



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Doğru akım motoru hız kontrolü için SAA tabanlı kesir dereceli PI-PD eklemeli denetleyici tasarımı

SSA-based fractional order PI-PD cascade controller design for dc motor speed control

Yazar(lar) (Author(s)): Bora ÇAVDAR¹, Erdinç ŞAHİN², Fatih Mehmet NUROĞLU³

ORCID¹: 0000-0002-0545-2925

ORCID²: 0000-0002-940-599X

ORCID³: 0000-0003-2530-8901

To cite to this article: Çavdar B., Şahin E. ve Nuroğlu F.M., “Doğru akım motoru hız kontrolü için SAA tabanlı kesir dereceli PI-PD eklemeli denetleyici tasarımı”, *Journal of Polytechnic*, 27(1): 283-296, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Çavdar B., Şahin E. ve Nuroğlu F.M., “Doğru akım motoru hız kontrolü için SAA tabanlı kesir dereceli PI-PD eklemeli denetleyici tasarımı”, *Politeknik Dergisi*, 27(1): 283-296, (2024).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1139517

Doğru Akım Motoru Hız Kontrolü için SAA Tabanlı Kesir Dereceli PI-PD Eklemeli Denetleyici Tasarımı

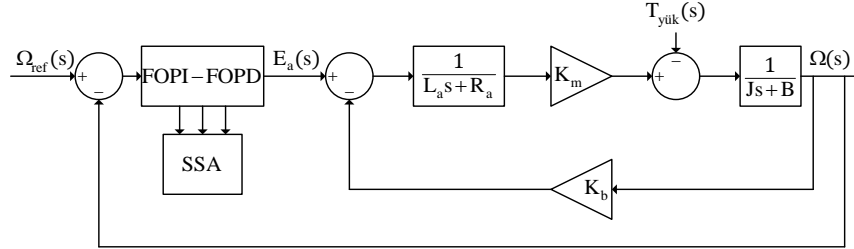
SSA-based Fractional Order PI-PD Cascade Controller Design for DC Motor Speed Control

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Eklemeli kesir dereceli PI-PD denetleyicisi / Cascade fractional order PI-PD controller
- ❖ Serçe arama algoritması / Sparrow Search Algorithm
- ❖ Çeşitli amaç fonksiyonları / Various types of objective functions (ITAE, IAE, ITSE, ISE, ZLG)
- ❖ Zaman bölgesi, frekans bölgesi, gürbüzlük analizi / Time domain, frequency domain, robustness analysis
- ❖ Bozucu yük, referans hız değişimi analizi / Disturbance load, reference speed change analysis

Grafik Özet (Graphical Abstract)

DA motoru hız kontrolü için SAA ayarlamalı kesir dereceli PI-PD denetleyici kullanılmıştır. / SAA-based fractional order PI-PD controller is used for DC motor speed control.



Şekil. DA motor hız kontrol blok diyagramı / Figure. DC motor speed control block diagram

Amaç (Aim)

DA motoru hız kontrolü için güçlü bir denetleyici yapısının analizi / Analysis of a powerful controller structure for DC motor speed control

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

DC motor hız kontrolü için önerilen denetleyici parametreleri serçe arama algoritmasıyla farklı amaç fonksiyonları için tespit edilmiştir. / The proposed controller parameters for DC motor speed control were determined for different objective functions with the sparrow search algorithm.

Özgünlük (Originality)

DA motoru hız kontrolü için ilk defa kesir dereceli PI-PD denetleyici kullanılmıştır. / For the first time, fractional order PI-PD controller is used for a DC motor speed control.

Bulgular (Findings)

Kesir dereceli PI-PD kontrolör ile DA motoru hız kontrolünde farklı analizler için yüksek performans elde edilmiştir. / With the fractional order PI-PD controller, high performance has been achieved for different analyzes in DC motor speed control.

Sonuç (Conclusion)

DA motor hız kontrolü için kesir dereceli PI-PD denetleyici literatürdeki denetleyicilere göre daha iyi performans sergilemiştir. / The fractional order PI-PD controller showed better performance for DC motor speed control than the controllers in the literature.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Doğru Akım Motoru Hız Kontrolü için SAA Tabanlı Kesir Dereceli PI-PD Eklemeli Denetleyici Tasarımı

Araştırma Makalesi / Research Article

Bora ÇAVDAR^{1*}, Erdiñ ŞAHİN², Fatih Mehmet NUROĞLU³

¹Of Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Müh. Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Müh. Bölümü, Giresun Üniversitesi, Türkiye

³Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 01.07.2022 ; Kabul/Accepted : 27.07.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 06.09.2022)

ÖZ

Bu çalışmada doğru akım (DA) motoru hız kontrolünü sağlamak için eklemeli ve kesir dereceli (FOPI-FOPD) denetleyici tasarımı önerilmiştir. Önerilen denetleyici parametreleri son yıllarda geliştirilen Serçe Arama Algoritması (SAA) ile optimize edilmiştir. Denetleyici parametrelerinin aranması için çeşitli amaç fonksiyonları kullanılmıştır. Bu amaç fonksiyonları zamanla çarpılan mutlak hatanın integrali (ITAE), mutlak hatanın integrali (IAE), zamanla çarpılan hatanın karesinin integrali (ITSE), hatanın karesinin integrali (ISE) ve Zwe-Lee Gaing (ZLG) fonksiyonudur. Zaman bölgesinde aşma (M_p), oturma süresi (t_s) ve yükselme süresi (t_r) bakımından kullanılan amaç fonksiyonlarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçlar frekans bölgesinde kazanç marjı, faz marjı ve bant genişliği açısından incelenmiştir. Zaman ve frekans bölgesinde farklı amaç fonksiyonlarından elde edilen en iyi sonuç literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca önerilen denetleyicide elde edilen en iyi sonuç için gürbüzlük, bozucu yük ve referans hız değişimi analizleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: DA motor hız kontrolü, kesir dereceli eklemeli denetleyici, SAA, zaman ve frekans bölgelerinde analiz.

SSA-based Fractional Order PI-PD Cascade Controller Design for DC Motor Speed Control

ABSTRACT

In this study, a fractional and cascaded controller type FOPI-FOPD is designed to control the DC motor speed. The proposed controller parameters are tuned via Sparrow Search Algorithm (SSA) which is a recently introduced metaheuristic optimization algorithm. Various types of objective functions are employed to search the proposed controller parameters. These objective functions are the integral of time multiply absolute error (ITAE), the integral of absolute error (IAE), the integral of time multiply squared error (ITSE), the integral of squared error (ISE), and Zwe-Lee Gaing (ZLG). The results obtained from the objective functions were compared in the time domain in terms of overshoot (M_p), settling time (t_s), and ramp time (t_r). In addition, the obtained results are examined in terms of gain margin, phase margin, and bandwidth in the frequency domain. The best results obtained from different objective functions in the time and frequency domain were compared with the studies in the literature. In addition, for the best result obtained in the proposed controller, robustness, disturbance load, and reference speed change analysis were examined.

Keywords: DC motor speed control, fractional order cascade controller, SSA, time and frequency domain analysis.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen teknolojiyle birlikte endüstriyel uygulamalar ve gündelik hayatta kullanılan cihazlar için kontrol çalışmaları giderek hız kazanmıştır. Bu kontrol çalışmalarına; DA motor sistemleri için hız ve konum kontrolü [1,2], sıvı bulunan sistemler için sıvı seviye kontrolü [3], araçların mesafesini koruyabilmesi için mesafe kontrolü [4], güç sistemlerinde kararlılık için yük-frekans ve gerilim kontrolü [5,6] gibi birçok kontrol uygulaması örnek olarak verilebilir. Bu çalışma endüstriyel uygulamalar ve gündelik yaşantının birçok noktasında doğru akım (DA) motorlarının yaygın olarak kullanılmasından dolayı bu konuya yönelmiştir. DA motorlarının kullanım alanlarına elektrikli araçlar,

insansız su altı araçları, manipülatör robotlar, sabit diskler ve bazı ev aletleri örnek olarak verilebilir [7–10]. Doğru akım motorlarının yaygın kullanımında, sağladığı avantajlar ön plana çıkmaktadır. Bu avantajlardan bazıları DA motorunun giriş gerilimi değiştirilerek çalıştırılabilmesi, düşük maliyetli olması ve birçok boyutta çeşitli şekilde tasarlanarak kullanılabilmesidir [11].

Oransal-integral-türevsel (PID) denetleyiciler kolay uygulanabilirliği ve sağlam performansı sebebiyle endüstride sıklıkla kullanılır [12]. Endüstride kullanılan PID denetleyicinin parametre ayarları genellikle elle yapılır [13]. Ayarları elle yapılan yöntemlerden endüstride yaygın olarak kullanılan ise Zeigler-Nichols yöntemi [13]. Ayrıca bu yöntem dışında ayarları elle yapılan Cohen-Coon yöntemine de başvurulur [14,15]. Ayarları elle yapılan yöntemlerin dezavantajları

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : boracavdar@ktu.edu.tr

denetleyici parametre tespitinin zor olması, genellikle sistem yanıtında dalgalanma ve aşım problemlerinin görülmesidir [12]. Bahsedilen dezavantajlara ek olarak ayarları elle yapılan yöntemler fazla zaman alıcı olabilir [16].

Literatüre bakıldığında DA motoru hız kontrolü için kullanılan denetleyicilerin parametre tespitinde ayarları elle yapılan yöntemlerden daha başarılı sonuçlar veren farklı meta sezgisel arama algoritmaları bulunmaktadır. Parametre tespitinde kullanılan farklı algoritmalar için Genetik Algoritma (GA), Jaya Optimizasyon Algoritması (JOA), Atom Arama Algoritması (ASO), Balina Optimizasyon Algoritması (WOA) vd. örnek olarak verilebilir [12,17–19].

Meta sezgisel arama algoritmaları ile optimum denetleyici parametrelerinin ayarlanması için minimize edilecek bir amaç fonksiyonu gerekmektedir. DA motoru hız kontrolü denetleyicisinin parametre tespitinde Zwe-Lee Gaing (ZLG) ve zamanla çarpılan mutlak hatanın integrali (ITAE) amaç fonksiyonları ön plana çıkmaktadır [20–22]. Bu amaç fonksiyonlarının yanı sıra literatürdeki kontrol çalışmalarında hatanın karesinin integrali (ISE), zamanla çarpılan hatanın karesinin integrali (ITSE) ve mutlak hatanın integrali (IAE) amaç fonksiyonları da sıklıkla kullanılmaktadır [23]. Araştırmacıların oluşturduğu farklı yapılarıdaki amaç fonksiyonları da denetleyici parametresi aramada

Sistemin kontrolünü sağlayacak denetleyiciler farklılık gösterebilir ve optimize edilmesi gereken birçok parametreye sahip olabilir. Kesirli analiz etkisiyle geliştirilmiş olan PID denetleyicisi (FOPID) de tam sayılı PID denetleyicisinden daha fazla optimize edilmesi gereken parametre içerir. Kesirli analiz ilk olarak yarım mertebeden türev almanın geçtiği 1695 yılında Leibniz ve L'Hospital ile ilişkilendirilebilir [24]. Kesirli analizin yıllar içinde ilerlemesiyle tam sayılı olarak kullanılan PID denetleyici yapısı kesirli dereceli olarak geliştirilmiştir [25]. Bu geliştirmeye PID denetleyicisi daha esnek bir tasarıma sahip olmuştur yani sistem kontrolünü sınırlayan tam sayı integral ve türev operatörü 0 ile 1 arasında istenilen bir değeri alabilme yeteneği kazanmıştır. Bu sayede, denetleyici performansı geliştirilmiştir. PID denetleyicisinin kesirli dereceli (FOPID) olarak kullanılmasından sonra bu yapı, literatürdeki farklı uygulamalarda ele alınmıştır. Bu uygulamalardan biri de DA motorunun hız kontrolüdür [13,18,21].

Literatürde DA motoru hız kontrol uygulamaları için farklı denetleyici yapıları bulunmaktadır. Bu denetleyicilerin parametreleri ise farklı amaç fonksiyonları için çeşitli optimizasyon algoritmalarıyla aranmıştır. Literatürde son yıllarda ön plana çıkan çalışmalar Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Literatürde yer alan dc motor hız kontrolü çalışmaları (Existing DC motor speed control studies in the literature)

Yıl	Çalışma No.	Denetleyici Tipi	Algoritma	Amaç Fonksiyonu
2015	[12]	PID	GA, ASOA	$\frac{\sum_{n=1}^M \sqrt{(r_n - y_n)^2}}{M}$
2016	[26]	PID, FOPID	PSO	IAE, ISE, ITAE, ITSE
2016	[27]	FOPID	CPSO	ITSE
2017	[14]	PID	SCA	ITAE
2017	[22]	PID	SFS	ITAE
2017	[17]	PID	JOA	$\frac{1}{1 - e^{-\alpha}}(t_s - t_r) + \frac{e^{-\alpha}}{1 - e^{-\alpha}}(M_p + E_{ss})$
2018	[28]	PI	SOS, PSO, GA	$\alpha * ISE + \beta * IAE$
2018	[13]	FOPID	GWO	ITAE
2018	[29]	PID	GWO	ITAE
2019	[30]	PI+DF	PSO, SFS	$\alpha * ISE + \beta * IAE$
2019	[20]	PID	SFS	ITAE
2019	[18]	FOPID	ASO, ChaSO	ITSE, ZLG, ITAE
2021	[31]	PID	HGSO, OBL-HGSO	ITAE
2021	[19]	PID	WOA, MFO	ITAE
2021	[21]	FOPID	MRFO, OBL-MRFO-SA	ZLG
2021	[32]	PID	LFDNM	ITAE

kullanılabilir. Kontrol çalışmalarında farklı amaç fonksiyonlarının kullanılmasındaki amaç optimize edilecek geçici yanıt parametrelerinin (oturma süresi, yükselme süresi, tepe süresi, maksimum aşım vb.) sayısının fazla olmasıdır.

Bu çalışmada DA motoru hız kontrolü için kesirli dereceli PI-PD (FOPI-FOPD) denetleyici yapısı önerilmiştir. Bu denetleyici yük frekans kontrolü çalışmasında [33] kullanılmış olup daha önce DA motoru hız kontrolü için performansı araştırılmamıştır. Önerilen denetleyicinin parametreleri serçe arama algoritması (SAA) ile elde

edilmiştir [34]. Çalışmada FOPI-FOPD denetleyicisinin parametrelerinin bulması için farklı amaç fonksiyonları test edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bulunan sonuçlar literatürdeki diğer çalışmaların sonuçlarıyla hem zaman hem de frekans bölgesinde karşılaştırılmıştır. DA motor hız kontrolü için önerilen denetleyici yapısının üstünlüğü bu çalışmada gösterilmiştir. Önerilen denetleyici için gürbüzlük, bozucu yük ve referans hız değişimi analizi de gerçekleştirilmiştir.

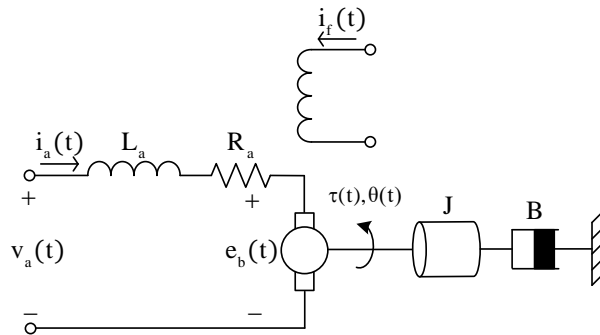
Bu çalışmanın literatüre katkısı aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- DA motoru hız kontrolünde ilk defa FOPI-FOPD eklemeli denetleyicisi kullanılmıştır.
- DA motoru hız kontrolü için ilk defa serçe arama algoritmasıyla denetleyici parametreleri elde edilmiştir.
- Önerilen denetleyici için farklı amaç fonksiyonlarının zaman ve frekans bölgesi analizleri bakımından karşılaştırılması yapılmıştır.
- Önerilen denetleyici için farklı analizlerle elde edilen sonuçlar literatürdeki güncel çalışmalarla karşılaştırılarak denetleyici üstünlüğü ortaya koyulmuştur.
- Önerilen denetleyici için gürbüzlük, bozucu yük ve referans hız değişim analizleri yapılmıştır.

Bu çalışma başlıca üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda (Giriş), kullanılan DA motoru yapısı, kesir dereceli PI-PD denetleyici, serçe arama algoritması ve amaç fonksiyonları tanıtılmıştır. İkinci kısımda (Yapılan Çalışmalar ve Vurgular), zaman ve frekans bölgesinde analizler yapılmıştır. Ayrıca gürbüzlük, bozucu yük ve referans hız değişimi analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler literatürle karşılaştırılarak sonuçların etkinliği vurgulanmıştır. Üçüncü kısımda (Tartışma ve Sonuçlar) ise yapılan çalışmadan elde edilen tüm sonuçlar özet biçiminde verilerek değerlendirmeler yapılmıştır.

1.1. DA motoru (DC motor)

Şekil 1'de DA motoru için eşdeğer devre verilmiştir [35]. Şekil 1'de R_a armatür direncini, L_a armatür endüktansını, J motorun atalet momentini, B motorun sürtünme sabitini, e_b endüvide indüklenen gerilimi, v_a armatür gerilimini, i_a armatür akımını, i_f uyarım akımını, θ açısal hızı ve τ momenti temsil etmektedir.



Şekil 1. DA motoru eşdeğer devresi (DC motor equivalent circuit)

DA motorunun endüvisinde indüklenen gerilim aşağıdaki gibi elde edilir [36].

$$e_b(t) = \frac{NP}{2\pi a} \phi \omega(t) \quad (1)$$

Denklem 1'de, N toplam iletken sayısını, P kutup sayısını, a akım yolu sayısını, ω açısal hızı ve ϕ akıyı, temsil eder. Denklemde 2π ifadesi rotorun silindirik yapıda kabul edilmesiyle hesaplanan yüzey alanından gelmektedir.

Denklem 1'de akı sabit kabul edilirse, denklem sabit elektromotor kuvveti ile aşağıdaki gibi temsil edilebilir [36].

$$e_b(t) = K_b \omega(t) \quad (2)$$

Denklem 2'de K_b elektromotor kuvvet sabitini temsil etmektedir. DA motorunda oluşan döndürme kuvvetinin (momentin) hesaplanması indüklenen gerilimin hesaplamasına benzerdir. DA motoru için toplam moment (iletkenlerin momentlerinin toplamı) aşağıdaki gibi yazılabilir [36].

$$\tau(t) = \frac{NP}{2\pi a} \phi i_a(t) \quad (3)$$

Denklem 3'te, $i_a(t)$ toplam endüvi akımını (her bir iletkendeki akımların toplamı) temsil eder.

Denklem 3'te akı sabit kabul edilirse, denklem moment sabitiyle aşağıdaki gibi temsil edilebilir [36].

$$\tau(t) = K_m i_a(t) \quad (4)$$

Denklem 4'te K_m motorun moment sabitini temsil eder. Armatür gerilimi (v_a) DA motorunda hız kontrolünün yapılması için kullanılır. Bu gerilim ile indüklenen gerilim arasındaki ilişki ise aşağıdaki gibi ifade edilir [36].

$$v_a(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + e_b(t) \quad (5)$$

DA motoruna bağlanan döner kütle ve burada oluşan sürtünme kuvvetinin moment cinsinden ifadesi aşağıdaki gibi yazılır [36].

$$\tau(s) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (6)$$

Denklem 2'den $e_b(t)$ ifadesi çekilerek denklem 5'te yerine koyulur ve daha sonra denklem 5'teki ifadenin Laplace dönüşümü alınır aşağıda verilen denklem elde edilir [36].

$$V_a(s) = (L_a s + R_a) I_a(s) + K_b \Omega(s) \quad (7)$$

Denklem 4'teki $i_a(t)$ ifadesi yalnız bırakılarak denklem 6'daki $\tau(s)$ denklem 4'te yerine koyulur ve daha sonra

bu ifadenin Laplace dönüşümü alınarak aşağıdaki denklem elde edilir [36].

$$I_a(s) = \frac{(Js + B)\Omega(s)}{K_m} \quad (8)$$

Denklem 8'de $I_a(s)$ ifadesi denklem 7'de yerine koyulursa DA motoru açık çevrim transfer fonksiyonu $\Omega(s)/V_a(s)$ aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(L_a s + R_a)(Js + B) + K_m K_b} \quad (9)$$

Denklem 9'da elde edilen açık çevrim ifadesi yük momentinin sıfır olarak alındığı durum ($\tau_{yük} = 0$) için geçerlidir. Eğer armatür gerilimi sıfır kabul edilirse ($V_a = 0$) motorun hızı ile yük momenti arasındaki transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir [31].

$$\frac{\Omega(s)}{\tau_{yük}(s)} = -\frac{(L_a s + R_a)}{(L_a s + R_a)(Js + B) + K_m K_b} \quad (10)$$

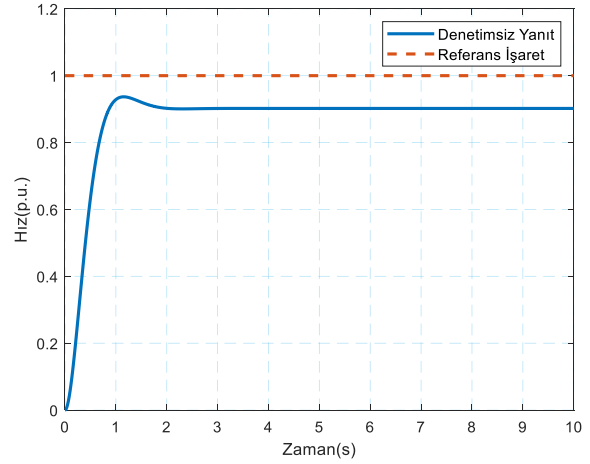
DA motoru sisteminin kapalı çevrim blok diyagramı Şekil 2'de verilmiştir.

DA motoru parametrelerinin değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelgede verilen parametreler literatürdeki çalışmalardan alınmıştır [13,18,21].

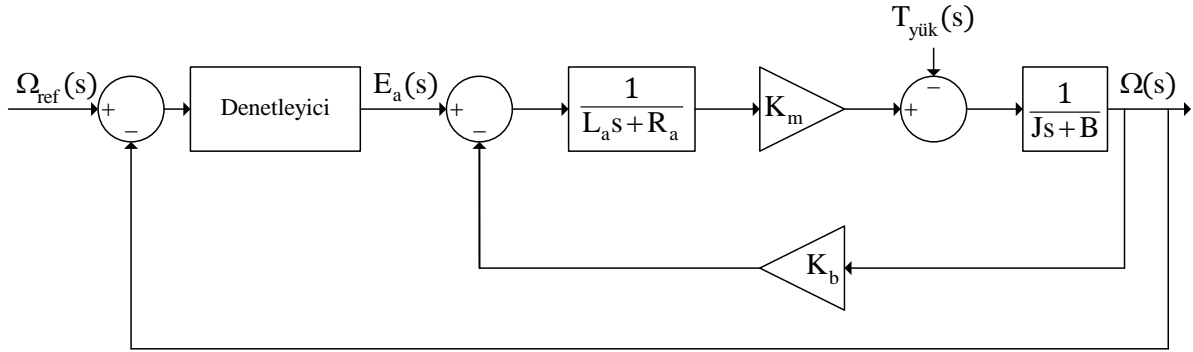
$$\tau_{yük} = 0 \rightarrow \frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{15}{1.08s^2 + 6.1s + 1.63} \quad (11)$$

$$V_a = 0 \rightarrow \frac{\Omega(s)}{\tau_{yük}(s)} = -\frac{2700s + 400}{1.08s^2 + 6.1s + 1.63} \quad (12)$$

Denklem 11'deki transfer fonksiyonu (Şekil 2'de denetleyici olmadığı durum) kullanıldığında ve armatür gerilimi olarak birim basamak işareti uygulandığında elde edilen çıkış hızı Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Kontrolsüz DA motoru sisteminin hız cevabı (Speed response of uncontrolled DC motor system)



Şekil 2. DA motor hız kontrol sisteminin kapalı çevrim blok diyagramı (Closed loop block diagram of DC motor speed control system)

Çizelge 2. DA motoru parametreleri (DC motor parameters)

DA Motor Parametreleri	Parametre Değerleri
R_a (Ω)	0.4
L_a (H)	2.7
J (kgm^2)	0.0004
B (Nm/s/rad)	0.0022
K_m (Nm/A)	0.015
K_b (Vs/rad)	0.05

Çizelge 2'deki değerler denklem 9 ve 10'da yerine koyulursa aşağıdaki ifadeler elde edilir.

Şekil 3'e bakıldığında elde edilen çıkış hızının referansa gelmediği daha düşük bir değerde sabitlendiği görülmektedir. Şekil 3'te denetleyici olmadan sistemin verdiği cevabın oturma süresi (t_s), yükselme süresi (t_r), epe süresi (t_p), maksimum aşma (M_p) ve kalıcı durum hata (E_{ss}) değerleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Kontrolsüz DA motoru sisteminin zaman bölgesinde analizi (Time domain analysis of uncontrolled DC motor system)

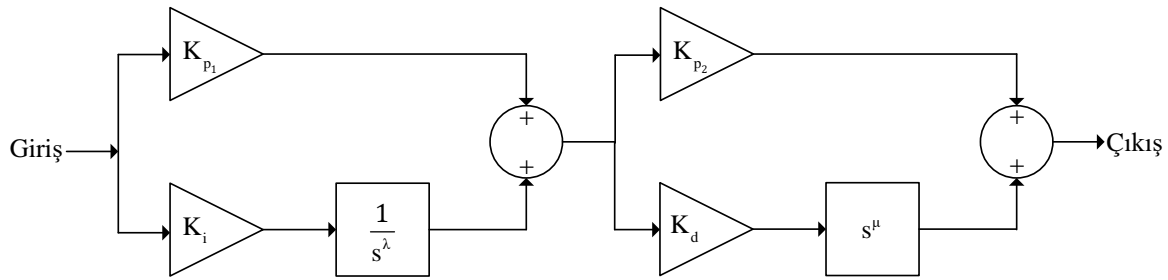
Ref.	t_s (%2)	t_r	t_p	E_{ss}	M_p (%)
1 p.u.	1.5095	0.5576	1.1578	0.0980	3.8519

1.2. Kesir Dereceli PI-PD Denetleyici (Fractional Order PI-PD Controller)

Kesir dereceli denetleyici tasarlamak için kesirli analiz kullanılır. Denklem 13'te ifade edilen sürekli integral-türev operatörü kesir dereceli denetleyicinin matematiksel modelini ortaya koymaktadır [24].

$${}_a^1 D_t^r = \begin{cases} d^r/dt^r & \Re(r) > 0, \\ 1 & \Re(r) = 0, \\ \int_a^t (d\tau)^{-r} & \Re(r) < 0, \end{cases} \quad (13)$$

Denklem 13'te a ve t işlemin sınırlarını, r işlemin derecesini ifade eder. Kesir dereceli ifade yazılırken



Şekil 4. FOPI-FOPD denetleyicisinin blok diyagramı (Block diagram of the FOPI-FOPD controller)

genellikle kullanılan Riemann-Liouville tanımı aşağıda verilmiştir [24].

$${}_a^1 D_t^r f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-1)} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{r-n+1}} d\tau \quad (14)$$

Denklem 14'te $n-1 < r \leq n$ aralığında ve $\Gamma(\cdot)$ gama fonksiyonudur. Gama fonksiyonunun ifadesi denklem 15'te verilmiştir.

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \quad (15)$$

Denklem 15'te z kompleks sayıyı ifade eder ve $\text{Re}[z] > 0$ olmalıdır.

Denklem 14'ün Laplace dönüşümü alınrsa denklem 16 elde edilir.

$$\int_0^\infty e^{-st} {}_a^1 D_t^r f(t) dt = s^r F(s) - \sum_{k=0}^{n-1} s^k {}_a^1 D_t^{r-k-1} f(t) \Big|_{t=0} \quad (16)$$

Denklem 16'da $s \equiv j\omega$ 'dir. Denklem 16 sayesinde kesir dereceli denetleyicinin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilebilir [24].

$$\text{FOPID} = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^\mu \quad (17)$$

Kesir dereceli denetleyici tasarımının benzetim ve gerçek zamanlı uygulamalarda kolayca kullanılabilmesi için tam sayı yaklaşımli yöntemler gerekir [37]. Burada kullanılan yaklaşım yöntemi Oustaloup özyinelemeli yaklaşımıdır. Bu yöntemle Laplace bölgesinde integral ve türev operatörlerinin nasıl elde edildiği aşağıda verilmiştir [38].

$$s^r \approx \omega_h^r \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k} \quad (18)$$

$$\omega'_k = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1-r)}{2N+1}} \quad (19)$$

$$\omega_k = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1+r)}{2N+1}}$$

Denklem 18 ve 19'da $2N+1$ analog filtre derecesini, ω_b, ω_h sırasıyla alt ve üst frekans sınırlarını temsil eder. Bu çalışmada filtre 5. dereceden olup, frekans alt ve üst sınırları sırasıyla 10^{-3} ve 10^3 rad/s değerlerindedir.

Bu çalışmada kullanılan denetleyici yapısı iki farklı kesir dereceli denetleyicinin peş peşe eklenmesiyle oluşturulmuştur. Bu yapı kesir dereceli PI-PD tasarımıdır ve Şekil 4'te kullanılan denetleyici tasarımı gösterilmektedir.

1.3. Serçe Arama Algoritması (Sparrow Search Algorithm)

Serçe arama algoritması Jiankai Xue ve Bo Shena tarafından 2020 yılında önerilmiş ve bu algoritma serçelerin avlanma sürecinden esinlenmiştir [34]. Serçeler iki tip davranış grubunda ifade edilir. Bu gruplardan ilki üreticiler ikincisi ise toplayıcılar. Üretici serçeler genellikle besin kaynağı ararken toplayıcı serçeler onları takip eder. Ayrıca serçeler besin kaynağı bulmak için hem üretici hem de toplayıcı olarak davranabilir. Serçelerin enerjisi azaldıkça toplayıcılığa yönelimleri artar [34].

Serçeler hem grup içi tehditlerle hem de dışardan gelen tehditlerle karşılaşabilir. Bazı serçeler grup içerisinde hedefledikleri üretici serçelerle rekabet haline girerek onların besinlerine yönelik saldırgan tutum izleyebilir. Serçelere karşı dışardan gelen tehdit durumlarında ise dış bölgelerde uçan serçeler daha güvenli alana doğru yönelirken, iç bölgedekiler komşularına daha yakın hareket eder. Ayrıca serçeler dış tehditlere karşı tüm grup üyelerini uyarmak için ses çıkarır [34].

Serçe arama algoritmasının matematiksel modelini ortaya koymak için serçelerin bahsedilen davranışları göz önüne alınmış ve bu davranışlara karşılık gelen kurallar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [34].

1) Üretici serçeler yüksek seviyede enerji rezervine sahiptir. Üretici serçelerin enerji rezerv seviyesi

bireylerin uygunluk (fitness) değerlerine göre belirlenir. Ayrıca üretici serçeler toplayıcı serçeler için yiyecek arama alanlarını belirler.

2) Serçeler avcı tehlikesini algıladığında cıvıdamaya başlar. Algılanan tehlike güvenlik eşiğinden büyükse tüm toplayıcılar güvenli alana yönlendirilir.

3) Her serçe daha iyi besin kaynaklarını aradığında üretici olabilir fakat popülasyondaki üretici ve toplayıcı oranı değişmez.

4) Enerjisi yüksek olan serçeler üretici olarak hareket ederken aklıktan ölmek üzere olan birkaç toplayıcı serçe yiyecek bulabilmek için daha uzun mesafeler alır.

5) Toplayıcı serçeler en iyi yiyeceği sağlayabilen üretici serçeleri takip eder. Fakat bazı toplayıcı serçeler kendi avlanma oranlarını arttırmak için üreticileri sürekli olarak takip ederek rekabeti arttırabilir.

6) Grubun ucundaki serçeler tehlikeli durumlarda güvenli alana doğru hareket eder. Grubun ortasındaki serçeler başkalarına yakın olmak için rastgele hareket eder.

Serçe arama algoritmasının üstte verilen kurallar çerçevesinde algoritma yazarları tarafından oluşturulmuş matematiksel modeli aşağıda anlatılmaktadır [34].

Serçelerin başlangıç konumu denklem 20'deki biçimde ifade edilir.

$$X = \begin{bmatrix} X_{1,1} & \cdots & X_{1,d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n,1} & \cdots & X_{n,d} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Burada n serçe sayısı, d problemin boyutu ifade eder. Başlangıç konumları kullanılarak serçelerin uygunluk değerleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$F_x = \begin{bmatrix} f([X_{1,1} & \cdots & X_{1,d}]) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f([X_{n,1} & \cdots & X_{n,d}]) \end{bmatrix} \quad (21)$$

Burada F_x her bireyin uygunluk değerini ifade eder. Üretici serçeler daha geniş bir alanda arama yapmakla görevlidir. Bu serçelerin konumları kural 1 ve 2'ye göre aşağıdaki biçimde güncellenir.

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \exp\left(\frac{-i}{a \cdot \text{iter}_{\max}}\right), & R_2 < ST \\ X_{i,j}^t + QL, & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (22)$$

Burada t geçerli iterasyon sayısını, iter_{\max} maksimum iterasyon sayısını ve "a" 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıyı ifade eder. $X_{i,j}^t$ konum ifadesindeki i kaçınıcı serçe, j kaçınıcı boyut olduğunu temsil etmektedir. " R_2 " 0 ile 1 arasında, "ST" 0.5 ile 1 arasında bir sayı alır. " R_2 " alarm değerini temsil ederken "ST" güvenlik eşiğini temsil eder. "Q" ile normal dağılıma sahip rastgele sayı üretilir. "L" içinde her elemanı 1 olan [1 x d] boyutunda vektörü temsil eder.

$R_2 < ST$ ise etrafta tehdit yoktur ve üretici serçe geniş alanda arama yapar. $R_2 \geq ST$ tehdit tespit edilir ve tüm serçeler güvenli alana yönelir.

Toplayıcı serçeler kural 4 ve 5'e göre hareket eder. Toplayıcılar üreticilerin yiyecek bulunduğu

öğrendiğinde rekabet için konumunu terk eder. Toplayıcılar rekabeti kazanırsa üreticilerin besinlerini elinden alırken kaybederlerse kural 5 uygulanmaya devam eder. Toplayıcılar için kuralların matematiksel hali aşağıda verilmiştir.

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \exp\left(\frac{X_{\text{worst}}^t - X_{i,j}^t}{i^2}\right), & i > n/2 \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}|A^+L, & \text{diğer} \end{cases} \quad (23)$$

Burada X_p üreticinin işgal ettiği en iyi konumdur. X_{worst} mevcut küresel en kötü konumu belirtir. A ($A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$) içindeki her öğeye rast gele 1 ya da -1 atar. $i > n/2$ ise toplayıcı büyük ihtimalle aklıktan ölmek üzeredir.

Algoritmada kural 6'ya göre tehlikeyi tespit edebilen serçeler popülasyonda %10 ile %20 arasındadır. Bu serçeler başlangıçta rastgele konumlarda oluşturulur. Bahsedilen ifadenin matematiksel modeli aşağıda verilmiştir.

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{best}}^t + \beta |X_{i,j}^t - X_{\text{best}}^t|, & f_i > f_g \\ X_{i,j}^t + K \left(\frac{|X_{i,j}^t - X_{\text{worst}}^t|}{(f_i - f_w) + \varepsilon} \right), & f_i = f_g \end{cases} \quad (24)$$

Burada X_{best} en iyi konumu temsil eder ve popülasyonun merkezini gösterir. f_i mevcut serçenin uygunluk değerini, f_g mevcut küresel en iyi uygunluk değerini ve f_w mevcut küresel en kötü uygunluk değerini temsil eder. Burada $f_i = f_g$ ise popülasyonun ortasında olan serçelerin tehlikenin farkında olduğunu gösterir. "β" 0 ile 1 arasında normal dağılıma göre rastgele sayı üreterek adım aralığını kontrol eden parametreyi temsil eder. "K" -1 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır ve serçenin hareket ettiği yön bilgisiyyle adım boyutu bilgisinin ifade eder.

"ε" sifıra bölme hatasını engellemek için en küçük sayıyı temsil eder. Burada $f_i > f_g$ ise serçenin grup kenarında olduğunu gösterir.

Serçe arama algoritmasının sözde kodu aşağıda verilmiştir [34].

G: Maksimum iterasyon sayısı

PD: Üretici serçe sayısı

SD: Tehlikeli durumu algılayan serçe sayısı

R_2 : Alarm değeri

n: Serçe sayısı

1 :while (t < G)

2 :Serçelerin uygunluk değerlerine göre mevcut en iyi ve en kötü tespiti yapılır.

3 : R_2 :rand(1)

4 :for i = 1: PD

5 :Denklem 22 kullanılarak serçe konumu güncellenir

6 :end for

7 :for i = (PD + 1): n

8 :Denklem 23 kullanılarak serçe konumu güncellenir


```

9   :end for
10  :for j=1:SD
11  :Denklem 24 kullanılarak serçe konumu
    güncellenir
12  :end for
13  :Yeni konum belirlenir
14  :Yeni konum önceki konuma göre daha iyi sonuç
    verdiyse konum güncellenir
15  :t=t+1
16  :end while
17  :return Xbest, fg

```

1.4. Amaç Fonksiyonları (Objective Functions)

Optimizasyon sürecinde amaç fonksiyonunun seçimi elde edilecek sonuç için önemli rol oynar [39]. Bu sebeple, farklı amaç fonksiyonlarının istenilen sonucu elde etmek için karşılaştırılması gereklidir. Bu çalışmada kullanılan amaç fonksiyonlarıyla elde edilmek istenen DA motoru hız tepkisinin oturma süresi, yükselme süresi ve maksimum aşma kriterlerini minimize etmektir. Burada kullanılan amaç fonksiyonları ITAE, IAE, ITSE, ISE ve ZLG'dir. IAE ve ISE amaç fonksiyonları aşmayı azaltmaya çalışır fakat zaman çarpanı olmadığından oturma süresi hesaba katmaz [40]. IAE ve ISE amaç fonksiyonlarının oturma süresindeki dezavantajı bu amaç fonksiyonlarına zaman çarpanı eklenerek (ITAE ve ITSE) giderilmeye çalışılmıştır. ZLG amaç fonksiyonu ise içinde doğrudan oturma süresi, yükselme süresi, maksimum aşma ve kalıcı durum hatasını barındırarak ITAE, IAE, ITSE ve ISE amaç fonksiyonlarına alternatif olarak ortaya koyulmuştur [40].

Bu çalışmada kullanılan amaç fonksiyonlarının matematiksel ifadeleri aşağıda verilmiştir.

fonksiyonunda ise M_p maksimum aşmayı, E_{ss} kalıcı durum hatasını, t_s oturma süresini ve t_r yükselme süresini ifade eder. Ayrıca ZLG amaç fonksiyonunda β ($= 1$) ağırlık kat sayısını, e ($= 2.7183$) ise Euler sayısını ifade etmektedir.

2. YÖNTEM VE BULGULAR (METHOD AND RESULTS)

Bu bölümde DA motoru hız kontrolü için önerilen denetleyici tasarımı farklı analizler açısından incelenmiş ve literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapılan çalışmalar güncel olması, yeni yaklaşımları barındırması ve önceki çalışmalara nazaran iyi sonuçlar ortaya koyması sebebiyle tercih edilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapılan çalışmalarda ve bu çalışmada optimum değeri aranan denetleyici parametrelerinin aralıklarının da aynı olmasına dikkat edilmiştir.

Bu bölümde yapılan analizler MATLAB/SIMULINK ortamında gerçekleştirilmiş ve beş alt başlık altında toplanmıştır. Bu başlıklar aşağıda verilmiştir.

- Zaman bölgesinde analiz
- Frekans bölgesinde analiz
- Gürbüzlük analizi
- Bozucu yük analizi
- Referans değişimi analizi

2.1. Zaman Bölgesinde Analiz (Time Domain Analysis)

Zaman bölgesinde yapılan analiz için öncelikle parametre aralıkları belirlenmiştir. Parametre aralıkları bu çalışmanın literatürdeki çalışmalarla adil olarak karşılaştırılabilmesi için literatürdeki kullanıma göre seçilmiştir [13,18,21]. Çalışmada belirlenen parametre aralıklarına göre amaç fonksiyonları üzerinden analiz gerçekleştirilmiş daha sonra literatürdeki çalışmalarla karşılaştırma yapılmıştır. Çizelge 4'te önerilen denetleyici için parametre aralıkları verilmiştir.

Çizelge 4. DC motor hız kontrolü için denetleyici parametrelerinin değer aralıkları (Value range of controller parameters for DC motor speed control)

Denetleyici	K_{p1}	K_{p2}	K_i	K_d	λ	μ
FOPI – FOPD	0.001-20	0.001-20	0.001-20	0.001-20	0.1-1	0.1-1

$$ITAE = \int_0^{t_{sim}} t|e(t)|dt \quad (27)$$

$$IAE = \int_0^{t_{sim}} |e(t)|dt \quad (28)$$

$$ITSE = \int_0^{t_{sim}} te^2(t)dt \quad (29)$$

$$ISE = \int_0^{t_{sim}} e^2(t)dt \quad (30)$$

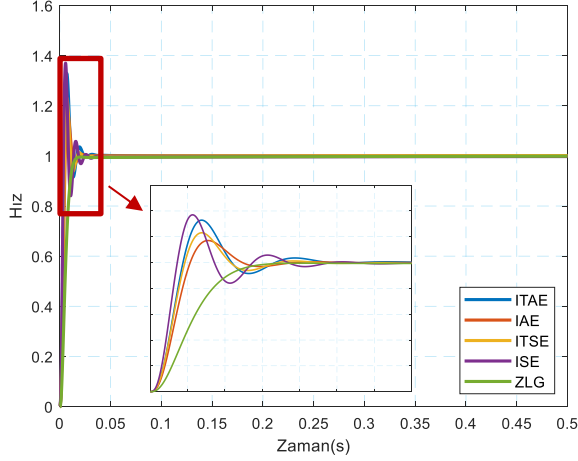
$$ZLG = (1 - e^{-\beta})(M_p + E_{ss}) + e^{-\beta}(t_s - t_r) \quad (31)$$

Yukarıda verilen ilk dört amaç fonksiyonundaki t zamanı, $e(t)$ hatayı temsil eder. ZLG amaç

2.1.1. Amaç fonksiyonu değerlendirme (Objective function evaluation)

Bu bölümde FOPI-FOPD denetleyicisi için farklı amaç fonksiyonlarıyla optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon algoritmasının iterasyon sayısı 650 ve popülasyon büyüklüğü 100'dür. Optimizasyon işlemi için benzetim çalışması süresi 0.5 saniye alınmıştır. Gerçekleştirilen optimizasyon işlemi sonucunda amaç fonksiyonlarının en iyi sonuçlarına göre DA motoru hızındaki değişim Şekil 5'te verilmiştir.

Şekil 5'te verilen DA motoru hızı değişimleri için kullanılan amaç fonksiyonlarının elde edilen en iyi sonuçları ve bu sonuçlara göre FOPI-FOPD parametre değerleriyle zaman bölgesindeki analiz sonuçları Çizelge 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Çeşitli amaç fonksiyonlarına göre elde edilen geçici yanıtlar (Various type objective functions based transient response)

ZLG fonksiyonunun kullanımıyla motor hızında, aşmanın ve oturma süresinin oldukça iyi yanıt verdiği görülmüştür. Bu sebeple literatürdeki çalışmaların sonuçlarıyla ZLG amaç fonksiyonunun kullanımıyla elde edilen sonuç karşılaştırılmıştır. Literatürde kullanılan FOPID denetleyiciyle önerilen FOPI-FOPD denetleyici yapısının karşılaştırılması Çizelge 6'da verilmiştir. Çizelge 6'da verilen literatürdeki çalışmalarda ZLG [18,21] ve ITAE [13,18] amaç fonksiyonları kullanılmıştır

Çizelge 6'da oturma süresi, yükselme süresi ve maksimum aşma incelendiğinde literatürdeki çalışmaların önerilen denetleyici tasarımıyla geçildiği görülmektedir. Çizelge 6'da verilen çalışmaların DA motoru hız kontrolünde adım yanıtları ise Şekil 6'da verilmiştir. DA motorunun hız kontrolü için önerilen denetleyicinin üstünlüğü Şekil 6'da açıkça görülmektedir.

Çizelge 5. Amaç fonksiyonlarının zaman bölgesi analiz sonuçları ve parametre değerleri (Time domain analysis results and parameter values of objective functions)

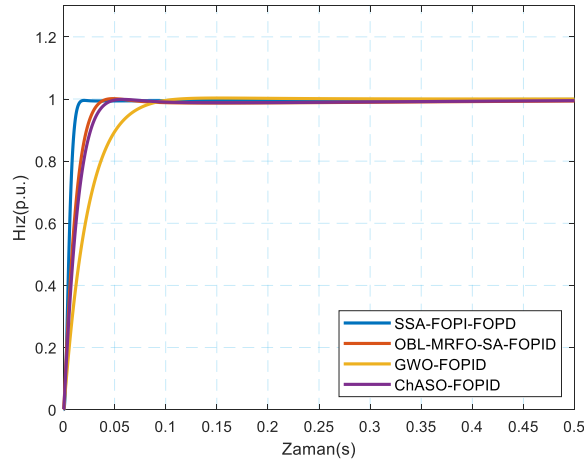
Amaç Fonksiyonu	En İyi Değer	K_{p1}	K_{p2}	K_i	K_d	λ	μ	$t_s(\%2)$	t_r	$M_p(\%)$
ITAE	$3.5 \cdot 10^{-5}$	20	9.2034	15.4591	2.8704	0.8430	0.9205	0.0216	0.0027	32.89
IAE	0.0041	19.0181	8.2574	2.3240	1.4856	0.6607	1	0.0166	0.0033	17.11
ITSE	$4 \cdot 10^{-6}$	2.2425	16.5390	7.6292	15.4080	1	1	0.0158	0.0028	23.11
ISE	0.0022	10.9318	9.0982	0.0010	4.5534	1	1	0.0223	0.0022	37.01
ZLG	0.0031	2.4718	20	0.6331	5.0454	0.8079	1	0.0143	0.0083	0

Çizelge 6. Literatürdeki çalışmaların parametre değerleri ile zaman bölgesi analiz sonuçlarının karşılaştırması (Comparison of parameter values and time domain analysis results with studies in the literature)

Algoritma-Denetleyici	K_{p1}	K_{p2}	K_i	K_d	λ	μ	$t_s(\%2)$	t_r	$M_p(\%)$
SAA-FOPI-FOPD	2.4718	20	0.6331	5.0454	0.8079	1	0.0143	0.0083	0
OBL-MRFO-SA-FOPID [15]	19.8080	-	9.9786	9.9504	0.8147	0.9030	0.0339	0.0214	0
GWO-FOPID [7]	18.3290	-	4.9418	3.2612	0.9998	0.9845	0.1172	0.0580	0.51
ChaSO-FOPID [12]	19.7722	-	9.1117	8.1189	0.8401	0.9112	0.0405	0.0253	0

Çizelge 5'te ve Şekil 5'te görüldüğü üzere motor hızında, Çizelge 5'te ve Şekil 5'te görüldüğü üzere motor hızında, en iyi oturma süresine sahip ve aşmanın olmadığı amaç fonksiyonu ZLG olmuştur. ZLG amaç fonksiyonunda diğer amaç fonksiyonlarına göre yükselme süresinde yaklaşık 3-4 kat daha yavaş tepki oluşmuştur. En iyi yükselme süresine ISE amaç fonksiyonunda ulaşıldığı fakat en yüksek aşmanın da burada olduğu görülmektedir.

2.1.2. Literatürle karşılaştırma (Comparison with the literature)



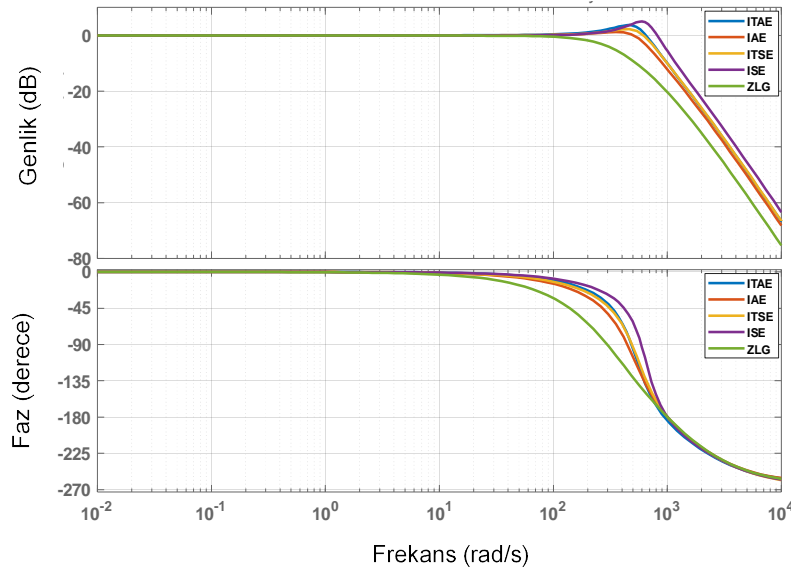
Şekil 6. Literatürdeki çalışmalarla geçici yanıt karşılaştırması (Transient response comparison with studies in the literature)

olan uzaklığı ifade eder. Hem faz hem de kazanç marjları sistemin kararsızlıktan ne kadar uzak olduğunu gösterir. Bant genişliği ise sistemin hızlı yanıt vermesiyle alakalıdır ve sistemin yükselme zamanıyla ters orantılı olarak değişir.

Bu bölümde, öncelikle zaman bölgesinde kullanılan amaç fonksiyonlarının en iyi sonuçları frekans bölgesinde analiz edilmiştir. Daha sonra ZLG amaç fonksiyonunun sonucu literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

2.2.1. Amaç fonksiyonu değerlendirilmesi (Objective function evaluation)

Amaç fonksiyonlarının sonuçları Şekil 7’de verilen bode grafiği sayesinde frekans bölgesinde karşılaştırılmaktadır.



Şekil 7. Çeşitli amaç fonksiyonlarına göre elde edilen bode grafikleri (Various type objective functions based bode plot)

2.2. Frekans Bölgesinde Analiz (Frequency Domain Analysis)

Frekans bölgesinde yapılan analizde sonuçların değerlendirilmesi için faz marjı, kazanç marjı ve bant genişliğinden yararlanılabilir. Faz marjı genliğin 0 dB olduğu frekans noktasındaki faz değerinin 180° olan uzaklığını belirtir. Kazanç marjı fazın -180° olduğu frekans noktasındaki kazanç değerinin 0 dB değerine

Şekil 7’de çeşitli amaç fonksiyonlarından elde edilen bode grafiklerinin kazanç marjı, faz marjı ve bant genişliği değerleri verilmiştir. Elde edilen değerlerin frekans bölgesindeki analiz sonuçları Çizelge 7’de verilmiştir

Çizelge 7’de görüldüğü üzere en yüksek kazanç ve faz marjı ZLG amaç fonksiyonunda elde edilmiştir. ISE amaç fonksiyonu için zaman bölgesinde yapılan analizde

Çizelge 7. Amaç fonksiyonlarının frekans bölgesindeki analizi (Frequency domain analysis of objective functions)

Amaç Fonksiyonu	Kazanç Marjı (dB)	Faz Marjı (deg.)	Bant Genişliği (Hz)
ITAE	8.55	39.2	744.43
IAE	12.2	72.2	636.30
ITSE	10.1	53.4	729.50
ISE	5.64	23.9	911.50
ZLG	20.5	180	260.49

yükselme süresinin çok kısa olması bant genişliğinden elde edilen sonuçla birbirini desteklemiş ve en yüksek değer olarak ortaya çıkmıştır. ZLG haricindeki amaç fonksiyonlarında hem kazanç hem de faz marjlarının düşük olması kararlılık açısından ZLG amaç fonksiyonunu frekans bölgesindeki analizde de ön plana çıkarmıştır.

göre daha iyi sonuç vermektedir. Karşılaştırma yapılan çalışmalarda elde edilen faz marjı bu çalışmadakine yakın çıkmıştır. Bant genişliğinde ise bu çalışmada elde edilen değer, literatürdeki çalışmalardan oldukça iyidir.

2.3. Gürbüzülük Analizi (Robustness Analysis)

Dış etkenler sebebiyle DA motoru parametre değerleri farklılıklar gösterebilir. Bu gibi oluşan anormal

Çizelge 8. Literatürdeki çalışmalarla frekans bölgesi analizi sonuçlarının karşılaştırması (Comparison of frequency domain analysis results with studies in the literature)

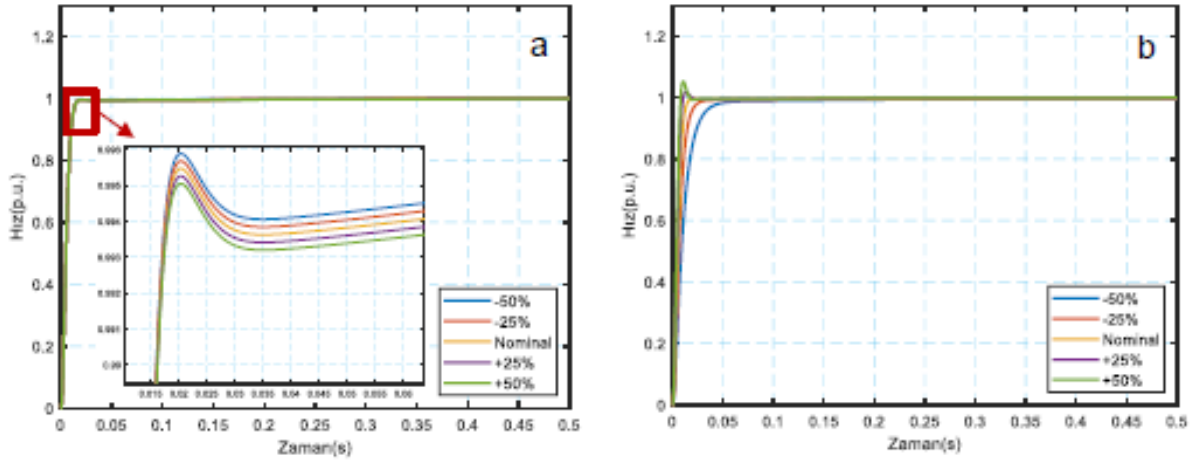
Objective Function	Kazanç Marjı (dB)	Faz Marjı (deg.)	Bant Genişliği (Hz)
SAA-FOPI-FOPD	20.5	180	260.49
OBL-MRFO-SA-FOPID [15]	Sonsuz	179.58	99.50
GWO-FOPID [7]	-	-	-
ChaSO-FOPID [12]	Sonsuz	179.35	84.80

2.2.3. Literatürle karşılaştırma (Comparison with the literature)

Çizelge 8'de literatürdeki çalışmalarla ZLG amaç fonksiyonunun sonucu frekans bölgesinde karşılaştırılmıştır.

durumlarda sistemde kullanılan kontrolcünün vereceği yanıt sistemin kararlılığını koruyacak biçimde olmalıdır.

Bu bölümde DA motorunun armatür direnci (R_a) ve moment sabiti (K_m) değiştirilerek gürbüzülük analizi gerçekleştirilmiştir. Bu değişimler -50%, -25%, +25%,



Şekil 8. a) Armatür direnci ve **b)** moment sabiti değişimi için gürbüzülük analizi (Robustness analysis for a) armature resistance and b) torque constant variation)

Çizelgede verilen sonuçlara göre FOPID kontrolcü +50% değerlerindedir. Yapılan değişimler sonucunda tasarımı kazanç marjında önerilen denetleyici yapısına önerilen denetleyicinin zaman bölgesinde analizi

Çizelge 9. Gürbüzülük analizi için zaman bölgesi analiz sonuçları (Time domain analysis results for robustness analysis)

Sabitler	Değişim Oranı (%)	t_s (s)	t_r (s)	t_p (s)	Tepe Değeri (p. u.)
R_a	-50	0.0143	0.0083	0.5000	0.9991
	-25	0.0143	0.0083	0.5000	0.9989
	+25	0.0143	0.0083	0.5000	0.9984
	+50	0.0144	0.0083	0.5000	0.9981
K_m	-50	0.0462	0.0214	0.5000	0.9979
	-25	0.0246	0.0124	0.5000	0.9984
	+25	0.0098	0.0062	0.0132	1.0179
	+50	0.0143	0.0050	0.0107	1.0519

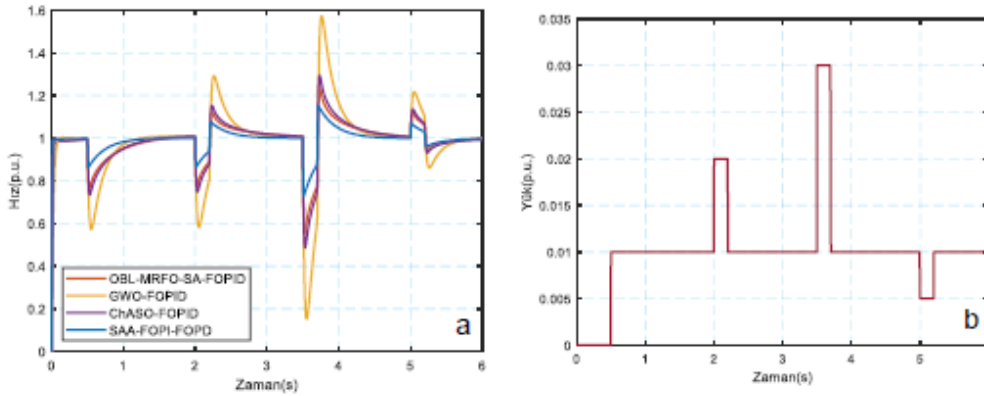
gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 8’de verilmiştir. Ayrıca şekilde nominal değerler için DA motoru hız yanıtı verilerek diğer durumlarla karşılaştırma imkânı sunulmuştur.

Şekil 8 verilen DA motoru geçici yanıtının zaman bölgesindeki analiz sonuçları Çizelge 9’da verilmiştir. Çizelge 9’da en yüksek tepe değeri 1.0519 p.u. (K_m +%50), oturma süresi 0.0462 s (K_m -%50), yükselme

durumlarında (K_m -%50,+%50) bile karşılaştırma yapılan çalışmaların nominal durumdaki performanslarını geçebildiği noktalar ortaya çıkmıştır.

2.4. Bozucu Yük Analizi (Load Disturbance Analysis)

Bu bölümde bozucu yük etkisi altında önerilen denetleyici zaman bölgesinde analiz edilmiştir. Sistemin bozucu yük analizi referansın 1 belirlendiği durum için yapılmıştır. Değişken bozucu yük ($T_{yük}$) sisteme farklı



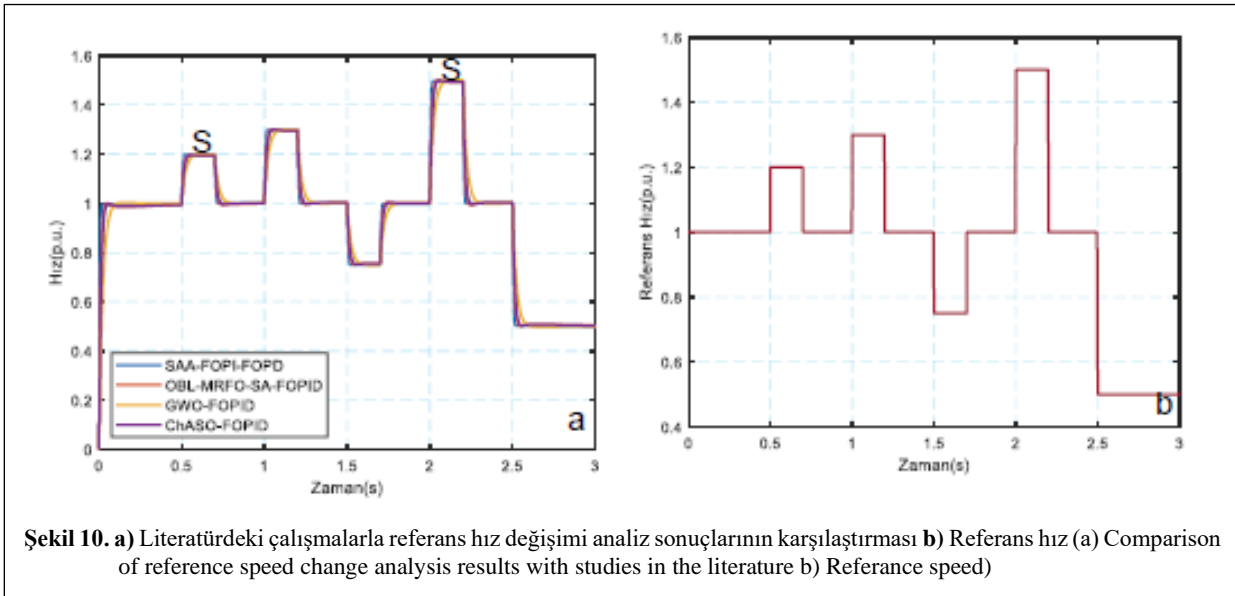
Şekil 9. a) Literatürdeki çalışmalarla bozucu yük analiz sonuçlarının karşılaştırması b) Bozucu yük (a) Comparison of disturbance load analysis results with studies in the literature b) Load disturbance)

süresi 0.0214 s (K_m -%50) ve tepe süresi 0.5000 s (K_m -%50,-%25, R_a -%50,-%25,+%25,+%50) olarak elde edilmiştir. Çizelge 9’da görüldüğü üzere armatür direnci değişiminde ortaya çıkan geçici yanıtlar direncin nominal değerindeki geçici yanıtına oldukça yakındır. Çizelge 9’da moment sabitinde yaşanan değişikliklerin sonucu incelendiğinde ise moment sabiti arttığında geçici yanıtta aşmaların arttığı fakat yükselme süresinin azaldığı görülmektedir. Moment sabiti azaldığında ise oturma zamanının azaldığı tespit edilmektedir.

Çizelge 9’daki analiz sonuçları incelendiğinde bozuk sistem parametrelerinin geçici yanıtı en çok etkilediği

zaman aralıklarında uygulanmıştır. Bu duruma karşı önerilen denetleyici ile karşılaştırma yapılan denetleyicilerin sonuçları ve sisteme uygulanan değişken bozucu yük Şekil 9’da verilmiştir

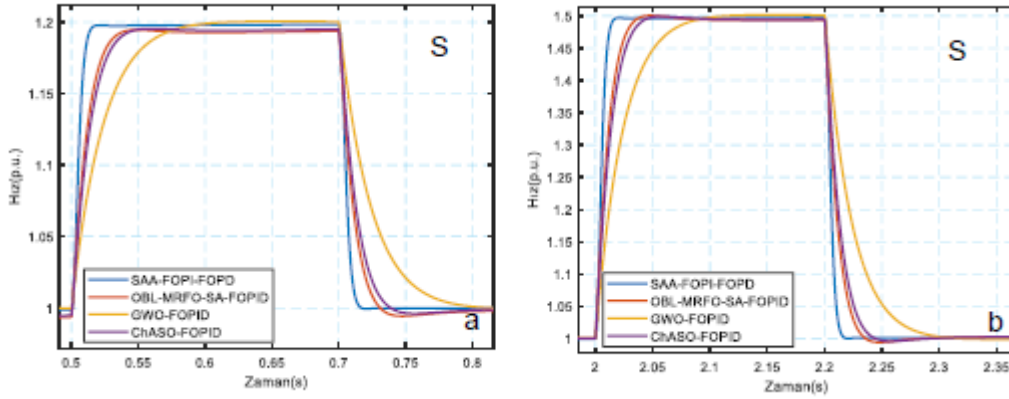
Şekil 9’da önerilen denetleyicinin literatürdeki çalışmalardan oldukça hızlı ve az sapma yaparak yükün hız değişikliği üzerindeki etkisini giderdiği görülmektedir. Bu durum önerilen denetleyici yapısının bozucu yük etkileri karşısında literatürdeki çalışmalara göre çok daha başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 10. a) Literatürdeki çalışmalarla referans hız değişimi analiz sonuçlarının karşılaştırması b) Referans hız (a) Comparison of reference speed change analysis results with studies in the literature b) Reference speed)

2.5. Referans Hız Değişimi Analizi (Reference Speed Change Analysis)

Bu bölümde referans hızın değişimine karşı denetleyicilerin tepkisi analiz edilmiştir. Sistemin başlangıçta hız referansı 0'dan 1 p.u. değerine çıkarılmış daha sonra değişken hız referansları sisteme uygulanmıştır. Değişken hız referanslarında önerilen denetleyici yapısı ve literatürdeki çalışmalar Şekil 10'da karşılaştırılmıştır. Ayrıca Şekil 10'da sisteme uygulanan referans hız değişikliği de verilmiştir. Şekil 10.a'daki literatür çalışmalarıyla önerilen denetleyici karşılaştırılmasında hız tepkilerinde değişikliklerin yakın olduğu görülmektedir. Bu değişiklikleri daha yakından inceleyebilmek için Şekil 10.a'da S1 (en küçük) ve S2 (en büyük) olarak belirtilen referans hız değişiklikleri Şekil 11'de verilmiştir



Şekil 11. a) S1 ve b) S2 referans hız değişimi analiz sonuçlarının karşılaştırması (Comparison of a) S1 and b) S2 reference speed change analysis results)

Şekil 11'deki sonuçlar incelendiğinde önerilen denetleyicinin literatürdeki denetleyicilere göre referans hızını takip konusunda daha başarılı olduğu açıkça görülmektedir

3. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu makalede DA motoru kontrolü için FOPID-FOPD denetleyici yapısının kullanılması önerilmiştir. Önerilen yapının parametreleri serçe arama algoritmasıyla farklı amaç fonksiyonları için optimize edilmiştir. Optimizasyon işleminden sonra zaman ve frekans bölgesinde analizler gerçekleştirilmiştir. Zaman ve frekans bölgesindeki analizlere göre en uygun değeri veren amaç fonksiyonunun (ZLG) sonuçları için gürbüzlük, bozucu yük ve referans hız değişimi analizleri yapılmıştır. Ayrıca aynı amaç fonksiyondan elde edilen sonuç literatürde yapılan çalışmaların sonuçlarıyla farklı açılardan karşılaştırılmıştır.

Yapılan çalışmanın sonuçları incelendiğinde farklı amaç fonksiyonlarının (ITAE, IAE, ITSE, ISE ve ZLG) zaman ve frekans bölgelerinde oldukça farklı sonuç ortaya koydukları görülmektedir. ZLG amaç fonksiyonunun sonucu zaman bölgesinde oturma zamanı (0.0143 s) ve aşma (0%) bakımından diğer amaç fonksiyonlarının

sonuçlarına göre oldukça iyidir. ZLG amaç fonksiyonunun sonucunda diğer amaç fonksiyonlarına göre iyi olmayan kısım yükselme zamanı (0.0083 s) olmuştur. Bu amaç fonksiyonları frekans bölgesinde karşılaştırıldığında ise kazanç ve faz marjı bakımından ZLG amaç fonksiyonundan elde edilen sonuç diğer amaç fonksiyonlarına göre oldukça iyi çıkmıştır. Fakat bant genişliğinde ZLG amaç fonksiyonunun sonucu diğer amaç fonksiyonlarına göre geride kalmıştır. Tüm bu sonuçlar incelendiğinde ZLG amaç fonksiyondan elde edilen sonuçlar ön plana çıkmıştır.

Önerilen FOPID-FOPD denetleyicisinin ZLG amaç fonksiyonuyla bulunan değerleri literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında zaman hem de frekans bölgesinde literatürdeki çalışmaların geçildiği görülmektedir. Yapılan gürbüzlük analizinde de

önerilen denetleyicinin kararlı yapısı belirgin biçimde görülmektedir. Önerilen denetleyicinin gürbüzlük analiziyle bozuk sistem parametrelerinin olduğu durumda bile literatürdeki çalışmaların nominal durumdaki sonuçlarının geçilebildiği ortaya çıkmıştır. Bozucu yük analiz edilerek diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında önerilen denetleyicinin üstünlüğü sapma miktarının az olması ve sistemin hızlı biçimde kararlı hale gelmesiyle açıkça ortaya konulmuştur. Referans hız değişimi analizinde de bozucu yük analizinde olduğu gibi önerilen denetleyicinin hızlı tepkisiyle kararlı durumu sağlaması literatürdeki denetleyicilere karşı üstünlüğünü gözler önüne sermiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Bora ÇAVDAR: Simülasyon çalışmalarını yapmış, sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

Erdinç ŞAHİN: Sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

Fatih Mehmet NUROĞLU: Sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Emiroğlu A., Yaren T., Kizir S., "Kendinden ayarlamalı denetleyici ile DA motor hız kontrolü", *Politeknik Dergisi*, 25(2): 757-765, (2022).
- [2] Maung, M. M., Latt, M. M., Nwe, C. M., "DC motor angular position control using PID controller with friction compensation", *International journal of scientific and research publications*, 8(11): 149-155, (2018).
- [3] Yüksek G., Mete A. N., Alkaya A., "PID parametrelerinin LQR ve GA tabanlı optimizasyonu: sıvı seviye kontrol uygulaması", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1111-1119, (2020).
- [4] Şahin H., "Adaptif Hız Kontrol (AHK) Sistemindeki Mesafe Kontrol Sisteminin Sabit Mesafe Ve Sabit Zaman Yöntemleriyle Uygulamalı Olarak Karşılaştırılması", *Politeknik Dergisi*, 20(1): 205-210, (2017)
- [5] Sahin, E., "Design of an optimized fractional high order differential feedback controller for load frequency control of a multi-area multi-source power system with nonlinearity", *IEEE Access*, 8:12327-12342, (2020).
- [6] Ayas, M. S., "Design of an optimized fractional high-order differential feedback controller for an AVR system" *Electrical Engineering*, 101(4): 1221-1233, (2019).
- [7] Bitar Z., Sandouk A., al Jabi S., "Testing the Performances of DC Series Motor Used in Electric Car", *Energy Procedia, Elsevier Ltd*, 74: 148-159, (2015).
- [8] Li Y., Tong S., Li T., "Adaptive fuzzy output feedback control for a single-link flexible robot manipulator driven DC motor via backstepping", *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 14: 483-494 (2013).
- [9] Shah R., Sands T., "Comparing methods of DC motor control for UAVs", *Applied Sciences*, 11: (2021).
- [10] Purnama H. S., Sutikno T., Alavandar S.R., Subrata A. C., "Intelligent Control Strategies for Tuning PID of Speed Control of DC Motor-A Review", *IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, 24-30, (2019).
- [11] Rodríguez-Molina A., Villarreal-Cervantes M.G., Aldape-Pérez M., "An adaptive control study for the DC motor using meta-heuristic algorithms", *Soft Computing*, 23: 889-906, (2019).
- [12] El-Deen A.T., Hakim Mahmoud A.A., El-Sawi A.R., "Optimal PID tuning for DC motor speed controller based on genetic algorithm", *International Review of Automatic Control*, 8: 80-85, (2015).
- [13] Agarwal J., Parmar G., Gupta R., Sikander A., "Analysis of grey wolf optimizer based fractional order PID controller in speed control of DC motor", *Microsystem Technologies*, 24: 4997-5006, (2018).
- [14] Agarwal J., Parmar G., Gupta R., "Application of Sine Cosine Algorithm in optimal control of DC motor and robustness analysis", *Wulfenia Journal*, 24: 77-95 (2017).
- [15] Ang K.H., Chong G., Li Y., "PID control system analysis, design, and technology", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13: 559-576, (2005).
- [16] Potnuru D., Alice Mary K., Sai Babu C., "Experimental implementation of Flower Pollination Algorithm for speed controller of a BLDC motor", *Ain Shams Engineering Journal*, 10: 287-295, (2019).
- [17] Achanta R.K., Pamula V.K., "DC motor speed control using PID controller tuned by Jaya Optimization Algorithm", *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, 983-987, (2017).
- [18] Hekimoglu B., "Optimal tuning of fractional order PID controller for DC motor speed control via Chaotic Atom Search Optimization Algorithm", *IEEE Access*, 7: 38100-38114, (2019).
- [19] Şahin A. K., Akyazi Ö., Şahin E., Çakir O., "Dc motorun hız kontrolü için meta-sezgisel algoritma tabanlı PID denetleyici tasarımı", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10: 533-549 (2021).
- [20] Bhatt R., Parmar G., Gupta R., A. Sikander, "Application of stochastic fractal search in approximation and control of LTI systems", *Microsystem Technologies*, 25: 105-114, (2019).
- [21] Ekinci S., Izci D., Hekimoğlu B., "Optimal FOPID speed control of DC motor via Opposition-Based Hybrid Manta Ray Foraging Optimization and simulated Annealing Algorithm", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46: 1395-1409, (2021).
- [22] Khanam I., Parmar G., "Application of SFS algorithm in control of DC motor and comparative analysis", *4th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics, (UPCON)*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 256-261, (2017).
- [23] Sahib M.A., Ahmed B.S., "A new multiobjective performance criterion used in PID tuning optimization algorithms", *Journal of Advanced Research*, 7: 125-134, (2016).
- [24] Chen Y.Q., Petráš I., Xue D., "Fractional order control - A tutorial", in: *Proceedings of the American Control Conference*, 1397-1411, (2009).
- [25] Podlubny I., "Fractional-order systems and PI λ D μ -controllers", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 44: 208-214, (1999).
- [26] Jain R. V., Aware M. V., Junghare A.S., "Tuning of Fractional Order PID controller using particle swarm optimization technique for DC motor speed control", in: *1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 1-4, (2017).
- [27] Roy A., Srivastava S., "Design of optimal PI λ D δ controller for speed control of DC motor using constrained particle swarm optimization", in:

- Proceedings of IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 1-6, (2016).
- [28] Çelik E., Öztürk N., “First application of symbiotic organisms search algorithm to off-line optimization of PI parameters for DSP-based DC motor drives”, *Neural Computing and Applications*, 30: 1689–1699, (2018).
- [29] Ahmed A., Gupta R., Parmar G., “GWO/PID approach for optimal control of DC motor”, in: *2018 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 181–186, (2018).
- [30] Çelik E., Gör H., “Enhanced speed control of a DC servo system using PI+DF controller tuned by stochastic fractal search technique”, *J Franklin Inst.*, 356: 1333–1359, (2019).
- [31] Ekinci S., Hekimoğlu B., Izci D., “Opposition based Henry gas solubility optimization as a novel algorithm for PID control of DC motor”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24: 331–342, (2021).
- [32] Izci D., “Design and application of an optimally tuned PID controller for DC motor speed regulation via a novel hybrid Lévy flight distribution and Nelder–Mead algorithm”, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 43: 3195–3211, (2021).
- [33] Çelik E., “Design of new fractional order PI–fractional order PD cascade controller through dragonfly search algorithm for advanced load frequency control of power systems”, *Soft Computing*, 25: 1193–1217, (2021).
- [34] Xue J., Shen B., “A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm”, *Systems Science and Control Engineering*, 8: 22–34, (2020).
- [35] Nise N.S., “Control Systems Engineering”, *John Wiley & Sons*, (2020).
- [36] Chapman S. J., “*Electric Machinery Fundamentals*”, McGraw-Hill, (2004).
- [37] Tabak A., “Maiden application of fractional order PID plus second order derivative controller in automatic voltage regulator”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31: (2021).
- [38] Pan I., Das S., “Fractional order AGC for distributed energy resources using robust optimization”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7: 2175–2186, (2016).
- [39] Paliwal N., Srivastava L., Pandit M., “Equilibrium optimizer tuned novel FOPID-DN controller for automatic voltage regulator system”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31: (2021).
- [40] Gaing Z.L., “A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19: 384–391, (2004).