Fırçasız DC Motorun Optimal Durum-Uzayı Kontrolü

Burak Kürkçü¹, Coşku Kasnakoğlu², Sabri Çetin³

¹Aselsan A.Ş

bkurkcu@aselsan.com.tr

²Tobb ETU kasnakoglu@etu.edu.tr

³Aselsan A.Ş scetin@aselsan.com.tr

Özet

Fırçasız DC Motorlar yüksek verimlilik, yüksek güç faktörü, yüksek tork, temel kontrol ve düşük bakım maliyetleri nedeniyle askeri uygulamalarda tercih sebebi olmaktadır. Bu makalede, fırçasız bir DC Motor pozisyonunun, optimal olarak (LQR) kontrol edilmesi çalışılmıştır. Bunlara ek olarak, tasarlanan pozisyon kontrolör yapısı, hazırlanan test düzeneğinde, xpc target ile gerçek zamanlı çalıştırılmıştır. Bu çalışmada, tasarlanan optimal denetleyicinin gerçek sistem ve şartlar altında performansı incelenmektedir. Geliştirilmiş olan bu kontrolörün bozucu etkiler ve değişken pozisyon girdileri için çeşitli deney sonuçları sunulmuş ve irdelenmiştir. Bu sonuçlardan denetleyici performansının tatmin edici olduğu anlaşılmaktadır.

1. Giriş

Fırçasız DC motorlar, firçalı DC motorlara göre daha iyi hıztork karakteristiğine, yüksek dinamik performansa, yüksek verimliliğe, uzun operasyon ömrüne, gürültüsüz operasyona ve yüksek hız limitlerine sahiptir. Bunlara ek olarak Fırçasız DC Motorlar daha güvenli, temel kontrole sahip ve daha ucuzdurlar [1]. Bu sebeplerden ötürü, kalıcı mıknatıslı firçasız DC motorlar artan bir şekilde uzay/havacılık, askeri, otomotiv ve endüstriyel ürünlerde kullanılmaya başlanmıştır [2-4]. Özellikle askeri uygulamalar için kırılma toleransı en önemli özelliklerden birisidir. Birden fazla fazlı motorlarda ise, kırılma toleransı, diğer tek fazlı motorlara göre daha yüksektir [5].

Geçtiğimiz seneler içerisinde, Fırçasız DC Motor kontrolü için birçok farklı yöntem önerilmiştir. Kaskad yapıya sahip olan bu kontrolörler, hız ve pozisyon için, PID, PSO PID, Genetik algoritması vb, akım için ise histerisis, sliding mode kontrol gibi metodlar bu önerilerden birkaçıdır. Literatürde, Fırçasız DC Motoru kontrol altında tutacak denetleyici yaklaşımları geliştirilmiştir [6].

Bunun yanında bozucu etkiler, gürültü ve doyum gibi etkiler de göz önüne alındığında sistem davranışının kontrol altında tutulması kolay olmamaktadır [7]. Bu sebeple, optimal denetleyici tasarımı ile konum kontrolü sayesinde istenilen performans değerleri elde edilebilmektedir. Bu makalede, 3 fazlı firçasız bir DC motor, LQR pozisyon kontrolörü ile kontrol edilmiştir. LQR pozisyon kontrolörünün düzgün bir şekilde tasarlanabilmesi için belirli bir çalışma bölgesi etrafında sistem tanımlama yapılmıştır. Elde edilen bu sistem modeli kullanılarak pozisyon kontrol döngüsü tasarlanmıştır. Oluşturulan kontrolör ise değişken pozisyon profilleri altında denenmiş ve gerçek durumla karşılaştırılmıştır.

2. Sistem Tanımlama ve Modelleme

Fırçasız DC motor (Şekil 1) 3 fazlı ve doğrusal olmayan etkileri mevcut olan bir yapıdır. Ancak sistemde matematiksel modelleme ile elde edilemeyecek dinamikler mevcuttur. Bunların içerisinde sürtünmeler, motorun iç dinamikleri, gerçek parametrelerin tam olarak bilinememesi gibi etkiler mevcuttur. Fırçasız DC Motorun istenilen düzeyde kontrol edilebilmesi için, yapının belirli bir veya birçok çalışma rejimi için doğrusal sistemlere indirgenmesi ve bu işlemin sistem tanımlama ile gerçekleştirilmesi yeterli olmaktadır.



Şekil 1: Fırçasız Bir DC Motorun Sürücü Şeması[6].

Fırçasız DC motorlarda, motorun akım denetleyicisi ile bütünlenmiş bir siyah kutu olarak düşünülmesi, yapılacak sistem tanımlama ve modelleme işlemini basite indirgeyecektir. Bu yüzden sistem tanımlama işleminde, tanımlanan sisteme, giriş olarak referans tork (Şekil 1: Te*) uygulanmış, çıkış olarak ise sistemin pozisyonu kullanılmıştır. Sistem tanımlamasında, sistemin modelini elde edebilmek için Şekil 2 de arayüzü gösterilen Matlab Sistem Tanımlama Aracı kullanılmıştır.



Şekil 2: Matlab Sistem Tanımlama Arayüzü

Sistemin doğrusal davrandığı bir aralık öncelikle çeşitli giriş denemeleri ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Buna göre siyah kutu şeklinde tanımlanan sisteme uygulanacak referans tork değeri;

$$-1 < referans tork değeri < 1$$
 (1)

aralığında olduğu durumlarda sistem davranışı doğrusala yakındır.

Sistem davranışının belirlenmesi için ise genlikleri (1) denklemi ile sınırlandırılmış farklı frekanslarda sinüs girişler Şekil 3'te gösterilen firçasız DC motor simulink sistemine 20 sn boyunca uygulanmıştır.



Şekil 3: Fırçasız DC Motor Modeli

Sistemin çalışması kesintisiz olarak tamamlandığında ,matlab workspace'e sisteme ait giriş sinyal verilerini, açı verilerini, pozisyon verilerini ve zaman verilerini vektörel olarak kayıt eder. Bu verileri input_sid/output_sid içinden aşağıdaki komutlar ile giriş ve çıkış vektörleri olarak ayrı ayrı parametrelere atamamız gerekmektedir.

u=input_sid(:,3);

$$x = output_sid(:,3); \tag{2}$$

(2)'de gösterilen komutlarla elde etmiş olduğumuz u ve x giriş çıkış verilerinden yararlanarak en uygun modeli belirleme çalışmasına geçmek için Şekil 2'deki sistem model belirleme aracı arayüzüne giriş çıkış verilerini çekmemiz gerekmektedir. Burada sistemin hangi örnekleme süresinde çalıştığı bilgisinin doğru olarak girilmesi unutulmamalıdır. Sistem tanımlamadan elde edilen durum uzayı gösterimi;

$$A = \begin{bmatrix} -22.05 & -112.4 & -2.956e-10\\ 1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$
(3)
$$B = \begin{bmatrix} 1\\ 0\\ 0 \end{bmatrix}$$
(4)

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1.079e4 & 1.472e5 \end{bmatrix}$$
(5)

$$D = 0 \tag{6}$$

şeklindedir.

Sistem tanımlamadan elde edilen model ile gerçek sistemin, tanımlanan doğrusal bölge içerisinde, çeşitli birim basamak girdilere verdikleri cevaplar Şekil 4 de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, sistem tanımlama ile elde edilen model doğru ve yeterli bir şekilde gerçek sistem cevaplarını yakalamaktadır. Bu incelenen durumlar neticesinde (3),(4),(5) ve (6) denklemleri ile verilen modelin denetleyici tasarımı için kullanılmak üzere yeterli olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4: Gerçek Sistem ve Optimize Edilmiş Model Birim Basamak Cevapları Karşılaştırması

3. Optimal Kontrolör Tasarımı

Durum geri beslemeli kontrol hem kök yerleştirme ile hem de optimal kontrol (LQR) ile gerçekleştirilebilmektedir (bknz. Anderson ve Moore 2007). Kök yerleştirme metodunda, tasarımcının kapalı çevrim sistemin özdeğerlerinin yerine karar vermesi gerekmektedir. LQR ise ağırlıklı durum hatalarının karelerini ve kontrol eforunu minimize etmek üzerine kurulmuştur[10]. Optimal durum geri besleme regülasyonu, oluşturulan maliyet fonksiyonunu **J**'yi;

$$J = \int \left(x^{T}(t) Q x(t) + u^{T} R u(t) \right)$$
⁽⁷⁾

minimize eder. (7) denkleminde \mathbf{Q} ve \mathbf{R} simetrik, pozitif yarı kesin tanımlı ağırlık matrisleridir. Optimal geri besleme kazancı ise;

$$K = R^{-1} B^T P \tag{8}$$

şeklinde tanımlanmıştır. (8) deki kazançlar ise cebirsel Ricatti denkleminin **P** matrisinin çözümünden elde edilmektedir.

$$A^{T} P + PA - PBR^{-1} B^{T} P + Q = 0$$
⁽⁹⁾

Denklem (9) daki ağırlık matrislerinin, kapalı çevrim sistemin bir referans sinyali, kontrol sisteminin ürettiği sinyal vasıtası ile takip edebilmesi üzerine seçilmesi gerekmektedir. Sabitlenmiş bir \mathbf{Q} ağırlık matrisi için, kontrol sisteminin amacı, minimum durum hatasının elde edilebileceği bir \mathbf{R} matrisinin seçilmesidir. Bu durumda geri besleme kontrol sinyali;

$$u = -Kx + V\theta_r \tag{10}$$

Kontrol sinyalinin belirlenme aşaması eyleyici sınırlarına uygun olarak yapılmalıdır.

Ayrıca kalıcı hal hatasının giderilmesi ve sistemdeki gecikmelerin önüne geçilmesi amacıyla bu kontrol sinyaline ek olarak bir ileri-besleme terimi, kontrolör yapısına eklenmelidir;

$$V = -(C^{T}(A - BK)^{-1}B)^{-1}$$
(11)

Sisteme etkiyecek bozucu etkiler ve çeşitli sebeplerden kaynaklanan belirsizliklerin giderilmesi için referans ve gerçek pozisyonların farkının integrali kontrolör modeline ilave bir durum olarak eklenmektedir.

$$\varepsilon = \int \left(\theta_r - \theta_a\right) dt \tag{12}$$

denklem (12) de belirtilen Θ r ve Θ a referans ve gerçek pozisyon bilgilerini göstermektedir. Bütünleşik sistem için durum uzayı gösterimi;

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \varepsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \theta_r$$
(13)

Genişletilmiş Q ağırlık matrisi ise;

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 80 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}, R = 0.75$$
(14)

şeklinde belirlenmiştir.

3.1. Sürtünme için İleri-Besleme

Kapalı çevrim sistem performansı sisteme etkiyen Coloumb sürtünmelerin giderilmesi için eklenecek bir ileri-beslemeli kontrolör ile gerçekleştirilmiştir. Genel bir yaklaşım olarak sürtünme kuvvetini sabit ve harekete ters bir doğrultuda etkidiği varsayımı birçok durum için yeterli olmaktadır. İleri-Besleme kontrolör kazancı;

$$K_f = \frac{R_m F_e}{K_m}$$

şeklindedir.

Tablo 2 kontrolör kazançları

Sürtünme Kazancı Kf	1,06
İleri Besleme Kazancı V	0.3166
Geri Besleme Kazancı K1	0,006
Geri Besleme Kazancı K2	0.3154
Geri Besleme Kazancı K3	01/03/18
İntegral Kazancı Ki	-0.0004
Motor Direnci Rm	0.35
Tork Sabiti Km	0.0296
Coloumb Sürtünmesi Fc	0.02

3.2. Kontrol Yasası

İleri-Beslemenin eklenmiş olduğu tüm kontrol sistemi;

$$\Gamma = \begin{cases} K_f \operatorname{sgn}(\boldsymbol{\theta}_r), & \operatorname{Eger} |\boldsymbol{\theta}_r| > \sigma \\ K_f \frac{\boldsymbol{\theta}_r}{\sigma}, & \operatorname{Degilse} \end{cases}$$
(14)

şeklindedir. Böylece;

$$u = -[\mathbf{K}_{i,\theta} \ K_{\varepsilon}] \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \varepsilon \end{bmatrix} + [\Gamma \ V] \begin{bmatrix} 1 \\ \theta_r \end{bmatrix}$$
(15)

Tablo 2 deki değerler kullanılarak, şeklini almaktadır.

Sistemde kullanılan bütün kontrol yapısı ise Şekil 5 de gösterilen haldedir.



Şekil 5: Durum Geri Beslemeli Fırçasız DC Motorun Genel Kontrol Seması

4. Deneysel Çalışmalar

4.1. Deneysel Düzenek

Fırçasız DC Motorun, tanımlama ve kontrol için kullanılan test platformu Şekil 6 ile gösterilmiştir. Sistemin kontrolü ve tanımlamasında kullanılmak üzere veri aktarımını ve gerçek zamanlı kontrol uygulamasını sağlayan sistem SpeedGoat adlı firmanın bir xpc Target ürünüdür. Bu ürün sayesinde 40 Khz frekansa sahip PWM sinyalleri üretilebilmekte olup, kontrol algoritmaları 25 Khz frekansa çıkabilmektedir. Çalışmalarda kullanılan motor ise Maxon firmasının EC-40 serisine ait bir üründür. 171 Watt güce sahip ve 28 Volt gerilim beslemeli olan bu motor, düşük indüktans, düşük direnç, düşük mekanik hacim ve yüksek tork değerlerine sahiptir. Motora ait pozisyon, hız ve akım bilgileri yine xpc target aracılığı ile gerçek zamanlı olarak alınıp işlenmektedir. Yukarıda anlatılan kontrol yapısı ise Şekil 7 ile gösterilen Matlab simulink ortamında kurulmuş olup, yine gerçek zamanlı olarak xpc targetin PWM kanallarını kontrol etmektedir.



Şekil 6: Test Ortamı

4.2. Gerçek Zamanlı Pozisyon Kontrolü

Kontrolcünün ve sistemin takip performansının denenebilmesi için sisteme, çeşitli ve farklı şekillerde pozisyon referans girişi uygulanmaktadır. Merdiven şeklinde uygulanan bu basamak giriş için 50 rad 100 rad ve 150 rad lık pozisyon girdileri sürekli bir şekilde uygulanmıştır. Kapalı çevrim sistem için referans olarak verilen ve ölçülen pozisyon çıktıları Şekil 8 a) ve b) de gösterilmiştir. Kontrolör, referans sinyali düzenli bir şekilde takip edebilmiştir. Ayrıca düzenli hal hatası ise gözlemlenmiştir. Sistemde meydana gelen aşımlar ise, ilk durumdaki referans girdi ve gerçek çıktı arasındaki büyük farktan kaynaklanan, yüksek tork isteri sebebi ile oluşur. Sistem tanımlama ve doğrusallaştırma sırasında bu etkiler gözardı edilmiştir. Modellenmemiş bu doğrusal olmayan etkiler sistemin aşım yapmasına sebep olmuştur. Sonuç bölümünde bu tür sorunlar ile ilgili çözüm önerileri sunulacaktır. Şekil 8 b) de aşım olmaması ve takip işleminin daha düzgün bir şekilde yapılabilmesinin sebebi ise, referans pozisyon girişi ile gerçek pozisyon arasında anlık bile olsa büyük bir fark oluşmamasıdır. Burada kontrolör, sistem tanımlamanın ve doğrusallaştırmanın yapıldığı, kendi tasarlandığı çalışma bölgesinde kalmaktadır. Ayrıca tasarlanan optimal denetleyicinin, Kürkçü'nun önceki çalışmasında [9] meydana gelen tork dalgalanmasını azalttığı ve sistem cevabını daha kararlı hale getirdiği gözlenmiştir. Şekil 9 da verilen yakınlaştırılmış akım ve hız çıktıları incelendiğinde tasarlanan optimal kontrolcünün, 3-fazlı ve doğrusal olmayan etkilerinin çok olduğu bir sistem için, takip ve regülasyton işlemlerini başarılı bir şekilde yaptığı anlaşılacaktır.



Şekil 7: Gerçek Zamanlı Optimal Fırçasız DC Motor Kontrol Algoritması



Şekil 8: Deneysel Sonuçlar-Pozisyon a) Merdiven Basamak Girişi, b) Sinüs sinyal Girişi

Şekil 9 da gösterilen firçasız DC motorun A fazına ait akım grafiğinde hala bir dalgalanma mevcuttur. Bu dalgalanma tasarlanan optimal kontrolcünün ve sistemin ataleti sayesinde pozisyon çıktısında gözlenmemektedir. Ancak akımda meydana gelen bu dalgalanmalar sisteme doğrusal olmayan etkiler kattığından mümkün olduğu kadar giderilmesi gerekmektedir. Fırçasız DC motorun doğası gereği bu dalgalanmalar sıfıra indirgenememektedir[9]. Bu makalede ele alınan problemde akım kontrolcüsü, sistemle birleşik bir siyah kutu şeklinde ele alındığı için tasarlanacak pozisyon veya hız kontrolcüleri, bu problemin giderilmesinde kritik bir katkı sağlamayacaktır. Sonuç bölümünde bu problemin çözümü ile ilgili öneriler verilecektir.





Şekil 9: Deneysel Sonuçlar a)Akım, b)Hız

5. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışma, firçasız DC motor için, sistem tanımlama ve optimal pozisyon kontrol (LQR) metodu ile yapılan bir kontrolör tasarımı yaklaşımı sunmaktadır. Bir geri beslemeli kontrolör, ileri beslemeli bir sürtünme giderme kontrolörü ile genişletilmiştir. LQR tasarımı kontrol eforunu azaltıcı ve optimal geri besleme kazançlarına sahip bir kontrolör olarak karşımıza çıkmıştır. Çalışmada ele alınan kontrol sisteminin kararlı çalıştığı, dinamik ve statik cevaplarının iyi bir karakteristiğe sahip olduğu ortaya konulmuştur. Sistem tanımlama ve doğrusallaştırma aşamasında sistemin çalışma aralığı daraltılmıştır. Gelecek çalışmalarda, bu çalışmada yapılan sistem tanımlama ve doğrusallaştırma işlemi, birçok bölge için sırası ile yapılacak ve sistemin çalışacağı bütün uzay için optimal geri besleme kazançları elde edilecektir. Bu şekilde sistem üzerinde ki doğrusal olmayan etkiler azaltılacak ve sistemin cevabı daha gürbüz bir hale gelecektir.

Kapalı kutu halinde olan firçasız DC motor ve akım kontrolcüsü üzerinde oynama yaparak sistem performansında artış elde etmek mümkündür. Hali hazırdaki akım kontrolcüsü histerisis akım kontrolörüdür. Gelecek çalışmalarda, fazlardaki akımların salınımını azaltacak şekilde daha gelişmiş ve gürbüz etkileri olan kontrolörler tasarlanacaktır. Bu sayede siyah kutu şekline indirgenmiş sistemin doğrusal olmayan etkileri azaltılmış olacaktır.

Kaynakça

- P.Yedamale, Brushless DC (BLDC) Motor Fundamental. Chandler, AZ: Microchip Technology, Inc., March 15 2009.
- [2] B.K. Lee and M. Ehsani, Advanced Simulation Model for Brushless DC Motor Drives, *Electric Power Components and Systems* 31, 841-868, 2003.
- [3] W.Hong, W. Lee, and B.K. Lee, Dynamic Simulation of Brushless DC Motor Drives Considering Phase Commutation for Automotive Applications, *Electric Machines & Drives Conference, IEMDC'07, 2007.*
- [4] R. Akkaya, A.A. Kulaksız, and O. Aydogdu, DSP implementation of a PV system with GA-MLP-NN based MPPT controller supplying BLDC motor Drive, *Energy Conv. And Management* 48, 210-218,2007.
- [5] T.Y. Kim, B.K. Lee, and C.Y. Won, Modelling and Simulation of Multiphase BLDC Motor Drives Systems for Autonomous Underwater Vehicles, *IEEE'07*, 1366-1371,2007
- [6] R.Krishnan, Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, Taylor and Francis Group, 2010
- [7] J. Shao, D. Nolan, and T. Hopkins, "A novel direct back emf detection for sensorless brushless dc (bldc) motor drives," in *Proceedings of the Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC)*, 2002.
- [8] J. Xiu, S. Wang, and Y. Xiu, "Fuzzy adaptive single neuron nn control of brushless dc motor," *Neural Computing and Applications*, vol. 22, no. 3-4, pp. 607– 613, 2013.
- [9] B.Kurkcu, M.Celik, S. Cetin, I.Ozsoy, "Güdümlü bir Sistem için Fırçasız DC Motorun Modellemesi, Simulasyonu ve Uygulaması" TOK'13, 699-705, 2013
- [10] B.D.O Anderson & J.B Moore, Optimal Control: Linear Quadratic Methods, Prentice Hall International Inc., 1991