ACTA INFOLOGICA 2022;6(1):53-64
dergipark.org.tr/acin

DOI: 10.26650/acin.1026494

RESEARCH ARTICLE

Otomatik Gerilim Regülatör Sistemi için Deniz Yırtıcıları Algoritmasının Performans Analizi

Performance Analysis of Marine Predators Algorithm for Automatic Voltage Regulator System

Zeynep Garip[1], Murat Erhan Çimen[2], Ali Fuat Boz[3]

[1] (Dr. Öğr. Üyesi), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Sakarya-Türkiye
[2] (Arş. Gör.), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Sakarya-Türkiye
[3] (Prof. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Sakarya-Türkiye

ORCID: Z.G. 0000-0002-0420-8541;
M.E.Ç. 0000-0002-1793-485X;
A.F.B. 0000-0001-6575-7678

Corresponding author:
Zeynep GARİP
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Sakarya-Türkiye
E-mail address: zbatik@subu.edu.tr

Submitted: 20.11.2021
Revision Requested: 09.03.2022
Last Revision Received: 16.03.2022
Accepted: 28.03.2022
Published Online: 16.05.2022

Citation: Z., Cimen, M. E., & Boz, A. F. (2022). Performance analysis of marine predators algorithm for automatic voltage regulator system. *Acta Infologica, 6*(1), 53-64. https://doi.org/10.26650/acin.1026494

ÖZ

Bu makalede otomatik gerilim regülatör sistemin oransal integral türev denetleyici optimal parametre değerlerini ayarlamak amacıyla yeni bir algoritma olan deniz yırtıcıları algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma ile terminal geriliminin maksimum yüzde aşımı, yerleşme süresi, yükselme süresi ve kararlı durum hatasını en aza indirmek ve optimal oransal integral türev denetleyicisi ile otomatik gerilim regülatör sisteminin geçici durum yanıtının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Denetleyici parametrelerini ayarlamak için karesel hatanın integrali, ağırlıklı karesel hatanın integrali, zaman'ın karesel integrali ve Zwe-Lee Gaing amaç fonksiyonları kullanılmıştır. Deniz yırtıcıları algoritma tabanlı oransal-integral-türev denetleyicinin performansı, literatürde önerilen çeşitli amaç fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilen farklı meta-sezgisel algoritmalar tarafından uyarlanmış oransal integral türev denetleyicileri ile karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Bu analizler geçici tepki analizi, kök konum analizi ve sağlamlık gibi analiz yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, deniz yırtıcıları algoritmasıyla ayarlanan oransal integral türev kontrollü otomatik gerilim regülatör sisteminin yerleşme süresi, tepe aşımı ve kararlılık açısından daha iyi performans gösterdiğini kanıtlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Otomatik Gerilim Regülatörü, Oransal-Integral-Türev, Deniz Yırtıcıları Algoritması, Optimizasyon

ABSTRACT

In this study, the emerging, novel marine predators algorithm is proposed to adjust the proportional–integral–derivative controller of the automatic voltage regulator system. With the proposed algorithm, this study aimed to minimize the maximum percent excess of the terminal voltage, settling time, rise time, and steady-state error and improve the transient response of the automatic voltage regulator system with an optimal proportional–integral–derivative controller. The integral of squared error, integral of weighted squared error, squared integral of time, and Zwe-Lee Gaing objective functions were used to set the controller parameters. The performance of the proportional–integral–derivative controller based on the marine predators algorithm was compared with those of the proportional–integral–derivative controllers adapted by different metaheuristic algorithms using various objective functions suggested in the literature. These analyses were conducted using analysis methods such as transient response, root locus, and robustness. The simulation results show better performance in terms of the settling time, over-peak, and stability of the proportional–integral–derivative-controlled automatic voltage regulator system tuned with the marine predators algorithm.

Keywords: Automatic Voltage Regulator, Proportional-Integral-Derivative, Marine Predators Algorithm

This work is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

1. GİRİŞ

Son yıllarda, geleneksel yaklaşımlarla çözüm üretilmeye çalışılan zor ve karmaşık mühendislik problemlerinde doğadan ilham alınarak geliştirilen hesaplamaya dayalı sezgisel yaklaşımlar sıklıkla kullanılmaktadır. Mühendislikte karşılaşılan problemlerden biri, bir sistemin kontrolünde kullanılan PID denetleyici kazançlarının istenen performansı karşılayacak şekilde ayarlanmasıdır. Sistemden istenen optimum cevabın elde edilebilmesi en uygun PID parametreleri ile mümkündür. PID kontrol tekniği süreç kontrolü, motor sürücüleri, uçuş kontrolleri gibi birçok endüstri uygulamasında sıklıkla kullanılmaktadır.

AVR sisteminin davranışını, hızını ve kararlılığını iyileştirmek amacıyla terminal gerilimindeki değişimlere verimli bir şekilde dönüş sağlanabilmesi için denetleyici seçimine dikkat edilmesi gerekmektedir. PID kontrol, tüm sistemlere uyum sağlaması, kolay anlaşılabilir ve gerçekleştirilebilir basit bir yapısından kaynaklanmaktadır. PID kontrolünün özelliklerine ek olarak kararlılık, tasarım ve performans da eklenmiştir (Bingul ve Karahan, 2018). Bundan dolayı AVR sistemler için PID kontroller uygulanmasına karar verilmiştir.

AVR sisteminde PID denetleyici uygulamasının yeterliliği literatürde birçok çalışma ile kanıtlanmıştır. PID denetleyicisinin parametrelerinin ayarlamasında geleneksel ve sezgisel hesaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Ziegler-Nichols (ZN), Cohen-Coon (CC) yöntemleri gibi geleneksel yöntemler büyük salınım ve aşım ile optimum PID denetleyici parametrelerini sağlarlar (Bingul ve Karahan, 2018). Son zamanlarda, birçok araştırmacı tarafından AVR sistemler için PID ayarlamasına uygun çözüm bulmak amacıyla sezgisel algoritmalar kullanmaktadır. Denetleyicinin performansını artırmak için uygulanan sezgisel optimizasyon tabanlı ayarlama yöntemleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Tablo 1'de algoritmaların uyguladığı AVR sistemlerinin performanslarını belirlemedeki kriterler verilmiştir. Gözde ve ark. AVR sistemde PID kontrolüyle optimal kontrol sağlamak amacıyla yapay arı koloni (ABC) algoritmasını önermişlerdir. Algoritmanın performansını analizinde diferansiyel evrim (DE) ve parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritmasıyla karşılaştırmıştır (Gozden ve Taplamacioglu, 2011). Panda ve ark. (2012) PSO algoritmasının en iyi bilinen parçacığın konumunu ortadan kaldırarak Optimizasyon bağlantıları (MOL) algoritmasını önermişlerdir. Önerilen MOL algoritması ile MOL-PID kontrolü ile AVR sistemini tasarlamış ve gerçekleştirmişlerdir. Önerilen algoritmanın performansını test etmek amacıyla ABC, PSO ve DE algoritmaları kullanmışlardır. Mohanty ve ark. (2014) pattern arama algoritmasının bir uzantısı olan yerel tek modlu örnekleme optimizasyon (LUS) algoritmasına dayalı AVR sistem için PID parametrelerini elde edilmesine uyarlanmıştır ve ABC, PSO ve DE algoritmalarına göre daha kararlı ve daha iyi bir cevap vermiştir. Güvenç ve ark. (2016) AVR sistemde PID kontrolünün kontrol parametrelerini optimize etmek amacıyla biyocoğrafya tabanlı optimizasyon (BBO) algoritması önermişlerdir ve ABC, PSO ve DE algoritmalarına göre daha iyi ayarlama yeteneğine sahip olduğu belirlenmiştir. Hekimoğlu ve ark. (2018) AVR sisteme uygulanan optimal PID kontroller parametrelerinin ayarlanması amacıyla çekirge optimizasyon algoritması (GOA) kullanılmıştır. Algoritmanın etkinliğini ve sağlamlığını göstermek amacıyla ZN, DE ve ABC algoritmalarıyla karşılaştırmıştır. Hekimoğlu (2019), AVR sisteminin PID denetleyicisinin optimal parametrelerini ayarlamak amacıyla Sinüs-Cosinüs (SCA) seçmişlerdir ve algoritmayı test etmek amacıyla DE, ABC, BBO ve ZN kullanmışlardır. Diğer bir çalışmalarında ise böbrek ilhamlı algoritmayı(IKA) yine aynı sisteme uygulamışlardır (Ekinci ve Hekimoğlu, 2019). Micev ve ark. (2021) geliştirdikleri AVR sistemi için optimal PID parametrelerini belirlemek amacıyla yeni bir amaç fonksiyonu geliştirmiştir. Denge optimizasyon algoritması ile amaç fonksiyonunu kullanarak sistemin optimizasyonu sağlamışlarıdır. DO algoritmasının performansını test etmek amacıyla sağlamlık analizi yapmışlardır. Sonuç olarak geliştirilen algoritma literatürdeki algoritmalara göre daha iyi sonuç vermiştir. Bu sonuçlara karşın AVR sistemine uygun çözümü bulmada kesin bir algoritma yoktur.

Tablo 1.

AVR-PID sistemi için literatürde kullanılan algoritmalar

Algoritma	Yılı	Performans Kriteri
ABC (Gozden ve Taplamacioglu, 2011)	2011	ITSE
PSO (Gozden ve Taplamacioglu, 2011)	2011	ITSE
DE (Gozden ve Taplamacioglu, 2011)	2011	ITSE
MOL(Panda vd., 2012)	2012	ITAE, IAE, ITSE, ISE
LUS (Mohanty vd., 2014)	2014	ITAE, IAE, ITSE, ISE, OF
BBO (Guvenc vd., 2016)	2016	ITSE
GOA (Ekinci ve Hekimoğlu, 2019)	2018	ITSE
SCA (Hekimoğlu, 2019)	2019	ITSE, ZLG
IKA (Ekinci ve Hekimoğlu, 2019)	2019	ITSE, ZLG

Bu çalışmada, AVR sistemin terminal geriliminin maksimum yüzde aşımı, yerleşme süresi, yükselme süresi ve kararlı durum hatasını en aza indirmek amacıyla yüksek dereceli bir AVR sistemi için DAA tabanlı bir PID denetleyicisi önerilmiştir. DAA kullanarak AVR sistemine uyarlanan PID denetleyicisinin Kp, Ki ve Kd parametrelerinin nasıl verimli bir şekilde elde edileceğine odaklanılmıştır. DAA basit olması, kolay ayarlanabilen parametreler ve esnek olması sebebiyle tercih edilmiştir. Burada algoritmanın basit olması, optimum denetleyici parametrelerinin belirlenerek istenen çıkışın yüksek kalitede elde edilmesini sağlamaktadır. Bunlara ek olarak algoritma optimal çözüm noktasına kararlı bir şekilde yakınsama gerçekleştirmektedir (Afshin vd., 2020). Sistemin dinamik yanıtı kullanılarak önerilen yaklaşımın performans üstünlüğü doğrulanmak için önerilen yaklaşımla literatürde bulunan sezgisel tabanlı yaklaşımlar karşılaştırılmıştır.

2. DENİZ YIRTICILARI ALGORİTMASI

Deniz yırtıcıları algoritması (DAA), deniz yırtıcıları ve avları arasındaki av-avcı sosyal ilişkisinden ilham alınarak Faramarzi ve ark. tarafından geliştirilmiştir (Faramarzi vd., 2020). DAA, deniz avcılarının ve avlarının karşılaşma oranına bağlı olarak geliştirilen sezgisel optimizasyon algoritmadır (Chen vd., 2021). DAA başlangıç çözümü arama uzayında rasgele dağılımla başlar. DAA temelinde av ve avcı arasındaki hız oranına göre algoritmanın yapısındaki fazlar arasındaki geçiş sağlanmaktadır (Yousri vd., 2021). Deniz avcıları avlarını yakalarken adım boyutunu üç fazda tamamlamaktadır (Abdel-Basset vd., 2021). Algoritmanın birinci fazındaki en belirgin özellik büyük hıza sahip olmasıdır. Diğer fazlarda ise birlik ve zayıf oran ön plana çıkmaktadır.

DAA rasgele ve üniform dağılımlı olarak arama uzayı kullanılarak başlangıç çözümü belirlenir. Avcı sayısı n, yineleme sayısı m, optimizasyon parametresi boyutu d, Av avın ilk konumunu göstermektedir. Denklem 1'deki $Xmax$ ve $Xmin$ maksimum ve minimum değerleri, rand ise [0,1] aralığında rasgele vektördür.

$$X_0 = X_{min} + rand(X_{max} - X_{min}) \tag{1}$$

Bu kısımda başlangıç popülasyonunun konumlarını tutan Av matrisi, en iyi uygunluk fonksiyonuna sahip $Elit$ matrisini oluşturmaktadır. Her bir aşama aşağıdaki gibi özetlenmektedir.

Algoritmanın Faz 1 aşamasında av yüksek hıza sahip olduğu için $avcının$ hareketini durdurulmalıdır. Bu süreç tüm iterasyonun yalnızca üçte biri için gerçekleştirilmektedir. Av Brownian hareketine göre davranışını belirlenir. Denklem 3 ile $Av'ın$ kullandığı matrisler güncellenmektedir. Denklem 2 ve 3'deki P=0.5, R [0,1] arasındaki uniform dağılımlı rasgele sayılar ve R_B, Brownian hareketinin normal dağılımına dayalı rasgele sayılar içeren bir vektör olarak tanımlanmıştır.

$$\overrightarrow{adım_\iota} = \overrightarrow{R_B} \otimes (\overrightarrow{Elıt_\iota} - (\overrightarrow{R_B} \otimes \overrightarrow{Av_\iota})) \tag{2}$$

$$\overrightarrow{Av_\iota} = \overrightarrow{Av_\iota} + (P.\vec{R} \otimes \overrightarrow{adım_\iota}) \tag{3}$$

Faz 2 aşamasında av ve $avcı$ aynı hızla hareket etmektedir ve algoritmanın ikinci üçte ikisine sahiptir. Burada Av ve $avcı$ farklı hareket metotları kullanmaktadır. Bu fazda, $Avcı$ Brownian hareketini, Av ise Levy hareketini kullanmaktadır. R_L Levy'nin hareket normal dağılımına dayalı rasgele sayılar içeren bir vektör ile Av bu adımda çarpılmaktadır. Bu adımda popülasyonun ilk yarısının hareketleri Denklem 4 ve 5'e göre güncellenmektedir.

$$\overrightarrow{adım_\iota} = \overrightarrow{R_L} \otimes (\overrightarrow{Elıt_\iota} - (\overrightarrow{R_L} \otimes \overrightarrow{Av_\iota})) \tag{4}$$

$$\overrightarrow{Av_\iota} = \overrightarrow{Av_\iota} + (P.\vec{R} \otimes \overrightarrow{adım_\iota}) \tag{5}$$

Popülasyonun diğer yarısı Denklem 6 ve 7'e göre güncellenmektedir. Elit matris R_B ile çarpılmaktadır. Burada CF, $Avcı$ hareketi için adım boyutunu kontrol etmek için uyarlanabilir bir parametredir.

$$\overrightarrow{adım_\iota} = \overrightarrow{R_B} \otimes ((\overrightarrow{R_B} \otimes \overrightarrow{Elıt_\iota}) - \overrightarrow{Av_\iota}) \tag{6}$$

$$\overrightarrow{Av_\iota} = \overrightarrow{Elıt_\iota} + (P.CF \otimes \overrightarrow{adım_\iota}) \tag{7}$$

$$CF = [1 - (Iter./Max.Iter.)]^{(2.Iter./Max.Iter.)} \tag{8}$$

Faz 3 aşamasında ise avın avcıdan daha yavaş hareket ettiği varsayılmakta ve algoritma iterasyonun kalan kısmında $Avcı$ tarafından Levy hareketini kullanmaktadır. Bu noktada $Elit$ matrisi R_L ile çarpılır. Av matrisi Denklem 10 kullanılarak güncellenmektedir.

$$\overrightarrow{adım_\iota} = \overrightarrow{R_L} \otimes ((\overrightarrow{R_L} \otimes \overrightarrow{Elit_\iota}) - \overrightarrow{Av_\iota})) \tag{9}$$

$$\overrightarrow{Av_\iota} = \overrightarrow{Av_\iota} + (P.CF \otimes \overrightarrow{Av_\iota}) \tag{10}$$

DAA'da her yinelemeden sonra $Elit$ matrisi en iyi çözümlerle yer değiştirir. Ayrıca maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında veya algoritmanın durdurma kriteri sağlandığında elde eden çözüm son çözümdür.

3. AVR SISTEMİNİN MODELLENMESİ

3.1. AVR Sisteminin Matematiksel Modeli

AVR sisteminin kullanım amacı güç sisteminin kararlılığını ve kalitesini artırmada senkron jeneratörün terminal voltaj büyüklüğünü önceden belirlenmiş bir seviyede tutmadır. AVR sisteminin matematiksel modellenmesinde yükselteç, uyarıcı, jeneratör ve sensör gibi temel bileşenler kullanılmaktadır. Bu bileşenler zaman sabiti ve kazançlarından oluşan basitleştirilmiş birinci dereceden transfer fonksiyonu ile temsil edilir. K_A, K_E, K_G ve K_S sırasıyla yükseltici, uyarıcı, jeneratör ve sensör bileşenlerinin kazançları temsil ederken, T_A, T_E, T_G ve T_S aynı bileşenler için ilgili zaman sabitlerini temsil etmektedir. Bu bileşenlerin kazanç ve zaman sabitinden oluşan transfer fonksiyon modelleri Denklem 11-14 ile temsil edilmektedir. Bu bileşenlerin alabileceği parametre aralıkları ve bu çalışmada kullanılan parametre değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Yükselticinin transfer fonksiyonu:

$$G_A(s) = \frac{K_A}{1+sT_A} \tag{11}$$

Uyarıcının transfer fonksiyonu:

$$G_E(s) = \frac{K_E}{1+sT_E} \tag{12}$$

Sistemin en önemli parçası olan jeneratör transfer fonksiyonu:

$$G_G(s) = \frac{K_G}{1+sT_G} \tag{13}$$

Sensör bileşenin transfer fonksiyonu:

$$G_S(s) = \frac{K_S}{1+sT_S} \tag{14}$$

Tablo 2

AVR bileşenlerinin parametreleri (Gaing 2004).

Bileşenler	**Parametre**	
	Alt ve Üst Sınırları	**Değeri**
Yükseltici	$10 \le K_A \le 40,$ $0.02 \le T_A \le 0.1$	$K_A = 10, T_A = 0.1$
Uyarıcı	$1 \le K_E \le 10,$ $0.4 \le T_E \le 1$	$K_E = 1, T_E = 0.4$
Jeneratör	$0.7 \le K_G \le 1,$ $1 \le T_G \le 2$	$K_G = 1, T_G = 1$
Sensör	$0.9 \le K_G \le 1.1,$ $0.001 \le T_G \le 0.06$	$K_S = 1, T_S = 0.01$

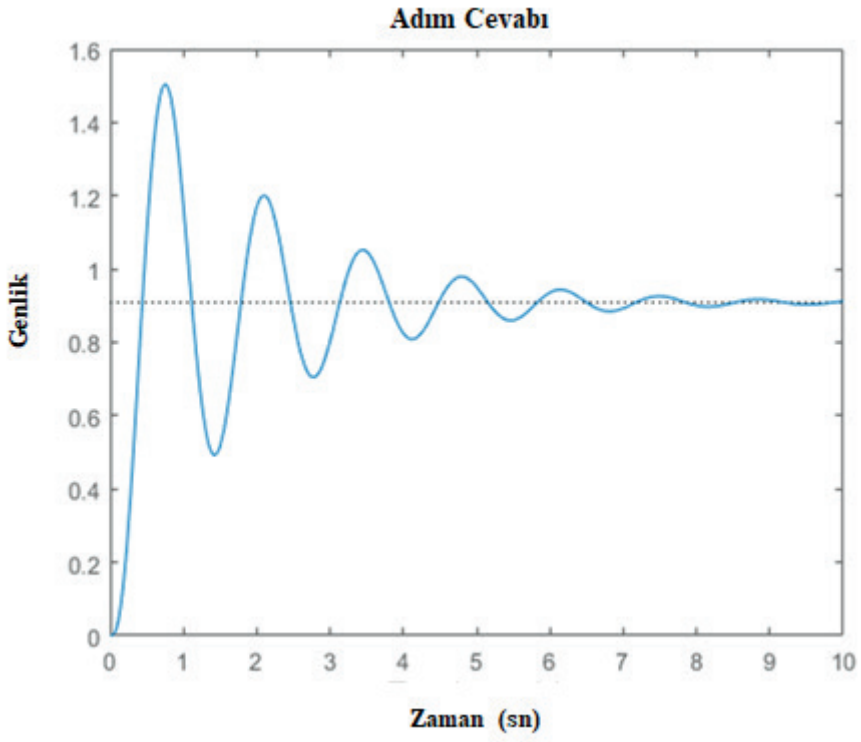
Denetleyici olmaksızın AVR sisteminin transfer fonksiyonu Denklem 15'te verilmiştir. Burada $V_t(s)$ jeneratör terminal gerilimi, $V_{ref}(s)$ referans giriş gerilimini temsil etmektedir.

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_a K_e K_g (1+sT_S)}{(1+sT_a)(1+sT_e)(1+sT_g)(1+sT_S) + K_a K_e K_g K_S} \tag{15}$$

Tablo 2'deki verilen bileşen parametreleri AVR sisteme uygulandıktan sonra elde edilen transfer fonksiyonu Denklem 16'da verilmiştir.

$$G(s) = \frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{0.1s+10}{0.004s^4+0.0454s^3+0.555s^2+1.51s+11} \quad (16)$$

PID kontrolsüz AVR sistemin terminal gerilimindeki artımlı değişimin adım cevabı Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu koşullardaki sistemin sıfır noktası $z = -100$, $s1 = -98.8170$ ve $s2 - 12.6261$ gerçek kutba ve $s3 = -0.5285 + 4.6649i$ ve $s4 = -0.5285 - 4.6649i$ karmaşık kutba sahip olduğundan dolayı sistem kararlıdır. AVR sisteminin yükselme zamanı (tr) 0.2626 sn, tepe zamanı (tp) 0.7513 sn, yerleşme zamanı (ts) 6.9662, yüzdelik aşım (Mp) %65.43 ve kalıcı durum hatası (Ess) 0.0909'dur.



Şekil 1. PID kontrolsüz AVR sistemin terminal gerilimindeki artımlı değişimi

3.2. PID Denetleyicisinin Matematiksel Modeli

PID denetleyicinin sistemlere göre adapte olması basit olduğundan dolayı endüstri de yaygın olarak kullanılmaktadır (Gozden ve Taplamacioglu, 2011). Jeneratör çıkış gerilimi (V_t), Referans gerilimine ulaşabilmek için sürekli olarak PID denetleyicisini kullanarak genliğini düzeltmeye çalışmaktadır (Blondin vd., 2018). PID denetleyicisinin s düzleminde verilen transfer fonksiyonu Denklem 17 ile ifade edilir (Li vd., 2006). Burada $U(s)$ kontrol sinyali, $E(s)$ ise ölüçülen ve istenen işlemler arasındaki hata, K_p, K_i ve K_d sırasıyla orantılı, integral ve türev kazançlardır.

$$G_{PID}(s) = P + I + D = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (17)$$

PID kontrollü AVR sisteminin transfer fonksiyonu Denklem 18'de verilmiştir. Tablo 1'deki verilen değerler AVR sistemine uygulandığında elde edilen PID kontrollü AVR sistemin transfer fonksiyonu Denklem 18'de verilmiştir.

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_a K_e K_g (1+sT_s)(s^2K_d+sK_p+K_i)}{s(1+sT_a)(1+sT_e)(1+sT_g)(1+sT_s) + K_a K_e K_g K_s(s^2K_d+sK_p+K_i)} \quad (18)$$

3.3. Amaç Fonksiyonun Tasarımı

PID denetleyicisinin parametrelerinin optimizasyonu sağlanabilmesi için bir amaç fonksiyonu tanımlanması gerekmektedir. Sistemi optimize edecek amaç fonksiyonu, AVR sisteminin geçici durum parametrelerinden yükselme zamanı, tepe zamanı, yüzdelik aşım ve kalıcı durum hatası gibi çıktıları içermesi gerekmektedir. Optimizasyon sürecinde asıl değişkenler sistemin kontrolünü gerçekleştiren PID denetleyicisinin parametrelerinin ($Kp,\ Ki,\ Kd$) optimize edilmesi ile sağlanmaktadır. Literatürde denetleyicileri analiz etmek amacıyla yükselme zamanı, tepe zamanı, yüzdelik aşım ve kalıcı durum hatası gibi farklı performans kriterleri de bulunmaktadır. Mutlak hatanın integrali (IAE), hata karelerinin toplamı (ISE), zaman ağırlıklı hata karelerinin toplamı ($ITSE$) bunlar arasında en fazla tercih edilendir. Bu çalışmada ise ISE, $ITSE$, Zamanın Karesel İntegrali (IT2SE) ve Zwe-Lee Gaing (ZLG) klasik yöntemi kullanılmaktadır. ZLG zaman alanlı Mp%, Ess, ts ve tr içeren geçici yanıt kriterlerini içeren bir amaç fonksiyonudur. β ise 0.5 ve 1.5 arasında ayarlanabilen ağırlık vektörüdür. Bu çalışma da ise β değeri 1 olarak belirlenmiştir. Matematiksel olarak ISE, $ITSE$, $IT2SE$ ve ZLG Tablo 3'te verilen Denklem 19-22 ile ifade edilmektedir. Simülasyon zamanı t, $e_v(t)$ AVR çıkış terminallerinde ölçülen voltaj ile referans voltaj arasındaki fark hata sinyalini ifade etmektedir.

Tablo 3
Performans Kriterleri ve Matematiksel Denklemleri

Performans Kriteri	Matematiksel Denklem	
ISE	$F(t) = \int (e_v(t)^2)\, dt$	(19)
$ITSE$	$F(t) = \int t(e_v(t)^2)\, dt$	(20)
$IT2SE$	$F(t) = \int (\quad e_v(t\quad)^2\, dt$	(21)
ZLG	$F(t) = \left(1 - e^{-\beta}\right).\left(M_p + E_{ss}\right) + e^{-\beta}(t_s - t_r)$	(22)

4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

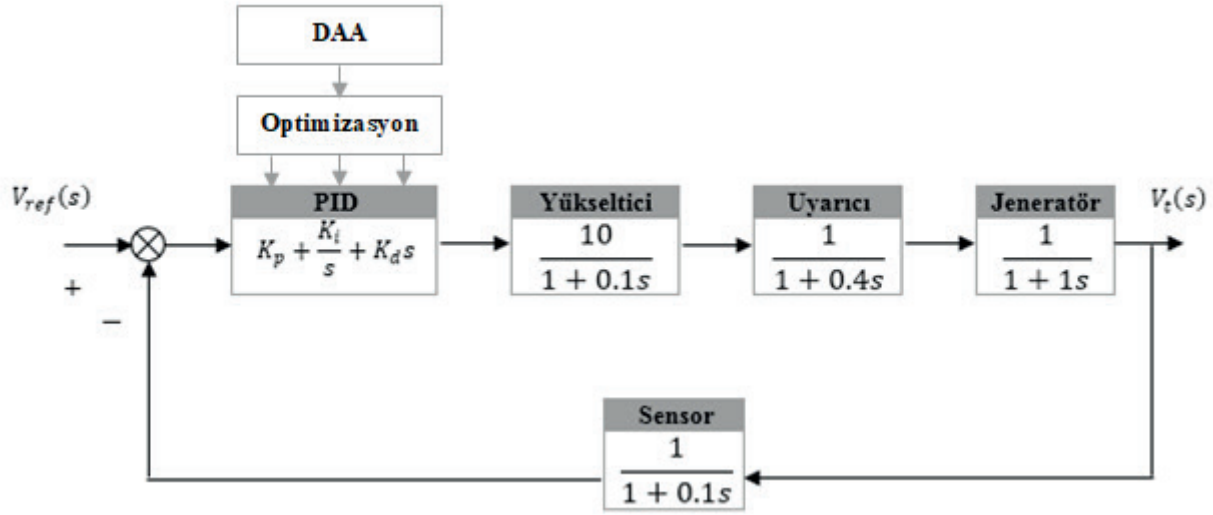
İstatiksel analizler, PID denetleyicisinin mühendislik çalışmaları için uygun olup olmadığı konusunda referans olarak gösterilmektedir. Bu makalede AVR sisteminin geçici durum yanıtını iyileştirmek amacıyla DAA-PID olarak adlandırılan PID denetleyicisi ile kontrol edilen DAA algoritması önerilmiştir.

MATLAB R2019 kullanılarak gerçekleştirilen istatiksel analizlerde algoritma 30 kere bağımsız çalıştırılarak elde edilmiştir. DAA'da sürü sayısı 25 ve iterasyon boyutu 100 olarak belirlenmiştir. Algoritmalar arasında en iyi olanı bulmak amacıyla performans kriteri olarak ISE, $ITSE$, $IT2SE$ ve ZLG seçilmiştir. PID kontrolünün dinamik yanıtını iyileştirmek ve sabit durum hatasını azaltmak veya ortadan kaldırmak amacıyla kazanç parametrelerinin ayarlanmasında optimizasyon tekniklerinin kullanılması tercih edilmiştir. Ayrıca optimizasyon tekniklerinde arama sürecinin kalitesini arttırmak amacıyla arama uzayının sınırların belirlenmesi gerekmektedir. Bunlara ek olarak da PID kontrolünün alt ve üst sınırlarının doğru belirlenmesi kararlılığı üzerinde etkilidir. Bu çalışmada kullanılan PID kontrol parametrelerinin alt ve üst sınırları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4
PID kontrol parametre sınırları

Sınır	PID Parametreleri		
	Kp	Ki	Kd
Alt	0.2	0.2	0.2
Üst	2	2	2

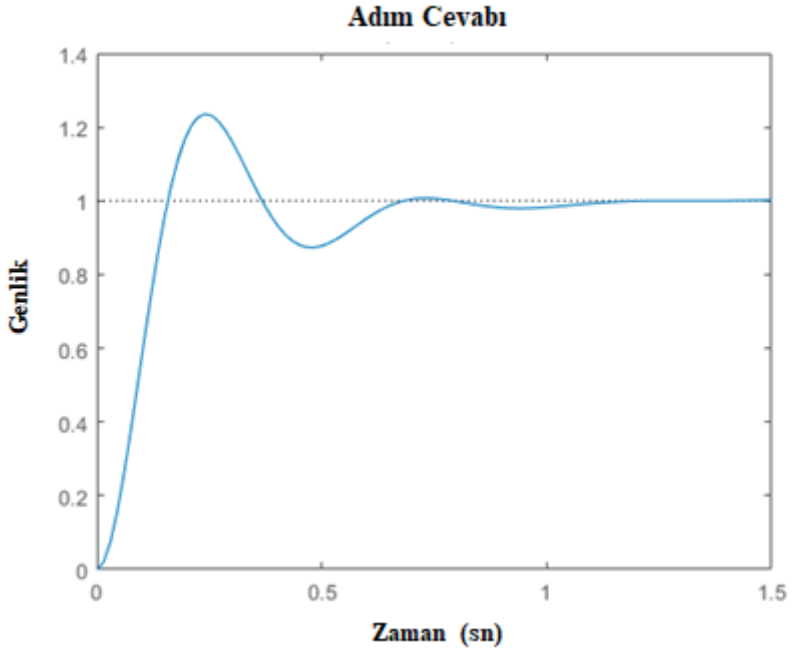
PID kontrollörlü AVR sisteminin transfer fonksiyon model diyagramı Şekil 2'de (Mohanty vd., 2014) ve uygulanan adım cevabı Şekil 3'te gösterilmiştir. Bunlara ek olarak DAA ile optimize edilen PID kontrolünü karşılaştırmak amacıyla literatürde bulunan ABC (Gozde ve Taplamacioglu, 2011), LUS (Bhookya ve Jatoth, 2019), PSO (Gozde ve Taplamacioglu, 2011), DE (Gozde ve Taplamacioglu, 2011), BBO (Guvencet vd., 2016), GOA (Ekinci ve Hekimoğlu, 2019), PSA (Bhullar vd., 2020), SCA (Ekinci vd., 2019) ve IKA (Hekimoğlu 2019) algoritmalar seçilmiştir.



Şekil 2. PID kontrollü AVR sistem tasarımı

Şekil 2'de verilen sistem Denklem 19 ile ifade edilmektedir.

$$G(s) = \frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{0.07361s^3+7.505s^2+14.5s+12.2}{0.004s^5+0.0454s^4+0.555s^3+8.871s^2+15.38s+12.2} \quad (19)$$



Şekil 3. PID kontrollü AVR sistemin terminal gerilimindeki artımlı değişimi

DAA'da seçilen amaç fonksiyonlarında elde edilen PID parametreleri birbirlerine yakındır. Fakat amaç fonksiyon değerleri birbirlerinden farklıdır. DAA kullanılarak elde edilen $K_p = 1.4381$, $K_i = 1.2204$ ve $K_d = 0.7361$ optimize edilmiş PID parametreleridir.

PID kontrollü AVR sistemin terminal gerilimindeki artımlı değişimin adım cevabı Şekil 3'te gösterilmiştir. Adım cevabıyla terminal gerilim kararlılığı ve tepkisi test edilmiştir. Bunlara ek olarak sisteminin yükselme zamanı, tepe zamanı, yerleşme zamanı da kontrol edilmektedir. Bu koşullardaki sistemin $s1 = -101.9900$ gerçek kutup ve $s2 = -4.8301 + 13.07889i$, $s3 = -4.8301 - 13.07889i$ ve $s4 = -0.9239 + 0.82750i, s5 = -0.9239 - 0.82750i$ karmaşık kutuplara sahip olduğundan dolayı sistem kararlıdır. AVR sisteminin yükselme zamanı ($tr = 0.1065$), tepe zamanı ($tp = 0.2420$), yerleşme zamanı $ts = 0.9580$ yüzdelik aşım ($Mp = \%23.56$) ve kalıcı durum hatası ($Ess = 7.3275e-15$)'dur. Bununla beraber bode diyagramından elde edilen tepe kazancı, faz marjı ve bant genişlik parametreleri sırasıyla 3.09 db, 62.7º ve 19.22 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak DAA 'sı PID kontrol sisteminin frekans yanıtını iyileştirdiği görülmektedir. Önerilen algoritma ve literatürdeki algoritmalar ile tasarlanan AVR sisteminin karşılaştırmalı kutup/sıfır haritası Tablo 5'de verilmiştir. Tablo 5'de yer alan tüm sistemler kapalı döngü kutupları sol düzlemde sol-yarısında bulunduğundan dolayı gerçekleştirilen tüm AVR sistemleri kararlı olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

Tablo 5

PID Tabanlı AVR Sisteminin Karşılaştırmalı Kapalı Çevrim Kutupları ve Sönüm Oranları

Denetleyici	Çevrim Kutupları	Sönüm Oranları	Denetleyici	Çevrim Kutupları	Sönüm Oranları
	-102	1.00		-101	1.00
	$-4.8300 + 13.0100i$	**0.346**		-1.18 + j1.06	0.74
DAA	$-4.8300 - 13.0100i$	**0.346**	GOA	-1.18 - j1.06	0.74
	$-0.9240 + 0.8280i$	0.745		-4.83 + j10.9	0.40
	$-0.9240 - 0.8280i$	0.745		-4.83 - j10.9	0.40
	-101.25	1.00		-102	1.00
	-4.8024+9.892*i*	0.437		-1.02	1.00
BBO	-4.8024-9.892*i*	0.437	PSO	-2.00	1.00
	-2.0568	1.00		-4.64 + j9.50	0.439
	-0.58505	1.00		-4.64 - j9.50	0.439
	-102	1.00		-100.91	1.00
	-5.13+11.7*i*	0.40		-3.02 + j8.19	0.34
IKA	-5.13-11.7*i*	0.40	DE	-3.02 - j8.19	0.34
	-0.80+0.93*i*	0.65		-6.29	1.00
	-0.80-0.93*i*	0.65		-0.22	1.00
	-101.25	1.00		-101.37	1.00
	-4.8842+9.8807*i*	0.443		-5.16 + j10.52	0.44
LUS	-4.8842-9.8807*i*	0.443	SCA	-5.16 - j10.52	0.44
	-1.2388+0.56033*i*	0.911		-0.91 + j0.82	0.74
	-1.2388-0.56033*i*	0.911		-0.91 - j0.82	0.74
	-101.3	1.00		-100.98	1.00
	-4.8163+10.109*i*	0.430		-3.7585+8.4058*i*	0.408
PSA	-4.8163-10.109*i*	0.430	ABC	-3.7585-8.4058*i*	0.408
	-1.2829+0.14614*i*	0.994		-4.7483	1.00
	-1.2829-0.14614*i*	0.994		-0.25108	1.00

Tablo 6 incelendiğinde maksimum aşım ve yerleşme zamanı daha fazla olduğu için kontrolsüz sistem yavaş tepki vermektedir. Sisteme PID kontrol eklendiğinde bu değerlerin düştüğü görülmektedir. Ayrıca kalıcı durum hatası kontrollü sistemde da düşüktür.

Tablo 6

Kontrolsüz ve kontrollü PID denetleyicisinin geçici tepkisinin sonuçları

PID	MP (%)	Tepe Değeri(sn)	Tr (sn)	Tp (sn)	Ts(sn)	Ess
Kontrolsüz	65.43	1.5066	0.2626	0.7513	6.9662	0.0909
Kontrollü	23.56	1.2350	0.1065	0.2420	0.9580	7.3275e-15

Sistemin kontrol parametre değerleri, ISE, ITSE, IT2SE ve ZLG uygunluk fonksiyon değeri Tablo 7'de listelenmiştir. ITSE amaç fonksiyonu göz önünde bulundurulduğunda minimum değeri DAA uygunluk değeri (0.0055) vermektedir. DAA minimum hata verdiğinden dolayı daha güvenilir ve daha doğrudur. Tablo 7-8'de verilen kalın değerler kontörlerin elde edilen minimum sonuçları göstermektedir.

Tablo 7

PID kontrollerin optimum parametreleri

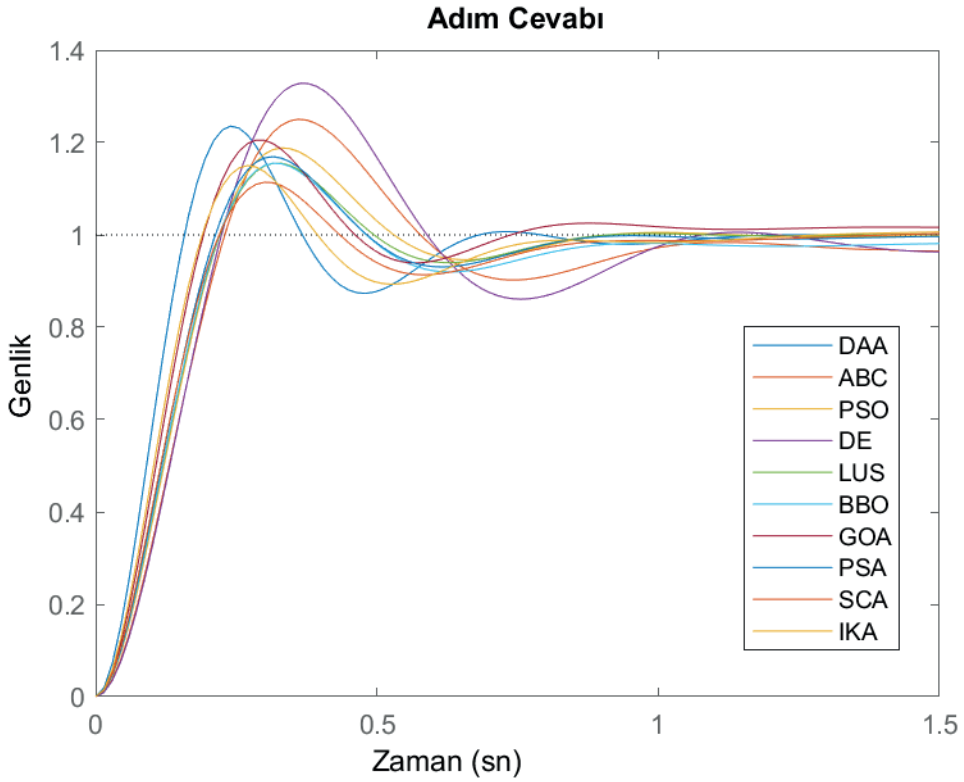
Algoritma	Kp	Ki	Kd	ISE	ITSE	$IT2SE$	ZLG
DAA	1.4381	1.2204	0.7361	**0.0753**	**0.0055**	**0.0016**	0.4622
ABC	1.6524	0.4083	0.3654		0.0125		
PSO	1.3541	0.9266	0.4378		0.0071		0.3640
DE	1.9499	0.4430	0.3427		0.0235		1.1272
LUS	1.2012	0.9096	0.4593	0.0750	0.0850		
BBO	1.2464	0.5893	0.4596		0.0073		
GOA	1.3825	1.4608	0.5462		0.0063		0.4390
PSA	1.2771	0.8471	0.4775		0.0064		**0.3496**
SCA	0.9826	0.8337	0.4982		0.0064		
IKA	1.0426	1.0093	0.5999		0.0061		**0.3247**

Tablo 8

Çeşitli denetleyiciler için geçici cevap analiz sonuçları

Algoritma	Geçici Durum Parametreleri				Amaç Fonksiyonu
	Mp	Ts(s)	Tr	Tp	ITSE
DAA	1.235	0.9580	**0.1065**	**0.242**	**0.0055**
ABC	1.250	0.9200	0.1560	0.360	0.0125
PSO	1.882	0.8120	0.1490	0.328	0.0071
DE	3.285	2.6490	0.1520	0.360	0.0235
LUS	1.156	**0.6960**	0.1490	0.322	0.0064
BBO	1.160	0.7660	0.1490	0.317	0.0073
GOA	2.053	0.9710	0.1300	0.286	0.0063
PSA	1.684	0.8040	0.1440	0.316	0.0064
SCA	**1.114**	0.7240	0.1480	0.304	0.0064
IKA	1.150	0.753	0.128	0.269	0.0061

Tablo 7'deki optimum parametre sonuçları incelendiğinde AVR sistemi için önerilen DAA'nın literatürdeki diğer algoritmalara göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Sistemin geçici cevap Mp, Tr, Ts ve Tp analiz değerleri ve ITSE amaç fonksiyonu değeri Tablo 8'de listelenmiştir. Tablo 8'ye göre minimum aşım noktası SCA algoritmasıyken yerleşim süresinde LUS algoritması, yükselme ve tepe sürelerinde diğer algoritmalara göre DAA algoritması daha yavaş gerçekleştirmektedir. DAA maksimum aşma ve yerleşme zamanı olarak PSO, DE ve GOA algoritmalarına daha düşük değerlere sahiptir. Bu da DAA temelli sistemin daha hızlı yanıt verdiğini göstermektedir. Performans kriterine göre minimum değeri önerilen DAA algoritması verdiği için PID kontrollü AVR sistemi tasarımında en iyi performansı gösterdiği belirlenmiştir. Tablo 7-8'de verilen algoritmaların PID denetleyicisinin Kp, Ki, Kd kazanım parametreleri ile elde edilen gerilim değişim eğrisi Şekil 4'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4. Çeşitli denetleyiciler için AVR sistemin terminal gerilimindeki artımlı değişimi

Sağlamlık analizi denetleyicinin sistem parametrelerindeki belirsizlikleri tolere etme yeteneğini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilir. AVR sisteminin zaman sabitleri (Ta, Te, Tg ve Ts) değişim aralığı %25'lik adım boyutlarıyla nominal değerlerinin ∓%50'si aralığında ayrı ayrı değiştirilmiştir. AVR sisteminin geçici tepki özellikleri de Tablo 9'da verilmiştir. Tablo 7'da açıkça görüldüğü üzere DAA tabanlı nominal şartlar altında tasarlanan PID denetleyicisinin parametrelerinin değişmesi geçiçi tepki değerlerini değiştirmiştir. Buna ek olarak sağlamlık analizinde parametrelerdeki değişimin tolere edilebilir olduğu ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak önerilen DAA-PID tabanlı AVR sisteminin sağlam olduğunu göstermektedir.

Tablo 9

AVR Sisteminin Gürbüzlük Analizi Sonuçları

Model Parametreleri	**Değişim Oranı(%)**	**Mp**	**ts(s)**	**tr(s)**	**tp(s)**
-	-	**1.2350**	**0.9580**	**0.1065**	**0.2420**
Ta	-50	1.2056	8.0567	0.0610	**0.1342**
	-25	1.3913	1.2350	**0.0574**	0.1409
	+25	1.2571	5.9448	0.0939	0.2117
	+50	**1.2007**	**1.0448**	0.1863	0.4220
Te	-50	1.5799	7.6024	**0.0409**	**0.1075**
	-25	**1.0609**	4.0421	0.1465	2.7384
	+25	1.1403	2.6798	0.1359	0.2774
	+50	1.2666	**1.1281**	0.1036	0.2408
Tg	-50	1.4402	**1.1954**	**0.0574**	**0.1412**
	-25	1.1804	2.5171	0.0982	0.2106
	+25	1.2409	4.0519	0.0903	0.2022
	+50	**0.1199**	5.6915	0.1199	0.2461
Ts	-50	**1.1725**	1.5521	0.1018	0.2120
	-25	1.3332	**0.8244**	0.0764	0.1798
	+25	1.5228	2.0976	**0.0565**	0.1504
	+50	1.5751	1.8417	0.0563	**0.1482**

5. SONUÇLAR

Bu makalede DAA tabanlı AVR sistemini optimal PID kontrol parametreleriyle gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. PID kontrol parametreleri aşım, kararlı durum hatası, yükselme süresi, yerleşme sürelerinin etkisiyle oluşan ISE, ITSE, IT2SE ve ZLG amaç fonksiyonu ile minimize edilerek belirlenmektedir. Önerilen sistemin performansı geçici durum yanıtları ve kalıcı durum hatasını göz önünde bulundurarak literatürde bulunan ABC, LUS, PSO, DE, BBO, GOA, PSA, SCA ve IKA optimizasyon algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır. Önerilen yaklaşım literatürdeki bazı yaklaşımlara göre üstünlüğü göstermek amacıyla geçici yanıt cevabı, kök konum ve bode analizi kullanılmıştır. Bu analizlere ek olarak sistem parametreleri değiştirilerek AVR sistemin sağlamlık analizi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre DAA tabanlı PID kontrollerin geçici davranış yanıtlarından yükselme, tepe değerleri ve ITSE amaç fonksiyonu açısından diğer algoritmalara göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Hakem Değerlendirmesi: Dış bağımsız.
Çıkar Çatışması: Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemişlerdir.
Finansal Destek: Yazarlar bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmemişlerdir.
Yazar Katkıları: Çalışma Konsepti/Tasarım- Z.G., M.E.Ç.; Veri Toplama- Z.G., M.E.Ç.; Veri Analizi/Yorumlama- Z.G., M.E.Ç. ; Yazı Taslağı- Z.G.; İçeriğin Eleştirel İncelemesi- Z.G.; Son Onay ve Sorumluluk- Z.G., A.F.B.; Supervision- Z.G.

Peer-review: Externally peer-reviewed.
Conflict of Interest: The authors have no conflict of interest to declare.
Grant Support: The authors declared that this study has received no financial support.
Author Contributions: Conception/Design of Study- Z.G., M.E.Ç.; Data Acquisition- Z.G., M.E.Ç.; Data Analysis/Interpretation- Z.G., M.E.Ç.; Drafting Manuscript- Z.G.; Critical Revision of Manuscript- Z.G; Final Approval and Accountability- - Z.G., A.F.B.; Supervision- Z.G.

Kaynaklar/References

Abdel-Basset, M., El-Shahat, D., Chakrabortty, R.K. & Ryan, M. (2021). Parameter estimation of photovoltaic models using an improved marine predators algorithm, *Energy Conversion and Management,* 227, 113491. https,//doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113491.

Ayas, M.S. (2019). Design of an optimized fractional high-order differential feedback controller for an AVR system. *Electrical Engineering*, 101,1221–1233. https,//doi.org/10.1007/s00202-019-00842-5.

Bhookya, J., Jatoth, R. K. (2019). Optimal FOPID/PID controller parameters tuning for the AVR system based on sine–cosine-algorithm. *Evolutionary Intelligence*, 12,725–733.https,//doi.org/10.1007/s12065-019-00290-x.

Bhullar, A.K., Kaur, R. & Sondhi, S. (2020). Enhanced crow search algorithm for AVR optimization. *Soft Computing*, 24,11957–11987.https,//doi.org/10.1007/s00500-019-04640-w.

Bingul, Z., & Karahan, O. (2018). A novel performance criterion approach to optimumdesign of PID controller using cuckoo search algorithm for AVR system. *Journal of the Franklin Institute*, 355, 5534–5559. https,//doi.org/10.1016/j.jfranklin.2018.05.056

Blondin, M., Sanchis, J., Sicard P. & Herrero J.M. (2018). New optimal controller tuning method for an AVR system using a simplifed Ant Colony Optimization with a new constrained Nelder–Mead algorithm. *Appl Soft Comput* ,62,216-229. https,//doi.org/10.1016/j.asoc.2017.10.007

Blondin, M.J., Sanchis, J. Sicard, P. & Herrero, J.M. (2018). New optimal controller tuning method for an AVR system using a simplified Ant Colony Optimization with a new constrained Nelder–Mead algorithm. *Applied Soft Computing*, 62, 216–229. ttps,//doi.org/10.1016/j.asoc.2017.10.007.

Çelik, E. (2018). Incorporation of stochastic fractal search algorithm into efficient design of PID controller for an automatic voltage regulator system. *Neural Computing and Applications*, 30,1991–2002. https,//doi.org/10.1007/s00521-017-3335-7.

Chen, X., Qi, X., Wang Z., Cui, C., Wu, B. & Yang Y. (2021) .Fault diagnosis of rolling bearing using marine predators algorithm-based support vector machine and topology learning and out-of-sample embedding. *Measurement*, 176,109116. https,//doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109116.

Ekinci, S. & Hekimoğlu, B. (2019). Improved Kidney-Inspired Algorithm Approach for Tuning of PID Controller in AVR System. *IEEE Access*, 7, 2169-3536. http,//dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906980.

Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Mirjalili, S. & Gandomi, A. H. (2020). Marine predator algorithm, a nature-inspired metaheuristic. *Int J Expert Syst Appl*, 52, 113377. https,//doi.org/10.1016/j.eswa.2020.11337.

Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Mirjalili, S. & Gandomi, A. H. (2020). Marine Predators Algorithm, A nature-inspired metaheuristic. *Expert Systems With Applications*, 152, 113377. https,//doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113377.

Gaing, L. (2004). A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. IEEE Trans. *Energy Convers.,* 19(2),384–391. https,//doi.org/10.1109/TEC.2003.821821

Gozde, H., & Taplamacioglu, M.C. (2011). Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm for automatic voltage regülatör (AVR) system. *Journal of the Franklin Institute,* 348, 1927–1946. http,//dx.doi.org/10.1016/j.jfranklin.2011.05.012

Guvenc, U., Yiğit, T., Işık, A.H. & Akkaya İ. (2016). Performance analysis of biogeography-based optimization for automatic voltage regulator system.

Turk J Elec Eng & Comp Sci, 24, 1150 -1162. http,//dx.doi.org/10.3906/elk-1311-11.

Hekimoğlu, B. & Ekinci, S. (2018). Grasshopper Optimization Algorithm for Automatic Voltage Regulator System. *5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 152-156.

Hekimoğlu, B. (2019). Sine-cosine algorithm-based optimization for automatic voltage regulator system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41(6), 1761–1771. http,//dx.doi.org/10.1177/0142331218811453.

Li, Y., Ang, K.H. & Chong, G.C.Y. (2006). PID control system analysis and design. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(1),32-41. https,//doi.org/10.1109/TCST.2005.847331.

Micev, M., Calasan, M., Ali, Z.M., Hasanien, H.M. & Aleem, S.H.E. A. (2021). Optimal design of automatic voltage regulation controller using hybrid simulated annealing – Manta ray foraging optimization algorithm. *Ain Shams Engineering Journal*, 12, 641–657. https,//doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.010.

Mohanty, P.K., Sahu, B.K. & Sidhartha Panda (2014) Tuning and Assessment of Proportional–Integral–Derivative Controller for an Automatic Voltage Regulator System Employing Local Unimodal Sampling Algorithm. *Electric Power Components and Systems*, 42(9), 959-969. http,//dx.doi.org/10.1080/15325008.2014.903546

Panda, S., Sahub, B.K. & Mohanty, P.K. (2012). Design and performance analysis of PID controller for an automatic voltage regulator system using simplified particle swarm optimization. *Journal of the Franklin Institute*, 349, 2609–2625. http,//dx.doi.org/10.1016/j.jfranklin.2012.06.008

Sahib, M.A. (2015). A novel optimal PID plus second order derivative controller for AVR system. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 18(2), 194-206. https,//doi.org/10.1016/j.jestch.2014.11.006.

Yousri, D., Hasanien, H.M. & Fathy, A. (2021). Parameters identification of solid oxide fuel cell for static and dynamic simulation using comprehensive learning dynamic multi-swarm marine predators algorithm. *Energy Conversion and Management*, 228, 113692. https,//doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113692.