

Bir Manyetik Askı Sisteminin Kontrolünde Dört Yöntemin Karşılaştırılması

Salih Burak Akat ve Mehmet Önder Efe

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Söğütözü, 06560, Ankara, Türkiye
{sbakat, onderefe}@etu.edu.tr

Özetçe

Manyetik askı sistemleri doğrusal olmayan dinamik davranışları nedeniyle kontrol sistemleri konusunda çalışan araştırmacıların ilgi odağında olmuşlardır. Bu çalışmada bir manyetik askı sistemi ele alınmış ve sistem üzerinde dört farklı kontrol yöntemi denenerek bu yöntemlerin farklı karşılaştırma ölçütlerinin hangilerinde daha başarılı olduklarının cevabı aranmıştır. Kayan Kipli Denetim (KKD), Geribeslemeli Doğrusallaştırmaya (GD) dayalı denetim, doğrusallaştırma sonucu elde edilen modelle tasarlanan bir PI kontrolörü ve nümerik verilere dayanarak geliştirilen Nörokontrol (NK) yaklaşımı bildiriye konu olan dört yöntemdir. Geribeslemeli sistemin performansını irdeleyebilmek için sinüzoidal ve trapezoid tipte referans konum işaretleri öngörülmüştür. Yöntemler basitlik, $i(t)$ akımının varyansı (uygulanabilirlik) ve izleme hatasının sifıra yakınsama zamanı ölçütleri göz önüne alınarak karşılaştırılmıştır.

1. Giriş

Manyetik askı sistemleri sürtünmesiz dişli yatağı tasarımı, titreşim izolasyonlu masa tasarımı ve hızlı tren tasarımı gibi bir çok endüstriyel uygulamada başarıyla uygulanmaktadır. Manyetik askı sistemleri açık çevrimde kararsız sistemler olduğu için kararlılığı ve istenen performansı sağlamak için geribeslemeli denetim mekanizmalarının kullanılması kaçınılmazdır. Ancak sistemdeki doğrusal olmayan dinamikler yüzünden sistemi betimleyen karmaşık diferansiyel denklemler çeşitli çalışma noktalarında doğrusal hale getirilip geribeslemeli kontrolörlerin bu modellere dayanarak gerçekleştirilmesi de uygulanagelen bir yaklaşım olmuştur. Bu anlamda en çok PID veya PID türevi denetleyiciler kullanılmıştır. PID denetleyiciler farklı çalışma koşullarındaki iyi performansları ve uygulamaya yönelik kolaylıları nedeniyle birçok tasarımda kullanılmışlardır [1]. Doğrusallaştırılmış modelin sadece belirli çalışma noktalarının etrafındaki dar bir bölgede geçerli olduğu göz önüne alınırsa, kontrolörün sadece bu bölgelerde iyi çalışması beklenen bir neticedir ve doğrusallaştırmaya dayalı denetim sistemlerinin de uygulamadaki temel dezavantajını bu gerçek teşkil eder. Manyetik askı sistemi için bir doğrusal kontrolör tasarımı Shiao [2] tarafından

verilmiştir. Shiao [2], sistemin doğrulaştırılması sonucu elde edilen model ile faz-ilerletici tipte bir kontrolör tasarlanmış ve kontrolörün performansını doğrusal olmayan sistem üzerinde göstermiştir. Bir başka çalışmada Famo vd., [3], sistemin davranışını ve sistemde kullanılan algılayıcıların dinamik modellerini çalışma noktalarında doğrusallaştırıp öngörülü denetim yöntemini kullanmıştır.

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda sistem modelinde doğrusal olmayan dinamiklerin de ele alınan örneklere rastlamak mümkündür. KKD yöntemi doğrusal olmayan sistemlerin gürbüz kontrolü için etkili bir yaklaşımdır. Literatürde, füze güdüm kontrolü [4], doğrusal olmayan kimyasal süreçlerin kontrolü [5] ve robotlarda yörünge kontrolü [6] gibi geniş bir uygulama alanı bulan KKD yaklaşımı bu çalışmada da ele alınan yöntemlerden biridir. Cho vd. [7] manyetik askı sisteminde KKD ve klasik faz ilerletici kontrol yöntemlerini kullanmıştır ve KKD yöntemiyle elde edilen kontrol sisteminin farklı frekanslardaki referans işaretlerini, klasik faz ilerletici kontrolörlü sisteme göre daha az hatayla takip ettiğini gözlemlemiştir. Bir başka çalışmada ise Lee vd. [8] doğrusal olmayan manyetik askı sistemini kaskat bağlı bir sistem olarak kabul etmiş ve geleneksel KKD yönteminden yola çıkarak tümleyici değişken yapıları denetim yöntemini kullanmıştır. Bu yöntem ile sistem çıkışının referans işaretini daha az hatayla izlediği de gözlemlenmiştir. Doğrusal olmayan sistemlerin gürbüz kontrolü için bir başka etkili yöntem de nörokontrol yaklaşımıdır. Yapay sinir ağları ile gerçekleştirilen bu kontrol sistemlerinin kullanımını teşvik eden temel neden nümerik verilerden yola çıkılarak bir kontrolörün sentezlenebilmesidir. Mühendislik pratiği açısından bu yaklaşımın değeri, zamanla değişen parametreler gibi dinamik modeli oluşturan ayrıntıların tam ve kesin olarak bilinmediği durumlarda dolaylı olarak sayısal gözlemlerle yansıyan kapalı bilginin bir kontrolöre dönüştürülebilmesidir. Uyarlanabilir özelliği sayesinde literatürde çokça bahsi geçen nörokontrol sistemleri robotik ve mekatronikte sıkça kullanılan yöntemlerden biri olmuştur.

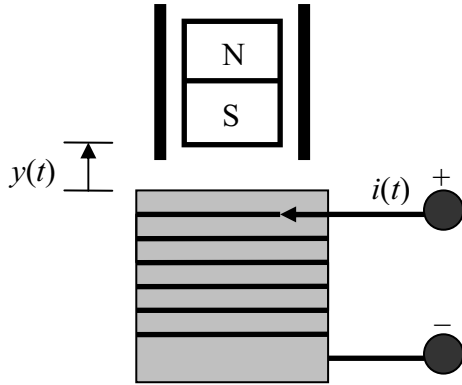
Bu çalışmada amaç, davranışı doğrusal olmayan bir diferansiyel denklemlerle ifade edilen ve Şekil 1'de temsili resmi verilen bir manyetik askı sistemi üzerinde dört kontrol yöntemini sınamak ve yöntemleri basitlik, yerleşme zamanı ve kontrol sinyali uygulanabilirliği açısından karşılaştırmaktır. Çalışmanın içeriği şu şekilde

düzenlenmiştir: 2. bölümde çalışmaya konu olan manyetik askı sisteminin dinamik modeli verilmektedir. 3. bölümde sistemin kayan kipli denetim yöntemiyle denetimi, 4. bölümde sistemin giriş doğrusalsızlığının giderilmesini takiben gerçekleştirilen geribeslemeli doğrusallaştırmaya dayalı denetim, 5. bölümde sistemin doğrusallaştırılması neticesinde elde edilen modele dayalı geliştirilen PI tipi denetim, 6. bölümde sayısal gözlemlere dayanarak geliştirilen ve yapay sinir ağlarına dayalı denetim sistemi ele alınmıştır. Sonuçlar çalışmanın son kısmında özetlenmiştir.

2. Manyetik askı sistemi

Manyetik askı mekanizmasının amacı sadece düşük pozisyonda hareketine izin verilen bir mıknatısın pozisyonunun kontrollü bir elektromıknatıs tarafından belirlenmesidir. Manyetik askı sisteminin modeli elektromıknatısa uygulanan akım (i) ve mıknatısın dikey konumdaki pozisyonu (y) kullanılarak oluşturulabilir. Bu çalışmada ele alınan sistemin matematiksel modeli Hagan vd. [9] tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir;

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} = -g + \frac{\alpha}{M} \frac{i^2(t) \operatorname{sgn}(i(t))}{y(t)} - \frac{\beta}{M} \frac{dy(t)}{dt} \quad (1)$$

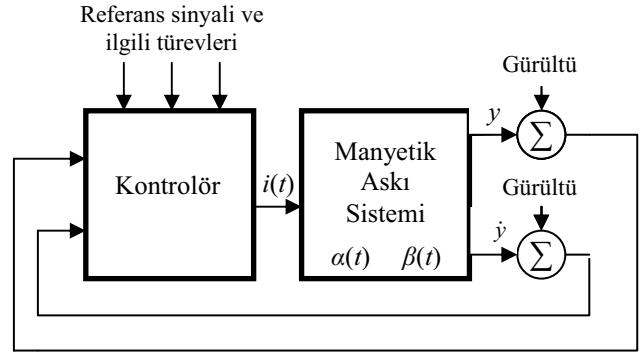


Şekil 1. Manyetik askı sistemi

Modelde mıknatısın hareket ettiği ortamdaki viskoz sürtünme katsayısının (β) nominal değeri 12, manyetik alan kuvvet sabitinin (α) nominal değeri 15, yerçekimi sabiti (g) 9.8 m/s^2 ve mıknatısın kütlesi (M) 3gr olarak alınmıştır. Sistemde $0 < i(t) < 4\text{A}$ kısıtı vardır ve mıknatıs azami 6cm yüksekliğe kadar kaldırılabilir. Sistemden mıknatısın pozisyonu ve hızı okunmaktadır. Amaç ise mıknatısı istenen hız ve pozisyon profilinde tutacak akımın kontrolör tarafından üretilmesidir.

Simülasyon çalışmalarında referans pozisyon olarak iki farklı sinyal ele alınmıştır. Bunlardan ilki $r(t)=3+2.5\sin(2\pi 0.05t)$ ile verilen sinüzoidal yörüngedir. Diğeri ise ortalaması 3, genişliği 0.5, yükselme ve düşme zamanları 5sn olan bir trapezoid profildir. Parametrelerdeki değişimlere karşı gürbüzlüğü sınamak için sistem dinamiğinde görülen α ve β parametrelerinin

nominal değer etrafında değişkenlik gösterdiği varsayılmaktadır ve bu değişimler $\alpha(t) = 15 + 1.5\sin(2\pi 0.09t) + h_\alpha$ ve $\beta(t) = 12 + 2\sin(2\pi 0.07t) + h_\beta$ alınmıştır. Burada h_α ve h_β verilen deterministik değişimlerin ötesinde parametrelere eklenen rassal Gauss gürültüleridir. Bunların haricinde sistemin durum vektörünü teşkil eden pozisyon ve hız değişkenlerine Şekil 2’de de gösterildiği üzere sıfır ortalamalı Gauss gözlem gürültüsü de eklenmiş, olabildiğince gerçekçi bir denetim senaryosu elde edilmiştir. Sunulan çalışmalarda mıknatısın başlangıç pozisyonu 5cm, başlangıç hızı ise 0 cm/s alınmıştır.



Şekil 2. Kontrol sisteminin blok diyagramı

3. Kayan kipli denetim (KKD)

Kayan Kipli Denetim yönteminin amacı doğrusal olmayan sistemin durum yörüngesini, durum uzayında kullanıcı tarafından tanımlanmış bir yüzeye, diğer bir deyişle kayma yüzeyine yaklaştırmak ve sistemin durum yörüngesinin sonraki zamanlarda bu yüzeyin üstünde bulunmasını sağlamaktır. Buradaki en önemli nokta sistemin durumunu kullanıcı tarafından tanımlanan yüzeye yönlendirecek ve sonraki zamanlarda yüzeyin üstünde bulunmasını sağlayacak bir giriş sinyalinin belirlenmesidir. Erişme kuralı (İng. *reaching law*) yaklaşımı faz uzayında kayma yüzeyine erişmeyi zorlayan bir yaklaşımdır ve bu bildiride benimsenen tasarım yöntemidir. Erişim kuralının uygun seçilmesi denetimin sürekli olmasını ve kayma yüzeyindeki salınımların, çattırılmanın, en aza indirilmesi açısından önemlidir. Tasarımı gösterebilmek için sistemin davranışını betimleyen dinamik ifadeyi aşağıdaki gibi durum uzayı biçiminde düzenleyelim.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -g + \frac{\alpha}{M} \frac{i^2 \operatorname{sgn}(i)}{x_1} - \frac{\beta}{M} x_2 \end{aligned} \quad (2)$$

x_1 durumunun (pozisyon) istenen yörüngesi r_1 ve bu işaretin zamana göre türevi olan r_2 de x_2 durumunun (hız) istenen yörüngesidir. x_1 durumu için hata e_1 ve x_2

durumu için hata e_2 değişkenleri ile gösterilmekte ve bu değişkenler aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır

$$\begin{aligned} e_1 &= r_1 - x_1 \\ e_2 &= r_2 - x_2 \end{aligned} \quad (3)$$

Tanım gereği şu durumda e_1 işaretinin zamana göre türevi de e_2 işaretine eşittir. Ele alınan sistem ikinci dereceden bir sistem olduğu için literatürde kayma yüzeyi olarak isimlendirilen ve bir doğruya dönüşen bu büyüklük (4) denklemindeki gibi tanımlanabilir. Erişim kuralı ise (5) denklemindeki gibi seçilmiştir. Bu seçim çaturdama etkisini olabildiğince bertaraf edebilmek amacıyla işaret fonksiyonunun yumuşatılması neticesinde elde edilmiştir.

$$s = e_2 + \lambda e_1 \quad (4)$$

$$\dot{s} = -\xi \frac{s}{|s| + \sigma} - \eta s \quad (5)$$

(4) ile verilen s ifadesinin zamana göre türevini alır \dot{s} ifadesinin yerine yazarsak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\dot{s} = \dot{r}_2 - \dot{x}_2 + \lambda e_2 \quad (6)$$

İfadelerin biraraya getirilmesi aşağıdaki eşitliğin elde edilmesini sağlayacaktır.

$$\begin{aligned} \frac{x_1}{\alpha} M \left(\xi \frac{s}{|s| + \sigma} + \eta s + g + \frac{\beta}{M} x_2 + \dot{r}_2 + \lambda e_2 \right) \\ = i^2 \operatorname{sgn}(i) \end{aligned} \quad (7)$$

(7) ifadesinden uygulanacak akım değeri (i) bulunur. Simülasyonlarda λ değeri 1 olarak kabul edilmiş, kayma doğrusunun eğimi böylelikle 1 olmuştur.

Şekil 3'te referans sinyali $r(t) = 3 + 2.5 \sin(2\pi 0.05t)$ seçilmiş, mıknatis pozisyonunun ve hızının referans işaretini nasıl takip ettiği ve bu durumu sağlayan kontrol işareti gösterilmiştir. Şekil 4'te ise durum izleme hatalarının zamana göre değişimi verilmiştir. Pozisyonun ve hızın referans işaretini oldukça yakın takip ettiği gözlemlenmiştir.

Şekil 5'te ise aynı denetim sistemi trapezoid referans sinyali için test edilmiş ve sistem durumlarıyla kontrol işareti gösterilmiştir. Şekil 6'da ise durum izleme hataları verilmiştir.

Tüm olumsuzluklara rağmen her iki deneyde de, sistem durumlarının istenen değerlere hızlı bir şekilde yakınsadığı gözlemlenmiştir.

4. Geribeslemeli doğrusallaştırmaya (GD) dayalı denetim

Yukarıda (1) denkleminde verilen modelde u ile tanımlanan ve (8) denklemindeki gibi tanımlanan fiktif bir giriş değişkeni kullanılarak sistem modeli doğrusallaştırılır, bu değişkeni girdi kabul eden ve (9) denkleminde verilen doğrusal sistem ifadesi elde edilir.

$$u = -g + \frac{\beta}{M} i^2 \operatorname{sgn}(i) \quad (8)$$

$$\ddot{y} = \frac{\beta}{M} \dot{y} + u \quad (9)$$

u değişkenini mıknatisin pozisyonunu (y) istenen yörünge (r) cinsinden aşağıdaki gibi seçilebilir.

$$u = \ddot{r} + \frac{\beta}{M} \dot{r} - k(y - r) \quad (10)$$

(10) denkleminin (9) denkleminde yerine yazılmasıyla (11) ifadesine ulaşılır.

$$\left(\ddot{y} - \ddot{r} \right) = -\frac{\beta}{M} \left(\dot{y} - \dot{r} \right) - k(y - r) \quad (11)$$

veya

$$\ddot{e}_1 + \frac{\beta}{M} \dot{e}_1 + k e_1 = 0 \quad (12)$$

doğrusal ifadesine ulaşılabilecektir. Burada tasarımcının seçeceği büyüklük k değeridir. Bu değişken hatanın sifira nasıl yaklaşacağını belirleyecektir ve simülasyonlarda $k = 4$ seçilerek yakınsamanın aşırıya sebep olmayacak biçimde (kritik sönümlü) olması sağlanmıştır.

Bu yaklaşımla (9) denkleminde u değişkeninin değeri, (8) denklemindeki nonlineer ilişkinin aşağıdaki gibi tersinmesinden de i akımı elde edilecektir.

$$i = \sqrt{\left| \frac{M(u + g)}{\alpha} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{M(u + g)}{\alpha} \right) \quad (13)$$

Vurgulanmalıdır ki (10) denkleminde referans işaretinin zamana göre ikinci türevi işlemlere katılmaktadır. Bu tespit, seçilecek referans yörüngeleri üzerine bir kısıt olarak görülmelidir.

5. Doğrusallaştırmaya dayalı PI denetimi

Oransal Türevsel İntegral (İng. *Proportional Integral Derivative, PID*) denetleyiciler hatanın mevcut değeri, hatanın birikmiş değeri ve hatanın eğilim

değerinin ağırlıklı birleşimi esasına göre çalışır. (1) ile verilen sistem dinamiği, mıknatısın pozisyonu, $y = 3\text{ cm}$ ve mıknatısın hızının sıfır olduğu çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılırsa (14) denkleminde verilen doğrusal model elde edilecektir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{g}{3}x_1 - \frac{\beta}{M}x_2 + \frac{\alpha}{3M}v \end{aligned} \quad (14)$$

Burada $v = i^2 \text{sgn}(i)$ ile tanımlanmaktadır. Doğrusallaştırılmış sistemin transfer fonksiyonu (15) ifadesiyle, seçilen kontrolör ise (16) ifadesiyle verilmiştir. Kapalı çevrim sistemin transfer fonksiyonu (17) ifadesiyle verilmiştir.

$$P(s) = \frac{X_1(s)}{V(s)} = \frac{\alpha}{3M} \frac{1}{s^2 + \frac{\beta}{M}s + \frac{g}{3}} \quad (15)$$

$$C(s) = \frac{V(s)}{E(s)} = 8 + \frac{16}{s} \quad (16)$$

$$T(s) = \frac{13.33s + 26.66}{s^3 + 4s^2 + 16.59s + 26.66} \quad (17)$$

Geribeslemeli sistemde α ve β parametrelerindeki rassal Gauss gürültüsü ve sistemin çıktılarındaki, mıknatısın pozisyonu (y) ve mıknatısın hızı (\dot{y}), Gauss gözlem gürültüsü yüzünden türev terimi (K_d) 0 alınmış, böylelikle çalışılan kontrolör PI tipi bir kontrolör olmuştur. Geribeslemeli sistemdeki sürekli hal hatasını azaltmak amacıyla integral kazancı (K_i) uygun seçilmelidir. Simülasyonlarda hatanın mevcut değerini gösteren terim (K_p) 8, integral terimi de (K_i) 16 seçilmiştir. Bu değerler artırılarak daha iyi bir cevap elde edilebilir; ancak terimlerin değerindeki artış kontrol işaretinin varyansında da artışa sebep olmaktadır. Bu durumun yarattığı pratik güçlük ise bobinden geçirilecek akıma kumanda edecek elektronik ekipmanda zamanla hızlı değişimler gösteren kumanda girişlerini gerçekleşmesinin zorluğudur. Bu nedenledir ki kontrol sinyalinin mutedil bir seyir sergilemesi tercih edilen bir karşılaştırma ölçütüdür.

6. Yapay sinir ağı tabanlı denetleyici

Manyetik askı sisteminin zamanla değişen parametrelerinin durum değişkenleri üzerindeki dolaylı etkileri sistemden toplanacak sayısal verilerde mevcuttur. Yapay sinir ağları, bu dolaylı etkileri bir geribeslemeli kontrolörün sentezinde kullanabilmesinden dolayı kontrol mühendisliğinde

önemli bir yer edinmişlerdir. Sistem dinamiğinde yer alan türev terimlerine birinci dereceden Euler yaklaştırmasının uygulanmasıyla elde edilecek ayrık modelden üretilecek verilerle, durum geçişine sebep olan giriş akımını sentezleyen bir nörokontrolör yapısına ulaşılabilir. Diğer bir deyişle, nörokontrolör, belli bir anda okunan pozisyon ve hız durumundan verilen bir referans pozisyon ve hız durumuna geçişi sağlayacak $i(t)$ akımını üretir.

Bu çalışmada nörokontrolörün eğitiminde Levenberg-Marquardt (LM) algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma, klasik hatayı geriye yayma (İng. *error backpropagation*) algoritmasının aksine çabuk yakınsar ve bu nedenle yapay sinir ağlarının eğitiminde sıkça tercih edilir. LM algoritması ikinci dereceden bir arama yöntemi olup, her iterasyonda hata yüzeyine parabolik yaklaşımla yaklaşır ve parabolün minimumu o adım için çözümü oluşturur.

Tek katmanlı ağ yapıları için yapılan tüm denemelerde istenen performans elde edilememiş, bu nedenle simülasyonlarda ilk katmada 20, ikinci katmada ise 15 gizli nöron içeren iki katmanlı bir ağ yapısı kullanılmıştır. Gizli katmanlardaki nöronların aktivasyon fonksiyonları hiperbolik tanjant tipinde, çıkış katmanı ise doğrusal tek nöron içerir. Eğitim rastgele üretilmiş 20000 eğitim verisi çifti, 800 adet de kontrol verisi çifti kullanılarak yapılmış, ortalama karesel eğitim hatasının 20000 çift üzerinden yapılan eğitim ile 0.018251 seviyesine kadar düştüğü gözlemlenmiştir.

Elde edilen kontrolör, daha önce verilen sinüzoidal ve trapezoid referans işaretleri için test edilmiş ve Tablo 1 ve 2 de özetlenen performans bulguları elde edilmiştir.

7. Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışmada doğrusal olmayan ve dinamik bir yapıya sahip manyetik askı sistemi ele alınarak, bu sistemin kayan kipli denetimi, geribeslemeli doğrusallaştırmaya dayalı denetimi, doğrulaştırmaya dayalı PI denetimi ve yapay sinir ağları ile denetimi ele alınmıştır. Bu yöntemler basitlik, $i(t)$ akımının varyansı (uygulanabilirlik) ve izleme hatasının sifra yakınsama zamanı (yerleşme zamanı) olarak belirlenmiştir. Tablo 1 ve Tablo 2 de dört yöntem bu kriterlere göre karşılaştırılmış ve elde edilen sayısal sonuçlar verilmiştir. Tablolardan görülebileceği üzere klasik bir kontrol yöntemi olan PI denetleyicinin yakınsama zamanının diğer denetleyicilerden daha fazladır. Ayrıca kontrol işaretinin ($i(t)$) varyansının da diğer denetleyicilerle elde edilen değerlerden çok daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonuç, kontrol işaretinde yüksek frekanslı bileşenlerin görece fazlalığına işaret etmekte ve fiziksel uygulanabilirlik açısından bilgi vermektedir. Sürekli hal hatasını bertaraf etmek için kullanılan integral terimi içeren PI denetleyicinin K_i kazancının artırılması sistemin sürekli rejime daha hızlı kavuşmasını sağlarken kontrol işaretinin varyansı artmasına sebep olur. Bu ise fiziksel uygulanabilirlik açısından olumsuz bir neticedir. Bir başka klasik kontrol

yöntemi olan GD dayalı denetleyici ile elde edilen bulguların da bu ölçütlere göre PI denetleyiciden daha iyi olduğu görülmektedir. Simülasyonlar sırasında referans sinyalinin trapezoid tipte olduğu durumda, kontrol sinyalinde ikinci türevden kaynaklanan ani yükselmeler ve düşmeler olmakta, genel anlamda düzgün bir seyir içeren kontrol sinyali bu anlarda arzu edilmeyen ani değişimler göstermektedir. Bunun haricinde GD dayalı denetleyiciyle elde edilen akım profili oldukça makuldür. Yapay sinir ağı denetleyici ile referans işareti sinüzoidal profili olduğu durumda yakınsama zamanının en iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca kontrol işaretinin varyansının PI denetleyiciden daha düşük olması da kontrol işaretinin fiziksel açıdan daha kolay uygulanabileceğini göstermektedir. Giriş işareti trapezoid profili olduğu durumda ise yakınsama zamanı biraz daha artmıştır.

Gerçekleme basitliği açısından ele alındığında PI denetleyicinin diğer denetim yöntemleri arasında en sade yapıya sahip olduğu göze çarpmaktadır. PI denetleyiciyle benzer karmaşıklık gösteren GD dayalı denetleyicisini KKD ve NK yöntemleri izlemektedir. Özellikle NK yaklaşımında iki gizli katmanlı sinir ağının gerçekleşmesi sistemin gömülü bir kontrol birimi tarafından gerçekleştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Tüm sonuçların birlikte değerlendirilmesi neticesinde en hızlı yakınsamanın ve en düşük akım varyansının GD dayalı denetim yaklaşımıyla elde edildiği görülmektedir.

Tablo.1 Sinüzoidal profili referans işaret olduğu durumda yerleşme zamanı ve kontrol sinyalinin varyansı

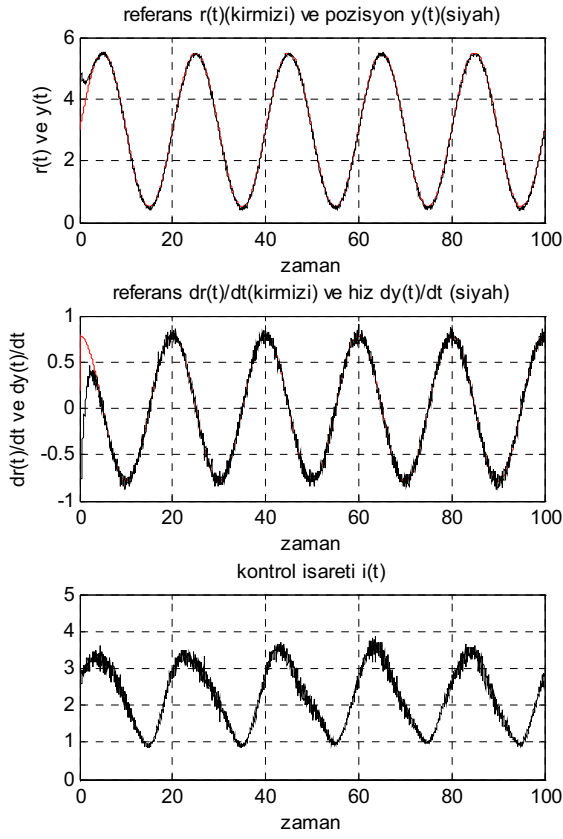
| Yöntem | Yakınsama Zamanı (sn) | $i(t)$ Akımının Varyansı |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Kayan Kipli Denetim | 3.43 sn | 0.7595 |
| GD Denetleyici | 3.38 sn | 0.6672 |
| PI Denetleyici | 5.24 sn | 0.9054 |
| Nörokontrolör ile Denetim | 2.05 sn | 0.7012 |

Tablo.2 Yamuk profili referans işaret olduğu durumda yerleşme zamanı ve kontrol sinyalinin varyansı

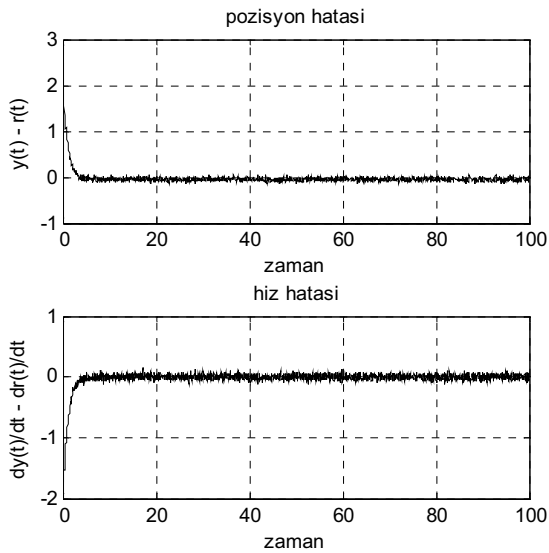
| Yöntem | Yakınsama Zamanı (sn) | $i(t)$ Akımının Varyansı |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Kayan Kipli Denetim | 3.45 sn | 0.1017 |
| GD Denetleyici | 3.12 sn | 0.0421 |
| PI Denetleyici | 5.42 sn | 0.8854 |
| Nörokontrolör ile Denetim | 4.05 sn | 0.0759 |

8. REFERANSLAR

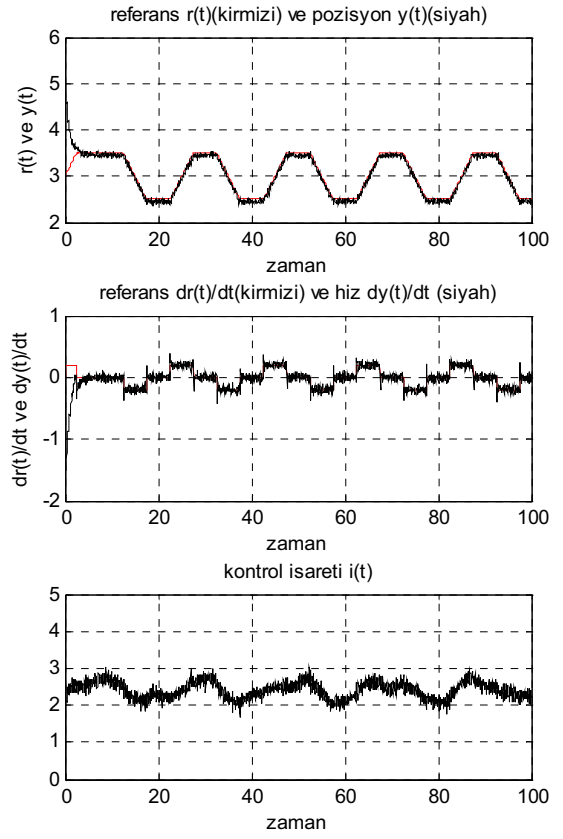
- [1] K.J. Astrom, T. Hagglund, (1995) "PID Controllers: Theory, Design, and Tuning", *International Society for Measurement and Control*.
- [2] Y. Shiao, "Design and Implementation of a Controller for a Magnetic Levitation System," *Proc. of Natl. Sci. Counc.*, Cilt: 11, No: 2, s:88-94, 2001.
- [3] R. C. Fama, R. V. Lopes, A. de P. Milhan, R. K. H. Galvao, B. A. D. Lastra, "Predictive Control of a Magnetic Levitation System with Explicit Treatment of Operational Constraints," *ABCMS Symposium Series in Mechatronics*, No: 2, s:01-08, 2006.
- [4] I. A. Shkolnikov, Y. B. Shtessel, D. P. Lianos, A.T Thies, "Robust missile autopilot design via high-order sliding mode control," *Proc. of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Denver, CO, U.S.A, AIAA Paper 2000-3968, 2000.
- [5] O. Camacho, C.A. Smith, "Sliding Mode Control: An Approach to Regulate Nonlinear Chemical Process," *ISA Trans.*, Cilt: 39, No: 14, s:205-218, 2000.
- [6] J. Guldner, V.I. Utkin, "Sliding Mode Control for Gradient Tracking and Robot Navigation Using Artificial Potential Fields," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Cilt: 11, No: 2, s:247-254, 1995.
- [7] D. Cho, Y. Kato, D. Spilman, "Sliding Mode and Classical Control Magnetic Levitation System," *IEEE Control Systems Magazine February 1993*, No: 1, s:42-48, 1993.
- [8] T.E Lee, J.P. Su, K.W. Yu, "Nonlinear Robust Control of a Magnetic Levitation System," *Proc. of the first International Conference on Innovative Computing, Information and Control*, Cilt: 1, No: 42, s:517-521, 2006.
- [9] M. Hagan, H. Demuth, O. De Jesus, "An Introduction to the Use of Neural Networks in Control Systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Cilt: 12, No: 11, s:959-985, 2002.



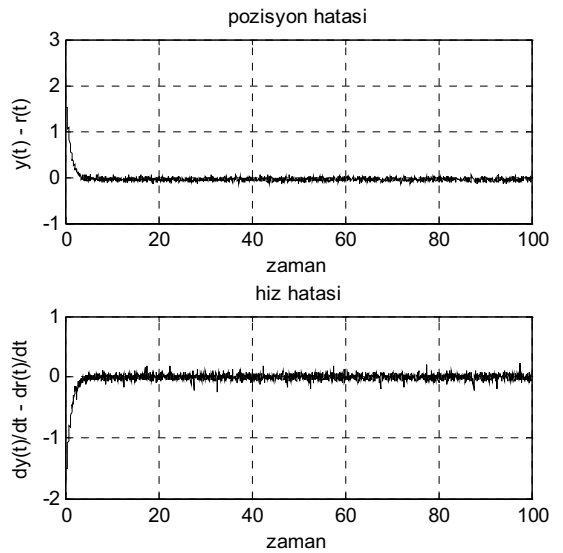
Şekil 3. Kayan Kipli Denetim yöntemi için referans işaretinin sinüzoidal profili olduğu durumda mıknatıs pozisyonun ve hızının referans işaretini takibi, kontrol işareti



Şekil 4. Kayan Kipli Denetim yöntemi için referans işaretinin sinüzoidal profili olduğu durumda gözlemlenen durum izleme hataları



Şekil 5. Kayan Kipli Denetim yöntemi için referans işaretinin trapezoid profili olduğu durumda mıknatıs pozisyonun ve hızının referans işaretini takibi, kontrol işareti



Şekil 6. Kayan Kipli Denetim yöntemi için referans işaretinin trapezoid profili olduğu durumda gözlemlenen durum izleme hataları