



Optimal design of power system stabilizer using sine cosine algorithm

Serdar Ekinci

Department of Computer Engineering, Batman University, Batman, 72060, Turkey

Highlights:

- SCA is based on sine/cosine mathematical functions.
- SCA is very effective in improving the dynamic stability of the power system.
- SCA has superior performance compared to BA and SOS techniques.

Keywords:

- Power system stabilizer
- Dynamic stability
- Sine cosine algorithm
- Bat algorithm
- Symbiotic organisms search algorithm

Graphical/Tabular Abstract

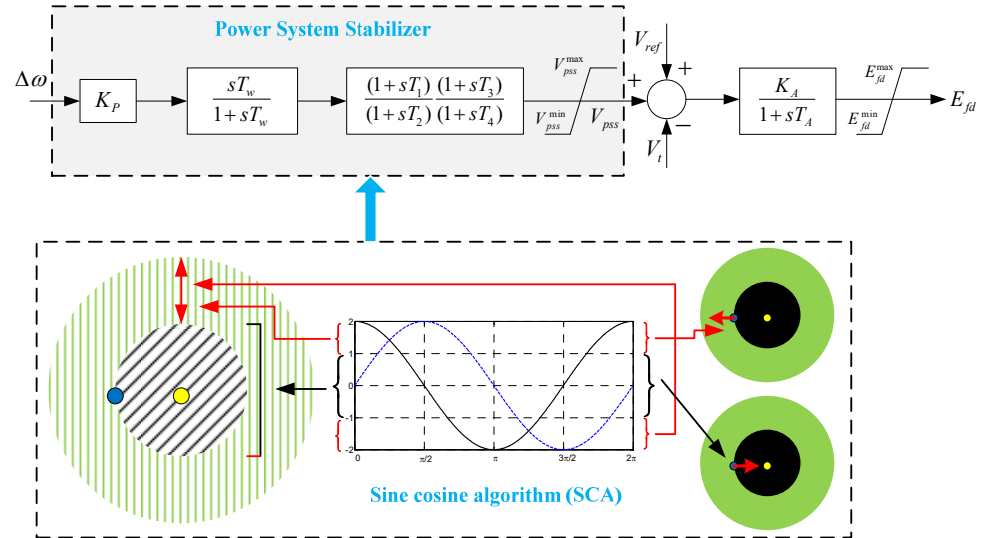


Figure A. SCA implementation block diagram for optimal design of PSS

Article Info:

Research Article

Received: 09.01.2018

Accepted: 29.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460529

Correspondence:

Author: Serdar Ekinci

e-mail:

serdar.ekinci@batman.edu.tr

phone: +90 553 558 5941

Purpose: This paper presents a new optimization approach based on the SCA technique, which has a balanced exploration and exploitation capability and is inspired from sine-cosine trigonometric functions, in order to increase power system stability through optimal adjustment of the PSS controller.

Theory and Methods:

For the PSS design problem, a new multi-objective function consisting of eigenvalue and time-domain based objective functions is considered and with the SCA technique, this proposed objective function was minimized and the optimal parameters of the stabilizer were found. The robustness and effectiveness of the stabilizer designed with SCA was tested to suppress the low-frequency oscillations in power systems, which are exposed to different disturbances.

Results:

The proposed SCA-based PSS (SCAPSS) results were compared with bat algorithm based PSS (BAPSS) and symbiotic organisms search algorithm based PSS (SOSPSS). The eigenvalue analysis and nonlinear simulation results confirmed the robustness and superiority of the proposed SCA-based stabilizer by providing a fast, efficient and good damping characteristic to the system oscillations in power angle and rotor speed.

Conclusion:

The superiority of the designed SCAPSS was verified by linear model stability analysis and nonlinear time-domain simulation. The results of the analysis have showed that the proposed novel approach provides faster damping and minimal overshoot of the low frequency oscillations in the rotor of the synchronous machine. In addition, SCA has performed better than the other two algorithms in terms of accuracy of final solution, convergence speed, computation time, damping ratio, and settling time of rotor angle.



Sinüs kosinüs algoritması kullanarak güç sistemi kararlı kılıcısının optimal tasarımı

Serdar Ekinci*^{ID}

Batman Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Batman, 72060, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- SCA sinüs/kosinüs matematiksel fonksiyonlarına dayalıdır
- SCA güc sisteminin dinamik kararlılığının iyileştirilmesinde çok etkilidir
- SCA; BA ve SOS tekniklerine göre üstün performans gösterir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 09.01.2018

Kabul: 29.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460529

Anahtar Kelimeler:

Güç sistemi kararlı kılıcı,
dinamik kararlılık,
sinüs kosinüs algoritması,
yarasa algoritması,
simbiyotik organizmalar
arama algoritması

ÖZET

Bu çalışmada yeni bir sezgisel-üstü metod olan sinüs kosinüs algoritmasının (SCA) güç sistemi kararlı kılıcısının (PSS) optimal tasarımında kullanılması önerilmiştir. PSS tasarım problemi için özdeğer ve zaman tanım bölgesi tabanlı amaç fonksiyonlarından oluşan yeni bir çoklu amaç fonksiyonu düşünüldü ve SCA tekniği ile önerilen bu amaç fonksiyonu minimum hale getirilerek kararlı kılıcının optimal parametreleri bulundu. SCA ile tasarlanan kararlı kılıcının dayanıklılığı ve etkinliği farklı arızalara maruz kalan güç sistemlerinde düşük frekanslı salınımları bastırmak için test edildi. Önerilen SCA tabanlı PSS'nin (SCAPSS) sonuçları yarasa algoritması tabanlı PSS (BAPSS) ve simbiyotik organizmalar arama algoritması tabanlı PSS (SOSPSS) ile karşılaştırıldı. Lineer model kararlılık analizi ve lineer olmayan zaman tanım bölgesi simülasyonu yapılarak tasarlanan SCAPSS'nin üstünlüğü doğrulandı. Analiz sonuçları önerilen yeni yaklaşımın senkron makinanın rotorundaki düşük frekanslı salınımlara daha hızlı sönümleme ve minimum aşım sağladığını göstermiştir. Ayrıca, son çözümün doğruluğu, yakınsama hızı, hesaplama zamanı, sönüm oranı ve rotor açısının yerleşme zamanı açısından SCA diğer iki algoritmaya nazaran daha iyi performans sergilemiştir.

Optimal design of power system stabilizer using sine cosine algorithm

H I G H L I G H T S

- SCA is based on sine/cosine mathematical functions
- SCA is very effective in improving the dynamic stability of the power system
- SCA has superior performance compared to BA and SOS techniques

Article Info

Research Article

Received: 09.01.2018

Accepted: 29.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460529

Keywords:

Power system stabilizer,
dynamic stability,
sine cosine algorithm,
bat algorithm,
symbiotic organisms search
algorithm

ABSTRACT

In this study, sine cosine algorithm (SCA), as a new meta-heuristic method, is proposed for optimal design of power system stabilizer (PSS). For the PSS design problem, a new multi-objective function consisting of eigenvalue and time-domain based objective functions is considered and with the SCA technique, this proposed objective function was minimized and the optimal parameters of the stabilizer were found. The robustness and effectiveness of the stabilizer designed with SCA was tested to suppress the low-frequency oscillations in power systems, which are exposed to different disturbances. The proposed SCA-based PSS (SCAPSS) results were compared with bat algorithm based PSS (BAPSS) and symbiotic organisms search algorithm based PSS (SOSPSS). The superiority of the designed SCAPSS was verified by linear model stability analysis and nonlinear time-domain simulation. The results of the analysis have showed that the proposed novel approach provides faster damping and minimal overshoot of the low frequency oscillations in the rotor of the synchronous machine. In addition, SCA has performed better than the other two algorithms in terms of accuracy of final solution, convergence speed, computation time, damping ratio, and settling time of rotor angle.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ekinciser@yahoo.com / Tel: +90 553 558 5941

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güç sistemi kararlılığı, sistemin herhangi bir bozucu etkiye maruz kaldığında sürekli halini gerini kazanma yeteneği olarak bilinir. Genel olarak güç sistemleri karmaşık ve yüksek dereceden doğrusal olmayan sistemlerdir. Yetersiz sönümleme momenti nedeniyle bu sistemler; arızalar, yük değişimleri ve gerilim çökmeleri gibi bozucu nedenlerden kaynaklanan düşük frekanslı elektromekanik salınımlar sergilerler [1]. Güç sistemi kararlılığı analizi ve denetiminde iki farklı türden sistem salınımları mevcuttur. İlki bir üretim alanının diğer alanlara salınımlardan kaynaklanan etkisidir ve alanlar arası mod olarak tanımlanır. Diğeri ise bir alanda var olan generatörlerin birbirlerine karşı salınımları ile ilgilidir ve yerel mod olarak bilinir [2, 3].

Sistem salınımlarının sönümünü iyileştirmek için generatörler, uyarma sistemlerinde ek geri-besleme kararlı kılıcı sinyaller sağlayan güç sistemi kararlı kılıcılar (PSS) ile donatılırlar. PSS'ler elektromekanik modlarla ilgili düşük frekanslı salınımların sistem sönümünü iyileştirerek güç sistemi kararlılık sınırını artırır ve güç iletimi kapasitesini de genişletirler [4]. Geleneksel PSS'ler; faz kompanzasyonu ve köklerin yer eğrisi gibi iki temel ayarlama tekniğini kullanan özdeğer analizine dayalı olarak tasarlanırlar. Faz kompanzasyonu tekniği yaygın olarak kullanılmıştır ve bir sönümleyici moment bileşeni sağlayarak faz gecikmelerini kompanze eder. Köklerin yer eğrisi tekniği ise kararlı kılıcının kutuplarını ve sıfırlarını kaydırarak salınımların güç sistemi modları ile ilgili özdeğerlerin kaydırılmasını içerir [5]. Güç sistemleri kamu kuruluşları geleneksel PSS'leri basitlikleri nedeniyle geçen kırk yıldan fazla süreyle kullanmışlardır [6]. Geleneksel PSS'ler normalde nominal çalışma koşullarında ve civarında optimum performans sağlayacak şekilde ayarlanırlar. Ancak sistem yüklenme koşulları veya çalışma koşulları değiştiğinde geleneksel PSS'ler sisteme yeterli sönüm sağlayamayabilirler ve sistem performansında düşüşe neden olurlar [7].

Bu tekniklerin doğrusal olmayan ve türevi alınamayan optimizasyon problemlerini çözmedeki zorlukları ve kısıtlamaları sebebiyle, global optimizasyon teknikleri PSS parametrelerinin optimizasyonu için yaygın hale gelmiştir. Genetik algoritma (GA), hakkında herhangi bir önbilginin bulunmadığı problemlerin karmaşıklığından bağımsız güçlü bir optimizasyon tekniğidir. Literatürde birçok GA kullanan PSS ayar yöntemi mevcuttur [8, 9]. Her ne kadar GA problemin optimum ya da optimuma yakın global çözümlerini bulmada yeterli ise de çalışma süreleri dakikalara hatta üzerinde çalışılan sistemin boyutuna bağlı olarak saatleri bulmaktadır [10]. Bunun yanında benzetilmiş tavlama (SA) [11] ve tabu arama (TS) [12] algoritmaları da PSS parametre optimizasyonu için önerilmiştir. Bu algoritmalar PSS parametre optimizasyonu problemi için iyi yöntemler olarak dursalar da yüksek epistatik (yani birbirleriyle yakın ilişkili parametrelerin optimizasyonunda) ve çok sayıda optimize edilecek parametre bulunduğu global optimum çözümün elde edilmesinde düşük verime

sahiptirler ve benzetim sürecinde hesaplama süreleri oldukça yüksektir [13]. PSS tasarımı için önerilmiş bir diğer yöntem de parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO)'dur [14, 15]. Ancak PSO'nun performansı büyük oranda kendi parametrelerine bağlıdır ve sıklıkla yakınsama sorunlarına sahiptir [13]. Nispeten daha yeni bir evrimsel hesaplama algoritması olan yarası algoritması (BA), PSS tasarımı problemine başarıyla uygulanmıştır [16, 17]. BA sömürme (exploitation) yeteneği güçlü olan bir algoritma olmasına rağmen keşif (exploration) özelliği zayıftır, bu nedenle PSO'da olduğu gibi yerel optimumda takılı kalabilmektedir [18, 19]. Yukarıda bahsedilen yöntemlere ek olarak literatürde bulunan diğer yöntemler bir bütün olarak Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de hem önerilen teknikler hem de karşılaştırıldıkları teknikler, PSS tasarımı için kullandıkları amaç fonksiyonları ile birlikte listelenmiştir. Bu optimizasyon yaklaşımları kullanılarak iyi sonuçlar elde edilebilir. Ne yazık ki PSS tasarımı için Tablo 1'de listelenen önerilmiş diğer yöntemlerde de GA, SA, TS, PSO ve BA yöntemleri için bahsedilen benzer sorunlar (yerel minimumda takılma, erken yakınsama, uzun süren hesaplama süresi, kontrol parametre seçiminin zorluğu vs.) mevcuttur. Yukarıda adı geçen metodların sorun ve eksiklerinin üstesinden gelebilmek amacıyla bu çalışmada sinüs kosinüs algoritması (SCA) tabanlı PSS önerilmiştir. SCA tekniği, problemin büyüklüğünden ve lineer olmayan yapısından büyük ölçüde etkilenmez ve diğer global optimizasyon tekniklerinin erken yakınsama gösterdiği çoğu durumda bile en iyi çözüme daha etkili ve hızlı bir yakınsama özelliği gösterir [36]. SCA tekniğinin gücünü düşünerek, bu çalışmada PSS parametrelerinin optimal ayarlanması için bu algoritmadan yararlanılmıştır.

SCA optimizasyon problemlerini çözmek için Mirjalili [36] tarafından önerilmiş popülasyon-tabanlı bir sezgisel optimizasyon tekniğidir. Bilinmeyen çözüm uzayına sahip gerçek problemlerin optimizasyonu için basit ancak etkili bir optimizasyon algoritmasıdır. Adından da anlaşılacağı üzere, SCA sinüs/kosinüs matematiksel fonksiyonlarına dayalıdır ve en iyi çözümü bulmak için bu fonksiyonları araştırma uzayında iki çözüm arasındaki uzayı keşfetmek ve sömürmek için kullanır. SCA tekniğinin diğer iki algoritmaya olan avantajları; üstün keşif ve sömürme yetisine sahip olması, yerel optimumdan kaçabilmesi, global optimuma hızlı yakınsama ve problemin yapısından etkilenmemesidir [36]. İlk kez önerildiği günden bugüne, SCA birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. [37-41] nolu referanslarda SCA'nın hibrit ya da geliştirilmiş versiyonları, [42] nolu referansta ikili tabandaki versiyonu, [43] nolu referansta birden çok maliyet fonksiyonlu versiyonu önerilmiştir. Literatürde görülen diğer çalışmalar ise daha çok SCA'nın uygulanmalarına yönelik çalışmalardır. Örneğin, nano-selenit ile beslenen balıkların karaciğer enzim konsantrasyonlarının daha iyi tahmini için bir ileri beslemeli sinir ağı sisteminin eğitimi [44], uzay mekiği araçları için atmosfere giriş eğrisinin optimizasyonu [45], kısmi gölgelenmiş fotovoltaik güneş sisteminin tepe güç değerinin tespiti [46], destek vektör regresyonu parametrelerinin ayarı

Tablo 1. Literatürde PSS parametre optimizasyonu için önerilen metotlar
(Proposed methods for PSS parameter optimization in the literature)

Önerilen metot	Karşılaştırma yapılan metotlar	Kullanılan amaç fonksiyonu	Referans
Kaotik Optimizasyon Algoritması (COA)	GA	Özdeğer tabanlı	[13]
Yapay Arı Kolonisi (ABC)	PSO	Zaman tanım bölgesi tabanlı	[20]
Kraliçe Arı Evrimi (QBE)	GA	Özdeğer tabanlı	[21]
Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO)	GA, PSO ve COA	Özdeğer tabanlı	[22]
Bakteriyel Yemleme Algoritması (BFA)	GA	Zaman tanım bölgesi tabanlı	[23]
Kültürel Algoritma (CA)	GA	Özdeğer tabanlı	[24]
Emperyalist Rekabetçi Algoritma (ICA)	GA	Zaman tanım bölgesi tabanlı	[25]
Armoni Arama Algoritması (HSA)	GA	Zaman tanım bölgesi tabanlı	[26]
Diferansiyel Evrim (DE)	GA ve PSO	Zaman tanım bölgesi tabanlı	[27]
Bal Arısı Çiftleşme Optimizasyonu (HBMO)	GA ve PSO	Zaman tanım bölgesi tabanlı	[28]
Guguk Kuşu Arama Algoritması (CS)	GA	Özdeğer tabanlı	[29]
Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (BBO)	PSO	Zaman tanım bölgesi tabanlı	[1]
Kaotik Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması (CTLA)	GA ve TLA	Zaman tanım bölgesi tabanlı	[30]
Geliştirilmiş Yapay Arı Kolonisi (GCABC)	ABC	Özdeğer tabanlı	[31]
Geri İzleme Arama Algoritması (BSA)	PSO ve BFA	Özdeğer tabanlı	[32]
Hibrit PSO-ABC (HPA)	PSO ve ABC	Özdeğer tabanlı	[33]
Böbrek-İlhamlı Algoritma (KA)	DE ve ABC	Zaman tanım bölgesi tabanlı	[34]
Salp Sürüsü Algoritması (SSA)	TS ve BBO	Zaman tanım bölgesi tabanlı	[35]

[47], güç sistemi kararlılığı için yüklenme marjı kararlılığının geliştirilmesi [48], güç sistemi ekonomisi için elektrik üretim birimlerinin kısa vadeli hidrotermal zamanlama probleminin çözümü [49], özellik seçimi [39, 50], nesne takibi [38], yapısal hasar tespiti [41] ve kara dayalı birim taahhüt probleminin çözümü [42] gibi çalışmaları sayabiliriz. Bunlarla birlikte, derinlemesine yapılan literatür taraması neticesinde, yeni ve çok etkili bir global optimizasyon tekniği olan SCA; güç sistemlerindeki PSS, esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS), otomatik gerilim regülatörü, optimal yük akışı gibi birçok konuya henüz uygulanmadığı görülmüştür.

Literatürde SCA kullanılarak PSS parametrelerinin optimal tasarımı şu ana kadar yapılmamıştır. Bu çalışma, tek makinalı sonsuz baralı ve çok makinalı güç sistemlerinin kararlılığının iyileştirilmesi amacıyla parametreleri SCA ile ayarlanan PSS kullanarak yeni bir tasarım metodunu önerir. Yeni algoritmanın etkinliğini belirlemek için yarıya algoritması ve simbiyotik organizmalar arama algoritması ile kararlılık performansı karşılaştırılması yapıldı. Çeşitli farklı arızalara (üç-fazlı arıza, iletim hattı zayıfı, mekanik güç değişimi, farklı arıza temizleme süreleri) maruz kalan tek makinalı sonsuz baralı ve çok makinalı güç sistemlerinde özdeğer analizi ve lineer olmayan zaman tanım bölgesi simülasyonları gerçekleştirildi. Analiz sonuçları, önerilen SCA tabanlı PSS (SCAPSS)'nin düşük frekanslı salınımların sönümü için istenilen performansı elde ettiğini ve sistemin dinamik kararlılığını artırdığını göstermiştir.

2. SİNÜS KOSİNÜS ALGORİTMASI (SCA) TABANLI OPTİMİZASYON (SINE COSINE ALGORITHM (SCA) BASED OPTIMIZATION)

Sinüs kosinüs algoritması (SCA) yakın geçmişte önerilmiş olan popülasyon-tabanlı sezgisel bir algoritmadır [36]. SCA başlangıçta çoklu rasgele çözümler üretir ve bunların en iyi çözüme ya da ondan uzağa doğru hareket etmelerini sağlar. Ayrıca, araştırma uzayının keşfinin ve sömürülmesinin güçlendirilmesi için rasgele ve uyarlanabilir birkaç değişken algoritmaya entegre edilmiştir. Keşif ve sömürme stokastik popülasyon-tabanlı optimizasyon sürecinin yaygın iki aşamasıdır ve SCA için her iki aşama, aşağıdaki konum güncelleme denklemlerinde dâhil edilmiştir [36]:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t + r_1 \cdot \sin(r_2) \cdot |r_3 \cdot P_i^t - X_i^t|, & r_4 < 0.5 \\ X_i^t + r_1 \cdot \cos(r_2) \cdot |r_3 \cdot P_i^t - X_i^t|, & r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

Burada, r_1 , r_2 , r_3 ve r_4 parametreleri rasgele sayılardır, X_i^t , t -inci iterasyonda i -inci boyutun şimdiki çözümünün konumudur, P_i^t , t -inci iterasyonda i -inci boyutun hedef noktasının konumudur ve $\|$ mutlak değerdir. Yukarıdaki denklem çiftinde, r_1 bir sonraki konum bölgesini tanımlar ve $[-2, 2]$ değer aralığına sahiptir. r_2 hareketin ne kadar hedef noktasına ya da ondan uzağa doğru olacağını belirler ve $[0, 2\pi]$ değer aralığına sahiptir. r_3 hedef için rasgele bir ağırlığı tanımlar ve hedef noktasının mesafeyi belirlemedeki etkisini stokastik olarak artırır ($r_3 > 1$) ya da azaltır ($r_3 < 1$). Son

olarak, r_4 sinüs fonksiyonundan kosinüs fonksiyonuna ya da tersi yönde eşit olarak geçiş yapılmasını sağlar ve $[0, 1]$ değer aralığına sahiptir. (Eş. 1) eşitliğindeki sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının bir sonraki konuma etkisi Şekil 1’de gösterilmektedir [36].

Yukarıdaki şekilde de gösterildiği gibi, (Eş. 1) eşitliği araştırma uzayında iki çözüm arasındaki uzayı tanımlar. Sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının genliklerini değiştirerek çözümlerin, ilgili hedefleriyle aralarındaki boşluğun dışında bir arama yapmaları sağlanır ki bu, arama alanının araştırılmasını garanti eder. Diğer yandan, sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının periyodik desenleri, bir çözümün bir başka çözümün yakınına konumlanmasına müsaade eder ki bu da iki çözüm arasındaki uzayın sömürülmesini garanti eder. $[-2, 2]$ aralığındaki sinüs kosinüs fonksiyonlarının etkileri Şekil 2’de gösterilmektedir [36].

Algoritmanın keşif ve sömürme aşamalarını dengeleyebilmek için Eş. 2’deki sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının genliği aşağıdaki eşitlik ile uyarlamalı olarak değiştirilir [36]:

$$r_1 = a - t \frac{a}{T} \quad (2)$$

Burada, t şimdiki iterasyonu, T toplam iterasyon sayısını ve a bir sabiti gösterir.

3. GÜÇ SİSTEMİ MODELLERİ (POWER SYSTEM MODELS)

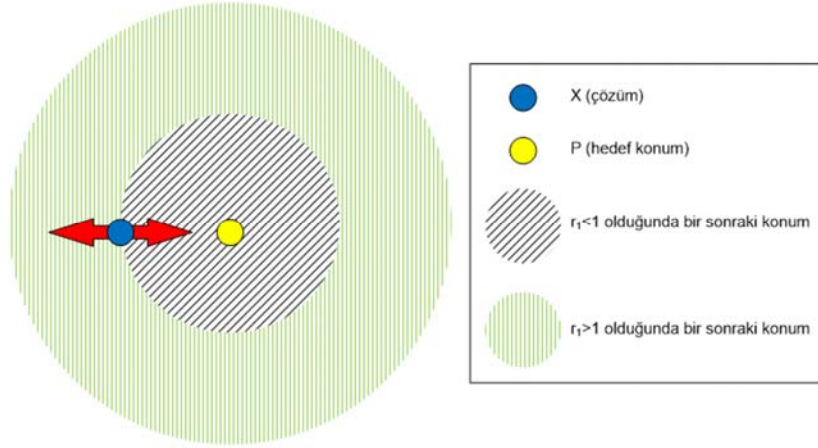
3.1. Generatör ve Uyarma (Generator and Exciter)

Generatör ve uyarma sistemlerini tanımlayan eşitlikler aşağıda sunulmuştur [3, 51].

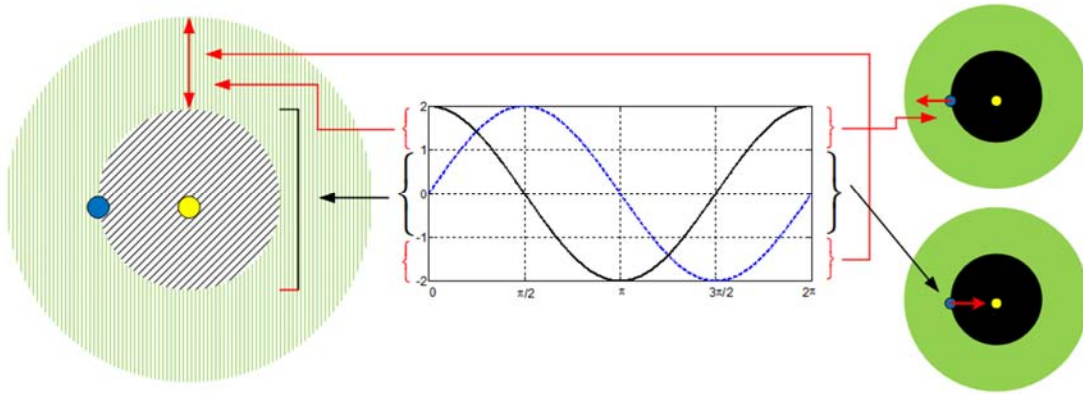
$$\dot{\delta} = \omega_b (\omega - 1) \quad (3)$$

$$\dot{\omega} = \frac{P_m - P_e - D(\omega - 1)}{M} \quad (4)$$

Yukarıdaki iki eşitlikte P_m ve P_e sırasıyla generatörün giriş ve çıkış güçlerini; M ve D sırasıyla atalet sabitini ve sönüm



Şekil 1. Eş. 1’deki sinüs ve kosinüsün bir sonraki konuma etkisi [36]
(Effects of sine and cosine functions in Eq. (1) on the next position [36])



Şekil 2. $[-2, 2]$ aralığındaki sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının bir çözümün ilgili hedef noktanın ötesine (hedefle arasındaki uzayın dışına) ya da etrafına (hedefle arasındaki uzayın içine) gitmesini izin vermesi [36] (Sine and cosine functions within a range of $[-2, 2]$ letting a solution to go beyond (outside the space among them) or around (inside the space among them) the destination [36])

katsayısını; ω_b senkron hızı; δ ve ω sırasıyla rotor açısını ve hızını göstermektedir. Generatör çıkış gücü, I armatür akımı ve V_t terminal geriliminin d -ekseni ve q -ekseni bileşenleri (i_d , i_q , v_d , v_q) cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [3, 51].

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q \quad (5)$$

E'_q iç gerilimi denklemi ise aşağıdaki gibidir.

$$\dot{E}'_q = \frac{E_{fd} - (x_d - x'_d) i_d - E'_q}{T'_{do}} \quad (6)$$

Son denklemde E_{fd} uyarma gerilimi; T'_{do} açık devre alan zaman sabiti; x_d ve x'_d sırasıyla generatörün d -ekseni reaktansı ve d -ekseni geçici reaktansıdır.

IEEE Type-ST1 uyarma sistemi ise aşağıdaki denklemle ifade edilir [3, 51].

$$\dot{E}_{fd} = \frac{K_A (V_{ref} - V_t + V_{pss}) - E_{fd}}{T_A} \quad (7)$$

Yukarıdaki denklemde K_A ve T_A sırasıyla uyarma sisteminin kazanç ve zaman sabitleri ve V_{ref} referans gerilimdir. V_t terminal gerilimi aşağıdaki gibidir [3, 51]:

$$V_t = (v_d^2 + v_q^2)^{1/2} \quad (8)$$

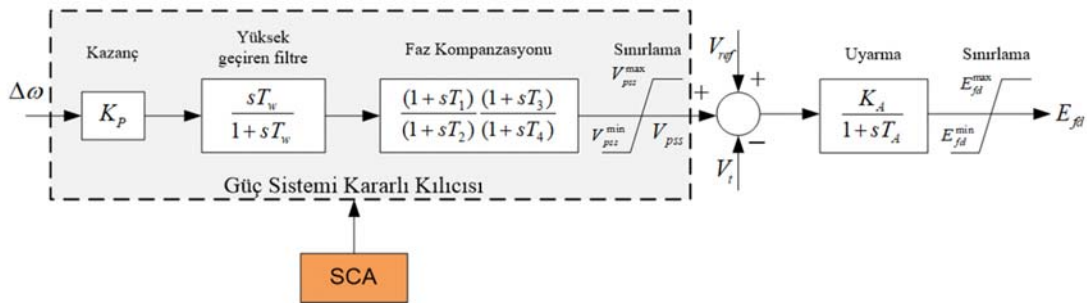
$$v_d = x_q i_q \quad (9)$$

$$v_q = E'_q - x'_d i_d \quad (10)$$

(Eş. 9) denklemde x_q generatörün q -ekseni reaktansıdır.

3.2. Güç Sistemi Kararlı Kılıcısının Yapısı (Structure of Power System Stabilizer)

PSS uyarma vasıtasıyla hareket eder ve üzerinde çalışılan güç sistemine kontrol etkisi sağlar. Bu çalışmada Şekil 3'te gösterilen PSS eklentili IEEE type-ST1 uyarma sistemi düşünülmüştür [52]. PSS'nin giriş sinyali normalize edilmiş hız sapması olan $\Delta\omega$ ve çıkış V_{pss} destekleyici kararlı kılıcı



Şekil 3. PSS eklentili IEEE type-ST1 uyarma sistemi (IEEE Type-ST1 excitation system with PSS)

sinyalidir. Şekil 3'teki blok şemadan anlaşılacağı gibi PSS'nin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi verilebilir [53]:

$$V_{pss}(s) = K_P \frac{sT_w}{1 + sT_w} \left[\frac{(1 + sT_1)(1 + sT_3)}{(1 + sT_2)(1 + sT_4)} \right] \Delta\omega(s) \quad (11)$$

Önceki eşitlikteki T_w zaman sabiti, rotor salınımları ile bağlantılı 0,2–2 Hz aralığındaki sinyalleri değiştirmeden geçirmeye izin vermek için yüksek geçiren filtre olarak kullanılır [54]. Genel olarak, T_w 1–20 s aralığındadır [3, 54]. İki adet birinci dereceden faz ilerlemeli-gerilemeli transfer fonksiyonları, PSS çıkışı ile elektriksel tork denetim eylemi arasındaki faz gecikmesini düzenlemek amacıyla kullanılır. Bu nedenle PSS gösterimi bir kazanç sabiti (K_P), zaman sabitli temizleme bloku (T_w) ve iki adet faz ilerlemeli-gerilemeli bloklardan (T_1 , T_2 , T_3 ve T_4) meydana gelir [54].

3.3. Linear Güç Sistemi Modeli (Linear Power System Model)

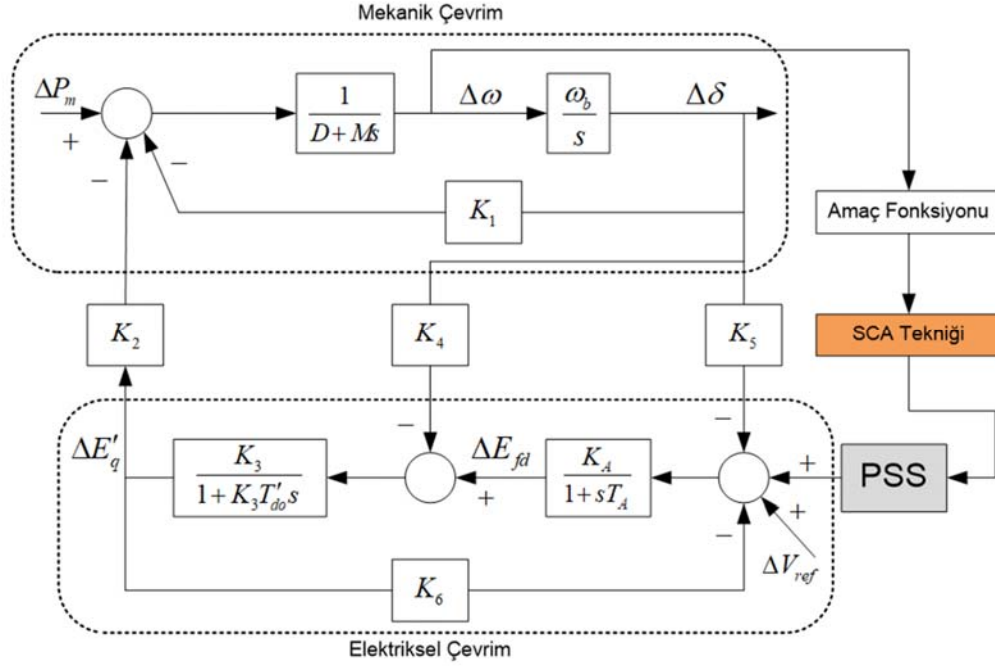
Sönüm denetleyicisi tasarımında genellikle nominal çalışma noktası civarında lineerleştirilmiş artışı model kullanılır [3]. Lineerleştirilmiş güç sisteminin durum uzayı modeli Eş. 12'de görülebileceği şekilde olur [3]:

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E'_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_b & 0 & 0 \\ \frac{K_1}{M} & \frac{D}{M} & \frac{K_2}{M} & 0 \\ \frac{K_4}{T'_{do}} & 0 & \frac{K_3}{T'_{do}} & \frac{1}{T'_{do}} \\ \frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & \frac{K_A K_6}{T_A} & \frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E'_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix} \Delta V_{pss} \quad (12)$$

Kıscacası güç sisteminin lineerleştirilmiş modeli aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta\dot{X} = A\Delta X + B\Delta U \quad (13)$$

Şekil 4 lineerleştirilmiş güç sistemi modelinin blok diyagramını açıklamaktadır. Bu model genellikle Heffron-Phillip modeli olarak bilinmektedir [3, 51]. Şekilde ayrıca algılama işaretleri şeması ile optimizasyon şeması da gösterilmiştir. K_1 – K_6 sabitlerinin ifadeleri [3, 51]'de verilmiştir.



Şekil 4. PSS ilave edilmiş Heffron-Phillip model gösterimi ve SCA kullanarak ayarlama şeması
(Representation of Heffron-Phillip model with PSS and tuning scheme using SCA)

4. ÖNERİLEN AMAÇ FONKSİYONU VE OPTİMAL KONTROLÖR TASARIMI (PROPOSED OBJECTIVE FUNCTION AND OPTIMAL CONTROLLER DESIGN)

Önceki bölümde güç sisteminin lineerleştirilmiş modeli sunulduğu için A durum matrisinden sistemin tüm özdeğerleri ($\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$) hesaplanabilir. $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ve n güç sistemindeki dominant özdeğerlerin toplam sayısını göstermek üzere her bir özdeğerin sönüm oranı $\zeta_i = -\sigma_i / \sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}$ olarak tanımlanır [55]. Özdeğer tabanlı kapsamlı sönümlenme indeksi (CDI) (Eş. 14) eşitliğiyle verilmiştir [56].

$$J_{CDI} = \sum_{i=1}^n (1 - \zeta_i) \quad (14)$$

Özdeğer tabanlı bu amaç fonksiyonunun minimum duruma gelmesi halinde sönüm oranı mümkün olduğunca maksimize edilmektedir. Bununla birlikte, hata işareti olarak hız sapmasını kullanan zaman tanım bölgesi tabanlı performans ölçütü olan zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali (ITAE) matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir [13, 57]:

$$J_{ITAE} = \int_0^{t_s} t |\Delta\omega(t)| dt \quad (15)$$

ITAE, PSS tasarım probleminde yaygın biçimde kullanılan etkili bir performans indeksidir [13, 27]. Burada t_s simülasyon zamanını ve $\Delta\omega$ hız sapmasını göstermektedir. Çok makinalı güç sistemlerinde $\Delta\omega$ tüm generatörlerdeki hız sapmalarının toplamıdır. ITAE en düşük değeri aldığı

sistem cevabı yerleşme zamanı ve aşım açısından iyileşme gösterir. Bu çalışmada ise PSS kontrolörünün parametrelerinin ayarlanması problemi için CDI ve ITAE fonksiyonlarını birlikte içeren çoklu bir amaç fonksiyonu önerilmiştir. Böylece sistemin sönüm oranı, yerleşme zamanı ve aşım açısından tüm arıza senaryolarında en iyi performans sergileyebilmesi sağlanacaktır. Önerilen amaç fonksiyonu Eş. 16 ve Eş. 17'deki gibidir.

$$J = J_{CDI} + J_{ITAE} = \sum_{i=1}^n (1 - \zeta_i) + \alpha \int_0^{t_s} t |\Delta\omega(t)| dt \quad (16)$$

$$F = \sum_{i=1}^{NP} J_i \quad (17)$$

Burada NP optimizasyonun yürütüleceği toplam senaryo sayısı ve α ağırlık katsayısıdır. Yapılan tekrarlı simülasyonlar sonucunda α ağırlık katsayısının yaklaşık 350 ile 600 arasında değiştiği saptanmıştır ve bu çalışmada ise α ağırlık katsayısı 500 olarak alınmıştır. Optimizasyon probleminde ayarlanabilir parametre sınırları Eş. 18 ve Eş.19'da verilmiş olup F 'nin minimize edilmesi zorunludur.

$$K_p^{\min} < K_p < K_p^{\max} \quad (18)$$

$$T_i^{\min} < T_i < T_i^{\max}; i = 1, 2, 3, 4 \text{ için} \quad (19)$$

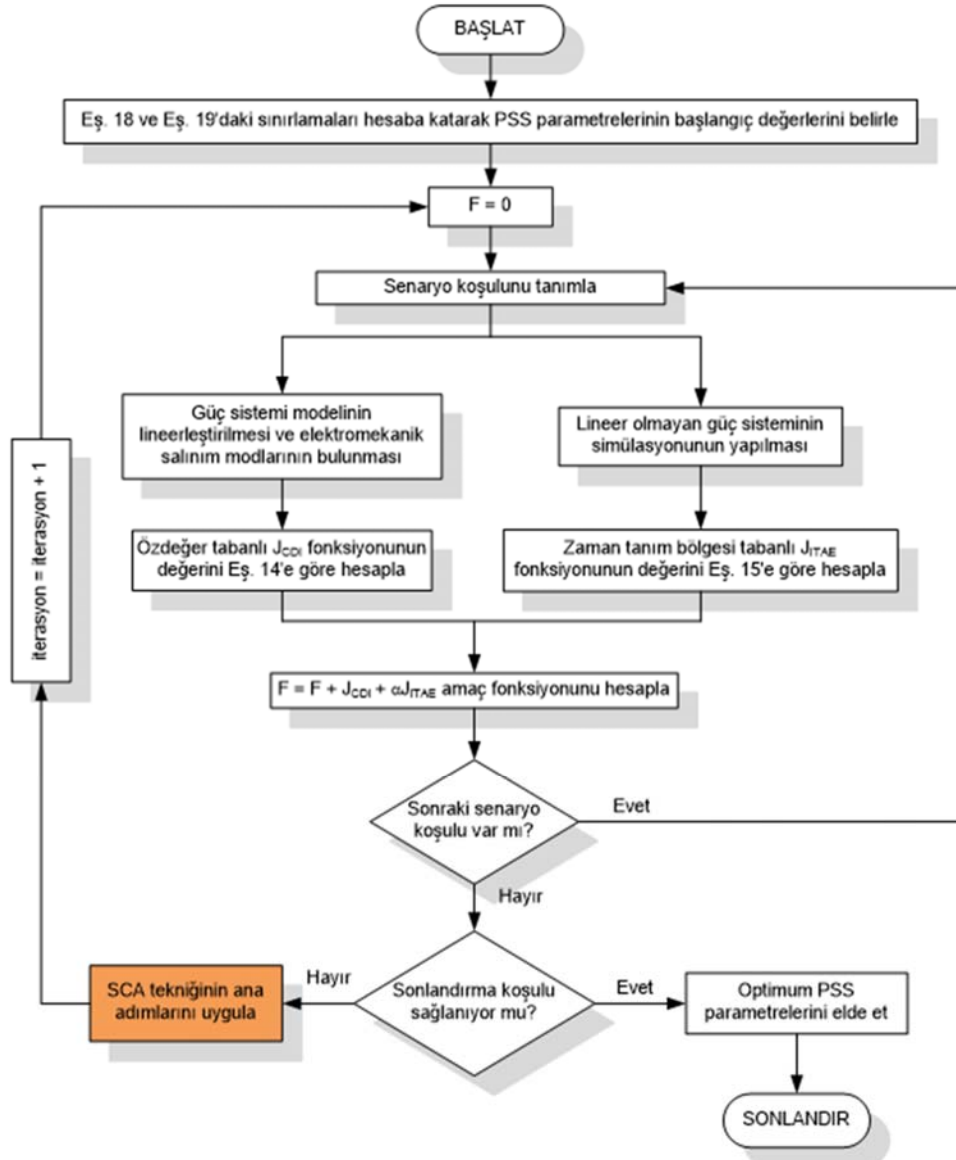
Önceki çalışmaların çoğunda T_w zaman sabiti genellikle 10 s olarak belirlenmiştir [13, 54]. PSS'nin K_p kazanç sabiti genellikle [0,01–100] arasında değişirken T_1 – T_4 faz ilerlemeli-gerilemeli blokların zaman sabitleri ise [0,01–1]

arasında değişmektedir [54]. Önerilen yaklaşım SCA tekniğinden yararlanarak bu optimizasyon problemini çözmeye çalışır. Sezgisel-üstü optimizasyon tekniğinin asıl amacı F çok amaçlı fonksiyonu minimumlaştırarak en iyi parametre kombinasyonunu (K_p , T_1 , T_2 , T_3 ve T_4) bulmaktır. Önerilen SCA tabanlı PSS kontrolör tasarımının hesaplamalı akış şeması Şekil 5'te detaylı olarak verilmiştir. Diğer sezgisel algoritmalara benzer şekilde SCA da iteratif bir algoritma türüdür ve algoritmayı sonlandırma ölçütü genellikle maksimum iterasyon sayısıdır.

5. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE TARTIŞMA (SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION)

PSS kontrolörünün parametrelerini en uygun değer olarak ayarlayan SCA tekniğinin etkinliğini farklı güç sistemleri üzerinde göstermek amacıyla, SCA ile elde edilen sonuçlar

BA [58] ve SOS [59] algoritmaları kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılacaktır. Bu çalışmada BA ve SOS karşılaştırma için seçilmiştir çünkü bu iki metod yeni olmalarının yanı sıra optimizasyon problemlerinin çözümlerinde yakın optimal global çözümler elde ettikleri için çok yaygındırlar. SCA, BA ve SOS tekniklerinin PSS tasarım problemine uygulanması için ihtiyaç duyulan kod yazımı 2,50 GHz Intel® Core™ i7 işlemci ve 16 GB RAM özellikli kişisel bir bilgisayar kullanılarak MATLAB R2014a ortamında yapılmıştır. SCA'nın popülasyon büyüklüğü 40 seçilmiştir. Uygun bir karşılaştırma yapılabilmesi için BA ve SOS algoritmalarının popülasyon sayısı da 40 seçilmiştir. İterasyon sayısı tüm algoritmalarda 50 alınmıştır. Ayrıca bu çalışmada önerilen kararlı kılıcının performansını resmetmek için sonuçlara ilişkin dört farklı durum sunuldu. Bu durumlar aşağıda verilmiştir.



Şekil 5. Önerilen SCA tabanlı PSS tasarımının akış diyagramı (Flowchart of the proposed SCA based PSS design)

- Kontrolsüz: Sistemin PSS olmadan çalışması
- BAPSS: Optimal parametreleri BA kullanılarak belirlenen PSS kontrolör ilaveli sistem
- SOS PSS: Optimal parametreleri SOS kullanılarak belirlenen PSS kontrolör ilaveli sistem
- SCAPSS: Optimal parametreleri önerilen SCA kullanılarak belirlenen PSS kontrolör ilaveli sistem

5.1. Tek Makinalı Sonsuz Baralı Test Sistemi ve PSS Tasarımına SCA'nın Uygulanması
(Single Machine Infinite Bus Test System and Application of SCA to PSS Design)

Sonsuz baraya bağlı tek makinalı güç sisteminin şematik hat diyagramı Şekil 6'da verilmiştir. İletim hattı, generatör, otomatik gerilim regülatörü, uyarma sistemi ve güç sistemi kararlı kılıcı şekilde gösterilmiştir. Bu makalede üzerinde analizler yapılan tek makinalı sonsuz baralı sistemin makina, iletim hattı, transformatör ve uyarma verileri Tablo 2'de listelenmiştir.

Tablo 2. Test sisteminin parametreleri
(Parameters of test system)

Makina	$M = 2H = 6.4$ pu, $x_d = 2.5$ pu, $x_q = 2.1$ pu, $x'_d = 0.39$ pu, $T'_{do} = 9.6$ s, $\omega_b = 2\pi \times 60$ rad/s, $P_{eo} = 0.5$ pu, $D = 0$, $\delta_o = 42.4^\circ$
İletim Hattı ve Transformatör	$X_{L1} = X_{L2} = 0.8$ pu, $X_T = 0.1$ pu $K_A = 400$, $T_A = 0.02$ s, $E_{fd}^{\min} = -5$
Uyarma ve PSS	pu, $E_{fd}^{\max} = 5$ pu, $V_{pss}^{\min} = -0.2$ pu, $V_{pss}^{\max} = 0.2$ pu

Bu çalışmada tek makinalı sonsuz baralı örnek sistemde optimize edilecek parametre sayısı 5'tir (K_p , T_1 , T_2 , T_3 ve T_4). Optimizasyon sürecinde aşağıda verilen üç farklı arıza senaryosu göz önüne alınmıştır.

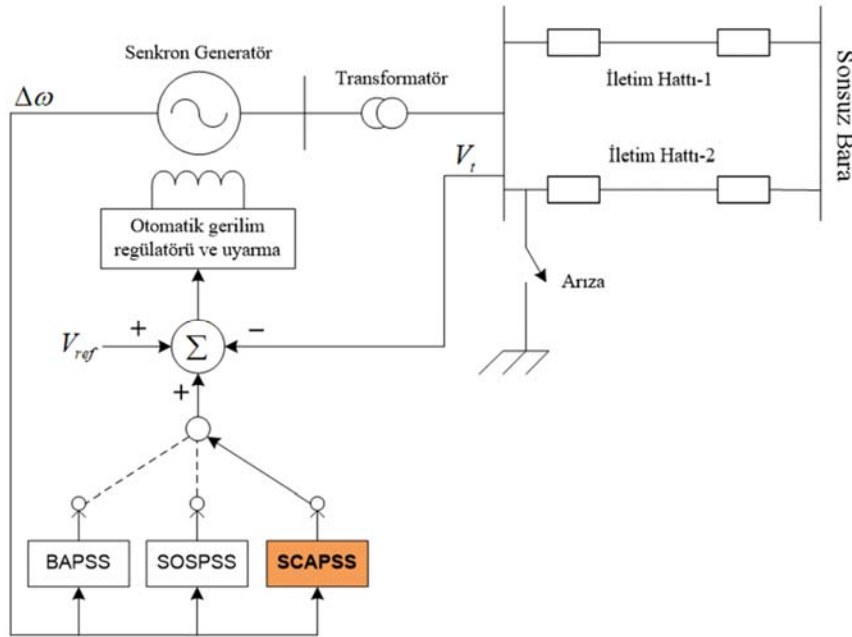
- t=2 s'de generatör uçlarındaki üç-fazlı 6-saykıl kısa devre arızası
- t=2 s'de paralel iletim hatlarından birinin sürekli olarak devreden çıkarılması
- t=2 s'de mekanik güç girişinde %15'lik ani bir azalma olması ($\Delta P_m = -0,075$ pu)

PSS parametrelerinin optimizasyon süreci, tüm senaryolarda Eş. 17'de verilen F amaç fonksiyonunun değeri hesaplanmak suretiyle yürütülür. BA, SOS ve SCA metotları ile optimize edilen PSS parametrelerinin son değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

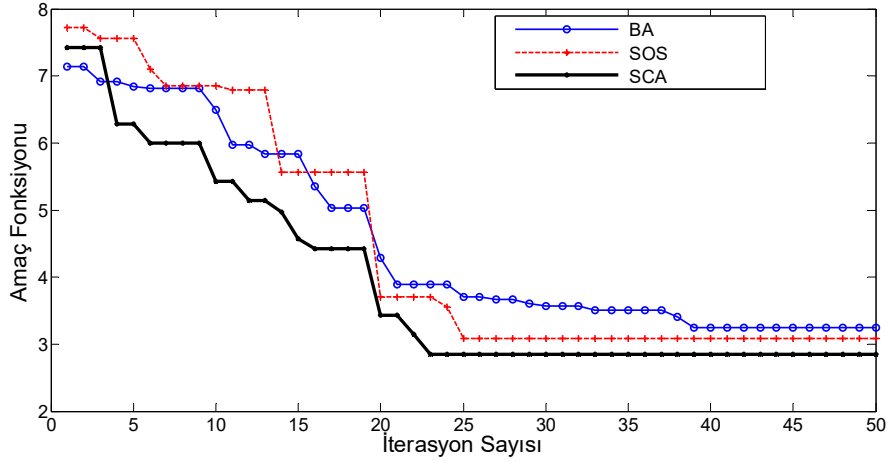
Tablo 3. Üç algoritma kullanılarak optimize edilen PSS parametreleri
(Optimized PSS parameters using three algorithms)

Optimizasyon Tekniği	Optimize edilen PSS parametreleri				
	K_p	T_1	T_2	T_3	T_4
BA	18,5951	0,4914	0,0990	0,1588	0,1813
SOS	16,1361	0,1888	0,0211	0,7916	0,5550
SCA	46,8866	0,09288	0,0100	0,1238	0,0100

Amaç fonksiyonunun üç algoritma kullanılarak değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Yakınsama hızlarına bakıldığında BA, SOS ve SCA sırasıyla 39, 25 ve 23 iterasyonda yakınsar. SCA diğer iki algoritmaya göre daha hızlı yakınsama özelliği göstermektedir. Bununla birlikte, örnek sistem için üç algoritma kullanılarak bulunan hesaplama zamanları Tablo 4'te verilmiştir. Bahsedilen hesaplama zamanı, bilgisayar



Şekil 6. Tek makinalı sonsuz baralı sistemin şematik hat diyagramı (Schematic line diagram of single machine infinite bus system)



Şekil 7. Amaç fonksiyonunun değişimi (Change of objective function)

kodlarının 30 defa çalıştırılmasıyla elde edilen değerlerinin ortalamalarıdır. Tablodan görüleceği gibi SCA'nın simülasyon süresi daha azdır ve bu yüzden hızlı yakınsar.

Tablo 4. BA, SOS ve SCA için hesaplama zamanı (Computation time for BA, SOS, and SCA)

Optimizasyon tekniği	BA	SOS	SCA
Simülasyon süresi (s)	71,38	86,42	65,19

5.1.1. Lineer modelde sistem kararlılığı (System stability in linear model)

Özdeğer analizi farklı karakteristik frekanslar altındaki bir güç sistemin dinamik davranışını araştırır. Özdeğerler sistem kararlılığını ve sistemin nasıl kararsız olduğunu belirtir. Bir güç sisteminde tüm özdeğerlerin kararlı olması (s -düzleminin sol tarafında olması) yetmez, aynı zamanda elektromekanik salınımlara ilişkin tüm istenilen özdeğerlerin olabildiğince çabuk sönümlenmesi gerekir [33]. Bu açıdan bakıldığında, önerilen SCA tabanlı kararlı kılıcısının sistemin lineer model kararlılığını iyileştirdiğini doğrulamak için özdeğer analizi yapılmıştır.

Sistemde kararlı kılıcı kullanılmadan ve kontrolör parametreleri diğer üç algoritma ile optimize edilen sistemlere ilişkin elektromekanik modların sistem özdeğerleri ($\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$) ve sönüm oranları (ζ_i) Tablo 5'te verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere, sisteme PSS ilave edilmemesi durumunda sistem yetersiz sönümlüdür ($\zeta=0,0115$). BAPSS ve SOSPSS kontrolörlerine nazaran önerilen SCAPSS'nin elektromekanik modu s -düzleminin daha solundadır (sönüm faktörü $\sigma=-2,0165$) ve ayrıca sönüm oranı ($\zeta=0,4866$) daha büyüktür. Bu nedenle önerilen kararlı kılıcı daha iyi sönüm oranı ve sönüm faktörü sağlar.

5.1.2. Lineer olmayan zaman tanım bölgesi simülasyonları (Nonlinear time-domain simulation)

Tek makinalı sonsuz baralı lineer olmayan güç sisteminin diferansiyel ve cebirsel denklemlerine ilişkin modeller çeşitli Simulink blokları kullanılarak oluşturulmuştur. Şekil 8 test

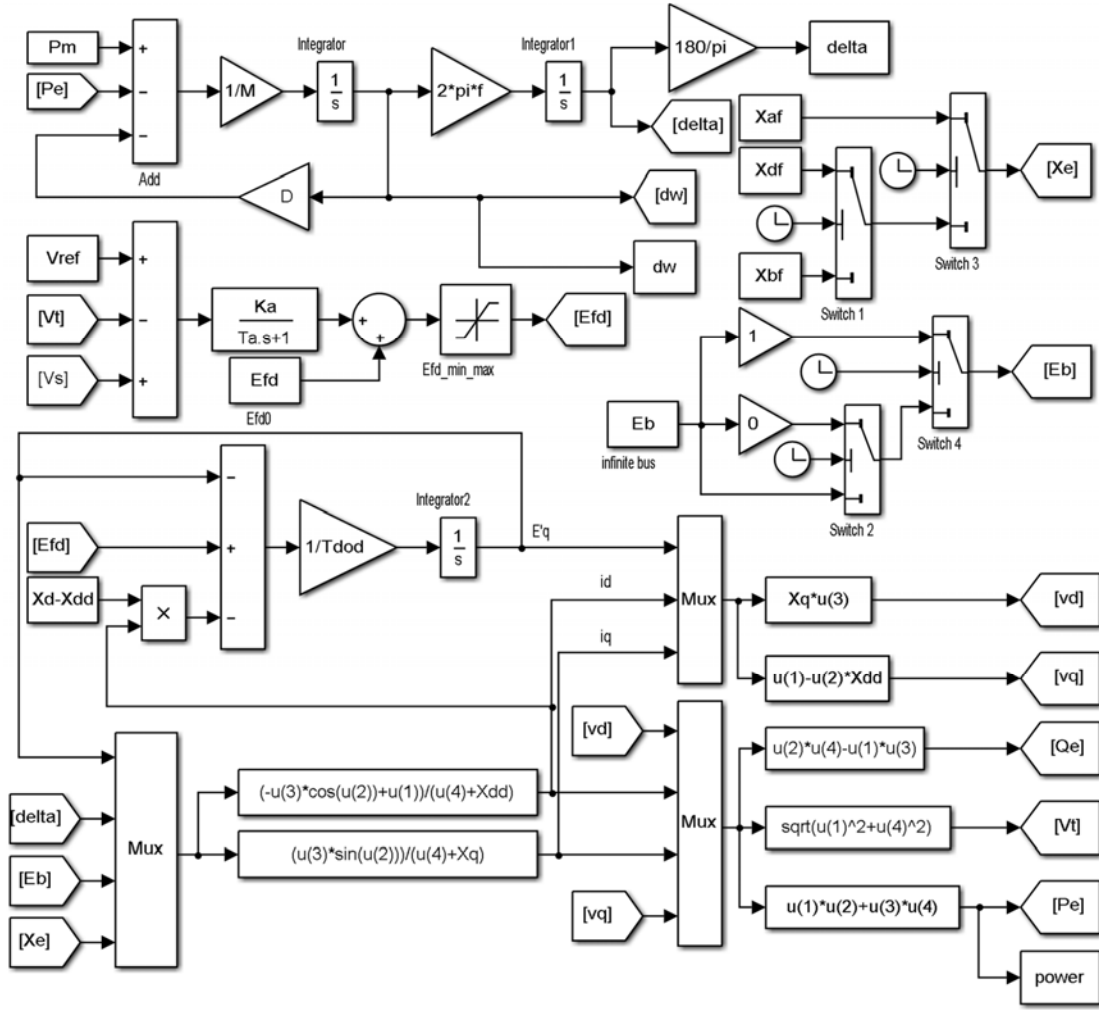
sistemine ait (Eş. 3–Eş. 10) eşitliklerinin Simulink ortamında modellenmesini gösterir. PSS işaret çıkışının ve ITAE amaç fonksiyonu çıkışının hesaplanması için gereken Simulink model ise Şekil 9'da verilmiştir. Geçici hal kararlılık çalışmalarında, tasarlanan bu iki Simulink modelinden yararlanılmıştır. MATLAB/Simulink ortamında örnek güç sisteminin zaman tanım bölgesi simülasyonlarında, diferansiyel denklemlerin sayısal entegrasyonu için *Runge-Kutta 4* metodu kullanıldı ve entegrasyon adımı $\Delta t=0,005$ s seçildi. Bu bölümde, önerilen yaklaşımın kalitesini açıkça belirtmek için zaman tanım bölgesi analizi yapılacaktır. Bu amaca ulaşabilmek için SCA tabanlı kontrolörün etkinliğini ve sağlamlığını vurgulamak suretiyle birbirinden farklı üç temel senaryo öne sürüldü.

Tablo 5. Sistem elektromekanik modları (System electromechanical modes)

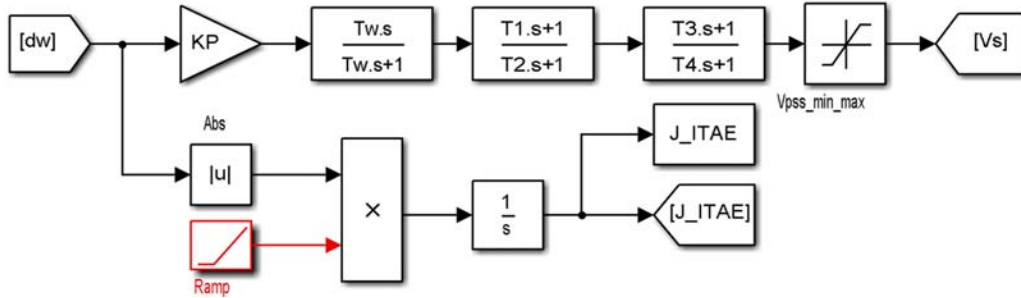
Sistem Özelliği	Elektromekanik mod özdeğeri	Sönüm oranı
Kontrolsüz	$-0,0803 \pm j6,9824$	%1,15
BAPSS	$-1,6970 \pm j3,7220$	%41,49
SOSPSS	$-1,7449 \pm j4,6057$	%35,43
SCAPSS	$-2,0165 \pm j3,6201$	%48,66

İlk Senaryo: Üç-fazlı arıza

$t=2$ s anında generatör uçlarına üç-fazlı 6 sayıkl ($t_{ariza}=0,1$ s) kısa devre arızası uygulandı ve ilgili arızanın kaldırılmasıyla sistemin eski haline döndüğü varsayımı yapıldı. Bu üç-fazlı arızanın ardından tek makinalı sonsuz baralı sistemin rotor açısı (δ), hız sapması ($\Delta\omega$) ve elektriksel güç (P_e) cevapları sırasıyla Şekil 10-12'de sunulmuştur. Bu şekillerdeki cevaplardan görüleceği üzere, kontrolsüz sistemde uzun süren salınımlar ve büyük aşımalar olmasına rağmen optimal kontrolörler ile (BAPSS, SOSPSS ve SCAPSS) yerleşme zamanı ve aşımalar önemli ölçüde azaltılarak sistem yeterli kararlılıkta salınımlar sergilemektedir. Ayrıca bu sistem cevabından anlaşıldığı üzere, optimal SCA tabanlı PSS (SCAPSS) kontrolörü; BA ve SOS tabanlı PSS (BAPSS ile SOSPSS) kontrolörleriyle karşılaştırıldığında düşük



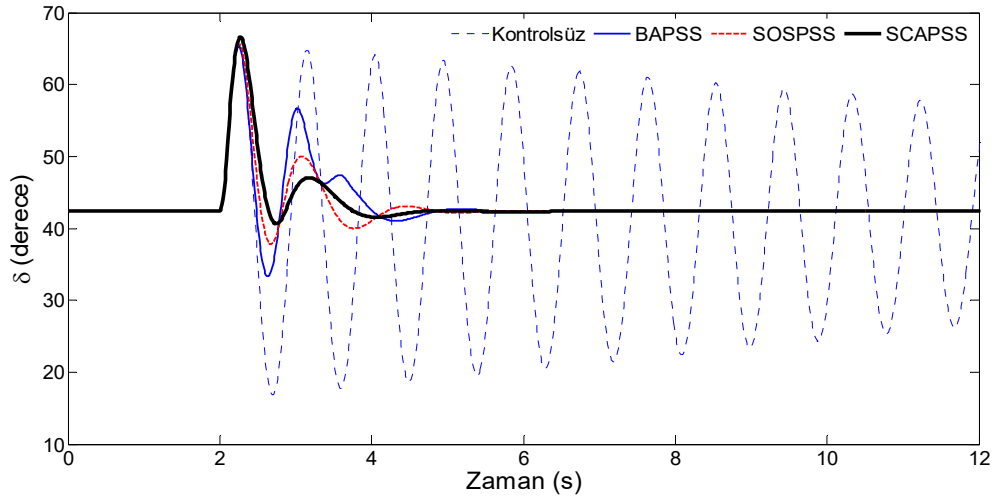
Şekil 8. (Eş. 3–Eş. 10) denklemlerinin hesaplanması için Simulink modeli (Simulink model for calculation of Eqs. (3–10))



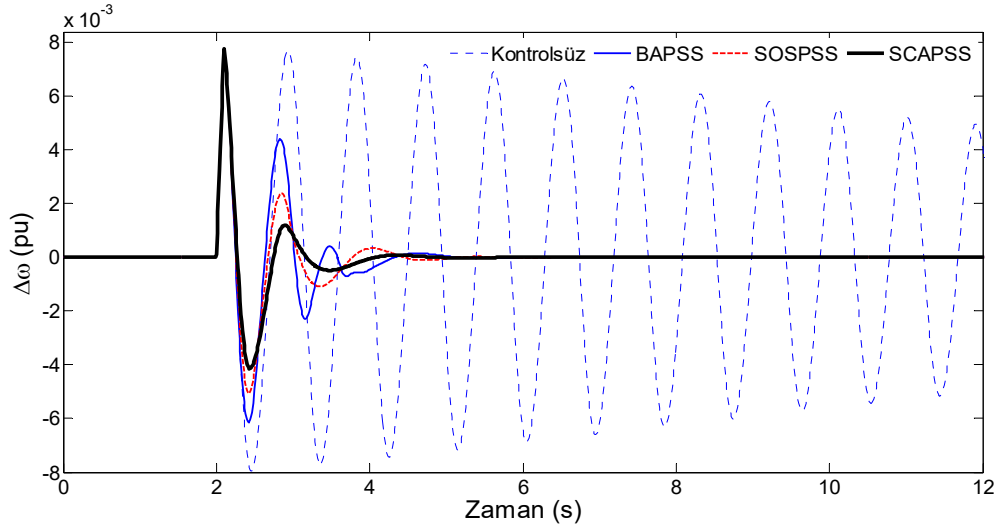
Şekil 9. PSS ve ITAE için Simulink modeli (Simulink model for PSS and ITAE)

frekanslı titreşimlere daha iyi bir sönüm performansı sağlamaktadır. İkinci Senaryo: İletim hattı zayıf Bu senaryoda diğer ciddi bir arıza türü düşünüldü. $t=2$ s'den sonra iletim hatlarından biri kalıcı olarak devreden çıkarıldı. Bu arıza ihtimaline karşı sistem cevabı Şekil 13-15'te gösterilmiştir. Bir hattın devreden çıkarılmasıyla sistemin kontrolsüz haldeki çalışması kararsızdır. Sistem zaman cevabı ve aşım, BA, SOS ve SCA tabanlı kararlı kılıçlar kullanıldığında iyileştirilmektedir. Bununla birlikte PSS parametreleri SCA ile optimize edilen sistem (SCAPSS);

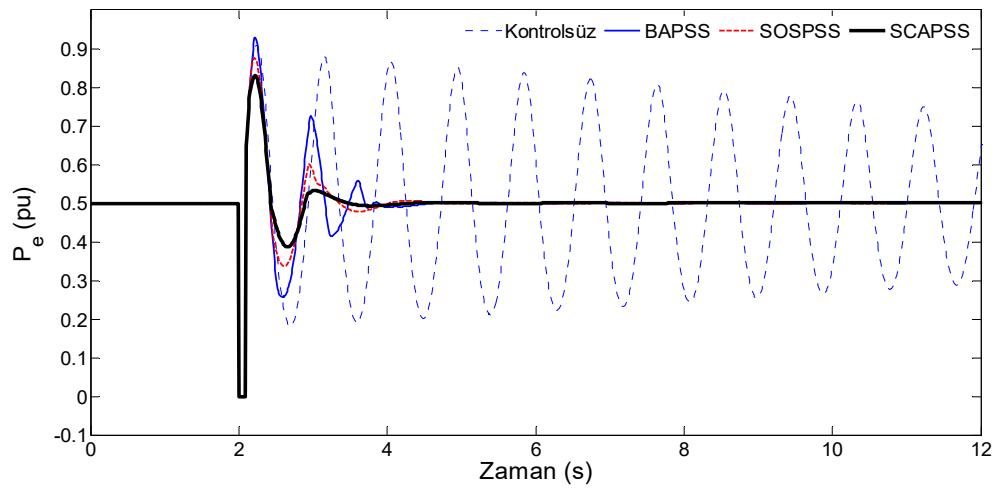
BAPSS ve SOSPPS'ye kıyasla biraz daha iyi sonuçlar vermektedir. Üçüncü Senaryo: Mekanik güç arızası Önerilen tasarım yaklaşımının etkinliğini doğrulamak amacıyla, son arıza türü olarak $t=2$ s'de mekanik güç girişinde %15'lik ani bir azalma olduğu düşünüldü. Şekil 16-18 bu küçük arızaya maruz kalan sistemin cevabını göstermektedir. Bu şekillerden açıkça görüleceği üzere, mekanik güç arızasının etkisi, kısa devre ve hat zayıf arızalarından daha az şiddetlidir. Mevcut arıza altında kontrolsüz sistem istenmeyen ve yetersiz kararlılıkta bir performansa sahiptir.



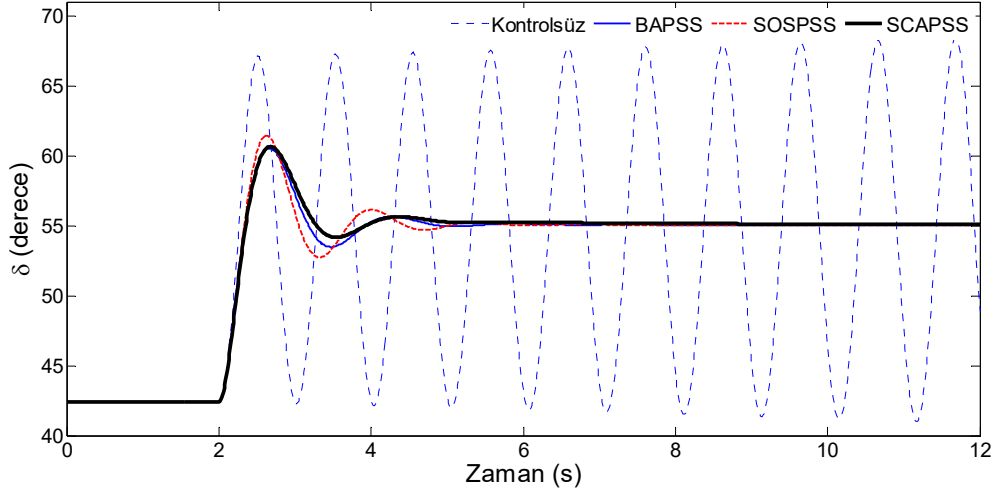
Şekil 10. Senaryo 1 altında δ 'nin cevabı (Response of δ under scenario 1)



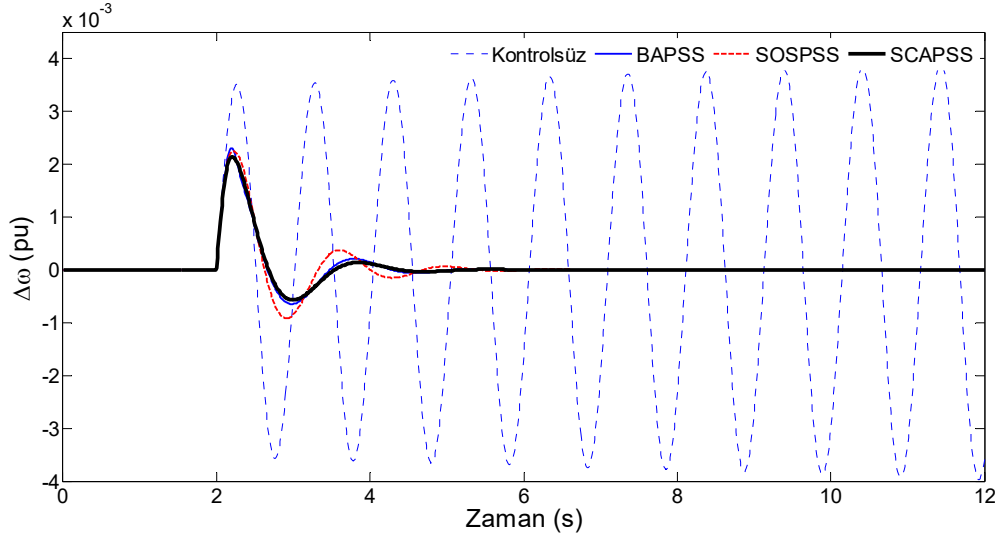
Şekil 11. Senaryo 1 altında $\Delta\omega$ 'nin cevabı (Response of $\Delta\omega$ under scenario 1)



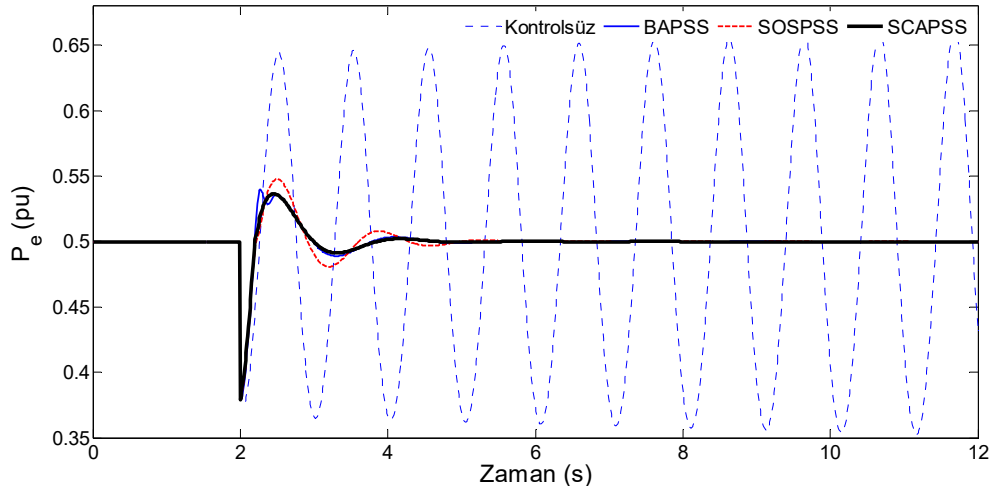
Şekil 12. Senaryo 1 altında P_e 'nin cevabı (Response of P_e under scenario 1)



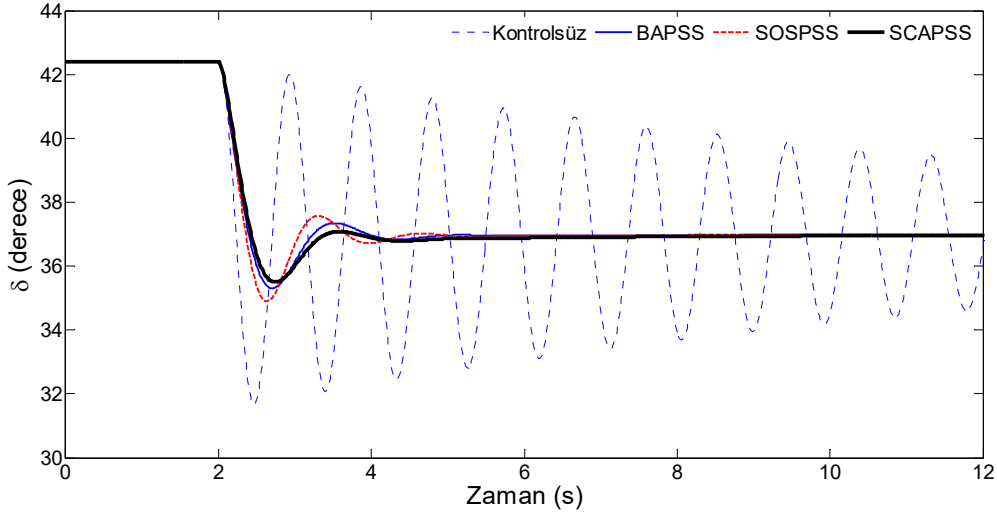
Şekil 13. Senaryo 2 altında δ 'nin cevabı (Response of δ under scenario 2)



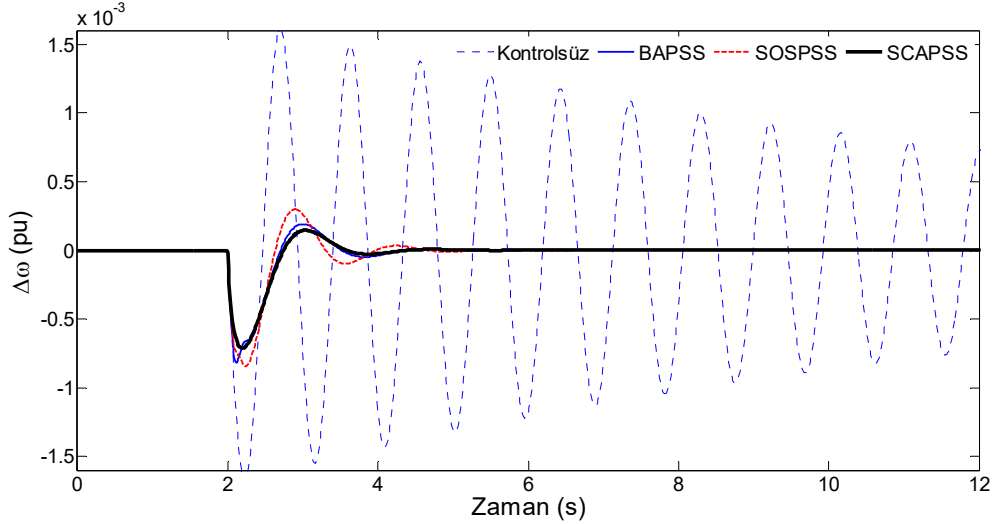
Şekil 14. Senaryo 2 altında $\Delta\omega$ 'nin cevabı (Response of $\Delta\omega$ under scenario 2)



Şekil 15. Senaryo 2 altında P_e 'nin cevabı (Response of P_e under scenario 2)



Şekil 16. Senaryo 3 altında δ 'nın cevabı (Response of δ under scenario 3)



Şekil 17. Senaryo 3 altında $\Delta\omega$ 'nın cevabı (Response of $\Delta\omega$ under scenario 3)

Üstelik bu şekillerden gözleneceği üzere önerilen SCAPSS diğer iki algoritma tabanlı kontrolörlere kıyasla, örnek güç sisteminin sönümleme yeteneğini belirgin şekilde artırmaktadır ve düşük frekanslı salınımları çabucak söndürmektedir.

5.1.3. Dayanıklılık araştırması (Robustness investigation)

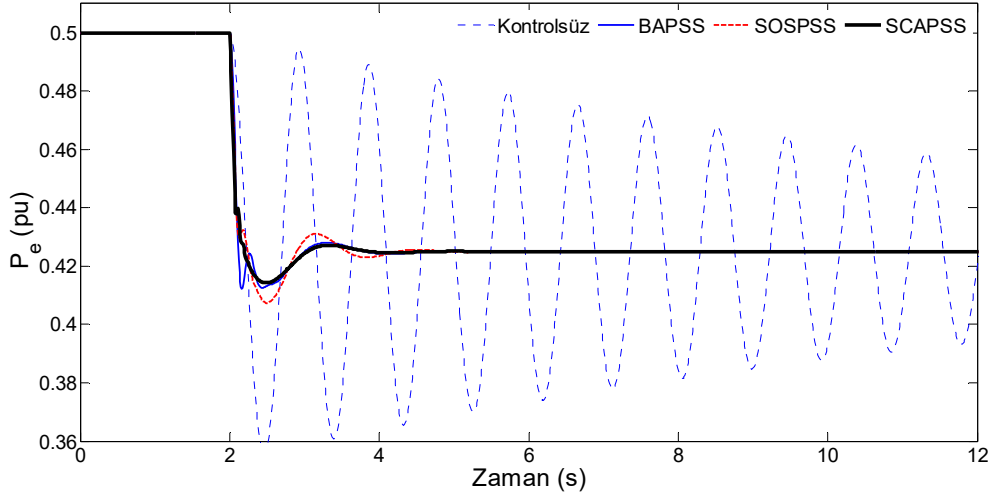
Önerilen kontrolörün tüm arıza senaryolarında dayanıklılığının kanıtlanması bakımından lineer olmayan zaman tanım bölgesi simülasyon sonuçlarından δ rotor açısının sistem cevabı ele alınmıştır. Rotor açısının %5 ve %2'lik yerleşme zamanı bandına girmesi için gereken süreler Tablo 6'da verilmiştir. Sistem cevabının zaman tanım bölgesi açısından daha iyi performans göstermesi için yerleşme zamanlarının düşük olması istenilir. Sistemin kontrolsüz çalışması durumuna bakıldığında Senaryo 1 ve 3 için yerleşme zamanı süreleri oldukça uzun ve Senaryo 2 için de sistem kararsızlığa sürüklenmektedir. Kontrolör parametreleri BA, SOS ve SCA ile en uygun hale getirilen

sistemlerin yerleşme zamanları gayet makul seviyelerde bulunmaktadır. %5'lik tolerans için rotor açısının yerleşme zamanlarının ortalama değeri SCA tabanlı kontrolör ile en düşük değeri almaktadır. Tüm senaryolardaki %2'lik tolerans (daha hassas bant) için yerleşme zamanı değerlerine bakıldığında ise, SCA tabanlı kontrolörün yerleşme zamanı değerleri diğer iki algoritma tabanlı kontrolörlere göre daha düşüktür. Böylece önerilen SCAPSS kullanılarak sistem daha hızlı sürekli hal durumuna oturur ve düşük frekanslı salınımlara karşı daha iyi bir sönüm karakteristiği gösterir.

5.2. Çok Makinalı Test Sistemi ve PSS Tasarımına SCA'nın Uygulanması

(Multi-machine Test System and Application of SCA to PSS Design)

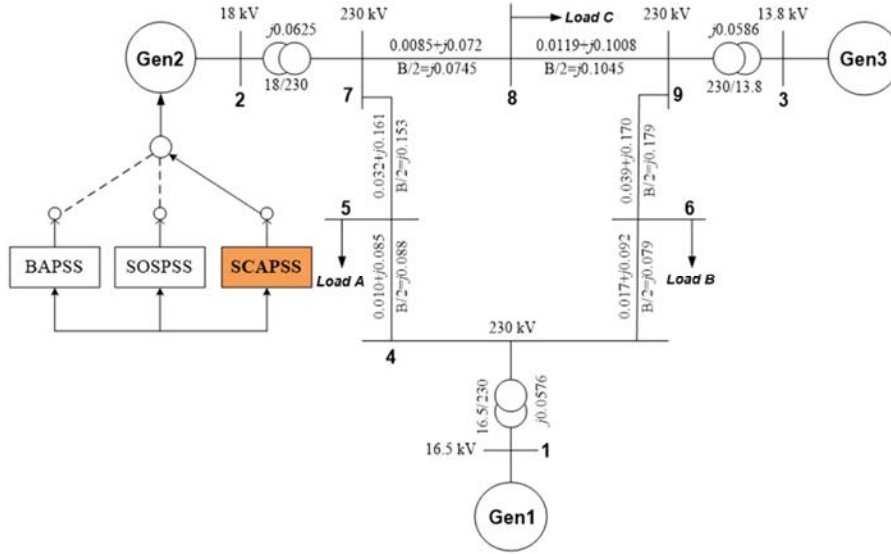
Bu makalede çok makinalı güç sistemi olarak Şekil 19'da detaylıca gösterilen 3-makinalı 9-baralı güç sistemi [3, 60] ele alındı. Bu sistem literatürde çokça kullanılmaktadır. Bu güç sistemine ait generatör, iletim hatları ve uyarma verilerine ayrıntılı şekilde [61]'den ulaşılabilir. Katılım



Şekil 18. Senaryo 3 altında P_e 'nin cevabı (Response of P_e under scenario 3)

Tablo 6. δ 'nın üç farklı arıza senaryosu için yerleşme zamanları (Settling times of δ for three different fault scenarios)

Senaryo türü	Senaryo 1		Senaryo 2		Senaryo 3		
Yerleşme zamanı kriteri	%5	%2	%5	%2	%5	%2	
Yerleşme zamanı (s)	Kontrolsüz	36,22	47,49	Kararsız	Kararsız	12,61	23,33
	BAPSS	1,82	2,57	0,96	1,66	0,25	1,07
	SOSPSS	1,87	2,06	0,90	2,05	0,73	1,02
	SCAPSS	1,51	1,64	0,94	1,15	0,27	0,92



Şekil 19. Çok makinalı test sistemi (Multi-machine test system)

faktörü analizine göre yalnızca iki nolu makinaya PSS'nin yerleştirilmesi öngörülmektedir [15]. Bu çalışmada "2" nolu generatör için 5 parametrenin (K_P , T_1 , T_2 , T_3 ve T_4) optimize edilmesi gerekmektedir. Optimizasyon süresi boyunca aşağıdaki iki farklı arıza senaryosu incelenmiştir.

- $t=2$ s anında 7 nolu baraya yakın 5-7 hattının sonunda üç-fazlı 6-saykıl kısa devre arızası

- Aynı yerde arıza süresinin 10-saykıl olması (Arıza temizleme süresinin artırılması)

Tüm senaryolarda Eş. 17'de verilen F amaç fonksiyonunun değeri hesaplanarak PSS parametrelerinin optimizasyon süreci yürütülür. Üç algoritma (BA, SOS ve SCA) ile optimize edilen PSS parametrelerinin son değerleri Tablo 7'de listelenmiştir.

BA, SOS ve SCA tabanlı F amaç fonksiyonunun yakınsama karakteristiği Şekil 20’de gösterilmiştir. Yakınsama grafiğinden görüleceği üzere BA ve SOS tekniklerine nazaran SCA tekniği daha iyi bir yakınsama hızına sahip olarak kontrolörün son parametre değerlerine daha az iterasyonla ulaşır. Bununla birlikte 3-makinalı 9-baralı güç sisteminin kontrolör (PSS) parametrelerinin optimizasyonu için geçen hesaplama zamanları ise Tablo 8’de verilmiştir. Tablodan açıkça anlaşılacağı üzere çok makinalı güç sisteminde de SCA tekniğinin simülasyon süresi diğer iki tekniğe oranla daha azdır. Böylece SCA tekniği ile çalışan sistemler önemli ölçüde zaman tasarrufu sağlar ve bu nedenle yüksek hızlı işlemcili online optimizasyonlar için kullanılması da uygundur.

5.2.1. Lineer Modelde sistem kararlılığı (System stability in linear model)

Tablo 9 kontrolsüz ve PSS parametreleri farklı algoritmalar ile optimize edilen sistemlerin (BAPSS, SOS PSS ve önerilen SCAPSS) elektromekanik salınım özdeğerlerini ($\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$) ve bu özdeğerlere karşılık gelen sönüm oranlarını (ζ_i) göstermektedir. Tablodan görüleceği üzere PSS eklemeyen sistem (kontrolsüz) zayıf sönümlüdür ($\zeta_{\min} = 0,0485$). Bununla birlikte önerilen SCAPSS kararlı kılıcısı BAPSS ve SOS PSS kararlı kılıcılarına göre daha iyi sönüm oranlarına sahip olduğu ve elektromekanik salınım özdeğerleri s -

düzleminin daha solunda yer aldığı için sistemin küçük işaret kararlılığını iyileştirmektedir.

Tablo 9. Sistem elektromekanik modları
(System electromechanical modes)

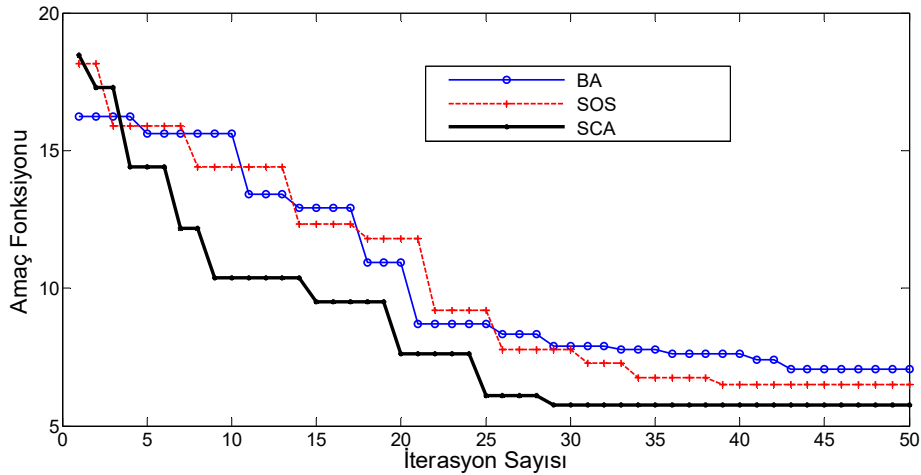
Sistem Özelliği	Elektromekanik mod özdeğeri	Sönüm oranı
Kontrolsüz	$-0,3831 \pm j7,8846$	%4,85
	$-1,3738 \pm j11,7499$	%11,61
BAPSS	$-2,4109 \pm j8,6004$	%26,99
	$-2,4935 \pm j14,7517$	%16,67
SOSPSS	$-1,8067 \pm j4,4511$	%37,61
	$-2,6541 \pm j10,4385$	%24,64
SCAPSS	$-2,3641 \pm j5,1628$	%41,63
	$-3,0404 \pm j10,5879$	%27,60

5.2.2. Lineer olmayan zaman tanım bölgesi simülasyonları (Nonlinear time-domain simulation)

3-makinalı 9-baralı test sisteminin geçici hal kararlılık çalışmalarında [33]’teki Simulink tabanlı modellerden yararlanılmıştır. MATLAB/Simulink ortamında örnek çok makinalı güç sisteminin zaman tanım bölgesi simülasyonlarında, diferansiyel denklemlerin sayısal entegrasyonu için *Runge-Kutta 4* metodu kullanıldı ve entegrasyon adımı $\Delta t = 0,005$ s seçildi. Bu bölümde, önerilen

Tablo 7. Üç algoritma kullanılarak optimize edilen PSS parametreleri
(Optimized PSS parameters using three algorithms)

Optimizasyon Tekniği	Optimize edilen PSS parametreleri				
	K_p	T_1	T_2	T_3	T_4
BA	12,5908	0,1349	0,7861	0,9657	0,0339
SOS	6,3341	0,7670	0,7787	1,0000	0,6326
SCA	64,3091	0,8649	0,0116	0,8233	0,4215



Şekil 20. Amaç fonksiyonunun değişimi (Change of objective function)

Tablo 8. BA, SOS ve SCA için hesaplama zamanı (Computation time for BA, SOS, and SCA)

Optimizasyon tekniği	BA	SOS	SCA
Simülasyon süresi (s)	3364,2	4027,6	3127,3

yaklaşımın kalitesini açıkça belirtmek için zaman tanım bölgesi analizi yapılacaktır. Bu hedefe ulaşabilmek için SCA tabanlı kontrolörün etkinliğini ve sağlamlığını vurgulamak suretiyle birbirinden farklı iki temel senaryo ele alındı.

İlk Senaryo: Üç-fazlı arıza (Arıza temizleme süresi 0,10 s ve kararlı sistemin iyileştirilmesi)

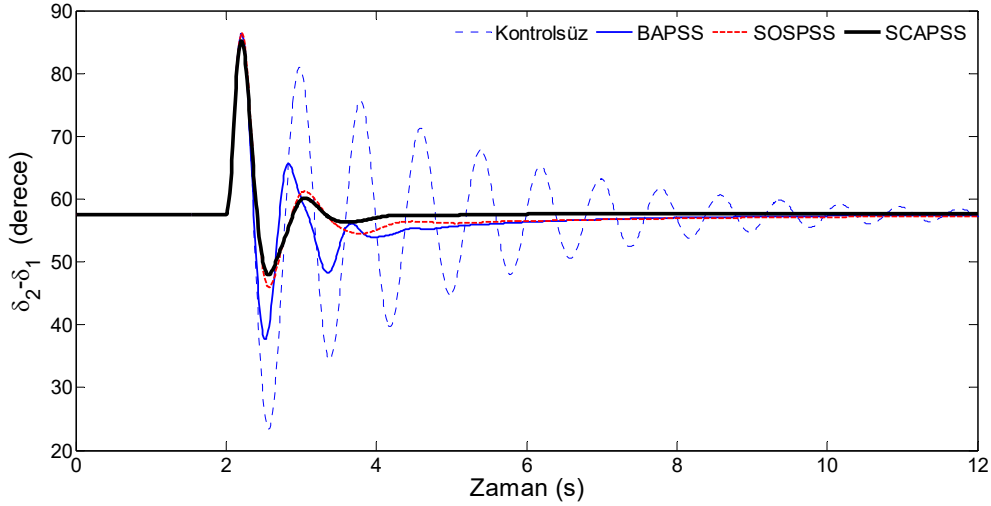
Şekil 19'daki çok makinalı sistem için $t=2$ s anında 7 nolu baraya yakın 5-7 hattının sonunda 6 saykıl (100 ms) süren üç-fazlı arızanın olduğu düşünüldü. İlgili arızalı hat yeniden devreye sokularak sistemdeki arıza giderildi. Sistem davranışı 12 s boyunca hesaplandı. Bu arıza ihtimali için G2 ve G3 generatörlerinin G1 generatörüne göre $\delta_2-\delta_1$ ve $\delta_3-\delta_1$ bağıl rotor açısı cevapları sırasıyla Şekil 21 ile Şekil 22'de ve $\omega_2-\omega_1$ ve $\omega_3-\omega_1$ bağıl hız sapması cevapları da sırasıyla Şekil 23 ve Şekil 24'te gösterilmiştir.

Şekil 21-24'ten anlaşılacağı üzere kontrolsüz sistemin yeterli olarak sönümlenmediği ve çok aşım yaptığı

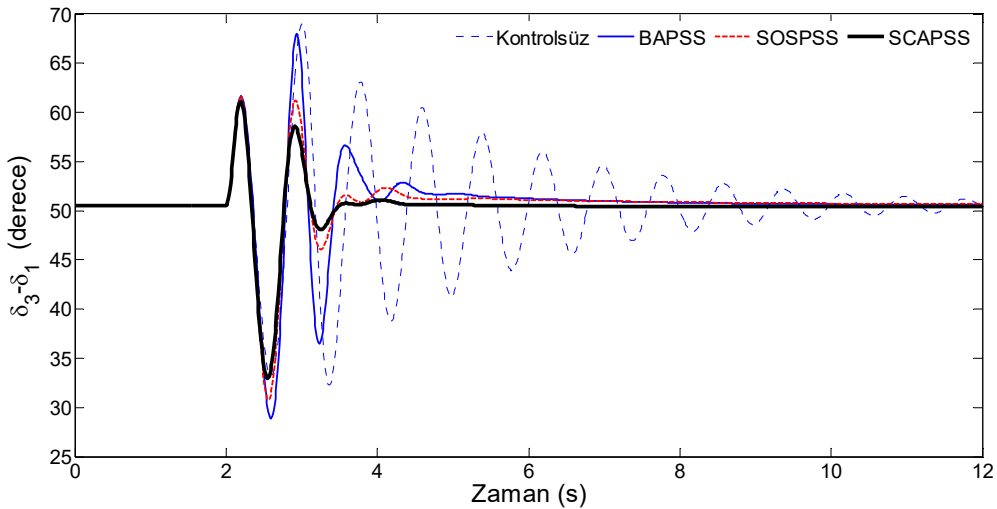
görülmektedir. BAPSS ve SOSPSS uygulamalarıyla sistem kararlılığını korumaktadır ve güç sistem salınımları etkili şekilde bastırılmıştır. Ayrıca şekillerden anlaşılacağı üzere diğer iki algoritma ile karşılaştırıldığında SCA tekniği ile elde edilen maksimum aşım ve yerleşme zamanı daha az çıkmaktadır.

İkinci Senaryo: Üç-fazlı arıza (Arıza temizleme süresi 0,1666 s ve kararsız sistemin iyileştirilmesi)

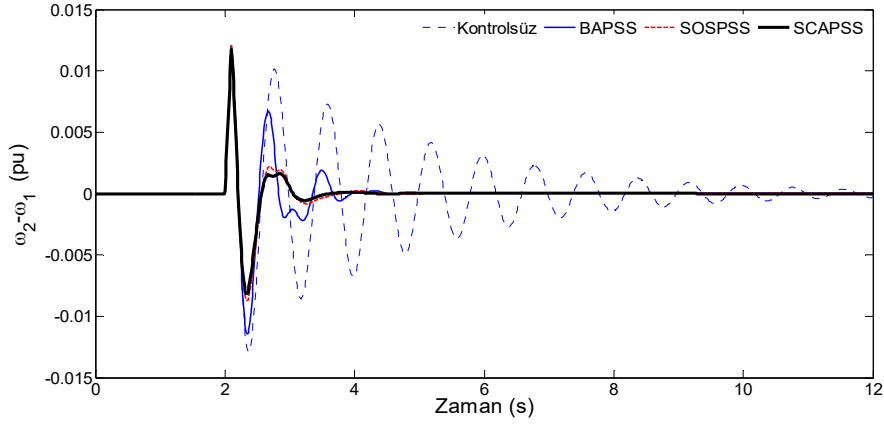
Bu senaryoda arıza temizleme süresi 10 saykıl (166,66 ms) çıkarıldı. Sistem davranışı 12 s boyunca hesaplandı. Şekil 25-28 bu ciddi arıza ihtimali altındaki çok makinalı güç sisteminin bağıl rotor açısı ve bağıl hız sapması cevaplarını göstermektedir. Şekillerden anlaşılacağı üzere sistemin PSS ilavesiz (kontrolsüz) çalışması durumunda sistem hızlıca kararsızlığa sürüklenmektedir. Bu kararsızlığa arıza temizleme süresinin artırılması neden olmuştur. BAPSS ya da SOSPSS kullanılarak kararsız olan kontrolsüz sistem kararlı hale gelmiştir. Bununla birlikte SCAPSS'nin geçici



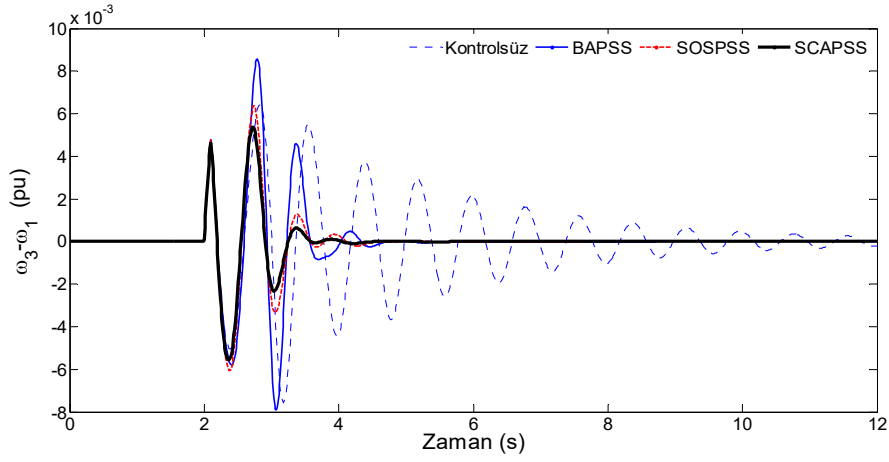
Şekil 21. Senaryo 1 altında $\delta_2-\delta_1$ 'in cevabı (Response of $\delta_2-\delta_1$ under scenario 1)



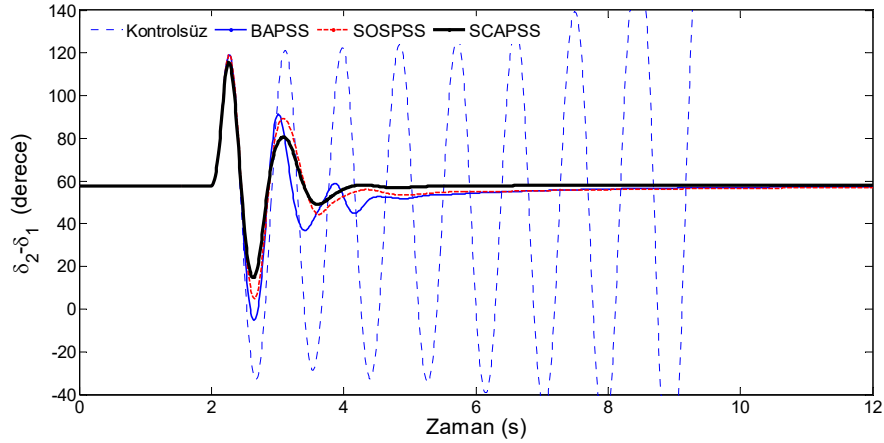
Şekil 22. Senaryo 1 altında $\delta_3-\delta_1$ 'in cevabı (Response of $\delta_3-\delta_1$ under scenario 1)



Şekil 23. Senaryo 1 altında $\omega_2-\omega_1$ 'in cevabı (Response of $\omega_2-\omega_1$ under scenario 1)



Şekil 24. Senaryo 1 altında $\omega_3-\omega_1$ 'in cevabı (Response of $\omega_3-\omega_1$ under scenario 1)



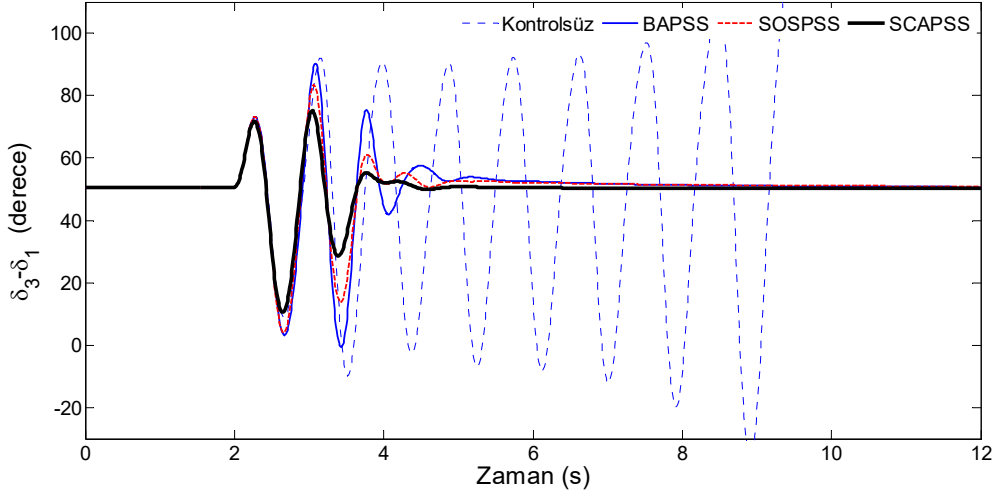
Şekil 25. Senaryo 2 altında $\delta_2-\delta_1$ 'in cevabı (Response of $\delta_2-\delta_1$ under scenario 2)

hal kararlılık performansı BAPSS ile SOSPSS'ye nazaran daha iyidir ve tüm generatörlerdeki düşük frekanslı salınımları daha hızlı söndürmektedir.

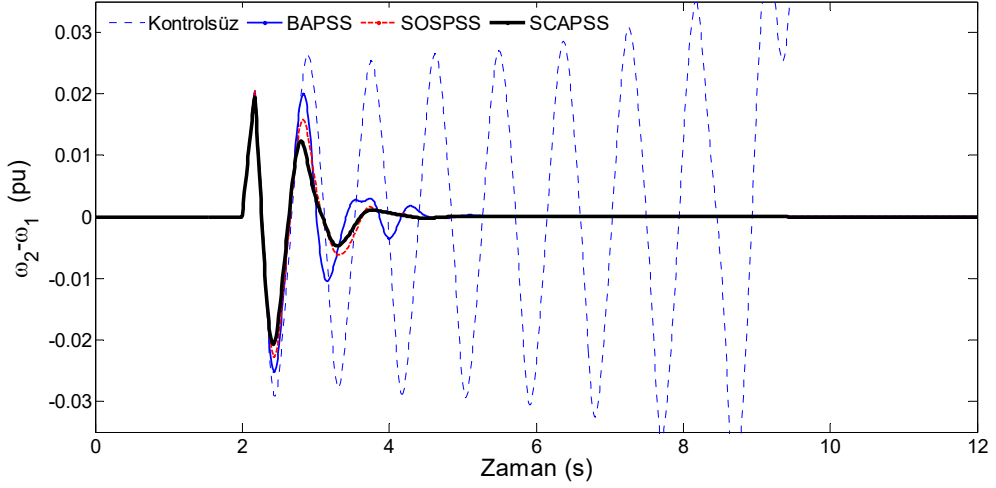
5.2.3. Dayanıklılık araştırması (Robustness investigation)

Önerilen kontrolörün çok makinalı güç sisteminde iki farklı arıza senaryosunda dayanıklılığının kanıtlanması

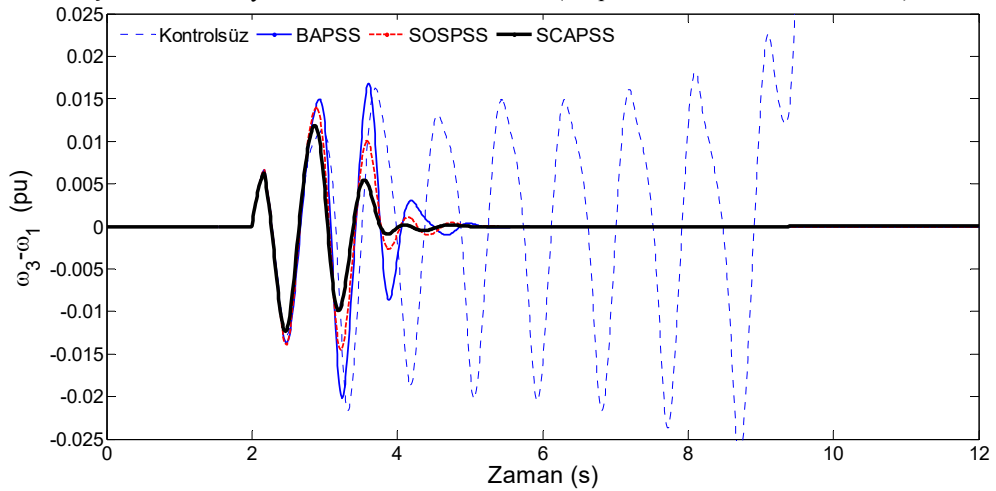
bakımından lineer olmayan zaman tanım bölgesi simülasyon sonuçlarından $\delta_2-\delta_1$ ve $\delta_3-\delta_1$ rotor açılarının sistem cevapları incelenmiştir. Tablo 10 rotor açılarının %5 ve %2'lik yerleşme zamanı bandına girmesi için gereken süreleri göstermektedir. Sistemin PSS ilavesiz çalışması göz önüne alındığında Senaryo 1 için kontrolsüz sistem kararludur ancak yerleşme zamanı süreleri oldukça uzundur ve Senaryo 2 için de sistem kararsızlığa sürüklenmektedir.



Şekil 26. Senaryo 2 altında $\delta_3-\delta_1$ 'in cevabı (Response of $\delta_3-\delta_1$ under scenario 2)



Şekil 27. Senaryo 2 altında $\omega_2-\omega_1$ 'in cevabı (Response of $\omega_2-\omega_1$ under scenario 2)



Şekil 28. Senaryo 2 altında $\omega_3-\omega_1$ 'in cevabı (Response of $\omega_3-\omega_1$ under scenario 2)

Kontrolör parametreleri üç algoritma ile optimize edilen sistemlerin (BAPSS, SOSPSS ve önerilen SCAPSS) yerleşme zamanları az oldukları için rotor açılarının

salınımları erken sönmektedir. Tüm senaryolardaki %5'lik ve %2'lik (daha hassas bant) toleranslar için rotor açılarının yerleşme zamanı değerlerine bakıldığında ise, SCA tabanlı

Tablo 10. $\delta_2-\delta_1$ ve $\delta_3-\delta_1$ 'in iki farklı arıza senaryosu için yerleşme zamanları
(Settling times of $\delta_2-\delta_1$ and $\delta_3-\delta_1$ for two different fault scenarios)

Senaryo türü	Senaryo 1				Senaryo 2			
	%5		%2		%5		%2	
Yerleşme zamanı kriteri	$\delta_2-\delta_1$	$\delta_3-\delta_1$	$\delta_2-\delta_1$	$\delta_3-\delta_1$	$\delta_2-\delta_1$	$\delta_3-\delta_1$	$\delta_2-\delta_1$	$\delta_3-\delta_1$
Kontrolsüz	6,62	6,21	9,02	8,60	Kararsız	Kararsız	Kararsız	Kararsız
Yerleşme zamanı (s)	BAPSS 2,27	1,81	4,04	3,26	4,20	3,46	6,28	5,37
	SOSPSS 1,88	1,36	3,50	2,35	3,46	2,42	7,27	5,43
	SCAPSS 1,27	1,33	1,94	1,79	2,08	2,27	3,54	3,12

kontrolörün yerleşme zamanı değerleri BA ve SOS tabanlı kontrolörlere göre daha düşüktür. Böylece çok makinalı güç sistemlerinde de önerilen SCAPSS kullanılarak sistem daha hızlı sürekli hal durumuna oturur ve düşük frekanslı salınımlara karşı daha iyi bir sönüm karakteristiği gösterir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makale PSS kontrolörünün optimal ayarlanması yoluyla güç sistemi kararlılığının artırılması için sinüs kosinüs trigonometrik fonksiyonlardan esinlenen, dengeli keşfetme ve sömürme yetisine sahip olan SCA tekniği tabanlı yeni bir optimizasyon yaklaşımını sunmuştur. PSS parametrelerinin tasarım probleminde, güç sisteminin küçük işaret kararlılık ve geçici hal kararlılık performanslarının iyileştirilmesi için özdeğer tabanlı *CDI* ve zaman tanım bölgesi tabanlı *ITAE* fonksiyonlarından oluşan yeni bir çoklu amaç fonksiyonu kullanıldı. Daha sonra, SCA tekniği kararlı kılıcının en uygun parametrelerinin bulunması için başarıyla uygulandı. Önerilen kararlı kılıcının performansı basit tek makinalı sonsuz baralı ve 3-makinalı 9-baralı güç sistemlerinde BA ve SOS metotlarıyla karşılaştırmalar yapılarak test edildi. Özdeğer analizi ve lineer olmayan simülasyon sonuçları önerilen SCA tabanlı kararlı kılıcının sağlamlığını ve üstünlüğünü δ güç açısı ve $\Delta\omega$ rotor hızındaki sistem salınımlarına hızlı, etkili ve iyi sönümleme karakteristiği sağlayarak doğrulamıştır. Bununla birlikte, yakınsama hızı, hesaplama süresi, dinamik kararlılık, aşım ve yerleşme zamanı bakımından tasarlanan kontrolörün sistem performans karakteristiği BAPSS ve SOSPSS'den daha iyidir. Önerilen algoritmanın ve en yeni optimizasyon algoritmalarının daha büyük ölçekli güç sistemlerine uygulanması, gelecekte yapılması düşünülen diğer çalışmalar kapsamındadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kasilingam G., Pasupuleti J., BBO algorithm-based tuning of PID controller for speed control of synchronous machine, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 24 (4), 3274-3285, 2016.
2. Ali E.S., Optimization of power system stabilizers using BAT search algorithm. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 61, 683-690, 2014.
3. 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, 2017.

4. Shayeghi H., Shayanfar H.A., Safari A., Aghmasheh, R., A robust PSSs design using PSO in a multi-machine environment, Energy Conversion and Management, 51 (4), 696-702, 2010.
5. Larsen E.V., Swann D.A., Applying Power System Stabilizers Part I: General Concepts," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 100 (6), 3017-3024, 1981.
6. Phiri A., Folly K.A., Application of Breeder GA to power system controller design. 2008 IEEE Swarm Intelligence Symposium, St. Louis, MO, 1-5, 21-23 Eylül, 2008.
7. Linda M.M., Nair N. K., A new-fangled adaptive mutation breeder genetic optimization of global multi-machine power system stabilizer, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 44 (1), 249-258, 2013.
8. Abdel-Magid Y.L., Abido M.A., Optimal multiobjective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms, IEEE Transactions on Power Systems, 18 (3), 1125-1132, 2003.
9. 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.
10. Ghadimi N., A new hybrid algorithm based on optimal fuzzy controller in multimachine power system. Complexity, 21(1), 78-93, 2015.
11. Abido M.A., Robust design of multimachine power system stabilizers using simulated annealing, IEEE transactions on Energy conversion, 15 (3), 297-304, 2000.
12. 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.
13. Shayeghi H., Shayanfar H.A., Jalilzadeh S., Safari A., Multi-machine power system stabilizers design using chaotic optimization algorithm, Energy Conversion and Management, 51 (7), 1572-1580, 2010.
14. Abido M.A., Optimal design of power-system stabilizers using particle swarm optimization. IEEE Transactions on Energy conversion, 17(3), 406-413, 2002.

15. Ekinci S., Demiroren A., PSO based PSS design for transient stability enhancement, *IU-Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 15 (1), 1855-1862, 2015.
16. 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.
17. Peres W., Júnior I.C.S., Passos Filho J.A., Gradient based hybrid metaheuristics for robust tuning of power system stabilizers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 95, 47-72, 2018.
18. Yılmaz S., Kütüksille E.U., A new modification approach on bat algorithm for solving optimization problems, *Applied Soft Computing*, 28, 259-275, 2015.
19. Pravesjit S., A hybrid bat algorithm with natural-inspired algorithms for continuous optimization problem. *Artificial Life and Robotics*, 21 (1), 112-119, 2016.
20. Eke İ., Taplamacıoğlu 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.
21. Linda M.M., Nair N.K., Optimal tuning of multi-machine power system stabilizers by the Queen-Bee Evolution technique, *Simulation*, 89 (3), 407-418, 2013.
22. Linda M.M., Nair N.K., Optimal design of multi-machine power system stabilizer using robust ant colony optimization technique, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 34 (7), 829-840, 2012.
23. Abd-Elazim S., Ali E., Power System Stability Enhancement via Bacteria Foraging Optimization Algorithm, *Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media BV)*, 38, 599-611, 2013.
24. 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.
25. Safari A., Ameli A., Shayanfar H.A., Nonlinear time response optimization using imperialist competitive algorithm for tuning robust power system stabilizers, *IETE Journal of Research*, 59 (5), 631-639, 2013.
26. Hameed K.A., Palani S., Robust design of power system stabilizer using harmony search algorithm, *Automatika*, 55 (2), 162-169, 2014.
27. Sun Z., Wang N., Srinivasan D., Bi Y., Optimal tuning of type-2 fuzzy logic power system stabilizer based on differential evolution algorithm, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 62, 19-28, 2014.
28. Ebrahimian H., Gollou A.R., Bayramzadeh F., Rahimi A., Multimachine power system stabilizer based on optimal multistage fuzzy PID attendant honey bee mating optimization. *Complexity*, 21 (6), 234-245, 2016.
29. Elazim S.A., Ali E.S., Optimal power system stabilizers design via cuckoo search algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 75, 99-107, 2016.
30. Farah A., Guesmi T., Abdallah H.H., Ouali A., A novel chaotic teaching-learning-based optimization algorithm for multi-machine power system stabilizers design problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 77, 197-209, 2016.
31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. Ekinci S., Hekimoğlu B., Uysal E., PID Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı Parametrelerinin Belirlenmesi için Böbrek-ilhamlı Algoritma, *Politeknik Dergisi*, 2018, DOI: 10.2339/politeknik.417765.
35. Ekinci S., Hekimoğlu B., Parameter Optimization of Power System Stabilizer via Salp Swarm Algorithm, 2018 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), Istanbul, 143-147, 2018.
36. Mirjalili S., SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-Based Systems*, 96, 120-133, 2016.
37. Chen K., Zhou F., Yin L., Wang S., Wang Y., Wan, F., A hybrid particle swarm optimizer with sine cosine acceleration coefficients, *Information Sciences*, 422, 218-241, 2018.
38. Nenavath H., Jatoth R.K., Hybridizing sine cosine algorithm with differential evolution for global optimization and object tracking, *Applied Soft Computing*, 62, 1019-1043, 2018.
39. Sindhu R., Ngadiran R., Yacob Y.M., Zahri N.A.H., Hariharan M., Sine-cosine algorithm for feature selection with elitism strategy and new updating mechanism. *Neural Computing and Applications*, 28, 2947-2958, 2017.
40. Elaziz M.A., Oliva D., Xiong S., An improved Opposition-Based Sine Cosine Algorithm for global optimization. *Expert Systems with Applications*, 90, 484-500, 2017.
41. Bureerat S., Pholdee N., Adaptive Sine Cosine Algorithm Integrated with Differential Evolution for Structural Damage Detection. *International Conference on Computational Science and Its Applications*, 71-86, Springer, Cham, July 2017.
42. Reddy K.S., Panwar L.K., Panigrahi B.K., Kumar R., A New Binary Variant of Sine-Cosine Algorithm: Development and Application to Solve Profit-Based Unit Commitment Problem. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-16, 2017.
43. Tawhid M.A., Savsani V., Multi-objective sine-cosine algorithm (MO-SCA) for multi-objective engineering

- design problems, *Neural Computing and Applications*, 1-15.
44. Sahlol, A. T., Ewees, A. A., Hemdan, A. M., & Hassanien, A. E. (2016, December). Training feedforward neural networks using Sine-Cosine algorithm to improve the prediction of liver enzymes on fish farmed on nano-selenite. In *Computer Engineering Conference (ICENCO)*, 12th International IEEE, 35-40, 2016.
 45. Banerjee, A., & Nabi, M. (2017, June). Re-entry trajectory optimization for space shuttle using Sine-Cosine Algorithm. In *Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, 8th International Conference on IEEE, 73-77, 2017.
 46. Kumar N., Hussain I., Singh B., Panigrahi B.K., Peak power detection of PS solar PV panel by using WPSCO. *IET Renewable Power Generation*, 11 (4), 480-489, 2017.
 47. Li S., Fang H., Liu X., Parameter optimization of support vector regression based on sine cosine algorithm. *Expert Systems with Applications*, 91, 63-77, 2018.
 48. Mahdad B., Srairi K., A new interactive sine cosine algorithm for loading margin stability improvement under contingency, *Electrical Engineering*, 1-21, 2017.
 49. Das S., Bhattacharya A., Chakraborty A.K., Solution of short-term hydrothermal scheduling using sine cosine algorithm. *Soft Computing*, 1-19, 2017.
 50. Hafez A.I., Zawbaa H.M., Emary E., Hassanien, A.E., (2016, August). Sine cosine optimization algorithm for feature selection. In *INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA)*, International Symposium on IEEE, 1-5, 2016.
 51. Mondal D., Chakrabarti A., Sengupta A., *Power System Small Signal Stability Analysis and Control*, London, Academic Press, 2014.
 52. Pai M.A., Gupta D.S., Padiyar K.R., *Small signal analysis of power systems*, Alpha Science Int'l Ltd., 2004.
 53. 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*, 1-13, 2017.
 54. 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.
 55. Ekinci S., Application and comparative performance analysis of PSO and ABC algorithms for optimal design of multi-machine power system stabilizers, *Gazi University Journal of Science*, 29 (2), 323-334, 2016.
 56. El-Zonkoly A.M., Optimal tuning of power systems stabilizers and AVR gains using particle swarm optimization, *Expert Systems with Applications*, 31 (3), 551-557, 2006.
 57. Alomoush M., Concurrent optimal design of TCSC and PSS using symbiotic organisms search algorithm, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25 (5), 3904-3919, 2017.
 58. Yang X.S., Hossein Gandomi A., Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization. *Engineering Computations*, 29 (5), 464-483, 2012.
 59. Cheng M.Y., Prayogo D., Symbiotic organisms search: a new metaheuristic optimization algorithm, *Computers & Structures*, 139, 98-112, 2014.
 60. Anderson P.M., Fouad A.A., *Power System Control and Stability*, Ames, IA: Iowa State Univ. Press, 1977.
 61. Ekinci S., Çok makinalı güç sisteminde açısız kararlılık analizi ve kontrolör parametre Optimizasyonu, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015.