

Manyetik Kaldırma Sistemi için Bulanık Mantık Kazanç Ayarlı PIV Denetleyici Tasarımı ve Gerçekleşmesi

Eyüp Gürcan¹, Erman Selim¹, Selen Çekinir², Musa Alci¹

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

[eyup.gurcan, erman.selim, musa.alci]@ege.edu.tr

²Elektrik ve Enerji Bölümü
Yaşar Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu
selen.cekinir@yasar.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada tek eksenli doğrusal olmayan manyetik kaldırma sistemi için bulanık kazanç ayarlı denetleyici tasarımı yapılmış ve sonuçlar deney düzeneği yardımıyla test edilmiştir. Temel olarak bir bobin, konum algılayıcı ve metal toptan oluşan manyetik kaldırma sisteminde bobinin akımı ayarlanarak topun istenen mesafede tutulması sağlanır. Denetleyici konum algılayıcıdan aldığı veri ile referans konum değerini karşılaştırarak bobin akımını ayarlar. Akım değerine bağlı olarak bobinde oluşan elektromanyetik kuvvet ile topun konumu ayarlanır. Konum ile akım arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu için öncelikle sistem doğrusallaştırılmıştır. Akımı dengelemek için PI denetleyici, konumu ayarlamak için PIV denetleyici kullanılarak basamaklı (cascade) kontrol yapılmıştır. PIV kazançlarını ayarlamak için ise bulanık mantık kazanç ayarı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan denetleyici Quanser firmasının manyetik kaldırma modeli üzerinde gerçek zamanlı olarak çalıştırılıp test edilmiştir. Yapılan deney sonucunda topun istenilen yörüngeyi başarıyla takip ettiği görülmüştür.

1. Giriş

Manyetik kaldırma düzeneği bir nesneyi herhangi bir fiziksel temas olmadan manyetik alan kuvveti ile havada tutabilen bir sistemdir [1]. Hava boşluğunda bulunan metal top yer çekiminin etkisiyle aşağı doğru hareket ederken üstünde bulunan bobinin yarattığı elektromanyetik kuvvet ile bu hareket dengelenmeye çalışılmaktadır. Manyetik kaldırma sistemi akademik olarak kontrol mühendisliği alanında [2], pratik endüstriyel uygulamalarda [3], bazı mikro robotik uygulamalarda [4], sürtünmesiz rulmanlar ve yüksek hızlı trenlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Manyetik kaldırma sisteminin matematiksel modeli 3. dereceden doğrusal olmayan bir sistem olduğu için denetleyici tasarımı oldukça karmaşık bir hal alabilmektedir. Bu nedenle ya doğrusal olmayan denetçi tasarımı yapılabilir ya da sistem dinamikleri doğrusallaştırılıp doğrusal olmayan etkiler giderilebilir ve sistem denge noktalarında kararlı hale getirilebilir. Sistem kararsızlıklarını etkin bir şekilde düzenleyebilen PID veya PD denetleyiciler tasarlanmıştır [5]. Ancak doğrusal denetleyicilerin takip performansı, denge noktasından zamanla artan sapmalar nedeniyle kötüye gidebilir. Bu nedenle doğrusal olmayan parametreleri de göz önünde bulundurmamak gerekir. Kaldırılan kütle değişmesi, direnç ve endüktans değerlerinin elektromanyetik ısınma

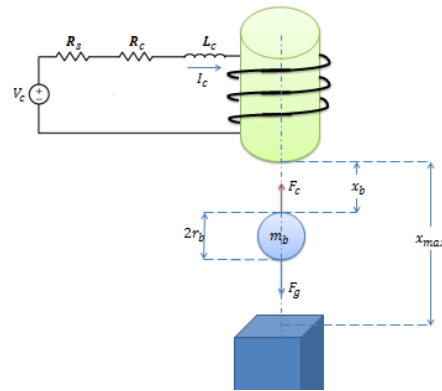
nedeniyle değişmesi gibi doğrusal olmayan parametreler dikkate alınarak, uyarlanabilir doğrusal olmayan H_∞ denetleyici [6], nicel geri bildirim teorisi [7] gibi bazı çalışmalar da gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada konum kontrolü için doğrusal PIV denetleyici ve elektromıknatis bobine uygulanacak akım için PI denetleyici basamaklı olarak kullanılmıştır. Farklı konum değerlerinden kaynaklanan doğrusal olmayan parametrelerin etkileri ise bulanık mantık sonuç çıkarım motoru ile PIV kazançları ayarlanarak sisteme dahil edilmiştir. Bulanık mantık kazanç ayarlı denetleyici, sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymamaktadır. MATLAB-Simulink programı kullanılarak denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiş ve Quanser firmasının manyetik kaldırma fiziksel düzeneği üzerinde denenmiştir.

İkinci bölümde manyetik kaldırma sistem modeli ve doğrusallaştırma işlemleri, üçüncü bölümde PIV denetleyici tasarımı ve kazanç değerlerinin bulanık mantıkla ayarlanması açıklanmıştır. Dördüncü bölümde sistemin kapalı çevrim kararlılık analizi yapılıp, beşinci bölümde deneysel sonuçlar sunulmuştur.

2. Manyetik Kaldırma Sistemi

Manyetik kaldırma sistemi, elektromanyetik etkiyle metal bir nesnenin üzerine düşen kuvvetin ayarlanabildiği elektromekanik bir sistemdir. Elektriksel olarak akım kontrolü ve mekanik olarak pozisyon kontrolü yapılmalıdır. Sistemin genel yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Manyetik kaldırma sistemi

2.1. Sistem Denklemleri

Denetimi yapılacak model olan manyetik kaldırma sisteminin temelde iki bölümü vardır. Birinci kısım, uygulanan gerilimi manyetik kuvvete çeviren bobin devresidir. Bu bölüm için Kirchhoff kanunları uygulanacaktır. İkinci kısım ise RL devresinde üretilen kuvveti girdi olarak kabul eden ve metal topa hareket kazandıran mekanik sistemdir. Mekanik sistem için Newton kanunları uygulanacaktır.

Elektrik devresini seri RL devresi olarak düşünersek Eşitlik (1) elde edilir.

$$V_c = (R_c + R_s)I_c + L_c \frac{dI_c}{dt} \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de bulunan seri direnç R , bobinin iç direnci R_c ve akım ölçümü için kullanılan R_s direncinin toplamıdır. Bobin endüktansı L_c 'nin zamanla veya pozisyonla değişmediği varsayılmıştır. I_c bobin akımı sistem değişkeni, V_c de sistem girişidir.

Mekanik sistem için kuvvetler Eşitlik (2) ve (3)'te, hareket denklemini ise Eşitlik (4)'te gösterilmiştir.

$$F_c = \frac{K_m I_c^2}{2x_b^2} \quad (2)$$

$$F_g = m_b g \quad (3)$$

$$-F_c + F_g = m_b \frac{d^2 x_b}{dt^2} = -\frac{K_m I_c^2}{2x_b^2} + m_b g \quad (4)$$

Mekanik sistem denklemlerindeki K_m manyetik kuvvet sabiti, m_b metal topun ağırlığı, g yer çekim ivmesidir. Bunların yanı sıra x_b topun bobine olan uzaklığı ve sistem değişkenidir. Hareket denklemini ikinci derece sistem olduğu için otonom forma çevirdiğimizde konumun türevi olan hız ($\dot{x}_b = v_b$) da sistem değişkeni olmaktadır. Bütün sistemin matematiksel modeli diferansiyel formda Eşitlik (5)'te birleştirilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{I}_c &= -\frac{R}{L_c} I_c + \frac{1}{L_c} V_c \\ \dot{x}_b &= v_b \\ \dot{v}_b &= -\frac{K_m I_c^2}{2m_b x_b^2} + g \end{aligned} \quad (5)$$

Sistemin genel yapısının gösterildiği Şekil 1'de diferansiyel denklemde tanımlanan elektriksel veya mekanik sabitler, kuvvetler ve bobin akımı gösterilmektedir.

2.2. Matematiksel Modelin Doğrusallaştırılması

Topun sabit bir uzaklıkta havada asılı durması için ivmesinin sıfır olması gerekir. Bu durumun gerçekleşmesi $F_c = F_g$ şartını sağlaması halinde olur. Kuvvetler birbirine eşitlendiğinde konum ve akım arasındaki bağıntı Eşitlik (6)'daki gibi bulunur.

$$\frac{I_c}{x_b} = \sqrt{\frac{2mg}{K_m}} \quad (6)$$

Sistem denklemlerinden akım ve konumun türevini veren denklemler doğrusal formdadır. Fakat hızın türevini veren denklemler doğrusallaştırılacaktır. Doğrusallaştırma işlemi x_{b0} ve I_{c0} noktaları etrafında yapılmaktadır. Eşitlik (5)'in üçüncü denklemini Taylor serisine açılırsa Eşitlik (7) yazılır.

$$\ddot{x}_b = -\frac{K_m I_{c0}^2}{2m_b x_{b0}^2} + g + \frac{K_m I_{c0}^2}{m_b x_{b0}^3} x_b - \frac{K_m I_{c0}}{m_b x_{b0}^2} I_c \quad (7)$$

Doğrusallaştırılan denklem sadece mekanik sisteme karşılık gelmektedir. Elektriksel ve mekanik sistem için doğrusallaştırılan Denklem (5)'in ilk eşitliğine ve Eşitlik (7)'ye Laplace dönüşümü uygulanırsa transfer fonksiyonları Eşitlik (8)'deki gibi elde edilir.

$$G_e(s) = \frac{1}{L_c s + (R_c + R_s)} \quad (8)$$

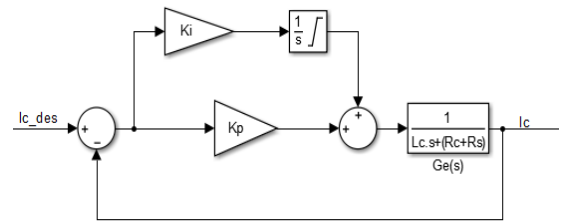
$$G_m(s) = -\frac{x_{b0}}{I_{c0}} \frac{2g}{x_{b0} s^2 - 2g} \quad (9)$$

3. Denetleyici Tasarımı

Matematiksel modeli elde edilen doğrusal olmayan manyetik kaldırma sistemi için doğrusal denetleme yöntemlerinden PIV (Proportional, Integral, Velocity) denetleyici tasarımı yapılmıştır. PIV denetleyici topun konumunu kontrol etmek için kullanılmaktadır. Ancak topun pozisyonu kontrol edilmeden önce elektro-mıknatıs bobin akımının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bobinin akım kontrolü için PI (Proportional, Integral) denetleyici kullanılarak basamaklı kontrol gerçekleştirilmiştir.

3.1. Akım Kontrolü için PI Denetleyici Tasarımı

Elektromıknatıs bobinin akım kontrolü için PI denetleyici tasarlanmıştır. Sistemin kapalı çevrim gösterimi Şekil 2'deki gibidir.



Şekil 2: Akım PI kontrol şeması

Şekil 2'de verilen blok diyagramından kapalı çevrim transfer fonksiyonu Eşitlik (10)'daki gibi bulunur

$$T_c(s) = \frac{I_c}{I_{c_{des}}} \quad (10)$$

$I_{c_{des}}$ topu dengede tutmak için gereken referans akım, I_c ise ölçülen akım değerini simgelemektedir. PI denetleyicinin transfer fonksiyonu ise Eşitlik (11)'deki gibidir [8].

$$T_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s}. \quad (11)$$

Burada K_p oransal kontrol kazancını, K_i ise integral kontrol kazancını göstermektedir. Eşitlik (10), (11) ve Eşitlik (8)'de verilen elektrik devresi transfer fonksiyonu kullanılarak PI denetleyici ile denetlenen elektromıknatısın kapalı çevrim transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi olur.

$$T_C(s) = \frac{K_p s + K_i}{L_c s^2 + (R_c + R_s + K_p)s + K_i}. \quad (12)$$

Elektrik sistemin normalleştirilmiş karakteristik denklemi aşağıdaki gibi olur

$$s^2 + \frac{(R_c + R_s + K_p)}{L_c} s + \frac{K_i}{L_c} = 0. \quad (13)$$

Denetlenen sistemin istenilen kutuplarının karakteristik denklemi Eşitlik (14)'teki gibidir.

$$s^2 + (-p_2 - p_1)s + p_2 p_1 = 0 \quad (14)$$

p_1 ve p_2 kapalı çevrim istenilen kararlı kutupları temsil etmektedir. Manyetik kaldırma sisteminin kararlı çalışabilmesi için bobin akımının kontrolü oldukça önemlidir. Akım değerinin istenilen değerden sapması, geçici hal süresince üst aşım oluşması sistemi kararsızlığa götürmektedir. Bu duruma yol açmayacak sıfır kararlı hatası olacak şekilde kapalı çevrim sistemin istenilen kutupları aşağıdaki gibi seçilmiştir. PI denetleyici basamaklı kontrol döngüsünün iç çevriminde çalıştığı için hızlı cevap vermesi gereklidir. Bu nedenle kutuplar sol yarı düzlemde ve büyük seçilmiştir. Kutupların büyük seçilmesi geçici hal cevap süresini kısaltmaktadır.

$$p_1 = -235 - 70i, \quad p_2 = -235 + 70i \quad (15)$$

Eşitlik (13) ve (14)'ten denetleyici kazançları K_p ve K_i aşağıdaki gibi elde edilir [9].

$$K_p = -(p_1 + p_2)L_c - R_c - R_s$$

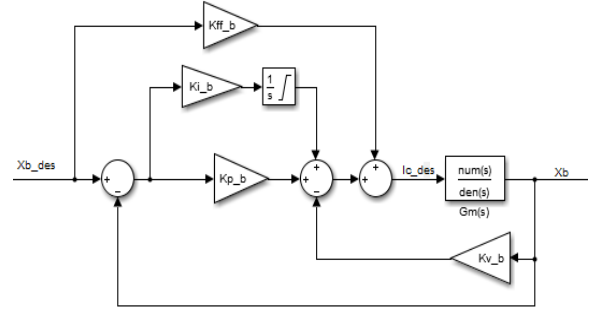
$$K_i = p_1 p_2 L_c \quad (16)$$

3.2. Pozisyon Kontrolü için PIV Denetleyici Tasarımı

Yaygın olarak kullanılan doğrusal denetleme yöntemlerinin başından PID denetleyiciler gelmektedir. PID denetleyicilerin bu kadar yaygın kullanılmasının altında yatan nedenlerin başında kazanç etkilerinin yorumlanmasının oldukça kolay olmasıdır. Ancak bu kazanç değerlerinin kapalı çevrim altında yorumlanması daha karmaşıktır.

Manyetik Kaldırma sisteminde topun konum kontrolü yapılırken aynı zamanda hızın da kontrol edilmesi gerekmektedir. Ancak PID denetleme yönteminde bu mümkün değildir. Belirlenen ve uygulanan kazançlar hem konum hem de hız için ortaktır. PIV denetleyici kontrol döngüsünün ayarlanmasında daha sezgisel bir yaklaşım sunmaktadır [10]. PIV denetleyici hem konum hem de hız için birbirinden bağımsız denetime izin vermektedir. Bu nedenle PIV denetleyici kullanılmıştır.

Tasarlanan PIV denetleyiciye ait kapalı çevrim blok diyagramı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3: Pozisyon kontrolü PIV kontrol şeması

Şekil 3'te verilen blok diyagramından kapalı çevrim transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi bulunabilir

$$T_b(s) = \frac{x_b}{x_{b_des}} \quad (17)$$

x_b topun ölçülen konumunu, x_{b_des} topun tutulmak istendiği pozisyonunu yani referans girişi temsil etmektedir. Eşitlik (9)'daki mekanik sisteme ait transfer fonksiyonunu Şekil 3'teki kapalı çevrim şemada yerine yazarsak kapalı döngü transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi olur

$$T_b(s) = \frac{2g((K_{f_b} + K_{p_b})s + K_{i_b})}{I_{c_0} \left(s^3 - \frac{2gK_{v_b}}{I_{c_0}} s^2 + \left(-\frac{2g}{x_{b_0}} - \frac{2gK_{p_b}}{I_{c_0}} \right) s - \frac{2gK_{i_b}}{I_{c_0}} \right)} \quad (18)$$

Eşitlik (18)'de K_{f_b} , mekanik sistem transfer fonksiyonu Eşitlik (9)'da yer alan katsayı $\left(\frac{x_{b_0}}{I_{c_0}}\right)^{-1}$ 'e eşittir ve sabit bir katsayıdır ($K_{f_b} \cong 143$). K_{p_b} oransal kontrol kazancını, K_{i_b} integral kontrol kazancını, K_{v_b} hız kontrol kazancını, I_{c_0} denge noktasındaki akımı, x_{b_0} ise denge noktasındaki konumu temsil etmektedir.

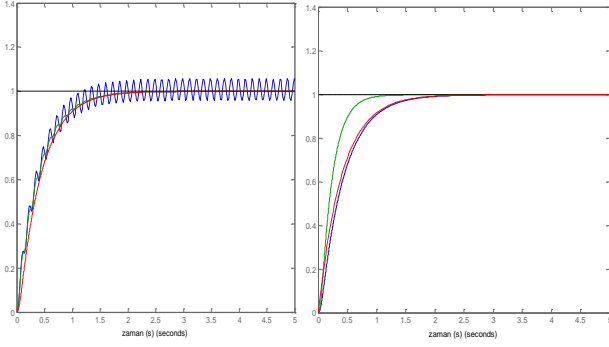
Mekanik sistemin normalleştirilmiş karakteristik denklemi aşağıdaki gibi olur

$$s^3 - \frac{2gK_{v_b}}{I_{c_0}} s^2 + \left(-\frac{2g}{x_{b_0}} - \frac{2gK_{p_b}}{I_{c_0}} \right) s - \frac{2gK_{i_b}}{I_{c_0}} = 0. \quad (19)$$

Denetlenen sistemin istenilen kutuplarının karakteristik denklemi Eşitlik (20)'deki gibidir.

$$s^3 + (-p_{b1} - p_{b2} - p_{b3})s^2 + (p_{b1}p_{b3} + p_{b1}p_{b2} + p_{b2}p_{b3})s - p_{b1}p_{b2}p_{b3} = 0. \quad (20)$$

Burada p_{b1} , p_{b2} , p_{b3} elektro-mekanik sistem için, kapalı çevrim istenilen kararlı kutupları temsil etmektedir. Manyetik kaldırma sisteminin kapalı çevrim kutupları 57,-57,-26 noktalarındadır ve sağ yarı düzlemde bir adet kutup bulunmaktadır. Bu nedenle sistem kararsızdır. Kararlı yapabilmek için kapalı çevrim kutupları sol yarı düzlemde istenilen noktaya taşınacaktır.



Şekil 4: kutupların konumuna göre adım cevap etkisi

Kutupların değerine göre yapılan testlerde, 1. kutbun büyük olması fiziksel donanım açısından problem oluşturduğu için bu değer 2.5 ile sınırlı tutulmaktadır. Diğer kutupların karmaşık olması sistem cevabını görece hızlandırmakta fakat salınım oluşturmaktadır. Kutupların ($\pm 50i$ ve $-2.5 \pm 50i$) karmaşık değerleri için adım cevabı Şekil 4'ün ilk parçasında gösterilmiştir. Şekil 4'ün ikinci parçasında ise ikinci ve üçüncü kutbun büyütülmesiyle (10 kat büyütülünce) oluşan sonuç ve sadece birinci kutbun büyütülmesiyle (2 kat büyütülünce) üretilen sonuç çizilmiştir. 2. ve 3. kutbun büyütülmesi cevabı çok etkilemezken 1. kutbun büyütülmesi sistemi hızlandırmakta fakat donanımsal kısıtlardan dolayı artırılmamaktadır. Buna göre kutup değerleri denklem 21'deki gibi seçilmiştir.

$$p_{b1} = -2.5, p_{b2} = -40, p_{b3} = -50 \quad (21)$$

Seçilen kutup noktalarında sistem aşırı sönümlü ve kararlıdır. Pozitif kutup noktası sağ yarı düzlemde daha uzak noktalarda seçildiğinde geçici hal durumu daha kısa olmaktadır ancak topun hızı oldukça yüksek olacağından dengede tutulamamaktadır. Bu nedenle kutuplar bu şekilde seçilmiştir. Eşitlik (19) ve (20) kullanılarak PIV denetleyici kazançları K_{p_b}, K_{i_b} ve K_{v_b} aşağıdaki gibi elde edilir

$$K_{p_b} = -\frac{1}{2} \frac{(p_{b1}p_{b3} + p_{b1}p_{b2} + p_{b2}p_{b3} + \frac{2g}{x_{b0}})I_{c0}}{g} \quad (22)$$

$$K_{i_b} = \frac{1}{2} \frac{p_{b1}p_{b2}p_{b3}I_{c0}}{g} \quad (23)$$

$$K_{v_b} = \frac{1}{2} \frac{(p_{b1} + p_{b2} + p_{b3})I_{c0}}{g} \quad (24)$$

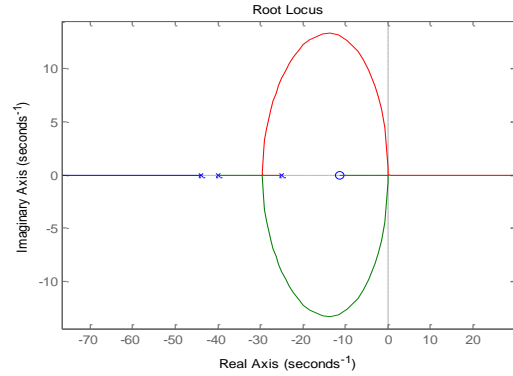
3.3. PIV Denetleyici için Bulanık Mantık Kazanç Ayarı

Eşitlik (22), (23) ve (24) ile belirlenen denetleyici kazançları ile manyetik kaldırma sistemi sadece denge noktası x_{b0} konumu etrafında kararlı çalışabilmektedir. Sistemin her konum değerinde çalışabilmesi için farklı denge noktaları etrafında doğrusallaştırma işlemi yapılarak PIV kazanç değerleri hesaplanmış ve bu değerlerle bir bulanık çıkarım motoru (Fuzzy Inference Engine) oluşturulmuştur. Bulanık çıkarım motorunu oluşturmak için Matlab programının Fuzzy araç çubuğundan faydalanılarak, tek girişli üç çıkışlı Mamdani bulanık modeli oluşturulmuştur. Giriş üyelik fonksiyonları Gauss, çıkış üyelik fonksiyonları ise üçgen seçilmiş, kural çıkarım metodu çarpım yapılmıştır. Son olarak merkezi durulayıcı kullanılarak bulanık veriler sayısal verilere dönüştürülmüş, elde edilen denetleyici kazançları sisteme uygulanmıştır.

4. Kapalı Çevrim Kararlılık Analizi

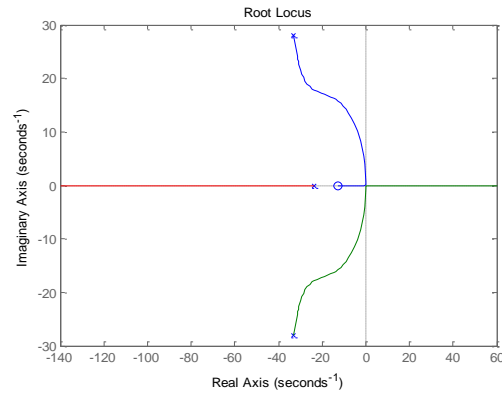
Sistem kontrolü doğrusallaştırılmış model için yapılmıştır. Fakat doğrusallaştırma işlemi tek nokta için değil, sekiz farklı nokta için yapılarak bulanık mantık kazanç kestirimi ile ara değerlere de uygulanmıştır. Kontrol yönteminin kararlı çalıştığını gösterebilmek için hem doğrusallaştırma noktalarının hem de ara bölgelerin kararlılığının gösterilmesi gerekir.

Doğrusallaştırılan bölgelerde sistem kutuplarını denetleyici ayarlamaktadır. Ve bütün köklerin negatif bölgede istenilen yerde olması sağlanmıştır. Sekiz noktanın her biri için analiz yapmak yerine istenilen kutupları sağlayan herhangi bir noktanın kök yer eğrisini çizmek, doğrusallaştırılan noktaların kararlılığını gösterecektir. Bu durum Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekilde bütün köklerin sol yarı düzlemde olduğu ve sadece limit durumunda sıfırdan geçtiği görülmektedir.



Şekil 5: Doğrusallaştırılan noktaların kapalı çevrim kök yer eğrisi grafiği

Ara bölgeler için katsayı kestirimi bulanık mantık ile yapılmaktadır. Dolayısıyla mutlak doğru değere ulaşamayabilir. Fakat kestirilen katsayılara göre köklerin yeri değişmiş olur. Bu değişimde tehlikeli olan durum, köklerin pozitif bölgeye doğru hareket etmesidir. Çıkış üyelik fonksiyonlarına bakıldığında K_{v_b} çıkışı için en büyük aralık ± 2 , K_{p_b} için ± 45 'dir. Kestirim hatası en büyük olduğunda $K_{v_b} = K_{v_b} + 2$, $K_{p_b} = K_{p_b} + 45$ olmaktadır. Bulanık mantık kestiriminin en büyük olduğu durumda kutupların yerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu durumda da sadece limit durumunda kök yer eğrisi sıfırdan geçmektedir.



Şekil 6: En büyük kestirim hatası durumunda kapalı çevrim kök yer eğrisi grafiği

Şekil 5 ve Şekil 6'da da görüldüğü gibi uygulanan kontrol yöntemi doğrusallaştırılan noktalarda hedeflenen kökleri sağlamaktadır. Hesaplanmayan aralıklar için, bulanık kestirimle bulunan katsayılar, kökleri negatif bölgede tutabilmiştir. Dolayısıyla topun hareket alanında bulanık kuralla kestirilen katsayılar sistemi kararlı kılmaktadır.

5. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalarda Quanser firmasının üretmiş olduğu manyetik kaldırma sistemi fiziksel modeli kullanılmıştır. Modelin pozisyon ve akım geri beslemesi mevcuttur. Pozisyon ölçümü için foto-algılayıcı kullanılmıştır. Ölçüm hatalarının önüne geçebilmek için, algılayıcının bulunduğu bölüm aydınlatılmıştır. Modele ait görüntü Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7: Quanser manyetik kaldırma sistemi

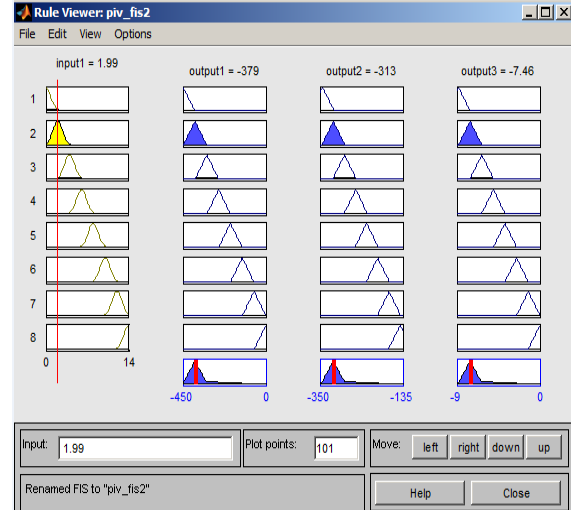
Deneysel çalışmalar sırasında PI akım kontrolü için denetleyici kazançları $K_p \cong 183$ ve $K_i \cong 24800$ olarak kullanılmıştır. Bu değerler Eşitlik (15)'te verilen istenilen kutuplar için Eşitlik (16)'dan hesaplanarak elde edilmiştir.

PIV denetleyici kazançları bulanık sonuç çıkarım sistemi ile topun konumuna göre ayarlanmıştır. Bulanık sonuç çıkarım sistemi girişi için 8 kural oluşturulmuştur. Her bir kural için farklı denge noktalarındaki denetleyici kazanç değerleri hesaplanmıştır. İlgili değerler Tablo 1'de gösterilmiştir. Doğrusal olmayan sistemlerde kazanç değerleri negatif olabilmektedir.

Tablo 1: Denge noktalarına göre denetleyici kazançları

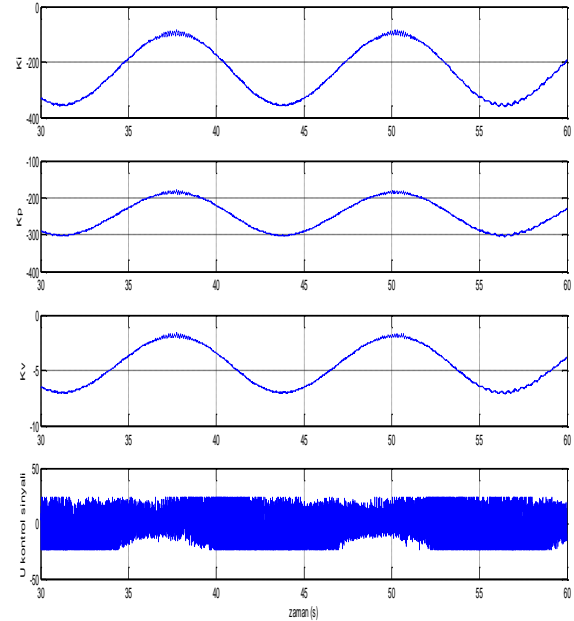
X_{b0} (mm)	K_{pb}	K_{ib}	K_{vb}
0.1	-142.9293	-0.0003	-0.0001
2	-171.6316	-64.1071	-1.2603
4	-200.3340	-128.2139	-2.5206
6	-229.0364	-192.3207	-3.7809
8	-257.7387	-256.4275	-5.0411
10	-286.4411	-320.5343	-6.3014
12	-315.1436	-384.6411	-7.5617
13	-343.8458	-448.7479	-8.8220

Bulanık sonuç çıkarım sistemi için X_{b0} değerleri giriş üyelik fonksiyonlarını, kazanç değerleri ise çıkış üyelik fonksiyonlarını oluşturmaktadır. Oluşturulan bulanık sistemin gerçek zamanlı çalışma esnasında $X_{b0} = 2$ mm değeri için vermiş olduğu kazanç değerleri ve kurallar Şekil 8'de gösterilmiştir.



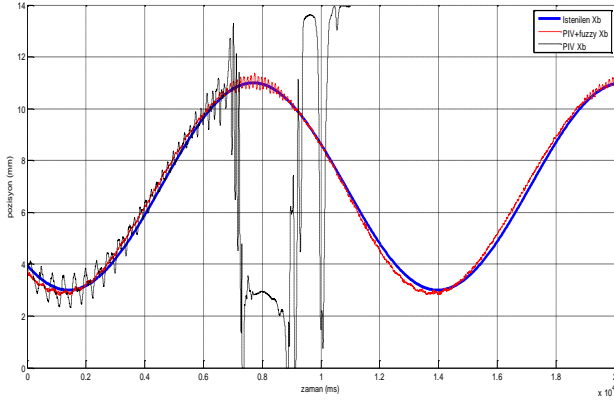
Şekil 8: Bulanık sonuç çıkarım sistemi kuralları

Tasarlanan denetleyiciye göre sistem gerçek zamanlı olarak test edilmiştir. Test işleminde topun doğrusallaştırılan ve kestirilen uzaklıklarda bulunmasını sağlayacak yörünge sinüzoidal olarak seçilmiştir. Test sırasında bulanık denetleyicinin ürettiği PIV katsayıları ve kontrol sinyali Şekil 9'da çizilmiştir.



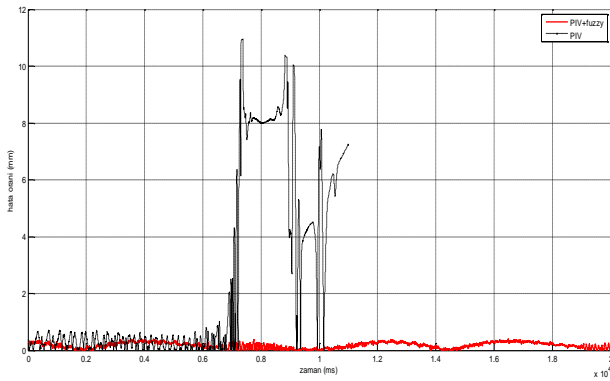
Şekil 9: Kestirilen PIV katsayıları ve kontrol sinyali

Şekil 10'da topun yörünge hareketi gösterilmiştir. Grafikte kalın çizgi ile hedeflenen rota, kesikli çizgi ile bulanık mantık destekli PIV denetleyici ve noktalı-kesikli çizgi ile sabit katsayılı PIV denetleyici gösterilmiştir. Sabit katsayılı PIV denetleyicide katsayılar orta nokta olan 7mm'ye göre ayarlanmıştır. Bulanık mantık destekli denetleyicide gecikme olmasına rağmen yörünge başarıyla izlenmiştir. Fakat sabit katsayılı denetleyici için doğrusallaştırma noktalarının dışında özellikle uç noktalarda salınım artmakta ve bir süre sonra rotadan kopmaktadır.



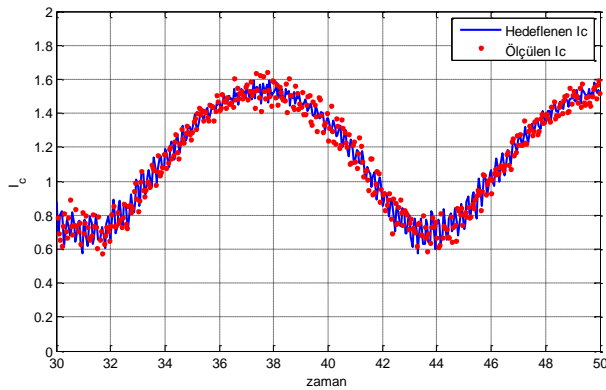
Şekil 10: 20 s için sinüzoidal rotada topun hareketi

Hem sabit katsayılı hem de bulanık mantık ayarlı katsayılı PIV denetleyici için hata grafiği Şekil 11 de çizilmiştir. Sabit katsayılı denetleyici doğrusallaştırma noktasının dışında büyük oranda salınıma neden olmuş ve bir noktadan sonra takibi kaçırmıştır. Ayarlı katsayılı denetleyici ise hata oranını küçültmenin yanı sıra her noktada takibi başarılıyla sürdürmüştür.



Şekil 11: Sabit ve ayarlı katsayılı PIV için yörünge hata grafiği

Denetleyici tasarımında akım kontrolü iç çevrimde yapılmıştır. Hedeflenen akım dış çevrimde üretilmektedir. Buna göre iç çevrimdeki akım grafikleri Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12: 20 s için ölçülen ve hedeflenen bobin akımı

Gerçek zamanlı yapılan testlerde dinamik bir sistem olan manyetik kaldırma sisteminin doğrusal kontrolcü kullanılarak belirli noktalarda kontrolü, bulanık mantık ile kazanç ayarı yapılarak kontrolcünün hareket alanını genişletilmesi ile sağlanmıştır. Yapılan testlerde hedeflenen denetleyici modelinin başarıyla çalıştığı gösterilmiştir.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada tek eksenli doğrusal olmayan manyetik kaldırma sistemi için bulanık mantık kazanç ayarlı PIV denetleyici tasarlanmıştır. Tasarım için öncelikle sistem doğrusallaştırılmış ve PIV denetleyici ile bobin akımı ayarlanarak metal topun istenen konumda durması sağlanmıştır. Aynı süreç 8 farklı denge noktası için tekrarlanıp PIV denetleme kazançları hesaplanmıştır. Denge noktaları dışında kalan bölgeler için bulanık kazanç ayarlama sistemi oluşturulmuş ve bu noktalarda da sistemin kararlılığını koruyacak PIV kontrol kazançları türetilmiştir. Test uygulaması olarak sisteme 3-11 mm aralığında salınan sinüzoidal yörünge işareti uygulanıp, topun referans konum sinyalinin izlenmesi sağlanmıştır. Sonuç olarak tasarlanan denetleyicinin verilen referans sinyalinin hem teorik hem de uygulama ortamında başarılı bir şekilde takip ettiği gösterilmiştir.

Kaynakça

- [1] R. Morales, H.S. Ramirez ve V.Feliu, "Adaptive Control Based on Fast Online Algebraic Identification and GPI Control for Magnetic Levitation Systems with Time-Varying Input Gain", *International Journal of Control*, Cilt: 87, No: 8, s:1604-1621, 2014.
- [2] K. Lilienkamp, "Low-Cost Magnetic Levitation Project Kits for Teaching Feedback System Design", *IEEE American Control Conference*, s: 1308:1313, 2004.
- [3] M. Ono, S. Koga ve H. Ohtsuki, "Japan's Superconducting MAGLEV TRAIN" *IEEE Instrumentation and Measurements Magazine*, Cilt: 5, No: 1, s:9-20, 2002.
- [4] M.B. Khamesee, N. Kato, Y. Nomura ve T. Nakamura, "Design and Control of a Microbotic System Using Magnetic Levitation" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Cilt: 7, No: 1, s: 1-14, 2002.
- [5] W.G. Hurley, "Electromagnetic Design of a Magnetic Suspension System", *IEEE Transactions on Education*, Cilt: 40, No: 2, s: 124-130, 1997.
- [6] A. Javadi ve S. Pezeshki, "A New Model-Free Adaptive Controller versus Non-linear H_{∞} Controller for Levitation of an Electromagnetic System", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Cilt: 35, No: 3, s: 321-329, 2013.
- [7] P. Nataraj ve M.D. Patil, "Robust Control Design for Nonlinear Magnetic Levitation System Using Quantitative Feedback Theory (QFT)", *Annual IEEE (Vol. 2) India Conference (INDICON 2008)*, Mumbai (Bombay), Hindistan, s:365-370, 2008
- [8] K. Ogata, *Modern Control Engineering Fifth Edition*, Prentice Hall, 2010
- [9] Quanser, *Magnetic Levitation User Manual*, Document Number: 835.
- [10] J.P. Nicholas, T. George ve C. Chiu, "Design of PIV Controller Using LQR Optimization for Control of Linear X-Y Stage", 2007.