

Fırçasız DC ve AC Sürekli Mıknatıslı Motor Tasarımı ve Kullanılan Yazılımlar

Brushless DC and AC Permanent Magnet Motor Design and Software Tools

Yücel Demir¹ ve Metin Aydın²

¹Ar-Ge Departmanı, MDS Motor Tasarımı Ltd.
Kocaeli Üniversitesi, Teknopark Kampüsü, Yeniköy, İzmit, Kocaeli
yucel@mdsmotor.com

²Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Kocaeli Üniversitesi, Umuttepe Yerleşkesi, İzmit, Kocaeli
metin.aydin@kocaeli.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, sürekli mıknatıslı fırçasız motor tasarımı, tasarım süreçleri ile açıklanmış, standart bir yapı için modern yazılımlar kullanılarak motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Fırçasız DC ve fırçasız AC motorlar arasındaki performans farklılıkları açıklanmış, tasarım yöntemi üç farklı özel yazılım ile tanıtılmıştır. Bu tip motorların tasarımında manyetik analizler ile yapısal ve ısı analizlerin maliyet ve performans açısından önemine vurgu yapılmış ve seri üretim öncesi tasarımda nasıl bir yol izleneceği açıklanmıştır.

Abstract

In this paper, design methodology for brushless permanent magnet motors is clarified by using a standard permanent magnet motor and modern design tools. The performance differences between brushless DC and AC motors are explained and design method is made clear by 3 special design tools. In addition, it was emphasized that the magnetic design and analysis as well as structural and thermal designs are critical during the design stage in terms of cost and performance, and explained the design and analysis process before getting into mass production.

1. Giriş

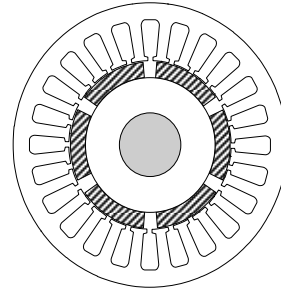
Sürekli mıknatıslı (SM) fırçasız DC ve AC elektrik motorları, küçük ev aletlerinden savunma sanayine, robotikten otomotive birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. SM motorların bu kadar çok tercih edilmelerinin başlıca sebepleri arasında verimlerinin yüksek olması, küçük boyutlarda yüksek güç ve moment üretebilmeleri, moment yoğunluklarının ve moment/ağırlık oranlarının fazla olması gelmektedir [1-4]. Günümüzde çok sayıda firma belirli güç ve hızlarda, endüstriyel sürekli mıknatıslı motor tasarımı ve üretimi yapmaktadır. Bu motorlar genellikle standart uygulamalar için üretilen motorlar olup, özel uygulamalar için (düşük gerilim, yüksek hız, yüksek moment gibi) yapılacak tasarımlar, çeşitli tasarım yazılımları mevcut olmasına rağmen uzmanlık istemekte ve zaman almaktadır. Standart uygulamaların

dışında SM motorların tasarımı ise başlı başına uzmanlık gerektiren, motor yapısına bağlı olarak denklemleri değişen, uygulamanın gereksinimlerinin de hesaba katılması gereken, modelleme ve sonlu elemanlar analizi (SEA) gibi analizler olmaksızın tasarımın sonlandırılmayacağı, gerektiğinde yapısal ve ısı analizlerinde yapılmasına ihtiyaç duyulan zaman alıcı, güç bir iştir.

Bu çalışmada, özel uygulamalar için tasarlanan fırçasız DC ve AC sürekli mıknatıslı senkron motorların tasarım süreçleri, SPEED® yazılımı [5] kullanılarak manyetik tasarımın nasıl gerçekleştirileceği, Flux2D [6] sonlu elemanlar analizi (SEA) yazılımı ile motor manyetik devresinin tasarımının nasıl sonlandırılacağı, Motor-CAD® [7] yazılımı ile motor ısı analizi gibi konulara değinilecektir. Standart 260W'lık bir SM motor üzerinde bu çalışmalar detaylı biçimde açıklanacaktır.

2. Elektrik Motoru Tasarım Aşamaları

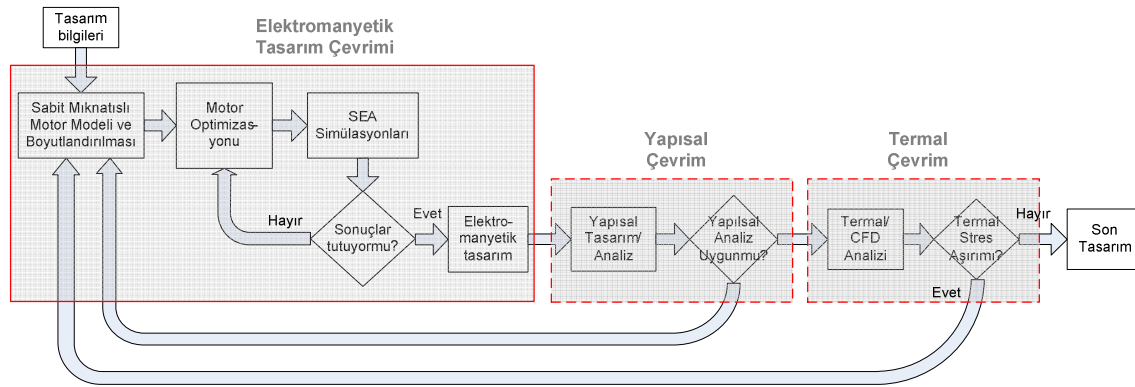
Şekil 1'de radyel akıllı standart bir sürekli mıknatıslı senkron motor kesiti gösterilmiştir. Bu tip motorların statoru silisli lamineli yapı ve oluklara yerleştirilmiş sargılar, rotoru ise silindirik şeklindeki rotora yerleştirilmiş sac, mıknatıslar ve milden oluşur. Statorda motorun yapısına bağlı olmak koşuluyla farklı tip sargılar kullanılabilir. Bu sargı tiplerine örnek olarak konsantre sargı, dağıtılmış sargı, Gramme tip veya sırt sırta bağlı sargılar verilebilir. Temel akının yönü ise mıknatıs N – stator – mıknatıs S – rotor – mıknatıs N şeklinde basitçe özetlenebilmektedir [4].



Şekil 1: SM motor kesiti

Sürekli mıknatıslı senkron motorların tasarım süreci günümüzde artık sadece elektromanyetik tasarımdan ibaret değildir. Şekil 2'den görüldüğü gibi, özel uygulamalar için tasarlanacak sürekli mıknatıslı bir motor, elektromanyetik tasarım ve analiz aşamasının yanı sıra, yapısal ve termal tasarım ya da analiz aşamalarından da geçtikten sonra tasarım aşaması sonlandırılmalıdır. Tasarım aşamalarının her biri en uygun tasarımı bulabilmek için kendi içinde bir çevrim oluşturmak zorundadır. Elektromanyetik tasarım kendi içerisinde motor modeli, optimizasyon, 2 ya da 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 ya da 3 boyutlu olmasını belirler. Elde edilen tasarım ya da tasarımlardan uygulamanın özelliklerine uygun olanı ya da olanları, SEA ile çözümlenerek tasarım kriterlerine uygunluğu belirlenir. Bu döngülü sürecin, tasarım kriterlerinin zorluk derecesine bağlı olarak bir kaç defa tekrarlanabileceği göz ardı edilmemelidir. Elektromanyetik tasarım aşamasını geçmiş bir motor, yapısal tasarım ya da analiz aşamasını geçemez ise elektromanyetik

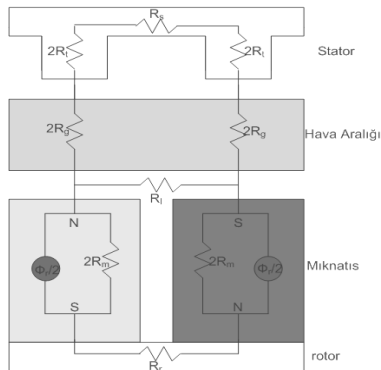
tasarım aşamasına geri dönmeli ve rotor yapısı uygulamanın hızına göre uygun şekilde değiştirilmelidir. Yüksek hızlı uygulamalarda, rotorun yapısal bütünlüğünü korumak için tasarımın bu aşaması çok kritiktir. Şayet uygulamada yüksek rotor hızları söz konusu değilse yapısal analize gerek kalmayabilir. Tasarım sürecinde son aşama ise ısıl streslerin kontrol edilmesidir. Bu bir Motor-CAD® yazılımı ya da ısıl SEA olabileceği gibi CFD türü bir çalışma da olabilir. Tasarımcılar, bu süreçte, kendi yazdıkları ısıl devre modelini de kullanabilirler. Benzer şekilde elektromanyetik ve yapısal tasarım aşamalarını geçen bir motorun termal tasarım aşamasında sorun yaratması elektromanyetik tasarım aşamasına geri dönülmesi anlamını taşıyacaktır. Akım yoğunluğu düşük uygulamalarda veya çok sıcak ortamlarda çalışmayan sürekli mıknatıslı motorlarda termal tasarıma gerek kalmayabilir. Tasarımcının tecrübesi, bu tip yapısal ve ısıl analizlere gerek olup olmayacağını belirleyen en önemli unsurdur. Ancak, özel bir uygulama için tasarlanan sürekli mıknatıslı AC veya DC bir senkron motor, tüm tasarım aşamalarını geçtikten sonra prototip ve takip eden üretim aşamasına geçilmelidir.



Şekil 2: Elektrikli motorların tasarım aşamaları

3. Sürekli Mıknatıslı Elektrik Motorlarının Modellenmesi ve Optimum Elektromanyetik Tasarımı

Sürekli mıknatıslı bir elektrik motorunun tasarımında ilk aşama verilen tasarım kriterleri çerçevesinde manyetik modellemedir. Bu tip bir SM motorun basitleştirilmiş manyetik eşdeğer devresi Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu devrede temel relüktans-



Şekil 3: Sürekli mıknatıslı bir senkron motorun basitleştirilmiş manyetik eşdeğer devresi

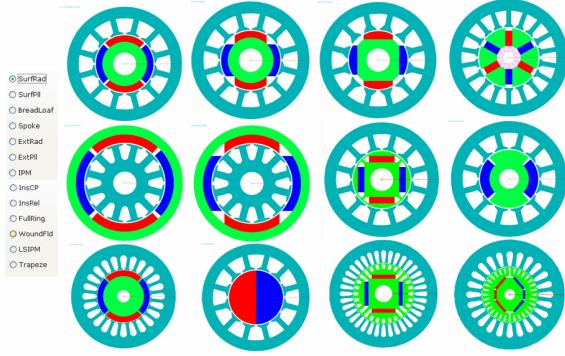
lar hesaba katılması, bir çok kaçak akı bileşeni ihmal edilmiştir. Bu eşdeğer devre, devre analizi yöntemleri ile incelenerek istenen akı bileşenleri ve motorun farklı bölgelerindeki akı yoğunlukları rahatlıkla elde edilebilir. Bu devre kullanılarak motor temel akısı

$$\Phi_m = \frac{R_g}{R_g + R_t + 0.25R_s + 0.25R_{pm}} \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada R_g ve R_t hava aralığı ve stator dış relüktansı, R_s stator arka nüve relüktansı ve R_{pm} ise mıknatıstan kaynaklanan relüktans bileşenidir. Bu eşdeğer devrede relüktanslar manyetik devrenin fiziksel boyutları tarafından belirlenen parametreler olduğu düşünülürse, verilen tasarım detayları için motor ön tasarımını oluşturan boyutlar belirlenebilmektedir. Hatta tam eşdeğer devre oluşturularak, fiziksel boyutların iyileştirilmesi, kaçak akı bileşenlerinin bulunması ve azaltılması gibi çalışmalar da rahatlıkla yapılabilmektedir.

Motor ön tasarımı tamamlandıktan sonra SM motorlar SPEED® yazılımı kullanılarak performans kontrolü ve kritik tasarım parametrelerinin ince ayarı aşamasına sokulurlar. SPEED® yazılımı içerisinde birçok farklı motor türüne ait modelleri barındıran bir yazılımdır. Hatta her bir motor türüne

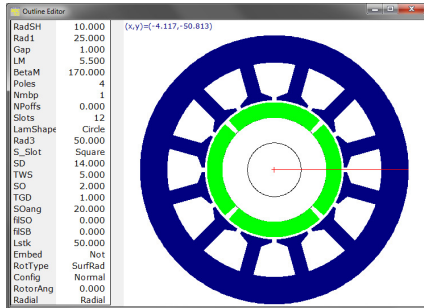
ait birçok farklı tasarım alternatifleri yazılımın içerisinde yer almaktadır. Bu örnek modellerden tasarıma uygun olanın seçilip, daha sonra istenen ölçüler doğrultusunda parametrelerinin değiştirilmesi tasarımcıya bir hayli zaman kazandıracaktır. SPEED® programında yer alan yüzey mıknatıslı, yüzeye yarı gömülü, dahili mıknatıslı, dış rotorlu yüzey mıknatıslı, kendinden kalkışlı sürekli mıknatıslı motorlar gibi bazı SM fırçasız motor tasarım örnekleri Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4: SPEED® yazılımında yer alan örnek tasarım seçeneklerinden bazıları

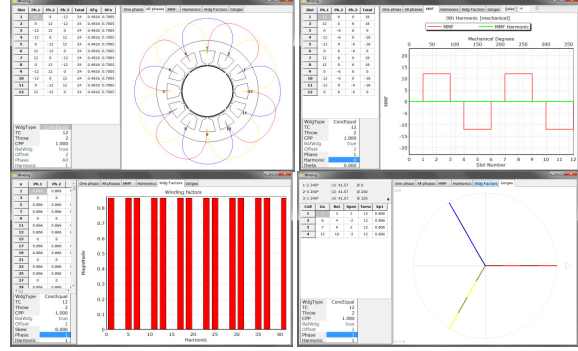
Şekil 4'de yer alan örnek tasarımlardan birisi seçildikten sonra manyetik modelleme sonucu elde edilen ön tasarım boyutları yazılıma girilmektedir. Ayrıca model üzerinde birçok değişiklik yapılabilmekte ve kritik fiziksel parametrelerin ve hatta malzemelerin motor performansına etkisi rahatlıkla incelenebilmektedir. Stator, rotor boyutlarının ayarlanması, mıknatıs şekil ve boyutlarının değiştirilmesi, stator oluk yapısı detaylarının belirlenmesi ve daha birçok parametre değişikliğini SPEED® yazılımı ile mümkündür.

Bu çalışmada kullanılan 260W çıkış gücünde sürekli mıknatıslı senkron motora ait 2 ve 3 boyutlu grafik ara yüzleri Şekil 5'de gösterilmiştir. Grafik ara yüzünden motora ait parametreler görülebilmekte ve rahatlıkla değiştirilebilmektedir. Tasarımın görsel sunulması tasarımcıya tasarım hakkında fikir vermekte ve yapılan tasarım hakkında daha doğru yaklaşımlar yapılmasını sağlamakta ve tasarım ile ilgili hataları bir hayli azaltmaktadır.



Şekil 5: Ön tasarım sonucu elde edilen motor boyutlarının SPEED® yazılımına girilmiş hali ve SPEED® yazılımı grafik ara yüzü çıktısı (2 ve 3 boyutlu)

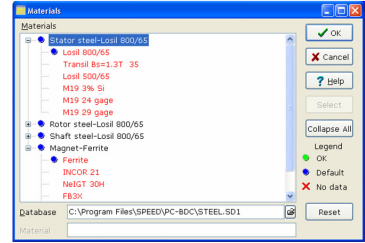
Tasarıma ait bilgiler girildikten sonra sargı yapısının modellenmesi için SPEED® sargı editörü kullanılır. Sargı editörü kullanılarak sargı yapısı türü ve sarım sayısı, seri ve paralel bobinler modellenebilmekte, stator tarafı alan dağılımı MMF, uzay harmoniklerinin dağılımı ve sargının dengeli yada dengesiz olup olmadığı kolaylıkla görülebilmekte ve modellenebilmektedir (Şekil 6). Ayrıca sargı tasarımı, harmonikler, sargı faktörü gibi grafikler sayesinde tasarımın ne kadar iyi olduğu hakkında tasarımcıya fikir vermektedir.



Şekil 6: 260W sürekli mıknatıslı motor sargı yapısı ve diğer veriler

Modellemede son aşama malzeme atamasıdır. Motoru oluşturan bileşenlerde kullanılan malzemeler kullanıcı tarafından oluşturulabileceği gibi, veri tabanında yer alan malzemeler arasından da seçilip atanabilir. Bu çalışmada tasarlanan motorda kullanılan malzemelerin listesi ve malzeme editörü görünümü Şekil 7'da verilmiştir.

Motor bileşeni	Malzeme
Stator	M19
Rotor	M19
Mıknatıs	N30H
Gövde	Al
Mil	Losil 800
İletken	Cu

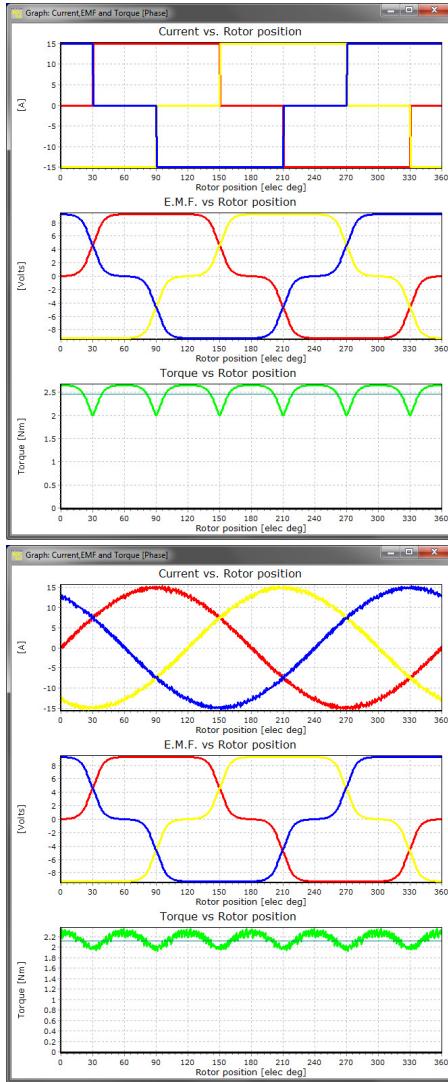


Şekil 7: Motorda kullanılan malzemelerin listesi ve malzeme editörü görünümü

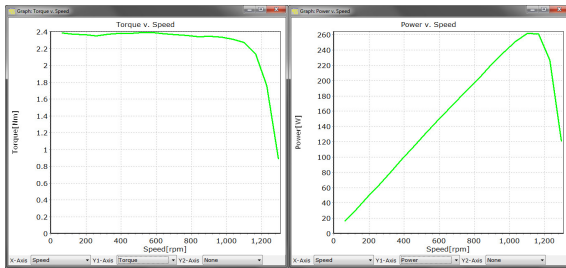
Modelleme de son aşama ise sürücü kısmı ve akım-gerilim gibi elektriksel verilerin girilmesidir. Motor girişlerine ne tür bir gerilim ya da akım uygulanacağı, dalga şeklinin sinüzoidal mi yoksa kare dalgamı olacağı bu aşamada belirlenir. Fırçasız DC ve fırçasız AC motor arasındaki temel fark akım besleme şeklidir. Motor yapıları arasında ciddi farklılıklar mevcut değildir. Şekil 8' fırçasız DC ve fırçasız AC olarak beslenen sürekli mıknatıslı senkron motorların besleme akım dalga şekillerinin yanında zıt EMK ve moment değişimleri verilmiştir. Beklendiği gibi motor çıkış momentı fırçasız DC motor olarak beslemede motor tasarımı fırçasız DC için yapıldığından bir miktar daha yüksektir. Ayrıca moment dalgalanması fırçasız AC beslemeye göre tasarım nedeniyle daha düşük çıkmaktadır.

Bu motorun moment-hız karakteristiği de SPEED® yazılımı ile kolaylıkla elde edilebilmekte, motorun anma hızı ve

momenti, maksimum hızı, düşük hızlardaki moment, motorun farklı hızlarda veriminin değişimi, motorun sabit güç bölgesi ve sabit moment bölgesi aralığı gibi önemli parametreler bu sayede elde edilebilmektedir.



Şekil 8: Tasarlanan sürekli mıknatıslı motorun fırçasız DC ve fırçasız AC motor olarak sürülmesi sonucunda elde edilen zıt-EMK ve çıkış moment



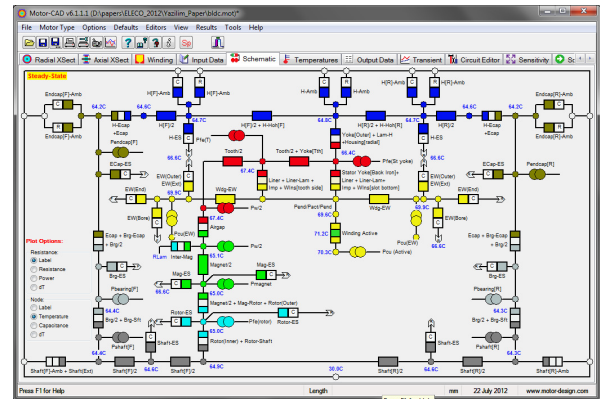
Şekil 9: Tasarlanan sürekli mıknatıslı motorun moment-hız ve güç-hız grafikleri

4. Elektrikli Motorların Isıl Analizi

Uzun yıllardır elektrik motorlarının ısı analizleri pratik bir şekilde yapılamamakta, ihtiyaç duyulduğunda ısı sonlu elemanlar analizi gibi pahalı ve zaman alıcı çalışmalarla yapılmaktaydı. Motor tasarımcıları ve üreticileri ise çoğunlukla tecrübe ile motorların akım yoğunluğu ve elektriksel yüklenme gibi parametreleri sınırlayarak termal sorunların önüne geçme yoluna gitmekteydi. Standart motorlar için bu yöntem belki de mümkün olmaktadır. Ancak özel uygulamalar için tasarlanan motorlarda tecrübe yeterli olamamaktadır. Bu nedenle termal tasarım konusuna tasarımcıların daha fazla ağırlık vermesi gerekmektedir.

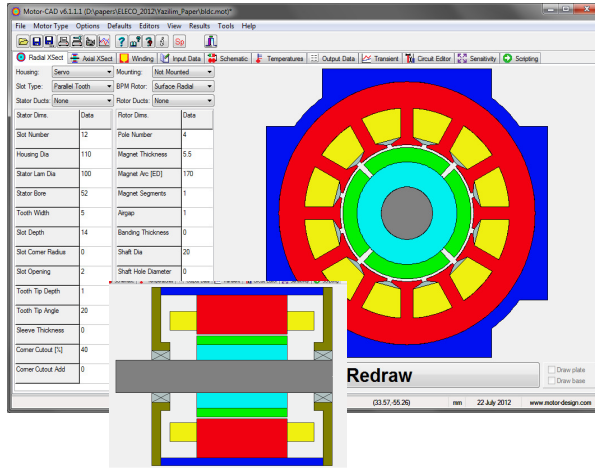
Günümüzde elektrik motorlarının ısı performansları, sargıların ısı dirençleri, kullanılan malzemelerin ısı iletim katsayıları, sargı akım yoğunluğu sınırı veya sargıların elektriksel yüklenme limitleri gibi bilgiler kullanılarak tahmin edilebilmektedir. Bu yayın kapsamında incelenen motorun termal tasarımı ve analizi için motor termal tasarım paketi (Motor-CAD®) kullanılacaktır. Bu modül SM motorların boyutsal ve malzeme gibi tasarım değişiklikleri karşısında nasıl bir termal davranış göstereceğini görmek için kullanılmaktadır. Kullanıcı sadece optimum sonucu bulmakla kalmayıp, aynı zamanda yapılan farklı tasarım değişikliklerinin ne gibi etkileri olduğunu da rahatlıkla görebilir. Bu sayede yeni üretim metodlarının uygulanması veya yeni malzemelerin kullanılmasıyla elde edilebilecek iyileştirmelerin etkisi de incelenebilmektedir.

Motor-CAD termal modeli ısı toplu devre analizi üzerine kuruludur. Toplu devre yaklaşımı hesaplama hızı bakımından, sonlu elemanlar analizi (SEA) ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) gibi nümerik tekniklere göre oldukça avantajlıdır. Motor-CAD®' in hızlı hesaplama kabiliyeti sayesinde, motorda yapılan değişikliklerin sonucu çok hızlı bir şekilde elde edilir. Motor-CAD® yazılımı ile geliştirilmiş bir fırçasız sürekli mıknatıslı motor modeline ait ısı eşdeğer devre Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu devre, kararlı durum termal verilerinin analizi için çok yararlıdır. Bu devre, motor içerisinde termal dirençlerin, güç akışının ve sıcaklık dağılımının analizi ve tespiti için kullanılmaktadır. Bileşenler Şekil 11'deki motor kesit editöründen görüldüğü üzere renklerle kodlanır. Özetle bu devre, motor bileşenleri arasındaki düğümlerdeki termal dirençler ve ısı kaynaklarından oluşur.



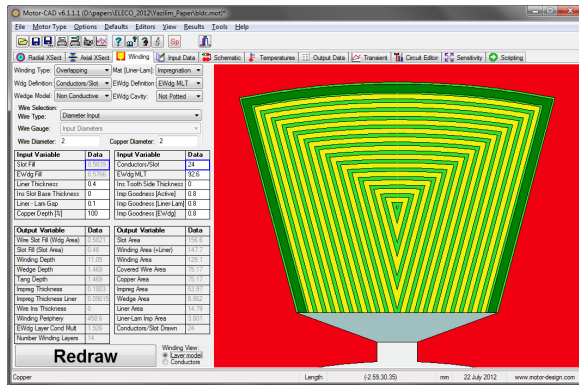
Şekil 10: Fırçasız SM motora ait ısı eşdeğer devre

Şekil 11'de bu çalışmada modellenen 260W'lık 4 kutuplu SM bir motor modeli gösterilmiştir. Motor içindeki tüm iletim yolları için ısı direnç değerleri, motor boyutları ve kullanılan malzeme bilgileri sayesinde hesaplanır. Hesaplamaların doğruluğu, motor boyunca bileşenler arasındaki 'gövelaminasyon arasındaki ara yüzey, oluk içerisindeki yalıtım malzemesi-laminasyon arasındaki ara yüzey' gibi çeşitli termal temas dirençlerine bağlıdır. Bu dirençler, temas halindeki katı yüzeyler arasında yer alan ve genelde hava ile dolu olan boşluklardan kaynaklanmaktadır. Temas dirençlerinin tahmini üzerine bir çok deneysel çalışma mevcuttur. Motor-CAD® yazılımı sayesinde bu ara yüzeyler de rahatlıkla modellenebilmekte ve daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir.



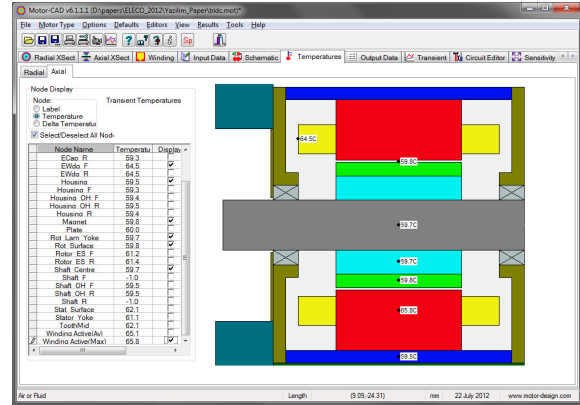
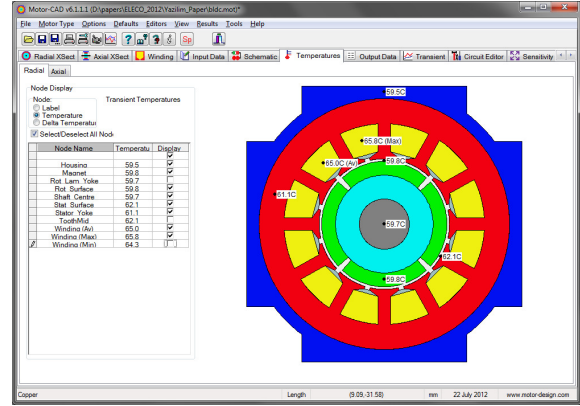
Şekil 11: Motor modeli kesit editörü

Motor sargılarında oluşan kayıplar en kritik ısı yükleri olması nedeniyle doğru bir şekilde modellenmesi önemlidir. Sargıların katman sayısı, izolasyon kalınlığı, sargıda epoksi kullanılıp kullanılmaması, sargıların epoksiye gömülmesi, oluk içerisinde kullanılan yalıtım malzemesi gibi önemli unsurlar da doğru bir termal veri elde etmek için modellenmelidir. Örnek olarak Şekil 12'de bu çalışmada incelenen sargı yapısı modeli gösterilmiştir.

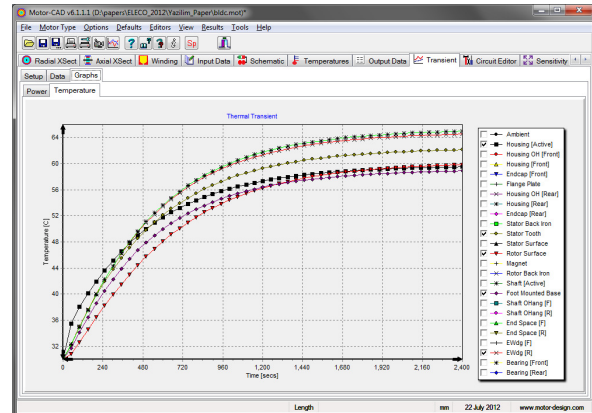


Şekil 12: Modellenen SM motorun standart sargı yapısı

Şekil 13 ve Şekil 14'de tasarlanan örnek motorun anma yükünde elde edilen kararlı durum ve geçici durum sıcaklık dağılımları radyel ve eksenel olarak gösterilmektedir. Ortam sıcaklığı 30 derece alınarak yapılan bu çalışmada maksimum sargı sıcaklığı ise 65.8 C° seviyelerinde bulunmuştur. Motorun sabit sıcaklıkta bir flanşa bağlı olduğu düşünülürse sıcaklık değerlerinin makul seviyelerde olduğu söylenebilir.



Şekil 13: SM motorun kararlı durum sıcaklık dağılımı- radyel ve eksenel görünüm (ortam sıcaklığı 30C° alınmıştır)

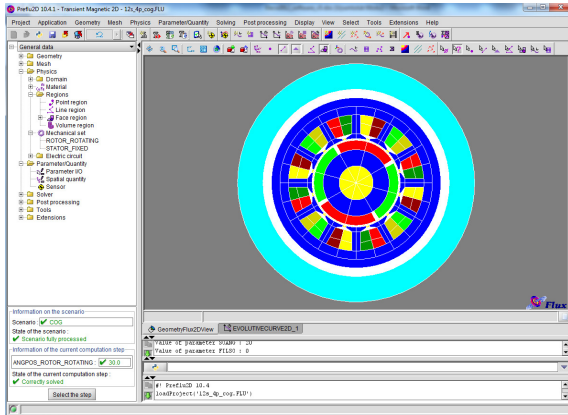


Şekil 14: SM motorun geçici durum sıcaklık dağılımı (ortam sıcaklığı 30C° alınmıştır)

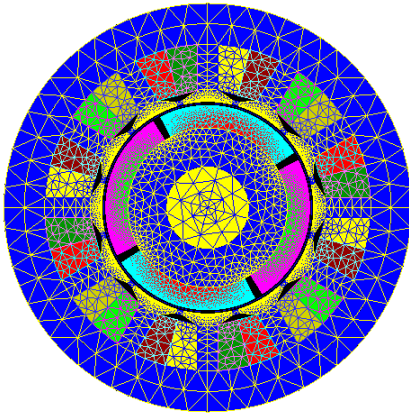
5. Sürekli Mıknatıslı Motorların Elektromanyetik Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar analizi (SEA) karmaşık elektromanyetik alan problemleri ve devre parametrelerinin çözümünde kullanılan nümerik bir yöntemdir. Özellikle lineer olmayan malzeme karakteristiklerine sahip problemlerin çözümünde çok faydalıdır. Bu metod, 2 boyutlu problemler için motor kesitinin veya 3 boyutlu problemler için motor hacminin küçük alan ya da hacimlere bölünmesini içerir. Manyetik alanın değişimi lineer olmayan diferansiyel denklemlerle ifade edilir ve farklı bölgelerdeki akı, akı yoğunluğu ve yönü gibi motor için önemli büyüklükleri belirlemede kullanılır. SEA herhangi bir şekle ve malzeme özelliğine sahip mıknatısları doğru olarak analiz edebilir. Relüktans, endüktans ve moment gibi büyüklükler SEA'nden kolaylıkla elde edilebileceğinden, lineer analitik metodlarla hesaplanmasına gerek yoktur.

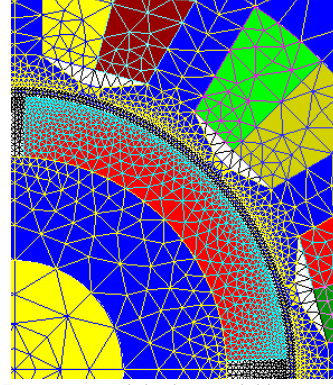
12 oluk 4 kutuplu tasarlanan motor yapısını inceleyebilmek için Flux® 2D kullanılarak SEA modeli oluşturulmuştur (Şekil 15). Şekil 16'da motorun tamamına ve Şekil 17'de de 2 kutbuna odaklanmış kısmının ağ yapısı verilmiştir. Ağ yapısına bakıldığında enerji dönüşümünün gerçekleştiği hava aralığında ağ yapısının daha hassas olduğu görülmektedir. Bunu sağlamak için 3 katmanlı hava aralığı tercih edilmiştir.



Şekil 15: Sürekli mıknatıslı motorun Flux® SEA modeli

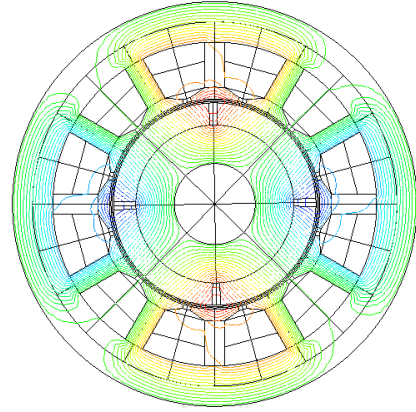


Şekil 16: Sürekli mıknatıslı motorun ağ yapısı

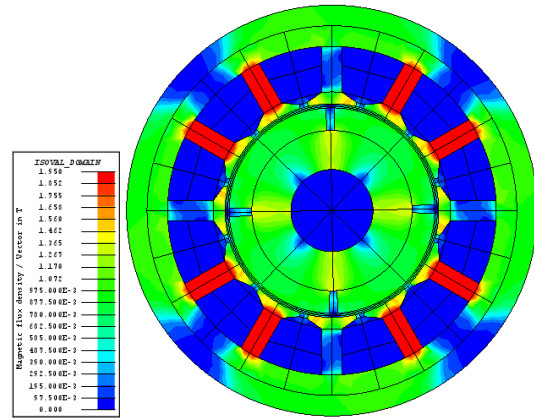


Şekil 17: Motorun tek kutbuna odaklanmış ağ yapısı

Şekil 18'de motorun stator ve rotordaki yüksüz durum akı çizgileri ve akı yönü verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi N mıknatıstan çıkan akı, hava aralığını geçerek statora ulaşmakta, stator dişlerinden devam ederek stator arka nüvesine girip, buradan da stator dişi, hava aralığı ve S mıknatıs üzerinden devresini tamamlamaktadır. Şekil 19'da ise yüksüz durumda motorun farklı bölgelerinde elde edilen akı yoğunlukları gösterilmiştir. Akı yoğunluğu en çok stator dişlerinde oluşmakta ve yaklaşık 1.95T seviyelerine çıkmaktadır.

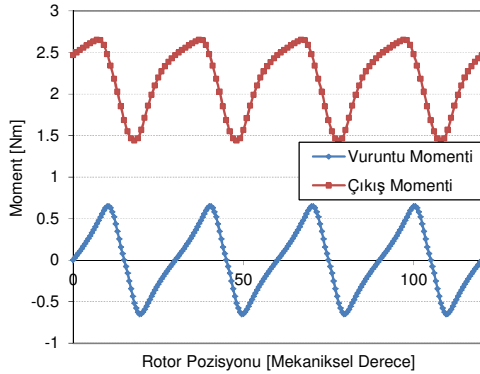


Şekil 18: SM motorun yüksüz durum akı çizgileri



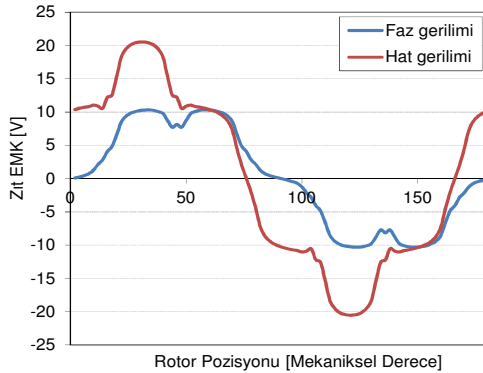
Şekil 19: SM motorun yüksüz durumu akı yoğunluğunun değişimi

Sürekli mıknatıslı motorun yüksüz ve yüklü durum analizleri sonucunda elde edilen vuruş momenti ve çıkış momenti değişimleri ise Flux 2D yazılımı kullanılarak karşılaştırmalı şekilde Şekil 20'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi motor çok yüksek bir vuruş değerine sahiptir. Ortalama momentin %29.9 seviyesinde olan bu moment bileşenin azaltılması sürekli mıknatıslı motorun moment kalitesini artırıcı en önemli unsurdur. Tasarımcının bu moment bileşenini azaltıcı tasarımsal önlemler alması zorunludur. Bu vuruş bileşeni şekilde de görüldüğü gibi çıkış momentine de yansımakta ve motor ortalama değeri 2.17Nm olan ancak moment dalgalanması %56.0 olan bir çıkış moment dalgalanmasına sahip olduğu görülür. Benzer şekilde bu da bir çok uygulama için kabul edilemez bir değerdir ve önlem alınması gerekir.

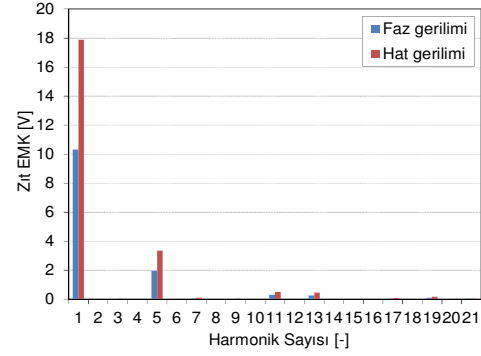


Şekil 20: SM motorun vuruş momenti, moment dalgalanması ve çıkış momentinin değişimi

1000 rpm hızdaki faz ve hat gerilimleri zıt-EMK dalga şekilleri Flux yazılımı kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 21'de gösterilmiştir. Faz geriliminin tepe değeri 10.32V iken hat gerilimi tepe değeri 20.52V'dur. Ayrıca bu modele ait faz ve hat gerilimi FFT'leri alınmış ve Şekil 22'de verilmiştir. Görüldüğü üzere faz ve hat geriliminde 5. Harmonik en baskın harmoniktir. Bu durum sürekli mıknatıslı fırçasız DC motor tasarımları için beklenen bir durum olmasına karşın SM fırçasız AC motor tasarımları için ise istenmeyen bir durumdur.



Şekil 21: SM motorun zıt-EMK değişimi



Şekil 22: SM motorun faz ve hat gerilimleri harmonik içeriği

Flux sonlu elemanlar analiz sonuçları deneysel datalarla uyum içerisinde olduğu bir çok çalışmada gösterilmiştir. Bu nedenle SEA ile doğrulanmamış bir SM motor tasarımı eksik bir tasarımdır ve üretim aşamasına geçilmemelidir. Tasarımsal sorunları içermeyen bir motor, sonlu elemanlar analiz ile doğrulanmış ise prototip üretimi ve takip eden seri üretim aşamasına rahatlıkla geçilebilir.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada sürekli mıknatıslı fırçasız DC ve AC senkron motorların tasarım süreçleri tasarlanan bir örnek motor üzerinde açıklanmış, tasarım sırasında dikkat edilmesi gereken noktalara değinilmiş, tasarımda kullanılan yazılımlar tanıtılmıştır. Motor tasarımın sadece elektromanyetik tasarımdan ibaret olmadığı, manyetik devre ile modellenmenin önemi, termal analizlerin ve tasarımın uygulamaya bağlı gerekliliğinin üzerinde durulmuştur. Çalışmalar 260W lık bir sürekli mıknatıslı motor üzerinde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar grafiklerle sunulmuştur. Flux 2D sonlu elemanlar analiz sonuçları deneysel sonuçlara yakın olduğu bilindiğinden tasarım sonlandırıldığı taktirde motor prototip üretimine geçilebileceği belirtilmiştir.

7. Kaynaklar

- [1] Hendershot, J.R., Miller, T.J.E.: Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Magna Physics & Oxford Science Publications, 1994
- [2] Hanselman, D.C.: Brushless Permanent-Magnet Motor Design, McGraw-Hill, 1994
- [3] Lipo, T. A.: Introduction to AC Machine Design, WEMPEC, 2004.
- [4] Hamdi, E.S.: Design of Small Electrical Machines, Wiley, 1994.
- [5] SPEED Software, PC-BDC 9.04 User's Manual, February 2010.
- [6] Flux 2D Application Manual, Cedrat, March 2010.
- [7] D. A. Staton, "Thermal computer aided design – Advancing the revolution in compact motors," in *Proc. IEEE IEMDC*, Boston, MA, Jun. 2001, pp. 858–863.
- [8] Motor-CAD v6.1 software manual, 2010.