

Özel Uygulamalar İçin DC ve AC Sürekli Mıknatıslı Motorların Optimum Elektromanyetik Tasarımı

Metin AYDIN

Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi,
Kocaeli Üniversitesi, Eski İstanbul Yolu 10. km
41380, İzmit/Kocaeli

e-posta: metin.aydin@kocaeli.edu.tr

Anahtar sözcükler: Elektrik Motorları, Sürekli mıknatıslı motorlar, Sabit mıknatıslı motorlar, Motor Tasarımı

Özet

Bu çalışmada, özel uygulamalar için AC ve DC sürekli mıknatıslı (SM) motorların tasarım yöntemi açıklanmış ve optimum tasarımın geliştirilen SM motor modeli ile nasıl elde edileceği bir SM disk motor tasarım örneği üzerinde gösterilmiştir. SM motor tasarım aşamalarının neler olduğu özetlenmiş, yapısal ve termal tasarım veya analizlerin özel uygulamalar için yapılan tasarımlarda gerekliliği açıklanmıştır. Ayrıca, SM motorlar için sistematik bir tasarım metodu verilmiş, ve bu metodun etkinliği deneysel sonuçlar ile gösterilmiştir.

Abstract

In this paper, design method for AC and DC permanent magnet (PM) motors is clarified for special applications, and details to find the optimum design is illustrated using a PM disk motor as an example. PM motor design steps are also summarized, the necessity of structural and thermal designs or analyses is also explained. In addition, a systematic design method is also provided and the effectiveness of this method is confirmed by the experimental data.

1. Giriş

Sürekli mıknatıslı AC ve DC motorlar günümüzde bir çok uygulamada sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Bu motorlar, asenkron yada DC motorların kullanılamayacağı uygulamalar başta olmak üzere çok sayıda uygulamada, verimlerinin yüksek olması, hacimlerinin ve ağırlıklarının az olması, moment yoğunluklarının ve moment/ağırlık oranlarının fazla olması nedeniyle tercih sebebi olmaya başlamıştır [1-3].

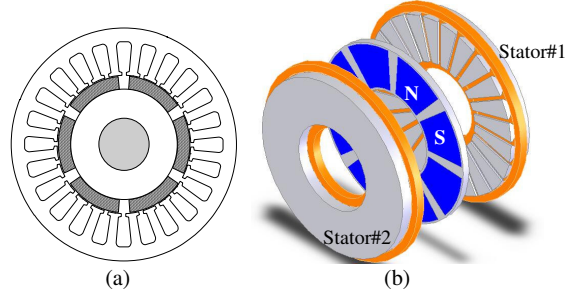
Sürekli mıknatıslı radyal akılı adı da verilen standart motorların tasarımı, tüm dünyada bir çok firma tarafından belirli güç ve hızlarda yapılmaktadır. Ancak, her ne kadar tasarımda kullanılabilecek yazılımlar olsa bile, özel bir uygulama için motor tasarımı uzmanlık istemekte ve zaman almaktadır. Standart dışı sürekli mıknatıslı motorların tasarımı ise, başlı başına uzmanlık gerektiren, motor yapısına bağlı olarak denklemleri değişen, modelleme ve sonlu elemanlar analizi (SEA) gibi analizler olmaksızın tasarımın sonlandırılmayacağı, zaman alıcı güç bir iştir.

Bu çalışmada hem standart SM motorlar için hem de eksenel akılı SM motorlar için sistematik bir tasarım metodu verilmiş, özel uygulamalar için AC ve DC sürekli mıknatıslı motorların tasarımı formüllerle açıklanmıştır. Çalışmalarda sadece yüzey mıknatıslı tip motorlar ele alınmış; dahili, yüzeye gömülü veya diğer tür SM motorlar

kapsam dışı bırakılmıştır. Radyal ve eksenel akılı SM motorların boyut oranı veya çap oranı kullanılarak nasıl optimizasyonunun yapıldığı ve dizayn kriterlerine uygun tasarımın nasıl bulunduğu 2-rotor-1-statorlu bir disk motor örneği kullanılarak gösterilmiştir. Tasarım süreci, sonlu elemanlar analizinin motor tasarımda nasıl kullanılacağı, yapısal ve termal tasarım yada analize ihtiyaç olup olmadığı detaylı bir biçimde açıklanmıştır. Son olarak, tasarım denklemlerini ve optimizasyon metodunu kullanarak tasarlanan örnek motor prototipinin deneysel sonuçları da kısaca verilmiştir.

2. Radyal ve Eksenel Akılı SM Motorların Tasarım Aşamaları

Şekil 1'de radyal akılı standart bir sürekli mıknatıslı motor ile eksenel akılı yüzey mıknatıslı çift-stator-tek-rotorlu bir sürekli mıknatıslı motor gösterilmiştir. Bu tip motorların statoru düz yada spiral bir tarzda sarılmış silindirik lamineli yapıda, rotoru ise radyal akılı motorlarda (RAM) silindirik rotora yerleştirilmiş, eksenel akılı motorlarda (EAM) ise disk yüzeyine yerleştirilmiş mıknatıslardan oluşur. Stator motorun yapısına bağlı olmak koşuluyla, yoğunlaştırılmış, dağıtılmış, dalga, Gramme tip veya sırt sırta bağlı sargılar kullanılabilir. Temel akının yönü RAM larda mıknatıs N – stator – mıknatıs S – rotor – mıknatıs N şeklindedir. Şekil 1 (b) de verilen türde bir sürekli mıknatıslı EAM için ise temel akı yönü, mıknatıs N – stator#1 – mıknatıs S – stator#2 – mıknatıs N şeklindedir [4].

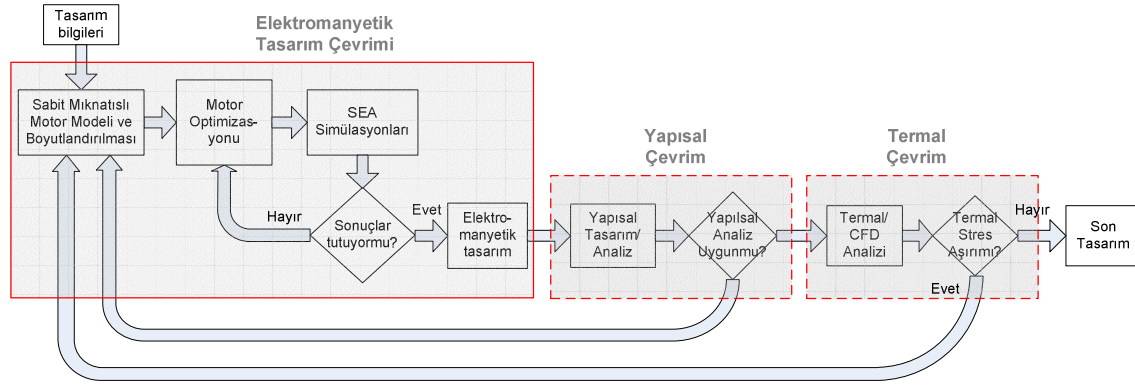


Şekil 1: Standart radyal akılı sürekli mıknatıslı motor (a), Eksenel akılı sürekli mıknatıslı disk motor (b)

Sürekli mıknatıslı motorların tasarım süreci günümüzde artık sadece elektromanyetik tasarımdan ibaret değildir. Şekil 2'den görüldüğü gibi, özel uygulamalar için tasarlanacak motor elektromanyetik, yapısal ve termal tasarım yada analiz aşamalarını geçtikten sonra sonlandırılmalıdır. Tasarım aşamalarının her biri optimum

tasarımı bulabilmek için kendi içinde bir çevrim oluşturmak zorundadır. Elektromanyetik tasarım kendi içerisinde motor modeli, optimizasyon, 2 yada 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi gibi uzun, yorucu ve zaman alıcı aşamalardan ibarettir. Motor modeli, sürekli mıknatıslı motorun yapısına bağlı olarak, sonlu elemanlar yazılımının türünün 2 yada 3 boyutlu olmasına göre değişir. Elde edilen tasarım yada tasarımlardan uygulamanın özelliklerine uygun olanı yada olanları SEA ile çözümlenerek tasarım kriterlerine uygunluğu belirlenir. Bu döngülü proses kriterlerin zorluk derecesine göre birkaç defa tekrarlanabileceği göz ardı edilmemelidir. Elektromanyetik tasarım aşamasını geçmiş bir motor, yapısal tasarım yada analiz aşamasına geçemez ise elektromanyetik tasarım aşamasına geri dönmeli, ve rotor yapısı uygulamanın hızına göre değiştirilmelidir. Yüksek hızlı uygulamalarda, rotorun yapısal bitinliği

korumak için tasarımın bu aşaması çok önemlidir. Şayet uygulamada yüksek rotor hızları söz konusu değilse yapısal analize gerek kalmayabilir. Tasarım sürecinde son aşama ise termal streslerin kontrol edilmesidir. Bu bir SEA olabileceği gibi CFD türü bir çalışma da olabilir. Benzer şekilde elektromanyetik ve yapısal tasarım aşamalarını geçen bir motorun termal tasarım aşamasında sorun yaratması elektromanyetik tasarım aşamasına geri dönülmesi demektir. Akım yoğunluğu düşük uygulamalarda veya çok sıcak ortamlarda çalışmayan sürekli mıknatıslı motorlarda termal tasarıma gerek kalmayabilir. Tasarımcının tecrübesi, bu tip yapısal ve termal analizlere gerek olup olmayacağını belirleyen en önemli unsurdur. Ancak, özel bir uygulama için tasarlanan sürekli mıknatıslı bir motor, tüm tasarım aşamalarını geçtikten sonra prototip veya üretim aşamasına geçilmelidir.



Şekil 2: Sürekli mıknatıslı makinelerin tasarım aşamaları

3. SM Motorların Modellenmesi ve Optimum Elektromanyetik Tasarımı

A. Motor Tasarım Denklemleri

Farklı tip elektrik motorlarının tek bir model kullanarak analizi ve tasarımı çok güç bir iştir. Genelleştirilmiş motor boyutlandırma denklemleri daha önce geliştirilmiş, doğruluğu ve işlerliği gösterilmiştir [4-6]. Bu yöntem sayesinde elektrik motorlarının optimum boyutları tasarım kriterlerine göre elde edilir. Motorları, maksimum güç yoğunlu noktası, maksimum verim noktası yada minimum motor ağırlığı için tasarlamak burada açıklanacak olan sistematik metot ile mümkündür.

Eğer stator kaçak endüktansı ve direnci ihmal edilirse herhangi bir elektrik makinesinin çıkış gücü

$$P_R = \eta \frac{m}{T} \int_0^T e(t) i(t) dt = \eta m K_p E_{PK} I_{PK} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $e(t)$ ve E_{pk} hava aralığı faz EMF si ve tepe değeridir. Benzer şekilde $i(t)$ ve I_{pk} ise faz akımı ve tepe değeri, η motor verimi, m faz sayısı, T ise periyot olarak tanımlanmıştır. (1) Denklemindeki K_p katsayısı elektriksel güç katsayısı olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$K_p = \frac{1}{T} \int_0^T f_e(t) f_i(t) dt \quad (2)$$

Bu ifade de $f_e(t) = e(t)/E_{pk}$ ve $f_i(t) = i(t)/I_{pk}$ endüklenen gerilim ve akımın düzgelenmiş değerleri olarak verilebilir.

Akım dalga şeklini tasarımda hesaba katabilmek için akım dalga faktörü, K_i , aşağıdaki gibi tanımlanmıştır,

$$K_i = \frac{I_{PK}}{I_{rms}} = \left(\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{i(t)}{I_{PK}} \right)^2 dt} \right)^{-1} \quad (3)$$

Hava aralığı faz EMF sinin tepe değeri standart SM motorlar ve EAM için denklem (4) de verilmiştir.

$$E_{PK} = \begin{cases} K_e N_t B_g \frac{f}{p} \lambda_o D_o L_e & \text{RAM} \\ K_e N_t B_g \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) D_o^2 & \text{EAM} \end{cases} \quad (4)$$

Burada K_e EMF faktörü, N_t faz başına sarım sayısı, B_g hava aralığı akı yoğunluğu, f frekans, p kutup çifti, λ ise çap oranı olarak tanımlanır. Çap oranı standart radyal akılı motorlar için D_g/D_o olarak, eksenel akılı motorlar için ise D_i/D_o olarak tanımlanır. D_o motor dış çapı, D_i ise motor iç çapıdır. L_e etkin effective stack length olarak tanımlanmıştır.

Tasarım denklemlerindeki faz akımının tepe değeri denklem (5) de verilmiştir;

$$I_{PK} = \begin{cases} \frac{1}{1 + K_\phi} K_i A \pi \lambda_o \frac{D_o}{2 m_1 N_t} & \text{RAM} \\ \frac{1}{1 + K_\phi} K_i A \pi \frac{1 + \lambda}{2} \frac{D_o}{2 m_1 N_t} & \text{EAM} \end{cases} \quad (5)$$

Bu denklemde A toplam elektriksel yüklem, K_ϕ ise rotor elektriksel yüklemesinin stator yüklemesine oranı olarak tanımlanmıştır. SM makinelerde rotorda sargı olmadığı için $K_\phi=0$ olarak alınmalıdır.

Bu denklemler birleştirilirse, standart SM ve eksenel akılı SM disk makineler için çıkış gücü kolaylıkla elde edilir. Şayet çıkış gücü D^2L denklemi olarak yazılmak istenirse;

$$P_R = \begin{cases} \frac{m}{m_1} \frac{\pi}{2} K_e K_i K_p \eta B_g A \frac{f}{p} \lambda_o^2 D_o^2 L_e & \text{RAM} \\ \frac{m}{m_1} \frac{\pi}{2} K_e K_i K_p K_L \eta B_g A \frac{f}{p} (1-\lambda^2) \frac{1+\lambda}{2} D_o^2 L_e & \text{EAM} \end{cases} \quad (6)$$

Motor çıkış gücünü D^2L denklemi yerine D^3 olarak hem radyal hem de eksenel akılı motorlar için yazmakta mümkündür;

$$P_R = \begin{cases} \frac{m}{m_1} \frac{\pi}{2} K_e K_i K_p K_L \eta B_g A \frac{f}{p} \lambda_o^2 D_o^3 & \text{RAM} \\ \frac{m}{m_1} \frac{\pi}{2} K_e K_i K_p \eta B_g A \frac{f}{p} (1-\lambda^2) \frac{1+\lambda}{2} D_o^3 & \text{EAM} \end{cases} \quad (7)$$

Radyal ve eksenel akılı SM motorlar için verilmiş bu denklemlerde P_R anma gücü yada motorun mil gücü, m motorun faz sayısı, m_1 statorun faz sayısı, K_i akım dalga faktörü, K_p elektriksel güç dalga faktörü, η makinenin verimi, B_g hav aralığındaki akı yoğunluğu, A toplam elektriksel yüklem, D_o, D_g, D_i ise motorun dış, hava aralığı ve iç çapları, $K_\phi=A_r/A_s$ elektriksel yüklem oranı, ve $K_L=D_o/L_e$ ise eksenel akılı motorlarda boyut oran katsayısı olarak tanımlanmıştır.

B. Motor Optimizasyon Aşaması

Yukarıda açıklanan denklemler radyal ve eksenel akılı SM motorlara rahatlıkla uygulanabilir ve tasarım için optimum motor boyutları elde edilebilir. Bu aşamada bir tasarım örneği olarak çift-rotor-tek-statorlu bir eksenel akılı SM disk motor alınmıştır. Bu tip bir disk motor için boyutlandırma denklemleri verilmiş, optimum motor tasarımının eldeki tasarımlar içinden nasıl bulunabileceği açıklanmıştır.

Bu tip bir disk motorun dış çapı yukarıda verilen çıkış gücü ifadesinden,

$$D_o = 3 \sqrt{P_R / \left(\frac{m}{m_1} \frac{\pi}{2} K_e K_i K_p \eta B_g A \frac{f}{p} (1-\lambda^2) \frac{1+\lambda}{2} \right)} \quad (8)$$

olarak elde edilir. Stator sargılarının sargı sonları da hesaba katılırsa toplam dış çap,

$$D_{tot} = D_o + 2W_{cu} \quad (9)$$

şeklinde hesaplanır. Bu denklemde W_{cu} sargı sonunun motor çapına radyal yönde katkısıdır. Bu katkı ise gramme tip bir sargı için şu şekilde hesaplanır:

$$W_{cu} = \frac{D_i}{2} - \sqrt{\frac{(D_i^2 - 2A_s D_g)}{4K_{cu} J_s}} \quad (10)$$

Burada, J_s akım yoğunluğu ve K_{cu} ise bakır dolgu faktörü olarak tanımlanmıştır.

İlgilendiğimiz motor çift rotor tek statorlu bir disk motor olduğundan makinenin toplam eksenel uzunluğu L_e rotor, stator ve hava aralığının eksenel uzunluğa katkısı ile bulunur;

$$L_e = L_s + 2L_r + 2g \quad (11)$$

Bu denklemde L_s statorun eksenel uzunluğu, L_r rotorun eksenel uzunluğu, g ise hava aralığıdır. Statorun eksenel uzunluğu, stator nüvesinin kalınlığı ile sargı sonunun etkisinin toplamına eşittir:

$$L_s = L_{cs} + 2W_{cu} \quad (12)$$

Stator nüve kalınlığı,

$$L_{cs} = \frac{B_g \alpha_p \pi D_o (1+\lambda)}{B_{cs} 4p} \quad (13)$$

olarak yazılabilir. Bu eşitlikte, B_{cs} stator nüvesinin akı yoğunluğu, ve α_p ise ortalama akı yoğunluğunun akı yoğunluğunun tepe değerine oranı olarak tanımlanmıştır.

Her bir rotorun eksenel uzunluğu rotor nüvesi ile mıknatısın eksenel uzunlukları toplamına eşittir.

$$L_r = L_{cr} + L_{PM} \quad (14)$$

Rotor nüve ve mıknatıs kalınlıkları ise denklem (15) ve (16) da verildiği gibi hesaplanır:

$$L_{cr} = \frac{B_u \pi D_o (1+\lambda)}{B_{cr} 8p} \quad (15)$$

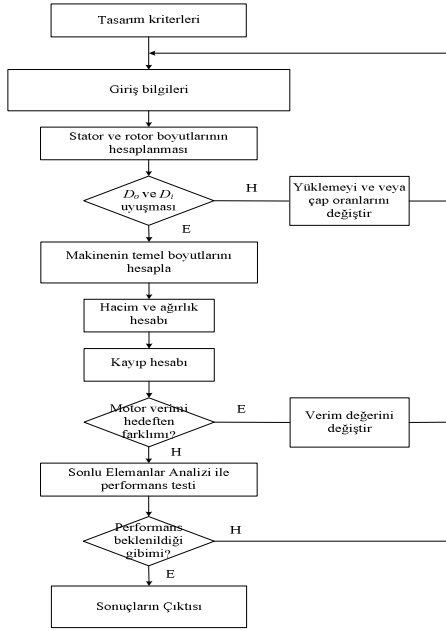
$$L_{PM} = \mu_r \frac{B_g}{B_r - \frac{K_f}{K_d} B_u} (g + W_{cu}) \quad (16)$$

Bu denklemlerde B_{cr} rotor akı yoğunluğu, B_u mıknatıs yüzeyinde elde edilebilecek akı yoğunluğu, μ_r mıknatısın "geri tepki bağıl geçirgenliği", B_r mıknatısın "artık akı yoğunluğu", K_d kaçak akı faktörü ve K_f ise hava aralığı akı yoğunluğu faktörüdür.

Motorun toplam eksenel uzunluğu olan L_e , (10)-(16) bağıntıları birleştirilerek aşağıdaki gibi elde edilir:

$$L_e = \frac{\pi D_o (1+\lambda)}{4p} \left(\frac{B_g \alpha_p}{B_{cs}} + \frac{B_u}{B_{cr}} \right) + (2g + 2W_{cu}) \left(1 + \frac{\mu_r B_g}{B_r - \frac{K_f}{K_d} B_u} \right) \quad (17)$$

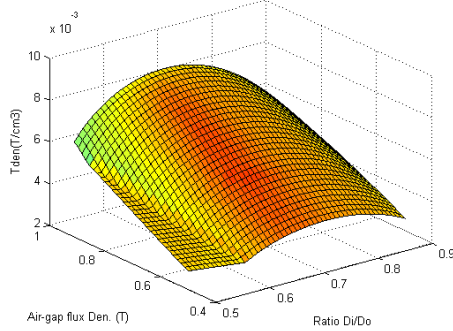
Yukarıda açıklanan tasarım denklemleri her bir SM motor türü için yazılır ve programlanırsa, istenen tasarım kriteri yada kriterleri için uygun (RAM için) boyut oranı veya (EAM için ise) çap oranı elde edilir. Başka bir deyişle, doğru olarak belirlenen boyut oranı yada çap oranı optimize edilmiş elektrik makinesinin ana boyutlarını belirleyen en önemli parametredir. SM motor tasarımı akış diyagramı Şekil 3'de açık bir şekilde gösterilmiştir. Bu akış diyagramı motorun performansını sonlu elemanlar analizinde test etme aşamasına geçmeden önce optimizasyonu yapılmış motor datasıdır.



Şekil 3: Sürekli mıknatıslı (RAM veya EAM) motorların tasarım akış diyagramı

C. Optimum Motor Tasarımının Bulunması

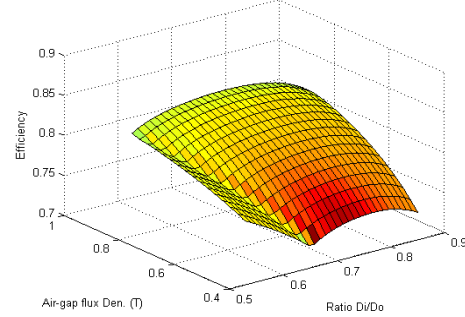
Bu kısımda, yukarıda açıklanan tasarım çalışması küçük güçlü (500W) 2-rotor-1-statorlu sürekli mıknatıslı bir disk motor için gerçekleştirilmiştir. Uygulamada geometrik kısıtlamalar da mevcuttur. Optimizasyon alıştırmasında moment/hacim oranı maksimum yapılacak şekilde tasarım kriteri seçilmiştir. Yukarıda açıklanan prosedür programlanarak moment yoğunluğu değerleri, hava aralığı akı yoğunluğu ve disk motorun çap oranı için elde edilirse, maksimum moment yoğunluğu noktası elde edilir. Şekil 4'te bu grafik ve optimum nokta gösterilmiştir. Bu nokta için optimum çap oranı ve optimum akı yoğunluğu değerleri elde edildiğine göre motor hakkında istenen tüm boyut bilgilerine ulaşılabilir. Benzer çalışma, moment/hacim oranı maksimum yapmak yerine moment/ağırlık yada motor verimini maksimum yapacak şekilde de tekrarlanabilir. Şekil 5'te ise motor veriminin çap oranı ve hava aralığı akı yoğunluğuna göre değişimi gösterilmiştir. Bu tasarım kriteri için de benzer şekilde optimum nokta ve motor boyutları rahatlıkla elde edilebilir. Moment yoğunluğunu kullanarak elde edilen optimum değerler Tablo 1'de özetlenmiştir.



Şekil 4: Moment yoğunluğunun çap oranı ve hava aralığı akı yoğunluğuna göre değişimi

Tablo1: Maksimum Moment Yoğunluğu Noktasında Parametreler

Optimum noktada güç yoğunluğu	0.53W/cm ³
Optimum noktada çap oranı	$D_1/D_2=0.67$
Optimum noktada akı yoğunluğu	$B_g=0.79$ T
Optimum noktada motor verim	$\eta = 86.0\%$



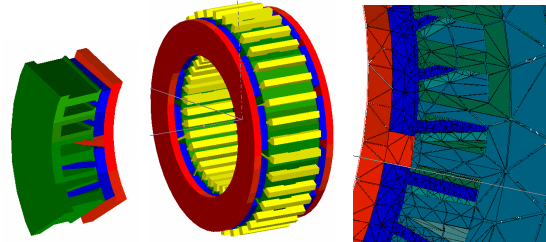
Şekil 5: Motor veriminin çap oranı ve hava aralığı akı yoğunluğuna göre değişimi

Ayrıca, maksimum moment yoğunluğu noktasında elde edilen motor veriminin maksimum verim olmadığı unutulmamalıdır. Maksimum verim noktası Şekil 5'te anlaşılabileceği gibi yaklaşık % 89 civarındadır, ve bu nokta farklı bir tasarıma karşılık gelmektedir. Son olarak, verim hesabında bakır kayıpları, stator demir kayıpları ve mekanik kayıplar hesaba katılmıştır.

4. Sonlu Elemanlar Analizinin SM Motor Tasarımında Kullanılması

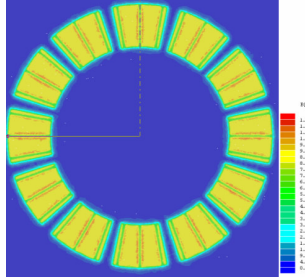
Sonlu elemanlar analizinin (SEA) elektrik makinelerinin analizinde kullanılmasının amacı, motor yada generatörün stator ve rotor nüvesi, diş, oluk gibi farklı noktalarında doyum seviyeleri hakkında bilgi sahibi olmak, makine modelinin doğruluğunu test etmek ve makineden alınabilecek vuruntu, dalgacık, darbe ve ortalama moment seviyelerini belirlemektir. Farklı SEA programları ile motor kayıp bileşenleri ve motor verimi dahi hesaplanabilir. Genelde, radyal akı standart SM makinelerde 2 boyutlu SEA, eksenel akı SM makinelerde ise 3 boyutlu SEA kullanılır. Günümüzde, MagNet, Maxwell, Flux, Vector Field, Jmag gibi bir çok yazılım motorlar için SE analizinde kullanılmaktadır ve bu programların doğrulukları bir çok araştırmacı tarafından gösterilmiştir [6-7].

Çift rotorlu EAM analizinde kullanılan sonlu elemanlar modelleri ve yüksüz analizde kullanılan modelin mesh yapısı Şekil 6'da gösterilmiştir. Motorun yapısına bağlı olarak simetri özelliğini kullanmak özellikle 3 boyutlu analizlerde

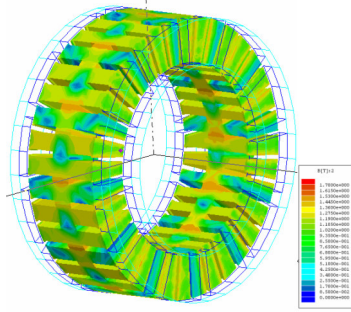


Şekil 6: Örnek olarak kullanılan SM disk motorun 2 kutup modeli (a), tam modeli (b) ve yüksüz analizde kullanılan modelin mesh yapısının görünümü (c).

ciddi boyutlarda zaman kazandırıcı bir unsursur. Standart SM motorlarda ise genelde 2 boyutlu SEA kullanmak yeterlidir. Şekil 7 ve Şekil 8’de tasarım çalışması yapılan EAM’un hava aralığı akı yoğunluğunun değişimi ve stator akı yoğunluğunun değişimi gösterilmiştir. Bu tip grafiklerden ortalama hava aralığı akı yoğunluğu, hava aralığı, stator veya rotordaki maksimum akı yoğunluk değerleri elde edilerek stator yada rotorda kullanılan malzemelerin farklı çalışma noktalarında doyum değerleri elde edilebilir. Tablo 2’de ise optimizasyon ve SEA ile elde edilen değerlerin karşılaştırılması verilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi her iki yaklaşım arasında iyi bir uyum mevcuttur.



Şekil 7: Hava aralığı akı yoğunluğunun değişimi



Şekil 8: Stator akı yoğunluğunun değişimi

Tablo2: Model ve SEA Sonucu Elde Edilen Akı Yoğunluklarının Karşılaştırılması

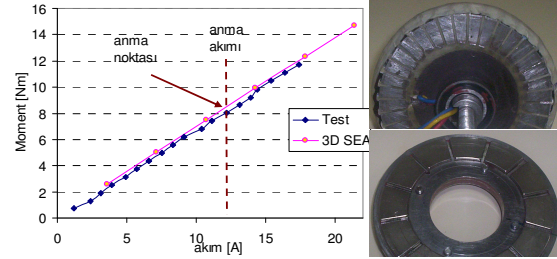
	Stator		Hava aralığı		Rotor
	B_{D-max}	B_{D-min}	B_{g-max}	B_{g-avg}	B_{r-max}
SEA	1.48	1.50	1.12	0.75	1.6
Model	1.50	1.5	1.10	0.79	1.65

Günümüzde SEA doğru yapıldığı taktirde elde edilen sonuçlar gerçek motor performansına çok yakın çıkmaktadır. Bu nedenle, SEA’de bir motor analizi yapılırken dikkat edilmesi gereken bir çok önemli nokta mevcuttur. Bunlar arasında; mıknatıs malzemesinin sıcaklıkla değişimini ve sıcaklık değişim katsayısını hesaba katmak, mıknatıs ile rotor arasındaki yapıştırıcıdan kaynaklanan hava aralığını modellemek, mıknatıslama yönlerine ve modelde kullanılan parçaların sivri köşelerine dikkat etmek, motorun bir kutbu yada kutup çifti analiz ediliyorsa simetri yüzeylerini doğru tesbit etmek, kullanılan akımların tepe değerlerini ve sarım sayılarını hesaba katmak sayılabilir. Kullanıcının bu gibi noktalara modelleme ve analiz sırasında dikkat etmesi deneysel çalışmalarla olan uyumu güçlendirecektir.

5. SM Motor Modelinin Doğrulaması

Ortaya koyulan modelin ve SEA’nin doğruluğunu değerlendirmek için motor prototipi üretilmiş ve ilk test

sonuçları alınmıştır. Endüklenen gerilim, hava aralığı akı yoğunluğu, yüklü durumda moment değerleri vs deneysel olarak elde edilmiş ve öngörülen tasarımla deneysel sonuçların uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Şekil 9’da prototip motorun resimleri ile SEA ve prototip ile elde edilen moment-akım değişimleri örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 9: Çalışmada kullanılan motor prototipi ve simülasyon-deneysel data arasındaki uyum

6. Sonuçlar

Bu çalışmada AC ve DC sürekli mıknatıslı (SM) motorların tasarım yöntemi açıklanmış, tasarımın nasıl yapılması gerektiği, optimum tasarımın verilen tasarım kriterlerine göre nasıl bulunacağı ve nasıl değiştiği açıklanmıştır. Motor tasarımın sadece elektromanyetik tasarımdan ibaret olmadığı, yapısal ve termal tasarımın uygulamaya bağlı olarak gerekliliğinin önemi üzerinde durulmuştur. Örnek olarak özel bir uygulama için 500W’lık çift-rotor-tek-rotorlu bir sürekli mıknatıslı EAM alınmış, optimizasyon ve SEA yapılarak deneysel sonuçlar elde edilmiş ve sonuçlar arasındaki uyum kısaca gösterilmiştir. Böylece kullanılan model ve SEA yazılımına olan güvenin etkinliği test edilmiştir.

Kaynaklar

- [1] T. Sebastian, G. R. Slemon and M. A. Rahman, “Design considerations for variable speed permanent magnet motors”, *Proceedings of International Conference on Electrical Machines (ICEM)* 1986, pp.1099-1102
- [2] P. Campbell, “Principles of a permanent-magnet axial-field DC machine”, *Proc. IEE*, Vol. 121, Dec. 1974, pp.1489-1494.
- [3] C. C. Jensen, F. Profumo and T. A. Lipo, “A low loss permanent magnet brushless DC motor utilizing tape wound amorphous iron”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 28, No. 3, May/June 1992, pp.646-651.
- [4] S. Huang, M. Aydin and T. A. Lipo, “A direct approach to electrical machine performance evaluation: Torque density assessment and sizing optimization”, *15th International Conference on Electrical Machine ICEM* 2002, Belgium.
- [5] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi, and T. A. Lipo, “A General Approach to Sizing and Power Density Equations for Comparison of Electrical Machines,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, *IEEE Trans.* IA-34, No.1, pp.92-97, 1998.
- [6] M. Aydin, S. Huang and T. A. Lipo, “Design and electromagnetic field analysis of non-slotted and slotted TORUS type axial flux surface mounted disc machines”, *IEEE International Conference on Electrical Machines and Drives*, Boston, 2001, pp.645-651.
- [7] F. Caricchi, F. Crescimbeni, A. Di Napoli and E. Santini, “Optimum CAD-CAE design of axial flux permanent magnets motors”, *Proceedings of International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Manchester Univ, Manchester, UK, 1992, pp.637-641.