

Performance Analysis of Inner Rotor and Outer Rotor PMSMs for Electric Vehicle Traction Systems

Mehmet Murat Tezcan^{a1}

^a Kütahya Dumlupınar University, Electrical Electronics Engineering Department, Türkiye

Abstract

In this study, FEA based load performance analysis of two PMSMs that have different rotor structures (inner rotor and outer rotor) has investigated, for new age hybride and electric car industry. It has proposed that electrical specifications of two motors are similar. For doing this comparison, it has proposed that, volumes of these motors are quite similar. With controlling the variation of physical parameters of these motors like diameter and stack length, how power density change of two motor types are investigated.

Keywords: “Electric Car, Permanent Magnet Synchronous Motor, Inner Rotor PMSM, Outer Rotor PMSM”

1. Giriş

Elektrik Makinası tasarımcısının ana hedefi, tasarlanan elektrik makinasının en doğru performans parametrelerini, en güvenilir ve en hızlı biçimde belirleyebilmek için en pratik yolu seçmek olmalıdır. Performans parametreleri olarak, akım yoğunluğu, hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı, elektromanyetik moment vb. parametrelerden söz edilebilir. Bu tür parametrelerin hızlı ve gerçeğe en yakın değerlerini hesaplayabilmek için çoğu elektrik makinası tasarımcısı nümerik çözüm yapan paket programları tercih etmektedir. Bu programlarda daha çok sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak istenilen geometrilerin malzeme özellikleri belirlenmekte ve performansı hesaplanmak istenen elektrik makinasının nominal çalışma şartlarında şebekeden çektiği akım değerlerine göre hava aralığı veya stator dişi veyahutta rotorun herhangi bir bölgesindeki manyetik akı yoğunluğu, manyetik vektör potansiyeli vb. değerlerin geometriye dağılımı simüle edilebilmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, elektrikli ve hibrid elektrikli araçlarda tahrik motoru tasarımlarının genellikle kalıcı mıknatıslı senkron motorlar çevresinde yoğunlaştığı görülmektedir. Literatürde sabit mıknatıslı makinalarda yaygın bir kullanıma sahip olan dağıtılmış ve konsantre sargı yapısına sahip Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların (SMSM) avantaj ve dezavantajları üzerine birçok çalışma yer almaktadır [1]. Yapılan bu çalışmalarda konsantre sargı yapısının dağıtılmış sargı yapısına göre birçok avantajı mevcuttur. Bu avantajlar, Verilen bir moment değerinde, kayıpların azalması, Kısa devre akımlarının azalması, Hata toleransının yükselmesi, Alan zayıflatma kabiliyetinin yükselmesi, Küçük sargı sonu değeri, Düşük bakır kaybı, Düşük kütle, Vuruntu (Cogging) momentinin azalması şeklinde özetlenebilir. Bu motor tipinin avantajlarının yanı sıra söylenmeden geçilmemesi gereken bazı dezavantajları mevcuttur. Bunlarda; Bazı çözümlerin daha küçük bir sargı faktörüne sahip olması, Rotor kayıplarının önemli ölçüde artması, Endüvi manyeto motor kuvvetinin (MMK) ağır bir biçimde yükselmesi, MMK harmoniklerinin yükselmesi ile ek rotor kayıplarının ve moment dalgalanmalarının olması şeklinde özetlenebilir.[2].

Sargı topolojilerinin yanında, shaft momentini asıl belirleyen faktörlerden biri de rotorun pozisyonudur [3]. SMSM’larda yüksek güç yoğunluğu sağlayan mıknatısların pozisyonu, iki temel montaj ile belirlenir. Bunlardan bir tanesi rotorun, stator bloğunun içinde olduğu yapıdır. Diğeri ise, statorun sabit olup, rotorun, stator dışında radyal hareket ettiği yap olan dış rotorlu yapıdır (Şekil 1).

¹ Corresponding author. Tel.: +0-000-000-0000 ; fax: +0-000-000-0000 .
E-mail address: murat.tezcan@dpu.edu.tr



Şekil 1. (a) İç Rotorlu SMSM [5]

(b) Dış Rotorlu SMSM [6]

Tasarım esnasında motorun performansının belirlenmesi için analitik olarak motorun fiziksel boyutlarının belirlenmesi gerekir. Üretimden önce ise genellikle nümerik çözüm yapan simülasyon programları ile motorun dinamik performansı incelenir.

Bu çalışmada iç ve dış rotor yapısına sahip iki SMSM'un performansının incelemesi nümerik çözüm yapan simülasyon programı ile yapılacaktır. Test parametreleri, mil momenti, moment dalgalılığı, motor verimi olacaktır [7],[8],[9].

2. İç ve Dış Rotorlu SMSM'un Modellenmesi

Genel olarak Sonlu Eleman Analizi ile çalışan nümerik simülasyon programlarını kullanmadan önce, üretilmesi düşünülen elektrik makinasının analitik olarak boyutlarının kabaca belirlenmesi gerekir. Bu işleme analitik boyutlandırma denilebilir. Daha sonra uygun manyetik (Mıknatıslar ve nüve) ve elektriksel (sargı malzemesi) malzeme seçimi ile istenen performans seviyesine ulaşmak hedeflenir. Bundan sonra kontrol, koruma sistemlerinin seçimine ve hangi ortam koşullarında çalışılacaksa o ortama uygun izolasyon sınıflarının belirlenmesine çalışılır.

2.1. Analitik Boyutlandırma

Bir elektrik makinasının fiziksel olarak modellenebilmesi için en önemli parametreler motorun dış çapı ve boyudur. Ortalama olarak 3 kW'lık bir şaft gücüne sahip SMSM'un 1000d/d da sürüleceği göz önüne alınarak, hem iç rotor yapısı, hem de dış rotor yapısı kullanılarak, aynı hacimde ve aynı güç yoğunluğunda performans karşılaştırılması yapılabilir [4]. Genel bir boyutlandırma hesabı ile;

$$S = 1.11 Kw \pi^2 B ac D^2 L n 10^{-3} \text{ (kVA)} \quad (1)$$

0.85 güç katsayısına sahip bir SMSM'un görünür gücü 3.52 kVA civarında olacaktır. Manyetik ve elektriksel yükleme değerleri sırası ile $B=0.8$ T ve $ac=30000$ A.sarım/m olarak seçilirse, $D^2 L$ değeri hesaplanabilir. Burada hacim değeri (D^2L) yaklaşık 7400 cm^3 olarak hesap edilmiştir. Kutup adımının boyunu Stator boyuna eşit alırsak stator iç çap değeri yaklaşık olarak 202 mm civarında hesaplanır. Bu hesaba göre stator paket boyu da ortalama olarak 55 mm alınmıştır.

3 kW mil gücüne sahip bir SMSM'un 1000d/d (104 rad/s) hızdaki mil momenti ortalama 28.8 Nm civarında olacaktır. Giriş bölümünde belirtildiği gibi, iki farklı yapıdaki motorun genel olarak bu fiziksel değerlerdeki performansları karşılaştırılacaktır.

2.2. Nümerik Simülasyon (SEA)

Aşağıda performans analizi yapılacak iki farklı SMSM yapısı için fiziksel ve elektriksel parametrelerin bulunduğu tablo görülmektedir. Önce RMxprt programı ile genel bir performans analizi yapılmış ve daha sonra Maxwell ile transient analiz yapılmıştır.

Tablo 1: İç ve Dış Rotorlu SMSM yapılarının Fiziksel ve Elektriksel Özellikleri

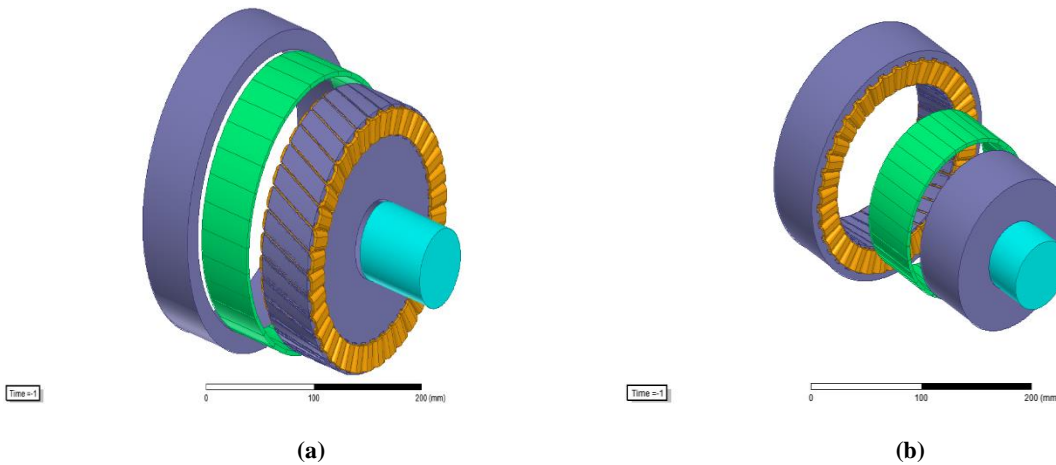
	İç Rotorlu SMSM	Dış Rotorlu SMSM
Stator Çapı (mm)	(İç Çap) 202	(Dış Çap) 202
Stator Oluk Sayısı	36	36
Stator Paket Boyu (mm)	55	55
Sarım Tipi	Dağıtılmış Sargı	Dağıtılmış Sargı
Rotor Kutup Sayısı	32	32
Hava Aralığı Boyu (mm)	1	1
Sargı Gerilimi (Faz Başına V)	110	110
Devir Sayısı (d/d)	1000	1000
Çıkış Gücü (kW)	3	3

Yapılan Rmxprt analizi sonucunda, istenen performans şartları için (3kW mil gücü, 1000 d/d senkron hız, %90 üzeri verim değeri), iç ve dış rotorlu SMSM'lerin simülasyonları yapılmış ve tam yük koşulları için Tablo 2'deki değerler elde edilmiştir.

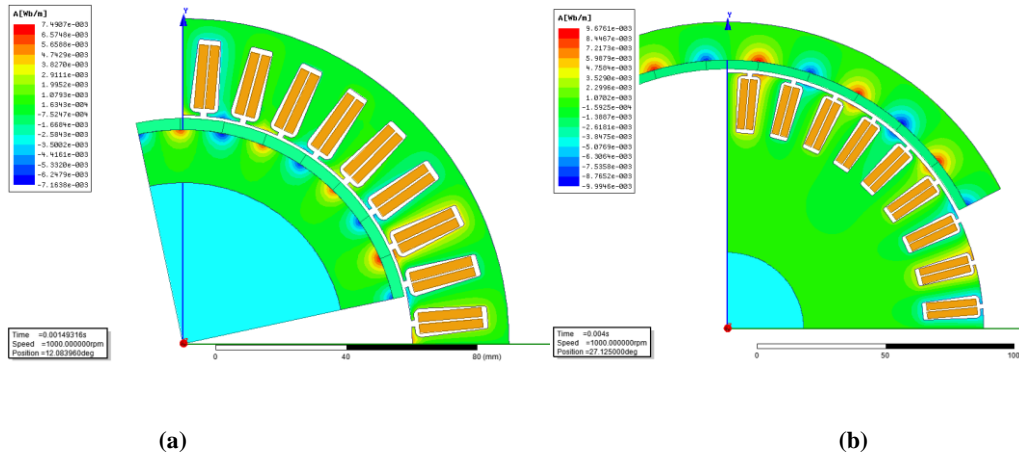
Tablo 2: İç ve Dış Rotorlu SMSM yapılarının Rmxprt TamYük Analiz Sonuçları

	İç Rotorlu SMSM	Dış Rotorlu SMSM
Faz-Faz Sargı EMK'sı Max. (V)	80	99
RMS Faz Akımı (A)	34	36
Sargı Akım Yoğunluğu (A/m ²)	4.14	4.38
Elektriksel Yükleme (A.Sarım/m)	33167	24658
Giriş Gücü (W)	3286	3305
Çıkış Gücü (W)	3003	3001
Kayıp Güç (W)	283	304
Verim (%)	91.36	90.81
Mil Momenti (Nm)	28.67	28.66
Senkron Hız (d/d)	1000	1000

Buna göre performansa verim olarak bakıldığında, iç rotorlu SMSM'un daha avantajlı olduğu söylenebilir. Faz-Faz sargı zıt EMK'larının max. değerlerinin farklı olmasının sebebi ise, dış rotorlu SMSM'un mıknatıs kutup dağılım alanının daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Dış rotorlu yapıda, mıknatıslar en büyük çap değerine sahip olan rotor bloğu üzerinde buldukları için radyal olarak daha fazla alan kaplamaktadır. İç rotorlu yapıda mıknatıs genişliği 13mm civarında iken, dış rotorlu yapıda bu değer 20 mm civarındadır. Mıknatıs kutup alanlarının farkından dolayı üretilen sargı zıt EMK'ları da farklı olmaktadır. Yapılan Rmxprt analizinden sonucuna göre Maxwell 3D ile çizilen iki farklı yapının şekilleri Şekil 2 (a) ve (b) de verilmiştir.

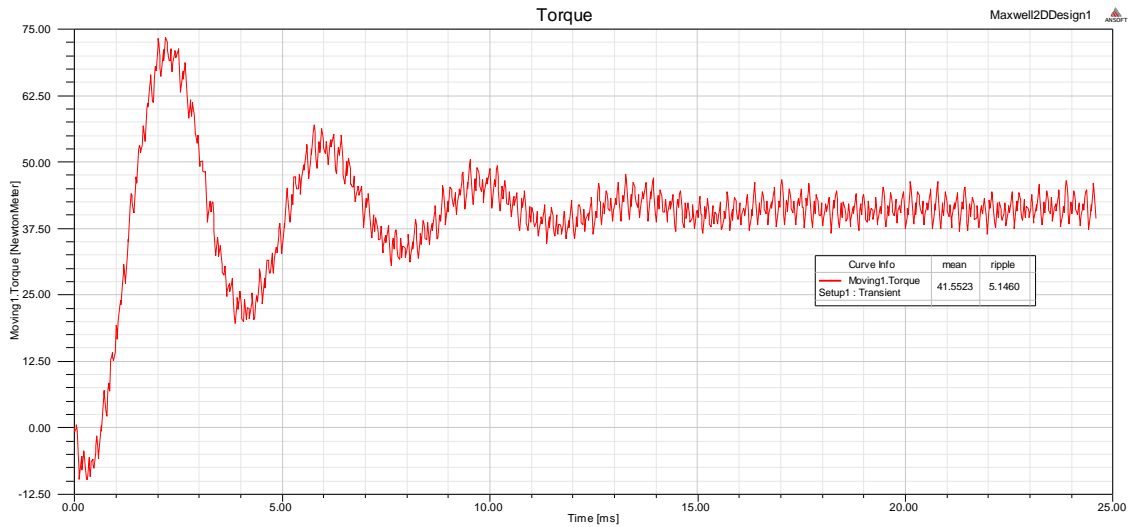
**Şekil 2. İç Rotorlu (a) ve Dış Rotorlu (b), SMSM ların 3 boyutlu Patlak Modelleri**

Alan dağılımları incelendiğinde ise, tam yük altında çalışma esnasında, iç ve dış rotorlu SMSM'un kabul edilebilir bir akı dağılımı bölgesinde çalıştığı söylenebilir. Bu durum Şekil 3 (a) ve (b)'de gösterilmiştir.

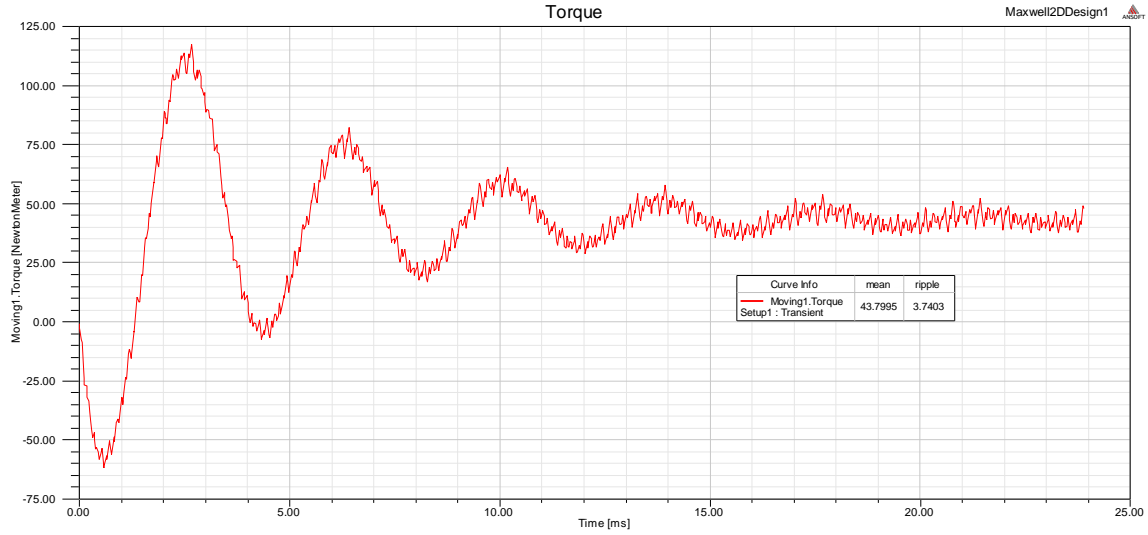


Şekil 3. İç Rotorlu (a) ve Dış Rotorlu (b) SMSM'un Tam Yük Şartlarında Akı Dağılımları

Buna 1 T civarında (veya 1 mWb'lik akı, Yeşil Contour) bir akı yoğunluğu dağılımı, tam performans esnasında sıcaklığın sabit kalmasına sebep olup, mıknatısların ortalama 75°C de, demagnetize olmadan çalışmasına imkan verecektir. Bunun dışında üretilen şaft momentlerinin ortalama değerlerinin aynı olduğu göz önünde bulundurulursa, transient analiz yapılarak hangi motor tipinin moment dalgalılığının daha iyi olduğu söylenebilir. Şekil 4 (a) ve (b)'de iç ve dış rotorlu SMSM'a ait şaft momentlerinin zamana göre değişim grafikleri verilmiştir. 20 ve 25.ms'ler arasında ortalama moment değerleri ve moment dalgalılık değerleri hesaplandığında, iç rotorlu SMSM'un ortalama şaft momentinin 41.55 Nm ve moment dalgalılığının ise %5.14 civarında olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, dış rotorlu SMSM'un ortalama şaft momentinin 43.79 Nm ve moment dalgalılığının ise %3.74 civarında olduğu görülmüştür. Buna göre 20. ms den sonra yani kararlı rejimde, dış rotorlu SMSM'un moment dalgalılığının daha iyi olduğu söylenebilir.



Şekil 4. (a) İç Rotorlu SMSM'un Şaft Momentinin Zamana Bağlı Değişim Grafiği



Şekil 4. (b) Dış Rotorlu SMSM'un Şaft Momentinin Zamana Bağlı Değişim Grafiği

3. Sonuçlar

İki farklı rotor yapısına sahip SMSM'un yapılan performans karşılaştırmalarında, güç ve enerji yoğunluğu değerleri sabit tutulmaya çalışılmıştır. Ancak aynı hacimdeki stator bloğu göz önüne alındığında, dış rotorlu yapının bir miktar daha ağır olduğu söylenebilir. İç rotorlu yapının elektriksel yüklenme değeri, stator oluk alanlarının daha fazla olması nedeni ile daha fazladır. Buna bağlı olarak akım yoğunluğu değeri, dış rotorlu yapıya göre daha düşüktür. Akım yoğunluğunun daha az olması sebebi ile, iç rotorlu SMSM'un sargı kayıpları daha azdır. Bu nedenle verim değeri %1 civarında daha iyidir. Üretilen şaft momentleri açısından bakılacak olursa, aynı ortalama şaft momenti için, dış rotorlu SMSM'un moment dalgalanması daha düşüktür. Sebebi ise dış rotor bloğunda bulunan ve daha yüksek yüzey alanına yayılmış mıknatıs kutuplarının vurutu etkisini azaltması ve yüksek stator akım yoğunluğuna bağlı harmonik dalgalanmanın azalması olarak söylenebilir. Verim göz önüne alınacaksa iç rotorlu yapının tercih edilmesi mümkündür, moment dalgalılığı göz önüne alınacaksa, dış rotorlu yapı tercih edilebilir.

4. Referanslar

- [1] Rasmussen, K. F., Davies, J. H., Miller, T. J. E., and McGelp, M. I., "Analytical and numerical computation of air-gap magnetic fields in brushless motors with surface permanent magnets," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 36, pp. 1547–1553, 2000.
- [2] Hendershot, J. R., and Miller, T. J. E., Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Oxford: Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1994.
- [3] Zhu, Z. Q., Howe, D., and Chan, C. C., "Improved analytical model for predicting the magnetic field distribution in brushless permanent-magnet machines," IEEE Trans. Magnet., Vol. 38, pp. 229–238, 2002.
- [4] Kitap: M.V.Desphande, "DESIGN AND TESTING OF ELECTRICAL MACHINES", New Delhi 2011.
- [5] <https://en.engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/>
- [6] <https://seminarprojects.blogspot.com/2011/12/brush-less-d-c-motor.html>
- [7] Wenjuan Zhang, Shoudao Huang, Jian Gao, Rui Li, and Litao Dai "Electromagnetic Torque Analysis for All-Harmonic-Torque Permanent Magnet Synchronous Motor", IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 54, No. 11, November 2018.
- [8] Radu Sיעoban, Radu Martiş, Claudia Martiş, Calin Husar, Lucian Coadălată, Cristi Irimia, "Multiphysics Design, Analysis and Optimisation Platform of PMSM for Automotive Applications", 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE 2016), 20-22 October, Iasi, Romania.
- [9] U. Demiroğlu and B. Şenol, "Analytical Design of PI Controllers for First Order plus Time Delay Systems," International Scientific and Vocational Studies Journal (ISVOS Journal), 2(2):40-47, 2018.