

Manyetik Kaldırma Sistemi için Gürbüz Denetleyici Tasarımı ve Gerçeklemesi

Erman Selim¹, Eyüp Gürçan¹, Enver Tatlıcıoğlu², Musa Alci¹

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Ege Üniversitesi, Bornova/İzmir
[erman.selim, eyup.gurcan, musa.alci]@ege.edu.tr

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Urla/İzmir
enver@iyte.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada tek serbestlik derecesine sahip manyetik kaldırma sistemi için gürbüz denetleyici tasarımı yapılmıştır. Topu havada tutmak için kullanılan manyetik kuvvetin üstel ifadeler içermesi sistemin doğrusal denetimini zorlaştırmaktadır. Bunun yanı sıra bobinde oluşan ısınmanın endüktans değerini değiştirmesi beklenen fakat ölçülemeyen bir durumdur. Bu problemlerle başa çıkabilmek için gürbüz denetleme yöntemlerinden olan kayan kipli denetleyici ve yüksek kazançlı denetleyici uygulanmıştır. Denetleyicilerin Lyapunov analiziyle kararlı oldukları gösterilmiş ve Matlab/Simulink ortamında benzetimleri yapılmıştır. Son aşamada bu iki denetleyici deneysel düzeneğe uygulanıp gerçek zamanlı olarak topun belirli bir rotayı takip etmesi sağlanmıştır.

1. Giriş

Manyetik kaldırma işlemi, en basit şekliyle metal cisimlerin manyetik kuvvet ile hareket ettirilmesidir. Bu hareketin avantajı temassız yapılması ve dolayısıyla sürtünmesiz olmasıdır [1]. Sürtünmesiz yapılan hareket, enerji kaybını önlemekte ve kuvvete göre konum belirlenmesinde bozucu etkiyi ortadan kaldırmaktadır. Bu avantajları sayesinde sürtünmesiz rulmanlar, yüksek hızlı yolcu trenleri ve kesin doğrulukta konumlandırma sistemlerinde tercih edilmektedirler [2].

Fakat manyetik kaldırma sistemleri doğrusal olmayan ve hızlı değişen dinamik davranış göstermektedir. Sistemin denetlenmesi için geçmişte durum uzayı temelli denetim [3], uyarlamalı denetleme [4], yapay sinir ağı yöntemleri [5] uygulanmıştır. Uygulanan denetleyiciler farklı davranışlar gösterebilmektedirler. Doğrusallaştırma temelli yöntemler geçmişte de denenmiş olup özellikle istenilen pozisyon takibi sırasında doğrusallaştırma varsayımları bozulabildiği için pek tercih edilmemektedirler. İlave olarak her sistemde bulunan belirsizlikler de doğrusal denetleyicilerin başarısını düşürmektedir. Çözüm olarak gürbüz denetleme yöntemlerinden yararlanılmaktadır [6]. Sistemi bozucu etkilere karşı dayanıklı yapmanın bir başka yöntemi de bozucu etkilerin kestirilmesidir. Bu sayede ölçülemeyen veya belirlenemeyen etkiler tasarlanan gözlemci yardımıyla denetlenebilmektedir [7].

Bu çalışmada tek serbestlik derecesine sahip manyetik kaldırma sistemi için gürbüz denetleyici tasarımı

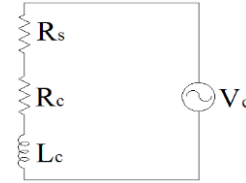
hedeflenmektedir. Bu doğrultuda ilk olarak manyetik kaldırma sistemi için matematiksel model türetilmiş ve bu model için kayan kipli denetleyici ile yüksek kazançlı denetleyici tasarlanmıştır. Matematiksel modelin kullanacağımız deneysel düzeneğe denk olabilmesi için model parametreleri Quanser firmasının manyetik kaldırma sistemi kullanıcı kılavuzundan alınmıştır [8]. Tasarlanan denetleyicilerin sistemin matematiksel modelinin bilinmediği durumda takip hatasını sifıra yakın ve sınırlı aralığa götürdüğü Lyapunov tarzı kararlılık analiz yöntemleri ile gösterilmiştir. Ardından, Matlab/Simulink üzerinde matematiksel model ile sistemin benzetimi yapılarak her iki denetleyici için de topun hedeflenen pozisyonda tutulabildiği gösterilmiştir. Son olarak matematiksel model yerine deneysel düzenek kullanılarak gerçek zamanlı çalışmada topun belirli bir rotayı takip etmesi sağlanmıştır.

2. Manyetik Kaldırma Sistemi Modeli

Tasarlanacak olan gürbüz denetleyiciler sistemin modelinin bilinmesi ihtiyacını ortadan kaldıracaktır. Fakat, çalışmanın tamlığı için sistemin matematiksel modeli derlenmiştir. Sistemin modeli iki alt kısımdan oluşmaktadır. Bu alt kısımlar, elektriksel ve elektromekanik sistemlerdir.

2.1. Elektriksel Sistem Modeli

Manyetik kaldırma sisteminin elektrik devresi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Manyetik kaldırma sisteminin elektrik devresi

Bobine $V_c(t)$ gerilimin uygulanması ile oluşan akım $I_c(t)$, elektromagnetik bobinin endüktansı L_c , direnci R_c ve ölçüm aletinin direnci R_s ile gösterilmiştir. Kirchhoff'un gerilimler kanununu kullanarak aşağıdaki ifade elde edilir

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

Şekil 1'de her ne kadar L_c ile gösterilse de aslında bobinin endüktansı topun konumuna bağlı olarak değişen ve alttaki şekilde gösterilen doğrusal olmayan bir fonksiyon ile ifade edilir

$$L = L_c + \frac{2K_m}{x_b} \quad (2)$$

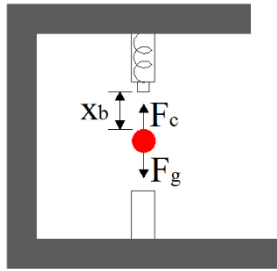
Eşitlik (2)'de, K_m elektromıknatis kuvvet sabitini, $x_b(t)$ ise topun pozisyonunu göstermektedir. Eşdeğer direnç değerini $R \triangleq (R_c + R_s)$ ve uygulanan gerilimi $u(t) \triangleq V_c(t)$ olarak tanımlayabiliriz. Eşitlikler (1) ve (2)'yi kullanarak manyetik kaldırma sisteminin diferansiyel denklemi alttaki gibi olur

$$\frac{d}{dt}I_c(t) = -\frac{R}{L_c}I_c(t) + \frac{2K_m v(t)I_c(t)}{L_c x_b^2} + \frac{u(t)}{L_c} \quad (3)$$

Eşitlik (3)'te $v(t) \triangleq \dot{x}_b(t)$ olup topun hızını temsil etmektedir.

2.2. Elektromekanik Sistem Modeli

Elektromekanik sistem Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: Manyetik kaldırma sisteminin mekanik modeli

Yerçekimi nedeniyle topa uygulanan kuvvet olan $F_g(t)$ altta tanımlanmıştır

$$F_g = M_b g \quad (4)$$

Eşitlik (4)'te, M_b çelik topun kütlesini, g ise yerçekimi sabitini göstermektedir. Elektromıknatisin çekim kuvveti olan $F_c(t)$ ise aşağıda belirtilmiştir

$$F_c = \frac{K_m I_c^2}{x_b^2} \quad (5)$$

Eşitlik (4) ve (5) kullanılarak topa etkiyen toplam kuvvet alttaki şekilde elde edilir

$$F = F_g - F_c = M_b g - \frac{K_m I_c^2}{x_b^2} \quad (6)$$

Bu durumda topun hareket denklemleri alttaki şekilde ifade edilebilir

$$\frac{d^2}{dt^2}x_b = g - \frac{K_m}{M_b} \left(\frac{I_c}{x_b}\right)^2 \quad (7)$$

3. Denetleyici Tasarımı

Denetleyici tasarımının ve denetleme sistemlerinin temel amacı, eğer mümkünse tanımlanacak bir takip hatasını sıfıra götürmek veya sıfırın komşuluğunda sınırlı tutmaktır. Bu bildiriye manyetik kaldırma sistemi için gürbüz denetim yöntemlerinden kayan kipli denetleyici ve yüksek kazançlı denetleyici tasarlanacaktır.

Takip hatası $e_1(t)$ ile gösterilmektedir ve alttaki şekilde tanımlanmıştır

$$e_1 \triangleq x_d - x_b \quad (8)$$

Üstte, $x_d(t)$ yeterince yumuşak olan istenilen pozisyonudur. Eşitlikler (3) ve (7) göz önünde bulundurulduğunda,

elimizdeki manyetik kaldırma sisteminin modelinin üçüncü dereceden olduğu gözlemlenebilir. Denetleyici tasarımının sunum kolaylığı ve kullanılacak kararlılık analizinde sadece birinci dereceden türev ifadelerinin olması için altta, $e_2(t)$ ve $e_3(t)$ ile gösterilen, süzgeçlenmiş hata işaretleri tanımlanmıştır

$$e_2 \triangleq \dot{e}_1 + \alpha_1 e_1 \quad (9)$$

$$e_3 \triangleq \dot{e}_2 + \alpha_2 e_2 \quad (10)$$

Üstteki tanımlarda α_1 ve α_2 artı işaretli, sabit denetleyici kazançlarıdır.

Süzgeçlenmiş hata işareti $e_3(t)$ 'nin dinamiklerine ulaşmak için Eşitlik (3) ve (7)'den faydalanırsak, alttaki ifadeyi elde edebiliriz

$$\ddot{x}_b = \frac{2K_m}{M_b} \left(\frac{R I_c^2}{L_c x_b^2} - \frac{2K_m v I_c^2}{L_c x_b^4} + \frac{v I_c^2}{x_b^2} + \frac{u I_c}{L_c x_b^2} \right) \quad (11)$$

Eşitlik (11)'deki sistem dinamiği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\ddot{x}_b = f(x_b, v, I_c) + h(x_b, I_c)u \quad (12)$$

Eşitlik (12)'de $f(\cdot)$ ve $h(\cdot)$ sistem durumlarına bağlı doğrusal olmayan fonksiyonları göstermektedir ve alttaki şekilde tanımlanmışlardır

$$f(x_b, v, I_c) \triangleq \frac{2K_m}{M_b} \left(\frac{R I_c^2}{L_c x_b^2} - \frac{2K_m v I_c^2}{L_c x_b^4} + \frac{v I_c^2}{x_b^2} \right) \quad (13)$$

$$h(x_b, I_c) \triangleq \frac{2K_m I_c}{M_b L_c x_b^2} \quad (14)$$

Akım ve pozisyon değerlerinin artı işaretli ve sınırlı oldukları göz önünde bulundurulduğunda $h(\cdot)$ 'nin de artı işaretli ve sınırlı olduğu tespit edilebilir. Bu çalışmada model parametrelerinin belirsiz oldukları varsayıldığından, $f(\cdot)$ ve $h(\cdot)$ belirsizdir ve denetleyici tasarımında kullanılmayacaklardır.

Sunum kolaylığı için $m(x_b, I_c)$ ifadesi alttaki şekilde tanımlanmıştır

$$m \triangleq \frac{1}{h} \quad (15)$$

Benzer şekilde $m(x_b, I_c)$ de artı işaretli ve sınırlıdır. Süzgeçlenmiş hata işareti $e_3(t)$ 'ün türevi alınıp $m(\cdot)$ ile çarpıldığında alttaki ifade elde edilir

$$m \dot{e}_3 = m \ddot{x}_d - m f - u + m \alpha_1 \dot{e}_1 + m \alpha_2 \dot{e}_2 \quad (16)$$

Kararlılık analizinde çapraz terimleri ortadan kaldırmak amacıyla Eşitlik (16)'ya $\frac{1}{2}m \dot{e}_3 + e_2$ ifadesi eklenip çıkartıldığında

$$m \dot{e}_3 = -\frac{1}{2}m \dot{e}_3 - e_2 + N - u \quad (17)$$

ifadesi elde edilir ki burada $N(x_b, v, I_c, t)$ ile gösterilen terim alttaki şekilde tanımlanmıştır

$$N \triangleq m \ddot{x}_d - m f - u + m \alpha_1 \dot{e}_1 + m \alpha_2 \dot{e}_2 + \frac{1}{2}m \dot{e}_3 + e_2 \quad (18)$$

Üstte tanımı verilen N terimi belirsizdir ve alttaki eşitsizlikteki şekilde üstten sınırlandırılabilir

$$|N| \leq \rho \quad (19)$$

ki burada $\rho(\cdot)$ bilinen bir sınırlayıcı fonksiyondur.

Eşitlik (18)'deki tanımı eşitlik (17)'de yerine yazarsak aşağıdaki ifadeyi elde edebiliriz

$$m \dot{e}_3 = -\frac{1}{2}m \dot{e}_3 - e_2 - u + N \quad (20)$$

3.1. Kayan Kipli Denetleyici

Kayan kipli denetim doğrusal olmayan bir denetleme yöntemidir. Hatanın işaretine bağlı olarak süresiz bir

denetleme sinyali göndererek sistemi kararlı hale getirmeye çalışır.

Kayan kipli denetleyici alttaki şekilde tasarlanmıştır

$$u = ke_3 + \rho \operatorname{sgn}(e_3). \quad (21)$$

Üstte, k artı işaretli denetleyici kazancıdır. Önerilen denetleyiciyi Eşitlik (20)'de yerine yazdığımızda

$$\dot{m}e_3 = -\frac{1}{2}\dot{m}e_3 - e_2 + N - ke_3 - \rho \operatorname{sgn}(e_3) \quad (22)$$

ifadesini elde ederiz.

Teorem 1: Denklem (21)'de tasarlanan denetleyici alttaki şartlar sağlandığında

$$\alpha_1 > \frac{1}{2} \quad (23)$$

$$\alpha_2 > \frac{1}{2} \quad (24)$$

takip hatası $e_1(t)$ 'nin üstel hızla sifıra götürülmesini garanti eder.

İspat: Altta Lyapunov fonksiyonu önerilmektedir

$$V \triangleq \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1}{2}me_3^2. \quad (25)$$

Bu Lyapunov fonksiyonunun sadece $e_1(t)$, $e_2(t)$ ve $e_3(t)$ sifıra eşit olduğunda sıfır olduğu ve bunun dışında artı işaretli olduğu kolayca görülebilir. İlaveten bu Lyapunov fonksiyonu alttan ve üstten sınırlandırılabilir.

Lyapunov fonksiyonunun türevini aldığımızda

$$\dot{V} = e_1\dot{e}_1 + e_2\dot{e}_2 + me_3\dot{e}_3 + \frac{1}{2}\dot{m}e_3^2 \quad (26)$$

ifadesini elde ederiz. Eşitlik (26) ile birlikte eşitlikler (9), (10) ve (22) kullanıldığında alttaki ifade elde edilebilir

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_1(e_2 - \alpha_1 e_1) + e_2(e_3 - \alpha_2 e_2) + \frac{1}{2}\dot{m}e_3^2 \\ &+ e_3 \left[-\frac{1}{2}\dot{m}e_3 - e_2 + N - ke_3 - \rho \operatorname{sgn}(e_3) \right]. \end{aligned} \quad (27)$$

Ters işaretli terimlerin sadeleştirilmesinden sonra

$$\dot{V} = e_1 e_2 - \alpha_1 e_1^2 - \alpha_2 e_2^2 + e_3 N - ke_3^2 - \rho |e_3| \quad (28)$$

ifadesine ulaşılabilir. Eşitlik (28)'i incelediğimizde $-\alpha_1 e_1^2$, $-\alpha_2 e_2^2$, $-ke_3^2$, $-\rho |e_3|$ terimleri eksi işaretlidir, ancak $e_1 e_2$ ve $e_3 N$ terimlerinin işaretleri belirsizdir ve incelenmeleri gerekmektedir. Eşitsizlik (19) kullanılarak

$$e_3 N \leq \rho |e_3| \quad (29)$$

ifadesi elde edilebilir ve yine alttaki eşitsizlik kolayca gösterilebilir

$$e_1 e_2 \leq \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2. \quad (30)$$

Eşitsizlikler (29) ve (30), eşitlik (28) ile beraber kullanıldığında

$$\dot{V} \leq -\left(\alpha_1 - \frac{1}{2}\right)e_1^2 - \left(\alpha_2 - \frac{1}{2}\right)e_2^2 - ke_3^2 \quad (31)$$

ifadesi elde edilir. Üstteki $\left(\alpha_1 - \frac{1}{2}\right)$ ve $\left(\alpha_2 - \frac{1}{2}\right)$ katsayıları α_1 ve α_2 denklemler (23) ve (24)'teki şartları sağlandığında artı işaretli sabit sayılar oldukları için Lyapunov fonksiyonunun türevi eksi tanımlıdır. Buradan $e_1(t)$, $e_2(t)$ ve $e_3(t)$ hatalarının üstel olarak sifıra gittiği açıkça görülmektedir.

3.2. Yüksek Kazançlı Denetleyici

Yüksek kazançlı denetleyici alttaki şekilde tasarlanmaktadır

$$u = ke_3 + \frac{1}{\varepsilon} \rho^2 e_3 \quad (32)$$

ki burada ε yeterince küçük artı işaretli bir sabittir. Tasarlanan denetleyiciyi Eşitlik (20)'deki açık döngü hata sisteminde yerine konmasıyla alttaki kapalı döngü hata sistemi elde edilir

$$\dot{m}e_3 = -\frac{1}{2}\dot{m}e_3 - e_2 + N - ke_3 - \frac{1}{\varepsilon} \rho^2 e_3. \quad (33)$$

Teorem 2: Denklem (32)'de tasarlanan denetleyici, denklemler (23) ve (24)'teki şartlar sağlandığında takip hatası $e_1(t)$ 'nin sıfırın komşuluğuna götürülmesini garanti eder.

İspat: Bu teoremin ispatında da bir önceki teoremin ispatında kullanılan Lyapunov fonksiyonu kullanılacaktır ve analiz eşitlik (26)'ya kadar aynı olup ardından ayrılmaktadır.

Eşitlik (26)'da, eşitlikler (9), (10) ve (33) kullanıldığında alttaki ifade elde edilir

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_1(e_2 - \alpha_1 e_1) + e_2(e_3 - \alpha_2 e_2) + \frac{1}{2}\dot{m}e_3^2 \\ &+ e_3 \left[-\frac{1}{2}\dot{m}e_3 - e_2 + N - ke_3 - \frac{1}{\varepsilon} \rho^2 e_3 \right]. \end{aligned} \quad (34)$$

Sadeleştirmelerden sonra alttaki ifadeye ulaşabiliriz

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_1 e_2 - \alpha_1 e_1^2 + e_2 e_3 - \alpha_2 e_2^2 + e_3 N - ke_3^2 \\ &- \frac{1}{\varepsilon} \rho^2 e_3^2. \end{aligned} \quad (35)$$

Eşitsizlik (19) ile doğrusal olmayan sönümleme yöntemi kullanıldığında alttaki üst sınır elde edilebilir

$$e_3 N - \frac{1}{\varepsilon} \rho^2 e_3^2 \leq \frac{\varepsilon}{4}. \quad (36)$$

Eşitsizlikler (30) ile (36), denklem (35) ile beraber kullanıldığında alttaki üst sınır elde edilebilir

$$\dot{V} \leq -\left(\alpha_1 - \frac{1}{2}\right)e_1^2 - \left(\alpha_2 - \frac{1}{2}\right)e_2^2 - ke_3^2 + \frac{\varepsilon}{4}. \quad (37)$$

Denetleyici kazançları denklemler (23) ve (24)'te verilen şartları sağlandığında alttaki ifade elde edilebilir

$$\dot{V} \leq -\beta V + \frac{\varepsilon}{4}. \quad (38)$$

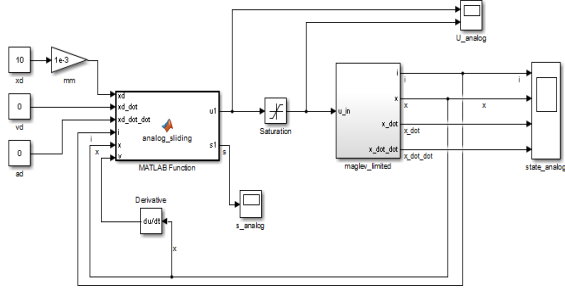
Denklem (38)'i incelediğimizde $V(t)$ 'nin büyük değerleri için türev eksi işaretlidir ve $V(t)$ üstel olarak azalır, $V(t)$ 'nin küçük değerlerinde türev artı işaretlidir ve $V(t)$ artmaktadır. Dolayısıyla, takip hatası $e_1(t)$ sifıra gitmemekte fakat sıfırın komşuluğunda salınım yapmaktadır.

4. Benzetim Sonuçları

Deneyel düzenek için türetilen matematiksel denklemler, Matlab/Simulink ortamında yazılarak manyetik kaldırma sisteminin benzetimi yapılmıştır. Benzetim modelinin gerçek modele daha uygun olması için fiziksel kısıtlar da göz önünde bulundurulmuştur. Topun bobine olan uzaklığının üst limiti 14 mm'dir. Fakat topun bobine yapışması halinde tekrar düşürmek için fiziksel dürtü gerekmektedir. Benzetim sırasında böyle bir etki olmayacağı için mesafenin sıfır veya sıfıra çok yakın, örneğin, x_b 'nin 10^{-5} mm'den küçük olması durumunda benzetim sonlandırılmaktadır.

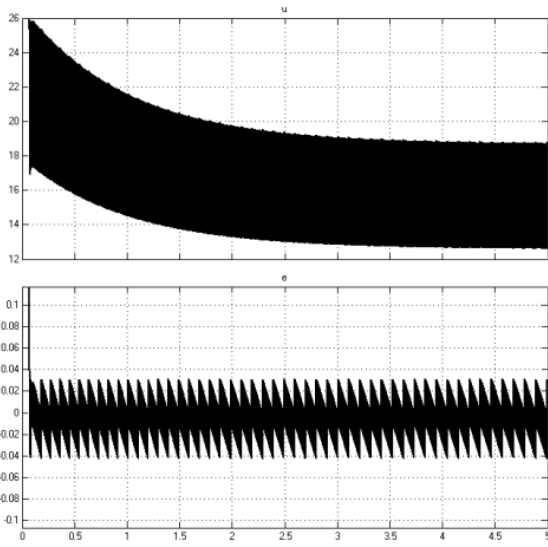
4.1 Kayan Kipli Denetleyici Benzetimi

Benzetimde tasarlanan denetleyici deneyel düzenekten bağımsız olarak çalıştırılabilmektedir ve Matlab/Simulink benzetim modeli Şekil 3'te gösterilmiştir.



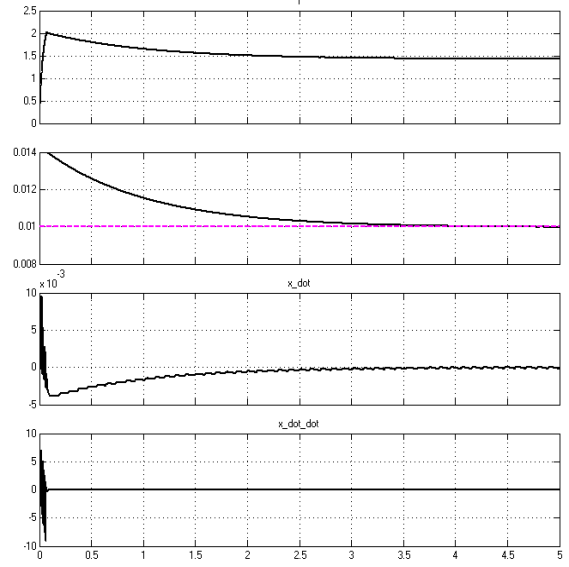
Şekil 3: Matlab/Simulink benzetim modeli

Denetleyici kazançları $\alpha_1 = \alpha_2 = \rho = k = 100$ olarak seçilmiştir. Denetleyici girişi $u(t)$ ve takip hatası $e_1(t)$ Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4: Kayan kipli denetleyici için denetleyici girişi $u(t)$ ve takip hatası $e_1(t)$

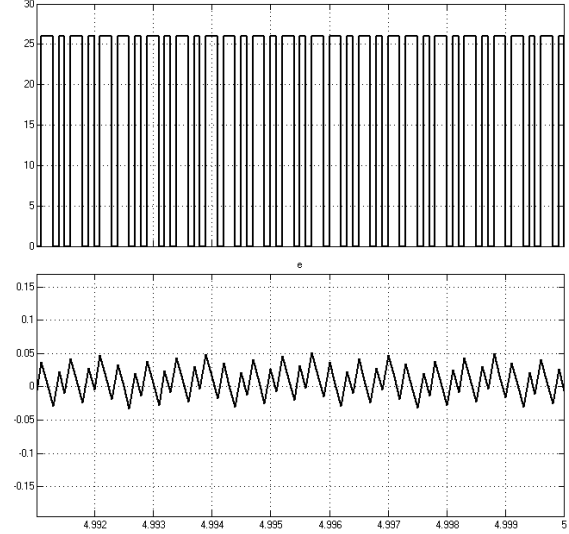
Benzetimde topun bobine olan uzaklığının 10 mm'de sabit kalması istenmiştir. Topun pozisyon, hız, ivme, istenilen pozisyon ve bobinin akım değerleri Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 5'de ilk grafikte bobin akımı gösterilmiştir. Bobin akımı, bobinden uygulanan kuvvet ile orantılı olduğundan ilk anda topa ivme kazandırmak için yüksek akım verilmekte sonrasında ise top istenilen noktaya yaklaştıkça sabit değere yakınsamaktadır. İkinci egride ise topun bobine olan uzaklığı (düz çizgi), istenen pozisyon değeri (kesikli çizgi) gösterilmiştir. Topun ivme ve hız grafikleri, anlık kalkışı ve yavaşlayan hızla yükselişini göstermektedir.



Şekil 5: (a) bobin akımı $I_c(t)$, (b) istenilen pozisyon $x_d(t)$ ve gerçek pozisyon $x_b(t)$, (c) topun hızı $\dot{x}_b(t)$, (d) topun ivmesi $\ddot{x}_b(t)$

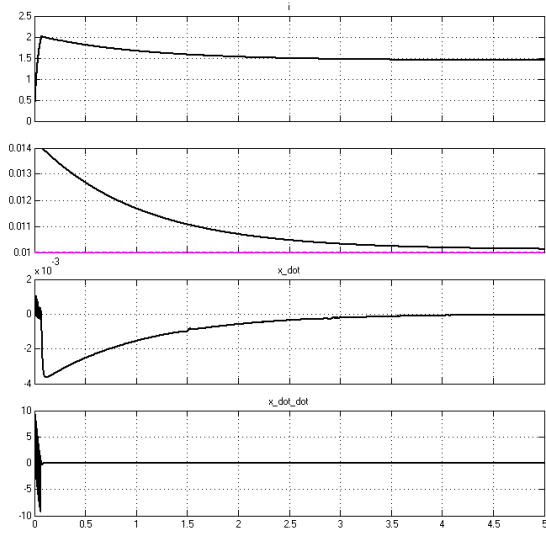
4.2 Yüksek Kazançlı Denetleyici Benzetimi

Benzetimde denetleyici kazançları $\alpha_1 = \alpha_2 = k = 100$, $\varepsilon = 0.1$ ve $\rho = 150$ olarak seçilmiştir. Denetleyici girişi $u(t)$ ve takip hatası $e_1(t)$ Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6: Yüksek kazançlı denetleyici için denetleyici girişi $u(t)$ ve takip hatası $e_1(t)$

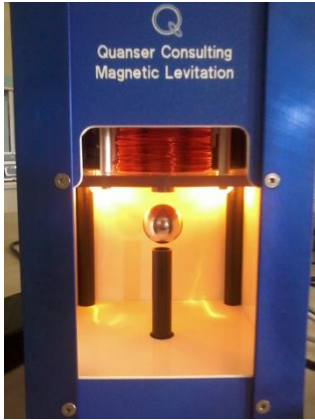
Yüksek kazançlı denetleyici ile 10 mm sabit uzaklıkta tutulan topun pozisyon, hız, ivme ve bobinin akım grafikleri Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7: (a) bobin akımı $I_c(t)$, (b) istenilen pozisyon $x_d(t)$ ve gerçek pozisyon $x_b(t)$, (c) topun hızı $\dot{x}_b(t)$, (d) topun ivmesi $\ddot{x}_b(t)$

5. Deneysel Sonuçları

Tasarlanan denetleyiciler Quanser firmasının Magnetic Levitation sistemi ile test edilmiştir [8]. Manyetik kaldırma sistemi Şekil 8'de görülmektedir. Bu modelin akım ve pozisyon geri beslemesi vardır. Pozisyon geri beslemesi topun oturduğu platformun altında bulunan foto direnç ile yapılmaktadır. Top, üzerine kuvvet uygulanmayınca platform üzerinde durmakta ve gelen bütün ışığı kırmaktadır. Manyetik kuvvet uygulanınca top yükselmekte ve foto dirençten okunan gerilim değeri artmaktadır, bu sayede topun pozisyonu ölçülmektedir. Pratik bir yöntem olsa da dış ortamdan gelen ışığa göre sensörün kalibrasyonu gerekmektedir. Yapılan deneylerde bu problemi önlemek için dış ortam ışığı engellenmiş ve sistem bu şartlara göre ayarlanmıştır.

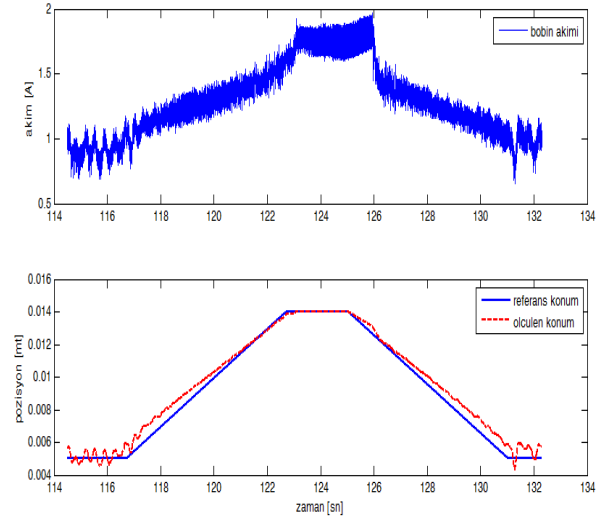


Şekil 8: Quanser Manyetik Kaldırma Sistemi

Benzetimde kullanılan matematiksel modelin gerilim girişi yerine analog çıkış, modelin çıkışı yerine ise analog okuma modülleri kullanılmıştır. Bu sayede matematiksel model ile deneysel düzenek değiştirilmiş oldu.

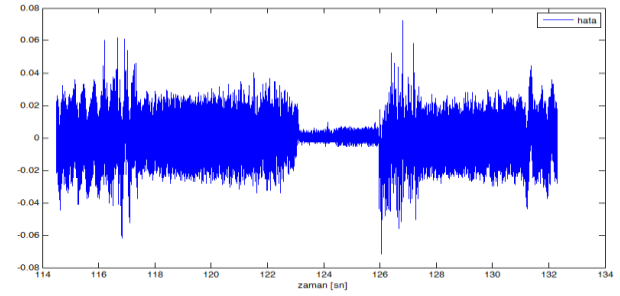
Benzetim aşamasında istenilen pozisyon olarak sabit pozisyon bilgisi kullanılmıştır. Sistemin tek bir nokta dışında belirli bir rotayı da takip edebileceğini göstermek için kare

dalga uygulanmıştır. Belirlenen kare dalga ile topun iki nokta arasında hareket etmesi sağlanmıştır. Topun hareketinin belirli hız ve ivme limitlerini aşmaması için istenilen pozisyon sigmoid fonksiyonuna uygulanmıştır. Bobinin akımı, topun pozisyonu ile istenilen pozisyon Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9: (a) Bobin akımı, (b) Topun pozisyonu ve istenilen pozisyon.

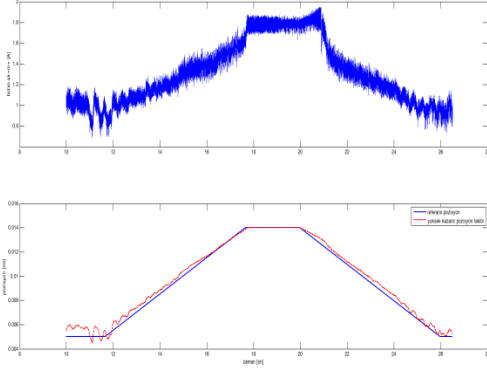
Kayan kipli denetleme için hata grafiği Şekil 10'da gösterilmiştir.



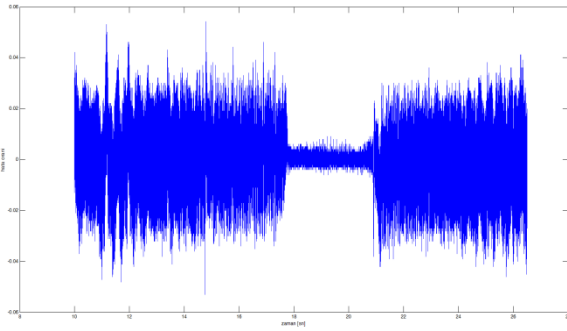
Şekil 10: Kayan kipli denetleyici için takip hatası $e_1(t)$

Aynı istenilen pozisyon yüksek kazançlı denetleyici için de uygulandığında sonuç grafikleri Şekiller 11 ve 12'deki gibi olmaktadır.

Hem kayan kipli denetleme hem de yüksek kazançlı denetleme için hata grafiklerinin olduğu Şekiller 10 ve 12'den görüleceği üzere, 122 ile 126 saniye aralığında top platforma oturduğundan, sadece ölçüm hatası bulunmaktadır.



Şekil 11: Yüksek kazanç denetleyici için (a) bobin akımı, (b) istenilen pozisyon ve gerçek pozisyon



Şekil 12: Yüksek kazanç denetleyici için takip hatası $e_1(t)$

6. Sonuçlar

Bu çalışmada öncelikle Quanser marka manyetik kaldırma sisteminin matematiksel modeli çıkarılmıştır. Elde edilen modelin yapısı göz önünde bulundurularak gürbüz denetleme yöntemlerinden olan kayan kipli denetleyici ve yüksek kazançlı denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan denetleyicilerin kararlılık analizleri Lyapunov tarzı yöntemler ile ispatlanmıştır. Her iki denetleyici için hem benzetim çalışmaları yapılmış hem de deneysel sonuçlar elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, doğası gereği kararsız olan manyetik kaldırma sistemine uygulanan gürbüz denetleyiciler, bozucu etkilere ve tam olarak bilinmeyen sistem dinamiklerine rağmen belirlenen eşik değerleri dâhilinde bütün sinyalleri sınırlı tutulabilmektedir. Uygulanan gürbüz yöntemler sayesinde sistem doğrusallaştırılmadan bütün hareket alanını kapsayacak denetleyici tasarlanmıştır. Hem kayan kipli hem de yüksek kazançlı denetleyici için elde edilen sonuçlar manyetik kaldırma sistemin başarıyla denetlendiğini göstermiştir.

Kaynakça

- [1] P. Šuster, A. Jadlovská, “*Modeling and Control Design of Magnetic Levitation System*,” IEEE International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, 2012, Slovakia.

- [2] I. Ahmad, M. A. Javaid, “*Nonlinear Model & Controller Design for Magnetic Levitation System*,” Recent Advances in Signal Processing, Robotics and Automation, ISBN:978-960-474-157-1.
- [3] W. Barie, J. Chiasson, “*Linear and Nonlinear State-Space Controllers for Magnetic Levitation*”, International Journal of Systems Science, vol. 27, no. 11, pp. 1153-1163, 1996.
- [4] S. Başaran, S. Sivrioğlu, “*Adaptive Control of a Novel Hybrid Magnetic Bearing Flywheel System for Use in Momentum Exchange Devices*”, Recent Advances in Space Technologies, 2013.
- [5] A. Rawat, M. J. Nigam, “*Comparison between Adaptive Linear Controller and Radial Basis Function Neurocontroller with Real Time Implementation on Magnetic Levitation System*,” Computational Intelligence and Computing Research, 2013.
- [6] R. Usvarman, A. I. Cahyadi, O. Wahyunggoro, “*Modified Sliding Mode Control with Uncertainties Behavior of a Magnetic Levitation System*”, IEEE International Conference on Robotics, Biomimetics, and Intelligent Computational Systems, 2013.
- [7] J. Yang, S. Hara, S. Kanae, K. Wad, “*Robust Output Feedback Control of a Magnetic Levitation System via High-Gain Observer*”, IEEE Conference on Decision and Control, 2009.
- [8] Quanser Magnetic Levitation (2014), “*Product Information Sheet*,” <http://www.quanser.com/products/maglev> (Erişim Tarihi: 13.06.2014).