

PID, MPC ve HCA Yöntemleriyle DC Motor Periyodik Konum İzleme

Periodic Position Tracking of a DC Motor with PID, MPC and HCA Methods

Muhammet Ali ARICA¹, Ramazan TUNÇEL¹, Murat DOĞRUEL¹

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, İstanbul

arica.muhammet@std.izu.edu.tr

tuncel.ramazan@std.izu.edu.tr

murat.dogrueel@izu.edu.tr

Özetçe

DC motor, endüstri ve robotik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir cihazdır. DC motorun periyodik konum kontrolü için farklı kontrol teknikleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada kontrolörler olarak, geleneksel bir yaklaşım olan PID ve MPC kontrol metodlarının yanı sıra Harmonik Kontrol Dizileri (ing. HCA) kontrol yöntemi uygulanmıştır. Bu bildiriye, DC motor şaftı pozisyon referans sinyali $-\pi/2$ ile $+\pi/2$ radyan (-90° ile $+90^\circ$) arasında üçgen dalga olacak şekilde seçilerek her bir kontrolörün performansı analiz edilerek karşılaştırılmıştır.

Abstract

DC motor is a widely used device in industry and robotics applications. Different control techniques are used for periodic position control of the DC motor. In this paper, besides the traditional PID and MPC control methods, the Harmonic Control Arrays (HCA) control method is applied. The reference signal of the DC motor shaft is chosen as a triangular wave between $-\pi/2$ and $+\pi/2$ radians (-90° to $+90^\circ$), and the performance of each controller is analyzed and compared.

1. Giriş

DC motor, endüstride olduğu kadar robotik uygulamalarda da çok geniş uygulamalara sahiptir. DC motorlar, hassas, geniş, basit ve sürekli kontrol özellikleri nedeniyle elektrikli araçlar, elektrikli vinçler ve robotik manipulatörler gibi birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. DC motorlar tam sürekli tork üretme yeteneği, kontrollü frenleme, yüksek güçlerdeki benzer AC sürücülerle karşılaştırıldığında nispeten basit ve düşük maliyet özelliği gösterirler. Uygulamaların çoğunda, DC motorun bu uygulaması doğrusal bir sistem olarak modellendiği için lineer DC motorun konum kontrolü için Oransal-İntegral-Türevsel (ing. PID), Model Öngörülü Kontrol (ing. MPC) ve Harmonik Kontrol Dizileri (ing. HCA) teknikleri uygulanmıştır.

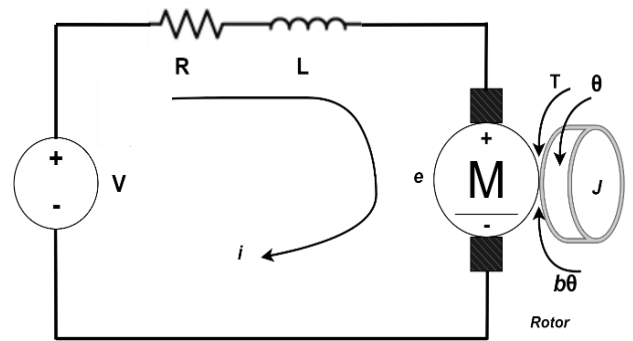
Bir DC motorun periyodik pozisyon takibi, motorun rotorunu düzenli aralıklarla belirli açılarda pozisyonlarda kontrol etme ve koruma sürecini ifade etmektedir. Bu kontrol, motorun giriş voltajını veya akımını ayarlamak için sensörlerden gelen geri bildirim kullanılarak elde edilir ve zaman içinde istenen pozisyonda uyumlu kalır. Periyodik

konum takibi için belirtilen kontrol algoritmaları olan PID, MPC ve HCA kontrol metodları hatayı girdi olarak alır ve motorun giriş gerilimi veya akımını ayarlayarak zaman içinde hedeflenen konumlarda senkronize kalmasını sağlar.

Bu çalışmada amacımız DC motorun konumunu kontrol etmektir. Bunun için en popüler iki kontrol algoritması olan PID ve MPC kontrol yöntemlerinin yanı sıra HCA metodu uygulanmıştır. Bu kontrol yöntemleri sistemin transfer fonksiyonu kullanılarak geleneksel yaklaşımı kullanır. Her denetleyicinin performansı DC motorun periyodik olarak pozisyonunu kontrol ederek ve gerekli özellikler kullanılarak karşılaştırılmıştır.

2. DC Motor Modellenmesi

DC motor ayrı ayrı uyarılır, alan ve armatür adı verilen iki sektörden oluşur. Armatürün elektrik eşdeğer devresi ve rotorun serbest cisim diyagramı aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.[2]



Şekil 1. DC motor eşdeğer devresi

Bu örnekte, fiziksel parametreler için aşağıdaki değerleri alacağız. Bu değerler, Carnegie Mellon Üniversitesinin lisans kontrol laboratuvarındaki gerçek bir motordan yapılan deneylerle elde edilmiştir [2].

Tablo 1: DC motor parametreleri

Sembol	Tanım	Değer/Birim
J	rotorun atalet momenti	3.2284e-6 kg.m ²
b	motor viskoz sürtünme sabiti	3.5077e-6 N.m.s
K_b	elektromotor kuvvet sabiti	0.0274 V/rad/sec
K_t	motor tork sabiti	0.0274 N.m/Amp
R	elektrik direnci	4 Ω
L	elektrik endüktansı	2.75e-6 H

Şekil 1 bu çalışmada kullanılan DC motor modeli göstermektedir. Sistem girişinin motor armatürüne uygulanan voltaj kaynağını V , çıkışın ise milin konumunu da θ olarak belirttik. Rotor ve milin rijit olduğu varsayarsak viskoz bir sürtünme modeli olarak sürtünme torku şaftın açışal hızıyla orantılıdır. Genel olarak, bir DC motor tarafından üretilen tork, armatür akımı ve manyetik alanın gücü ile orantılıdır. Bu örnekte, manyetik alanın sabit olduğunu ve bu nedenle motor torkunun aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi sabit bir K_t faktörü ve armatür akımı i ile orantılı olduğunu söyleyebiliriz.

$$T = K_t i \quad (1)$$

Burada T motor torkunun olduğu yerde, armatür akımı ile orantılıdır. Ters elektromotor kuvveti (emf) e , sabit bir faktör K_b ile şaftın açışal hızı ile orantılıdır.

$$e = K_b \dot{\theta} \quad (2)$$

SI birimlerinde motor torku ve geri emf sabitleri eşittir, yani $K_t = K_b$; bu nedenle hem motor tork sabitini hem de ters emf sabitini temsil etmek için K kullanılacaktır. Şekil 1'den, Newton'un 2. yasasına ve Kirchhoff'un gerilim kanununa dayanan denklemleri türetebiliriz.

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = K i \quad (3)$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V - K\dot{\theta} \quad (4)$$

J mekanik atalet momentumu, b viskoz katsayısı ve θ rotorun konum açısıdır. L ve R , sırasıyla motor armatür kanatlarının endüktansı ve direncidir. Laplace dönüşümünü kullanarak armatür voltajını giriş, rotor konumunu ise çıkış olarak kabul ederek transfer fonksiyonu şu şekilde yazılır:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{s((Js+b)(Ls+R)+K^2)} \left[\frac{rad}{V} \right] \quad (5)$$

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{0.0274}{8.878e-12s^3 + 1.291e-05s^2 + 0.0007648s} \left[\frac{rad}{V} \right] \quad (6)$$

Denklem (6), sistemin numerik olarak transfer fonksiyonunu temsil etmektedir. Ancak bu modelde kutuplardan biri 0, diğeri yaklaşık -60 iken, üçüncü kutup -1.45e+6 olup diğeri

ikisine göre mutlak değer olarak çok büyüktür yani çok daha hızlı bir cevap üretmektedir. Bu türden bir sistemin MPC ile kontrolü nümerik olarak sorunlu olacaktır, zira örnekleme zamanı (10^{-8} sn seviyelerinde) çok düşük alınması gerekecek bu da saniye seviyesindeki periyotlar için hesaplamayı aşırı yavaşlatacaktır. Aslında bu kadar hızlı bir kutbu diğerlerinin yanında değerlendirmeye almaya gerek yoktur. Bu nedenlerle, DC motor transfer fonksiyonunda hızlı mod elimine edilerek, aşağıdaki daha düşük dereceli ve basitleştirilmiş yaklaşık bir model seçilmiştir:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{2120}{s^2 + 60s} \left[\frac{rad}{V} \right]. \quad (7)$$

3. Kontrol Sistem Tasarımı

Bu uygulamada, DC motor şaftı pozisyonunun $-\pi/2$ ile $+\pi/2$ radyan (-90° ile $+90^\circ$) arasında üçgen dalga şeklinde bir referans sinyali takip etmesi, yani sabit hız ile sola sağa sürekli dönmesi istenmektedir. Sistem girişi -4 V ile +4 V arasında sınırlandırılmıştır. Ayrık zamanlı olarak gerçekleştirilecek kontrolörler için örnekleme adımı $T_s = 1e-3$ sn olarak seçilmiştir.

DC motorun periyodik konum izlemesi PID, MPC ve HCA Kontrol Yöntemleri ile gerçekleştirilecektir. Aşağıda kontrol yöntemleri detaylandırılmaktadır.

A. PID Konum Kontrolü

PID kontrollerinin kullanışlılığı, çoğu kontrol sistemine genel uygulanabilirliklerinde yatmaktadır. Özellikle sistemin matematiksel modeli bilinmediğinde karmaşık sistemler için analitik tasarım yöntemleri kullanılamaz, bu nedenle PID denetleyicisinin oldukça yararlı olduğu gösterilmiştir [3].

PID kontrolü (Oransal-İntegral-Türev), çeşitli alanlarda en sık kullanılan kapalı çevrim kontrollerden biridir. PID kontrolünün temel amacı, ayar noktası ile hesaplanan değer arasındaki farkı hesaplayarak hatayı en aza indirmektir. Her ayarın (P, I ve D) bağımsız veya aynı anda çalışabileceği bir kontrol uygulamasıdır.

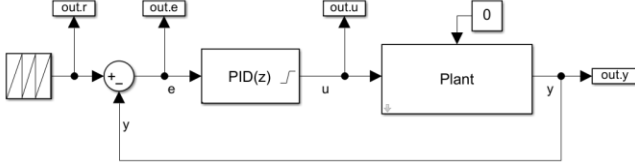
PID kontrolünün [4] sürekli zamandaki ifadesi şöyledir:

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \int_{t_0}^t e(t) dt + K_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

(8)'de açıklanan PID kontrol yönteminin sürekli formunda var olan $u(t)$ kontrol değişkeni ve $e(t)$ kontrol hatasıdır. Denetleyici parametreleri orantılı kazanç K_p , integral kazanç K_i ve türev kazancı K_d 'dir. PID için [5]'te tasarlanan kontrolör kullanılmış olup Tablo 2'de parametreler gösterilmiştir. Ayrıca, PID denetleyicisi Şekil 2'de belirtildiği gibi MATLAB/Simulink ortamında sisteme uygulanmıştır.

Tablo 2: PID kazanç parametreleri

Parametreler	Değerler
K_p	21
K_i	500
K_d	0.15



Şekil 2. PID sistem uygulaması

B. MPC Konum Kontrolü

Model Öngörülü Kontrol (MPC), dinamik sistem modeline dayanan optimal bir kontrol metodolojisidir. MPC'nin ana fikri, mevcut örneklemede, çıktı tahmin yörüngesinin ($y(t)$) optimal bir yaklaşımda bir referans sinyali ($r(t)$) izlemek için hesaplanmasıdır [6]. Bu amaçla, performans indeksini ve kontrol eyleminin agresifliği gibi diğer etkileri dikkate almak gerekir [6-7].

Süreç, tahmin ufku (prediction horizon) N_p olarak bilinen belirli sayıda gelecekteki etkileşimler üzerinden tanımlanır. Sistemin girdileri, tahmin edilen yörünge boyunca sistemin davranışını sürdürmek için değişkenlik gösterir. Bu eylem, kontrol ufku (control horizon) N_c olarak bilinen belirli sayıda örnek üzerinde değişir. Modeli yani sistemin dinamiklerini bilerek, her tahmin ufkunda çıkış yörüngesini oluşturmak için matematiksel bir prosedür gerçekleştirilir [6-7]. Hesaplamanın etkinliği, sistemlerin davranışları ve kısıtlamaları dikkate alınarak sistem fonksiyonu (cost function) ile ölçülür [7].

Ayrık zaman durum uzayı modeli şu şekilde verilmektedir [8]:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (9)$$

Daha sonra durum değişkeni ve çıktı değişkeninin tahminini yaparak giriş artışı şu şekilde tanımlanır:

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ u(k) &= \Delta u(k) + u(k-1) \end{aligned} \quad (10)$$

Böylece, denklem (9) şu hale gelir:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k-1) + B \Delta u(k) \quad (11)$$

Belirlenen ufuk aralığı için yaklaşan süreç çıktısı, tahmin ufku olarak adlandırılır ve süreç modeli kullanılarak her örnekleme zamanında tahmin edilir. Böylece, elimizdeki tahmin ufku N_p ve kontrol ufku N_c şu şekilde belirlenir:

$$\begin{aligned} x(k+N_p|k) &= Ax(k+N_p-1|k) + Bu(k+N_p-1|k) \\ y(k+N_p|k) &= Cx(k+N_p|k) \end{aligned} \quad (12)$$

Kriter veya amaç fonksiyonunun genel fonksiyonu şu şekilde verilir:

$$J = \sum_{j=1}^{N_p} [y(k+j) - r(k+j)]^2 + p \sum_{j=1}^{N_c} [u(k+j-1)]^2 \quad (13)$$

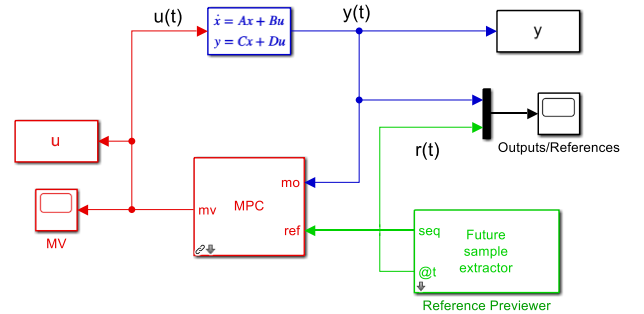
Bu denklem, denetleyicinin tahmin yörüngesine $y(k)$ en uygun yörüngeye ulaşmasını sağlar. Denklem, $u(k)$ kontrol değişkeninin mevcut ve gelecekteki girdilerinin değerlerinden oluşur. Gelecekteki girdiler hesaplandıktan sonra, sisteme yalnızca ilk kısmı uygulanacaktır. Bir sonraki etkileşimde ($k=k+N_c$) işlem tekrarlanacaktır [7][9]. Bir örnekle, N_p ve N_c horizonları bir sonraki etkileşim için uzunlukları korunarak ileri kaydırılacaktır. Bundan sonra, gelecekteki yeni girdiler hesaplanır ve yalnızca ilki uygulanır.

MPC sistemi MATLAB/Simulink programında Şekil 3'te gösterildiği şekilde tasarlanmıştır. Burada "Future sample extractor" bloğu referansın gelecekte olacak değerlerini MPC bloğuna gerçek zamanda vererek, gelecek sinyallerin doğru şekilde optimize edilmesini sağlamaktadır.

MPC için tahmin ufku (N_p) 200 ve kontrol ufku (N_c) 50 olarak seçilmiştir. Ayrıca MPC tarafından kontrol edilen sistemin giriş değişkeni olan Manipülasyon Değişkeni (ing. MV) sınırları minimum -4 ve maksimum +4 olarak ve sistemin çıkış değişkeni ise minimum -10 ve maksimum +10 olarak ayarlanmıştır.

(7)'de verilen sistemin, (9)'da verilen ayrık zamanlı durum denklemi matrisleri şu şekildedir:

$$A = \begin{bmatrix} -60 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [0 \quad 2120].$$

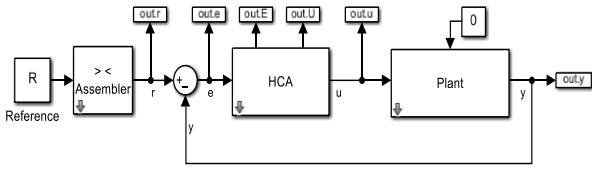


Şekil 3. MPC sistem uygulaması

C. HCA Konum Kontrolü

Harmonik Kontrol Dizileri (HCA), periyodik referans ve distorsiyona sahip denetim sistemleri için geliştirilen bir yöntemdir [10-11]. Yöntemin ilkesi, seçilen denetim sinyali ya da sinyallerin, klasik kontrol yöntemlerindeki gibi direk olarak hata işaretinin üzerinde uygulanması yerine, hata işaretinin Fourier açılımının seçilen bileşenlerinin her birine ayrı ayrı uygulanması yatmaktadır. HCA iç yapısında kullanılan kontrol yöntemi olarak Oransal-İntegral (PI) denetimi seçilerek, hata işaretinin her bir Fourier bileşeni üzerine farklı oransal ve integral kompleks katsayıları (K_p ve K_i) uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

HCA Şekil 4'te gösterildiği gibi [12], $e(t)$, referans girişi $r(t)$ ile sistem çıkışı $y(t)$ arasındaki fark ve $u(t)$, denetleyici tarafından üretilen sistem girişi olan tipik bir birim geri besleme sistemi ele alalım. Kontrolör olarak bir HCA seçildiğinde, belirli bir sinyal periyodu olan T 'nin temel periyot olarak belirtilmesi gerekir. Açısal frekans $\omega = 2\pi/T$ olarak tanımlanır [12]. Dikkate alınan en yüksek harmonik sayı H 'dir.



Şekil 4. HCA sistem uygulaması

Sürekli zamanda HCA kontrol aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\langle u \rangle (t) = K_p \langle e \rangle (t) + K_i \int_0^t \langle e \rangle (t) dt \quad (14)$$

Burada, hata ve çıkış işaretinin yürüten Fourier serisi katsayı işaretleri gösterilmiştir. K_p ve K_i karmaşık değerli oransal ve integral kazanç matrisleridir. Bu matrislerdeki köşegen dışı veya çapraz terimler, doğrusal olmayan sistemler için yararlı olabilir; ancak, kullanılmadığı takdirde, bu matrisler köşegen matrisler olarak seçilebilir; bu durumda, her hata harmonik sinyali, yalnızca karşılık gelen kontrol harmonik sinyalini değiştirir. Harmonik Kontrol Dizisi terimi, her bir harmonik için ayrı bir denetleyicinin kontrol sinyalini oluşturmak üzere çalışması nedeniyle türetilmiştir.

Denklem (14) ayrık zamanlı versiyonu şu şekilde kullanılabilir:

$$\langle u \rangle [n] = K_p \langle e \rangle [n] + K_i T_s \sum_0^n \langle e \rangle [n] \quad (15)$$

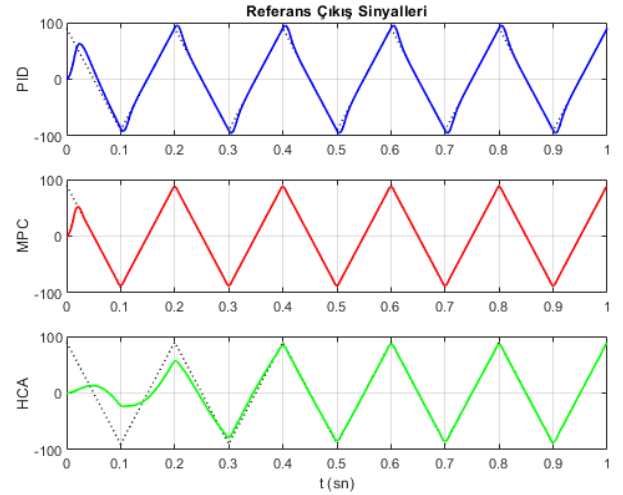
Sistem için üçgen şeklinde referans sinyali normalde sonsuz adet harmonik içermekle birlikte, $H=11$ adet harmonik seçilerek, üçgen dalga yeterince temsil edilmiştir. HCA bu 11 harmoniği kontrol ederek üçgen dalgaya yakın bir çıkış elde etmektedir. Referans harmonik vektörü (R) ve HCA PI kompleks kazançları (K_p ve K_i) Tablo 3'te verildiği şekilde seçilmiştir.

Tablo 3: HCA R , K_p ve K_i parametreleri

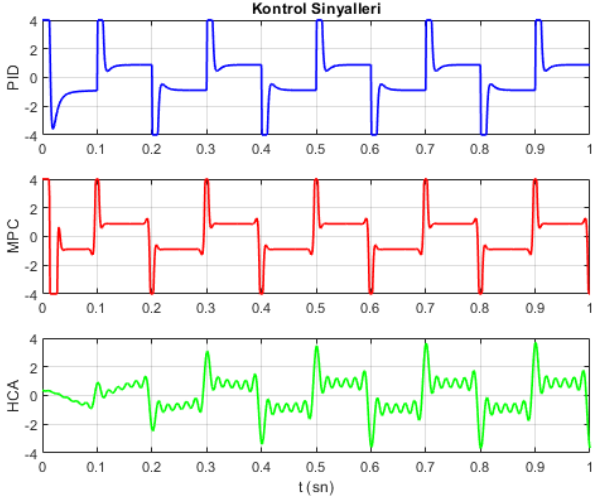
H	R	K_p	K_i
0	0	0.4	3
1	0.63667	0.3+0.03i	-1.7+3.2i
2	0	0	-6.1+5.9i
3	0.070788	0	-14+8.8i
4	0	0	-25+12i
5	0.025517	0	-38+15i
6	0	0	-55+18i
7	0.013045	0	-75+21i
8	0	0	-98+23i
9	0.0079121	0	-120+26i
10	0	0	-150+29i
11	0.005314	0	-190+32i

4. MATLAB/Simulink Simülasyon Sonuçları

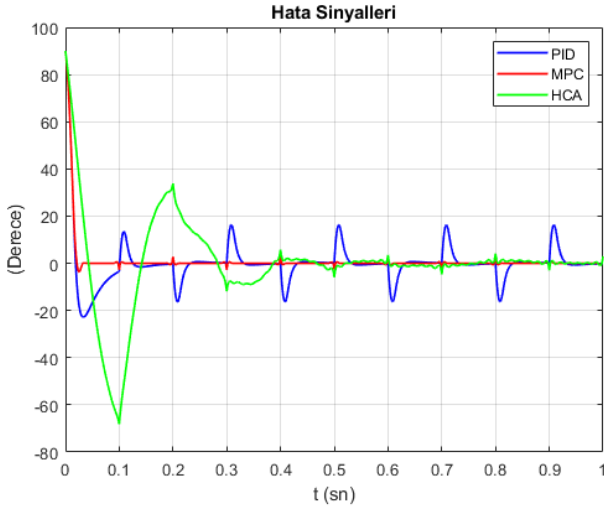
(7)'de verilen nominal model kullanılarak, ele alınan kontrolörler için (derece cinsinden) motor pozisyonunu çıkışları, kontrol sinyalleri ve hata sinyalleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 5. Nominal sistem için PID, MPC, HCA referans ve çıkış sinyalleri



Şekil 6. Nominal sistem için PID, MPC ve HCA kontrol sinyalleri



Şekil 7. Nominal sistem için PID, MPC ve HCA hata sinyalleri

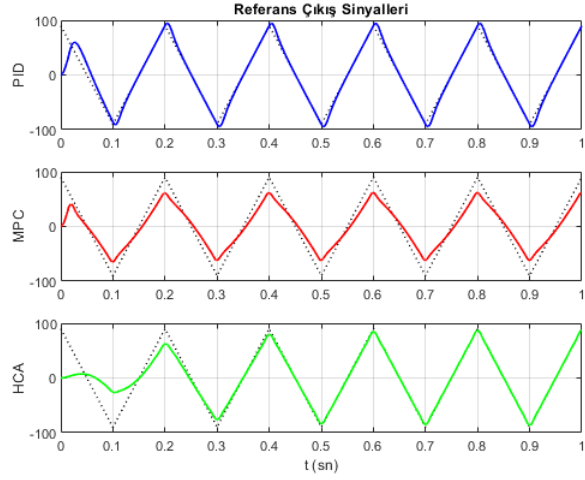
Burada, MPC için nominal ve gerçek sistem tam olarak uyduğundan, Şekil 5 ve 7'de görüldüğü gibi, oldukça iyi bir geçici hal ve sürekli hal performansı elde edilmektedir. PID geçici hal olarak iyi olmakla birlikte sürekli halde kalıcı hata vermektedir. HCA ise ilk başta geçici halde sistemdeki harmonikleri oturtmakta geç kalsa da sürekli halde hatayı minimum kılmaktadır, yani zamanla referans sinyaline neredeyse tam olarak oturmaktadır. Ayrıca Şekil 6'da sisteme uygulanan sınırlandırılmış giriş işaretleri gösterilmektedir.

Şimdi, sistemin gerçek modelinin nominalden farklı olduğunu veya zaman içinde değişmiş olduğunu değerlendirelim. (7)'de verilen transfer fonksiyonunda 60 olan parametreyi 100 olarak güncelleyelim, zira bu sistemin Tablo 1'de verilen parametrelerin değişiminden kaynaklanabilecektir.

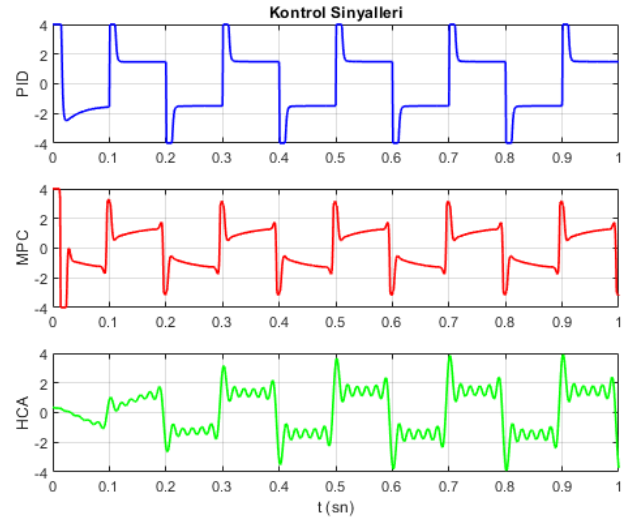
Bu durumda gerçek sistem transfer fonksiyonunun (16)'da olduğu gibi varsayalım.

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{2120}{s^2 + 100s} \left[\frac{rad}{V} \right] \quad (16)$$

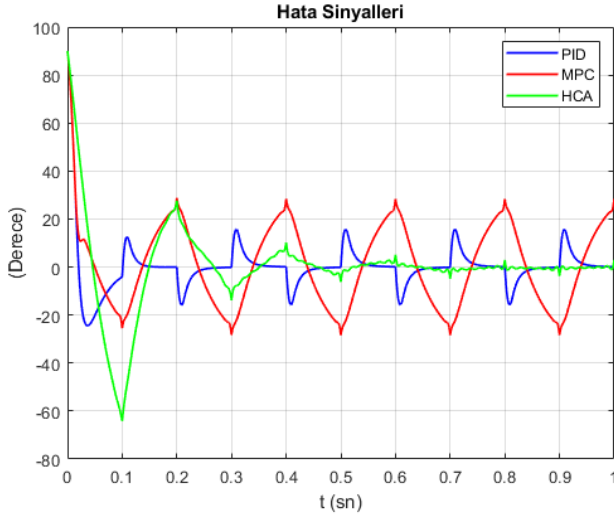
Yine, nominal model için tasarlanmış olan önceki kontrolörler kullanıldığında, değişmiş sistem için motor pozisyonunu çıkışları, kontrol sinyalleri ve hata sinyalleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 8. Gerçek sistem için PID, MPC, HCA referans ve çıkış sinyalleri



Şekil 9. Gerçek sistem için PID, MPC ve HCA kontrol sinyalleri



Şekil 10. Gerçek sistem için PID, MPC ve HCA hata sinyalleri

Görüldüğü gibi bu durumda, MPC modelindeki uyumsuzluk nedeniyle motor pozisyonunda oldukça büyük bir hata ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte PID ve HCA yine önceki benzer performanslarını gösterebilmektedir. Böylece, HCA'nın model değişiminde dahi hata işaretini elimine edebildiği ve MPC ve PID kontrol yöntemlerine göre iyi bir sonuç sağladığı gözlemlenmiştir.

6. Sonuçlar

Bu araştırmanın temel amacı, DC motorun periyodik olarak konum izlenmesini PID, MPC ve HCA kontrol yöntemleri ile uygulamaktır. Bu kontrol yöntemlerinin sonuçları simülasyon ortamında görsellerle desteklenerek karşılaştırılmıştır. PID, yükselme süresini hızlandırmayı başarmıştır, ancak periyodik yerleşmeyi sağlayamamıştır, zira kapalı çevrimdeki bulunan iki integral (sistem tipi 2) ancak sabit veya rampa işaretleri için kalıcı hatayı yok edebilmektedir. Bu belli süre içinde kısmi rampa referansına tam uyumu sağlamakla birlikte, geçişlerde meydana gelen hata miktarı oldukça büyüktür. MPC kontrol sistemi ise, nominal sistem için optimize edildiğinden, hızlı yükselme süresi ile ve önemli miktarda kalıcı hata olmadan oldukça iyi bir performans sağlamıştır. HCA, başlangıçta geçici halde sistemdeki harmonikleri orturtmakta gecikse de, sürekli halde hatayı minimum kılmaktadır.

HCA ve PID sistem parametre değişimlerine karşı daha gürbüz iken, MPC buna karşı oldukça hassastır. Yani sistem modelindeki değişimler doğrudan MPC performansını etkilemektedir. Bu durumda çok fazla hatalar oluşabilmekte ve sistem kontrol başarımı kabul edilebilir düzeyden uzak kalabilmektedir. Sürekli durumda periyodik referanslı sistemler için, PID, yapısı gereği sıfır hataya ulaşamazken, HCA harmonikleri ayrı ayrı kontrol ederek minimum hatayı yakalayabilmektedir.

Kaynakça

- [1] Tan KK, Zhao S. Precision motion control with a high gain disturbance compensator for linear motors. *ISA Transactions* 2004;43:399–412.
- [2] <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorPosition§ion=SystemModeling>
- [3] H. Neenu Thomas and Dr. P.Poongodi, "Position Control of DC Motor Using Genetic Algorithm Based PID Controller", *Proceedings of the World Congress on Engineering 2009 Vol. II, WCE2009, July 1-3, 2009, London, U.K*
- [4] Mardiljah, Amirul Hakam, Didik Khusnul Arif, "PID-MPC Control Design To Control Oil Temperature In Main Fermentor Machine PT.Cheil Jedang, Jombang-Indonesia ", *2018 International Conference on Computer Engineering, Network and Intellegent Multimedia*.
- [5] <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorPosition§ion=ControlPID>
- [6] A. Syaichu-Rohman and R. Sirius, "Model predictive control implementation on a programmable logic controller for DC motor speed control," *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEEI.2011.6021841*.
- [7] H. Wu, L. Zhang, J. Yang and S. Li, "Model predictive control for DC-DC buck power converter-DC motor system with uncertainties using a GPI observer," *2017 36th Chinese Control Conference (CCC), 2017, pp. 4906-4911, doi: 10.23919/ChiCC.2017.8028129*.
- [8] Fahrudin R, Perancangan pengendali model predictive control (MPC) pada sistem heat exchanger dengan jenis karakteristik shell and tube, *Doctoral dissertation, Universitas Indonesia, 2010*.
- [9] A. Syaichu-Rohman and R. Sirius, "Model predictive control implementation on a programmable logic controller for DC motor speed control," *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEEI.2011.6021841*.
- [10] M. Dogruel, "Harmonik kontrol dizileri," presented at the *Turkish Nat. Symp. Autom. Control, Istanbul, Turkey, Jun. 2005*.
- [11] M. Dogruel, H. H. Çelik, "Harmonic control arrays method with a real time application to periodic position control", *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 521–530, May. 2011
- [12] Murat Dogruel, "Modeling of Harmonic Control Arrays using MATLAB/Simulink with an Application to a Hot Rolling Mill Process", *European Control Conference (ECC), Bukresh, Romania, 2023*.