

DC ÇEKME İLKESİYLE ÇALIŞAN BİR AKTİF MANYETİK YATAĞIN TASARIMI VE BENZETİMİ

Ahu Ece HARTAVI¹

Özgür ÜSTÜN²

R.Nejat TUNÇAY³

^{1,2,3} Elektrik Mühendisliği Bölümü
Elektrik-Elektronik Fakültesi

İstanbul Teknik Üniversitesi, 80626, Maslak, İstanbul

¹e-posta: hartavi@elk.itu.edu.tr

²e-posta: ustun@elk.itu.edu.tr

³e-posta: tuncay@elk.itu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Manyetik yatak, Sonlu elemanlar analizi, Benzetim

ABSTRACT

This paper presents the design, simulation and control of dc attraction type electromagnetic bearing. Initially, single dimension magnetic model and relevant electrodynamic equations are developed. Later, this model is optimized with FEM analysis. A test model is constructed, and the VisSim™ dynamic model is formed. Finally, the dynamic response of this electromagnetic bearing, which is controlled horizontally is presented for x-axis position control.

1. GİRİŞ

Manyetik yatak sistemleri günümüzde bilim ve teknoloji çevrelerinin üzerinde yoğun olarak çalıştığı konulardan biridir. Manyetik yataklar bir milin veya rotorun manyetik alanının oluşturduğu kuvvetler yardımı ile hiçbir fiziksel temas olmaksızın havada asılı kalmasını sağlayan düzenlerdir. Bu sayede geleneksel yataklama sistemlerinin neden olduğu sürtünme, ısıma, kirlenme gibi olumsuz özelliklerin ortadan kalkmasını sağlarlar [1].

Manyetik yataklar yapısal özellikleri açısından üç ana sınıfta toplanırlar: pasif, aktif ve karma manyetik yataklar. Pasif manyetik yataklarda sürekli mıknatıslar, aktif manyetik yataklarda elektromıknatıslar ve karma manyetik yataklarda ise hem elektromıknatıslar hem de sürekli mıknatıslar birlikte kullanılmaktadır [2].

Manyetik yatak ve askı sistemleri kuramının kurucusu kabul edilen Earnshaw, 1842 yılında yaptığı çalışmada herhangi bir yük yoğunluğunun değişmeyen bir alan tarafından kararlı olarak tutulamayacağını göstermiştir. Buna karşın manyetik yataklarla ilgili çalışmalar 1930'lu yıllarda başlamıştır [3]. Çalışmalar önceleri pasif sistemler üzerine yoğunlaşsa da, problemleri çözmek için aktif sistemlere yönelinmiştir [4]. Ancak etkin denetim

gerektiren aktif manyetik yataklar için, o zaman ki teknoloji yeterli olamamıştır. 1970'lerin ilk yarısından başlayarak patent alımları ve ticari girişimler hız kazanmıştır [4]. Bu girişimlerin sonucu olarak manyetik yatakların uygulama alanları genişlemiştir. Böylece yüksek verimliliğin ve güvenilirliğin önemli olduğu, özellikle uzay uygulamalarında çekici bir hale gelmiştir.

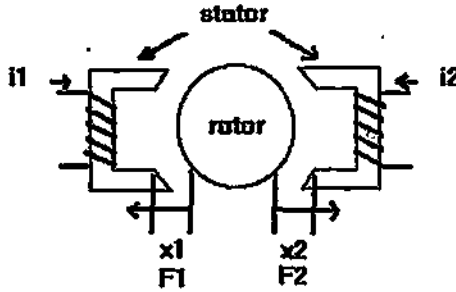
Günümüzde, manyetik yataklar ticari olarak piyasaya sunulmakta ve geliştirme çalışmaları da hız kazanarak sürmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte yeni denetim tekniklerinin uygulamaya geçmesi de gelişimi desteklemektedir. Manyetik yataklar yüksek hızlı elektrik makinaların da, sıvı helyum pompalarında, kompresörlerde, kayıpların en az olmasının istendiği uzay gemileri ve uydular için enerji depolayan sistemlerde, yüksek sıcaklıklara çıkılan ortamlarda ve daha bir çok yerde kullanım alanı bulmaktadırlar [5].

Bu çalışmada aktif manyetik yatağın (AMY) matematiksel modeli verilerek doğrusal olmayan yapısı ortaya konulmuş, bu model yardımı ile sistemin tasarımının hangi parametrelere bağlı olduğu gösterilmiş, tasarım gerçekleştirilmeden önce VisSim™ programı yardımı ile gerçekleştirilen benzetim sonuçları verilmiş ve son olarak gerçekleştirilen AMY'nin Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) sonuçları ve deneysel sonuçlar verilmiştir.

2. AKTİF MANYETİK YATAKLARIN ÇALIŞMA İLKESİ

Bir manyetik yatağın asıl görevi askıda tutulan yapının zorlanmış hareketini istenilen sınırlar dahilinde tutmaktır. AMY'ları pasif sistemlere göre çekici kılan en önemli unsurlar ağır yükleri yüksek sıcaklık gibi çok geniş işletme koşullarında kontrol edebilmeleri ve sadece manyetik yatak görevi

görmeyip aynı zamanda kontrol elektroniği yardımı ile tüm yatak kuvvetlerini ve titreşimlerini izlemeye imkan sağlamalarıdır [6]. Örneğin dönen parçanın durumunu izleyebilir ve kontrolör sayesinde rotorun dengesizliğinin izin verilen sınırlar dahilinde kalması sağlanabilirken motorun ilk yataklanmasında montaja ilişkin problemlerin belirlenmesinde de kullanılabilir [7]. Dünyadaki en büyük manyetik yatak 1300MW'lık bir turbogeneratöre monte edilmiş olup jeneratörün titreşim kontrolünde kullanılmaktadır [8]. Şekil 1 yarıçaplı AMY'nin x-eksenine ilişkin çalışma prensibini göstermektedir.



Şekil 1 Aktif manyetik yatağın x-eksenine ilişkin basitleştirilmiş modeli

Rotorun karşılıklı taraflarında yer alan elektromıknatıslardan i_b akımı geçirildiğinde, elektromanyetik kuvvetler oluşur ve rotor her iki taraftan eşit büyüklükte kuvvetle çekildiği için dengede asılı olarak kalır. Gerçek manyetik yataklarda ise rotor çevresinde her iki eksenindeki hareketi kontrol edebilmek için bir çok elektromıknatıs bulunmaktadır. Sarımların herhangi birinden kontrol edilmemiş bir akım geçtiğinde rotor, akımın olduğu kutba doğru artan bir ivme ile hareket ederek yapışır. Ancak rotor konumu bilinirse sistemin dengede kalması sağlanır. Bu nedenle AMY'lar da geri besleme kontrolüne ihtiyaç duyulur [9]. Dolayısı ile AMY'lar 3 farklı ögeden meydana gelirler. Bunlardan ilki rotor konumunu ölçmeye yarayan duyarga, ikincisi cisme uygulanması gereken kuvveti kontrol eden kontrolör ve üçüncüsü ise cismin dengede kalması için gerekli kuvveti sağlayan elektromekanik aksamdır.

3. DİNAMİK MODEL

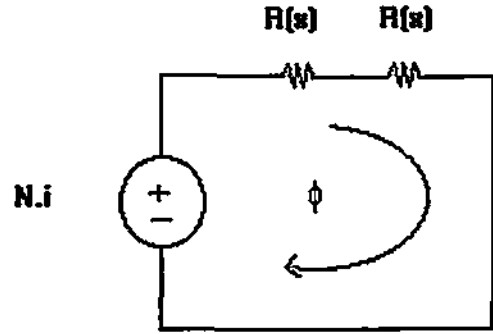
Rotorun x-eksenindeki hareketini Newton'un doğrusal hareket için olan yasasından hareketle

$$m\ddot{x}_1 = F_2 - F_1 \quad (1)$$

denklemini ifade edebiliriz. Denkleminde yer alan F_1 ve F_2 elektromıknatıslar tarafından üretilen kuvvetleri, m ise askıda tutulan cismin kütlesini göstermektedir.

4. MANYETİK KUVVET MODELİ

Sisteme ilişkin manyetik kuvvet modeli Şekil 1'de gösterilen yatağın manyetik eşdeğer devresi yardımı ile gerçekleştirilir. Şekil 2'de x-eksenine ilişkin eşdeğer devre gösterilmiştir. Eşdeğer devre modellenirken ferromanyetik malzemenin geçirgenliğinin havanınkinden çok büyük olması nedeni ile incelemelerde kolaylık sağlaması açısından manyetik alan şiddetinin iki hava aralığında yoğunlaştığı varsayılmıştır.



Şekil 2 X-Eksenine ilişkin manyetik eşdeğer devre

Manyetik yatağın her bir kutup yüzeyine ilişkin kesit alanı A ve havanın geçirgenliği de μ_0 ile ifade edilirse, hava aralığının manyetik direnci

$$R(x) = \frac{x}{\mu_0 \cdot A} \quad (2)$$

denklemini ile ifade edilir. Eşdeğer devreden akan manyetik akı ise

$$\Phi(i, x) = \frac{\odot}{\sum R(x)} \quad (3)$$

ifadesinden bulunabilir. Devreden akan akımın N sarımlı manyetik devrede oluşturduğu halkalama akısı Ψ ise

$$\Psi(i, x) = N \cdot \Phi \quad (4)$$

denklemini ile ifade edilebilir. Elektromıknatısların rotor üzerine uyguladıkları elektromanyetik kuvvet ifadesi de

$$F_e = \frac{\partial W_e(i, x)}{\partial x} \quad (5)$$

denklemini yardımı ile hesaplanabilir. 4 ve 5 numaralı denklemlerden yararlanılarak hava aralığının δ ile

gösterildiği manyetik yatağın x-eksenine ilişkin dinamik modeli

$$m\ddot{x}_1 = k \left[\left(\frac{i_2}{\delta - x_1} \right)^2 - \left(\frac{i_1}{x_1} \right)^2 \right] \quad (6)$$

ifadesi ile gösterilebilir. AMY'nin VisSim™ paket programı yardımı ile benzetimi gerçekleştirilirken Tablo 1'de verilen parametreler ve 6 numaralı denklem kullanılmıştır.

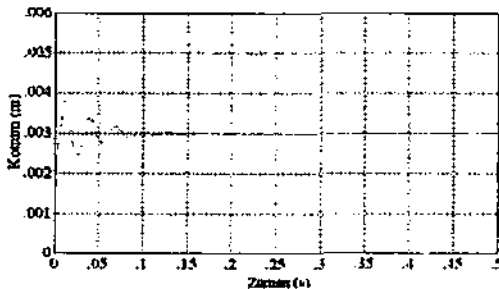
5.BENZETİM MODELİ

Sisteme ilişkin benzetim modelinin kurulmasında Visual Solutions şirketince hazırlanmış sürekli, ayrık, hızlı ve karma sistemlerin modellerini geliştirmede ve dinamik benzetim sonuçlarını bilgisayarda çalıştırmada en kapsamlı modelleme ve benzetim olanaklarına sahip olan VisSim™ paket programı kullanılmıştır.

Tablo-1. AMY'nin modeline ilişkin parametreler

N	Bir kutba ilişkin sarım sayısı	30
l	Sac paketi kalınlığı, m	$15 \cdot 10^{-3}$
A	Kutup yüzeyi kesit alanı, m ²	$1,2 \cdot 10^{-4}$
δ	Hava aralığı, m	$3 \cdot 10^{-3}$
k	Kuvvet katsayısı, Nm ² /A ²	$0,1510^{-6}$
μ_0	Havanın manyetik geçirgenliği, H/m	$4\pi \cdot 10^{-7}$

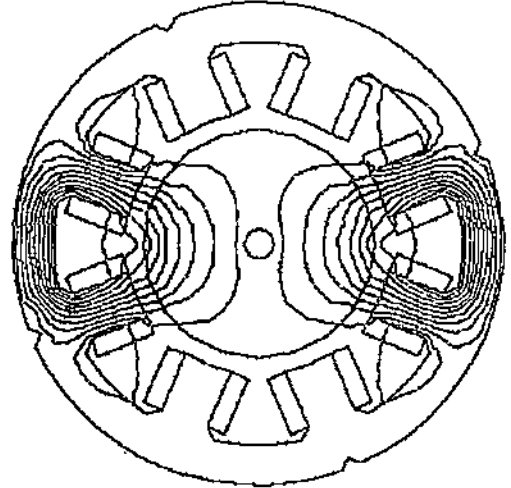
Sisteme ilişkin benzetim modelini gerçekleştirirken sistemin manyetik modelinin yanında AMY'nin doğal olarak kararsız bir yapıya sahip olması nedeni ile kapalı çevrim kontrol sisteminden yararlanılmıştır. Bu çalışmada doğrusal olmayan manyetik yatağın incelenmesinde ve tasarımında en yaygın olarak kullanılan doğrusal kontrol yöntemi olan PD kontrolör kullanılmıştır. Şekil 3'de AMY'a ilişkin PD kontrolörün ve sistemin matematiksel modelinin kullanıldığı kapalı çevrim blok diyagramı gösterilmiştir. Şekil 4'de ise rotorun bozucu bir etki sonucunda bozulan dengenin nasıl tekrar eski konumuna geldiği gösterilmiştir.



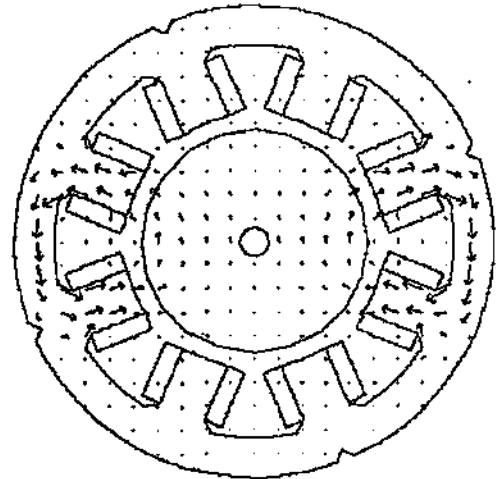
Şekil 4 X-Eksen konum çıkışı

6.AMY'İN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ALAN İNCELEMESİ

AMY'nin SEY yardımı ile incelemesinin de Magnet 5.2 sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. İnceleme, uç etkilerinin göz ardı edilebilecek büyüklükte olduğu kabul edilerek 2 boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, manyetik alan dağılımının incelenmesi manyetik alanın durağan olduğu durum için gerçekleştirilmiştir. Sistemin hem x hem de y-eksenine ilişkin incelenmesi gerçekleştirilmiş olup Şekil 5 ve 6'da sistemin sadece x-eksenine ait akı çizgileri ve akı yönleri gösterilmiştir.



Şekil 5 X-Eksenine ait akı çizgileri

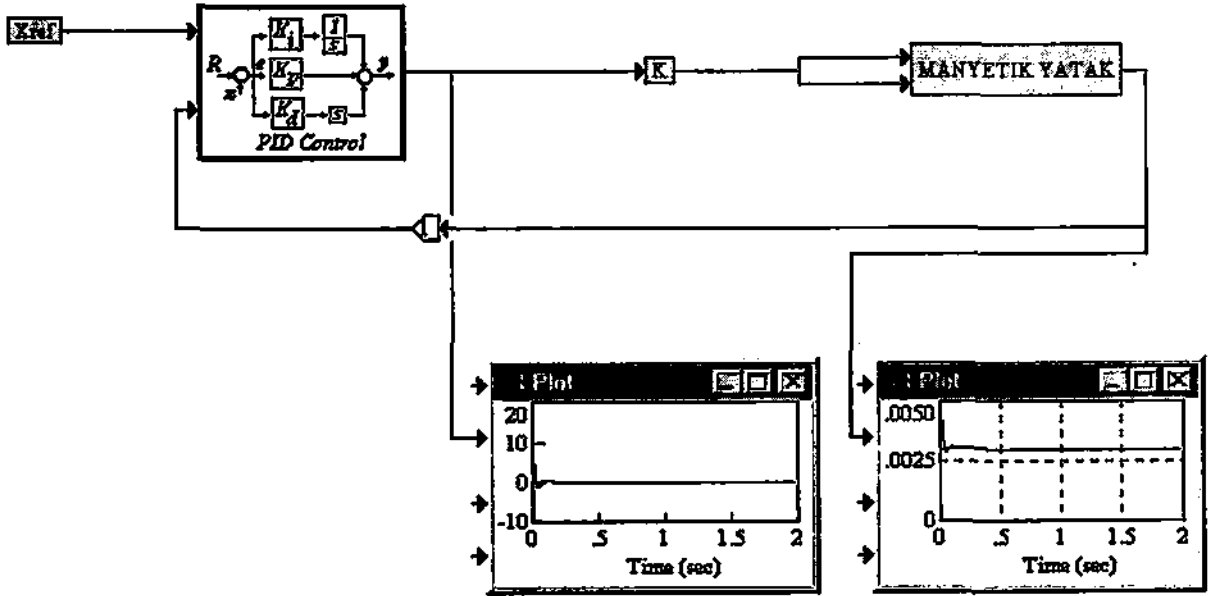


Şekil 6 X-Eksenine ait akı yönleri

AMY'nin x-eksenine ilişkin yapılan incelemelerinden sistemin simetrik bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle, x-ekseninde denge

konumundan pozitif veya negatif x-ekseni yönünde gerçekleşecek bir kaçıklık, bir yönde ki elektromıknatıstan i_c kontrol akımının çıkarılmasına neden olurken diğer taraftaki elektromıknatısa eklenmesine neden olur. X-ekseninde pozitif ve

referans bilgisi ile karşılaştırılır. Böylece kontrolör hata ifadesini düzeltmek için gerekli işareti üretirerek güç elektroniği devresine uygular. Güç elektroniği katında üretilen işaret ise gerekli olan kuvveti üretecek



Şekil 3 X-Eksemi

kapalı çevrim blok diyagramı

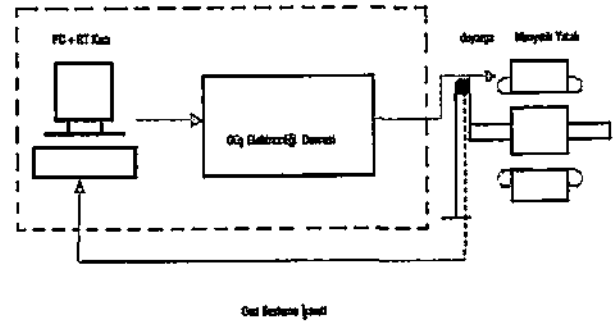
negatif yönde gerçekleşen hareketinin simetrik olması nedeni ile x-ekseni modeli birbirine zıt çalışan kasırlarına benzetilebilir.

7.DENY DÜZENEGİ

AMY'a ilişkin deney düzeneginde 3 öge yer almaktadır. Bunlardan ilki rotor konumunu ölçmede kullanılan duyargadır. Rotor konumunu algılamada endüktif, kapasitif ve optik duyargalardan herhangi biri kullanılabilir. Duyarga seçiminde dikkat edilecek en önemli unsur duyarganın cevabının doğrusal olması ve seçilen cihazın doğru bir şekilde düzeneğe tespit edilmesidir. Aksi takdirde duyarga konumunun yanlış algılanmasına neden olur. İkinci öge alınan ölçüm bilgilerine göre gereken kuvveti kontrol eden kontrolördür. Sistem için duyarga seçiminde olduğu gibi çok farklı kontrol yöntemleri uygulanabilir. Gerçekleştirilen deney düzeneginde ise doğrusal kontrol sistemlerinden olan PD kontrolör kullanılmıştır. Sistemde kullanılan üçüncü öge ise rotorun dengede kalmasını sağlayacak olan elektromekanik yapıdır. Şekil 7'de AMY'a ilişkin deney düzeneginin ilke şeması gösterilmiştir.

Sistemin kontrolü için duyargadan alınan geri besleme işareti ana denetim bilgisayarda yer alan denetleyiciye girilir. Konum bilgisi burada VisSim programında gerçekleştirilen kontrol devresindeki

işaret bilgisini elektromıknatıslara uygulayarak rotorun dengede kalmasını sağlar.



Şekil 7 Aktif manyetik yatağın ilke şeması

8.SONUÇLAR

Bu çalışmada, mekanik sistemlerde kullanılan alışlagelmiş yatak türlerinin enerji kaybı, ömür ve güvenilirlik gibi çeşitli açılardan olumsuzluklarının kendini daha etkin bir şekilde hissettirdiği yüksek hız uygulamaları ve özel uygulamalarda tercih edilen aktif manyetik yatağın matematiksel modeli geliştirilmiş, bu model yardımı ile VisSim ortamında benzetim modeli elde edilmiştir. Tasarlanan yapının SEY ile gerçekleştirilen inceleme sonuçları verilmiş böylece

manyetik yapı eniyileştirilmiştir. Sistemin kararsız yapısı nedeni ile kullanılan kontrolör ile birlikte düzeneğin kontrol modeli ortaya konulmuştur. Özellikle benzetim sonuçlarından, manyetik yatak performansının denge konumu civarında oldukça iyi olduğu ancak sistemin belirlenen aralıktan uzaklaştığı durumda dengenin nasıl bozulduğu ve kontrol parametrelerinin önemi gözlemlenmiştir. Magnet 5.2 paket programı yardımı ile gerçekleştirilen iki boyutlu manyetik alan incelemesi ise tasarımın doğruluğunu ortaya koymuştur.

TEŞEKKÜR

Yazarlar manyetik yatak tasarımında gösterdikleri yardımlar nedeni ile Senur A.Ş.'ye, Makasan Makine Kalıp San.'ne, Aksan Kalıp San. ve T.A.Ş.'ye ve Yeni Yurt San.Tic.Ltd.Şti'ye teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] Jones G., Magnetic Bearings Promise Reduced Operation And Maintenance Costs, NUCLEAR ENGINEERING INTERNATIONAL, pp 67-68, 1990.
- [2] Delamare J., Rulliere E., Yonnet J.P., Classification and Synthesis of Permanent Magnet Bearing Configurations, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 31, pp 4190-4192, 1995.
- [3] Hung J.Y., Magnetic Bearing Control Using Fuzzy Logic, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol. 31, pp 1492-1497, 1995.
- [4] Yonnet J.P., Passive Magnetic Bearings With Permanent Magnets, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 14, pp. 803-805, 1978.
- [5] Harvey M.E., Magnetic Bearing Synthesis For Rotating Machinery, Ph.D Thesis, UNIVERSITY OF VIRGINIA, 1991.
- [6] Habermann H., Liard G.L., Practical Magnetic Bearings, IEEE SPECTRUM, pp. 26-30, 1979.
- [7] Matsumura F., Okada Y., Fujita M., Namerikawa T., State of the Art of Magnetic Bearings, JSME INTERNATIONAL JOURNAL, Vol. 40, pp. 553-559, 1997.
- [8] Antila M., Lantto E., Arkkio A., Determination of Forces and Linearized Parameters of Radial Active Magnetic Bearings By Finite Element Technique, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 34, pp. 684-694, 1998.
- [9] Antila M., Arkkio A., Lantto E., Jokinen T., Active Magnetic Bearings For High-Speed Electric Machines, 3rd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED ELECTROMECHANICAL MOTION SYSTEMS, pp. 959-964, 1999.