

2DOFPID ve Kesir Dereceli PID Kontrolör ile Ayarlanan Senkron Motorların Kontrolü Yardımıyla İki Eksenli Robot Kolu Pozisyonunun Ayarlanması

Aykut Fatih GÜVEN^{1*} 

Öz

İki eksenli robot kol endüstride yaygın olarak kullanılan temel robotlardır. Pek çok sanayi tesisinde üretim, taşıma, yönlendirme, parça birleştirme gibi pek çok farklı görevde kullanılabilirler. Bu robotlar aynı zamanda değişik ağırlıkları taşıyabilecek şekilde farklı güç değerlerinde de üretilmektedirler. Genelde kuka robotu olarak bilinen bu robotlar farklı motorlar kullanılarak hareket ettirilmektedir. Kullanılan elektrik motoru her ne çeşit oluşa olsun hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla farklı güç değerinde ya da farklı motor kullanılan bu robotların farklı şekillerde kontrol edilmeleri gereklidir. Bu çalışmada senkron motorlar tarafından hareket ettirilen iki eksenli bir robotun hem kesir dereceli PID (KDPID) kontrolör hem de iki serbestlik dereceli PID (2DOFPID) kontrolör kullanılarak pozisyon kontrolünün incelenmesi amaçlanmıştır. İki eksenli robot olduğu için iki adet senkron motor, iki adet sürücü ve iki adet kontrolör kullanılarak sistem gerçekleştirilmektedir. Sistemin tamamı Matlab/Simulink ortamında tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Farklı referans girişler için sistem performansı ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kesir dereceli PID kontrolör, İki serbestlik dereceli PID, Senkron motor, İki eksenli robot kol.

Adjustment of the Two-Axis Robot Arm Position with the Control of Synchronous Motors Set by 2DOFPID and Fractional Order PID Controller

Abstract

The two-axis robot arm is the basic robot widely used in industry. They can be used in many different tasks such as production, transportation, routing, and assembly of parts in many industrial facilities. These robots are also produced in different power values so that they can carry different weights. These robots, generally known as skittle robots, are moved using different motors. Regardless of the type of electric motor used, it must be precisely controlled. Therefore, these robots with different power values or using different motors need to be controlled in different ways. In this study, it is aimed to examine the position control of a two-axis robot driven by synchronous motors using both a fractional order PID (KDPID) controller and a two degrees of freedom PID (2DOFPID) controller. Since it is a two-axis robot, the system is implemented using two synchronous motors, two drivers, and two controllers. The entire system has been designed and analyzed in Matlab/Simulink environment. The system performance for different reference inputs is examined in detail.

Keywords: Fractional order PID controller, Two degrees of freedom PID, Synchron machine, Two axis robot arm.

¹Yalova Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği/Mühendislik Fakültesi, Yalova, Türkiye, afatih.guven@yalova.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-1071-9700>

1. Giriş

Endüstriyel üretim süreçleri zor, karmaşık, hassas ve pahalı işlemlerdir. Günümüzde makine parçalarının üretilmesi, elektronik sektöründe işlemci gibi son derece karmaşık ürünlerin imalatı, ilaç sektöründe hassas doz ayarlamaları gibi işlemler robotlar tarafından kontrol edilmekte ve gerçekleştirilmektedir.

Bu robotlar çok farklı güç değerlerinde üretilmektedirler. Düşük, orta ve yüksek güçlü, farklı güç değerlerinde üretilen robotlar sanayide bulunmaktadır. Hassas işlerin yapıldığı düşük güçlü fakat hassasiyeti çok yüksek robotlar ameliyatlarda ve işlemci, entegre imalatı gibi sektörlerde kullanılırken büyük güçlü robotların ağır ve kaba yüklerin taşınması ve montajı gibi yerlerde kullanıldıklarını görmekteyiz (Billard ve ark., 2022).

Doğru akım motoru ve senkron motor gibi klasik motorların yanında adım motoru ve servo motor gibi özel elektrik makinaları ile donatılan robotların olduğu görülmektedir. Bu kadar motor çeşidinin kullanılması nedeniyle bir bu kadar da farklı sürücünün kullanılması zorunlu olmaktadır. Dolayısıyla her motora uygun sürücünün kullanılması gerekmektedir (Craig, 2022).

Çok eksenli robotları kontrol etmek sadece motor eklemlerinde kullanılan motorların tek tek kontrol edilmelerinden daha karmaşıktır. İstenen işlemi gerçekleştirmek için tüm bileşenlerin hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Bu durumda örneğin beş eksenli bir robotta her bir bileşen bir hata yaptığında son noktada hata topluca ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle her bir ekseninde kullanılan robotun en hassas şekilde ayarlanması üretim kalitesini etkiler (Karcı ve Yangel, 2016).

Çok eksenli robot kolların gelişmiş olanları da bulunmaktadır. Özellikle 6 eksenli robotlar çok daha hassas işlerin yapımında kullanılmaktadır. Robot kolun çizgi planlaması, MATLAB programı ve parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece, başlangıç noktasından hedefe hareket ederken robotun her noktadaki konumu, PSO algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Bu sayede, iki nokta arasındaki en kısa yolu seçerek zaman optimizasyonu sağlanarak, başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki pozisyon, hız ve ivme sürekliliğini de beşinci derece polinom yardımıyla eklemler arasındaki çizgi planlaması yapılmıştır (Ekrem ve Aksoy, 2023).

Çok eksenli robot kollarının en önemli uygulamalarından bir tanesi 3 boyutlu yazıcılardır. Eserde, hem eklemeli hem de çıkarma imalatı gerçekleştiren düşük maliyetli 6 eksenli 3 boyutlu yazıcı robotik kolu HydraX'in programlama, kontrol ve kalibrasyon yönlerini açıklamaktadır. Eklemlerle, otomatik uç değiştirici, CNC freze milini, sıcak ucu sıcaklık ölçümü, filament ekstrüzyonu ve soğutma fanı hız ayarını kontrol eder ve böylece başarılı hibrid imalat işlemlerini gerçekleştirir. Bu uygulamaların tamamı hassas kontrol süreçleridir (Papapaschos ve ark., 2021).

Kullanılan elektrik motoru her ne çeşit olursa olsun kullanılan sürücünün doğru güç değerinde olması ve hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Burada klasik kontrol teknikleri olan

PID (Subrata ve ark., 2022) ve türevleri kesir dereceli PID (Vinagre ve Monje, 2012), 2DOFPID (Salazar-Aquino ve ark., 2020) ve bunların çeşitlerinin yanında bulanık mantık kontrolörler (Ardiyanto ve Miura, 2012), model öngörülü kontrolörler (Thomas ve Hansson, 2014) gibi gelişmiş teknikler de kullanılmaktadır.

Bu makalede senkron makineler tarafından hareket ettirilen iki eksenli robot kolun hassas kontrolü anlatılmaktadır. Sürücüler Kesir Dereceli PID (KDPID) kontrolörler kullanılarak kontrol edilmektedir. Sistem hassas pozisyon kontrolü yapmaktadır. Benzetimi yapılan sistem Matlab/Simulink ortamında incelenmiş ve sonuçları ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Benzetimi yapılan sistemde senkron motorlar, sürücüleri, kontrolörler ve iki eksenli robot bulunmaktadır.

2.1. İki Eksenli Robotlar

İki eksenli robotlar genellikle basit taşıma-yön değiştirme ve temel birleştirme işlemleri için sıklıkla endüstride kullanılmaktadırlar. Çok daha gelişmiş olanları da mevcuttur. 3, 4, 5, 6 ve çok daha fazla eksenli robotlar farklı görevleri yerine getirmek için kullanılırlar (Billard ve ark., 2022).

2.2. Pozisyon Kontrolü

Pozisyon kontrol sistemleri mekanik sistemlerin tamamında oldukça önemlidir. Algılayıcılardan gelen bilgiler ile referansın karşılaştırılması ile hatanın sıfır olması beklenir. Böylece istenen konuma hatasız/az hatalı bir şekilde ulaşılmış olur. Özellikle insansız araçlarda pozisyon kontrolünün hatasız olması istenir (Qu ve Cai, 2023).

2.3. Daimi Mıknatıslı Senkron Motor (DMSM)

DMSM yüksek moment ve çıkış gücü veren, ekonomik, yapımı ve bakımı kolay olan elektrik makineleridir. Manyetik akı ve torka ait denklemler aşağıda verilmiştir. Burada d-q eksen takımında dönüşümler ile hesaplamalar kolayca yapılmaktadır.

$$\Psi_{ds} = L_{ds}i_{ds} + \Psi_M \quad (1)$$

$$\Psi_{ds} = L_{qs} i_{qs} \quad (2)$$

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds} - \omega_r \Psi_{qs} \quad (3)$$

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs} + \Psi_{ds} \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \quad (5)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\Psi_M i_{qs} - (L_{qs} - L_{ds}) i_{ds} i_{qs}) \quad (6)$$

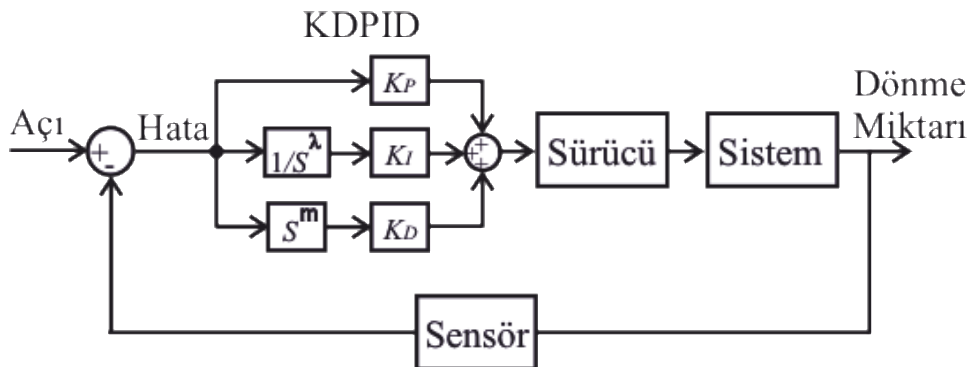
Burada; δ yük açısını, ψ_s stator akı vektörünü, ψ_M rotor akı vektörünü, göstermektedir (Özçira ve ark., 2012).

2.4. Kesir dereceli PID Kontrolör (KDPID)

Endüstride en çok kullanılan kontrolör çeşidi PID kontrolörlerdir. Açık-Kapalı kontrolörlerden sonra en yaygın kullanılan, hatanın minimize edilmesi için kontrolör parametrelerinin ayarlanması gereken bir kontrolör tipidir. Denklem 7’de denklemi görülmektedir:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int_0^t e(t) d(t) \quad (7)$$

Burada $u(t)$ kontrolör çıkış işaretini, $e(t)$ hata fonksiyonunu, K_p orantı sabitini, K_d türev sabitini ve K_i integral sabitini ifade etmektedir (Dorf ve Bishop, 2020). Şekil 1’de KDPID kontrolör görülmektedir.



Şekil 1. KDPID kontrolörün yapısı.

Tablo 1’de klasik PID denetleyicilerin katsayıları ve etkileri görülmektedir. PID parametreleri ayarlanırken bu etkiler dikkate alınır (Heong ve ark., 2005).

Tablo 1. PID parametrelerini etkileri.

Kapalı Çevrim Cevabı	Yükselme Zamanı	Aşma	Oturma Zamanı	Sürekli Durum Hatası	Kararlılık
K_p yi artırmak	Azaltır	Artırır	Küçük oranda artırır	Azaltır	Geriletir
K_i yi artırmak	Küçük oranda azaltır	Artırır	Artırır	Büyük oranda azaltır	Düşürür
K_d yi artırmak	Küçük oranda azaltır	Azaltır	Azaltır	Çok az değiştirir	İyileştirir

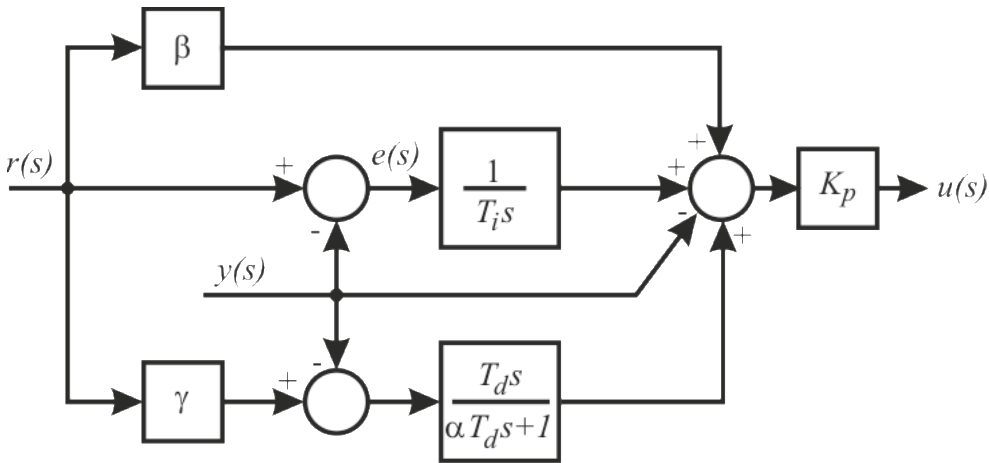
Bu makalede klasik PID ‘lerden daha iyi sonuç verdiği için KDPID kontrolörler kullanılmıştır. Daha hassas ayarlama yapılabildiği için bu kontrolörler daha iyi sonuç vermektedir. Denklem 8’de KDPID kontrolörlerin s-domenindeki denklemi görülmektedir.

$$u(s) = e(s) \left[K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \right] \quad (8)$$

Burada λ ve μ integral ve türev denetleyicilerin kesir derecelerini ifade etmektedir (Zhu ve ark., 2014).

2.5. 2DOFPID Kontrolör

Klasik PID kontrolörlerin gelişmiş farklı bir türüdür (Srichandan ve ark., 2020). Şekil 2’de temel yapısı görülmektedir.



Şekil 2. 2DOFPID kontrolör.

Denklem 9’da matematiksel eşitliği görülmektedir.

$$u(s) = K_p \left\{ e_p(s) + \frac{1}{T_i s} e_i(s) + \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1} e_d(s) \right\} \quad (9)$$

Burada;

$$e_p(s) = \beta r(s) - y(s) \quad (10)$$

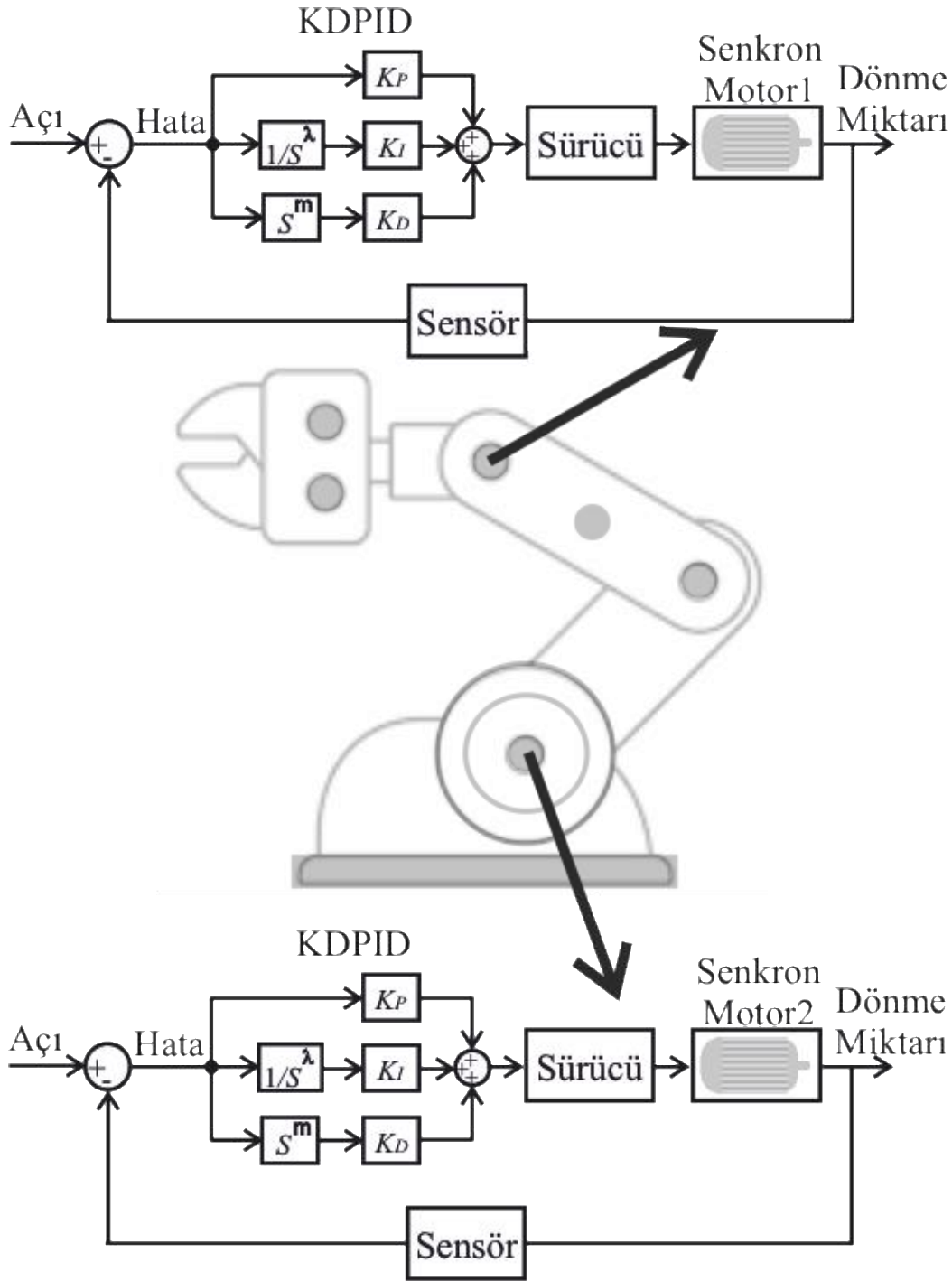
$$e_i(s) = r(s) - y(s) \quad (11)$$

$$e_d(s) = \gamma r(s) - y(s) \quad (12)$$

İfade etmektedir ve T_i integral zaman sabitini, T_d türev zaman sabitini, β ve γ ayar noktası ağırlık katsayılarını ve α ise türev filtre sabitini ifade etmektedir (Alfaro ve Vilanova., 2012).

3. Bulgular ve Tartışma

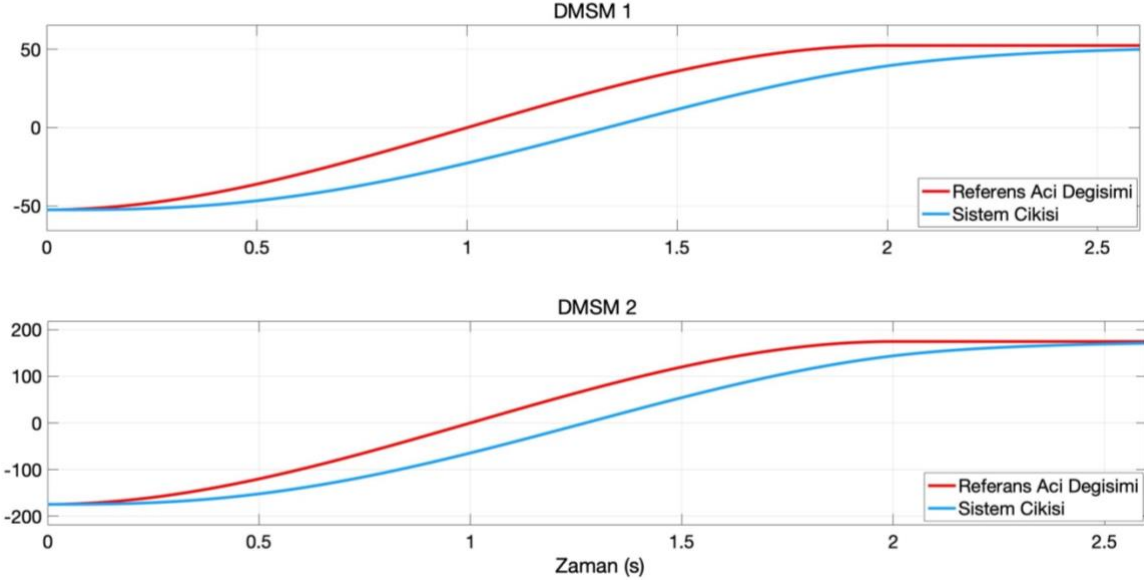
Benzetimi yapılan sistem Şekil 3’te görülmektedir. Burada KDPID kullanılmıştır. Doğrudan KDPID yerine 2DOFPID kullanılarak da diğer benzetim çalışması hazırlanmıştır. Robotu hareket ettirmek için iki adet DMSM ve bunları sürmek için de iki adet KDPID kontrolör kullanılmaktadır. Pozisyon kontrolünün doğru bir şekilde yapılması için hatanın sıfır olması amaçlanmaktadır. Farklı referans seviyeleri girilerek sistem performansı ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. DMSM gerilimi 380 V/50 Hz’lik kaynaklardan beslenmektedir. Sürücü içerisinde doğrultucu, filtre ve 3 fazlı 6 IGBT’li evirici bulunmaktadır. Burada doğrultucu kısmında ileri yön gerilimi 1,3 V olan diyotlar kullanılmıştır. Filtre kısmında ise 2 mF’lık kondansatör kullanılmıştır. Evirici kısmında ise anahtarlama elemanı olarak IGBT kullanılmıştır. Benzetimde kullanılan DMSM 0,25 ohm direnç, 8,9 mH L_d , 8,9 mH L_q , 0,01 kgm² eylemsizlik momentine sahiptir ve 4 kutupludur. Benzetim ayrık zamanlıdır. Örnekleme zamanı 1 µs hassasiyetinde seçilmiştir. Benzetim süresi 2,6 s’dir.



Şekil 3. İki eksenli robot kol kontrolü.

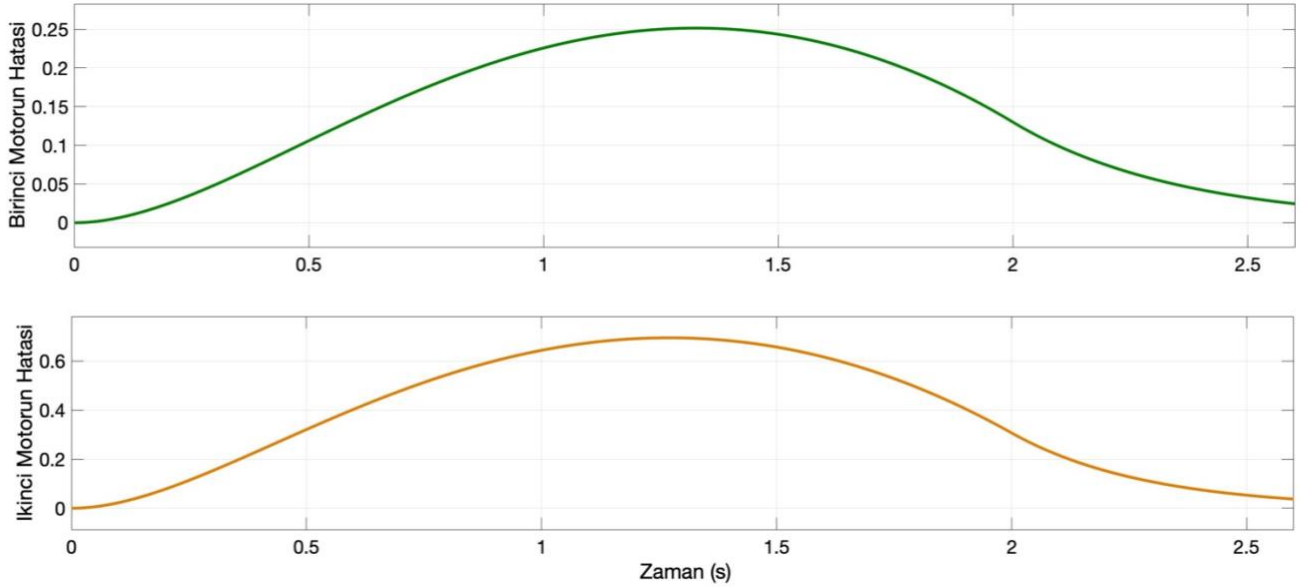
KDPID kontrolör kullanılarak elde edilen sonuçlar şekil 4 ile şekil 8 arasında görülmektedir. Burada $K_P=4000$, $K_D=3$, $K_I=2$, $\lambda=1,2$ ve $\mu=1,2$ olarak alınmıştır. PID kontrolör parametrelerinin hesaplanmasında, Ziegler-Nichols, Åström-Hägglund ve Cohen Coon gibi klasik tasarım metotları en önemlileridir. Bu çalışmada, parametreler Ziegler-Nichols tekniği kullanılarak tespit edilmiştir. İlk DMSM'nin -50° ile $+50^\circ$ arasında değişmesi planlanmıştır. Her iki kontrolöründe parametreleri aynıdır. Diğer DMSM ise -175° ile $+175^\circ$ arasında sürekli olarak değiştirilerek sistem zorlanmış ve bu esnada kontrolörlerin etkinlikleri incelenmiştir. Referans açının sürekli değiştirilmesi

adeta sisteme bir bozucu gibi etmekte ve bir anlık referans giriş yakalanmaya çalışılırken diğer bir referans noktasına geçerek bu değişime kontrolörlerin etkin bir şekilde cevap vermesi istenmiştir.



Şekil 4. Referans girişe çıkışın değişimi.

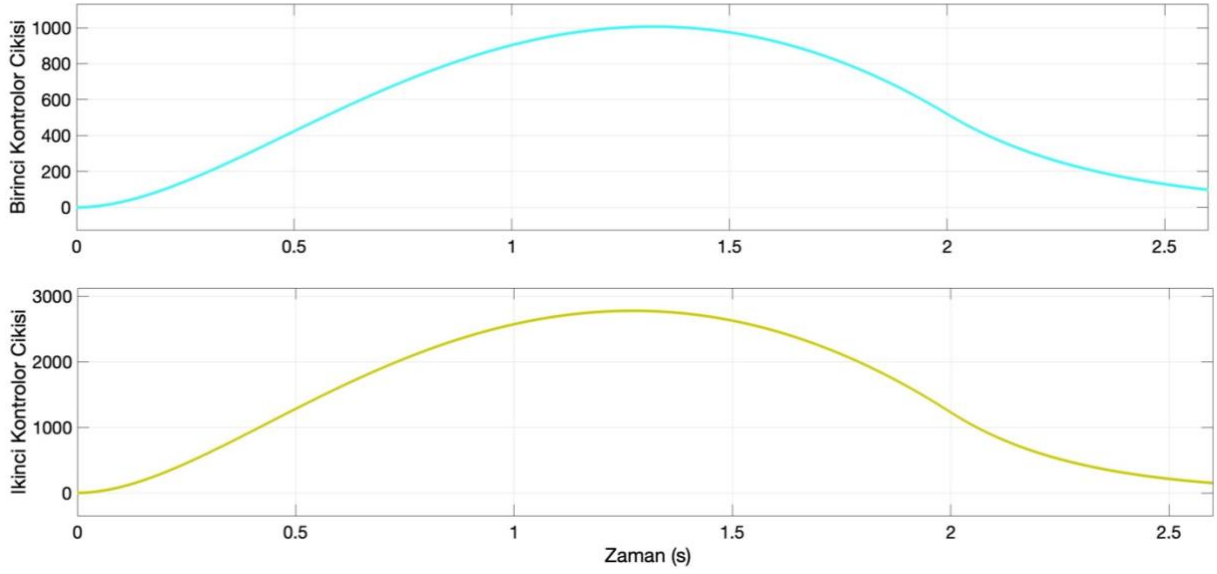
Şekil 4'ten de görüldüğü gibi kontrolörler çok hızlı bir referans değişimine ayak uydurmaya çalışmaktadırlar. Bu esnada bir miktar pozisyon (açı) hatası yapılmaktadır. Şekil 5'te bu hata değişimi görülmektedir.



Şekil 5. Her iki motorun referans açı değişiminde yaptığı pozisyon hatası.

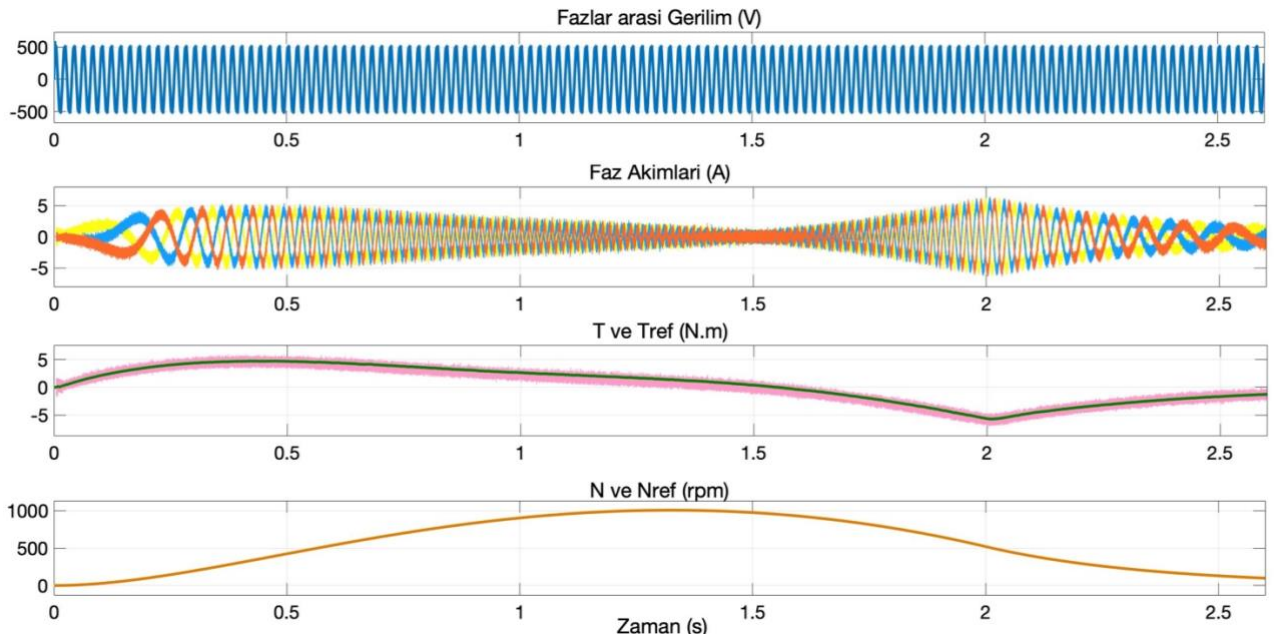
Hata değeri birinci motorda 0 ile 0,25 arasında, ikinci motorda ise 0 ile 0,7 arasında değiştiği görülmektedir.

Şekil 6'da kontrolörlerin çıkış işaretleri görülmektedir. Bu işaretler hata ile benzerlik göstermekte ve birbirini desteklemektedir.

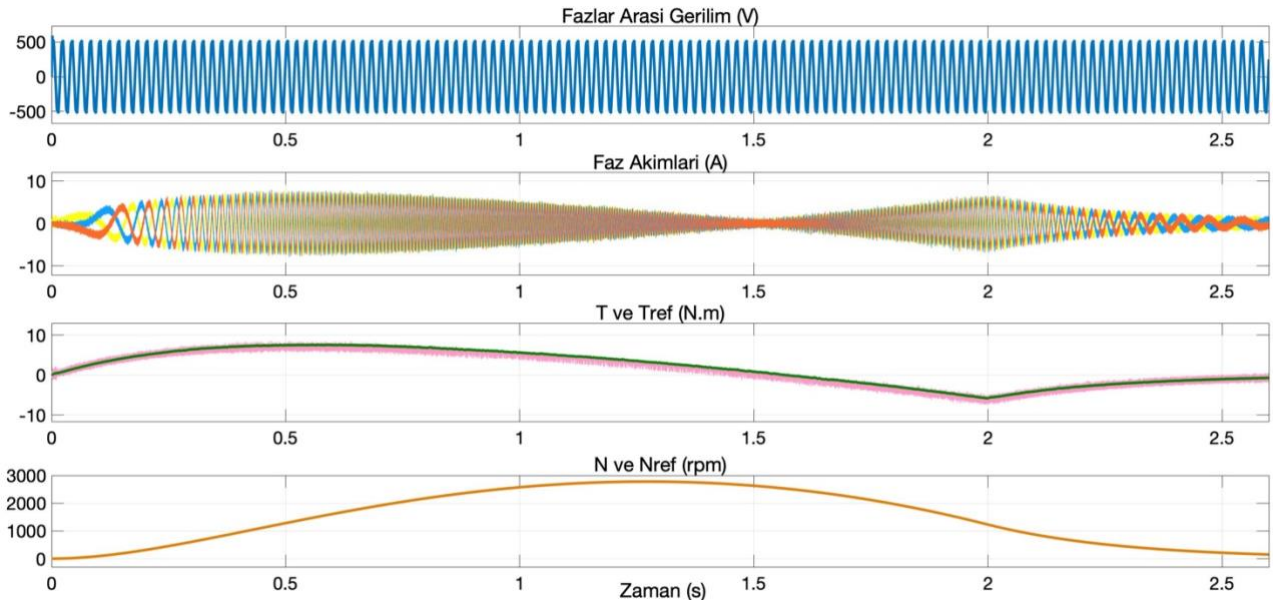


Şekil 6. KDPID kontrolör çıkış işaretlerinin değişimi.

Motor 1 ve Motor 2'ye ait grafikler şekil 7 ve 8'de sırasıyla verilmiştir.



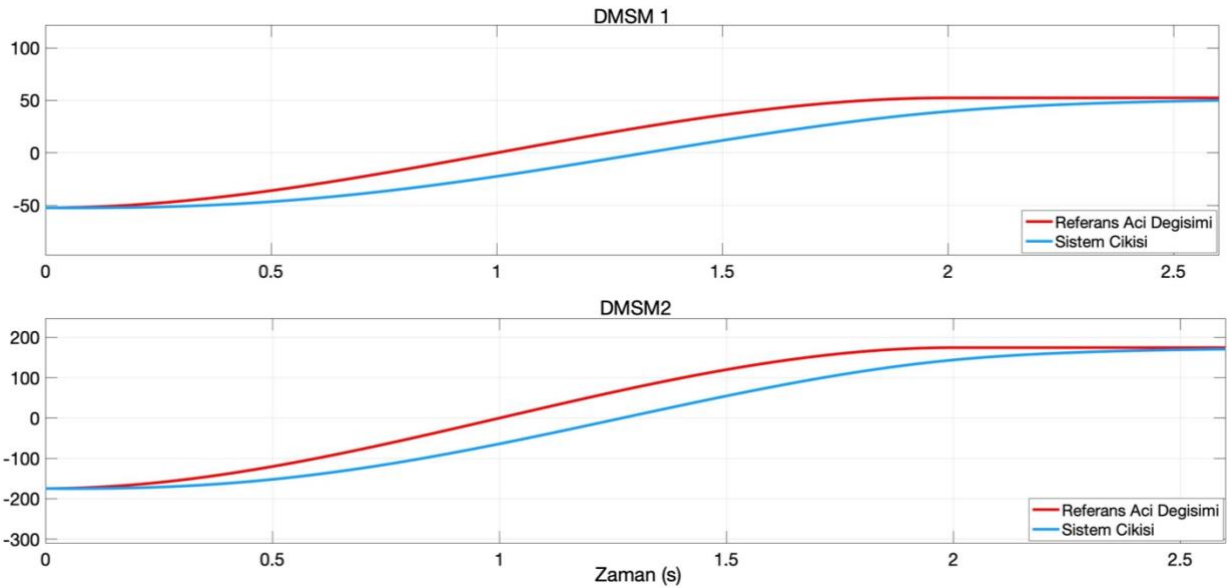
Şekil 7. Motor 1'e ait elektriksel ve mekanik büyüklüklerin değişimi.



Şekil 8. Motor 2'ye ait elektriksel ve mekanik büyüklüklerin değişimi.

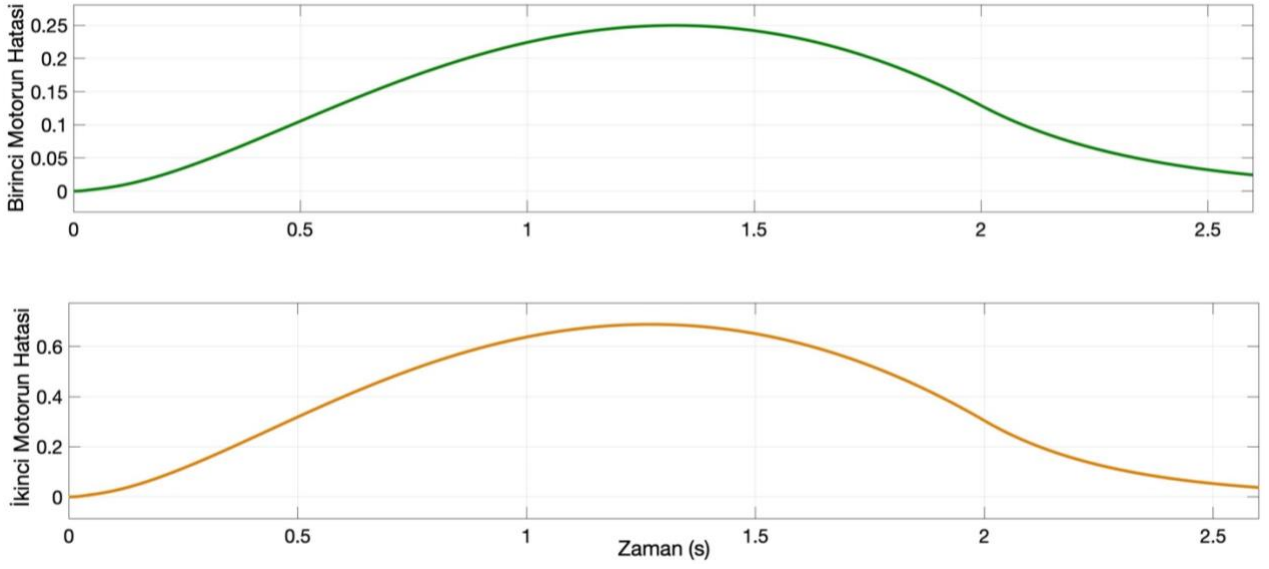
Hem motor 1'de hem de motor 2'de sonuçlar incelendiğinde momentin ve devir sayısındaki değişimin referans değişimi aynen takip ettiği gözlenmektedir. Devir sayısı referansın tamamen üstünde olduğu için görülmektedir. Moment ise bir miktar dalgalanmaktadır.

2DOFPID kontrolör kullanılarak elde edilen sonuçlar şekil 9 ile şekil 13 arasında görülmektedir. Burada $K_P=4000$, $K_D=3$, $K_I=2$, $N=100$ $c=4$ ve $b=1.1$ olarak alınmıştır. Yine benzer şekilde ilk DMSM'nin -50° ile $+50^\circ$ arasında diğer DMSM ise -175° ile $+175^\circ$ arasında değiştirilmiştir. Böylece her iki kontrolör de aynı şartlarda çalıştırılmıştır. Her iki kontrolöründe parametreleri de aynıdır.



Şekil 9. Referans giriş çıkışın zamana göre değişimi.

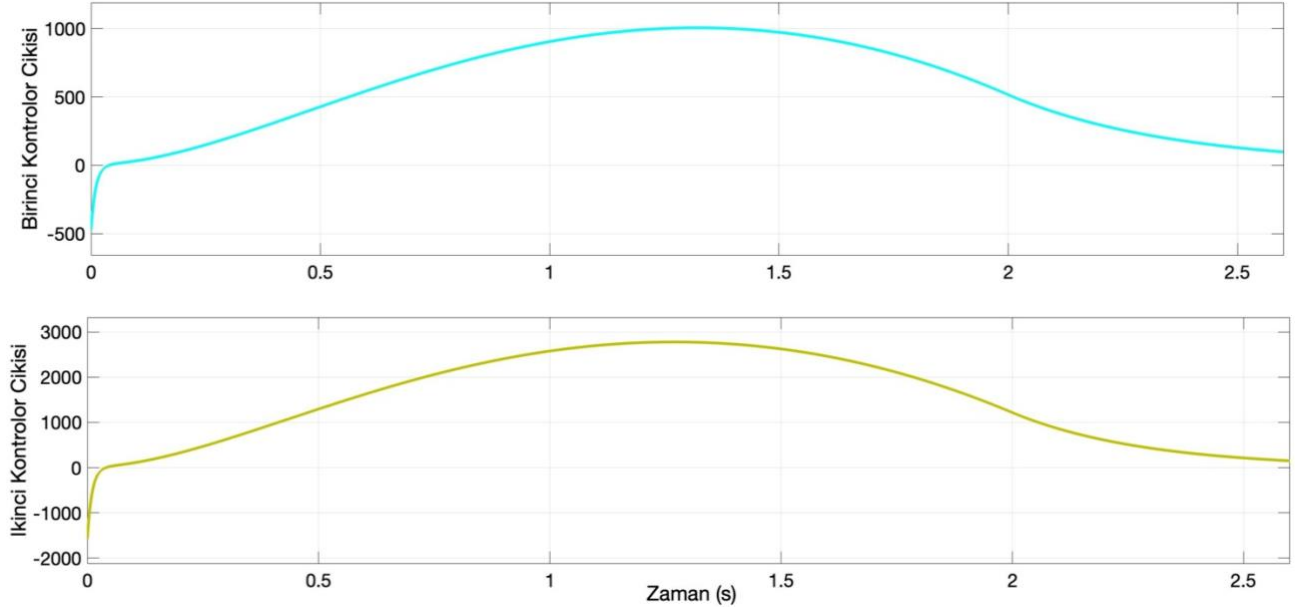
Şekil 9'da her iki motordaki açı değişiminin referans değişimi nasıl takip ettiği görülmektedir. Sistemde bir miktar hata bulunmaktadır. Hata değişimi şekil 10'daki gibidir.



Şekil 10. Her iki motorun referans açı değişiminde yaptığı pozisyon hatası.

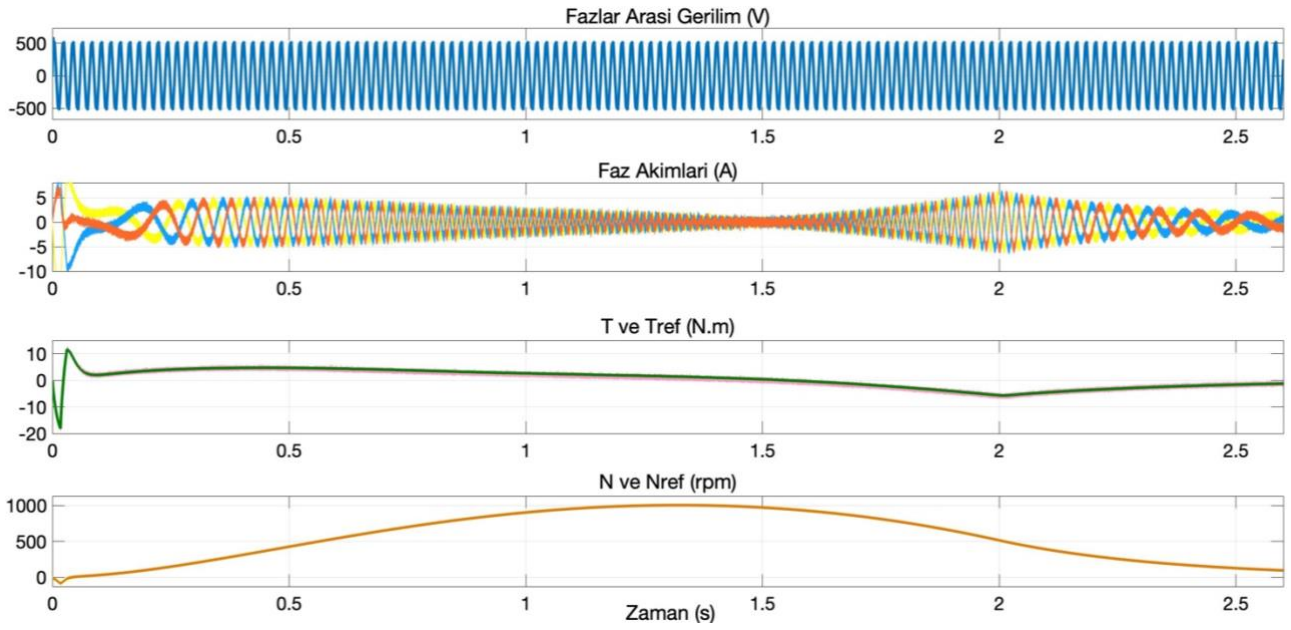
Hata değeri birinci motorda 0 ile 0,24 arasında, ikinci motorda ise 0 ile 0,68 arasında değiştiği görülmektedir.

Şekil 11’de ise 2DOFPID kontrolör çıkış işaretleri görülmektedir.

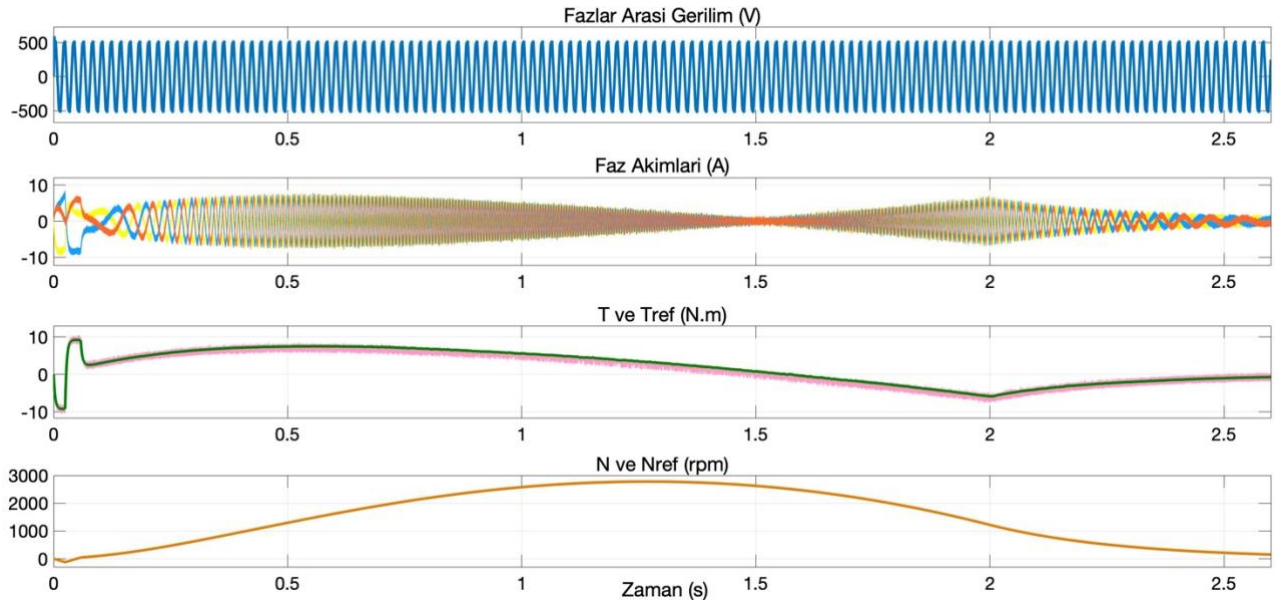


Şekil 11. 2DOFPID kontrolör çıkış işaretlerinin değişimi.

Motor 1 ve Motor 2’ye ait grafikler şekil 12 ve 13’te görülmektedir.



Şekil 12. Motor 1'e ait elektriksel ve mekanik büyüklüklerin değişimi.



Şekil 13. Motor 2'ye ait elektriksel ve mekanik büyüklüklerin değişimi.

Hem motor 1'de hem de motor 2'de sonuçlar incelendiğinde momentin ve devir sayısındaki değişimin referans değişimi aynen takip ettiği gözlenmektedir. KDPID kontrolörde olduğu gibi devir sayısı referansın tamamen üstünde olduğu için görülememektedir. Moment ise yine bir miktar dalgalanarak değişmektedir. Gerilim şebekeden beslendiği için dengeli ve düzgündür. Akım miktarı da referansın değişimine göre artmakta ya da azalmaktadır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada iki eksenli bir robot kolda kullanılan DMSM'ların hem KDPID hem de 2DOFPID kullanılarak motor pozisyonlarının kontrol edilmeleri ve kontrolörlerin etkinliklerinin kıyaslanması anlatılmıştır.

Şekil 4'te KDPID kontrolörün ve şekil 9'da da 2DOFPID kontrolörün referansının değişimi ile sistem sonuçları görülmektedir. Bu iki grafik ve şekil 5 ve 10'da da hatanın değişim grafikleri ayrıntılı olarak incelendiğinde 2DOFPID kontrolörün referansı KDPID kontrolöre göre daha iyi takip ettiği gözlenmiştir. Hata grafiklerinde de azda olsa bir fark bulunmaktadır.

Motora ait diğer grafiklerde de motor momenti ve devir sayısındaki değişimin referans değişimleri takip edebildiği gözlenmiştir.

Bu sistemde kullanılan kontrolörler ile ilgili aşağıdaki durumlar gözetilebilir:

- Elde edilen KDPID ve 2DOFPID parametreleri önce Ziegler-Nichols metodu ile sonrada bunun üzerinden deneme-yanılma usulü ile belirlenmektedir. Bu hem zaman alan hem de garantisi olmayan bir metottur. Bu nedenle bu değerler farklı algoritmalar kullanılarak belirlenmeye çalışılabilir.
- Sistemde ister KDPID ister 2DOFPID kontrolör çeşidi olsun her bir benzetimde iki motor olduğu için iki adet kontrolör kullanılmalıdır. Bunların parametreleri aynı seçilmiştir. Farklı değerler seçilerek daha etkin sonuçlar elde edilebilir.
- Daha farklı tipte PID kontrolörler ya da daha gelişmiş kontrol yapıları kullanılarak daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

Kaynaklar

- Alfaro, V. M. and Vilanova, R., (2012). Conversion Formulae and Performance Capabilities of Two-Degree-of-Freedom PID Control Algorithms. *Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012)* (pp. 1-6). Krakow, Poland. (doi: 10.1109/ETFA.2012.6489608)
- Ardiyanto, I. and Miura, J., (2012). Real-time Navigation Using Randomized Kinodynamic Planning with Arrival Time Field. *Robotics and Autonomous Systems*, 12, 455-459.
- Billard, A., Mirrazavi, S. and Figueroa, N., (2022). *Learning for Adaptive and Reactive Robot Control: A Dynamical Systems Approach*. England:MIT Press.
- Craig, J. J., (2022). *Robotiğe Giriş* (Çev. A. A. Adlı ve E. Akdoğan), Türkiye, Nobel Yayıncılık.
- Dorf, R. C. ve Bishop, R. H., (2020). *Modern Kontrol Sistemleri* (Çev. Ed. Ö. T. Altınöz), Türkiye:Nobel Akademik Yayıncılık.
- Ekrem, Ö., and Aksoy, B.,(2023). Engineering Applications of Artificial Intelligence Trajectory planning for a 6-axis robotic arm with particle swarm optimization algorithm, *Eng. Appl. Artif. Intell.* 122, 106099.
- Heong, K., Chong, G. and Li, Y., (2005). PID Control System Analysis, Design and Technology, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13 (4), 559-576.
- Karcı, H. ve Yangel, A., (2016). FPGA Tabanlı 4 Eksenli Mobil Robot Kolu Tasarımı ve Prototip Gerçeklenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 295-302.

- Özçira, S., Bekiroğlu, N., Şenol, İ. ve Ayçiçek E., (2012). Sürekli Miknatıslı Senkron Motorlarda Doğrudan Moment Kontrolünün İncelenmesi, *EMO Bilimsel Dergi*, 2 (3), 1-6.
- Papapaschos, V., Bontarenko, E., Krimpenis, A.A. (2021). HydraX , a 3D printed robotic arm for Hybrid Manufacturing . Part II : Control , Calibration & Programming, *Procedia Manuf.* 5, 109–115.
- Qu, Y. and Cai, L., (2023). State-Dependent Finite-Time Controller Design and Its Applications to Positioning Control Task for Underactuated Unmanned Surface Vehicle. *Ocean Engineering*, 267,1-17.
- Salazar-Aquino, O., Pampamallco-Jara, J. and Rojas-Moreno, A. (2020). Position Control of a 2DOF Rotary Torsion Plant Using a 2DOF Fractional Order PID Controller, 2020 IEEE XXVII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), Peru.
- Srincandan, S., Rath, S. and Pati, T. K., (2020). Sine Cosine Algorithm Optimized Two Degree of Freedom Based Cascade PID-PI Controller for Multi-Units Power System. ICREISG-2020, India.
- Subrata, R. H., Gozali, F. and Djuana, E., (2022). Computational and Intelligent Optimization Tuning Method for PID Controller. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 100(7), 2007-2017.
- Thomas, J. and Hansson, A., (2014). Enumerative Nonlinear Model Predictive Control for Linear Induction Motor Using Load Observer. *2014 UKACC International Conference on Control (373-377)*, United Kingdom.
- Vinagre, B.M., Monje, C.A., (2012). *Fractional-Order PID*. In: Vilanova, R., Visioli, A. (eds) *PID Control in the Third Millennium*. Advances in Industrial Control. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2425-2_15
- Zhu, D., Liu, L. and Liu, C., (2014). Optimal Fractional Order PID Control of Chaos in the Fractional-Order Buck Converter, *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications* (pp.787-791), China.