

KÜTLE ROTORLU ASENKRON MOTORUN ELEKTROMAGNETİK ALAN İNCELEMESİ VE BAŞARIM ÖZELLİKLERİ

İrfan ŞENLİK, Güven ÖNBİLGİN ve Onur COPCUOĞLU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 55139, Samsun
isenlik@omu.edu.tr, gonbilgi@omu.edu.tr, ocopcu@gmail.com

(Geliş/Received: 26.07.2010; Kabul/Accepted: 09.12.2010)

ÖZET

Elektrik makinalarının başarımları özelliklerinin incelenmesinde ve parametrelerinin boyutlar, malzeme özellikleri, tasarım büyüklüklerine bağlı olarak elde edilmesinde, makina içindeki elektromagnetik alan değişimlerinin bilinmesinde büyük yarar vardır. Özellikle bilgisayar donanımı ve yazılımındaki gelişmelerin bir sonucu olarak, yürüyen dalga, yüzey empedansı, sonlu elemanlar ve sonlu farklar gibi yazılımlarla, elektromagnetik alan büyüklüklerinin sayısal çözümleme ile bilgisayar destekli belirlenmesi günümüzde elektrik makinası tasarımının önemli parçasıdır. Bu çalışmada, çok katmanlı kuram aktarım matrisi yöntemi ile sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak, kütle çelik rotorlu asenkron motorun elektromagnetik alan değişimi ve başarımları özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılıp, yöntemlerin doğruluğu ve başarımları değerlendirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Çelik kütle rotor, asenkron motor, çok katmanlı kuram, sonlu elemanlar yöntemi

ELECTROMAGNETIC FIELD STUDY AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF SOLID STEEL ROTOR INDUCTION MACHINES

ABSTRACT

Knowledge of electromagnetic field variations in an electrical machine is very useful in the performance study of the machine, and in the determination of machine parameters depending on the dimensions, material characteristics and design specifications. Recent electrical machine design efforts include, as a significant element, numerical analysis based and computer aided determination of electromagnetic field particulars using software such as those on traveling waves, surface impedance, finite elements and finite differences, as a consequence of developments in computer hardware and software. In this study, two methods, namely the multilayer theory transfer matrix method and the finite element method have been employed to investigate the electromagnetic field and performance characteristics of solid steel rotor induction machine. The results obtained by these two methods have been compared to experimental results to assess the accuracy and performance of these methods.

Keywords: Solid steel rotor, induction motor, multilayer theory, finite element method

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Asenkron motorlarda rotordaki girdap akımlarının, güç kayıplarına neden olarak ısınma ve verim azalmasına neden olduğu bilinmektedir. Çalışmalarda girdap akımlarının ısınma üzerine etkisi incelenmiş, motorun soğuması için bu ısının nasıl çevreye yayılabileceği araştırılmıştır. Bir yandan bu araştırmalar yapılırken diğer yandan motorda

olumsuzluklara neden olan girdap akımlarından yararlanabilmek için, motorda yapılması gereken biçim ve yapı değişiklikleri üzerinde durulduğu görülmektedir. Böylece ortaya kütle rotorlu asenkron motorların çıktığını ve rotor empedansını küçültmek amacıyla nikel, demir ve çelik malzemeli rotorların biçim olarak da uç yüzeyli, yarıklı ve oluklu rotorların imal edilip, üzerinde çalışmalar yapıldığını görmekteyiz [1,2,3,4,5].

Çelik malzemesinin iletkenliğinin bakıra göre daha düşük olmasından dolayı, çelik rotorlu motorda rotor direnci kafesli motorlara göre büyük olup; anma hızında, kayma daha büyük verim daha düşüktür. Buna karşılık rotor direncinin büyük oluşu yol alma momenti ve güç katsayısının büyük, yol alma akımının ise küçük olmasını sağlar [1,3].

Sürücü düzenek uygulamalarında, kütle rotorlu asenkron motorlar; yalın ve sağlam olmaları, yüksek hızda çalışabilmeleri, yüksek yol alma momenti üretebilmeleri, yol almada düşük akım çekebilmeleri ve yapım kolaylığı nedeniyle yeğlenmektedir. Bu özellikleri ile uygulama alanları çok değişik olan kütle rotorlu asenkron motorlar; yüksek hız uygulamalarında, yol alma momentinin büyük olması gereken yerlerde, ayrıca büyük frenleme momenti istenen yerlerde fren motoru olarak, rotorda yapılacak özel değişikliklerle sürücü motoru olarak ve servomotor olarak kullanılır [1,2,3].

Sözü edilen üstünlükleri nedeniyle kütle rotorlu asenkron motorun boyut, malzeme özelliklerine göre tasarım büyüklüklerinin belirlenmesi için değişik çalışma koşullarındaki elektromagnetik alan değişimi ve başarımının incelenmesi önemlidir.

Asenkron motorun çeşitli katmanlarındaki magnetik akı yoğunluğunu, magnetik ve elektrik alan şiddetlerini hesaplayabilmek için Maxwell eşitliklerinin çözümü gerekmektedir. Bu eşitliklerin çözümü malzeme özellikleri ve motor geometrisinden dolayı çok karmaşıktır. Çok katmanlı kuram, asenkron motorda karmaşık alan çözümü yöntemlerine gerek kalmadan, motor içindeki elektromagnetik alan özelliklerinin kestirilebileceğini gösteren bir yaklaşımdır[4,5,6,7]. Özellikle Makina tasarımında, magnetik akı yolu varsayımına veya ampirik katsayılara gereksinim duymayan sonlu elamanlar gibi yeni yöntemler de kullanılmaktadır [7,8,9,10,11,12,13].

2. KÜTLE ROTORLU MOTOR ÖZELLİKLERİ (PARTICULARS OF SOLID ROTOR MOTOR)

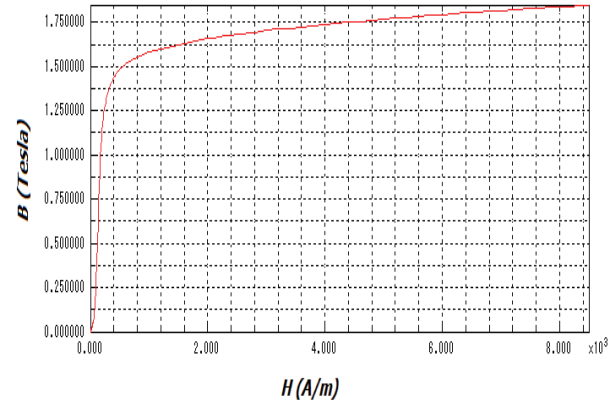
Çalışmada 3 faz, 50 Hz, 250W, 380V, 4 kutuplu, statoru yıldız bağlı kütle çelik rotorlu bir asenkron motor kullanılmıştır. Motorun stator ve rotor verileri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Stator ve rotor verileri (Stator and rotor data)

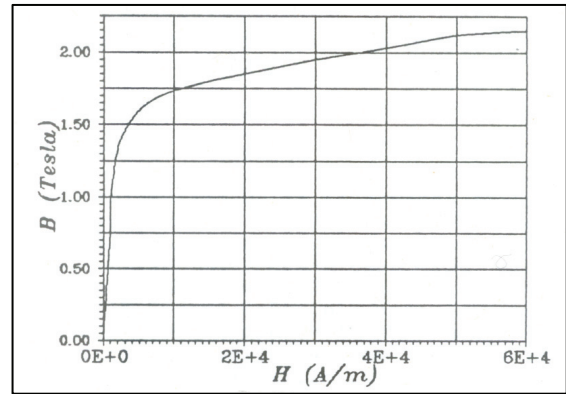
Stator ve rotor boyu (mm)	50
Stator dış çapı (mm)	110
Stator iç çapı (mm)	69
Hava aralığı (mm)	0,25
Stator oluk sayısı	24
Stator adım sayısı	6
Oluktaki (stator) sarım sayısı	172
Tel çapı (mm)	0,355
Sarım faktörü, k_w	0,96

Etkin sarım sayısı, N_{eff}	667
Stator faz sargı direnci, R_f (ohm)	35
Stator faz sargı kaçak reaktansı (ohm)	20
Kütle çelik rotorun direnci, ρ (ohm.m)	2,226
Uç etkisi katsayısı, k_e	0,4
Eylemsizlik momenti, J (Ws ³)	0,00112

Motorun stator saclarının B-H eğrisi Şekil 1. de, rotor çeliğinin B-H eğrisi ise Şekil 2. de verildiği gibidir.



Şekil 1. Stator saclarının B-H eğrisi (B-H curve stator steel sheet)



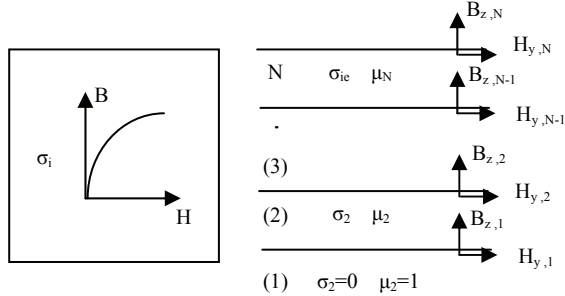
Şekil 2. Rotor çeliğinin B-H eğrisi (B-H curve of rotor steel)

3. ÇOK KATMANLI KURAM İLE İNCELEME (INVESTIGATION BY MULTILAYER THEORY)

Kütle rotorlu asenkron motorun çok katmanlı aktarım matrisi yöntemiyle yapılan sürekli durum çözümlemesi, belli bir gerilimde çalışma için; her katmanda teğetsel mıknatıslanma alanına uygun magnetik geçirgenliğin yinelemeli ayarlaması ile yapılır. Yöntem rotora giren akı ve motorun sürekli durum parametrelerinin değişimi ile ilgili bilgi vermektedir [3,4,6].

Kuramda Şekil 3. de verilen kütle rotorun yerini, N katmanlı modeli alır. Burada her katmanın kalınlığı gerçek rotor kalınlığının 1/N sidir. İç rotor yüzeyinde teğetsel mıknatıslanma alanının son değeri 10^{-3} A/m den daha az olarak varsayılabilir [4,5]. Böyle bir

mıknatıslanma alanı değeri en alt katmanda göz ardı edilebilir bir akı üretir. Bunun temel nedeni kütle rotordaki akı dalma derinliğinin, rotor radyal kalınlığından daha az olmasıdır. Kullanılacak kütle çelikteki histerezis etkileri ve doymaya ilişkin armonikler göz ardı edilebilir.



Şekil 3. Kütle rotorlu motor çok katmanlı modeli
(Multilayer model of solid rotor motor)

Genel katman kalınlığı S_n , bir katmanın iletkenliği σ_n bağıl magnetik geçirgenliği μ_n olarak; katmanın alt ve üst sınırlarındaki B_z dik akı yoğunluğu ve teğetsel mıknatıslanma alanı H_y ile ilgili aktarım matrisi $[T_n]$ eşitlik (1) deki gibi tanımlanır[14].

$$\begin{bmatrix} B_{z,n} \\ H_{y,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma_n S_n & (\sinh \gamma_n S_n) / \beta_n \\ \beta_n \sinh \gamma_n S_n & \cosh \gamma_n S_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{z,n-1} \\ H_{y,n-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada:

$$\gamma_n = (K^2 + j\mu_0 \mu_n \sigma_n w)^{1/2} \quad (2)$$

$$\beta_n = \gamma_n / (j\mu_0 \mu_n K) \quad (3)$$

$$K = 2\pi / \lambda \quad (4)$$

$$\lambda = \pi D / p \quad (5)$$

Rotorun Şekil 3 de verilen N katmanlı modelinde rotor kütlesi ile mil arasındaki iç rotor yüzeyine ilişkin bileşenler $H_{y,1}$, $B_{z,1}$ iken; hava aralığı bölgesine bitişik üst rotor yüzeyinde $H_{y,N}$ ve $B_{z,N}$ bileşenleri vardır. Birinci katman ve onun ikinci katman ile olan sınırında:

$$H_{y,1} = \beta_1 B_{z,1} \quad (6)$$

eşitliği yazılır. Bu katman rotor kütlesi ile mil arasında kalan bölge olup burada $\sigma = 0$ ve $\mu_1 = 1$ dir. Bu bölge için (2) ve (3) eşitliklerinden : $\gamma_1 = K$ ve $\beta_1 = 1 / j\mu_0$ bulunur. Buna göre;

$$B_{z,1} = j\mu_0 H_{y,1} \quad (7)$$

yazılır. Benzer biçimde eşitlik (1) deki aktarım matrisi kullanılarak kütle çelik rotorun tüm katmanlarındaki alan dağılımı hesaplanabilir. Rotor

yüzeyindeki (N. Katman) alan çözümü ile motorun Şekil 4. de gösterilen faz başına eşdeğer devresindeki \underline{E} , \underline{I}'_r ve \underline{Z}'_r parametreleri elde edilebilir. Ayrıca kullanılan yöntemde motorun hava aralığı ve stator dış uçları hesaba katılarak oluşturulacak modeli ile belli yaklaşıklıkla ortak empedans da (X_m) elde edilebilir. Böylece w_r açısal frekansıyla rotor yüzeyindeki elektriksel alan:

$$\underline{E}_{z,n} = -\frac{w_r}{K} B_{z,n} \quad (8)$$

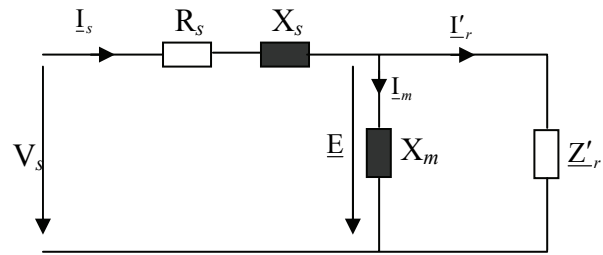
olup, rotordaki elektromotor kuvvet (emk):

$$\underline{E}_r = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{w_r}{K} L B_{z,n} \quad (9)$$

eşitliğiyle tanımlanır. Burada $w_r = 2\pi f s$ ve $K = 2p/D$ eşitlikleri kullanılırsa (9) eşitliği;

$$\underline{E}_r = \frac{\pi}{\sqrt{2}} s f \frac{DL}{p} B_{z,n} \quad (10)$$

olur.



Şekil 4. Kütle rotorlu motorun eşdeğer devresi
(Equivalent circuit of solid rotor motor)

Bu 'emk' in bir eşdeğer yarım sarımlı rotor sargısında endüklenen gerilime eşit olduğu varsayılabilir. Böylece N_s sarımlı bir stator faz sargısında endüklenen emk :

$$\underline{E} = \underline{E}_r \left(\frac{1}{s} \right) \frac{N_s k_w}{(1/2)} = \sqrt{2} \pi f \frac{DL}{p} (N_s k_w) B_{z,n} \quad (11)$$

Kutup başına rotor magnetomotor kuvveti (MMK) :

$$F_r = \int_{y=0}^{y=\pi D/4p} \underline{H}_{y,N} \sin\left(\frac{2p}{D} y\right) dy = \underline{H}_{y,N} \frac{D}{2p} \quad (12)$$

eşitliğiyle verilir. Bu mmk ya eşdeğer mmk yı üretecek bir rotor akımı :

$$\underline{I}'_r = \left(\frac{\pi D}{6\sqrt{2} N_s k_w} \right) \underline{H}_{y,N} \quad (13)$$

elde edilir. Rotor yüzey empedansı:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{\varepsilon}_{x,N}}{\underline{H}_{y,N}} = \left(-\frac{w_r}{K} \frac{\underline{B}_{z,N}}{\underline{H}_{y,N}} \right) \quad (14)$$

bulunur. Faz başına rotor empedansı ise;

$$\underline{Z}'_r = \frac{E}{I'_r} = Z'_r \angle \theta_r = \frac{12(N_s k_w)^2 L}{\pi D} \frac{1}{s} \left(-\frac{w_r}{K} \frac{\underline{B}_{z,N}}{\underline{H}_{y,N}} \right) \quad (15)$$

eşitliği ile bulunur.

Bu denklemlerin çözümü için, motor özellikleri, stator parametreleri, kütle rotorun özgül direnci ile B-H eğrisi ve uç etkisi katsayısı verilir. Rotor malzemesinin doğrusal olmama durumu göz önüne alınarak, rotor 100 katmana ayrılmıştır. Her katmanın bağıl magnetik geçirgenliği μ_n , bir önceki katmanın teğetsel mıknatıslanma alanı, $H_{y,n-1}$ 'e uygun olarak, kesirli eğri uydurma yöntemi ile bulunmuştur.

Çözümde, çelik rotorun iç yüzeyinden geniş bir aralıktaki $H_{y,1}$ değer çiftleriyle başlanmıştır. Daha sonra $H_{y,1}$ değeri V_s uç gerilimi elde edilinceye kadar yinelemeli olarak ayarlanmıştır. Diğer katmanlardaki ve rotor yüzeyindeki alan büyüklükleri $H_{y,N}$, $B_{y,N}$ aktarım matrisi yöntemi ile çözümülenip bulunan bu alan büyüklüklerinden motorun sürekli durum parametreleri ve davranışı incelenebilir.

4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ (SEY) YAZILIMI (FINITE ELEMENT METHOD (FEM) SOFTWARE)

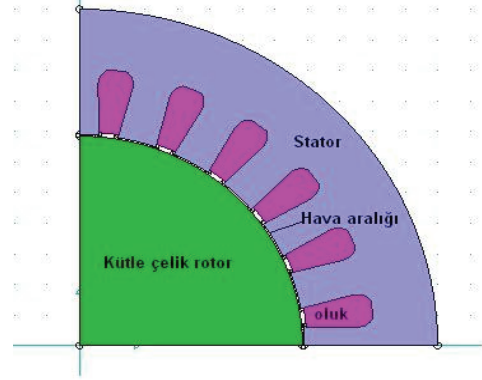
Günümüzde makina tasarımında, magnetik akı yolu varsayımına veya ampirik katsayılarla gereksinim duymayan sonlu elemanlar gibi yeni yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntem ile karmaşık geometrilere sahip makinalarda magnetik doyma, endüvi reaksiyonu etkisi, eddy akımları etkisi gibi etkiler göz ardı edilmeden magnetik alan büyüklükleri ve tasarım ölçütleri doğru biçimde belirlenebilmektedir [7,8,9,10,11,12,13].

Sonlu elemanlar yöntemi, makinaya uygulanan giriş enerjisi ile makinada depolanan enerji arasındaki fark enerji işlevi F en küçük olacak biçimde alan büyüklüklerine çözüm getirir.

$$F = \int_V \left(\int_0^B \bar{H} d\bar{B} - \int_0^A \bar{J} d\bar{A} \right) dV \quad (16)$$

F işlevi $\partial F / \partial A = 0$ olduğunda en küçük olur.

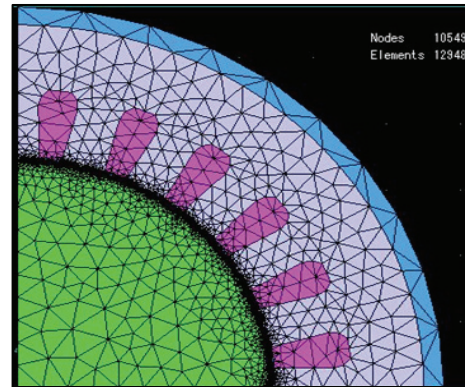
Modelleme için JMAG SEY yazılımı kullanılmıştır. JMAG SEY yazılımında motorun modeli kendi çizim penceresinde oluşturulabileceği gibi herhangi bir bilgisayarlı çizim yazılımı (CAD) kullanılarak da çizilebilir. Motor 4 kutuplu olduğundan $1/4$ ' ünün modelinin oluşturulması yeterlidir. Şekil 5. de çözümülenip yapılan kütle çelik rotorlu motor modeli ve motora ait farklı malzeme bölgeleri görülmektedir.



Şekil 5. Çözümülenip yapılan kütle rotorlu motorun $1/4$ modeli ve farklı malzeme bölgeleri (A quarter model and different material regions of the solid rotor motor studied)

Çözümleme için 2 Boyutlu çözümleme aracından yararlanılmıştır. Çözümleme türü belirlendikten sonra, farklı malzeme bölgeleri ve bölgelere ilişkin malzeme özellikleri (B-H eğrileri, iletkenlikler, kütle yoğunlukları, vb.) tanımlanır. Daha sonra çözümleme koşulları (çözümleme adımı, periyodik sınır koşulları, hareket yönü ve denklemi, faz sargı yönleri ve sarım biçimleri, sargı dirençleri vb.) tanımlanır. Ardından gerilim kaynağı gibi dış devre ögesi bağlantıları tanımlanarak sargılara uygulanacak gerilim ve frekans değerleri tanımlanabilir. Son olarak sonlu elemanlar ağı oluşturularak alan büyüklüklerinin hesaplanması için program koşuturur.

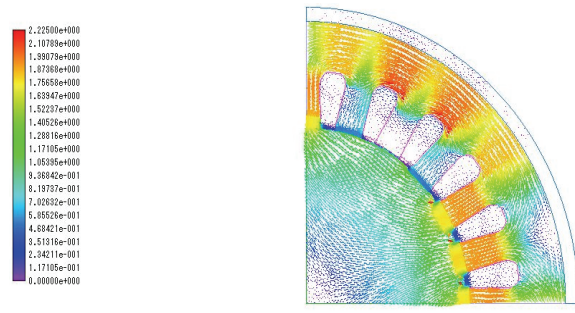
Stator ve rotor sonlu elemanlar ağı SEY yazılımı ile manuel ya da otomatik olarak oluşturulabilir. Hava aralığı ve hava aralığı ağı ise yazılım tarafından otomatik olarak oluşturulur. Bu nedenle malzeme bölgeleri tanımlanırken hava aralığı bölgesi tanımlanmaz. Rotorun hareket ettiği çözümlemeler için rotor hareketinin dikkate alınması amacıyla yazılımda "silindirik kayar ağı" adlandırılan bir özellik kullanılır. Bu durumda stator ve rotor arasında bir kayma kenarı oluşturulur. Şekil 6.'da motor modelinin sonlu elemanlar çözümülenip için oluşturulan sonlu elemanlar ağı görülmektedir. Sonlu elemanlar ağında üçgen elemanlar kullanılmıştır.



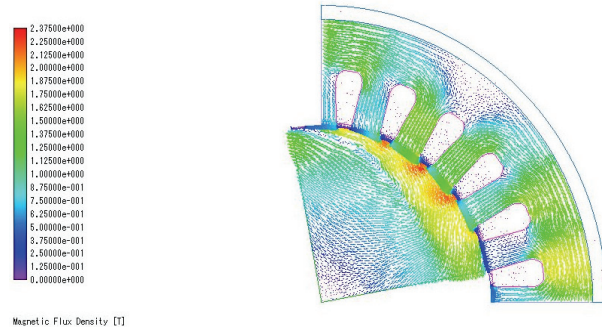
Şekil 6. Magnetik çözümleme için sonlu elemanlar ağının oluşturulması (Finite Element mesh generation for magnetic analysis)

5. BULGULAR (RESULTS)

Özellikleri verilen kütle çelik rotorlu asenkron motorun e JMAG sonlu elemanlar yazılımı ve çok katmanlı aktarım matrisi yaklaşımı ile modellenmesi sonucu motorun elektromagnetik alan dağılımı benzetimsel bulgular verilmiştir. Elde edilen sonuçların başarım özelliklerinin değerlendirilmesi için deneysel bulgular da incelenerek, yöntemlerin doğruluğu sınanmıştır. Sonlu elamanlar yazılımı ile yapılan elektromagnetik alan incelemesinde motorun başlangıç durumundaki ($t=0$) magnetik akı yoğunluğu Şekil 7. de, rotor belirli bir konumdayken ($t=10$ ms) magnetik akı yoğunluğu Şekil 8. da verilmiştir.

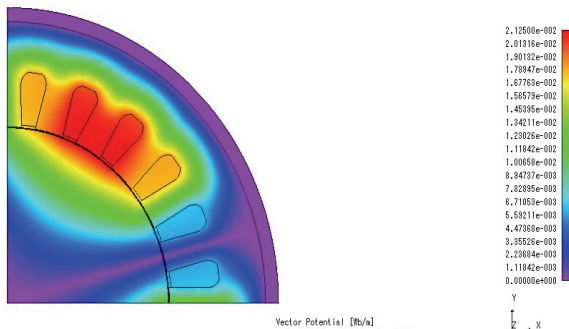


Şekil 7. Rotorun başlangıç durumundaki magnetik akı yoğunluğu (Magnetic flux density at the initial position of the rotor)

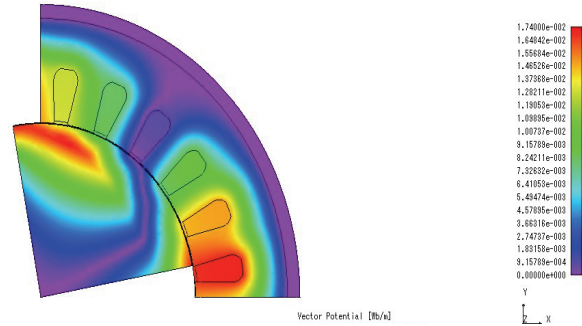


Şekil 8. Motorun rotoru belirli bir konumdayken magnetik akı yoğunluğu (Magnetic flux density at any rotor position)

Motorun geometrisindeki magnetik vektör potansiyeli Şekil 9. ve Şekil 10. de verilmiştir.

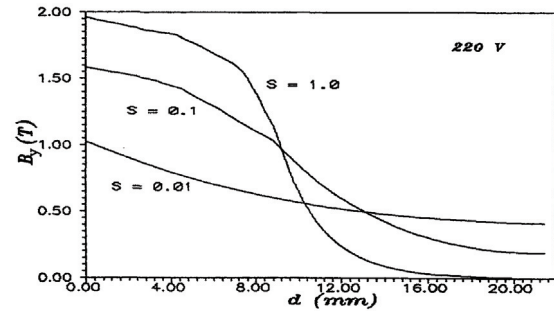


Şekil 9. Magnetik vektör potansiyelinin başlangıç durumundaki ($t=0$) gösterimi (Display of magnetic vector potential at initial ($t=0$) rotor position)



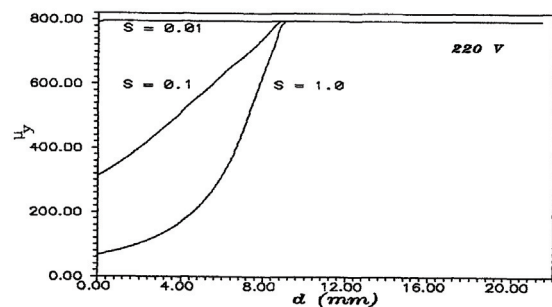
Şekil 10. Magnetik vektör potansiyelin rotorun belirli bir konumundaki ($t=10$ ms) gösterimi (Display of magnetic vector potential at a certain ($t=0$) rotor position)

Çok katmanlı kuram aktarım matrisi yöntemi kütle çelik rotordaki alan dağılımı ve akının rotora girişiyle ilgili bilgi verebilmektedir. Motorun anma gerilimiyle beslenmesi durumunda, kaymanın rotor içindeki akı dağılımı üzerine etkisi Şekil 11. de gösterilmektedir. Eğrilerde görüldüğü gibi, büyük kayma değerlerinde ($s=1,0$) rotor içine akı girişi sınırlıdır ve teğetsel akı şiddeti bu rotor yüzeyine yaklaştıkça daha da büyümektedir. Küçük kayma değerlerinde ($s=0,01-0,1$), akı daha derine dalmakta ve B_y oldukça düzgün değişmektedir.



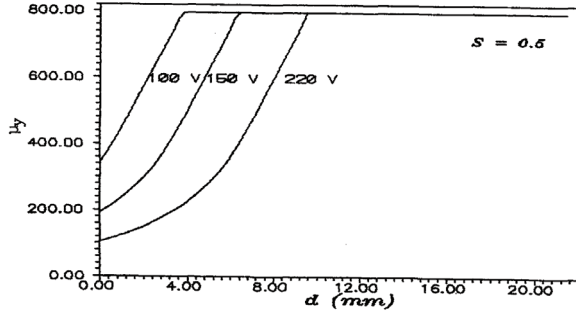
Şekil 11. Teğetsel akı yoğunluğunun değişik kayma değerlerindeki değişimi (Variation of tangential flux density with different slip values)

Motorun anma gerilimi ile beslenmesi durumunda hesaplanan teğetsel magnetik geçirgenlik μ_y nın değişik kaymalardaki değişimi Şekil 12. da gösterilmiştir. Bu eğrilerden görüldüğü gibi μ_y nın küçük kayma değerlerinde rotor derinliklerindeki değişimi oldukça azdır. Teğetsel magnetik geçirgenlik büyük kaymada rotor yüzeyinde düşük, rotor içinde ise yüksektir.



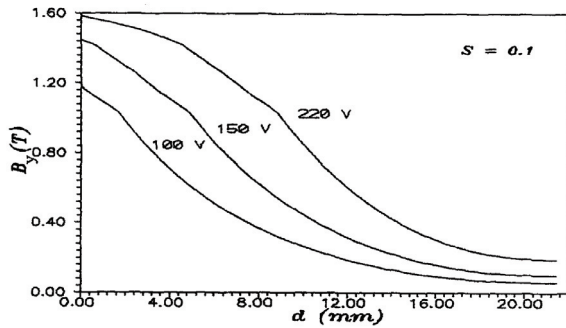
Şekil 12. Teğetsel magnetik geçirgenliğin değişik kayma değerlerindeki değişimi (Variation of tangential permeability with different slip values)

Sabit kaymada ($s=0,5$) motorun değişik gerilimlerle beslenmesi durumunda, teğetsel magnetik geçirgenliğin rotordaki değişimi Şekil 13. de gösterilmektedir. Düşük gerilimlerde μ rotor içinde doymamış değerine ulaşmaya çalışır. Yüksek gerilimlerde ise, rotor çeliği derinliği boyunca doymaya girer.



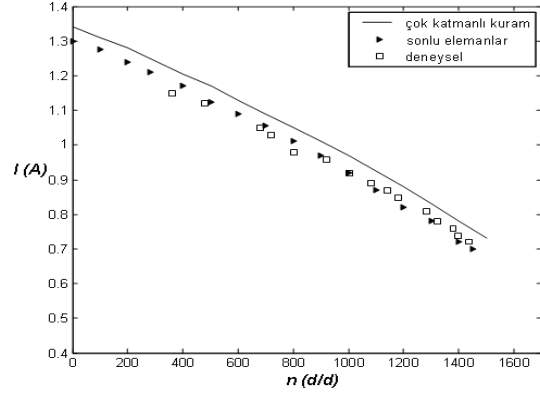
Şekil 13. Teğetsel magnetik geçirgenliğe gerilimin etkisi ($s=0,5$) (The influence of the voltage on tangential permeability ($s=0,5$))

Değişik besleme gerilimlerinde teğetsel akı yoğunluğunun rotor içindeki değişimi Şekil 14. de verilmiştir. Eğrilerden de görüldüğü gibi teğetsel akı yoğunluğu rotor çeliği içine girdikçe azalmakta ve oldukça küçük bir değerde kalmaktadır.

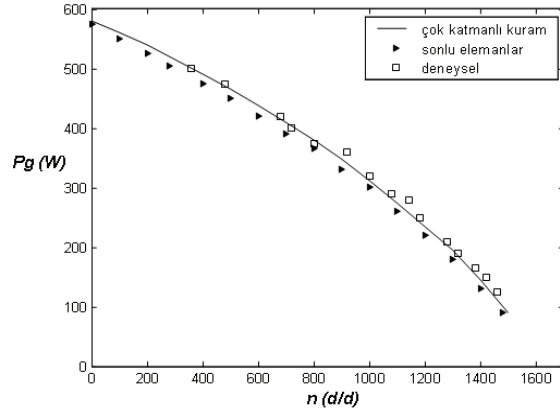


Şekil 14. Değişik gerilimler için teğetsel akı yoğunluğunun rotor içindeki değişimi ($s=0,1$) (Variation of tangential flux density with voltage inside the rotor ($s=0,1$))

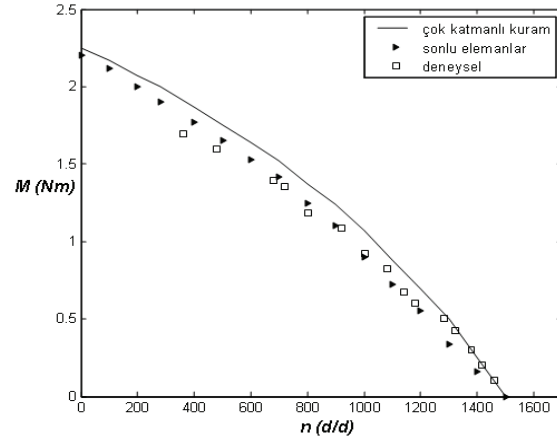
Çalışmada kullanılan kütle rotorlu asenkron motorun sürekli durumdaki başarım özellikleri çok katmanlı kuram ve sonlu elemanlar yazılımlarıyla incelenmiş, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi için deneysel bulgular da incelenerek, doğruluğu sınanmıştır. Motorun anma gerilimi ile beslenmesi durumunda akım – hız değişimleri Şekil 15. da, giriş gücü – hız değişimleri Şekil 16. de ve moment – hız değişimleri Şekil 17. de, sonlu elemanlar yazılımı (SEY), çok katmanlı kuram çözüm sonuçları ile deneysel ölçüm sonuçlarını içerecek biçimde verilmiştir.



Şekil 15. Kütle rotorlu motorun akım – hız değişimi (Current-speed variation of solid rotor motor)



Şekil 16. Kütle rotorlu motorun güç – hız değişimi (Power-speed variation of solid rotor motor)



Şekil 17. Kütle rotorlu motorun moment – hız değişimi (Torque-speed variation of solid rotor motor)

Sürekli durum değişimlerinden sonlu elemanlar ve çok katmanlı kuramı sonuçları ile deney sonuçlarının genellikle iyi uydukları görülmektedir. Deneyler sırasında artan rotor sıcaklığı nedeniyle ölçülen akımlar, akımın artan değerlerinde hesaplanandan bir miktar daha küçüktür. Buna göre ölçülen momentler, daha yüksek gerilimlerde hesaplanandan daha düşüktür.

6. DEĞERLENDİRME (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Sonlu elemanlar yazılımı ile kütle rotorlu motorun stator ve rotordaki magnetik akı yoğunluğu, magnetik vektör potansiyeli elde edilerek, sürekli çalışma durumunda başarım özellikleri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan sonlu elemanlar yazılımı ile motor parametrelerinin kolaylıkla belirlenmesi olanaklıdır. Ayrıca sonlu elemanlar yazılımı, elektromagnetik alan büyüklükleri ile devre denklemlerinin birlikte çözümlenmesine de olanak sağlamaktadır. Böylece elektrik motoru ve güç elektroniği devrelerinden oluşan sürücü sistemlerin tasarım ve başarım özelliklerinin incelenmesi de gerçekleştirilebilir.

Çalışmada ayrıca çok katmanlı kuram aktarım matrisi ile kütle rotorlu motorun rotorundaki akı yoğunluğu ve sürekli çalışma durumunda başarım özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla oluşturulan bilgisayar programı ile örnek motora uygulamanın sonuçları verilmiştir. Yöntem kütle rotordaki alan dağılımı ve akının rotora girişiyle ilgili bilgi verebilmektedir. Program ile kayma ve besleme gerilimine bağlı olarak rotor parametresi eğri kümeleri elde edilebilir.

Sürekli durumda örnek motorda yapılan hesaplama ve ölçüm değerleri, sonlu elemanlar yazılımı ile çok katmanlı kurama dayalı bilgisayar modelinin geçerlilik derecesini doğrulamıştır. Bu yöntemlerle kütle rotorlu asenkron motorun çalışması sırasında gerek besleme gerek yük tarafından gelebilecek bozucu etkiler belirlenebilir. Sonuçlar, motorun sürücü düzeneklerinin tasarımı sırasında, davranış ölçütlerinin denenmesi ve denetim yönteminin uygunluğunun araştırılmasında benzetim yöntemlerinin kullanılabilirliğini göstermektedir.

Çok katmanlı kuramının aktarım matrisi yönteminin kullanılışı, bu çalışmada yer alan sürekli durum için daha yeğlenebilir olmaktadır. Çünkü, bu yaklaşımla düzenlenen bir benzetim yazılımı, gelişkin ve edinimi belli olanaklara bağlı olan bir SEY yazılımı kadar başarım gösterebilmektedir. Bu belirgin sınırlı amaca dayalı benzetimde, araştırmacının kendisi tarafından yazılım geliştirilebilmektedir. Bilgisayarda bellek ve işlem yükü de daha az olmaktadır. Elde edilen sonuçların SEY yaklaşımı ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması da yöntemin bu açıdan elverişli olduğunu gösterebilir.

7. SEMBOLLER (SYMBOLS)

\bar{A}	Magnetik vektör potansiyeli
B	Magnetik akı yoğunluğu
B_s	Rotor malzemesi doyma akı yoğunluğu
D	Rotor çapı
E	Stator faz sargılarında endüklenen e.m.k.
E_r	Rotordaki e.m.k.

f	Statora uygulanan gerilimin frekansı
f_r	Rotor frekansı
F	Skalar magnetik enerji
H	Magnetik alan şiddeti
\underline{I}_s	Stator akım vektörü
\underline{I}'_r	Statora indirgenmiş rotor akım vektörü
I_m	Mıknatıslanma akımı
J	Eylemsizlik Momenti
\bar{J}	Akı yoğunluğu vektörü
k_e	Enine uç etkisi katsayısı
k_w	Sargı faktörü
L	Rotor boyu
m	Faz sayısı
M	Moment
n	Rotor hızı
n_s	Senkron hız
N_s	Stator fazındaki sarım sayısı
N_{eff}	Stator fazındaki etkin sarım sayısı
N	Katman sayısı
p	Kutup sayısı
P_g	Giriş gücü
P_m	Mekanik güç
R_s	Stator direnci
R_r	Rotor direnci
s	Kayma
S	Katman kalınlığı
T_n	n. bölge aktarım matrisi
V_s	Stator gerilimi
w_s	Senkron açısal hız
w_r	Rotor açısal frekansı
w_n	n. bölgenin açısal frekansı
Z	Yüzey empedansı
Z_r	Statora indirgenmiş rotor empedansı
X_s	Stator reaktansı
X_r	Statora indirgenmiş rotor reaktansı
X_m	Mıknatıslanma reaktansı
θ_r	Rotor empedansı faz açısı
μ	Magnetik geçirgenlik
μ_0	Havanın magnetik geçirgenliği
μ_n	n. katmanın magnetik bağlı geçirgenliği
e	Elektriksel alan
σ	Malzemenin iletkenliği
σ_n	n. katmanın iletkenliği
ρ	Özgül direnç
λ	Dalga boyu
e.m.k.	Elektromotor kuvvet
m.m.k.	Magnetomotor kuvvet
SEY	Sonlu elemanlar yazılımı

8. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Chalmers, B. J., Woolley I., "General Theory of Solid Rotor Induction Machines", **Proc.IEE**, 119, pp.1301-1308, 1972
- Chalmers, B. J., Woolley I., "End Effects in Unlaminated Rotor Induction Machines", **Proc.IEE**, 120, pp.641-646, 1973
- Finzi, L. A., Paice, D.A., "Analysis of the Solid Iron Rotor Induction Motor for Solid State Speed

- Controls”, **IEEE Trans.**, Vol. PAS-87, pp. 590-596 , 1968
4. Chalmers, B. J., Saleh, A.M., “Induction Machine with Thin Secondary of Unlaminated Steel”, **Electric Machines and Power Systems**, No.9, pp.23-31, 1984
 5. Chalmers, B. J., Hamdi, E.S., “Multi-layer Analysis of Composite-Rotor Induction Machines”, **Electric Machines and Electromechanics**, No.7, pp.331-338, 1982
 6. Önbilgin, G., Şenlik, İ., “Computer Simulation for the Dynamic Behaviour of Variable Speed Solid Rotor Induction Machines”, **Proc. Of Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM’92)**, Vol.2, pp. 657-661,1992
 7. Hupponen, J., “High-Speed Solid-Rotor Induction Machine – Electromagnetic Calculation and Design”, Ph. Dr. Thesis, **Lappeenranta University of Technology**, Finland, 2004.
 8. Brauer, J.R., “Handbook of Electric Motors” , **Principles of Energy Conversion, Taylor&Francis Group**, LLC, pp.15-24 , 2004
 9. Kanerva, S., “Simulation of Electrical Machines, Circuits and Control Systems Using Finite Element Method and System Simulator”, **Helsinki University of Technology Department of Electrical and Communications Engineering Laboratory of Electromechanics**, 2005
 10. Zdim, M.E., “Non-Linear Models for the Design of Solid Rotor Induction Machines”, **IEEE Transactions on Magnetic**, Vol. 35, No. 3, pp. 1310-1313, 1999
 11. Bumby, J.R., Spooner, E. and Jagiela, M., “Equivalent Circuit Analysis of Solid-Rotor Induction Machines with Reference to Turbocharger Accelerator Applications” **IEE Proc.-Electr. Power Appl.**, Vol. 153, No.1, pp. 31-39, 2006
 12. Yang, T., Zhou, L. and Jiang, W., “Calculation of Eddy Current Losses in a Solid-Rotor Cage Induction Motor by Finite Element Analysis”, **Electric Machines and Systems Conference (ICEMS 2008)**, pp. 3656-3659, 17-20.10.2008
 13. Ibtouen, R., Kechroud , R., Touhami, O. and Mekhtoub, S, “Complex Finite Element Analysis of a Solid Rotor Induction Motor”, **Electric Machines and Drives Conference**, vol.3, pp. 1606 - 1610 ,1-4.06. 2003
 14. Freeman, E.M., “Travelling Waves in Induction Machines: Input Impedance and Equivalent Circuits”, **Proc.IEE**, 115, pp.1772-1776, 1968