

FARKLI YAPIDAKİ RADYAL MANYETİK YATAK SİSTEMLERİNİN İKİ BOYUTLU STATİK MANYETİK ANALİZİ

Yusuf ÖNER,* Ahmet ALTINTAŞ**

*Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elk.-Elt. Mühendisliği Bölümü, 20017/Kınıklı/Denizli

**Dumlupınar Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü, Simav/Kütahya

Geliş Tarihi : 01.03.2005

ÖZET

Sürtünme kayıpları, diğer dönel makinalarda olduğu gibi elektrik makinalarında da önemli bir problemdir. Ayrıca, sürtünme kayıplarının olduğu yataklar periyodik aralıklarla yağlanmaya ve bakıma ihtiyaç duyarlar. Bu çalışmada, elektrik motorunun sürtünme kayıplarını azaltmak için, farklı yapıya sahip radyal manyetik yatak sistemlerinin iki boyutlu statik manyetik analizi yapılmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır; ayrıca, dört kutba sahip manyetik yatak sistemi gerçekleştirilmiş ve bir asenkron motora uygulanmıştır. Simülasyonlarda, tasarlanan manyetik yatak sistemi tarafından asenkron motorun rotoruna uygulanan kuvvetler, FEMM yazılım paketi kullanan bir bilgisayar yardımıyla hesaplanmıştır. Uygulamada, manyetik yatak sistemi ile mekanik yatak sistemi 350 d/d'lık hızlara kadar karşılaştırıldığında; manyetik yataklı sistemin, asenkron motorun yüksüz çalışma kayıplarını % 15 dolaylarında azalttığı gözlenmiştir. Buna ek olarak, motorun mekanik gürültüsü de önemli derecede azalmıştır.

Anahtar Kelimeler : Manyetik yatak, 2D manyetik analiz, Asenkron motor

TWO DIMENTIONAL STATIC MAGNETIC ANALYSIS OF RADIAL MAGNETIC BEARING SYSTEMS WITH DIFFERENT STRUCTURES

ABSTRACT

The friction loss of electrical machines is an important problem as like in other rotary machines. In addition, the bearings, where the friction losses occur, also require lubrication at periodic intervals and need to be maintained. In this study, to minimize the friction loss of electrical motor, two dimensional static magnetic analysis of radial magnetic bearing systems with different structures are performed and compared with each other; also, magnetic bearing system with four-pole is realized and applied to an induction motor. In simulation, the forces applied to the rotor of induction motor from designed magnetic bearing system are calculated in a computer by using FEMM software package. In application, when comparing designed magnetic bearing system with mechanical bearings up to the revolution of 350 rpm, it was observed that the loss of no-load operating condition of induction motor is decreased about 15 % with magnetic bearing system. In addition to this, mechanical noisy of the motor is also decreased considerably.

Key Words : Magnetic bearing, 2D magnetic analysis, Induction motor

1. GİRİŞ

Manyetik yataklar, bazı yüksek performanslı turbo makine uygulamalarında ince sıvı tabanlı kayma

yataklarla veya bilyeli elemanlarla kullanılmaktadır. Bu özel uygulamalar yanıcı sıvı pompaları, enerji depolama ve yüksek güvenilirlikli pompa ve kompresör uygulamalarını kapsamaktadır.

Manyetik yataklar birkaç avantaj sağlamaktadır. Manyetik yataklarda mekanik kontakların bulunmamasından dolayı mekanik sürtünme kayıpları ortadan kaldırılmıştır; ek olarak, mekanik bir aşınma olmayacağı için sistemin güvenilirliği artırılmıştır. Sürtünme kayıplarının ortadan kaldırılması doğal olarak motor performansını da olumlu yönde etkileyecektir (Maslen, 1999).

Manyetik yataklar, diğer yataklama sistemlerinden farklı olarak, yatak içine konulan mili havada asılı tutarlar. Mekaniksel etkilere maruz kalmadıklarından her türlü alanlarda rahatlıkla kullanılmaya açık olan bu sistemlere, elektrik ve mekanik mühendisliğin ortak çalışma konusu olarak bakılmaktadır. Yataklarda kullanılan malzeme ve denge sistemleri için yapılan analizler makine mühendisliğinin, yatağı kontrol altında tutan ve çalışmasını her durumda denetleyen kontrol sistemlerinin tasarımını da elektrik mühendisliğinin ilgi alanını girmektedir.

Açık döngü kontrol sistemine sahip manyetik yataklar genellikle kararsızdırlar ve yatağın kararlı hale gelmesi için aktif elektronik geri beslemeye ihtiyaç duyulur. Bununla beraber, manyetik yatakların esnek dinamik tepkisini elde edebilmek için uygun bir geri besleme kontrolü gerekmektedir. Değişken kontrol kazançları ve stratejileri tarafından, yatakların arzu edilen kapalı döngü karakteristikleri elde edilebilir (Meeker, 1995)

Kontrollü DC elektromıknatis düzeneklerini kullanan manyetik süspansiyon sistemleri, manyetik yatak uygulamalarında artan bir şekilde kullanılmaktadır. Uygulama alanlarına, yüksek hızlı rotorlar, tehlikeli ortamlar ve giriş zorluğu olan kapalı pompalar örnek verilebilir. Her bir durum için yatakların güvenilirliği en öncelikli konudur (Jayawant et al., 1995).

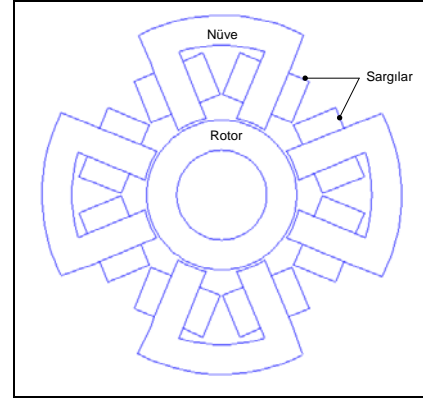
Manyetik yatakların kontrolü üzerine yapılan çalışmalar, sensörlü kontrol sistemleri ve sensörsüz kontrol sistemleri olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Sensörlü kontrol sistemlerinde DC elektromıknatisler, optik dönüştürücüler ve kompanzasyon devreleri ile kontrol edilmektedir. Sensörsüz kontrol sistemleri de kendi arasında iki gruba ayrılabilir; birinci grupta, hava aralığına bağlı endüktans değişiminin belirlenmesinde yüksek frekanslı sinyalin demodülasyonu kullanılır; ikinci grupta ise, gözlemlenebilirlik ve kontrol edilebilirlik mantığı kullanılmaktadır (Vischer and Bleuler, 1993); burada, regüleli gerilim sistem girişi olarak ve elektromıknatis akımı sistem çıkışı olarak kabul edilip, sistemin hem kontrol edilebilirlik hem de gözlemlenebilirlik matrisi elde edilerek lineer

kontrolcü tasarımı gerçekleştirilir.

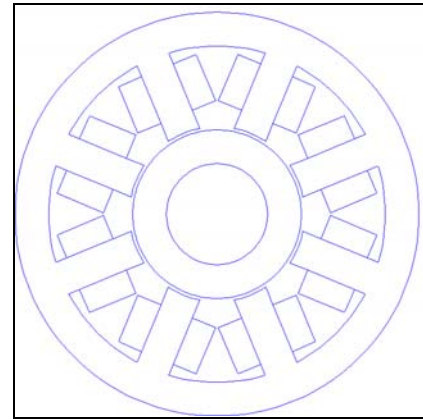
Çağdaş bir manyetik süspansiyon sistemini üç önemli özelliğe sahiptir. Birincisi, hava aralığındaki kuvvet-uzaklık karakteristiklerinde sistemin doğası gereği oluşan kararsızlık durumları, geri besleme yapısı ile kararlı şekle dönüştürülür. İkincisi, sistemdeki esneklik ve sönüm birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilir. Üçüncüsü, kontrolör bir PID kontrol işlemi yaparak sistem düşük frekanstaki kuvvet bozulmalarında iyi bir dinamik tepki verir ve statik yüklerde pozisyon hatası vermez (Jayawant et al., 1995).

2. MANYETİK YATAK GEOMETRİSİ

Tipik bir manyetik yatak düzeneği en basit şekliyle dört adet U biçimli elektromıknatisden oluşmaktadır. Bu konfigürasyon Şekil 1’de verilmiştir. Dört adet elektromıknatis, bir daire çevresine belirli açılarla yerleştirilmiştir; her bir elektromıknatis, demir rotor üzerine bir kuvvet uygulayarak milin havada kalmasını sağlamaktadır (Meeker, 1996).



Şekil 1. Tipik bir manyetik yatak düzeneği,



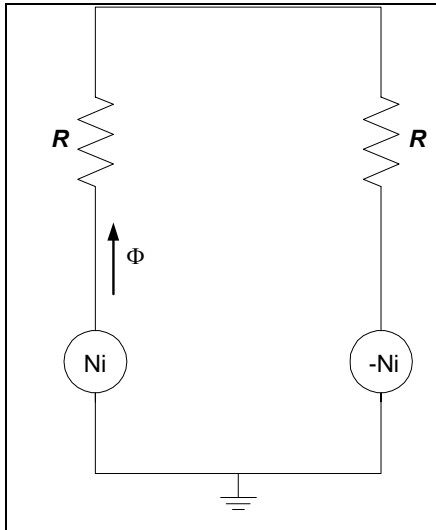
Şekil 2. Sekiz kutuplu manyetik yatak

U biçimli elektromıknatısların yapısal imalatı güç olduğu için yapı demirle birleştirilerek Şekil 2'deki geometri elde edilmiştir. Şekil 2'de görülen manyetik yatakta her bir nüve bacağı çevresine N sipirli bir sargı sarılmıştır.

3. AKI DAĞILIMI VE KUVVET TEORİSİ

Sekiz kutuplu manyetik yatak, manyetik devre teorisi yoluyla analiz edilebilir. Manyetik devrede akı yolunda bulunan demir parçalardaki küçük relüktans, sızıntı ve saçaklanmalar ihmal edilebilir (Meeker, 1995).

Şekil 3'e bakıldığında kaynaklar ve dirençlerden oluşan basit bir elektrik devresi görülmektedir. Bu devre U biçimli elektromıknatısın manyetik devre modelidir;



Şekil 3. U biçimli yatağın manyetik devresi

burada, akıya karşılık Φ akısı ve dirence karşılık relüktans R kullanılmıştır. Gerilim kaynağı yerine manyeto motor kuvvet (mmf) kaynağı Ni ve $-Ni$ kullanılmıştır. Bu ifadeler yatağın geometrik terimleri ile ifade edilecek olursa, relüktans:

$$\mathfrak{R} = \frac{g}{\mu_0 a} \quad (1)$$

Burada g , rotor ile manyetik yatağın her bir kolu arasındaki hava aralığını; a , her bir kolun alanı ve μ_0 , havanın geçirgenliği ($1.2566e^{-6}$ Tesla Metre/Amp) temsil etmektedir. Devrede akı için çözüm yapılırsa:

$$\phi = \frac{Ni}{\mathfrak{R}} = \frac{\mu_0 a Ni}{g} \quad (2)$$

Hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğu B :

$$B = \frac{\mu_0 Ni}{g} \quad (3)$$

Kuvvet hesaplamasında Maxwell stress tensor formülasyonu kullanılabilir. Her bir U biçimli elektromıknatısın kollarında oluşan kuvvete bakılacak olursa:

$$F = \frac{B^2 a}{\mu_0} \quad (4)$$

Akı yoğunluğu B , Eş. 4'te yerine konulacak olursa:

$$F = \frac{\mu_0 a N^2 i^2}{g^2} \quad (5)$$

Buna ek olarak, yataktaki her bir kol için akı yoğunluğu bulunabilir. Nüve malzemesinin doyması B_{sat} şeklinde gösterilebilir (Maslen, 1999). Yatak geometrisinde üretilebilen maksimum kuvvet ise:

$$F_{max} = \frac{B_{sat}^2 a}{\mu_0} \quad (6)$$

Maksimum akım bulunacak olursa:

$$I_{max} = \frac{B_{sat} g}{N \mu_0} \quad (7)$$

U biçimli elektromıknatısın bir kolunun endüktansı:

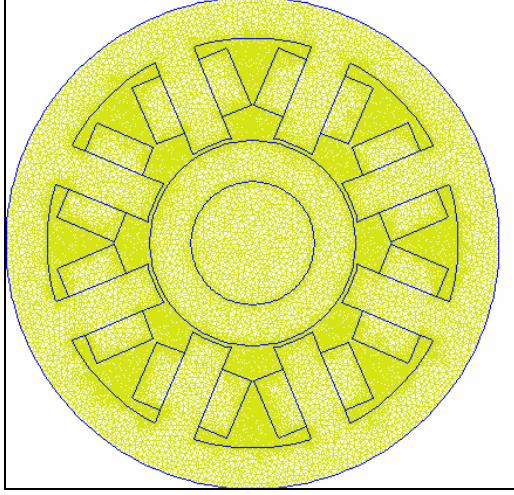
$$L = \frac{2N^2 \mu_0 a}{g} \quad (8)$$

4. FARKLI YAPIDAKİ MANYETİK YATAKLAR VE SİMÜLASYONLARI

Farklı manyetik yatak tasarımları, sonlu elemanlar metodunu (FEM) kullanan manyetik analiz programı ile analiz edilmiş ve tasarımların oluşturdukları akılar ve kuvvetler hesaplanmıştır. Farklı yapılardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

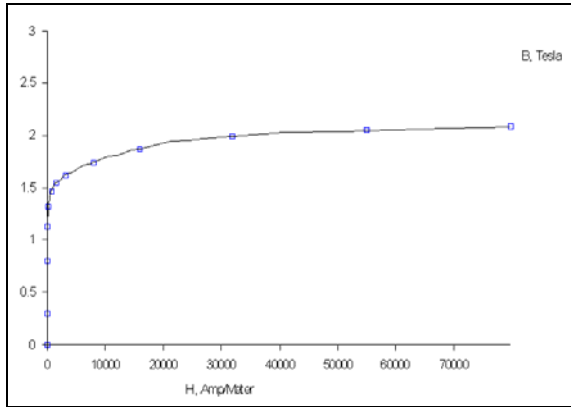
4. 1. Sekiz Kutuplu Manyetik Yatak

Şekil 4'te sekiz kutuplu manyetik yatağın geometrik yapısı ve mesh yapılmış hali görülmektedir. Sekiz kutup üzerine 80 sipirlik sargılar yerleştirilmiştir. Böylece sargıların oluşturacakları kuvvetlerin dengeli olması sağlanmıştır.



Şekil 4. Sekiz kutuplu manyetik yatak geometrisi ve mesh yapılmış hali

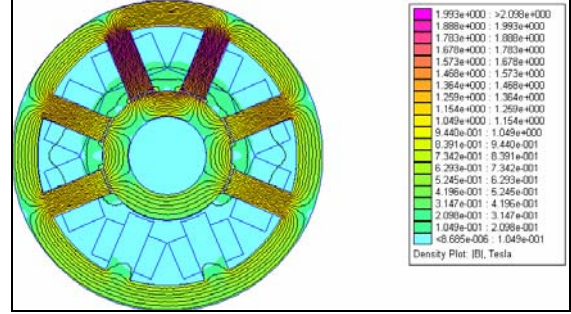
Sekiz kutuplu manyetik yatağın statoru ve rotoru M-19 çeliğinden imal edilmiştir. M-19 laminasyonlu çelik malzeme, lineer olmayan bir B-H eğrisine sahiptir. 2 Tesla civarında doyuma ulaşmaktadır. Manyetik analiz yapılırken doyuma değeri dikkate alınarak çözüm yapılmalıdır. M-19 laminasyonlu çeliğin B-H eğrisi Şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 5. M-19 Laminasyonlu çeliğin B-H eğrisi

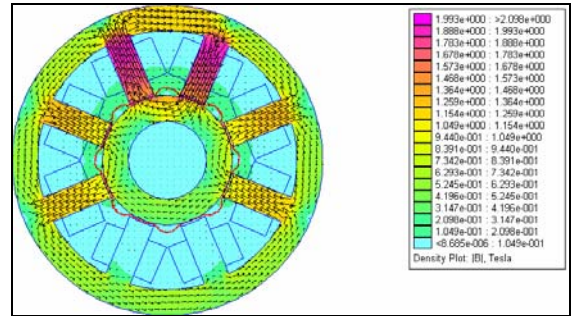
Manyetik yatağın üst sargısına maksimum akım değeri uygulanmıştır; bu sargı, dikey yöndeki kuvveti oluşturan sargıdır. Alt sargıya enerji verilmemiştir. Yan sargılar ise maksimum akımın yarısı ile enerjilendirilmiştir. Böylece Şekil 6'da

görülen dengeli akı dağılımı elde edilmiştir. Şekil incelenecek olursa, akının tamamının stator gövdesi üzerinden devresini tamamladığı açıkça görülmektedir. Stator kutuplarının uçlarında çok fazla saçaklanma meydana gelmemiştir.



Şekil 6. Sekiz kutuplu manyetik yatağın B manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Sekiz kutuplu manyetik yatakta rotor üzerine uygulanan dikey kuvvet 213 N dur. Manyetik yatağın üstünde bulunan ve maksimum akım değeri uygulanan sargıların oluşturdukları çekme kuvveti böylece bulunmuş olur. Yanlardaki sargıların oluşturdukları kuvvetler ise bir birine eşit ve ters yönlüdür. Bu sargıların oluşturdukları kuvvetler yatay kuvvetlerdir. Şekil 7'de manyetik akı yoğunluğu B'nin vektörel dağılımı verilmiştir.

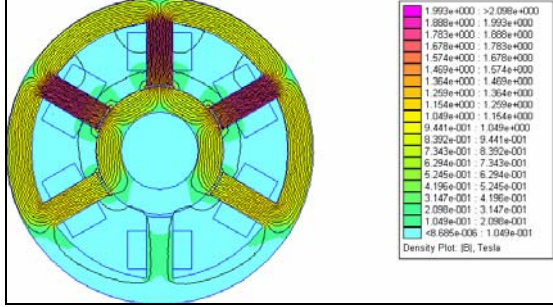


Şekil 7. Sekiz kutuplu manyetik yatakta B manyetik akı yoğunluğunun vektörel dağılımı

4. 2. Altı Kutuplu Manyetik Yatak

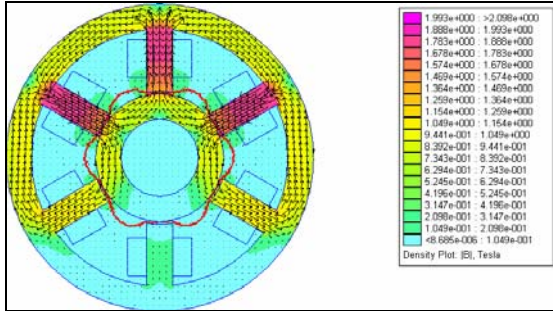
Altı kutuplu manyetik yatak tasarımında stator kol sayısı altıya indirilmiştir. Stator kollarının eksenleri arasında 60°'lik bir açı mevcuttur. Stator kollarının yüzey alanları analizleri kıyaslama açısından aynı seçilmiştir. Sargı sipir sayıları da yine 80 sipir olarak seçilmiştir. Altı kutuplu manyetik yatak sargılarından üst üç sargıya maksimum akım değeri, diğer sargılardan yan bölgede bulunanlara maksimum akım değerinin yarısı ve alt sargıya ise hiç bir akım uygulanmamıştır. Şekil 8'de görüleceği

üzere dengeli bir B manyetik akı yoğunluğu elde edilmiştir. Üst üç sargıya maksimum akım uygulandığından, bu kollarda oluşan eşit akı yoğunluğu kolaylıkla görülmektedir.



Şekil 8. Altı kutuplu manyetik yatağın B manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Altı kutuplu manyetik yatak rotoru üzerine uygulanan kuvvet, uygun bir kontur çizilerek hesaplanacak olursa sargıların dikey yöndeki bileşke kuvvetleri 143 N bulunur. Altı kutuplu manyetik yatak statorunun üzerindeki manyetik akı yoğunluğu B 'nin vektörel dağılımı Şekil 9'da verilmiştir.

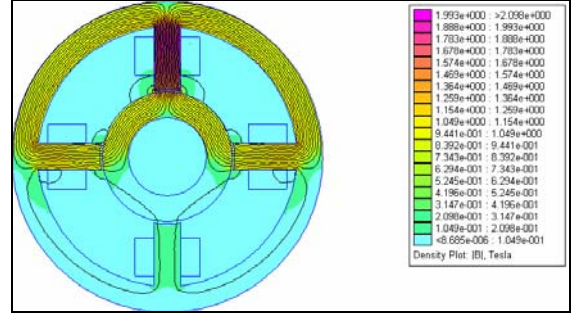


Şekil 9. Altı kutuplu manyetik yatakta B manyetik akı yoğunluğunun vektörel dağılımı

4. 3. Dört Kutuplu Manyetik Yatak

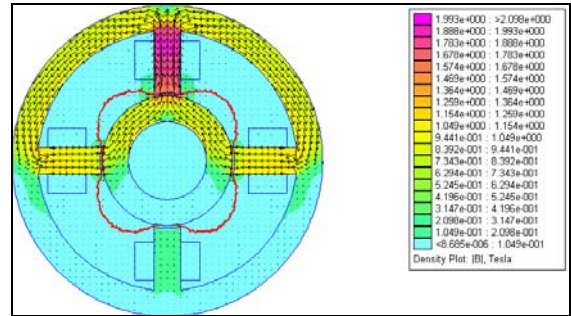
Dört kutuplu manyetik yatak tasarımında stator kol sayısı dörde indirilmiş ve kol eksenleri arasında 90° 'lik bir açı bırakılmıştır. Sargıların sipir sayıları bir önceki uygulamalar ile aynı seçilmiştir. Stator ve rotor çapları, rotor ile stator kutupları arasındaki hava aralığı da değiştirilmemiştir. Şekil 10'da dört kutuplu manyetik yatağın B manyetik akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Statorun üst kutup sargısına maksimum akım, yan sargılara ise maksimum akım değerinin yarısı uygulanmıştır. Alt sargıdan bir akım geçişi yoktur. Akı çizgilerinin büyük bir çoğunluğu stator üzerinden manyetik devresini tamamlamaktadır. Havadan dolaşan kaçak akıların miktarı oldukça düşüktür. Kutuplar ile rotor

arasında, yani hava aralığında fazla bir akı saçaklanması gözlenmemiştir (Öner, 1998)



Şekil 10. Dört kutuplu manyetik yatağın B manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Dört kutuplu manyetik yatak rotoru üzerine uygulanan kuvvet uygun bir kontur çizilerek hesaplanacak olursa üst sargının uyguladığı çekme kuvveti 79 N bulunur. Şekil 11'de dört kutuplu manyetik yatağın B manyetik akı yoğunluğunun vektörel dağılımını verilmiştir.



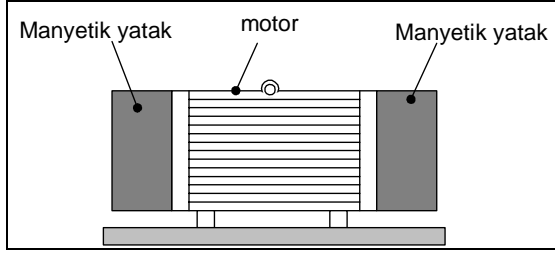
Şekil 11. Dört kutuplu manyetik yatakta B manyetik akı yoğunluğunun vektörel dağılımı

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yukarıda manyetik analizleri yapılan farklı yapılardan en iyi performans sekiz kutuplu manyetik yatakta ortaya çıkmıştır. Fakat uygulamanın yapım kolaylığından dolayı dört kutuplu manyetik yatağın uygulaması yapılmıştır. Dört kutuplu manyetik yatak tasarımı üç fazlı bir asenkron motora monte edilmiş ve asenkron motor rotoru yataklanmıştır (Öner, 1998).

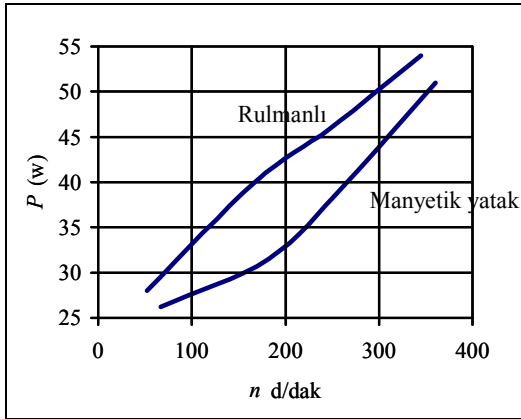
Prototip yatak düzeneği, 350 dev/dak'lık hızlara kadar mekanik ve manyetik yataklar arasında iyi bir karşılaştırma özelliğine sahiptir. Manyetik yatakta asenkron motorun boşa çalışma güç kayıplarında % 15'lik bir azalma gözlenmiştir. Motorun gürültüsü

de oldukça düşük bir seviyeye inmiştir. Her iki duruma ait eğriler Şekil 13’de görülmektedir (Öner, 1998a).



Şekil 12. Manyetik yatakların motora yerleştirilmesi

Yukarıdaki analizlerde görüleceği üzere, sekiz kutuplu manyetik yatak ideal olarak kullanılabilen bir yatak geometrisi olarak göze çarpmaktadır. Tasarımı yapılan prototipte, boşta çalışma güç kayıplarındaki azalma dikkate alınacak olursa, sekiz kutuplu manyetik yatakta sürtünme kayıplarındaki azalmanın daha fazla olması beklenir.



Şekil 13. Rulmanlı ve manyetik yatağa ait devir sayısı ve boşta çalışma gücü değişimi eğrileri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yüksek hızlı rotorlar, tehlikeli ortamlar ve giriş zorluğu olan kapalı pompalar gibi uygulama alanları olan manyetik süspansiyonlu yatak sisteminin manyetik analizleri yapılmış ve bir prototipi tasarlanmıştır. Deneysel çalışmalarda 3 fazlı bir asenkron motorun mekanik yatağından dolayı oluşan sürtünme kayıplarını ve yatak gürültüsünü en aza indirmek için rotor, manyetik yastıklı yataklar üzerine yerleştirilmiş ve yastıklama

işlemini sağlayan elektromekanik düzenek ise algılama elemanları ile PD kompanzasyon devresinden oluşan bir elektronik devre ile kontrol edilmiştir (Öner, 1998a).

Sistem 350 dev/dak’lık hızlarda mekanik ve manyetik yataklar arasında iyi bir karşılaştırma özelliğine sahiptir. Manyetik yatakta boşta çalışma güç kayıplarında %15’lik bir azalma gözlenmiştir. Motorun gürültüsü de düşük bir seviyeye inmiştir (Öner, 1998a).

Prototip sistemde iki boyutlu radyal yataklama yapılmıştır. Bazı durumlarda sallantı ve eksenel hareketlerin oluşturduğu kararsızlığı engellemek için ek bir radyal yataklamaya ihtiyaç duyulabilir.

7. KAYNAKLAR

Jayawant, B.V., Whorlow, R. J., Dawson, B. E. 1995. “New Transducerless Magnetic Suspension System” IEE Proc-Scie. Meas. Technol., 142. (3), May.

Maslen, E. H. 1999. “Magnetic Bearing” Graduate seminar, University of Virginia Department of Mechanical, Aerospace, and Nuclear Engineering.

Meeker, D.C. and Maslen, E. H. 1995. “Fault Tolerance of Magnetic Bearings by Generalized Bias Current Linearization” IEEE Transactions on Magnetic, MAG-31 (3): 2304-2314.

Meeker, D. C. and Maslen, E. H. 1996. “Power Optimal Solution of the Magnetic Inverse Problem For Heteropolar Magnetic Bearing” **Fifth International Symposium on Magnetic Bearings**, Kanazawa, Japan, Aug.

Öner, Y. 1998. “Üç Fazlı Bir Asenkron Motorda Manyetik Süspansiyonlu Yatak Uygulaması” Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fak. Mühendislik Bilimleri Dergisi. 4 (3), 759-766.

Öner, Y. 1998a. “Üç Fazlı Asenkron Motorda Manyetik Süspansiyonlu Yatak Tasarımı ve Uygulaması” Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniv., Fen Bil. Enst.

Vischer, D. and Bleuler, H. 1993. “Self Sensing Active Magnetic Levitation” Transactions on Magnetic, IEEE 29, pp.1276-1281.