

Elektrikli Araçlarda Kullanılan BLDC Motorun PI, PID, FOPI, FOPID ve FOPI+FOPD Tabanlı Kontrolörlerle Sürülmesi ve Verimliliklerinin Karşılaştırılması

Mirza Mashfiquur RAHMAN¹, Hilmi ZENK^{2*}

Öz

Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan motor yapıları ve kontrol yöntemleri incelenmiş, özellikle fırçasız doğru akım (BLDC) motorlarının sürücü ve kontrol sistemleri üzerinde durulmuştur. Simulink tabanlı bir model oluşturularak BLDC motor için farklı kontrolör yapıları (PI: Oransal-İntegral denetleyici, PID: Oransal-İntegral-Türev denetleyici, FOPI: Kesirli Dereceli PI denetleyici, FOPID: Kesirli Dereceli PID denetleyici, FOPI+FOPD: Kesirli Dereceli PI + Kesirli Dereceli PD denetleyicileri) test edilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları, klasik kontrolörlerin belirli ölçüde yeterli olmakla birlikte kesirli mertebeden kontrolörlerin daha esnek ve etkili performans sunduğunu göstermektedir. Özellikle FOPI+FOPD kontrolörünün hata kriterleri (ISE: Hata Kareleri Integrali, IAE: Hata Mutlak Değerinin Integrali, ITSE: Zaman Çarpanlı Hata Kareleri Integrali, ITAE: Zaman Çarpanlı Hata Mutlak Değerinin Integrali) açısından en düşük değerlere ulaştığı ve sistem kararlılığını artırdığı görülmüştür. Sonuçlar, elektrikli araç motor kontrolünde kesirli mertebeden kontrol yaklaşımlarının yüksek verimlilik ve güvenilirlik için güçlü bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, BLDC motor, Motor kontrolü, PI/PID denetleyicileri, Kesirli mertebeden kontrol.

Driving BLDC Motor Used in Electric Vehicles with PI, PID, FOPI, FOPID and FOPI+FOPD Based Controllers and Comparison of Their Efficiency

Abstract

In this study, motor structures and control methods used in electric vehicles are examined with a particular focus on the drive and control systems of brushless direct current (BLDC) motors. A Simulink-based model was developed, and various controller structures (PI: Proportional-Integral, PID: Proportional-Integral-Derivative, FOPI: Fractional-Order PI, FOPID: Fractional-Order PID, FOPI+FOPD: Fractional-Order PI + Fractional-Order PD) were tested for BLDC motor control. The simulation results indicate that while classical controllers provide satisfactory performance to some extent, fractional-order controllers offer more flexible and effective control capabilities. In particular, the FOPI+FOPD controller achieved the lowest values in the error criteria (ISE: Integral of Squared Error, IAE: Integral of Absolute Error, ITSE: Integral of Time-Weighted Squared Error, ITAE: Integral of Time-Weighted Absolute Error) and enhanced system stability. These findings demonstrate that fractional-order control approaches present a strong alternative for improving efficiency, reliability, and overall performance in electric vehicle motor control applications.

Keywords: Electric vehicles, BLDC motor, Motor control, PI/PID controllers, Fractional-order control.

¹Giresun Üniversitesi, FBE, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Öğrencisi, Giresun, Türkiye, mashfique19@gmail.com

²Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Giresun, Türkiye, hilmi.zenk@giresun.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Elektrikli araç teknolojisi, çevresel duyarlılığın artması ve fosil yakıt kaynaklarının azalması ile birlikte dünya genelinde hızla önem kazanmaktadır (Emadi ve ark., 2008). Elektrikli araç teknolojisindeki hızlı gelişmeler, yüksek verimlilik, düşük bakım gereksinimi ve hassas kontrol özelliklerine sahip motor sistemlerine olan talebi artırmıştır. Bu bağlamda, BLDC motorları, geleneksel fırçalı DC motorlarına göre üstün performans karakteristikleri sunarak elektrikli taşıt uygulamalarında kritik bir rol oynamaktadır.

BLDC motorlar özel elektrik makinesi grubundan olup senkron motor sınıfından elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren bir motor türüdür (Aktaş, 2020; Robotistan, 2023). BLDC motorların temel yapısal bileşenleri dört ana kategoride incelenmektedir: stator, rotor, konum sensörü ve sürücü devresi.

Stator, motorun sabit dış kısmını oluşturan ve üç fazlı bakır sargılardan (elektromıknatıslar) meydana gelen bileşendir. Stator sargıları yıldız veya üçgen konfigürasyonunda düzenlenebilir ve güvenlik ile verimli soğutma için yalıtım malzemeleri kullanılır (Krause ve ark., 2013). BLDC motorların rotor kısmında daimi mıknatıslar bulunurken statorda sargılar (elektromıknatıslar) yer alır. Kalıcı mıknatıslar, yüksek performans uygulamaları için neodimyum-demir-bor veya maliyet odaklı uygulamalar için ferrit malzemelerden üretilebilir (Mpc Magnetic, 2023).

Konum sensörleri, stator veya şaft üzerinde yerleştirilmiş Hall etkili sensörler veya optik enkodörlerden oluşmaktadır. Bu sensörler, rotorun konumu hakkında sürekli geri bildirim sağlayarak elektronik komütasyonun doğru zamanlamasını mümkün kılmaktadır (Embitel, 2023).

BLDC motorların çalışma prensibi, stator sargılarının belirli bir sırayla akım alması sonucu oluşan döner manyetik alan ile rotorun kalıcı mıknatıslarının sabit manyetik alanı arasındaki etkileşime dayanır. Elektronik komütasyon sistemi, stator sargılarına belirli bir zaman sırasına göre akım göndererek dönen bir manyetik alan oluşturur. Lorentz Kuvvet Yasasına göre bu manyetik alan, rotorun kalıcı mıknatıslarla etkileşime girerek bir kuvvet meydana getirir ve rotoru hareket ettirir. Bu süreç, Faraday'ın İndüksiyon Yasası'na dayanır ve fırçalı DC motorlardan farklı olarak mekanik komütasyon yerine elektronik komütasyon kullanır.

Trapezoidal kontrol olarak da bilinen altı adım komütasyon, basitlik ve yeterli performans arasında denge kurarak birçok elektrikli araç uygulamasında tercih edilen temel yöntemlerden biridir (Mohan ve ark., 2003). Bu yöntem, üç fazlı motorun aynı anda iki fazını enerjilendirip üçüncü fazı iletim dışı tutma esasına dayanır ve bu sayede optimum torka yakın bir yarı-dikdörtgen akım formu elde edilir.

Trapezoidal geri EMK dalga şekli, her elektriksel yarım çevrimde üç bölümden meydana gelir: 120° boyunca sabit kalan bir düz tepe bölgesi ve pozitif ile negatif kısımları bağlayan 30°'lik iki geçiş

bölgesi. Komütasyon zamanlaması, geri EMK dalga formunun düz tepe kısmına denk getirilir (Krishnan, 2001).

Standart komütasyon sırası altı adımda gerçekleşir:

- Adım 1 (0° - 60°): A→B fazları aktif, C fazı pasif
- Adım 2 (60° - 120°): A→C fazları aktif, B fazı pasif
- Adım 3 (120° - 180°): B→C fazları aktif, A fazı pasif
- Adım 4 (180° - 240°): B→A fazları aktif, C fazı pasif
- Adım 5 (240° - 300°): C→A fazları aktif, B fazı pasif
- Adım 6 (300° - 360°): C→B fazları aktif, A fazı pasif

Bu yöntem, mikrodeneleyici ve DSP tabanlı sistemlerde kolaylıkla dijital olarak uygulanabilmektedir. Temel avantajları arasında basit donanım ve algoritma, düşük kontrol işlemcisi ihtiyacı, yüksek verimlilik ($\sim 90\%$), otomotivde zorlu koşullara dayanıklılık, düşük maliyet ve bakım gereksinimi yer almaktadır (Bose, 2006; Ehsani ve ark., 2005; Kenjo ve Nagamori, 1985).

Bu çalışmada, BLDC motorun MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi ve altı adım komütasyon kullanılarak hız kontrolü simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Klasik denetleyiciler (PI ve PID) ile kesirli mertebeye denetleyiciler (FOPI, FOPID, FOPI+FOPD) karşılaştırılmış ve performansları ISE, IAE, ITSE ve ITAE gibi hata kriterleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Çalışmanın amacı, elektrikli araçlarda BLDC motor kontrolünde farklı denetleyici yapıların performansını ortaya koymak ve altı adım komütasyonun sınırlamalarını ve avantajlarını göstermek olarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, motor kontrol stratejilerinin seçimi ve tasarımı açısından hem akademik hem de endüstriyel araştırmalara ışık tutacaktır.

Literatürde, BLDC motorların hız kontrolü için klasik PI ve PID tabanlı denetleyicilerin altı adımlı komütasyon ile birlikte kullanıldığı çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda temel olarak denetleyici parametrelerinin motorun dinamik performansına etkisi incelenmiş olsa da, klasik denetleyicilerin farklı hata kriterleri üzerinden kapsamlı bir değerlendirmesi sınırlı kalmıştır (Adila ve ark., 2024). Öte yandan, bazı araştırmalarda kesirli mertebeye FOPI veya FOPID denetleyiciler kullanılarak daha esnek kontrol özellikleri elde edildiği rapor edilmiştir; ancak bu çalışmalar genellikle tek bir kesirli mertebeye denetleyici üzerinde durmakta ve farklı kesirli mertebeye kontrol yapıları arasında bir karşılaştırmaya yer vermemektedir (Vanchinathan ve Selvagesan, 2021). Ayrıca literatürde BLDC motorların MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi ve komütasyon tekniklerinin analiz edildiği çalışmalar bulunmakla birlikte, farklı kontrolör yapılarına ilişkin performansın ISE, IAE, ITSE ve ITAE gibi hata kriterleri üzerinden bütüncül bir şekilde değerlendirilmesi sınırlıdır (Durmuş ve Temir, 2023). Bu çalışma, klasik (PI, PID) ve kesirli mertebeye

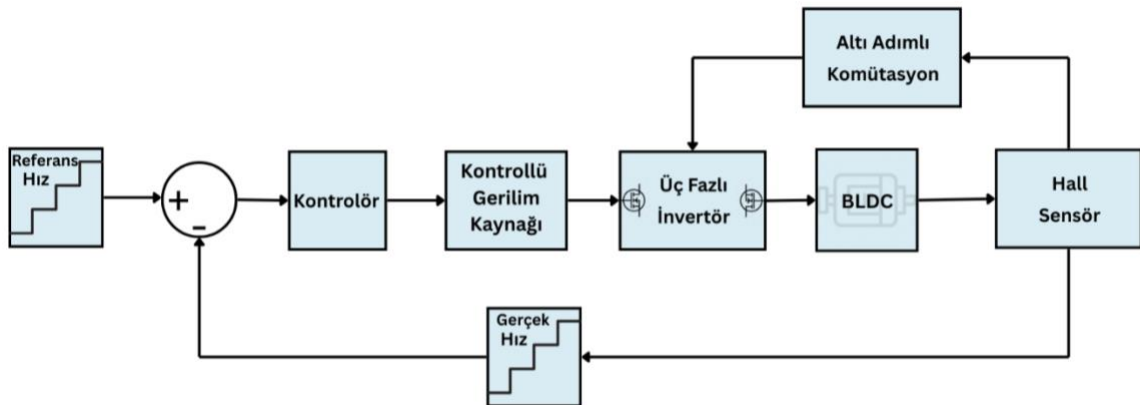
(FOPI, FOPID, FOPI+FOPD) kontrolörleri hem modelleme hem de performans ölçütleri açısından birlikte ele alarak literatürdeki bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan BLDC motorlarının hız kontrol performansı incelenmiştir. Simülasyonlar, MATLAB R2021a ortamında gerçekleştirilmiş ve motor modellemesi ile kontrol algoritmaları için Simscape Electrical kütüphanesi ve FOMCON Toolbox kullanılmıştır. Modelleme sürecinde, literatürde yaygın olarak kabul gören motor parametreleri ve gerçekçi sistem özellikleri dikkate alınarak, BLDC motorun davranışını doğru şekilde temsil eden bir Simulink modeli oluşturulmuştur.

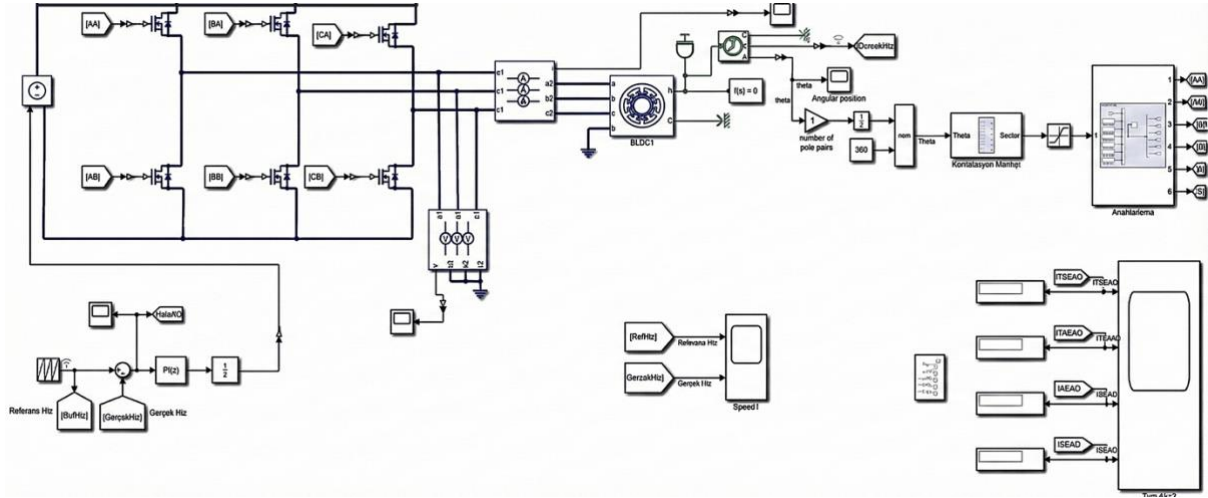
2.1. Simülasyon Modeli ve Sistem Yapısı

Simülasyon sistemi, BLDC motor, üç fazlı invertör, rotor pozisyon belirleme bloğu, altı adımlı komütasyon mantığı, kontrolör blokları ve performans ölçüm birimlerinden oluşmaktadır. Sistemde, kullanıcı tarafından belirlenen referans hız sinyali ile motorun gerçek hızı karşılaştırılarak elde edilen hata sinyali kontrolörlere giriş olarak verilmiştir. Bu hata sinyali, tasarlanan PI, PID, FOPI, FOPID ve FOPI+FOPD kontrolörleri tarafından işlenmiş, kontrol sinyali aracılığıyla invertör tetiklenmiş ve motorun kapalı çevrim hız kontrolü sağlanmıştır. Hall sensörleri veya simülasyon amacıyla kullanılan ideal dönme hareketi sensörleri, rotor konum bilgisini sağlayarak doğru komütasyon ve invertör anahtarlama sırasını belirlemiştir. Şekil 1’de bu sistemin blok diyagramı verilmiştir:



Şekil 1. Sistemin Blok Diyagramı

Yukarıda sistemin blok diyagramı verilmişti. Aşağıdaki Şekil 2’de Simulink ortamında oluşturulan tam model ekran görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 2. BLDC motor Simulink modeli

2.2. BLDC Motorunun Matematiksel Modeli

Aşağıda üç fazlı fırçasız doğru akım (BLDC) motorunun Simulink’te kullanılan yaygın matematiksel modeli verilmiştir. Model, üç fazlı faz denklemleri (elektriksel), elektromekanik tork ifadesi ve rotor dinamiğini (mekanik) içerir. Trapezoidal (altı adım) komütasyon uygulamalarında arka emk (back-EMF) ve tork dağılımı genellikle açısız konuma bağlı şekil fonksiyonları ile modellenir.

BLDC motor, üç fazlı faz denklemleri ve rotor mekaniği ile modeller. Faz gerilimleri aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$v_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a(\theta, \omega) \quad (1)$$

$$v_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b(\theta, \omega) \quad (2)$$

$$v_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c(\theta, \omega) \quad (3)$$

Ayrıca üç faz akımının toplamı nötr koşulundan dolayı genellikle sıfır alınır:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (4)$$

Back-EMF ve tork dağılımları açısız pozisyona bağlı $f_{a,b,c}(\theta)$ ve $g_{a,b,c}(\theta)$ fonksiyonları ile modellenmiş olup eşitlik 5 ve 6 kullanılmıştır.

$$e_a(\theta, \omega) = k_e f_a(\theta) \omega, \quad e_b(\theta, \omega) = k_e f_b(\theta) \omega, \quad e_c(\theta, \omega) = k_e f_c(\theta) \omega \quad (5)$$

$$T_e(\theta, i_a, i_b, i_c) = k_t (g_a(\theta) i_a + g_b(\theta) i_b + g_c(\theta) i_c) \quad (6)$$

Rotor dinamiği Newton-Euler denklemi (Eş. 7) ile verilir:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_L - B \omega \quad (7)$$

Rotor açısal hızı ve açısal pozisyon ilişkisi (Eş. 8):

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (8)$$

Modelde trapezoidal back-EMF profili ve altı adım komütasyon varsayılmıştır.

2.3. Kontrolör Tasarımı

Çalışmada hem klasik hem de modern kesirli mertbe kontrolörler değerlendirilmiştir:

- PI kontrolör: Oransal ve integral bileşenlere sahip olup hatayı zamanla azaltır ve basit yapısı ile hızlı yanıt sağlar (Zenk, 2016a). Denklem 9’da bu kontrolörün transfer fonksiyonu görülmektedir.

$$\frac{u(s)}{e(s)} = G_{PID} = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (9)$$

- PID kontrolör: Oransal, integral ve türevsel bileşenleri ile ani değişimlere karşı daha kararlı bir performans sunar (Zenk, 2016b; Zenk ve Akpınar, 2014). Denklem 10’da bu kontrolörün transfer fonksiyonu görülmektedir.

$$\frac{u(s)}{e(s)} = G_{PID} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (10)$$

- FOPI kontrolör: Integral kısmı kesirli derecede çalışarak esnek ayarlama imkânı sağlar ve hassas kontrol sunar (Zenk, 2019). Denklem 11’de bu kontrolörün transfer fonksiyonu görülmektedir.

$$\frac{u(s)}{e(s)} = G_{FOPID} = K_P + \frac{K_I}{s^\lambda} \quad (11)$$

- FOPID kontrolör: Hem integral hem türev kısmında kesirli dereceler kullanır; klasik PID’ye göre daha yüksek doğruluk ve kararlılık sağlar (Zenk, 2020). Denklem 12’de bu kontrolörün transfer fonksiyonu görülmektedir.

$$\frac{u(s)}{e(s)} = G_{FOPID} = K_P + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu \quad (12)$$

- FOPI+FOPD kontrolör: Kesirli PI ve kesirli PD yapısını birleştirir, en esnek ve hassas kontrol çözümünü sunar. Transfer fonksiyonu Denklem 13’te görülmektedir.

$$\frac{u(s)}{e(s)} = G_{(FOPI+FOPD)}(s) = \left(K_P + \frac{K_I}{s^\lambda} \right) (K_P + K_D s^\mu) \quad (13)$$

Kontrolör parametreleri, literatür taramaları ve simülasyon testleri doğrultusunda optimize edilmiştir. Her bir kontrolör için motor hız yanıtları kaydedilmiş ve karşılaştırmalı analiz yapılmıştır.

2.4. Performans Ölçütleri

Denetleyicilerin etkinliği, Eşitlik 14 ile 18 arasında görülen dört yaygın hata kriteri kullanılarak değerlendirilmiştir:

- ISE: Hata sinyalinin karesinin zamana göre integrali alınarak hesaplanır. Büyük hatalara daha fazla ağırlık verir.
- IAE: Hata sinyalinin mutlak değerinin zamana göre integrali alınır. Hataları eşit şekilde değerlendirir.
- ITSE: Hata sinyalinin karesi zamanla çarpılarak integrali alınır. Zaman ilerledikçe hatalara daha fazla ağırlık verir.
- ITAE: Hata sinyalinin mutlak değeri zamanla çarpılarak integrali alınır . Uzun süre devam eden hatalara daha çok ağırlık vererek düşük aşma ve kısa yerleşme süresi sağlar.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (14)$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (15)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} te^2(t) dt \quad (16)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (18)$$

Bu kriterler, her bir kontrolörün referans hız ile gerçek hız arasındaki performansını nesnel olarak değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Simülasyonlarda, beş farklı kontrolör aynı sistem üzerinde uygulanmış, yalnızca kontrolör yapıları değiştirilmiş ve her bir denetleyici için hız yanıtları ile hata göstergeleri karşılaştırılmıştır.

2.5. Analiz ve Karşılaştırma

Simülasyon sürecinde, her kontrolör için referans hız ve motorun gerçek hızı grafiksel olarak incelenmiş, performans ölçütleri hesaplanmış ve tablo ve grafiklerle görselleştirilmiştir. Bu analiz sayesinde, klasik ve kesirli mertebe denetleyicilerin motor dinamiklerine etkisi, hata davranışı ve sistem kararlılığı net bir şekilde ortaya konmuştur. Sonuçlar, BLDC motor kontrolünde hangi denetleyici yapısının üstün performans sunduğuna dair karşılaştırmalı bir değerlendirme imkânı sağlamaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, BLDC motorun hız kontrol performansı, beş farklı kontrolör (PI, PID, FOPI, FOPID ve FOPI+FOPD) kullanılarak incelenmiş ve simülasyon sonuçları detaylı bir şekilde

değerlendirilmiştir. Simülasyon çıktıları, her kontrolörün referans hıza ulaşma süresi, kararlı duruma geçiş süresi, aşım miktarı ve hata kriterleri bakımından karşılaştırılmasını sağlamaktadır.

3.1. Kontrolörlerin Hata Kriterleri Karşılaştırması

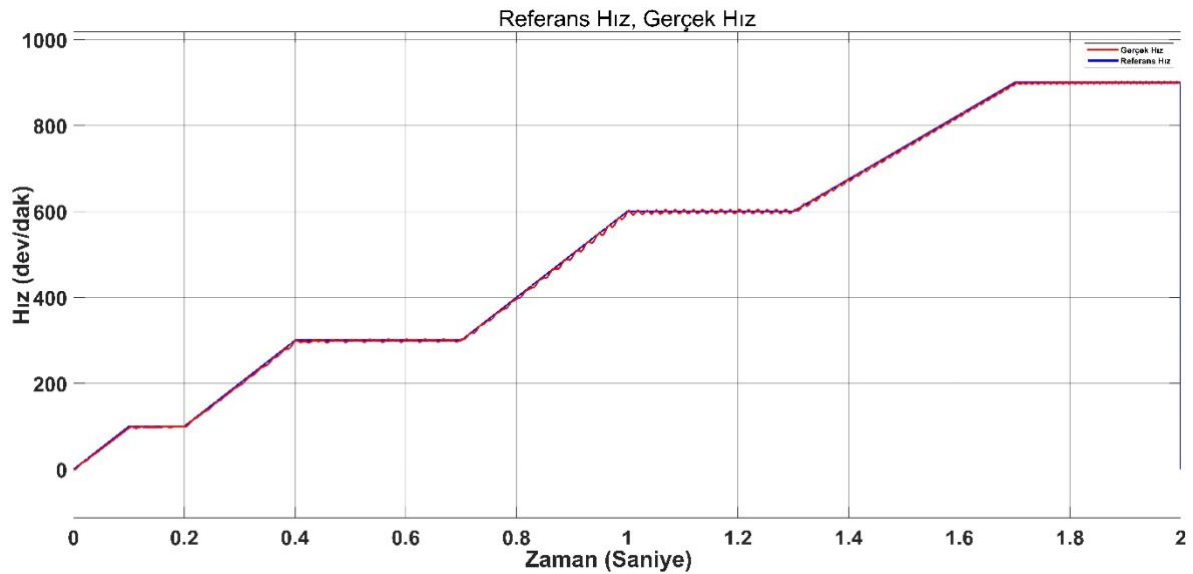
Tablo 1’de tüm kontrolörlerin hata kriterleri özetlenmiştir:

Tablo 1. Kontrolörlerin hata kriterleri

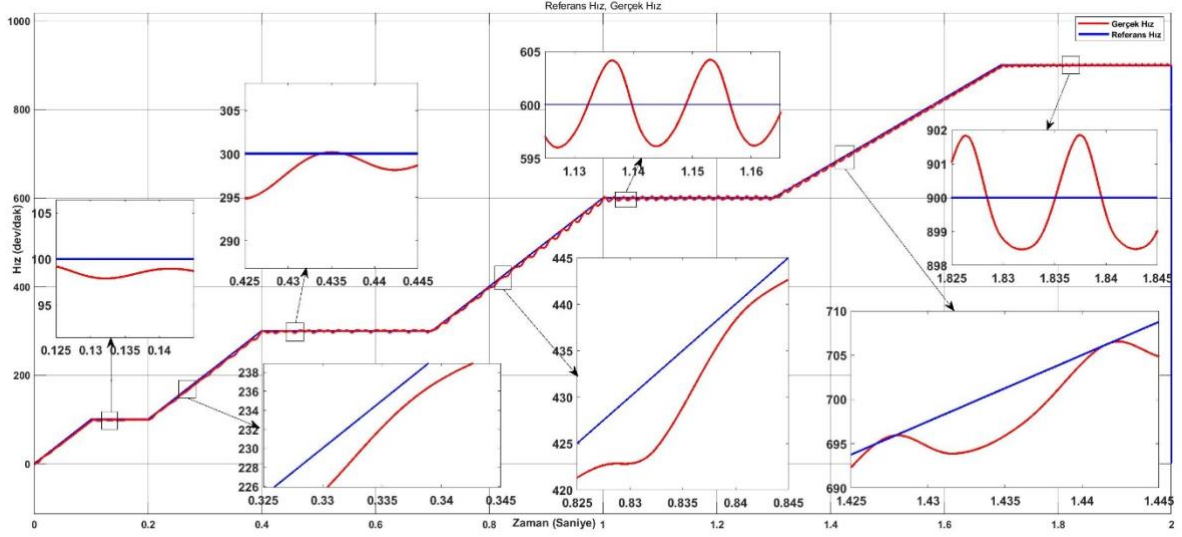
	Hata Kriterleri			
	ISE	IAE	ITSE	ITAE
PI	21,36	5,281	20,29	5,093
PID	17,84	4,918	17,40	4,731
FOPI	15,77	4,931	19,16	5,533
FOPID	16,09	4,981	19,54	5,599
FOPI+FOPD	10,51	3,915	13,93	4,391

3.2. Hız Takip Performansı

PI kontrolör kullanıldığında, motor başlangıçta referans hıza hızlı bir şekilde yaklaşabilmiş, ancak özellikle 500–1000 dev/dak hız aralığında belirgin dalgalanmalar gözlenmiştir (Şekil 3 ve Şekil 4). Kararlı durum hatası ortalama 5 birim olarak ölçülmüş, sistemin hassasiyetinin sınırlı olduğu anlaşılmıştır.

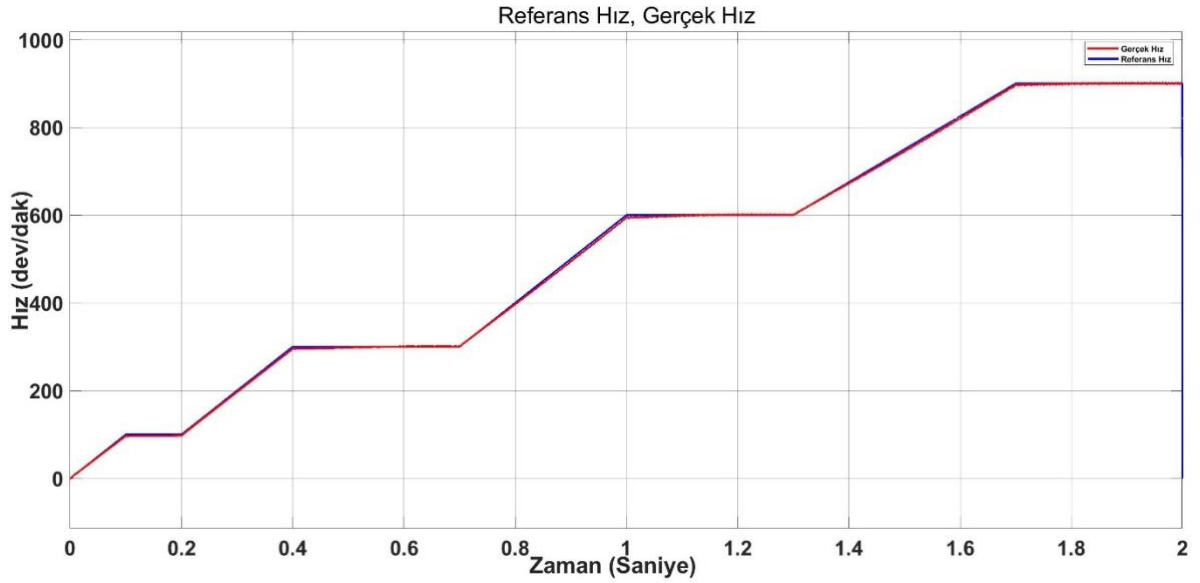


Şekil 3. PI Kontrolör Hız Karşılaştırma Grafiği

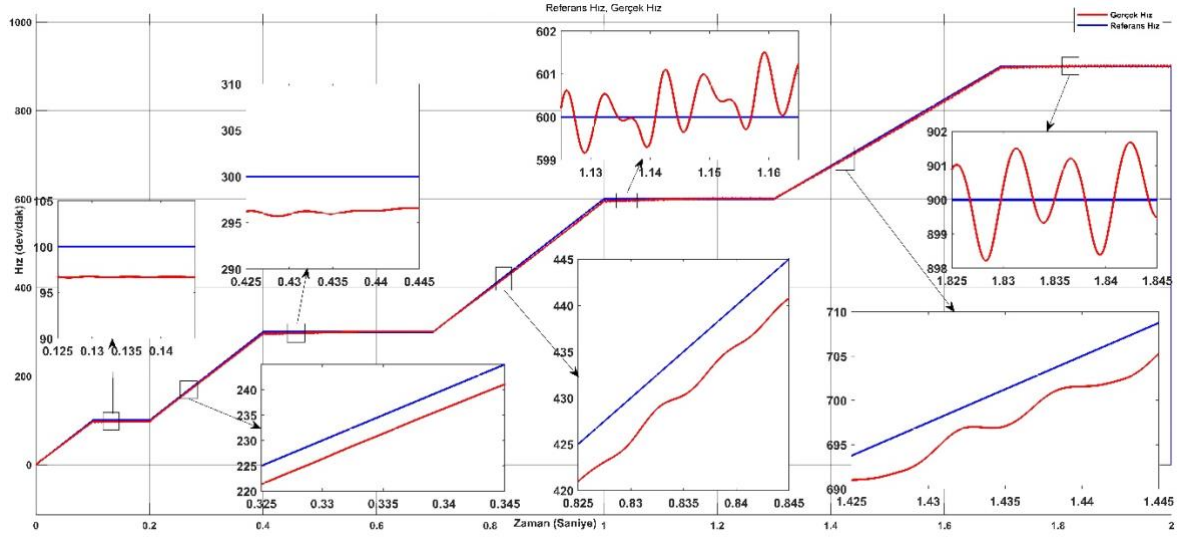


Şekil 4. PI Kontrolör Büyütülmüş Hız Grafiği

PID kontrolör ile yapılan simülasyonlarda, motor gecikme yaşasa da PI kontrolöre kıyasla daha hızlı ve daha doğru bir şekilde referans hıza yakınsama göstermiştir (Şekil 5 ve Şekil 6). Kararlı durum hatası ortalama 3 birim olup, kısa süreli salınımlar türevsel bileşen ile sınırlanmıştır. Bu, PID kontrolörün hız takip performansında belirgin bir iyileşme sağladığını göstermektedir.

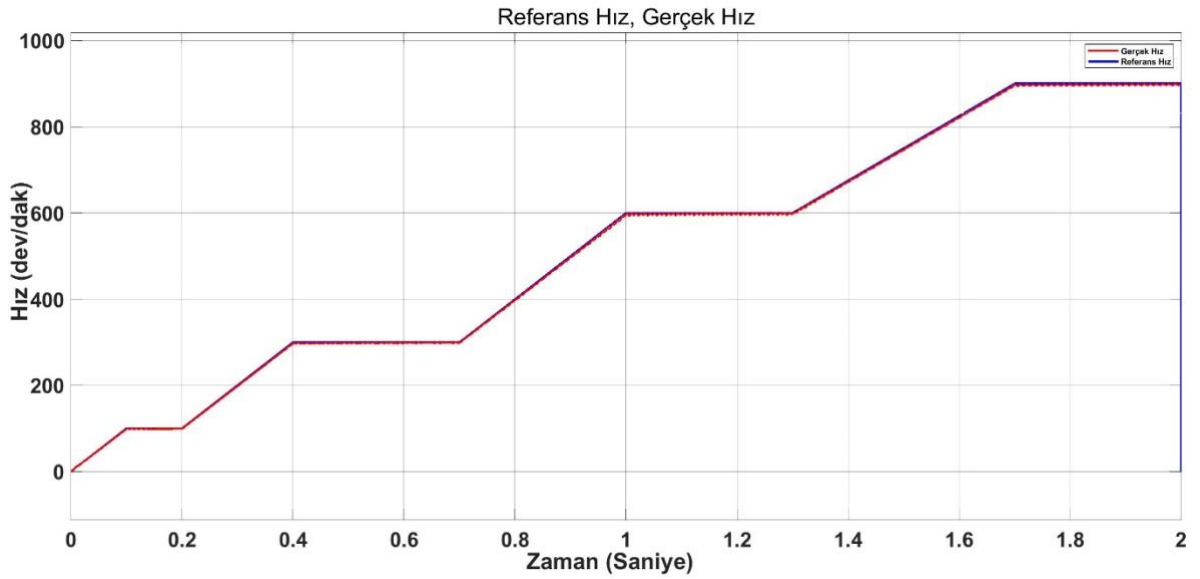


Şekil 5. PID Kontrolör Hız Karşılaştırma Grafiği

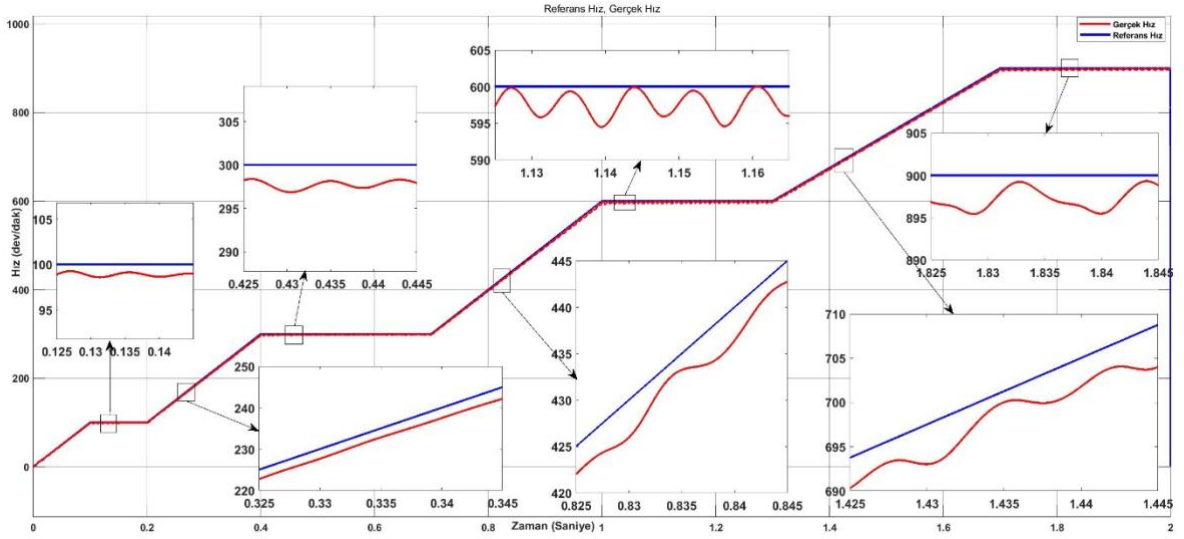


Şekil 6. PID Kontrolör Büyütülmüş Hız Grafiği

FOPI kontrolör kullanıldığında, referans hıza yakınsama davranışı PI kontrolöre göre daha pürüzsüz olmuş, aşım miktarı ve dalgalanmalar belirgin şekilde azalmıştır (Şekil 7 ve Şekil 8). Kararlı durum hatası ortalama 3 birim olarak ölçülmüş ve kesirli integral derecesi sayesinde hata birikimi minimum seviyeye inmiştir.

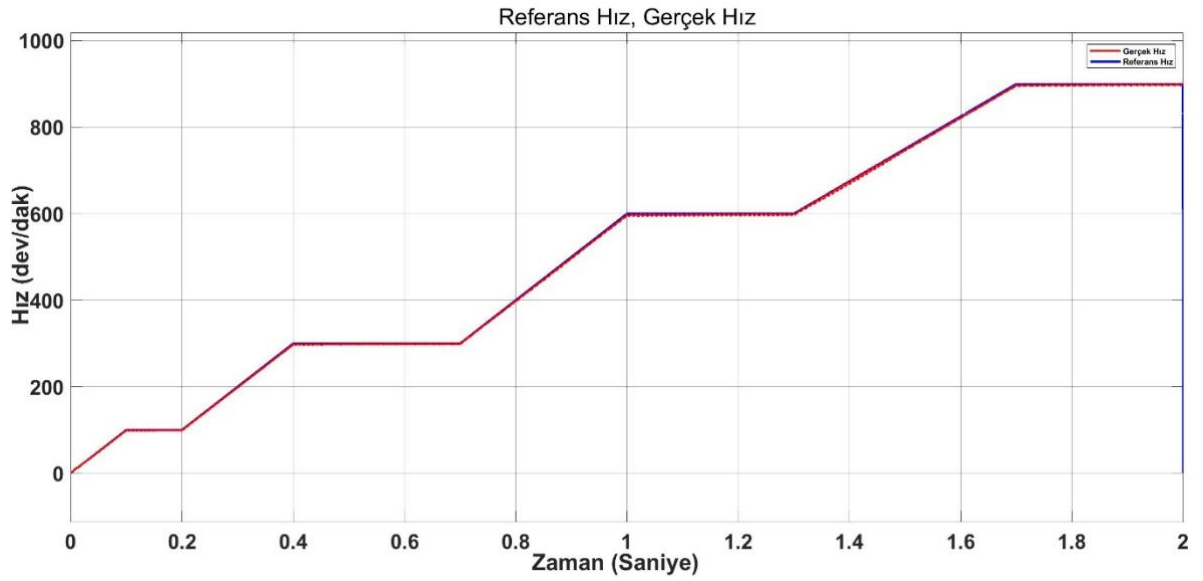


Şekil 7. FOPI Kontrolör Hız Karşılaştırma Grafiği

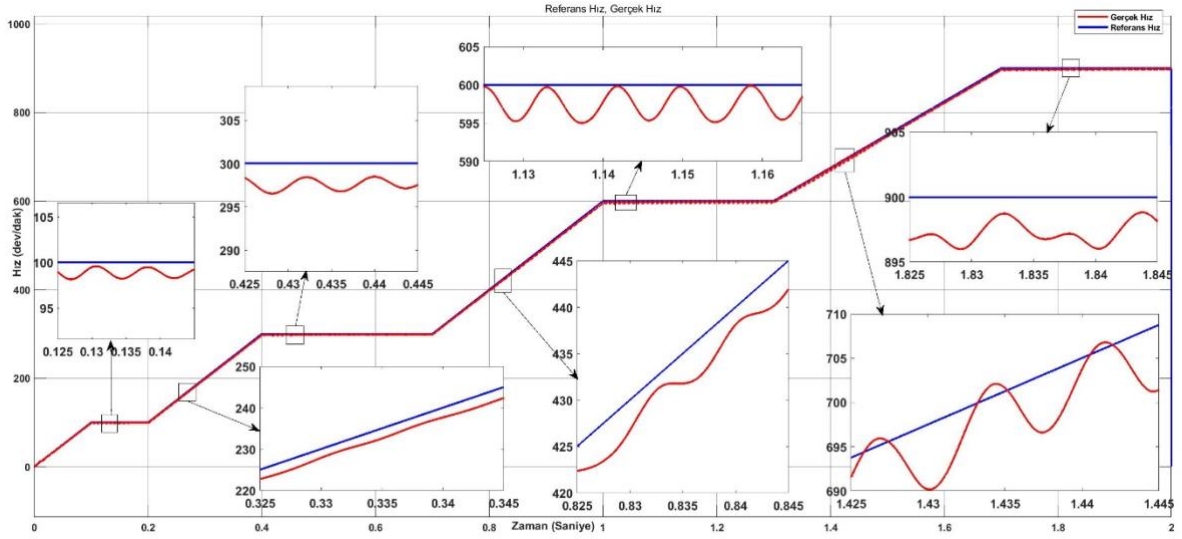


Şekil 8. FOPI Kontrolör Büyütülmüş Hız Grafiği

FOPID kontrolör, PI, PID ve FOPI kontrolörlere göre daha düşük dalgalanma üretmiş ve kararlı duruma daha hızlı geçiş sağlamıştır (Şekil 9 ve Şekil 10). Kesirli türev derecesi, ani değişimlere yumuşak tepki verilmesini sağlayarak sistemin stabilitesini artırmıştır.

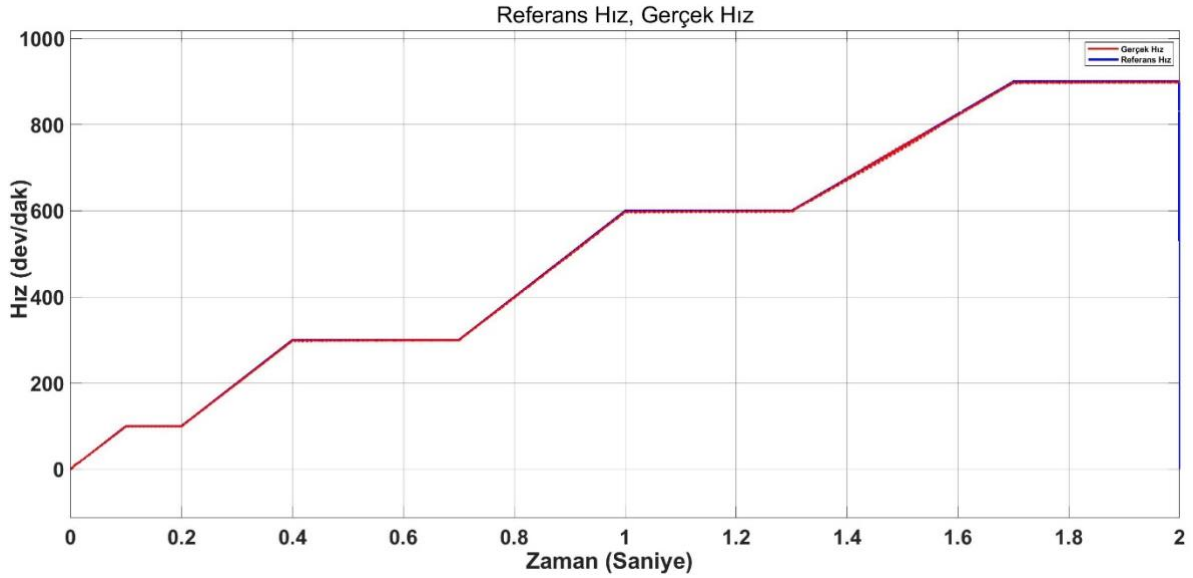


Şekil 9. FOPID Kontrolör Hız Karşılaştırma Grafiği

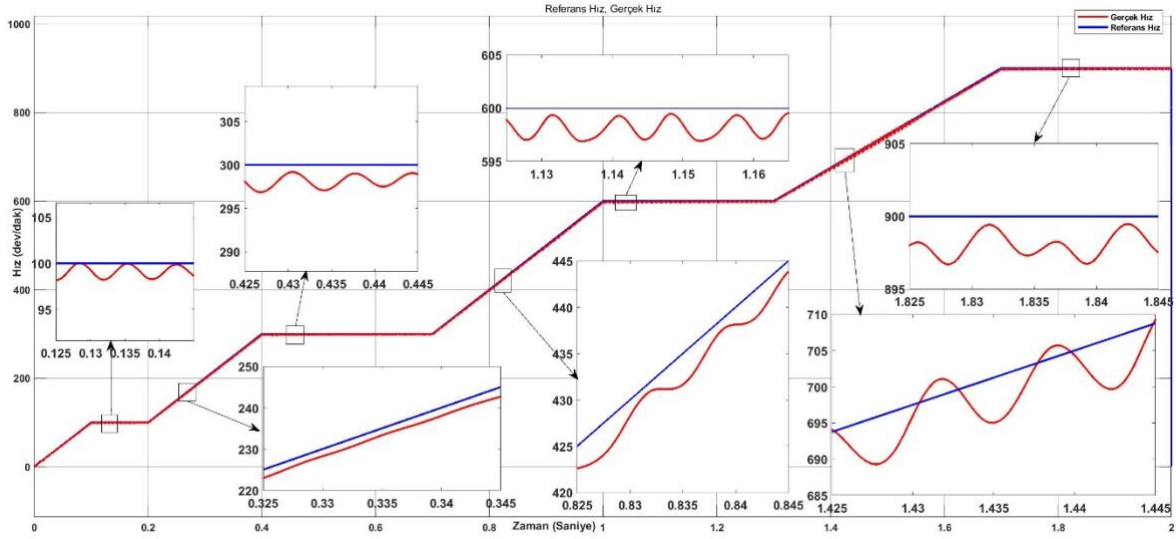


Şekil 10. FOPID Kontrolör Büyütülmüş Hız Grafiği

FOPI+FOPD kontrolör, tüm kontrolörler arasında en üstün hız takip performansını göstermiştir (Şekil 11 ve Şekil 12). Motor referans hıza kısa sürede ulaşmış, aşım miktarı düşük seviyelerde gerçekleşmiş ve kararlı durum hatası minimal düzeyde olmuştur. Bu sonuç, kesirli integral ve türev bileşenlerinin kombinasyonunun sistemin hem hata birikimini etkin şekilde azaltmasını hem de ani değişimlere yumuşak tepki vermesini sağlamaktadır.



Şekil 11. FOPI+FOPD Kontrolör Hız Karşılaştırma Grafiği

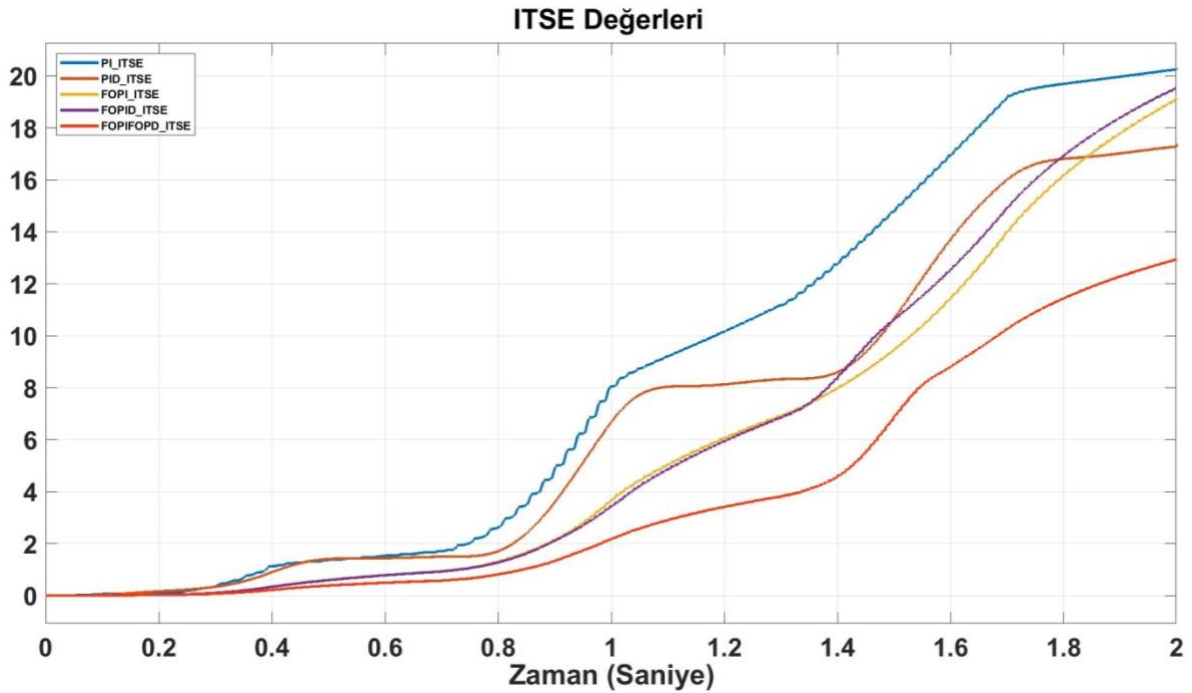


Şekil 12. FOPI+FOPD Kontrolör Büyütülmüş Hız Grafiği

3.3. Hata Kriterleri Analizi

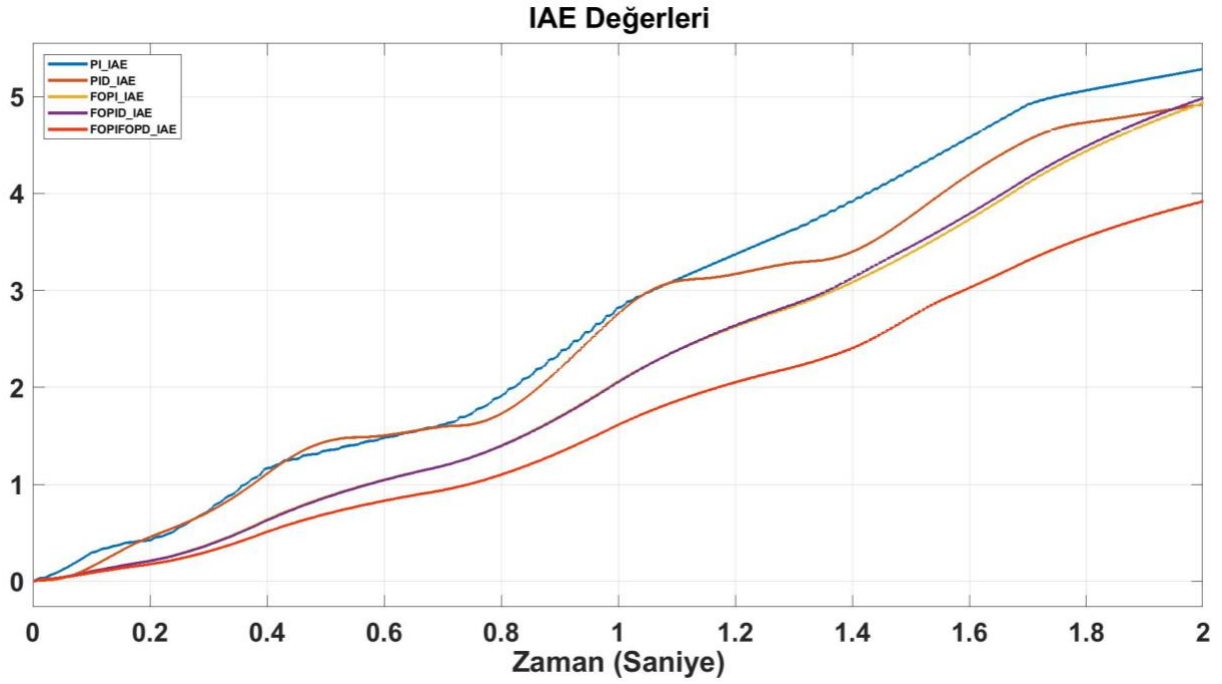
Hata kriterleri (ISE, IAE, ITSE ve ITAE) açısından yapılan karşılaştırmalar, kontrolörlerin performansını nicel olarak ortaya koymaktadır:

ITSE: Zamanla ağırlıklı kare hatalar açısından, FOPI+FOPD kontrolör en düşük değeri (13,93) almış ve uzun süreli hata birikimini etkin şekilde bastırmıştır. PI kontrolör ise en yüksek ITSE değerine sahip olarak, uzun süreli hata bastırma performansının sınırlı olduğunu göstermektedir (Şekil 13).



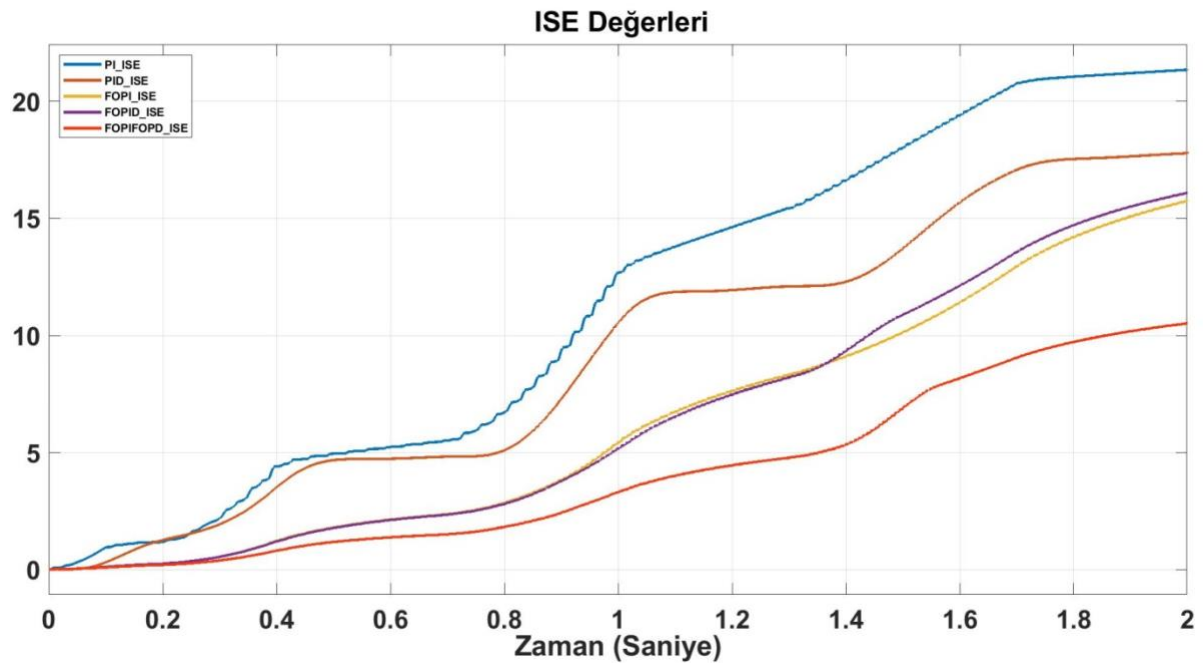
Şekil 13. ITSE Hata Kriteri Sonuçları

IAE: Mutlak hata büyüklüğü açısından, FOPI+FOPD kontrolör (3,915) en iyi performansı sergilemiş, PI kontrolör (5,281) en düşük başarıya sahip olmuştur (Şekil 14).



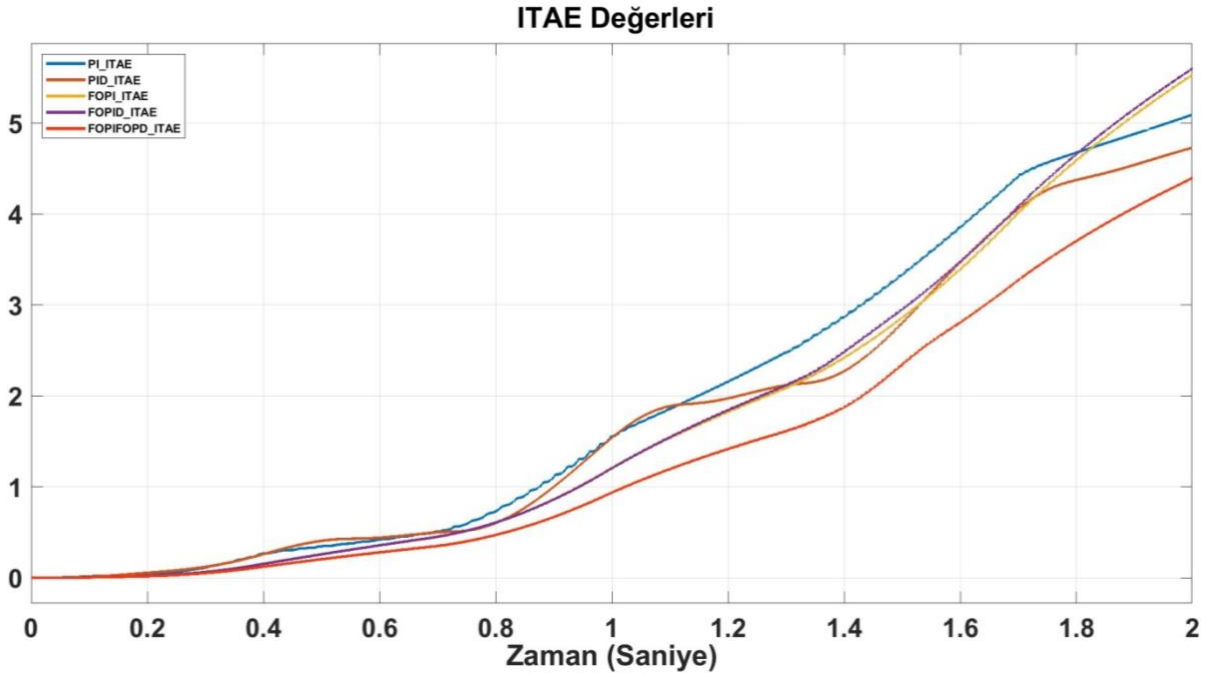
Şekil 14. IAE Hata Kriteri Sonuçları

ISE: Hata karelerinin entegrali açısından, FOPI+FOPD kontrolör (10,51) büyük hataları azaltmada en başarılı kontrolör olarak öne çıkmıştır. PI kontrolör (21,36) en yüksek ISE değerini vermiştir (Şekil 15).



Şekil 15. ISE Hata Kriteri Sonuçları

ITAE: Zamanla ağırlıklı mutlak hatalar açısından, FOPI+FOPD kontrolör (4,391) uzun süreli hataları en etkin şekilde bastırmıştır. FOPI ve FOPID kontrolörleri ise daha yüksek ITAE değerleri ile uzun süreli hataların azaltılmasında daha zayıf performans göstermiştir (Şekil 16).



Şekil 16. ITAE Hata Kriteri Sonuçları

3.4. Kontrolörlerin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Simülasyon sonuçları ve hata kriterleri analizleri, kontrolörlerin genel performans eğilimlerini açıkça ortaya koymaktadır:

Klasik kontrolörler: PI kontrolör temel bir referans sağlarken, PID kontrolör daha hızlı kararlı duruma geçiş ve düşük dalgalanma ile geliştirilmiş bir performans sunmuştur.

Kesirli dereceli kontrolörler: FOPI ve FOPID kontrolörler, klasik kontrolörlere göre daha iyi hız takip ve hata performansı sağlamış, sistemin kararlı duruma geçiş süresini ve dalgalanmaları azaltmıştır.

FOPI+FOPD kontrolör: Tüm kontrolörler arasında hem hız yanıtı hem de hata kriterleri açısından en iyi performansı göstermiştir. Sistem, geçici ve kararlı durum davranışında üstün kararlılık ve hassasiyet sergilemiş, uzun vadeli hatalar minimuma indirilmiştir.

Bu sonuçlar, kesirli mertbe kontrolörlerinin BLDC motor kontrolünde klasik PID ve PI kontrolörlere göre belirgin avantajlar sunduğunu doğrulamaktadır. Özellikle FOPI+FOPD kontrolör,

hata birikimini azaltma, dalgalanmaları kontrol etme ve kararlı duruma hızlı geçiş sağlama açısından en uygun kontrol stratejisi olarak öne çıkmaktadır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, BLDC motor hız kontrolü için PI, PID, FOPI, FOPID ve FOPI+FOPD kontrolörlerinin performansları, ISE, IAE, ITSE ve ITAE hata kriterleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Her bir kriter, kontrolörlerin kısa ve uzun vadeli hataları ne ölçüde azalttığını ortaya koymakta ve böylece kontrolörlerin etkinliğini kapsamlı bir şekilde göstermektedir.

Simülasyon sonuçları, tüm hata kriterlerinde FOPI+FOPD kontrolörün en düşük değerleri elde ederek en başarılı performansı sağladığını göstermektedir. Bu kontrolör, özellikle sistemin kararlı hale gelmesini hızlandırma, hata büyüklüklerini minimize etme ve uzun vadeli hataları azaltma açısından diğer kontrolörlere göre belirgin bir üstünlük sergilemiştir. PID kontrolör, klasik kontrolörler arasında en iyi performansı sunarken, PI kontrolör orta seviyede kalmış; FOPI ve FOPID kontrolörler bazı kriterlerde PI'ye yakın veya biraz daha iyi sonuçlar üretmiş, ancak FOPI+FOPD'nin gerisinde kalmıştır.

Bu sonuçlar, kesirli dereceli kontrol stratejilerinin, özellikle FOPI+FOPD kombinasyonunun, BLDC motor hız kontrolünde klasik kontrolörlere göre daha etkin ve kararlı bir çözüm sunduğunu açıkça göstermektedir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Adila, A., Ridwan, M., Ferdiansyah, I., Rusli, M., Suryoatmojo, H., & Ashari, M. 2024. *Modeling and Simulation of BLDC Motor Drive with Bipolar PWM Six-Step Commutation for Speed Regulation System*. <https://doi.org/10.1109/ICEECIT63698.2024.10859942>
- Aktaş, M. 2020. *Fırçasız DC Motor (BLDC) Teknik Dokümanı*. Ondokuz Mayıs Üniversitesi. <https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/mustafa.aktas/137354/f%C4%B1r%C3%A7as%C4%B1z%20dc%20motor%20BLDC.pdf>
- Bose, B. K. 2006. *Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends*. Academic Press.
- Durmuş, B., & Temir, A. 2023. Equilibrium Optimizer Based FOPID Control of BLDC Motor [Fırçasız DC Motorun Denge Optimizasyon Algoritması Tabanlı FOPID Kontrolü]. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(51), 153-161. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1256908>
- Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S. E., & Emadi, A. 2005. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. CRC Press.
- Emadi, A., Lee, Y. J., & Rajashekara, K. 2008. Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-in Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6), 2237-2245. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.922768>
- Embitel, T. 2023, 2023-02-08 (from blog metadata). *Hall Effect Sensor and Its Role in a Motor Controller*. <https://www.embitel.com/blog/embedded-blog/hall-effect-sensor-and-its-role-in-a-motor-controller>, Erişim Tarihi: 15.04.2025
- Kenjo, T., & Nagamori, S. 1985. *Permanent-Magnet and Brushless DC Motors*. Oxford University Press.
- Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. 2013. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. Wiley-IEEE Press.
- Krishnan, R. 2001. *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*. Prentice Hall.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. 2003. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. Wiley.
- Mpco Magnetics. 2023. IPM vs SPM Electric Motors Technical Comparison. <https://mpcomagnetics.com/wp-content/uploads/2023/09/IPM-vs-SPM-Electric-Motors.jpg>
- Robotistan. 2023. Fırçasız Motor (Brushless DC Motor - BLDC). <https://www.robotistan.com/fircasiz-motor?ps=3>
- Vanchinathan, K., & Selvaganesan, N. 2021. Adaptive fractional order PID controller tuning for brushless DC motor using Artificial Bee Colony algorithm. *Results in Control and Optimization*, 4, 100032. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rico.2021.100032>
- Zenk, H. 2016a. A Comparative Application of Performance of the SEPIC Converter Using PI, PID and Fuzzy Logic Controllers for PMDC Motor Speed Analysis. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS)*, 2(12), 1226-1231.
- Zenk, H. 2016b. In push-pull converter output voltage stability comparison with using fuzzy logic, PI and PID controllers. *International Journal of Engineering Research and Management (IJERM)*, 3(12), 1-6.
- Zenk, H. 2019. Comparison of the Performance of Photovoltaic Power Generation-Consumption System with Push-Pull Converter under the Effect of Five Different Types of Controllers. *International Journal of Photoenergy*, 2019(1), 3810970.
- Zenk, H. 2020. Comparison of Voltage Stability of Photovoltaic Power Source Dual Structure Flyback Converter with Fuzzy-Tuned PI and Fractional PID Type Controllers. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 443-465.
- Zenk, H., & Akpınar, A. S. 2014. Dynamic Performance Comparison of Cúk Converter with DC Motor Driving and Using PI, PID, Fuzzy Logic Types Controllers. *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2(2), 90-96.