

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Doğrudan Sürüşlü Beyaz Eşya Uygulamalarında Kullanımı

Permanent Magnet Synchronous Motors Used in Direct-Drive Home Appliance Applications

Metin AYDIN^{1,2}, Oğuzhan OCAK², Günsu Çırpanlı ALBAŞ³

¹Mekatronik Mühendisliği Böl.
Kocaeli Üniversitesi, Umuttepe, Kocaeli
Metin.aydin@kocaeli.edu.tr

² Ar-Ge Böl., MDS Motor Tasarım Ltd.
KOU Teknopark, Başiskele, Kocaeli
oguzhan@mdsmotor.com

³Ar-Ge Merkezi
ARÇELİK A.Ş., Tuzla, İstanbul
gunsu.albas@arcelik.com

Özet

Bu çalışmada doğrudan sürüş (DS) beyaz eşya uygulaması için kalıcı veya sürekli mıknatıslı bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Farklı oluk sayısı-kutup sayısı seçenekleri incelenmiş, uygun kombinasyon belirlenmiş, verilen tasarım kriterleri doğrultusunda motor elektromanyetik, termal ve yapısal analizleri gerçekleştirilerek motor tasarımı sonlandırılmış ve motor prototip aşamasına getirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Doğrudan Sürüş, Kalıcı Mıknatıslı Motor, PM Motor, Sonlu Elemanlar Analizi

Abstract

This paper talks about a permanent magnet motor design for direct-drive home appliance applications. Within the study, various slot and pole number combinations are investigated and appropriate combination is found. Motor electromagnetic design, thermal and structural analyses are all completed for given design specifications and the motor prototype work is started.

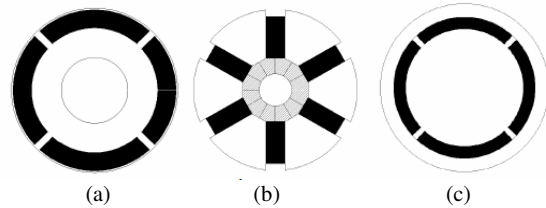
Keywords: Direct-Drive, Permanent Magnet Motor, PM Motor, Finite Element Analysis.

1. Giriş

Radyel Akılı Sürekli Mıknatıslı (RASM) motorlar günümüzde birçok uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır. NdFeB (Neodymium Iron Boron) ve SmCo (Samarium Cobalt) mıknatısların 1980'li yılların başında keşfinin ardından Sürekli (veya Sabit) Mıknatıslı (SM) motorlar birçok uygulamada asenkron, DC ve klasik senkron motorların yerini hızla almaya başlamıştır. Bu motorlar, asenkron yada DC motorların kullanılmayacağı özel uygulamalar başta olmak üzere çok sayıda uygulamada, verimlerinin yüksek olması, hacimlerinin ve ağırlıklarının düşük olması, moment yoğunluklarının ve moment/ağırlık oranlarının fazla olması

nedeniyle tercih edilmeye başlanmıştır [1-3]. Özellikle günümüzde robotlu otomasyonlarda kullanılan servomotorlarda, savunma ve beyaz eşya sektörlerinde, elektrikli taşıtlarda, havacılık ve uzay uygulamalarında, bu tip motorlara sıkça rastlamak mümkündür. Bir uygulama için uygun sürekli mıknatıslı motoru seçerken yada tasarlarken uygulamanın moment-hız ve moment-güç gibi karakteristiği sürekli mıknatıslı motorun rotor yapısını belirleyici unsurdur. Örneğin, motorun özellikle geniş bir sabit güç bölgesinde çalışacağı uygulamalar için dâhili mıknatıslı motorlar tercih edilir. Çok yüksek hızlı uygulamalarda ise yüzeyden mıknatıslı motorlar tasarım avantajları nedeni ile daha sık kullanılmaktadır. Benzer şekilde üretim maliyeti az ve kontrolün basit olması önemli bir unsur ise yüzeyden mıknatıslı motorlar, hatta yüzük şekilli mıknatıslar iyi bir seçimdir.

Kalıcı mıknatıslı motorlar rotor yapılarına göre sınıflandırılabilirler gibi yaygın olarak besleme akımı dalga şekline göre de sınıflandırılırlar. "Fırçasız DC Motor" (Brushless DC Motor – BLDC Motor) olarak bilinen motorlar literatürde besleme akımı trapezoidal dalga şeklinde olan motorlardır. "Fırçasız AC motor" (Brushless AC Motor –



Şekil 1: Farklı sürekli mıknatıslı motor yapıları: (a) yüzey mıknatıslı, (b) dahili mıknatıslı ve (c) dış rotorlu yüzey mıknatıslı motorlar

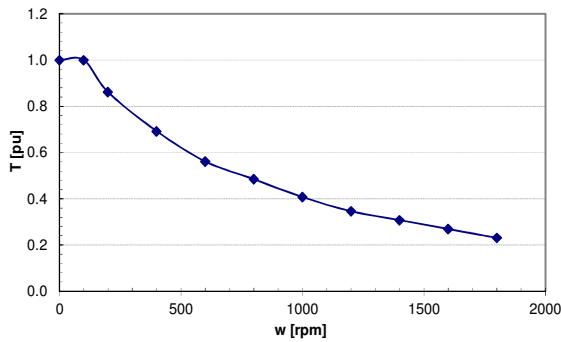
BLAC Motor)” veya “Sürekli mıknatıslı senkron motor” olarak bilinen motorlar ise literatürde besleme akımı sinüzoidal dalga şeklinde olan motorlardır. Unutulmaması gereken nokta, her iki motorun da DC veya AC bir kaynaktan beslenebilmeleri ve her iki tür motorun da fırçasız motor olmalarıdır. Şekil 1’de de gösterildiği gibi sürekli mıknatıslı motorlar rotor yapılarına göre yüzeyden mıknatıslı, gömülü mıknatıslı ve dış rotorlu yapılar olmak üzere 3 temel kısımda sınıflandırılabilirler. Bu 3 grubun dışında yer alan yüzük tip mıknatıslı yapılar da yüzeyden mıknatıslı guruba dahil edilebilirler.

Standart sürekli mıknatıslı motorların tasarımı ve üretimi, dünyada birçok firma tarafından belirli güç ve hızlarda yapılmaktadır. Ancak, her ne kadar tasarım aşamasında kullanılan yazılımlara sahip olunsu bile, özel uygulamalar için motor tasarımı uzmanlık istemekte ve zaman almaktadır. Standart dışı, özel sürekli mıknatıslı motorların tasarımı ise, başlı başına uzmanlık gerektiren zor bir iştir. Bu tür motorların denklemleri motor yapısına bağlı olarak değişmektedir ve modelleme ile sonlu elemanlar analizi (SEA) gibi analizler olmaksızın tasarımları sonlandırmak zaman kaybı ve ek maliyet getirme gibi riskleri beraberinde taşımaktadır.

Bu çalışmada doğrudan sürürlü beyaz eşya uygulamasında kullanılan bir SM motor için dış rotorlu kalıcı mıknatıslı senkron motorun tasarımı özetlenmiştir. Tasarım süreci, elektromanyetik sonlu elemanlar analizi, yapısal ve termal tasarımlar SPEED, Flux 2D ve MotorCAD gibi modern yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilmiş ve motor prototip üretimi aşamasına getirilmiştir.

2. Tasarım Kriterleri

Tasarımda kullanılacak temel kriterlerden biri olan moment ve hız verileri Şekil 2’de özetlenmiştir. Motor tasarımı, biri düşük hız, diğeri ise yüksek bir hız olmak üzere iki farklı çalışma noktası için gerçekleştirilecek ve bu noktalarda 1pu ve yaklaşık 0.2pu momente ihtiyaç duyulacaktır. Kullanılan elektriksel verilerin yanında kritik diğeri bir veri ise mekanik kısıtlamalardır. Beyaz eşya motorunun monte edileceği hacmin boyutları tasarım aşamasında göz önüne alınarak, tasarlanan motorun bu hacmin içerisine gireceğinden emin olunması gerekmektedir. Ayrıca tasarlanacak motorun seri üretime uygun olması da diğeri bir önemli tasarım kriteridir.



Şekil 2: DS Beyaz eşya uygulaması için tasarlanacak SM motorun moment-hız karakteristiği

3. Konsantre Sargılı Motorlar

Üretim kolaylığı ve üretim maliyetinin düşük olması nedeniyle konsantre sargılı motorlar günümüzde bir çok uygulamada yer bulmaktadır. Bu tip sargı yapısına sahip motorlar yüksek hızlı uygulamalarda olduğu kadar, doğrudan sürürlü, yüksek kutuplu uygulamalarda da sıkça görülmektedir. Konsantre sargı yapısına sahip 3 fazlı dengeli motorların temel özellikleri Tablo 1’de kısaca özetlenmiştir. Bu tip motorları sinüzoidal motor olarak tasarlamamın yanında, tasarımın getireceği üretim avantajı ve maliyet faktörü de bu motorların çok adetli uygulamalarda kullanılmasını daha cazip kılmaktadır [4].

Tablo 1: $q \neq 1$ Olan Sargı Yapılarının Karşılaştırılması

Oluk/kutup/faz oranı (q)	Özellikler
$q = 0.5$	<ul style="list-style-type: none"> Kısa kutup adımları Sinüzoidal akımlar için performansta sorun Düşük sargı faktörü $K_w = 0.866$ Kare dalge besleme için yüzey mıknatıslı motorlarda yüksek moment dalgalanması Moment dalgalanma şartı olmayan düşük güçlü uygulamalarda kullanım
$q = 0.5 - 0.33$	<ul style="list-style-type: none"> $q = 0.5$'e göre yüksek performans 12 oluk - 10 kutuplu ilginç tasarım Tek katmanlı sargı yapısını destekler Düşük moment dalgalanması ve düşük vuruş momenti
$q = 0.33 - 0.25$	<ul style="list-style-type: none"> Moment yoğunluğu sargıların daha fazla akı kesmesi nedeniyle yüksektir. Yüksek sargı faktörü avantajdır 12 oluk, 14 kutuplu ilginç tasarım Tek katmanlı sargıları destekler Sinüzoidal akımla beslemeye uygundur
$q \leq 0.25$	<ul style="list-style-type: none"> Daha sinüzoidal moment fakat genlik düşük Kare dalga besleme durumunda, olukların düzensiz dağılımı yüksek performans sağlar

4. Dış Rotorlu Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor Tasarım Süreci

Farklı tip elektrik motorlarının tek bir model kullanarak analizi ve tasarımı mümkün değildir. Farklı motorlar yada farklı rotor yapıları için denklemler ayrı ayrı oluşturulmalı ve motor boyutlandırması gerçekleştirilmelidir. Genelleştirilmiş motor boyutlandırma denklemleri yüzey mıknatıslı motorlar için daha önce geliştirilmiş, doğruluğu ve işlerliği ispatlanmıştır [5-6]. Bu tasarım yöntemi kullanılarak elektrik motorlarının optimum boyutları tasarım kriterleri doğrultusunda elde edilebilmektedir. Motorları, maksimum güç yoğunluğu noktası, minimum maliyeti verecek şekilde tasarlamak, maksimum verim noktası için yada minimum motor ağırlığı için tasarlamak aşağıda açıklanan sistematik metod ile mümkündür.

Stator kaçak endüktansı ve direncinin ihmal edildiği herhangi bir 3 fazlı elektrik motorunun çıkış gücü,

$$P_R = 3\eta K_p E_{PK} I_{PK} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada E_{PK} hava aralığı faz EMF'si tepe değeridir. Benzer şekilde I_{PK} ise faz akımı tepe değeri ve η motor verimi olarak tanımlanmıştır. (1) Denklemindeki K_p katsayısı ise elektriksel güç dalga katsayısıdır. Bu katsayı motor EMF ve akım dalga şekline bağlı bir parametredir.

Hava aralığı faz EMF'sinin tepe değeri standart sürekli mıknatıslı motorlar için denklem (2) de verilmiştir.

$$E_{PK} = K_e N_t B_g \frac{f}{p} \lambda_o D_o L_e \quad (2)$$

Burada K_e sargı faktörünü de içeren EMF faktörü, N_t sarım sayısı, B_g hava aralığı akı yoğunluğu, f besleme frekansı, p kutup çifti, λ_o ise motor çap oranı olarak tanımlanır:

$$\lambda_o = \frac{D_g}{D_o} \quad (3)$$

Çap oranı standart radyal akılı motorlar için D_o motor dış çapı, D_g hava aralığı çapı olacak şekilde verilmektedir. Bu oran motorun oluk uzunluğuna, arka nüve kalınlığına, mıknatıs kalınlığına ve kutup sayısına bağlı olduğu unutulmamalıdır. L_e ise tüm denklemlerde motor paket boyu olarak tanımlanmıştır.

Tasarım denklemlerindeki faz akımının tepe değeri ise denklem (4)'de verilmiştir;

$$I_{PK} = \frac{1}{1 + K_\phi} K_t A \pi \lambda_o \frac{D_o}{2m_1 N_t} \quad (4)$$

Bu denklemde A toplam elektriksel yüklemeye, K_ϕ ise rotor elektriksel yüklemesinin stator yüklemesine oranı olarak verilmiştir. Sürekli mıknatıslı motorlarda rotorda sargı olmadığı için $K_\phi=0$ olarak alınmalıdır.

Bu denklemler birleştirilirse, kalıcı mıknatıslı motorlar için çıkış gücü kolaylıkla elde edilir. Şayet çıkış gücü D^2L denklemi olarak yazılmak istenirse;

$$P_R = \frac{3}{m_1} \frac{\pi}{2} K_e K_t K_p \eta B_g A \frac{f}{p} \lambda_o^2 D_o^2 L_e \quad (5)$$

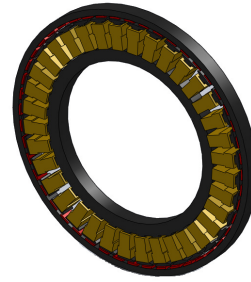
elde edilir. Motor çıkış gücünü D^2L denklemi yerine D^3 denklemi olarak hem radyal akılı hem de disk motorlar için yazmak da mümkündür;

$$P_R = \frac{3}{m_1} \frac{\pi}{2} K_e K_t K_p K_l \eta B_g A \frac{f}{p} \lambda_o^2 D_o^3 \quad (6)$$

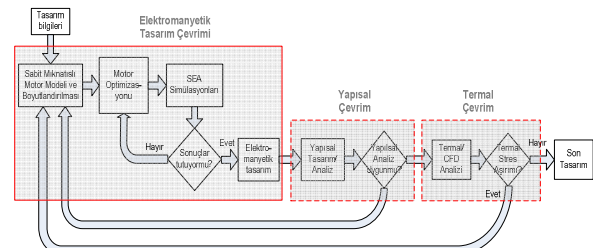
SM motorlar için verilmiş bu denklemlerde P_R anma gücü yada motorun mil gücü, m_1 statorun faz sayısı, K_t akım dalga faktörü, K_p elektriksel güç dalga faktörü, olarak tanımlanmıştır. Endüklenen EMF ve besleme akımı dalga şekline göre bu faktörler değişiklik göstermektedir.

Bu tasarım denklemleri kullanılarak dış rotorlu, mıknatısları yüzeye yapılandırılmış kalıcı mıknatıslı bir motorun boyutları

tesbit edilebilmektedir. Dış rotorlu bir SM motorun 3 boyutlu katı modeli Şekil 3 de verilmiştir. Bu aşamadan sonra elde edilen ön elektromanyetik tasarım, kendi içerisinde performans kontrolü, SPEED [7] yada benzeri bir yazılım kullanılarak parametrik optimizasyonu, 2 yada 3 boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) gibi uzun, yorucu ve zaman alıcı aşamalara tabi tutulur. Motor topolojisi sonlu elemanlar yazılımının 2D yada 3D olacağını belirler. Elde edilen tasarım yada tasarımlardan uygulamanın özelliklerine uygun olanı yada olanları SEA ile analizi yapılarak tasarım kriterlerine uygunluğu belirlenir. Bu döngüsel prosesin kriterlerin zorluk derecesine göre birkaç defa tekrarlanabileceği göz ardı edilmemelidir. Elektromanyetik tasarım aşamasını geçmiş bir motor, yapısal tasarım yada analiz aşamasını geçemez ise elektromanyetik tasarım aşamasına geri dönmelidir. Yüksek hızlı uygulamalarda, rotorun yapısal bütünlüğünü korumak için tasarımın bu aşaması çok önemlidir. Rotor yapısının maruz kalacağı stres ve yer değiştirme değerleri dikkatlice kontrol edilmelidir. Şayet uygulamada yüksek rotor hızları söz konusu değilse yapısal analize gerek kalmayabilir. Tasarım sürecinde son aşama ise termal streslerin kontrol edilmesidir. Motor yapısı uygulamaya bağlı olarak sürekli çalışma yada maksimum çalışma durumu için manyetik tasarım aşamasında belirlenen tüm kayıp değerleri kullanılarak sıcaklık artışları ve sıcaklıkların hangi seviyelere ulaştığı kontrol edilmelidir. 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 dönmesi anlamını taşımaktadır. 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 unsurlardan biridir. Ancak, özel bir uygulama için tasarlanan sürekli mıknatıslı bir motor, tüm tasarım aşamalarını geçtikten sonra prototip veya üretim aşamasına geçilmelidir. Tüm bu tasarım süreci Şekil 4'de detaylıca gösterilmiştir.



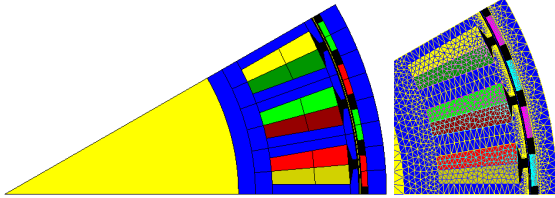
Şekil 3: Dış rotorlu SM bir motorun 3 boyutlu görünümü



Şekil 4: Dış rotorlu SM motorun tasarım aşamaları

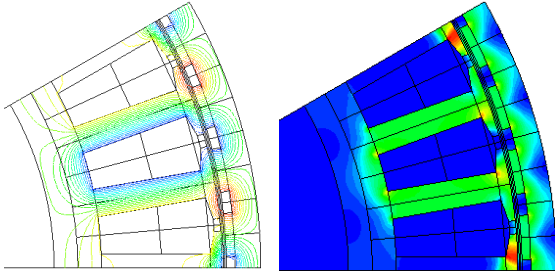
5. Dış Rotorlu Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar analizinin (SEA) elektrik motorlarının analizinde kullanılmasının temel amaçları, motorun stator ve rotor nüvesi, diş, oluk gibi farklı noktalarında ki doyum seviyeleri hakkında bilgi sahibi olmak, motor tasarım modelinin doğruluğunu test etmektir. Ayrıca motordan alınabilecek vuruğu momenti, moment dalgalanması ve ortalama moment gibi motorun moment kalitesini ve kabiliyetini gösteren moment bileşenlerinin seviyeleri SEA ile belirlenebilmektedir. Farklı SEA programları sayesinde motor kayıpları ve motor verimi dahi hesaplanabilmekte, zamana bağlı geçici durum SEA'leri mevcut yazılımlar sayesinde yapılabilmektedir. Genelde, radyal akılı standart SM motorlarda 2 boyutlu SEA, eksenel akılı SM motorlarda ise 3 boyutlu SEA kullanılır. Motor paket boyunun motor çapına oranının çok küçük olduğu radyal akılı SM motorlarda ise 2 boyutlu SEA'den çok 3 boyutlu SEA daha doğru sonuç vermektedir. Günümüzde birçok SEA yazılımı sürekli mıknatıslı motorların analizinde kullanılmaktadır ve programların doğrulukları birçok araştırmacı tarafından gösterilmiştir. Bu makaledeki çalışmalarda Flux2D (Cedrat) yazılımı kullanılmıştır [8]. Flux2D yazılımı kullanılarak oluşturulan SEA modeli ve ağ yapısı, incelenen dış rotorlu motor için Şekil 5'de gösterilmiştir. Simetri özelliğinden faydalanılarak motorun tamamı analiz edilmemiş ve bu sayede çözüm süresi bir hayli kısaltılmıştır. Ayrıca şekilden de görüldüğü üzere, özellikle elektrik makinelerinde enerji dönüşümünün gerçekleştiği yer olan hava aralığında ki mesh yapısı oldukça iyidir. Bu da analizin doğruluğunu artırıcı önemli bir faktördür.



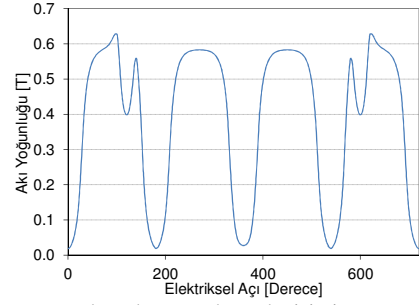
Şekil 5: Dış rotorlu SM motorun SEA modeli ve ağ yapısı

Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de motor yüksüz ve yüklü durum analizleri gösterilmektedir. Motor akı yoğunlukları her iki çalışma noktası için de makul seviyelerde olduğu gerçekleştirilen SEA'lerinde görülmektedir. Belirlenen kutup sayısı-oluk kombinasyonu ile motor vuruğu momenti anma momentinin %6'ları mertebesine çekilebilmiştir. Bu sayede düşük hızlarda motor kontrolü daha rahat yapılabilecektir.

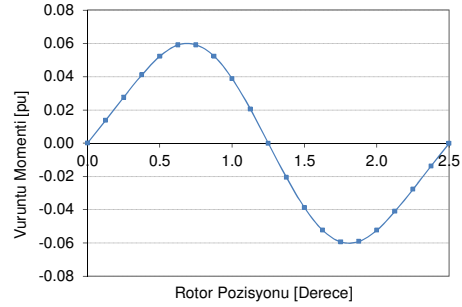
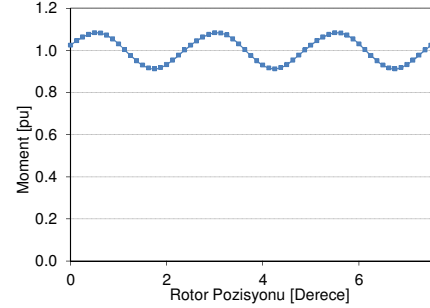


Şekil 6: Dış rotorlu SM motorun manyetik akı çizgileri ve akı yoğunluğu değişimi

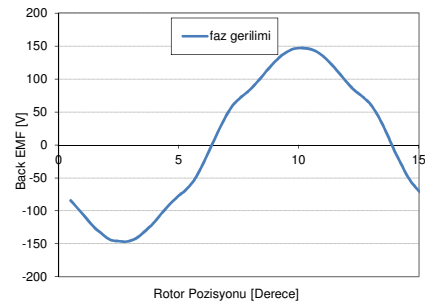
Ayrıca yüklü durum analizleri de bu motor için gerçekleştirilmiş, hem yüksek hemde düşük hızlarda yüklü durum momenti istenen moment-hız şartını sağladığı görülmüştür. Flux yazılımı kullanılarak elde edilen endüklenen faz gerilimi dalga şekli 500rpm için Şekil 9'da verilmiştir. Düşük harmonikleri içermeyen, yüksek harmonik içeriği olan bu dalga şekli istenen şartları sağlamaktadır.



Şekil 7: Hava aralığı akı yoğunluğu değişimi



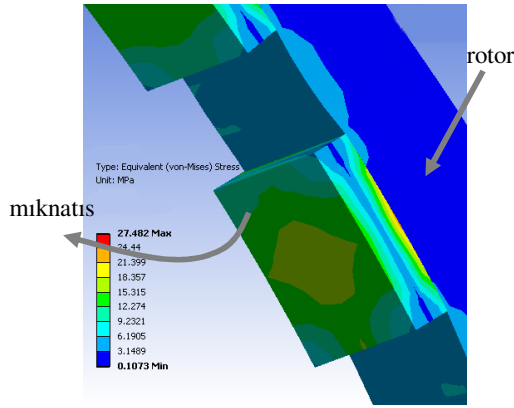
Şekil 8: Dış rotorlu yapının çıkış momenti ve vuruğu momentinin değişimi



Şekil 9: Dış rotorlu yapının 500rpm hız için back EMF dalga şeklinin değişimi

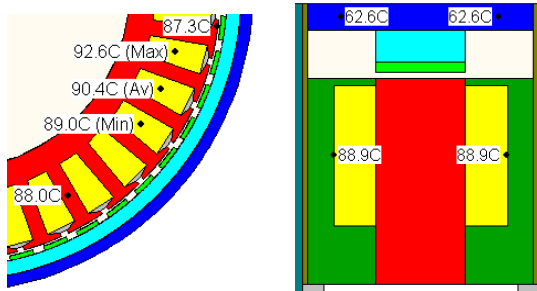
6. Yapısal ve Isıl Analizler

Elektromanyetik tasarım çalışması tamamlanmış dış rotorlu kalıcı miknatıslı motorun yapısal sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş ve motorun çalışacağı maksimum hızda yapısal olarak bir problem olup olmadığı incelenmiştir. Miknatısların merkezkaç kuvvetlerinden dolayı oluşan kuvvetlere karşı kullanılan yapıştırıcının oluşturduğu bağ kuvvetinin oldukça yeterli olduğu yapılan çalışmalar neticesinde görülmüştür. Şekil 10'dan da görüldüğü gibi maksimum hızda oluşan stres seviyeleri 20Mpa mertebelerindedir ve bu değer kullanılan malzemelerin yapısal özellikleri göz önüne alındığında önemsiz değerlerdir. Ayrıca rotor yapısında maksimum hız altında 0.0016 mm radyal yönde deformasyon olduğu görülmüş ve önemsiz miktarda bir deformasyon olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 10: Eşdeğer gerilmelerin miknatıslar etrafındaki değerleri.

Ayrıca dış rotorlu kalıcı miknatıslı yapının en zor koşul olan maksimum yük altında termal analizleri yapılmış ve stator ile rotordaki kararlı durum sıcaklık değerleri incelenmiştir. Dış rotorlu yapının termal analizi Motor CAD [9-10] yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 11'de Motor CAD yazılımından elde edilen motora ait sıcaklık değerleri verilmiştir. Bu yazılım kullanılarak motor modellenmiş ve motorun sargı sonları dahil değişik noktalarda kararlı durum sıcaklıkları farklı ortam sıcaklıkları da hesaba katılarak tesbit edilmiştir. Modelleme, en zor koşul olan düşük hız çalışma noktasında 1pu moment için gerçekleştirilmiş ve kararlı durumda motor sıcaklıkları Şekil 11'de verilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi ortam sıcaklığı 20 °C alınırca, motorun sargı sonu sıcaklık değeri 90.4 °C seviyelerine



Şekil 11: Motor CAD yazılımından elde edilen motorun sıcaklık profili (kararlı durum profili) – radyal ve eksenel görünüm

ulaşmaktadır. Bu durumda miknatıs sıcaklığı 63.2 °C gibi düşük bir seviyededir. Kullanılan miknatısların yüksek sıcaklıklara dayanabilen bir NdFeB tür miknatıs olduğu düşünülürse bulunan değerler makul seviyelerdedir. Ortam sıcaklığının 50 °C seviyelerine çekilmesi durumunda ise Motor CAD yazılımından elde edilen maksimum sıcaklık 118 °C seviyelerine, miknatıs sıcaklığı ise 89 °C seviyelerine ulaşmakta, sargı ve miknatıslarda bir problem gözlenmemektedir.

7. Sonuçlar

Bu çalışmada doğrudan sürüş (DS) beyaz eşya uygulaması için analizlerle desteklenen kalıcı miknatıslı bir motor tasarımı çalışması gerçekleştirilmiştir. Belirlenen oluk-kutup kombinasyonuna göre yapının uygulama ve kriterler açısından tasarımı yapılmış, elektromanyetik, mekanik ve termal analizleri tamamlanmış, moment kalitesi incelenmiş ve tasarım sonlandırılmıştır. Motor vuru moment, çıkış momenti değerlerinin tasarım kriterlerine uygun olduğu yapılan elektromanyetik analizler sonucunda görülmüştür. Ayrıca akı yoğunluğu seviyelerinin de kritik seviyelerin altında olduğu yine yapılan analizler sonucunda gözlenmiştir. Rotor, maksimum hızda yapısal analize tabi tutulmuş, motor nüvesinde ve miknatıslarda oluşan yapısal stres ve deformasyon incelenmiş ve bir problem olmadığı teyit edilmiştir. Ayrıca termal analizler akım yoğunluğu da göz önüne alınarak gerçekleştirilmiş ve kararlı durumda miknatıs ya da sargıların farklı ortam sıcaklıklarında termal problem yaratmayacak olmasına tasarım sürecinde dikkat edilmiş, tasarım sonlandırılmış ve motor prototip üretimi aşamasına getirilmiştir.

8. Kaynaklar

- [1] T. Sebastain and G. R. Slemon, "Operation limits of an inverter-driven permanent magnet motor drives", *IEEE Trans. on Industry App*, Vol.23, No.2, 1987, pp.327-333.
- [2] 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.
- [3] N. Boules, "Prediction of no-load flux density distribution of permanent magnet machines", *IEEE Tran. on Industry App.*, Vol.21, No.3, 1987, pp.633-643.
- [4] A. El-Refai, "High Speed Operation of Permanent Magnet Machines", PhD Thesis, Univ. of Wisconsin, 2005.
- [5] S. Huang, M. Aydın and T. A. Lipo, "A direct approach to electrical machine performance evaluation: Torque density assessment and sizing optimization", *15th Int. Conference on Electrical Machine ICEM 2002*, Belgium.
- [6] 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.
- [7] SPEED Software, PC-BDC 9.04 User's Manual, February 2010.
- [8] Flux 2D Application Manual, Cedrat, March 2010.
- [9] D. A. Staton, "Thermal computer aided design – Advancing the revolution in compact motors," in *Proc. IEEE IEMDC*, Boston, MA, Jun. 2001, pp. 858–863.
- [10] Motor-CAD v3.1 software manual, April 2006.

