

Rotor-AMY sisteminin bulanık denetleyici ile kontrolü ve denge akımı eniyileştirilmesi

Ahu Ece HARTAVİ*, R. Nejat TUNCAY, M. Necip ŞAHİNKAYA, Clifford R. BURROWS*

İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, Rotor-Aktif Manyetik Yatak (AMY) sistemi için tasarlanılan Bulanık Denetleyici Kontrolör (BDK) ve sistemde harcanılan enerjiyi azaltmayı sağlayan enerji eniyileştirme algoritması (EİA) sunulmuştur. Başlangıçta sistem dinamiğini incelemek için sisteme ait benzetişim modeli Matlab®/ Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan model ile denge akımının enerji kaybına olan etkisi literatürde yer alan iki farklı yöntemi için incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan hareket ile enerji eniyileştirme algoritması geliştirilmiş ve sistemin kontrolünde kullanılan BDK'ya bağlanmıştır. Gerçekleştirilen BDK+EİA, dSPACE modülü yardımı ile Rotor-AMY sistemine uygulanmıştır. Sonuçta sistem parametrelerinin aynı anda değiştirilmesi ile dinamik yapının uygun katılıkta ve en az enerji harcayacak biçimde çalıştığı deneysel olarak gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aktif manyetik yatak, bulanık mantık, enerji.

Fuzzy supervisory control of Rotor-AMB system and bias current optimization

Abstract

This paper presents the Fuzzy Supervisory Control (FSC) and bias current optimization algorithm developed for a Rotor-Active Magnetic Bearing (Rotor-AMB) system. Since the AMBs are inherently unstable, it is essential to use a controller for a stable levitation. Initially, a closed loop control of Rotor-AMB system is achieved and the whole model is built in a virtual environment (Matlab®/ Simulink). With the help of simulation model the system dynamics is analyzed. In addition to that, the effect of bias current on energy consumption is studied for both unidirectional and differential control current strategies. A differential current control gives better efficiency compared with a unidirectional approach when the bias current is variable. Thus, optimizing the bias current according to the operational conditions is beneficial for magnetically levitated systems. According to the results obtained an energy optimization algorithm (EOA) is developed. Since the system is nonlinear and has some uncertainties a Fuzzy Supervisory Controller is used to overcome these problems. Then, the real time model of the FSC and EOA are achieved using dSPACE. Finally an experimental set up is formed and FSC+EOA are applied to the Rotor-AMB system. It is shown that, FSC and the algorithm developed make the system tolerant to higher unbalances and disturbances with minimum energy consumption.

Keywords: Active magnetic bearing, fuzzy logic, energy.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Ahu Ece HARTAVİ. hartavi@elk.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 67 75.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Elektrik Elektronik Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Rotor-AMY sisteminin bulanık denetleyici ile kontrolü ve denge akımı eniyileştirilmesi" başlıklı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 20.12.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 24.02.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.11.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Aktif manyetik yataklar (AMY) günümüzde teknoloji çevrelerinin üzerinde yoğun olarak çalıştığı konulardan biridir. Manyetik yataklar (MY) bir mili veya rotoru manyetik alanının oluşturduğu kuvvetler yardımı ile hiçbir fiziksel temas olmaksızın havada asılı tutan, kılavuzlayan ve oluşan titreşimleri belirli sınırlar içerisinde tutmaya yarayan elektromekanik düzenlerdir. Temassız çalışması, sürtünmesiz işletme, düşük titreşim seviyesi, sessiz çalışma, yüksek hız, özel ortamlarda kullanılabilirlik ve az bakım gibi birçok avantajları da beraberinde getirmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte yeni denetim tekniklerinin geliştirilmesi aktif denetimin gerekli olduğu AMY'lerin gelişimini desteklemiştir. Bunun sonucunda AMY'ler bugün yüksek hızlı elektrik makinelerinde, sıvı helyum pompalarında, kompresörlerde, uzay araçlarında, enerji depolayan sistemlerde, yüksek sıcaklıkların gerektiği uygulamalarda, turbomoleküler pompalarda ve endüstride daha bir çok yerde kullanım alanı bulmuştur (Matsumura vd., 1997).

Earnshaw, 1842 yılındaki çalışmasında sabit yük, mıknatısiyet veya akım taşıyan herhangi bir cismin, sadece değişmeyen bir elektrik veya manyetik alan tarafından kararlı olarak tutulmayacağını ortaya koymuştur. Earnshaw (1842) bu teoremi ile manyetik askı sistemleri kuramının kurucusu olarak kabul edilmiştir. Ancak manyetik yataklarla ilgili asıl çalışmalar 1930'lu yıllarda başlayabilmiştir. Bu yıllardaki teknolojinin etkin denetimin gerekli olduğu AMY'ler için yeterli olmaması çalışmaların öncelikle sürekli mıknatısların kullanıldığı pasif sistemler üzerine yoğunlaşmasına neden olmuştur. 1970'li yılların ilk yarısında MY'ler üzerine patent alımları ve ticari girişimler hız kazanmıştır (Habermann ve Liard, 1979). Bu girişimlerin bir sonucu olarak manyetik yatakların uygulama alanları günümüzde oldukça genişlemiştir.

AMY'lerin doğal olarak kararsız yapıları nedeni ile geri besleme kontrolüne ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, AMY'lerin kararlı olarak çalışmasını sağlamada bir çok farklı kontrol yönteminin kullanıldığı

görülmektedir. Bu yöntemler, doğrusal ve doğrusal olmayan kontrol metotları olmak üzere iki ana grupta toplanabilirler. Doğrusal kontrol metotları, kullanıldıkları AMY'li sistemlerde basit tasarım, kolay uygulanabilirlik ve ucuz maliyetin istenmesi durumunda tercih edilirler (Hartavi vd., 2003). Ancak, manyetik yapının doğrusal olmaması ve sistemdeki belirsizliklerden kaynaklanan etkilerin bastırılarak kontrolör etkinliğinin ve sistemin kararlı olduğu bölge sınırlarının genişletilmesinin istendiği durumlarda ise doğrusal metotlara nazaran daha karmaşık ancak daha etkin olan doğrusal olmayan kontrol yöntemleri tercih edilmektedir (Ariga vd., 2000; Yeh vd., 2001; Gürleyen, 2005).

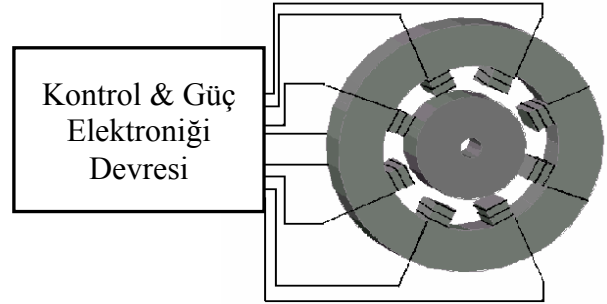
Bu çalışmada, tasarımı gerçekleştirilen kontrolörden iki performans indeksini sağlaması istenmiştir. Bunlardan ilki sistemin değişen çalışma şartlarına uygun olan eşdeğer katılığının belirlenmesi ikincisi ise herhangi bir bozucu durumunda rotor-stator temasının önlenmesidir. Aksi taktirde rotor yardımcı yataklar çarparak sistemin doğrusal olmayan dinamik bir yapı sergilemesine neden olur. Bu durum ise kontrolörün yetersiz kalarak devre dışı olmasına yol açar (Şahinkaya vd., 2005). İstenmeyen bu duruma engel olabilmek için sistemin çalışması sırasında oluşan titreşimlerin belirli sınırlar dahilinde tutulması gerekmektedir (Şahinkaya vd., 2004). Özellikle son zamanlardaki çalışmalara bakıldığında doğrusal olmayan, iyi tanımlanamamış ve parametre değişimleri olan sistemlerde insan deneyiminden faydalanan Bulanık Kontrolörler (BK) tercih edilmektedir. Buna neden olarak BK'ların tasarımlarının klasik doğrusal olmayan kontrol yöntemlerine nazaran daha kolay ve daha hızlı olması gösterilmektedir (Hartavi vd., 2003). Hung, (1995) AMY'ler için tasarladığı kontrol yapısında bulanık kontrolörü PID kontrolör ile seri olarak kullanmıştır. Böylece her iki yöntemin faydalarını birleştirmiştir. Hong ve diğ erleri (2000) ise çalışmalarında BK'yı asıl kontrolör olarak kullanarak dengesizlik sonucu oluşan titreşimleri bastırmayı amaçlamışlardır. Bu durumu çalışmalarında yer alan deneysel sonuçlarla da desteklemiştir.

Bu çalışmada ilk olarak Rotor-AMY sistemi dinamik modeli ve sistemin kararlı çalışmasını sağlayacak olan PID kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. İkinci kısımda sistem matematiksel modeli farklı çalışma şartlarındaki dinamik yapıyı inceleyebilmek için Matlab® / Simulink ortamına aktarılmıştır. Daha sonra literatürde yer alan iki farklı akım kontrol yönteminin AMY'lerdeki enerji kaybı üzerine olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen enerji-denge akımı ilişkisinden hareket ile sistemdeki harcanılan enerjiyi azaltan Değişken Çift Yönlü Sürme Modu (DÇYSM) yöntemi geliştirilmiştir. Kontrolör tasarımında ise denge akımının sistem dinamiğini belirleyen eşdeğer katılığa olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan hareket ile değişken dengesizlik durumlarına kendini adapte edebilen Bulanık Denetleyici Kontrolör (BDK) tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kontrolör, Enerji İyileştirme Algoritması (EİA) ile seri olarak bağlanarak sisteme uygulanmıştır. Böylece uygun denge akımı seçilerek sistemin en az enerji kaybı ile belirlenen sınırlar içerisinde kararlı bir biçimde çalışması sağlanmıştır. Son olarak deneysel ve teorik çalışmalar karşılaştırılmış ve sonuçların birbirlerini desteklediği görülmüştür.

AMY'lerin çalışma ilkesi

Bir manyetik yatağın asıl görevi hiçbir fiziksel temas olmaksızın havada asılı tutulan yapının zorlanmış hareketini istenilen sınırlar dahilinde tutmaktır. Bu görev birbirlerine karşılıklı olarak yerleştirilmiş olan elektromıknatıslardan denge akımının geçirilmesi ile gerçekleştirilir. Böylece rotora eşit büyüklükte ve zıt yönde elektromanyetik kuvvet uygulanarak milin dengede asılı olarak kalması sağlanır. Ancak sarımların herhangi birinden kontrol edilmemiş bir akımın geçmesi veya sisteme dış bir bozucunun etkimesi ile rotor, kuvvetin arttığı yöndeki kutba doğru artan bir ivme ile hızlanarak hareket eder ve çarpar. Bu nedenle AMY'lar da geri besleme kontrolüne ihtiyaç duyulur. Pratikte kullanılan bir AMY sistemine ait prensip modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Herhangi bir neden ile roturun denge konumundan uzaklaşması halinde algılayıcılar tarafından alınan yeni konum bilgisi

kontrolöre aktarılır. Kontrolör aldığı giriş işaretine bağlı olarak bir kontrol işareti üretir. Daha sonra bu kontrol işareti elektromıknatıslara uygulanarak roturun denge konumuna dönmesi sağlanır. Bu nedenle AMY'ler elektromekanik aksam, algılayıcı, ve kontrolör olmak üzere temel olarak 3 kısımdan meydana gelirler. Aktif denetime ihtiyaç duyulması her ne kadar bir takım araştırmacılar tarafından maliyet olarak nitelendirilse de klasik sistemlerden farklı olarak yatak kuvvetlerinin ve titreşimlerinin izlenmesine imkan sağlamaktadır.



Şekil 1. Aktif manyetik yatak prensip modeli

İncelemeler esnasında basitlik sağlaması açısından milin sadece x-ekseni yönündeki hareketi göz önüne alınır ve sisteme Newton'un doğrusal hareket yasası uygulanırsa rotora ait hareket denklemi

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_2 - F_1 \quad (1)$$

olarak elde edilir. Burada yer alan F_1 ve F_2 karşılıklı yerleştirilmiş olan elektromıknatısların ürettiği kuvvetleri, m askıda tutulan cismin külesini, x ise denge konumundan uzaklaşma miktarını göstermektedir. Elektromanyetik kuvvete ait daha açık ifade yapıya ait manyetik eşdeğer devreden ve manyetik koenerjiden faydalanılarak bulunur. Elde edilen yeni kuvvet ifadesi denklem 1'de yerine yazılması ile

$$f = k \left[\left(\frac{I_2}{g_0 - x} \right)^2 - \left(\frac{I_1}{g_0 + x} \right)^2 \right] \quad (2)$$

seçilir ve sistemin kararlı çalışmasında en etkili olan parametredir. Bu nedenle kontrol akımı

$$I_c = -K_p x \quad (9)$$

şeklinde ifade edilebilir. Buradaki I_c kontrol akımını, K_p orantı katsayısını ve x denge konumundan uzaklaşma miktarını göstermektedir.

Çift Yönlü Sürme Modu (ÇYSM)

Kontrol akımı üretiminde en çok kullanılan yöntemdir. Kontrol akımı konumun fonksiyonu olarak üretir ve birbirine karşılıklı yerleştirilmiş olan elektromıknatıslara ters işaretli olarak eklenir. Bu durumda elektromıknatıslarından akan akımlar

$$I_1 = I_b + I_c = I_b - K_p x \quad (10)$$

$$I_2 = I_b - I_c = I_b + K_p x \quad (11)$$

biçiminde ifade edilir. Denklem (10) ve (11) de gösterilen I_1 ve I_2 sırası ile birinci ve ikinci elektromıknatıslardan akan akımları gösterirken, I_b denge akımını göstermektedir. ÇYSM'de sisteme ait eşdeğer katılık (10) ve (11) denklemlerinin (2)'de yerine yazıldıktan sonra konuma göre türevinin alınması ile elde edilir.

$$K_{esd} = \frac{k}{g_o^3} (I_b^2 - K_p I_b g_o) \quad (12)$$

Buradaki K_{esd} eşdeğer katılığı, k geometrik katsayıyı ve I_b denge akımını göstermektedir.

Tek Yönlü Sürme Modu (TYSM)

Literatürde kullanılan diğer bir yöntemdir. Enerji kaybını azaltmak amacı ile kullanılmaktadır. TYSM yönteminde üretilen kontrol akımı konum değişimine neden olan kuvvete zıt yöndeki elektromıknatısa uygulanır. Böylece her durumda sadece tek bir elektromıknatısa kontrol akımı uygulanmış olur. Bu durumda karşılıklı elektromıknatıslardan akan akımlar

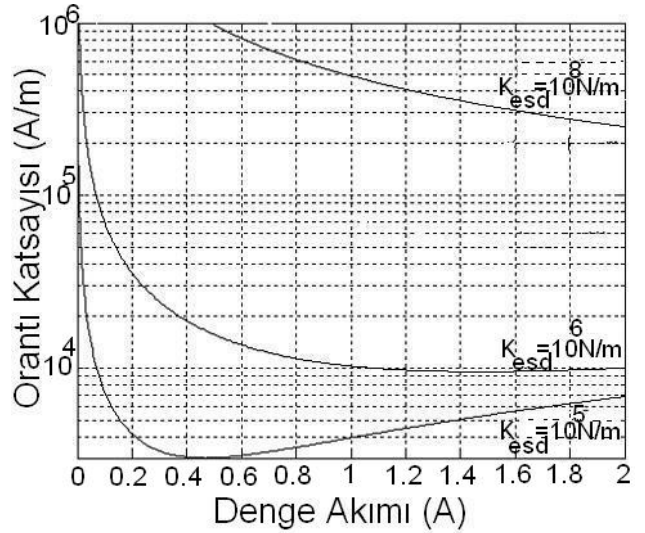
$$I_1 = \begin{cases} I_b + 2|I_c| \Leftarrow I_c > 0 \\ I_b \Leftarrow I_c < 0 \end{cases}, \quad f > 0 \quad (13)$$

$$I_2 = \begin{cases} I_b \Leftarrow I_c < 0 \\ I_b + 2|I_c| \Leftarrow I_c > 0 \end{cases}, \quad f < 0 \quad (14)$$

olarak ifade edilir. Bu yöntemin uygulanması durumundaki eşdeğer katılık ifadesi de ÇYSM'ye benzer biçimde elde edilir.

Enerji kayıplarının eniyileştirilmesi

Kontrol akımı uygulama yöntemleri incelendiğinde eşdeğer katılık ifadesinin denge akımının fonksiyonu olduğu görülür. Şekil 3'de farklı K_{esd} değerleri için denge akımı ve orantı katsayısının değişimi gösterilmiştir. Eğrilere bakıldığında literatürde yer alan yöntemlerden farklı olarak sistem cevabını verebilen birden fazla orantı katsayısının bulunduğu görülür.



Şekil 3. $K_p - I_b$ 'nin farklı eşdeğer katılık durumundaki eğrileri

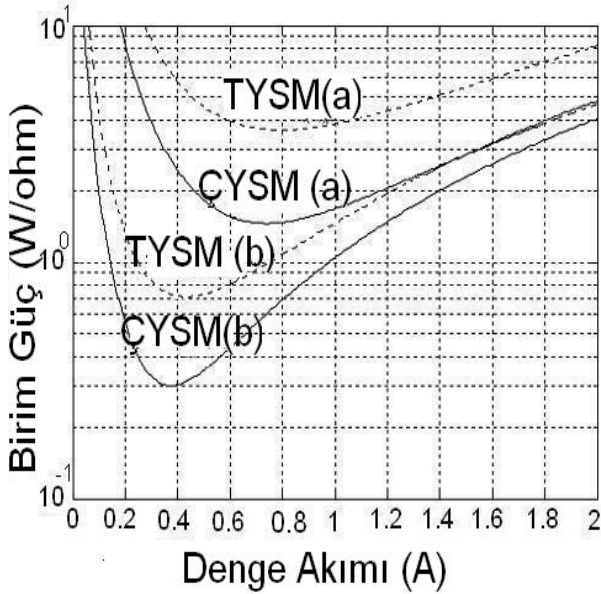
Denge konumunda Ω hızı ile dönmekte olan rotora dönme hızının fonksiyonu olan bir takım kuvvetler etkir. Bu ise rotorun titreşmesine neden olur. Rotorun sabit Ω hızındaki kararlı hal senkron cevabı

$$x = X \sin(\Omega t + \Theta) \quad (15)$$

şeklinde ifade edilir. Denklemden yer alan X senkron cevap genliğini, θ ise fazı göstermektedir. Bu durumda AMY'de harcanılan ortalama güç:

$$P_{ort} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{R}{2\pi} \int_{\Omega t = \theta}^{2\pi - \theta} (I_1^2 + I_2^2) d(\Omega t) \quad (16)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada R bobin direnci, I_1 ve I_2 ise sırası ile birinci ve ikinci elektromıknatis akımlarıdır. Denklemden enerji kaybının denge akımının fonksiyonu olduğu görülür. Şekil 4’de 10^6N/m eşdeğer katılık değerindeki birim gücün denge akımı ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4. $K_{esd} = 10^6 \text{N/m}$ durumuda birim gücün denge akımı ile değişimi
a) $0.4 g_0$ b) $0.1 g_0$ seviyesindeki titreşim

Değişken çift yönlü sürme modu

Bu çalışmada geliştirilen Değişken Çift Yönlü Sürme (DÇYSM) modu farklı çalışma şartlarında uygun denge akımı kullanılması ilkesine dayanmaktadır. Amaç bu yöntem yardımı ile Rotor-AMY sisteminde harcanan enerjiyi azaltmaktır. Geliştirilen yönteme ilişkin benzetişim modeli sonuçları ÇYSM ile karşılaştırmalı olarak Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Benzetişim modeli sonuçları

	F_d (N)	I_b (A)	K_{esd} (N/m)	W (J)
ÇYSM	130	5	4.1×10^6	20.91324
DÇYSM	130	4.8	4.1×10^6	18.2332
DÇYSM	130	2.5	4.1×10^6	6.809

Bulanık denetleyici kontrolör

Tasarımı gerçekleştirilen Bulanık Denetleyici Kontrolör (BDK) ile sistemin içinde bulunduğu çalışma şartlarına uygun olan dinamiği ayarlanmıştır. Böylece sisteme farklı bozucular karşısında kendini adapte edebilme özelliği kazandırılmıştır. BK’nın yapısında Takagi-Sugeno (TS) kural yapısı kullanılmıştır. BDK yapısında yer alan kural yapısı ise genel olarak

$$\text{If } (e_1 \text{ is } A_1) \text{ and } (e_2 \text{ is } A_2) \text{ then } y = g(e_1, e_2) \quad (17)$$

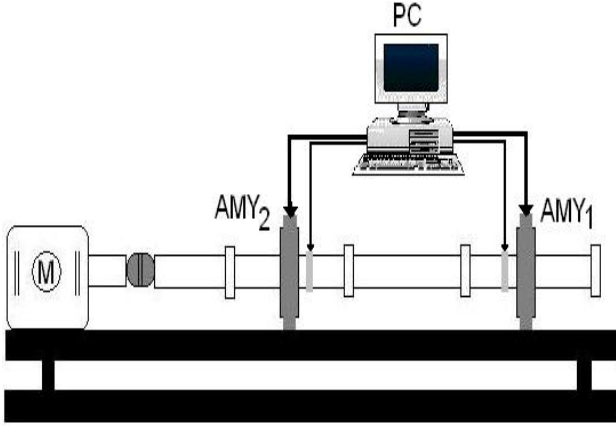
biçiminde ifade edilebilir. Buradaki e_1 ve e_2 kontrolör girişleri, A_1 ve A_2 bulanık kümeler ve $g(e_1, e_2)$ ise sisteme ait çıkış fonksiyonudur. Sisteme ait BDK’da girişler sırası ile rotor yö-rüngesi ve değişimi çıkış ise eşdeğer katılık olarak belirlenmiştir.

BDK tasarımının gerçekleştirilmesinden sonra PID kontrolör, AMY’ler ve rotor modelleri bir araya getirilerek tüm sisteme ait model yapı elde edilmiştir. Böylece PID kontrolör girişinden aldığı konum bilgisine karşılık bir kontrol işareti üretirken, BDK belirlenmiş olan performans kriterleri doğrultusunda gerekli olan bilgiyi enerji eniyileştirme bloğuna göndermektedir. EİA ise harcanılan enerjiyi en aza indirgeyecek olan parametreleri belirleyerek PID kontrolörüne ve AMY’lere uygulamaktadır. Böylece farklı bozucular karşısında sistem dinamiği istenilen biçimde ayarlanırken harcanılan enerjinin de en az olması sağlanmıştır.

Deney düzeneği

Tasarlanılan BDK ve EİA’nın sistem üzerindeki etkisini incelemek için bir takım deneyler gerçekleştirilmiştir. Rotor-AMY sistemine ait deney düzeneği 2m uzunluğunda, üzerinde dört adet diskin yer aldığı rotordan, dört adet AMY’den, rotor-stator temasını önlemede kullanılan yardımcı yataklardan, konum algılayıcılarından, güç elektroniği devrelerinden, anadenetim bilgisayarından, dSPACE modülünden, DS2002 A/D, DS2103 D/A, DS1005 PPC kartından, MathWorks’ün Matlab®/Simulink ve Real time Workshop programlarından oluşmaktadır. Şekil 6’da deney düzeneği gösterilmiştir. dSPACE modülü ile BDK ve EİA’nın benzeti-

şim modellerinden kod üretimi otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Sistemin kapalı çevrim kontrolü algılanan konum bilgisinin geri besleme işareti olarak ana denetim bilgisayarındaki gerçek zaman modeline uygulanması ve üretilen kontrol işaretinin güç elektroniği devresi üzerinden elektromıknatlara uygulanması ile sağlanır. Sonuç olarak rotora gerekli kontrol kuvvetleri uygulanarak sistemin denge konumunda çalışması sağlanmıştır.



Şekil 6. Rotor-AMY sistemi deney düzeneği

BDK ve EİA modellerinin deney düzeneğine uygulanması ile elde edilen sonuçlar geleneksel yöntemle karşılaştırmalı olarak Tablo 4'de verilmiştir. Tablodaki değerler incelendiğinde geliştirilen yöntem ile farklı bozucular karşısında sistemin denge akımını ve eşdeğer katılığı değiştirerek kendini çalışma koşullarına uygun olarak adapte ettiği görülmektedir. Denge akımının 5A'den 2.5 ve 2.78A'ya, eşdeğer katılık değeri ise $0.89 \times 10^6 \text{N/m}^6$ 'den 0.30×10^6 ve $0.40 \times 10^6 \text{N/m}^6$ 'ye değiştirilmiştir.

Tablo 4. Deneysel sonuçlar

	F_d (N)	I_b (A)	K_{esd} (N/m)
PID	30	5	0.89×10^6
BDK+EİA	30	2.5	0.30×10^6
PID	85	5	0.89×10^6
BDK+EİA	85	2.78	0.40×10^6

Sonuçlar

Bu çalışmada, Rotor-AMY sistemi üzerinde tasarımı gerçekleştirilen BDK ve EİA uygulan-

arak sistemin farklı çalışma koşullarındaki davranışı incelenmiştir. Bu amaca yönelik olarak da öncelikle AMY'lere ve rotor dinamiğine ait matematiksel modeller oluşturulmuştur. AMY'lerin kararsız olmaları nedeni ile kontrolöre ihtiyaç duyulmuş ve klasik PID kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. PID kontrolöründe yer aldığı tüm sisteme ait kapalı çevrim modeli Matlab®/Simulink ortamına aktarılmıştır. Daha sonra AMY'lerin çalışmaları esnasında harcadıkları enerji ve sistem dengesizliğinden kaynaklanan bozucuların etkileri olmak üzere iki temel konu incelenmiştir. Bu doğrultuda denge akımının enerji kaybına olan etkisi incelenmiştir. Literatürde yer alan iki farklı kontrol akımı uygulama yöntemleri sistemde harcanılan enerji açısından ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar ile sistemdeki enerji harcamasını en aza indirmede kullanılan Enerji İyileştirme Algoritması (EİA) geliştirilmiştir. Eşdeğer katılığın sistem dinamiğine olan etkisi incelendikten sonrada Rotor-AMY sistemi için Bulanık Denetleyici Kontrolör (BDK) tasarımı gerçekleştirilmiştir. BDK ve EİA seri bir biçimde bağlanarak Rotor-AMY sistemine uygulanmıştır. Kontrolörün ve geliştirilen algoritmanın birlikte çalıştırılması ile denge akımı enerji kaybını en aza indirecek şekilde seçilirken eşdeğer katılık değeri de bozucular karşısında sistemin belirlenen sınırlar içerisinde kararlı biçimde çalışmasını sağlayacak şekilde seçilmiştir. Böylece sisteme kendini farklı çalışma koşullarına adapte edebilme özelliği kazandırılmıştır. Son olarak deneysel çalışmalar ile ortaya konulan teori karşılaştırılarak sonuçların birbirini desteklediği gösterilmiştir.

Kaynaklar

- Ariga, Y., Nonami, K., Sakai, K., (2000). Nonlinear control of zero power magnetic bearing using Lyapunov's direct method, *7th International Symposium on Magnetic Bearings*, 293-298, Zurich.
- Earnshaw, S., (1842). On the nature of molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether, *Transactions Cambridge Phil. Society*, **12**, 97-112.
- Gürleyen F., (2005). PID+Kural tabanı-değişken yapıli kontrol ile aktif manyetik yataklamalı yüksek hızlı rotorlar, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, 125-130, İstanbul, Türkiye.

- Habermann, H. ve Liard G. L., (1979). Practical magnetic bearings, *IEEE Spectrum*, **16**, 26-30.
- Hartavi, A. E., Üstün, Ö., Tuncay, R. N., Gürleyen, F., (2003). A Comparative approach on PD and Fuzzy Control of AMB using RCP, *International Electrical Machines and Drives Conference*, 11-16, Wisconsin, USA.
- Hong, S. K., Langari, R., (2000). Robust fuzzy control of a magnetic bearing system subject to harmonic disturbances, *IEEE Transactions on Control System Technology*, **8**, 366-371.
- Hung, J. Y., (1995). Magnetic bearing control using fuzzy logic *IEEE Transactions on Industrial Applications*, **31**, 1492-1497.
- Matsumura, F., Okada, Y., Fujita, M., Namerikawa, T., (1997). State of art of magnetic bearings *JSME International Journal*, **40**, 553-559.
- Şahinkaya, M. N., Hartavi, A. E., Tuncay, R. N., Burrows, C. R., (2004). Bias current optimization and fuzzy controller for magnetic bearings in TMPs, *9th International Symposium on Magnetic Bearings*, 19-24, Lexington, USA.
- Şahinkaya, M. N., Abulrub, A. G., Keogh, P. S., Burrows, C.R., (2005). effective model reduction magnetically levitated flexible rotors including contact dynamics, *ASME 2005 International Design Engineering Technical Conference*, 1-7, Long Beach, USA.
- Yeh, T. J., Chung, Y. J., Wu, C., (2001). Sliding control of magnetic bearing systems, *ASME Journal of Dynamical Systems Measurement and Control*, **123**, 111-117.