

Manyetik Yatakların Manyetik Devre ve 2B Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi ve Tasarımı

Modelling and Design of Magnetic Bearings Based on Magnetic Circuit and 2D Finite Element Analysis

Mehmet Güleç, Metin Aydın

Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Kocaeli Üniversitesi

mehmet.gulec@kocaeli.edu.tr, metin.aydin@kocaeli.edu.tr

Özet

Bu çalışma günümüzün popüler konularından olan manyetik yataklar üzerine yapılmıştır. Manyetik yataklar tıpkı bir elektrik motoru gibi çalışır ve çalışma mantıkları da elektrik motorları gibi manyetik esaslara dayanmaktadır. Bu çalışmadaki amaç manyetik yatakların manyetik devre temelli modellenmesiyle analitik çözümlerini çıkarmak ve sonlu elemanlar analizi (SEA) ile elde edilen çözümleri analitik çözümler ile karşılaştırmaktır. Bu sayede hem manyetik devre modelinin doğruluğu hem de kullanılan SEA paket programının güvenilirliği test edilecektir.

Abstract

This study focus on magnetic bearing which is one of the most attractive research topics. Magnetic bearings works like an electric machine and its principles based on magnetism. Goal of this project is figure out modelling and design of magnetic bearing based on magnetic circuit and 2D finite element method and comparison the results of solutions in analitic and FEA. So that modelling based on magnetic circuit and finite element method is tested for the confidence to these models.

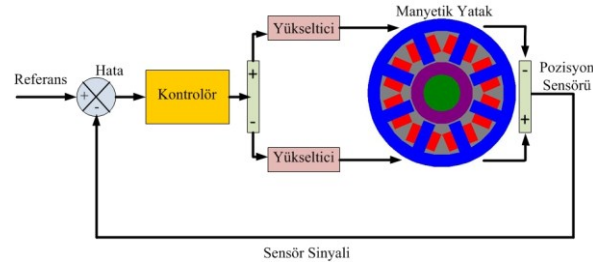
1. Giriş

Kuşkusuz günümüzün en ilginç araştırma konularından bir tanesi manyetik yataklardır. 1982 yılında geliştirilen ve üç yıl sonra bir gaz kompresörüne uygulanan ilk manyetik yataktan bu yana günümüze kadar manyetik yatak konusunda birçok araştırma yapılmış ve bu araştırmaların sonucunda manyetik yataklar pekçok farklı alana uygulanmışlardır. Manyetik yatak fiziksel bir bağlantı olmadan motor milini istenilen deplasmanda tutan ve gerektiğinde 3 boyutlu bir çalışma uzayında hareket ettiren bir sistemdir. Manyetik yataklar, klasik yatakların aksine herhangi bir fiziksel temas barındırmadıklarından dolayı konvansiyonel yatakların dezavantajlarını barındırmazlar. Motor mili herhangi bir mekaniksel sürtünmeye ve yağlanmaya maruz kalmadığından dolayı manyetik yataklama sayesinde çok yüksek hızlara sessiz çalışma koşullarında rahatlıkla ulaşabilir. Manyetik yataklar motor milinin başka bir tahrik kaynağı ile döndürülmesi üzerine dengede tutulur. Manyetik yatak tam bir mekatronik uygulamadır. Yataklarda kullanılan malzeme ve bunlar için yapılan statik ve termal analizler mekanik kısmını, manyetik yatağın tasarımı elektrik kısmını, yataklamayı kontrol altında tutan ve denetleyen kontrol

sistemleride elektronik kısmını oluşturmaktadır. Manyetik yataklar elektrik motorlarına benzer elektromanyetik esaslara dayanan bir çalışma prensiplerine göre çalışmaktadır.

Manyetik yataklar elektrik motorları ile aynı benzer bir yapıya sahiptirler. Manyetik yataklardaki elektromıknatıslar rotoru kendilerine göre çekmek suretiyle dengede tutarlar. Bu dengenin sağlanması için manyetik yataklara rotorun ve milin pozisyon bilgisinin eksiksiz ve hızlı bir biçimde aktarılması gerekmektedir. Manyetik yataklardaki kontrolün en temel aracı rotor pozisyonu ile iletişim kurulması ve bu iletişimin istenildiği gibi düzenlenmesidir.

Şekil 1’de manyetik yatağa ait blok diagramı gösterilmiştir. Bu iletişim sayesinde mili etkileyen kuvvetin ayarlanması ve bu sayede milin istenilen konumda tutulması sağlanır. Milin denge durumu kontrol altında tutmak için motorun konumunu algılayan çok hassas kapasitif veya endüktif sensörler kullanılmaktadır. Sensörler mil ile manyetik yatak arasındaki hava aralığındaki değişimleri algıyarak kontrolöre bu deplasman bilgisini gönderir. Bu bilgiler sayesinde kontrolör milin istenilen pozisyona gelmebilmesi için gerekli kuvvet değerini uygular. Kısaca kontrol edilmesi manyetik yatağa mil deplasman bilgisinin geri iletilmesi oluşur.



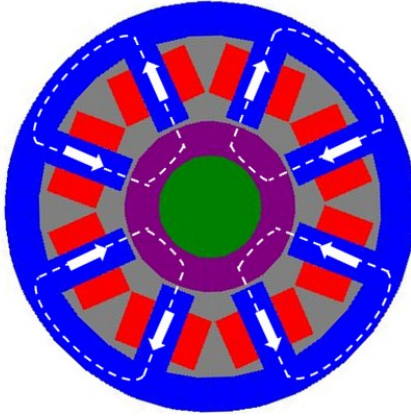
Şekil 1: Manyetik yatak blok diagramı

Manyetik yataklarda titreşim yok denecek kadar azdır ve bu yüzden çok sessiz bir şekilde çalışırlar. Mekanik bağlantı olmaması ve buna bağlı bakım masraflarının olmaması ve uzun süre bakım olmadan kullanabilir olmaları manyetik yatakların en büyük avantajlarındandır. Manyetik yatağın maliyetinin çok fazla olması, karmaşık bir yapıya sahip olması ve ilk denge konumuna alınmasının zahmetli ve uzun bir iş olması ise manyetik yatakların dezavantajları arasında gösterilebilir [1-6].

2. Manyetik Yatakların Manyetik Devre ile Modellenmesi

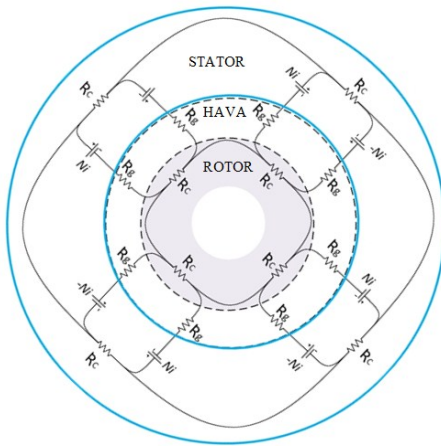
2.1. Tam Manyetik Devre ile Modellenmesi

Manyetik yatakların manyetik devre ile modellenmesi ve eşdeğer devresinin çıkartılması manyetik yatak tasarımı kısmının en önemli kısımlarından biridir. Bu kısımda konvansiyonel bir manyetik yatağın tam eşdeğer devresinin çıkartılması ve aktif bir manyetik yatağa ait akım-kuvvet değerlerinin çıkartılması amaçlanmıştır. Şekil 2’de klasik bir radyal manyetik yatağın kesit görüntüsü ve akı yolları gösterilmiştir. Bu çalışmada Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL) Üniversitesinde 2006 yılında Luc Burdet tarafından yapılan doktora çalışmasında üretilen bir manyetik yatak referans alınarak manyetik modelleme yapılmış ve sonlu elemanlar analizleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır [7]. Şekil 2’de görüldüğü üzere konvansiyonel manyetik yatak toplam 4 kutup çiftinden meydana gelmektedir ve bu elektromıknatıslar mili x ve y eksenlerinde dengede tutmaya çalışılır.



Şekil 2: Manyetik yatağın kesit görüntüsü

Manyetik yatağa ait manyetik eşdeğer devre Şekil 3’de gösterilmiştir. R_g hava aralığının relüktansını, R_c stator ve rotor çekirdeğinin relüktanslarını ve N_i ise sarımların oluşturduğu manyetomotor kuvvetini temsil etmektedir.

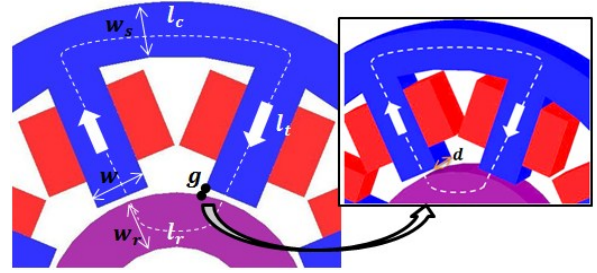


Şekil 3: Manyetik yatağın eşdeğer devresi

Manyetik devredeki relüktans denklemi ise aşağıda belirtilmiştir. Burada μ malzemenin geçirgenliğini, l akı yolunun uzunluğu ve A ise akı yolunun kesit alanını temsil etmektedir.

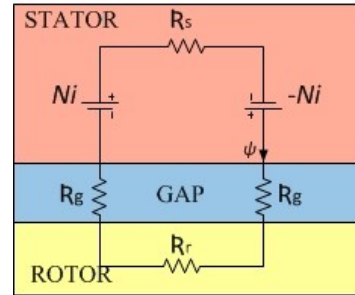
$$\mathfrak{R} = \frac{1}{\mu} \frac{l}{A} \quad (1)$$

Manyetik yatağın çalışma prensibine göre her bir kutup çifti devresinin içinden geçen akım değeri değişkendir. Yani her bir kutup çiftinin bağımsız bir şekilde sensörlerden gelen verilere göre akım değerleri ayarlanır. Bu tür manyetik yataklara akım değerleri değişken olduğu için aktif manyetik yatak denir. Bu kuvvet değerlerine göre rotor ve mil x ve y ekseninde yerçekiyi aynı veya aksi yönde hareket edebilir ve istenilen konuma getirilebilir.



Şekil 4: Tek bir kutup çiftinin kesit gösterimi

Manyetik yataktaki önemli olan kutup çifti ise rotor milini yerçekimi eksenine göre dengede tutacak olan kutup çiftleridir. Şekil 4’da gösterilen bu kutup çiftinde g hava aralığını, w akımın geçtiği yolun genişliğini, d paket uzunluğunu ve l ise akımın geçtiği yolun uzunluğunu temsil etmektedir.



Şekil 5: Tek bir kutup çiftinin manyetik eşdeğer devresi

Şekil 5’de bir kutup çiftinin eşdeğer manyetik devresi verilmiştir. R_s statorun relüktansını, R_g hava aralığının relüktansını ve R_r ise rotorun relüktansını göstermektedir. N_i ise sarımların oluşturduğu manyetik kaynaktır. Tek bir kutup çiftinin manyetik eşdeğer devresindeki relüktans değerleri aşağıda belirtilmiştir.

$$\begin{aligned}\mathfrak{R}_g &= \frac{1}{\mu_0} \frac{g}{wd} \left(\frac{A}{Wb} \right) \\ \mathfrak{R}_s &= \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left(\frac{2 * l_t}{wd} + \frac{l_c}{w_s d} \right) \\ \mathfrak{R}_r &= \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l_r}{w_r d}\end{aligned}\quad (2)$$

Boşluğun geçirgenliği μ_0 olarak gösterilmiştir ve değeri $4\pi * 10^{-7}$ H/m'dir. Havanın geçirgenliği 1 ve manyetik malzemenin geçirgenliği μ_r ise 1000 ile 10000 arasında değişmektedir. Şekil 5'deki devreye bakıldığında devreden akan akı;

$$\psi = \frac{2Ni}{2\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_s + \mathfrak{R}_r} (Wb) \quad (3)$$

şeklinde yazılır. Devreden akan toplam akı λ_l ise devrede bulunan sargıların sarım sayısı yani $N+N$ ile devreden geçen akının çarpılmasıyla bulunur. Toplam akı;

$$\lambda_l = 4N^2 i \frac{1}{2\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_s + \mathfrak{R}_r} (Wb) \quad (4)$$

Kutup çiftinin öz indüksiyonu ise toplam akının akıma bölünmesiyle ($L=\lambda_l/i$) bulunur. Kutup çiftinin öz indüksiyonu;

$$L = 4N^2 \frac{1}{2\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_s + \mathfrak{R}_r} (H) \quad (5)$$

Hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunlu ise

$$B = \frac{\psi}{wd} = \frac{1}{wd} * \frac{2Ni}{2\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_s + \mathfrak{R}_r} (T) \quad (6)$$

denklemleri ile elde edilir. Bu sayede bir kutup çiftinin rotor ve stator dişi arasındaki kuvvet değeri rahatlıkla bulunabilir. Kutup çiftinin uygulayabileceği kuvvet değeri ise;

$$F = \frac{\delta W_m}{\delta x} \quad (7)$$

formülü ile elde edilir ve manyetik enerji formülü

$$W_m = \int_0^i L di = \frac{1}{2} Li \quad (8)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu formül kuvvet denklemi ile açıldığında ise elektromanyetik kuvvet;

$$F = \frac{\delta W_m}{\delta x} = \frac{\delta L}{\delta x} \frac{i^2}{2} * \cos(\pi/8) \quad (9)$$

denklemi daha da basitleştirirsek

$$\frac{\delta L}{\delta x} = \frac{L}{g} \quad (10)$$

açılımını kullanarak tekrardan kuvvet denklemini düzenlersek kutup çiftinin rotor ve mil etki edebileceği kuvvet;

$$F = \frac{L}{2g} i^2 * \cos(\pi/8) \quad (11)$$

denklemleri ile bulunabilir. Buradaki $\cos(\pi/8)$ değeri ise bir stator dişinin dikey veya yatay doğrultu ile yaptığı açıdır. Elektromagnetik çiftinin rotora etki edecek olan kuvvet formülü ise farklı biçimlerde de açılabilir. Bunlar;

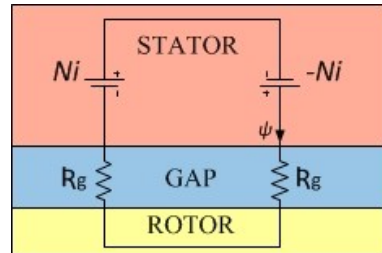
$$F = \frac{1}{2g} * \frac{4N^2}{2R_g + R_s + R_r} i^2 * \cos(\pi/8) \quad (12)$$

$$F = B \frac{Ni}{g} * wd * \cos(\pi/8) \quad (13)$$

şeklinde kuvvet denklemleri elde edilebilir.

2.2. Yaklaşık Manyetik Devre ile Modellenmesi

Literatürde yapılan araştırmalara, yayınlara ve üretilen manyetik yataklara bakıldığında çoğunlukla tam manyetik devre modeli yerine araştırmacıya karışık relüktans hesaplamalarının zaman kayından kurtaran yaklaşık manyetik devre ile modellenen manyetik yataklara rastanılmaktadır. Yaklaşık manyetik devre modellenen manyetik devrelerdeki bazı relüktans değerleri ihmal edilir ve hesaplamalar bu şekilde yapılır. Rotor ve stator malzemeleri ferromanyetik malzeme olduğundan ve geçirgenliği 1000-10.000 olduğundan dolayı stator ve rotordaki relüktans değerleri ihmal edilebilir olduğu kabul edilir ve ferromanyetik malzemelerin relüktans değerleri manyetik devreye dahil edilmez. Bu sayede devre sadece hava aralığındaki relüktans değeri ile manyetik devre modellenmiş olur. Şekil 6'da tek bir kutup çiftinin yaklaşık manyetik devre modeli verilmiştir. Yaklaşık manyetik devrede stator ve rotordaki relüktans değeri ihmal edilmiş sadece hava aralığındaki relüktans değeri manyetik devre modeline dahil edilmiştir.



Şekil 6: Tek bir kutup çiftinin yaklaşık manyetik devresi

Yaklaşık manyetik devredeki hava aralığındaki relüktans formülü ve devreden akan akı formülü aşağıda verilmiştir.

$$\mathfrak{R}_g = \frac{1}{\mu_0} \frac{g}{wd} \left(\frac{A}{Wb} \right) \quad (14)$$

$$\psi = \frac{2Ni}{2\mathfrak{R}_g} = \frac{Ni}{\mathfrak{R}_g} (Wb) \quad (15)$$

Devreden akan toplam akı λ_l devrede bulunan sargıların sarım sayısı ile devreden geçen akının çarpılmasıyla bulunur. Toplam akı;

$$\lambda_l = \frac{2N^2 i}{\mathfrak{R}_g} (Wb) \quad (16)$$

Kutup çiftinin öz indüksiyonu ise toplam akının akıma bölünmesiyle ($L=\lambda/i$) bulunur. Kutup çiftinin öz indüksiyonu;

$$L = \frac{2N^2}{\mathfrak{R}_g} (H) \quad (17)$$

Hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunlu ise

$$B = \frac{\psi}{wd} = \frac{1}{wd} * \frac{Ni}{\mathfrak{R}_g} (T) \quad (18)$$

denklemleri ile elde edilir. Bu sayede bir kutup çiftinin rotor ve stator uygulayabileceği kuvvet değeri rahatlıkla bulunabilir. Kutup çiftinin uygulayabileceği kuvvet değeri ise;

$$F = \frac{\delta W_m}{\delta x} = \frac{\delta L}{\delta x} \frac{i^2}{2} * \cos(\pi/8) \quad (19)$$

Denklemi daha da basitleştirirsek

$$\frac{\delta L}{\delta x} = \frac{L}{g} \quad (20)$$

Açılımını kullanarak tekrardan kuvvet denklemini düzenlersek kutup çiftinin rotor ve mil etki edebileceği kuvvet;

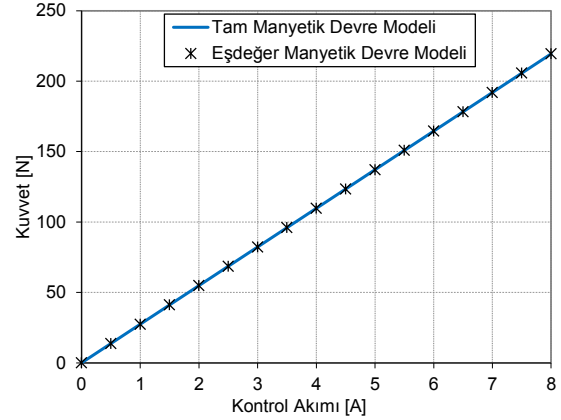
$$F = \frac{L}{2g} i^2 * \cos(\pi/8) \quad (21)$$

denklemleri ile bulunabilir. Buradaki $\cos(\pi/8)$ değeri ise bir elektromıknatısın dikey doğrultu ile yapmış olduğu açı değeridir. Elektromıknatıs çiftinin oluşturduğu kuvvet farklı biçimlerde de açılabilir. Bunlar;

$$F = \frac{1}{2g} * \frac{2N^2}{R_g} i^2 * \cos(\pi/8) \quad (22)$$

$$F = B \frac{Ni}{2g} * wd * \cos(\pi/8) \quad (23)$$

şeklinde kuvvet denklemleri elde edilebilir. Bu sayede sadece hava aralığındaki relüktans değerini bilerek yaklaşık olarak manyetik yatağın rotora uygulayabileceği kuvvet değerleri bulunabilir. Bu denklemleri kullanarak [7]'deki manyetik yatağa ait tam ve eşdeğer manyetik modellerine göre hesaplanan kuvvet değerleri Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'ye bakıldığında tam ve eşdeğer manyetik devre modeli ile elde edilen kuvvet değerleri büyük bir uyum içersindedir.



Şekil 7: Üretilmiş manyetik yatağa ait akım-kuvvet ilişkisi: Tam ve eşdeğer manyetik modeli

Şekil 7'deki grafikte tam ve eşdeğer devreden elde edilen değerler tam detaylı bir şekilde anlaşılabilir. Çizelge 1'de tam ve eşdeğer manyetik devre modeli ile elde edilen akım kuvvet değerleri verilmiştir. Tam manyetik devre modeli ile eşdeğer manyetik devre modeli sonuçlarına bakıldığında eşdeğer manyetik devre modelinin %1,7'lik bir hata oranına sahip olduğu ve bu değerler içersinde içersinde kabul edilebilirliği rahatlıkla söylenebilir.

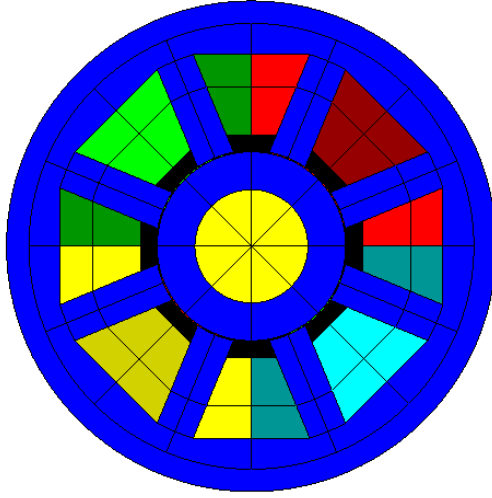
Çizelge 1: Tam ve eşdeğer manyetik devre modeli ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması.

Kontrol Akımı	Tam manyetik devre modeli	Eşdeğer manyetik devre modeli
0	0	0
1	26,96	27,42
2	53,93	54,85
3	80,89	82,27
4	107,86	109,70
5	134,83	137,12
6	161,79	164,55
7	188,76	191,97
8	215,76	219,4

3. Manyetik Yatakların 2B Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi

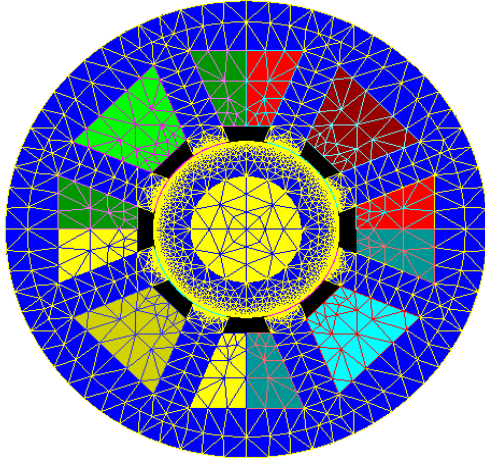
Manyetik yatağın tam veya eşdeğer manyetik devre ile modellenmesi kadar 2B sonlu elemanlar yöntemi ile de modellenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu sayede hem manyetik devre modelin doğruluğu kanıtlanacak hem de manyetik yatağın tasarımı ile ilgili değişiklikler hızlı bir şekilde yapılarak gerekli optimizasyonlara hızlı bir şekilde gidilecektir. Şekil 8'de manyetik yatağın 2B modellenmiş hali

verilmiştir. Yeşil, bordo, sarı ve turkuaz renkli yapılar sargı yapılarıdır ve 2B model Şekil 2'deki manyetik yatak ile aynı akı yollarına sahiptir ve bu manyetik yatak [7]'deki manyetik yatağa uygulanarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.



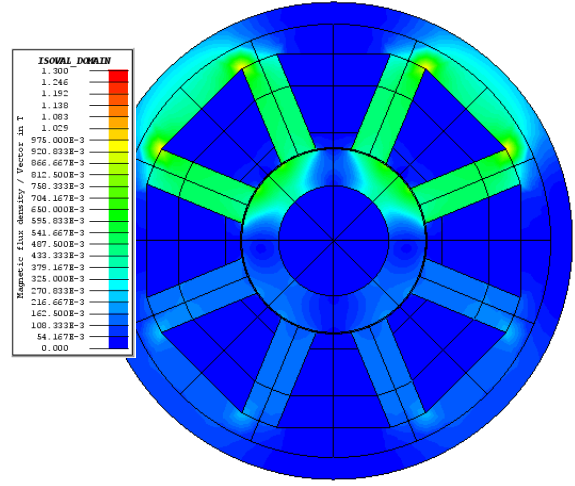
Şekil 8: Manyetik yatağın 2B modellenmiş görüntüsü

Şekil 9'de manyetik yatağın mesh yapısı gösterilmiştir. Manyetik yataklarda en hassas olan yer rotor ile stator arasındaki hava aralığıdır ve buradaki mesh yapısının fazla yoğunlukta olması istenir. Nominal olarak milimetrenin onda biri hassasiyetle çalışan manyetik yataklarda en çok dikkatli bir şekilde incelenmesi gereken yerleri şüphesiz hava aralıklarıdır ve Şekil 9'den görüldüğü üzere en fazla mesh hava aralığında olacak şekilde mesh yapısı oluşturulmuştur.



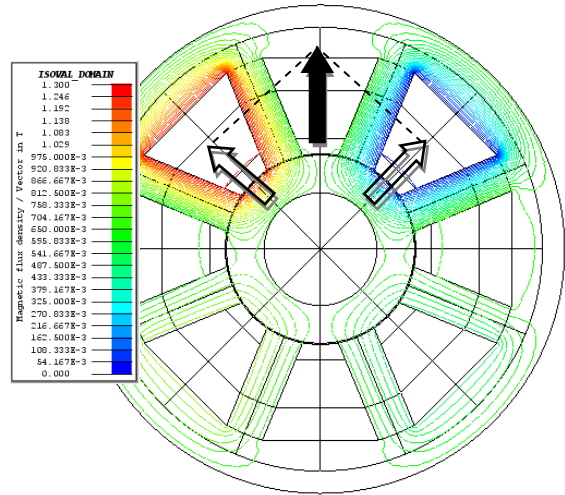
Şekil 9: Manyetik yatağın ağ yapısı

Manyetik yatağa ait akı yoğunluğu ise Şekil 10'da gösterilmiştir. Mili dengelemede en fazla üst y eksenindeki yataklara iş düşmektedir ve akı yoğunluğundaki büyüklük belirgin bir şekilde gözükmemektedir.



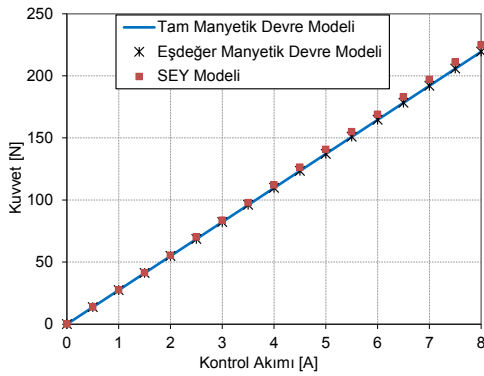
Şekil 10: Manyetik yatağın akı yoğunluğu

Şekil 11'da manyetik yatağa ait akı yolları ve kuvvet çizgileri gösterilmiştir. Üst kısımda bulunan kutup çiftleri rotoru kendilerine göre çekmeye çalışırlar ve rotora ektiyen toplam kuvvet kutup çiftlerinin kuvvetlerinin vektörel toplamına eşittir.



Şekil 11: Manyetik yatağın akı yolları

Analitik olarak tek bir kutup çiftinin ürettiği kuvvet değeri bulunduktan sonra rotora etkiyen bileşke kuvvet değerinin bulunması ve bunun 2B sonlu elemanlar analizi ile rotora etki eden kuvvet değeri ile karşılaştırılması ve bütün bu verilerin kuvvet değeri deneysel olarak ölçülen bir manyetik yatak ile karşılaştırılması son derece önemlidir. Şekil 12'de referans alınan manyetik yatağa ait 2B sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçların tam ve eşdeğer manyetik devre modeli ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması verilmiştir. Kontrol akımı manyetik malzemenin doyuma ulaşmadığı, lineer olduğu bölge olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 12: Üretilmiş bir manyetik yatağa ait akım-kuvvet ilişkisi: Analitik ve 2B sonlu elemanlar yöntemi

2B sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen akım-kuvvet değerleri manyetik devre temelli modelleme ile elde edilen akım-kuvvet değerleri ile uyum içinde olması hem manyetik devre modelinin hem de 2B sonlu elemanlar yöntemi analizlerinin doğruluğunu sağlamakta hem de güvenilirliğini belirtmektedir. Bu sayede üretilen bir manyetik yatağın ister matematiksel olarak doğrulanması ister 2B sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanması yapılabilir.

Çizelge 2: Tam, eşdeğer manyetik devre modeli ve 2B sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen kuvvet sonuçlarının karşılaştırılması.

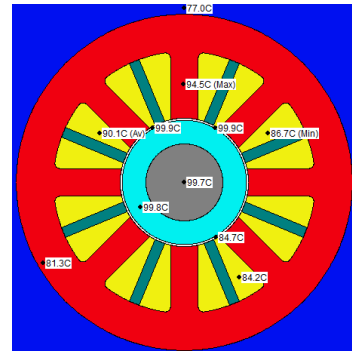
Kontrol Akımı [i]	Tam manyetik devre modeli ile hesaplnn. kuvvet [F]	Eşdeğer manyetik devre modeli ile hesaplnn. kuvvet [F]	2B SEY ile hesaplnn. kuvvet [F]	Hata %
1	26,96	27,42	27,49	0,26
2	53,93	54,85	55,34	0,9
3	80,89	82,27	83,54	1,54
4	107,86	109,70	112,04	2,14
5	134,83	137,12	140,63	2,56

Çizelge 2’de tam ve eşdeğer manyetik devre modeli ile elde edilen sonuçların 2B sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlara göre karşılaştırılması ve hata oranları verilmiştir. Eşdeğer manyetik devre modeli baz alınarak 2B sonlu elemanlar analizi yöntemi ile elde edilen kuvvet sonuçlarının hata oranları verilmiştir. Üretilen manyetik yatağın deneysel çalışmaları sonucu elde edilen kuvvet değerleriyle kıyaslama yapıldığında 2B sonlu elemanlar yöntemi analizi ile elde edilen kuvvet değerleri düşük akım değerlerinde iyi bir örtüşme içersindedir.

4. Tasarlanan Manyetik Yatağın Isıl Analizi

Tasarlanan manyetik yatağın ısı analizi MotorCAD yazılımı kullanılarak maksimum akım değerinde gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar Şekil 13 de gösterilmiştir. Ortam sıcaklığı 20 derece alınmış ve yapılan çalışmalarda yatakta termal bir sorun

ortaya çıkmadığı gözlenmiştir.



Şekil 13: Manyetik yatağın ısı analizi

5. Sonuçlar

Bu çalışmada manyetik yatakların hem manyetik devre temelli olarak modellenmesi hem de 2B sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayar ortamında modellenmesinin yapılarak bu modellemelerin doğruluğunun ispatlanması amaçlanmıştır. Manyetik yatakların manyetik devre temelli modellerinin çıkarılması, 2B sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerinin yapılması ve bu iki çalışmadan elde edilen akım-kuvvet değerlerinin deneysel olarak üretilmiş bir manyetik yataktan elde edilen akım-kuvvet değerleri ile karşılaştırılması bu çalışmada yapılmıştır. Manyetik devre temelli elde edilen analitik akım-kuvvet değerleri, 2B sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen akım-kuvvet değerleri ile büyük bir uyum içindedir.

6. Kaynaklar

- [1] Earnshaw, S., “On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether”, *Transactions of Cambridge Philosophical Society*, sayfa 97-112, 1842.
- [2] P. K. Hermann, “A Radial Active Magnetic Bearing”, London Patent No. 1 478 868, 1973
- [3] G. Schweitzer, E.H. Maslen, *Magnetic Bearings Theory, Design and Application of Rotating Machinery*, Springer, 2009.
- [4] A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa, M. Oshima, M. Takemoto and D. G. Dorrell, *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*, Great Britain, Elsevier, 2005.
- [5] G. Schweitzer, H. Bleuler and A. Traxler, *Active Magnetic Bearings*, Hochschulverlag AG an der ETH Zurich, ISBN 3 7281 21320.
- [6] G. Samtaş, A. Güllü, Manyetik yatak sistemleri üzerine bir araştırma, Pamukkale Üni. Mühendislik Bilimleri Dergisi, cilt no 2, sayfa 235-245, 2007.
- [7] L. Burdet, *Active Magnetic Bearing Design and Characterization for High Temperature Applications*, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland, 2006

7. Teşekkür

Yazarlar yazılım desteği sağlayan Cedrat firmasına ve desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederler.