorithm, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(3), 599-611, 2013.
- Hameed K.A., Palani S., Robust design of power system stabilizer using harmony search algorithm, *Automatika*, 55(2), 162-169, 2014.
- 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.
- Guesmi T., Alshammari B.M., An improved artificial bee colony algorithm for robust design of power system stabilizers, *Engineering Computations*, 34(7), 2131-2153, 2017.
- Shayeghi H., Ghasemi A., Shayanfar H., PID type stabilizer design for multi machine power system using IPSO procedure, *Computer Science and Engineering*, 1(2), 36-42, 2011.
- Khodabakhshian A., Hemmati R., Multi-machine power system stabilizer design by using cultural algorithms,

- International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 44(1), 571-580, 2013.
22. Khodabakhshian A., Hemmati R., Moazzami M., Multi-band power system stabilizer design by using CPCE algorithm for multi-machine power system, *Electric Power Systems Research*, 101, 36-48, 2013.
 23. Abd-Elazim S.M., Ali E.S., A hybrid particle swarm optimization and bacterial foraging for optimal power system stabilizers design, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 46, 334-341, 2013.
 24. Eslami M., Shareef H., Khajezadeh M., Optimal design of damping controllers using a new hybrid artificial bee colony algorithm, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 52, 42-54, 2013.
 25. Ekinci S., Hekimoğlu B., Multi-machine power system stabilizer design via HPA algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(4), 1271-1285, 2017.
 26. Saremi S., Mirjalili S., Lewis A., Grasshopper Optimisation Algorithm: Theory and application, *Advances in Engineering Software*, 105, 30-47, 2017.
 27. El-Fergany A.A., Electrical characterisation of proton exchange membrane fuel cells stack using grasshopper optimizer, *IET Renewable Power Generation*, 12(1), 9-17, 2017.
 28. Tumulu P., Ravi B., GOA-based DBN: Grasshopper optimization algorithm-based deep belief neural networks for cancer classification, *Int. J. of Appl. Eng. Research*, 12, 14218-14231, 2017.
 29. Wu J., Wang H., Li N., Yao P., Huang Y., Su Z., Yu Y., Distributed trajectory optimization for multiple solar-powered UAVs target tracking in urban environment by adaptive grasshopper optimization algorithm, *Aerospace Science and Technology*, 70, 497-510, 2017.
 30. Łukasik S., Kowalski P.A., Charytanowicz M., Kulczycki P., Data clustering with grasshopper optimization algorithm, in *Proc. 2017 Federated Conf. on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*; 71-74.
 31. Barman M., Dev Choudhury N.B., Sutradhar S., A regional hybrid GOA-SVM model based on similar day approach for short-term load forecasting in Assam, India, *Energy*, 145, 710-720, 2018.
 32. Mafarja M., Aljarah I., Heidari A.A., Hammouri A.I., Faris H., Ala'M A.Z., Mirjalili S., Evolutionary population dynamics and grasshopper optimization approaches for feature selection problems, *Knowledge-Based Systems*, 145, 25-45, 2018.
 33. Sönmez Ş., Ayasun S., Kesir dereceli PI denetleyici içeren zaman gecikmeli bir bölgesel yük frekans kontrol sisteminin kazanç ve faz payı tabanlı kararlılık analizi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(2), 945-959, 2019.
 34. Tang Y., Cui M., Hua C., Li L., Yang Y., Optimum design of fractional order PI^λD^μ controller for AVR system using chaotic ant swarm, *Expert Systems with Applications*, 39(8), 6887-6896, 2012.
 35. Sikander A., Thakur P., Bansal R.C., Rajasekar S., A novel technique to design cuckoo search based FOPID controller for AVR in power systems, *Computers & Electrical Engineering*, 70, 261-274, 2018.
 36. Ekinci S., Demiroren A., Modeling, simulation, and optimal design of power system stabilizers using ABC algorithm, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24(3), 1532-1546, 2016.
 37. Podlubny I., Fractional-order systems and PI^λD^μ controllers. *IEEE Transactions on automatic control*, 44(1), 208-214, 1999.
 38. Shah P., Agashe S., Review of fractional PID controller. *Mechatronics*, 38, 29-41, 2016.
 39. Sauer P.W., Pai M.A., Chow J.H., *Power system dynamics and stability: with synchrophasor measurement and power system toolbox*. Hoboken, NJ, USA: IEEE Press, Wiley, 2018.
 40. Mondal D., Chakrabarti A., Sengupta A., *Power system small signal stability analysis and control*. Academic Press, 2014.
 41. Guesmi T., Farah A., Abdallah H.H., Ouali A., Robust design of multimachine power system stabilizers based on improved non-dominated sorting genetic algorithms, *Electrical Engineering*, 100(3), 1351-1363, 2018.
 42. Kundur P., *Power System Stability and Control*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
 43. Gaing Z.L., A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(2), 384-391, 2004.
 44. Hannan M.A., Islam N.N., Mohamed A., Lipu M.S.H., Ker P.J., Rashid M.M., Shareef, H., Artificial intelligent based damping controller optimization for the multi-machine power system: A review, *IEEE Access*, 6, 39574-39594, 2018.