



Efficiency and Performance Comparison Between Synchronous Reluctance and Induction Motor in Axial Flux Concept

Harun Serhat GERÇEKÇİOĞLU* Mehmet AKAR

Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechatronics Engineering, 60150, Taşlıçiftlik/TOKAT

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received:06/04/2021
Revision:18/04/2021
Accepted:11/05/2021

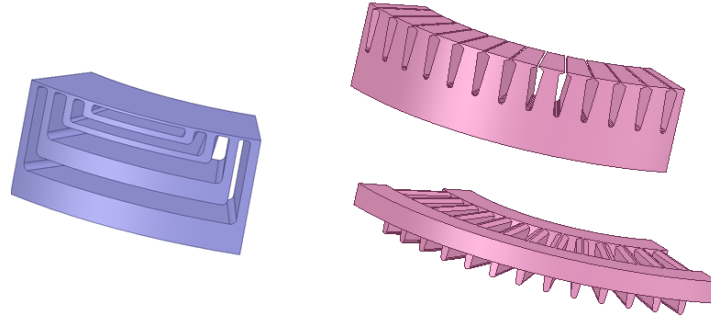
Highlights

- Motor Design.
- Axial Flux.
- Finite Element Method.

Keywords

Synchronous Reluctance
Axial Flux Motor
Finite Element Method

Efficiency, power density and cost play an important role in motors used in low-power industrial applications. In today's world, where the importance of energy efficiency and compact structure is increasing day by day, the Axial Flux Synchronous Reluctance Motor (AF-SynRM) design, which is a unique motor with no copper loss in its rotor and compact with its axial structure, has been compared with the Axial Flux-Induction Motor (AF-IM) with the same stator structure.



Axial Flux Synchronous Reluctance Motor

Axial Flux Induction Motor

Figure A. Rotor parts of two motors (AF-SynRM and AF-IM) with the same stator structure.

Purpose: In this study, in two motors with the same stator structure and dimensions; In AF-IM and AF-SynRM, only the rotor part has been changed and the change in output parameters has been examined.

Theory and Methods: In the preliminary study of the designs, the motor dimensions were calculated analytically and modeled with the 3D Finite Element Method (FEM). To optimize the saliency ratio, which is the most important factor affecting AF-SynRM performance, a Genetic Algorithm (GA) based optimization was made and the rotor geometry was changed.

Results: In comparison, the outer diameter, inner diameter and stator parameters are the same, and the motor efficiency has been increased proportionally by 8.53% with only rotor change, and it has been increased from IE3 to IE4 standards. At full load, the AF-SynRM produced 23.2% more power than the AF-IM

Conclusion: Considering the total losses, costs and efficiency values, the AF-SynRM design will be an alternative to the AF-IM compared with reference. In future studies, experimental comparison of AF-SynRM, which goes through production processes, with AF-IM will also be possible. In addition, designs of AF-SynRM with permanent magnets can also be designed and the comparison procedure can be repeated.



Efficiency and Performance Comparison Between Synchronous Reluctance and Induction Motor in Axial Flux Concept

Harun Serhat GERÇEKCİOĞLU* Mehmet AKAR

¹Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 60150, Taşlıçiftlik/TOKAT

Abstract

In this study, the Axial Flux Synchronous Reluctance Motor (AF-SynRM) with multiple barriers in its rotor is designed and it is aimed to compare the performance with the Axial Flux Induction Motor (AF-IM) with the same stator structure and dimensions. For an equal comparison, the motor dimensions and stator structure are chosen the same, only the rotor is changed. In the preliminary study of the designs, machine dimensions are calculated analytically and modeled with the 3D Finite Element Method (FEM). To optimize the saliency ratio, which is the most important factor affecting AF-SynRM performance, Genetic Algorithm (GA) based optimization is performed and the rotor geometry is changed. Thus, a suitable model is created for comparison. Torque, efficiency, input power, power factor, total losses and torque per ampere parameters are analyzed. With the proposed comparison method, AF-SynRM obtains higher efficiency, power, torque per ampere and lower losses than AF-IM at the same power rating (2.2 kW). The AF-SynRM rotor will be a good alternative in applications where high efficiency and torque are required, with low cost-maintenance costs due to the absence of a squirrel cage and its structure without magnet.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/04/2021
Düzeltilme: 18/04/2021
Kabul: 11/05/2021

Keywords

Synchronous Reluctance
Axial Flux Motor
Finite Element Method

Anahtar Kelimeler

Senkron Relüktans
Eksenel Akılı Motor
Sonlu Elemanlar Yöntemi

Eksenel Akı Konseptindeki Senkron Relüktans ve İndüksiyon Motor'un Verim ve Performans Karşılaştırması

Öz

Bu eserde, rotorunda çoklu sayıda bariyere sahip Eksenel Akılı Senkron Relüktans Motor (EA-SRM) tasarımı yapılarak, aynı stator yapısı ve boyutlara sahip Eksenel Akılı İndüksiyon Motor (EA-IM) ile performans karşılaştırması yapmak amaçlanmıştır. Eşit bir karşılaştırma olabilmesi için motor ölçüleri ve stator yapısı aynı seçilmiş, sadece rotor değişimi yapılmıştır. Tasarımların ön çalışmada motor ölçüleri analitik olarak hesaplanmış ve 3D Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile modellenmiştir. EA-SRM performansını etkileyen en önemli faktör olan çıkıntı oranını optimal düzeye getirmek için Genetik Algoritma (GA) tabanlı optimizasyon yapılmış ve rotor geometrisi değiştirilmiştir. Böylece karşılaştırma için uygun model oluşturulmuştur. Tork, verim, giriş gücü, güç faktörü, toplam kayıplar ve akım başına tork parametreleri analiz edilmiştir. Önerilen karşılaştırma metodu ile EA-SRM aynı güç değerindeki (2.2 kW) EA-IM den daha yüksek verim, güç, amper başına tork ve daha düşük kayıplar elde edilmiştir. Karşılaştırmada dış çapı, iç çapı ve stator parametreleri aynı olup sadece rotor değişimi ile motor verimi oransal olarak %8.53 artarak, IE3'ten IE4 standartlarına çıkarılmıştır. Tam yükte EA-SRM de, EA-IM den %23.2 fazla güç üretilmiştir. EA-SRM rotorunda sincap kafesi bulunmaması sebebiyle bakır kayıplarının olmaması ve mıknatıssız yapısıyla maliyet-bakım masraflarının düşüklüğü, yüksek verim ve tork istenilen uygulamalarda iyi bir alternatif olacaktır.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya genelinde üretilen enerjinin %40 ı sanayi uygulamalarında kullanılan elektrik motorları tarafından tüketilmektedir. AB ülkelerinde ise elektrik motorları ve sistemleri endüstrinin önemli bir parçası halindedir ve üretilen enerjinin %70 i elektrik motorları ve sistemleri tarafından tüketilmektedir [1-2]. IEA (Uluslararası Enerji Ajansı) 'nın 2020 yılı küresel enerji inceleme raporunda dünya enerji

tüketiminin yıllık ortalama %3 arttığı ayrıca yenilenebilir kaynaklardan (su, rüzgâr ve güneş) üretilen elektrik üretiminin de %7 arttığı belirtilmiştir [3]. Gelecek yıllardaki enerji tüketimi artışı ve verim talebi senaryoları da incelendiğinde, son yıllarda yüksek verimli elektrik motoru tasarımlarına ihtiyaç olduğu görülmüş ve çalışmalar yapılmıştır. Endüstride en çok kullanılan ve en büyük market payına sahip Üç Fazlı Sincap Kafesli İndüksiyon Motorlar üzerinde geliştirmeler yapılmıştır fakat rotor kayıplarının bulunması, alternatif ve daha verimli motor tiplerine yönelmeyi gerektirmiştir [4]. Böylece rotor kayıplarından arındırılmış Senkron Relüktans Motor (SRM) tasarımları incelenmiş ve dikkate alınmıştır. SRM ler uzun zaman boyunca düşük performansları dolayısıyla önemsenmemiştir. Özellikle şebeke kalkışı için kullanılan sincap kafesi içeren tasarımlar dikkat çekmemiştir. Fakat son yıllarda gelişen güç elektroniği ve sürücü sistemleri ile sincap kafesi bulunmayan tasarımlar çalışılmış ve performansları ile dikkat çekmiştir. Özellikle geleneksel AC motor ve senkron motorlar ile aynı tip stator kullanımı önemli bir fayda sağlamıştır.

Bu çalışmada aynı stator yapısı ve boyutlara sahip iki motorda; Eksenel Akılı İndüksiyon Motor (EA-IM) ve Eksenel Akılı Senkron Relüktans Motor (EA-SRM), sadece rotor değişimi ile çıkış parametrelerindeki değişim incelenmiştir. Beş bölümden oluşan bu eserde birinci bölüm Giriş kısmıdır. İkinci bölümde İndüksiyon ve Senkron Relüktans Motorlar üzerinde bilgi verilmiş olup Eksenel Akılı modelleri üzerine literatür taramaları yapılmıştır. Üçüncü bölümde eksenel akılı motorlar için boyutlandırma Denklemlerine yer verilmiş olup, stator ve rotor tasarımları için detaylandırılmıştır. Dördüncü bölüm, analitik olarak hesaplanmış modellerin Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak tasarlanması, analiz edilmesi ve karşılaştırmasını içermektedir. Son olarak Sonuç kısmı sunulmuştur.

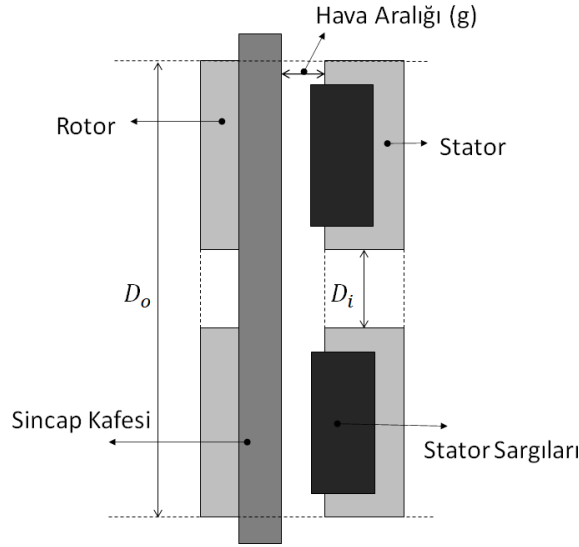
2. İNDÜKSİYON VE SENKRON RELÜKTANS MOTORLAR (INDUCTION AND SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTORS)

İndüksiyon ve Senkron Relüktans Motorlar ile ilgili yapılan karşılaştırmalı çalışmalarda, geleneksel modelleri yani radyal akılı modelleri kullanılmıştır [5-8]. 2.2 kW, 4kW, 5.5kW ve 15 kW güçlerindeki motorlar karşılaştırılmış verim, tork ve tork dalgalanması parametrelerinde radyal akılı SRM'nin üstün olduğu gösterilmiştir. Günümüzde elektrikli araçlar ve ev tipi uygulamalarda kullanılacak motorlarda hacim önem kazanmıştır. Bu sebeple eksenel akılı motor kavramı üzerine çalışmalar artmış olup: geniş yarıçap/uzunluk oranı, düzlemsel ve ayarlanabilir hava aralığı, daha yüksek güç yoğunluğu, daha küçük hacim ve ağırlık, yüksek frekans ve düşük hızlara uygunluk ve yüksek verim gibi özellikleri ile radyal akılı motorlardan öne çıkmaya başlamıştır [9-18].

2.1. Eksenel Akılı İndüksiyon Motorlar (Axial Flux Induction Motors)

Eksenel akılı motorların kullanımı düşünüldüğünde, sanayide en çok kullanılan radyal akılı indüksiyon motorların eksenel tasarımları da çalışılmıştır. Eksenel akılı indüksiyon motorlar radyal akılı indüksiyon motorlar ile aynı çalışma prensibine sahiptir. Temelde eksenel akı, rotor çubuklarının üzerine güç uygular ve Lenz kanunu ile rotorda indüklenen EMF nin en düşük olduğu yöne hareket ettirir. Elektromanyetik tork, motor çapının etkisinin üzerinde bir etki ile üretilir ve konveksiyonel motorlardaki gibi sabit bir çap oranına bağlı değildir. Çünkü elektrik ve manyetik devrelerin hesaplamaları çap uzunluğunun bir fonksiyonudur. Örnek olarak yan taraftan görünüşe sahip EA-IM Şekil 1 de gösterilmiştir [15].

EA-IM'ler üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Geleneksel stator-rotor yapısından farklı olarak çift stator-tek rotor ve çift stator-çift rotor yapısındaki tasarımlar incelenmiştir. Bu yapılar ile eksenel akılı motorlardaki manyetik çekimin azaltıldığı gözlenmiştir. Rotor oluk sayısının fazla olması ve stator sargı yapılarının değişimi ile tork ve verim parametrelerinde olumlu etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Mıknatıslı senkron motorlar ile de karşılaştırmalar yapılmıştır. EA-IM'de daha düşük tork yoğunluğu-verim değerleri olmasına rağmen mıknatısların demagnetize olma ihtimali de değerlendirilmiştir. Tasarımlarda eğik kısa devre çubuklarının gözlenebilmesi ve tork dalgalanmasının değerlendirilmesi istendiği durumlar için 3D SEY kullanılması gerektiği belirtilmiştir [11-22, 29].

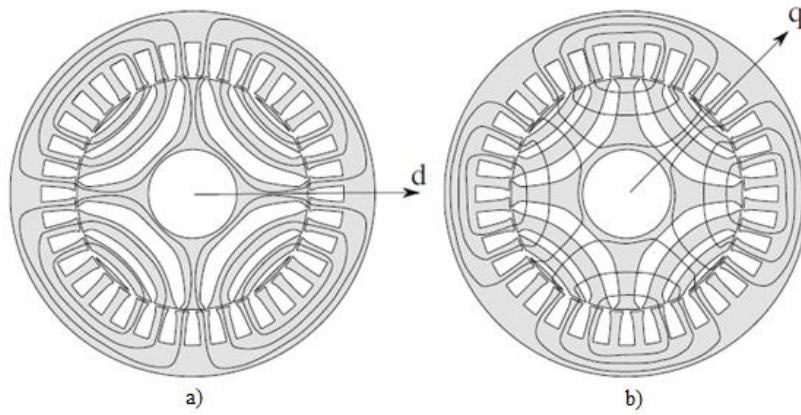


Şekil 1. EA-IM yandan görünüşü

EA-IM' ler ayarlanabilir hava aralığı, iyi güç-ağırlık ve çap-uzunluk oranı, kompakt yapısı, iyi verimi ve özellikle yüksek kutup sayısı kullanılabilirliği ile fanlar, tekerlek uygulamaları, pompalar, ev aletleri ve elektrik araçlarında geleneksel motorlara göre alternatif olabilmektedir. EA-IM ile aynı güç değerinde bir radyal akılı indüksiyon motor (RA-IM) karşılaştırıldığında: stator bakır kayıpları, stator demir kayıpları ve rotor bakır kayıpları açısından avantajlı görünse de rotor eddy akımı kayıplarının fazla olması dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunların dışında motor paket uzunluğu olarak neredeyse radyal akılı bir motorun yarısı kadardır. EA-IM ler yüksek hızlı uygulamalar için RA-IM ler kadar uygun değildir. Bunun sebebi indüksiyon motorların çalışma prensibi dolayısıyla en verimli modelleri 2 veya 4 kutuplu olanlarıdır. EA-IM lerde kısa rotor ve geniş çap dolayısıyla yüksek hızlarda aşırı sürtünme kayıpları olacağından, rotor çekirdeğinin mekanik dayanımı yetersiz görünmektedir. EA-IM ler diğer eksenel akılı motorlarda da karşılaşılan, kuvvetli eksenel manyetik çekime sahip olması dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır [19,29].

2.2. Eksenel Akılı Senkron Relüktans Motorlar (Axial Flux Synchronous Reluctance Motors)

Son zamanlarda birçok uygulamada kullanılan AC motorlar arasında, radyal akılı senkron relüktans motorlar (SRM): Rotorunda kafes bulunmadığı için bakır kaybı olmaması, yüksek verimi, sağlam yapıları, yüksek tork yoğunluğu ile öne çıkmaktadır. Elektrik motorlarındaki yüksek verim IE4 sınıfına giren bu tasarımlar, sanayide en çok kullanılan asenkron motorların yerine almaya aday haline gelmiştir [30-36]. Senkron relüktans motorlar, rotorlarında bulunan bariyer yapıları ile manyetik geçirgenlik farkları bulunan iki eksen arasındaki akı farkı tork üretimindeki önemli bir parametredir. Rotorda iki farklı akı yolu vardır. Birincisi yüksek geçirgenlikli Şekil 2.a da gösterilmiştir ve d-ekseni yönü olarak tanımlanmıştır. Diğeri ise düşük geçirgenlikli Şekil 2.b de gösterilen ve q-ekseni yönü olarak isimlendirilmiştir [22]. d-ekseni endüktansı (L_d) ve q-ekseni endüktansı (L_q) farkını bariyer yapısı değiştirilerek artırmak, tork değerini de artırmaktadır. Bu sebeple rotor tasarımı öne çıkmaktadır. Rotora ilave edilen mıknatıslar ile tork vb. kapasitesi artırabilir olmasına rağmen demagnetizasyon gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Ayrıca mıknatıssız tasarımlar maliyet olarak düşüktür. Sonlu elemanlar yöntemi analizleri ve optimizasyonları ile tork, tork ripple, verim ve çıkıntı oranı gibi değerlerde iyileştirmeler yapılarak performansları artırılabilir.

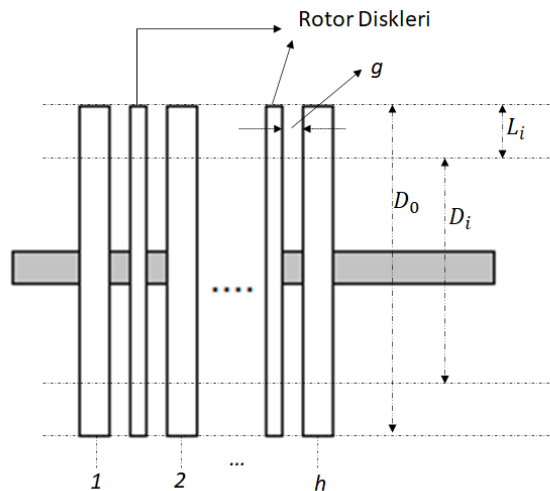


Şekil 2. SRM ve akı yolları a)yüksek geçirgenlik b)düşük geçirgenlik

Rotor kayıplarından arındırılmış radyal akılı SRM ler için yeni bir yaklaşım olan EA-SRM'ler (disk tipi motorlar) örnek olarak otomotiv alanındaki boyut sıkıntısı yaşanan uygulamalarda (fan v.b. içerdiğinde büyük boyutlu), kompakt yapısı ve yüksek güç/tork yoğunluğu ile radyal akılı motorların karşısında alternatif olarak yer almaktadır. Radyal akılı SRM ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen EA-SRM çalışmaları çok az sayıdadır. 3D SEY ile oluşturulmuş tasarımlarda stator için konsantre sargılar tercih edilmiştir. SRM, mıknatıslı SRM ve mıknatıslı EA-SRM ile karşılaştırılmıştır. Üstün yönleri belirtilmiş ve üretilebilirliği tartışılmıştır [23-25]. Bir başka çalışmada ise 2.2 kW-1500 d/d-8 kutuplu EA-SRM prototipi tasarlanmış, rotor geometrisi üzerine detaylı çalışılmış ve üretilmiştir. Similasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında sonuçların örtüştüğü görülmüştür. EA-SRM'nin 60034-30-1:2014 IE4 Süper Premium verim sınıfına sahip olduğu belirtilmiştir [26].

3. BOYUTLANDIRMA EŞİTLİKLERİ (SIZING EQUATIONS)

Boyutlandırma Denklemleri, eksenel akılı motor denklemleri kullanılarak yapılmıştır. Eksenel yapılı bir motor olduğu için stator ve rotor dış-iç çapları eşit olacaktır. Eksenel akılı motorlarda stator ve rotor tasarımı, indüksiyon ve senkron motorlardaki silindirik yapı baz alınarak yapılmaktadır. Belirlenen parametreler sabit manyetik devre hesaplama yöntemiyle stator ve rotor iç çapı, dış çapı ve kalınlıkları eksenel yapı dikkate alınarak hesaplanmıştır [27-28]. Eksenel akılı motorların genelleştirilmiş gösterimi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Eksenel Akılı Senkron Motor (EA-SM) genelleştirilmiş gösterimi

Şekil 3'te D_o , D_i , L_i , g ve h ifadeleri stator dış çapı, iç çapı, etkin boyu, hava aralığı ve stator sayısı EA-SM'ler de diğer önemli parametreler stator ortalama çapı D_{av} ve kutup aralığı ortalama çapıdır (τ).

$$D_o = \sqrt[3]{\frac{\varepsilon P_{out}}{\pi^2 k_D k_{\omega 1} n_s B_{mg} A_m \eta \cos \varphi}} \quad 1$$

$$D_i = k_d D_o \quad 2$$

$$D_{av} = 0.5(D_o + D_i) \quad 3$$

$$\tau = \frac{\pi D_{av}}{2p} \quad 4$$

$$k_D = \frac{1}{8}(1 + k_d)[1 - (k_d)^2] \quad 5$$

Verilen denklemlerde ε emf-faz gerilimi oranıdır, P_{out} çıkış gücü, k_D ifadesi D_i/D_o oranı ile ilgili bir katsayıyı ifade etmektedir, $k_{\omega 1}$ sargı faktörü, n_s rotor hızı, B_{mg} hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunu tepe değeri, A_m hat akım yoğunluğunun tepe değeri, η verim, $\cos \varphi$ güç faktörünü göstermektedir. k_d ise stator iç çapının dış çapına oranıdır. Hava aralığında indüklenen akımın, sinüsoidal dağılmış stator akımı nedeniyle sinüsoidal olarak dağıldığı varsayılırsa, her fazdaki akımlar Denklem 6, 7 ve 8 de ve üç fazın toplam akımı Denklem 9'daki gibidir [28].

$$\text{Faz A : } \hat{i} \cos \omega t \frac{N_s}{2} \sin p\theta d\theta \quad 6$$

$$\text{Faz B : } \hat{i} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \frac{N_s}{2} \sin(p\theta - \frac{2\pi}{3}) d\theta \quad 7$$

$$\text{Faz B : } \hat{i} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \frac{N_s}{2} \sin(p\theta + \frac{2\pi}{3}) d\theta \quad 8$$

$$\frac{3}{2} I \sqrt{2} \frac{N_s}{2} \sin(p\theta - \omega t) d\theta \quad 9$$

I akımın rms değeridir ve $\hat{i}$ akımın tepe değeridir. N_s seri sarım, p kutup çifti sayısıdır. Uygun denklemler belirtildikten sonra tek stator için temel tork değeri ifadesi Denklem 10 da verilmiştir.

$$T_1 = \frac{3}{8} \sqrt{2} \pi B_{g1} N_s I (r_o^2 - r_i^2) \sin(\beta) \quad 10$$

Tork ifadesindeki r_o ve r_i stator dış ve iç çaplarıdır ve β senkron makinadaki tork açısıdır. Denklem 12 de N_{ph} her fazdaki seri sarım sayısıdır. Aynı şekilde tork eşitliği yeniden yazılırsa;

$$N_s = \frac{4}{\pi} k_{\omega 1} N_{ph} \quad 11$$

$$T_1 = \frac{3}{2} \sqrt{2} \pi B_{g1} k_{\omega 1} N_{ph} I D_{av} L_i \sin(\beta) \quad 12$$

Tasarım formülleri sadeleştirmek için stator yüzeyi akım yoğunluğu katsayısını ifade eden ve Denklem 13 te verilen K_1 değeri eklenmiştir. Bu ifade genellikle düşük güçlü motorlar için 10000 A/m civarında ve orta güçlü motorlar için 40000 A/m civarı değerlerindedir. [28]

$$K_1 = \frac{3\sqrt{2} I_2 N_{ph}}{D_{av} \pi} \quad 13$$

Tek statorlu motorda tork ifadesi son halini alarak Denklem 14'te dönüşmektedir.

$$T_1 = \frac{1}{4} \pi B_{g1} k_{\omega 1} K_1 D_{av}^2 L_i \sin(\beta) \quad 14$$

Stator sayısı arttıkça tork ifadesi de her stator için hesaplanabilir. Benzer şekilde her fazda endüklenen EMF nin rms değeri de hesaplanabilir.

$$E_{ph} = \frac{\sqrt{2}}{2} B_{g1} \omega_m k_{\omega 1} N_{ph} D_{av} L_i \quad 15$$

Görünür güç S_{elm} bağlantı tipi ne olursa olsun Denklem 16'dan hesaplanabilir. h stator sayısını ifade etmektedir [28].

$$S_{elm} = 3hE_{ph}I = \pi \frac{h}{2} B_{g1} \omega_m k_{\omega 1} K_1 D_{av}^2 L_i \quad 16$$

Oluk kutup sayısı seçimi relüktans torku üretimi ve ortalama tork yoğunluğu için önemlidir. Oluk kutup kombinasyonu seçimi sargı faktörünü maksimize etmesi gereklidir [29]. Eksenel akılı senkron relüktans motor da çift katmanlı dağıtılmış sargılar seçilmiştir. Konsantre sargıların üretimi kolay ve bakır kayıpları küçük olmasına rağmen, yüksek relüktans torku için dağıtılmış sargılar tercih edilmektedir [25,30,32]. Bu sebeplerle 48 oluk ve 8 kutup yapısı tercih edilmektedir. Bu oluk-kutup uyumu ile yüksek relüktans tork sağlayacaktır fakat bu sargı seçimi ile tork dalgalanması da yüksek olacaktır. İleri bölümlerde bahsedilecek optimizasyon çalışmaları ile tork dalgalanması değeri düşürülmeye çalışılacaktır. Akım yoğunluğu J (A/m²) değeri 3-7 A/m² aralığında değişmektedir. Eğer sistemde ilave soğutma ekipmanları bulunursa bu değer yüksek seçilebilmektedir. Manyetik devrelerdeki akı yoğunluğu makinanın laminasyonunda kullanılan materyale bağlı olarak belirli değerler altında olmalıdır. Genellikle iyi tasarlanmış bir motorda stator dişlerindeki maksimum akı yoğunluğu değeri $0.2 T \leq B_{avg} \leq 0.8 T$ aralığında olmalıdır. SRM'ler amper başına maksimum tork ile çalıştırıldıklarında, dezavantajlarından olan düşük güç faktörü değerine sahiptirler. Çıkış geriliminin giriş gerilimine dönüşüm oranı 0.8-1 aralığında kabul edilmektedir. Stator oluk dolgu faktörü $k_{fill} = A_{cu}/A_{su}$ eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada A_{cu} toplam bakır alanını ve A_{su} ile stator oluk alanını ifade etmektedir. Dağıtılmış sargı tip kullanıldığında 0.6 değerinde dolgu faktörü kullanılabilmektedir. Bu oran yalıtım kalınlığına ve iletkenlerin geometrisine göre de bağlı olarak değişebilmektedir. İç çapın dış çapa oranı k_d kutup sayısı ile doğru orantılı değişen bir değerdir. 8 kutuplu motorda bu değer 0.72-0.74 arası seçilmektedir [31]. EA-IM ve EA-SRM tasarımları için seçilen başlangıç değerleri ve stator oluk ölçüleri Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Tasarım için seçilen başlangıç değerleri ve stator oluk ölçüleri

Parametreler	Tanım	Değer
P_o	Çıkış gücü	2.2 kW
n	Hız	1500 d/d
η	Verim	%90
$\cos \varphi$	Güç faktörü	0.7
p	Kutup çifti sayısı	4
B_{avg}	Ortalama manyetik akı yoğunluğu	0.65 T
A_m	Elektrik yükü	23000 A.turn/m
q_s	Her faz her kutuptaki oluk sayısı	2
J	Akım yoğunluğu	5 A/mm ²
k_{st}	Laminasyon faktörü	0.96
k_w	Sargı faktörü	0.933
k_{fill}	Dolgu faktörü	0.6
k_d	Stator iç-dış çap oranı	0.72
HS_0	Stator oluk girişi uzunluğu	1.5 mm
HS_1	Stator oluk girişi-boyunduruğu arası	1.5 mm
HS_2	Stator oluk yüksekliği	18.75 mm
BS_0	Stator oluk girişi genişliği	2.5 mm
BS_1	Stator oluk üst genişliği	6.5 mm
BS_2	Stator oluk alt genişliği	6.5 mm

3.1. Rotor Tasarımları (Rotor Designs)

Rotor oluk sayısı seçmek, tork dalgalanması, ilave kayıplar, radyal kuvvetler, gürültü ve titreşim değerlerini en aza indirmek için önemlidir. Yapılan çalışmalarda oluk sayısı eşleşmeleri ve performansları incelenmiştir [32-34]. Rotor çubukları eğik olmayan durumlarda, rotor çubukları çift sayıda seçilmelidir. Eğer stator oluk sayısı 48 seçilmişse en uygun rotor oluk sayısı 54 seçilmelidir. Bir başka çalışmada da rotor oluk sayısı 52 alındığında $R=54$ ile korelatif değerler çıkmıştır. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile analizler yapıldığında analiz sonuçlarının hızlı alınması için EA-IM'nin $\frac{1}{4}$ modeli alınırsa $R=52$ daha uygun olacaktır. 4 kutuplu ($p=4$) için stator-rotor oluk eşleşmeleri Tablo 2'de gösterilmiştir [35].

Tablo 2. 4 kutuplu ($p=4$) IM için stator-rotor oluk eşleşmeleri

p	R (eğimli rotor çubukları-çift)	
4	22, 26, 30, 36, 38, 50, 52, 54, 58, ...	
4	$S = 48$	$S = 72$
	(eğik olmayan rotor çubukları – çift)	(eğik olmayan rotor çubukları – çift)
	30, 42, 50, 54, 58, 62, ...	42, 44, 46, 50, 58, 60, 82, ...

Rotor bar akımı Denklem 17'de gösterilmiştir.

$$\frac{K_1 2mN_1 K_{w1} I_a}{N_r} \quad 17$$

Bu Denklemden;

$$K_1 = 0.8 \cos \phi_n + 0.2 \quad 18$$

Yüksek verimde rotor barındaki akım yoğunluğu $j_b = 3.42 \text{ A/mm}^2$ alınabilir. Rotor kullanılabilir oluk alanı Denklem 18 ile hesaplanabilir.

$$A_b = \frac{I_b}{j_b} \quad 19$$

Şekil 4'te görülen uzunluklar aşağıdaki Denklemler yardımıyla hesaplanabilir. $l_r = 0.5 \text{ mm}$ ve $O_r = 1.5 \text{ mm}$ alınabilir. Rotor dişi genişliği b_{tr} Denklem 20'de ve rotor oluk dişi uzunluğu τ_r Denklem 21'de ifade edilmiştir. Rotor dişlerindeki akı yoğunluğu B_{tr} ifadesi radyal akılı motorlarda 1.5-2.2 T alınmaktadır. EA-IM de de aynı şekilde kullanılabilir [26,29].

$$b_{tr} = \frac{B_g}{K_{Fe} B_{tr}} \tau_r \quad 20$$

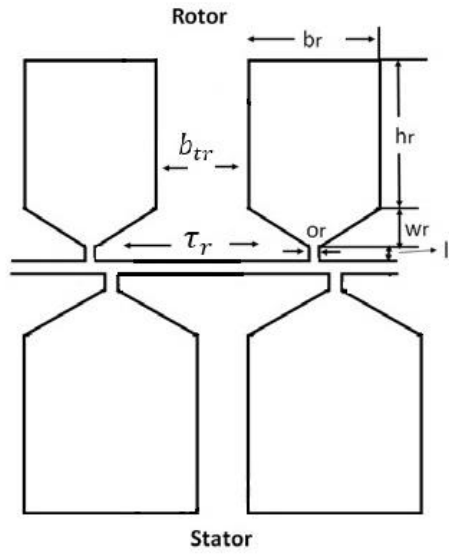
$$\tau_r = \frac{\pi(D_{in} - 2g)}{N_r} \quad 21$$

EA-SRM, rotor -d ve -q eksenlerindeki endüktans farkı ile relüktans torkunun oluşması konsepti ile çalışmaktadır. Rotor bariyerlerindeki özgün tasarım ile bu endüktans farkı maksimize edilmeye çalışılmış ve tork dalgalanması minimize edilmiştir. Yapılan optimizasyonlar ile rotor bariyerlerinin sayısı, genişlikleri, bariyer başlangıç açıları gibi değişkenler optimum şekilde ayarlanmıştır. Sonuç olarak daha önceden yapılmamış ve özgün rotor topolojisi oluşturulmuştur. Motor da üretilcek tork değeri Denklem 22'de verilmiştir [37].

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (L_{md} - L_{mq}) i_{md} i_{mq} = \frac{3}{2} p (L_{md} - L_{mq}) I_m \sin(2\gamma) \quad 22$$

Denklem 22'de L_{md} ve L_{mq} -d ve -q eksenlerinde hava aralığındaki endüktansları, i_{md} ve i_{mq} -d ve -q eksenlerindeki stator akımlarını, I_m stator akımının vektör genliğini ve γ ise akım açısını ifade etmektedir. Görüldüğü üzere tork değeri rotorun yapısı ve geometrisi ile doğrudan ilişkilidir. EA-SRM rotor yapısındaki bariyer ve segmentlerin oranları yalıtım oranı (k_q) olarak isimlendirilmektedir [39].

$$k_q = \frac{l_a}{l_y} \quad 23$$



Şekil 4. EA-IM için rotor oluk geometrisi

l_a toplam bariyer genişliğini ve l_y ise toplam demir genişliğini ifade etmektedir. Burada amaç optimum tasarımı bularak torku maksimize etmek ve tork dalgalanmasını en aza indirmektedir. Literatürde radyal akılı motorlar için k_q değerleri 0.4, 0.6, 1, 1.2 ve 1.5 gibi değerler alınarak çalışmalar yapılmıştır [31,38]. Rotor kutuplarında bulunan segment ve bariyerlerin açılmal olarak pozisyonları tork ve tork dalgalanmasında önemli parametrelerdir. Denklem 24'te " α " bariyerler arasındaki açıdır. " β " ise α açısının kontrolü için gerekli ilave yardımcı açıdır.

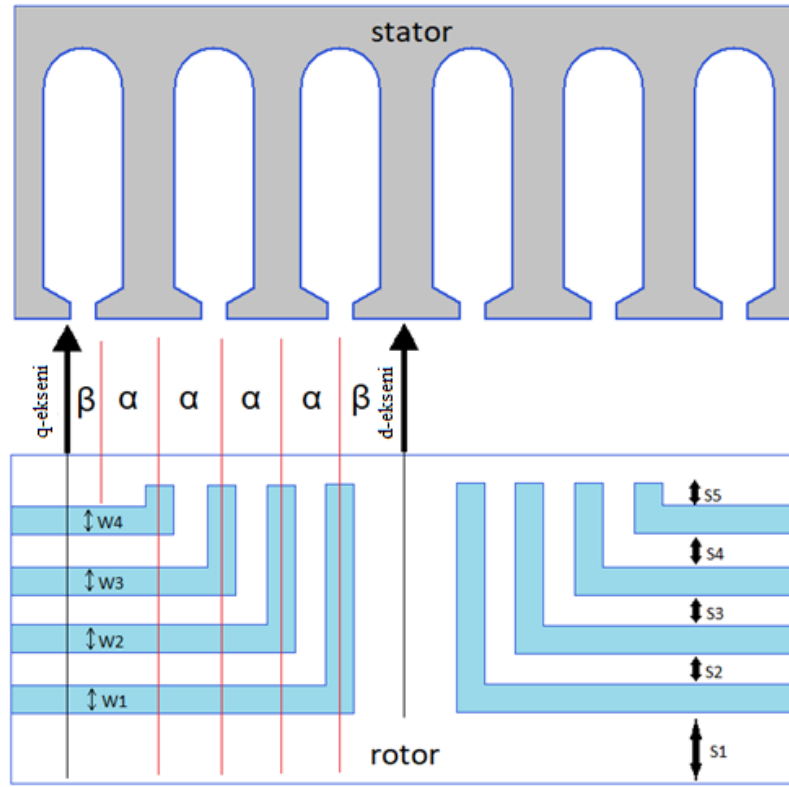
$$\alpha = \frac{\frac{\pi}{2p} - \beta}{n_{layer} + \frac{1}{2}} \quad 24$$

α açısı ile tork dalgalanması minimize edilebilmektedir. Optimizasyon çalışmaları ile β açısının da değişeceği çalışmalar ile gösterilmiştir. Yapılan çalışmalarda $\alpha = \frac{\beta}{2}$ alınarak hesaplamalar yapılabilmektedir [38]. Diğer önemli parametreler, bariyer ve segmentlerin kalınlıklarının hesaplarıdır. Şekil 5'te EA-SRM rotorun bir kutubundaki bariyer ve segmentleri örnek olarak gösterilmiştir.

Şekil 5'te segment genişliği " S " ile bariyer genişlikleri ise " W " ile gösterilmiştir. Segmentlerin hava aralığında oluşan MMF lerinin ortalama (p.u.) değerleri hesaplanmış, bir segmentten diğerine toplam akı farkı dikkate alınmıştır. Aynı yöntem ile bariyer genişliklerinin hesapları da her bariyer üzerindeki MMF farkı (Δf_k) ile yapılabilmektedir. Bu hesaplar sonrası her bir segment ve bariyerin kalınlıkları elde edilmiş olacaktır. Böylece yalıtım oranı k_q , l_y ve l_a oranları ile hesaplanıp elde edilebilir [15, 26, 31, 39].

4. SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ (SEY) TASARIMLARI VE ANALİZLERİ (FINITE ELEMENT METHOD (FEM) DESIGN AND ANALYSIS)

Tasarım metodolojisinde ilk olarak tasarım kriterleri belirlenmektedir. Daha sonra elektromanyetik tasarım olarak ifade edilen, içerisinde motor boyutlandırmaları, optimizasyonu ve SEY analizini içermektedir [5]. Bu çalışmada stator tasarımı ve motor boyutları aynı olan motorların, rotor tasarımlarının farklılıkları ile motor performansını karşılaştırmak amaçlanmıştır. Sonuç olarak sadece rotor değişimi motor performansının karşılaştırması yapılacaktır. 2.2 kW gücündeki referans EA-IM ile yeni bir tasarım olan 2.2 kW gücündeki EA-SRM karşılaştırılacaktır.



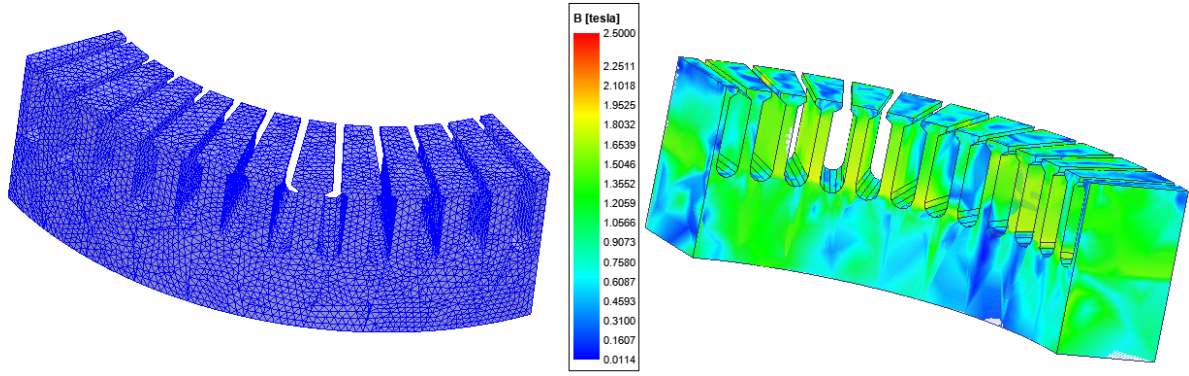
Şekil 5. EA-SRM rotor bariyer ve segmentleri

4.1. Stator Modeli (Stator Model)

Her iki motor tipinde ortak seçilecek stator tasarımında sargı parametreleri Tablo 3'te gösterilmiştir. Stator ve amper-sarım değerleri eşit bir karşılaştırma olması için aynı seçilmiştir. Stator mesh ve manyetik akı yoğunluğu görüntüsü Şekil 6'da gösterilmiştir. Analizlerin doğruluğu açısından mesh sayısı özel olarak artırılarak "200364" mesh oluşturulmuştur. Manyetik akı yoğunluğuna bakıldığında ortalama 1.5 T ile malzemenin doyumunda olmadığı gözlenmiştir.

Tablo 3. Stator sargı parametreleri

Tanım	Değer
Faz sayısı	3
Sargı katmanı	2
Sargı tipi	Tam kalıp
Paralel kol	1
Oluktaki iletken sayısı	58
Adım sayısı	5
İletken boyutu çapı	2x0.85mm
Oluk sayısı	48



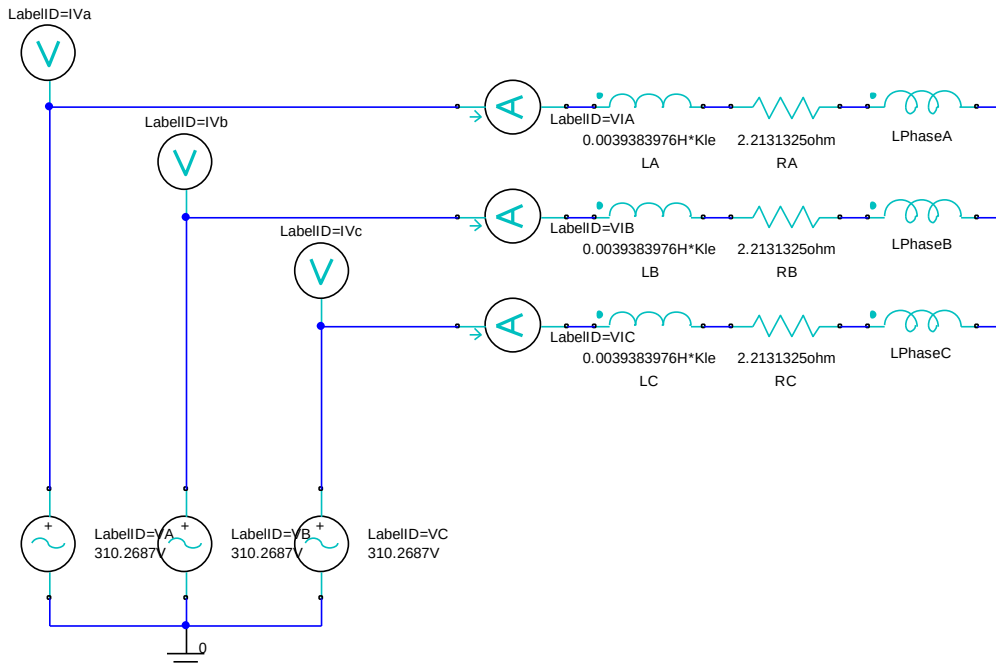
Şekil 6. Stator ve mesh görüntüsü

4.2. Ea-Im / Ea-Srm Rotor Modelleri Ve Sey Analizleri (Af-Im / Af-Synrm Rotor Models And Fem Analysis)

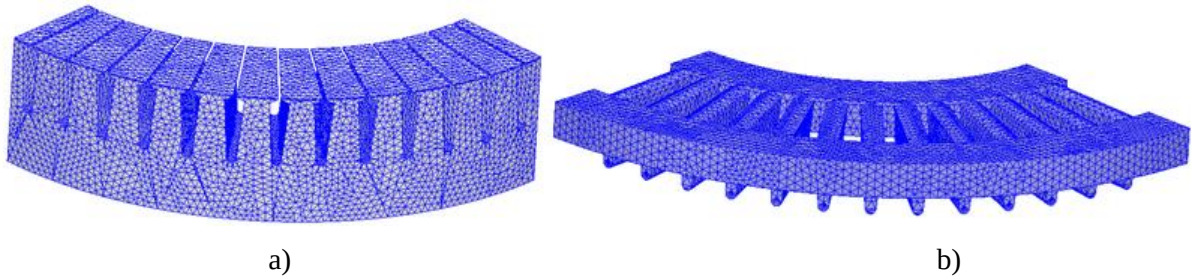
Analitik olarak tasarlanmış EA-IM ve EA-SRM nin karakteristik eğrilerini çıkarmak için 3D- Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile analizleri yapılmıştır. Bariyer analiz ve tasarımları için SEY tabanlı benzetim programı ile çalışmalar yapılmıştır. SEY, akışkanlar dinamiği, elektromanyetik, magnetostatics ve termal iletkenlik gibi integral ve diferansiyel denklemler içeren eşitliklerin çözümü için kullanılan nümerik bir tekniktir. ANSYS programı, sonlu elemanlar yöntemi gibi fiziksel problemlerin çözümü için kullanılan bir paket programdır. Bu çalışmadaki modeller ANSYS Electromagnetics Suite paket programı ile tasarlanmış ve analizleri yapılmıştır. Manyetik analizlerdeki hesaplama sürelerini azaltmak için stator-rotor bariyer uyumları göz önüne alınarak EA-SRM'nin 1/8 ve EA-IM'nin 1/4 motor modeli kullanılmıştır. Motor parçalarında materyal olarak, Stator için "JFE_Steel_35JN300" ve rotor için "Steel_1010" kullanılmıştır. Tasarlanmış modellerin SEY analizleri 80 ms boyunca 0.33 ms lik aralıklarla analiz edilecektir. EA-IM için harici uyarım devresi uygulanmıştır ve Şekil 7'de gösterilmiştir. EA-SRM sabit akımda uyarılmıştır ve uygulanan akım değerleri-parametreleri Tablo 4'te gösterilmiştir. Bu çalışmada referans olarak seçilen EA-IM' nin ¼ model rotor görüntüsü (mesh) ve sincap kafesi (mesh) Şekil 8'de gösterilmiştir. Stator-rotor oluk sayısı eşleşmesi olarak 48-52 seçilmiştir [35].

Tablo 4. EA-SRM uygulanan akım ve parametre değerleri

Parametreler	Açıklama	Değer
Gamma_TSC	Akım açısı	45 ⁰
Imax_TSC	Akım	8.202 A
Speed_TSC	Hız	1500 d/d
Phase A akımı	$Imax_TSC * \sin(Speed_TSC/1rpm*8/60*pi*time+Gamma_TSC-0.0deg- \bar{O} deg)$	8.20 A
Phase B akımı	$Imax_TSC * \sin(Speed_TSC/1rpm*8/60*pi*time+Gamma_TSC-120.0deg- \bar{O} deg)$	-4.14 A
Phase C akımı	$Imax_TSC * \sin(Speed_TSC/1rpm*8/60*pi*time+Gamma_TSC-240.0deg- \bar{O} deg)$	-4.06 A
$\bar{O}$	d-q eksenleri hizalama açısı	-15.3 ⁰

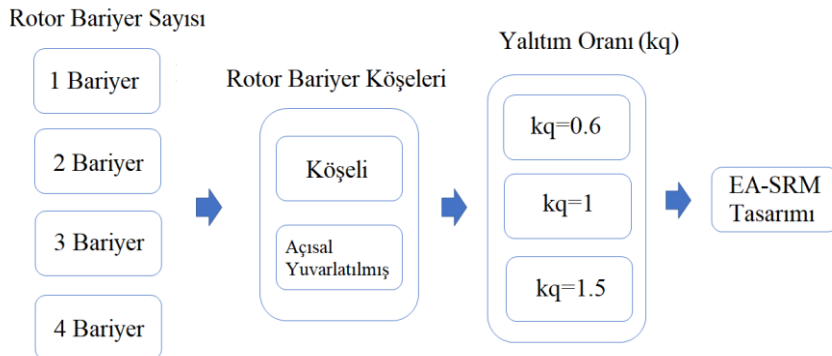


Şekil 7. EA-IM harici uyarım devresi



Şekil 8. a) EA-IM Rotor ve b) EA-IM Sincap Kafesi

EA-SRM tasarımında Şekil 9'da gösterilen aşamalar izlenmiştir. Bu aşamalarındaki parametrelerin değişimi, maliyet, verim ve üretilebilirliği için önemlidir [5]. Hava aralığı olarak 0.3 mm alınmıştır. Uygun model oluşturulduktan sonra referans EA-IM ile performansları karşılaştırılacaktır.



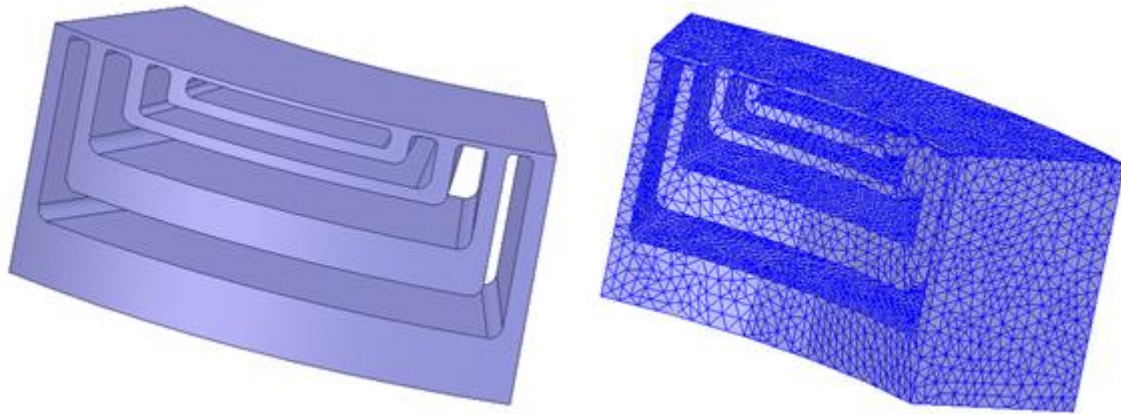
Şekil 9. EA-SRM tasarım aşamaları

Daha önce yapılmış çalışmada 2.2 kW gücündeki EA-SRM tasarımında Şekil 9'daki aşamalar detaylıca incelenmiştir [26]. Yapılan analiz ve karşılaştırmalar sonucunda, 2.2 kW güç değerindeki bir motor için nominal tork değerini gerçekleştirmiş ve en düşük tork dalgalanması değerini veren model 4 bariyerli, bariyer köşeleri açısal olarak yuvarlatılmış ve 0.6 yalıtım oranı seçilmiştir. Analiz sonucu seçilen modelde tork dalgalanması değerini düşürmek için Genetik Algoritma (GA) tabanlı optimizasyon analizi de

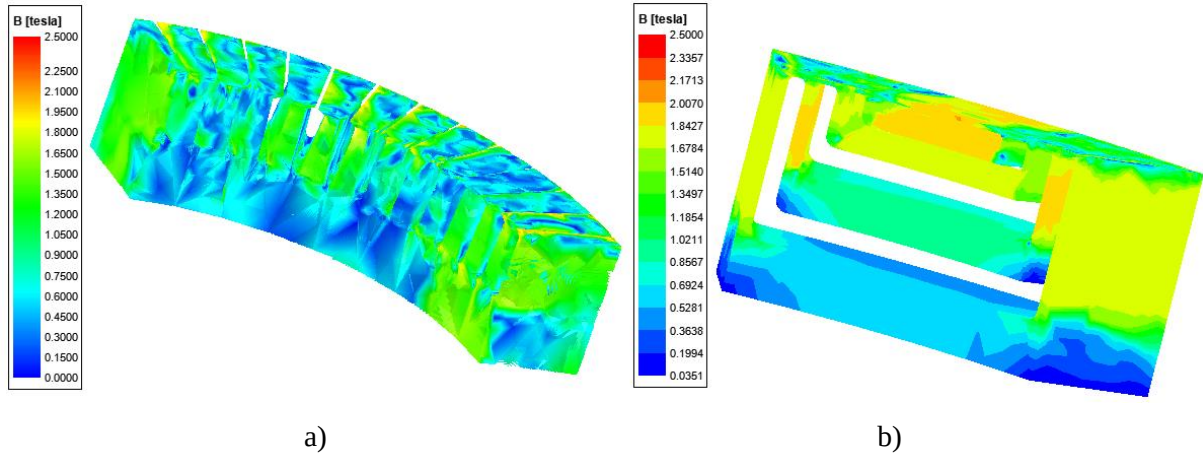
yapılmıştır. Rotor bariyerlerinin $-q$ eksen yönündeki kalınlıkları ve bariyer uçlarının genişlikleri değiştirme yöntemi uygulanmıştır. Yapılan optimizasyon öncesi ve sonrası bariyer ölçüleri Tablo 5'te gösterilmiştir. 'emb' olarak belirtilen değişkenler bariyer uçları genişliklerini ifade etmekte ve '0-0.99' aralığında değişmektedir. 'S' ise q -ekseni bariyer genişliğini milimetre cinsinden göstermektedir [26]. Şekil 10'da optimizasyon analizi sonucu tasarlanmış EA-SRM rotoru ve mesh görüntüsü gösterilmiştir.

Tablo 5. Optimizasyon öncesi ve sonrası EA-SRM rotor bariyer ölçüleri

<i>Değişkenler</i>	<i>Optimizasyon öncesi</i>	<i>Optimizasyon sonucu</i>
<i>emb 11</i>	0.95	0.9236
<i>emb 12</i>	0.85	0.8262
<i>emb 21</i>	0.75	0.7539
<i>emb 22</i>	0.65	0.6387
<i>emb 31</i>	0.55	0.5697
<i>emb 32</i>	0.45	0.4688
<i>emb 41</i>	0.3516	0.3970
<i>S 11</i>	29.99	28.6331
<i>S 12</i>	24.355	22.7361
<i>S 21</i>	15.787	15.9944
<i>S 22</i>	11.2	10
<i>S 31</i>	7.818	8
<i>S 32</i>	4.914	5
<i>S 41</i>	2.458	3



Şekil 10. EA-SRM 1/8 rotor modeli (mesh)



Şekil 11. a) EA-IM ve b) EA-SRM Rotor Manyetik Akı Yoğunlukları

Şekil 11’de gösterilen rotor manyetik akım yoğunlukları incelendiğinde malzemelerin doyumda olmadığı gözlenmiştir. EA-IM rotor dişlerindeki akı yoğunluğu değerleri 1.3-1.7 T aralığında ve uygun aralıktadır. EA-SRM nin rotor boyunduruğunda 0.5-0.7 T aralığında ve hava aralığına yaklaştıkça 1.7-1.8 T akım yoğunluğu değerleri ile malzemenin doyumda olmadığı gösterilmiştir.

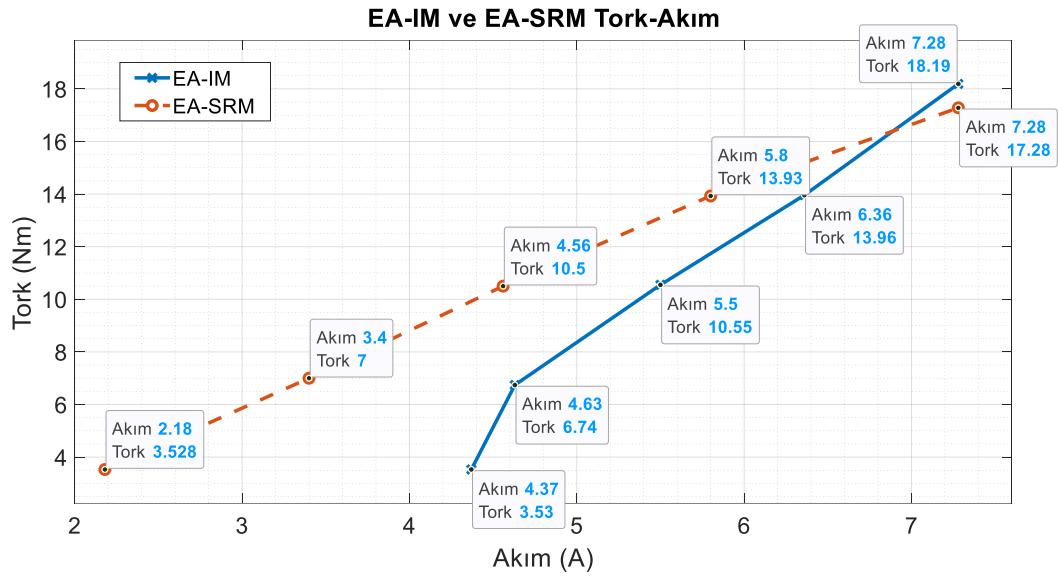
Son durumda EA-IM ve EA-SRM rotor topolojileri oluşturulmuş ve manyetik akı yoğunluğu açısından da incelenip karşılaştırılabilir duruma gelmişlerdir. Bir sonraki bölümde motorların sadece rotor değişiminin motor performansına etkisi gösterilecektir.

4.3. Performans Karşılaştırmaları (Performance Comparisons)

Analiz sonuçları Tablo 6’da gösterilmiştir ve %25-%50-%75-%100-%125 yük aralıklarında alınmıştır. Şekil 12-18 aralığında performans karşılaştırmaları yapılmıştır.

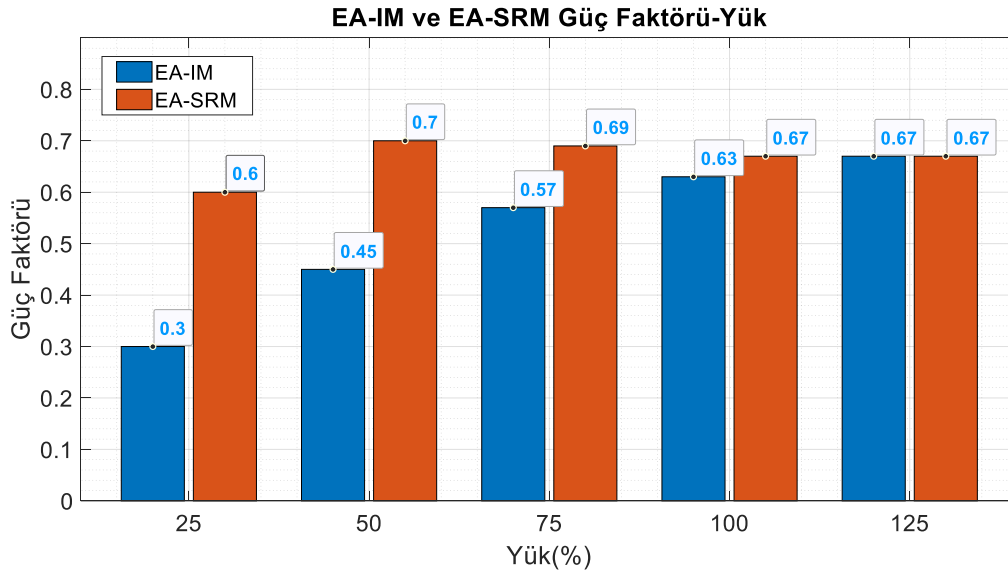
Tablo 6. EA-IM ve EA-SRM SEY analiz sonuçları

		Yük (%)				
		25	50	75	100	125
Tork (Nm)	EA-IM	3.53	6.74	10.55	13.96	18.19
	EA-SRM	3.528	7	10.5	13.93	17.28
Verim (%)	EA-IM	70.62	81.33	82.92	82.28	80.55
	EA-SRM	88.88	90.75	89.5	89.3	85.8
Güç Faktörü ($\cos \phi$)	EA-IM	0.3	0.45	0.57	0.63	0.67
	EA-SRM	0.6	0.7	0.69	0.67	0.67
Giriş Gücü (kW)	EA-IM	0.82	1.41	1.89	2.5	2.75
	EA-SRM	0.76	1.49	2.25	3.08	4.14
Toplam Kayıplar (kW)	EA-IM	0.2	0.5	0.57	0.63	0.51
	EA-SRM	0.06	0.11	0.18	0.26	0.39
Akım başına Tork (Nm/A)	EA-IM	0.75	1.45	1.92	2.2	2.48
	EA-SRM	1.62	2.06	2.3	2.4	2.37



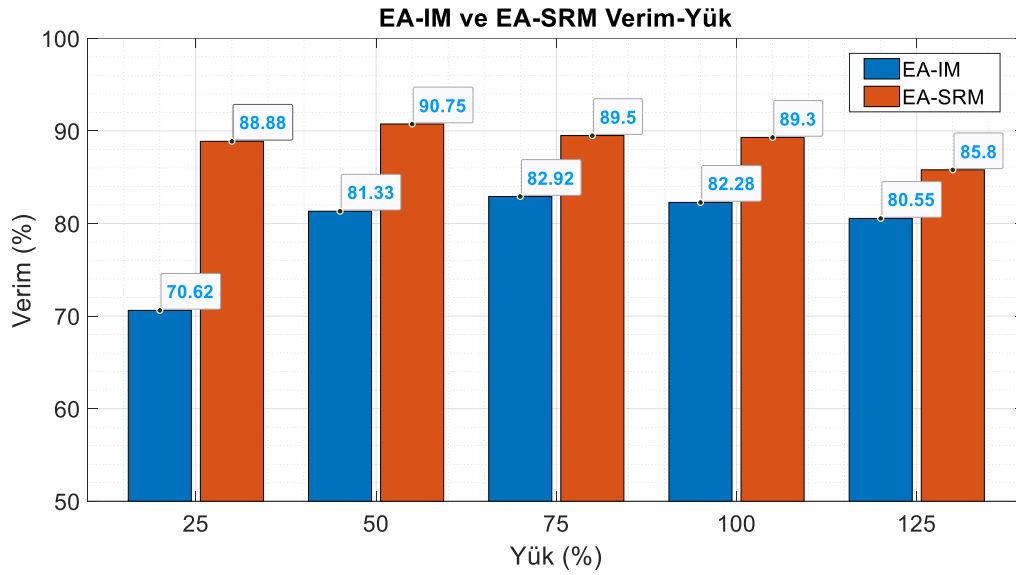
Şekil 12. Tork-Akım karşılaştırması

Şekil 12’te görüldüğü üzere EA-SRM’nin tork değeri, %125 yük durumunda güç faktörü hariç diğer tüm yük durumlarında üstün çıkmıştır. Bunun sebebi olarak, güç faktörü grafiğinde de görüleceği üzere EA-SRM de tam yükün üzerinde güç faktörü de düşmüştür. Şekil 13’te Güç faktörü-Yük durumları karşılaştırılmıştır. %25 yük durumunda güç faktörü farkı fazla olmasına rağmen %125 yük durumunda eşitlenmiştir. Fakat EA-SRM’nin üstün durumda olduğu görülmektedir.

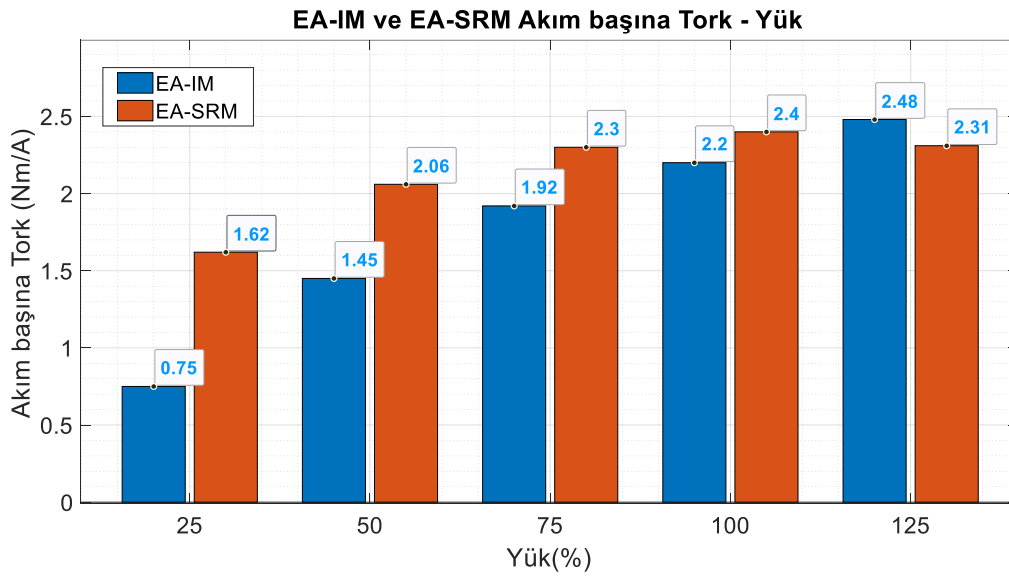


Şekil 13. Güç Faktörü-Yük karşılaştırması

Verim karşılaştırması Şekil 14’te gösterilmiştir. Tüm yük durumlarında EA-SRM’nin verimi üstün çıkmıştır. Tam yükte EA-SRM verimi oransal olarak %8.53 daha fazladır.

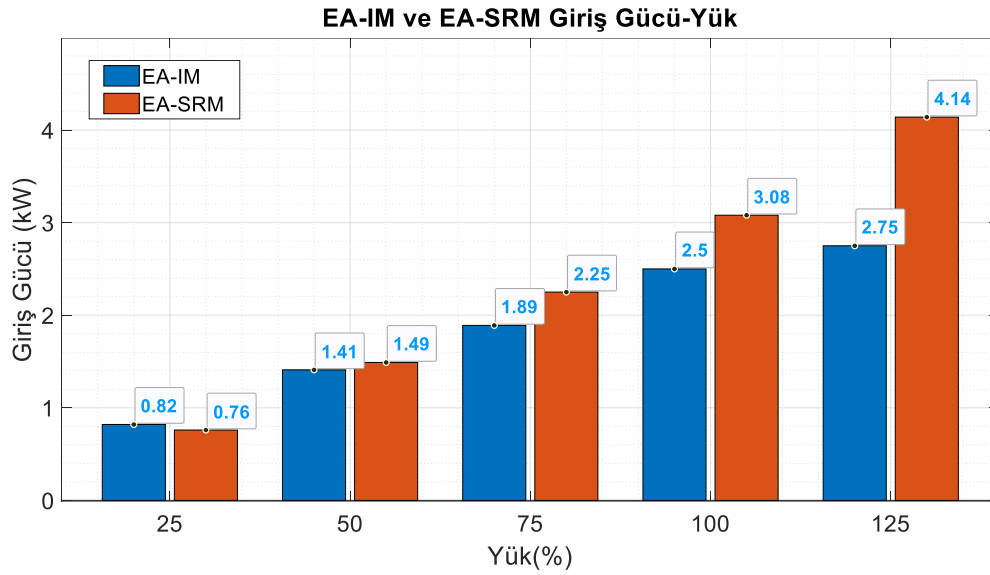


Şekil 14. Verim-Yük karşılaştırması

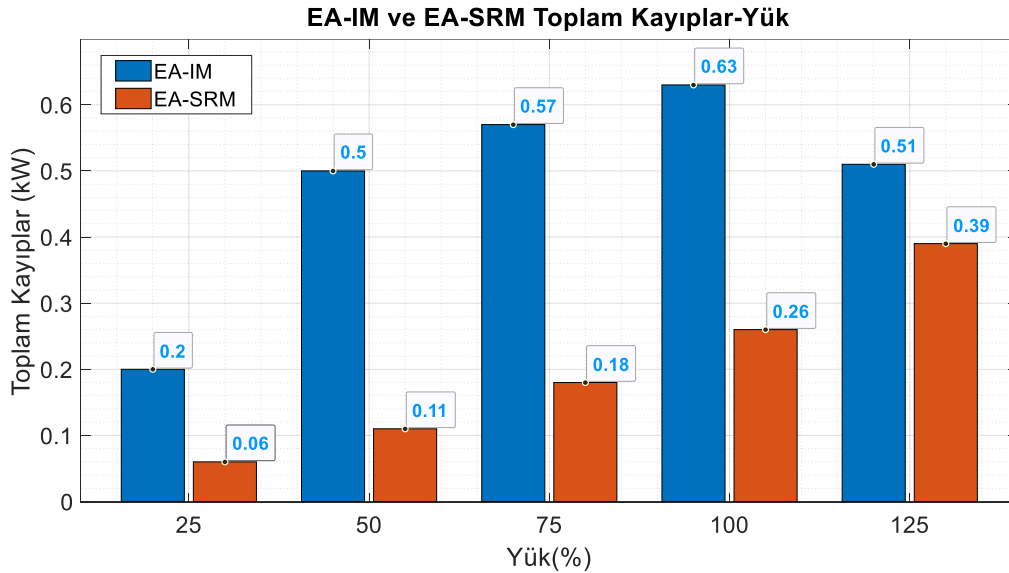


Şekil 15. Akım başına Tork (Nm/A)-Yük karşılaştırması

Şekil 15'te akım başına tork değerlerine bakıldığında %125 hariç EA-SRM üstün çıkmıştır. Yük miktarı arttıkça Nm/A oranı da artmıştır. Tork değeri yük ile doğru orantılı artmış olmasına rağmen EA-SRM'de Nm/A oranı maksimum, tam yük değerinde gözlenmiştir. Bu da EA-SRM 'nin optimal çalışma noktasında çalıştığının göstergesidir.



Şekil 16. Giriş Gücü-Yük karşılaştırması



Şekil 17. Toplam Kayıplar-Yük karşılaştırması

Şekil 16’da EA-IM ve EA-SRM giriş güçlerinin yük ile değişimi gösterilmiştir. Her iki motorda yük ile giriş gücü doğru orantılı olarak artmıştır ve EA-SRM üstündür. Şekil 17’de ise toplam kayıplar karşılaştırılmıştır. Tam yükte EA-IM toplam kaybı EA-SRM’nin 2.42 katı fazladır.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Düşük güçlü endüstriyel uygulamalarda kullanılan motorlarda verim, güç yoğunluğu ve maliyet önemli rol oynamaktadır. Enerji verimliliği ve kompakt yapının öneminin her geçen gün arttığı günümüzde, rotorunda bakır kaybı bulunmayan ve eksenel yapısı ile kompakt yapıda bulunan ve özgün bir motor olan EA-SRM tasarımı, aynı stator yapısına sahip EA-IM ile karşılaştırılmıştır. EA-SRM rotor tasarımı üzerinde bariyer sayısı, bariyer yapısı ve çıkıntı oranını (L_d/L_q) doğrudan etkileyen yalıtım oranı (k_q) parametreleri üzerinde detaylı çalışılmış ve ayrıca optimizasyonu da yapılmıştır. Bu çalışmada 2.2 kW gücü referans alınmış iki motor tasarlanmıştır. Karşılaştırmada dış çapı, iç çapı ve stator parametreleri aynı olup sadece rotor değişimi ile motor verimi oransal olarak %8.53 artarak, IE3’ten IE4 standartlarına çıkarılmıştır. Tam yükte EA-SRM de, EA-IM den %23.2 fazla güç üretilmiştir.

Sonuç olarak toplam kayıpları, maliyetleri ve verim değerleri göz önüne alındığında, EA-SRM tasarımı, referans alınarak karşılaştırılan EA-IM’a alternatif olacaktır. İlerleyen çalışmalarda üretimsel süreçlerden

geçen EA-SRM'nin, EA-IM ile deneysel karşılaştırması da yapılabilecektir. Ayrıca EA-SRM'nin mıknatıslı tasarımları da tasarlanıp karşılaştırma prosedürü tekrarlanabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi, 2020/41 numaralı proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Almeida, A.T., Ferreira, F., & Duarte, A.Q. (2014). Technical and Economical Considerations on Super High-Efficiency Three-Phase Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50, 1274-1285.
- [2] Huang, H., Hu, Y., Xiao, Y., & Lyu, H. (2015). Research of Parameters and Antidemagnetization of Rare-Earth-Less Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51, 1-4.
- [3] IEA, Uluslararası Enerji Ajansı, 2020 Raporu, <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/electricity#electricity-supply>
- [4] Mohanarajah, T., Rizk, J., Nagrial, M., & Hellany, A. (2018). Finite Element Analysis and Design Methodology for High-Efficiency Synchronous Reluctance Motors. *Electric Power Components and Systems*, 46, 1478-1493.
- [5] Ozcelik, N., Dogru, U.E., Imeryuz, M., & Ergene, L.T. (2019). Synchronous Reluctance Motor vs. Induction Motor at Low-Power Industrial Applications: Design and Comparison. *Energies*, 12, 1-20.
- [6] Villan, M., Tursini, M., Popescu, M., Fabri, G., Credo, A., & Leonardo, L.D. (2018). Experimental Comparison Between Induction and Synchronous Reluctance Motor-Drives. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 1188-1194.
- [7] Boglietti, A., & Pastorelli, M. (2008). Induction and synchronous reluctance motors comparison. 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2041-2044.
- [8] Oner, Y., Ersoz, M., & Bingöl, O. (2016). Akı Bariyerli TLA Tipi Senkron Relüktans Motor Tasarımı ve Optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 31, sayı. 4, ss. 0-0, Ara. 2016, doi:10.17341/gazimmfd.278449.
- [9] Nakahara, A., Deguchi, K., Kikuchi, S., & Enomoto, Y. (2014). Comparative electrical design of radial- and axial-flux permanent magnet synchronous machines under space limitation. 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 422-428.
- [10] Ashari, M., Suryoatmojo, H., Riawan, D.C., Mardiyanto, R., Fahmi, D., Hidayat, S., & Adam, K.B. (2015). Design and Implementation of Axial Flux Induction Motor Single Stator - Single Rotor for Electric Vehicle Application.
- [11] Babu, V.R., Soni, M., & Manjeera, C. (2012). Modeling of axial flux induction machine with sinusoidal winding distribution. 2012 Annual IEEE India Conference (INDICON), 481-486.
- [12] Kalo, A.K., Dwivedi, A., Srivastava, R., & Banchhor, D.K. (2015). Experiences with Axial-Flux induction motor. 2015 International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE), 1-6.
- [13] Banchhor, D.K., & Dhabale, A. (2018). Design, Modeling, and Analysis of Dual Rotor Axial Flux Induction Motor. 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 1-6.

- [14] Benoudjit, A., & Said, N.N. (1998). New dual-airgap axial and radial-flux induction motor for on wheel drive electric propulsion systems. POWERCON '98. 1998 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.98EX151), 1, 615-619 vol.1.
- [15] Dwivedi, A., Gupta, S., Singh, S., & Srivastava, R. (2015). Experiences with axial flux sheet rotor induction motor. 2015 IEEE IAS Joint Industrial and Commercial Power Systems / Petroleum and Chemical Industry Conference (ICPSPCIC), 115-118.
- [16] Hu, Z., Huang, W., Hong, C., & Bu, F. (2018). Control Strategy of Self-Bearing Dual Stator Solid Rotor Axial Flux Induction Motor for Flywheel Energy Storage. 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 1513-1517.
- [17] Nobahari, A., Darabi, A., & Hassannia, A. (2017). Axial flux induction motor, design and evaluation of steady state modeling using equivalent circuit. 2017 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 353-358.
- [18] Profumo, F., Zhang, Z., & Tenconi, A. (1997). Axial flux machines drives: a new viable solution for electric cars. IEEE Trans. Ind. Electron., 44, 39-45.
- [19] Nasiri-Gheidari, Z., & Lesani, H. (2012). A Survey on Axial Flux Induction Motors. Przegląd Elektrotechniczny, 300-305.
- [20] Zhang, C., Tseng, K., & Nguyen, T.D. (2010). Analysis and comparison of axial flux PM synchronous motor and induction motor. 2010 Conference Proceedings IPEC, 572-577.
- [21] Igelspacher, J., Fluegel, S., & Herzog, H. (2011). Analytic examination of coupled axial-flux induction machines with reduced yoke. 2011 1st International Electric Drives Production Conference, 153-158.
- [22] Bianchi, N., & Jahns, T. (2016). The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors: Tutorial Course Notes.
- [23] Pop, A., Piglesan, F.P., Martis, R., Vintiloiu, I., & Martis, C. (2018). First Insights on the Electromagnetic Design of Axial-Flux Synchronous-Reluctance Maschine. IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 5702-5709.
- [24] Akiki, P., Hage-Hassan, M., Bensetti, M., Vannier, J., Prieto, D., & McClelland, M. (2018). Axial Ferrite-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 583-589.
- [25] Tarek, M.T., & Sozer, Y. (2019). Design of a Novel Axial Flux Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor. 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 3004-3009.
- [26] Gerçekcioglu, H.S., & Akar, M. (2021). Optimal rotor design of novel axial flux synchronous reluctance motor and validation. Int Trans Electr Energ Syst. 2021; e12866.
- [27] Chlebiš, P., Havel, A., & Vaculík, P. (2012). The Design of HEV Drive Unit with an Axial Flux Rotary Converter.
- [28] Sahin, F., Tuckey, A.M., & Vandenput, A. (2001). Design, development and testing of a high-speed axial-flux permanent-magnet machine. Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No.01CH37248), 3, 1640-1647 vol.3.
- [29] Taghavi, S., & Pillay, P. (2014). A comparative study of synchronous reluctance machine performance with different pole numbers for automotive applications. IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 3812-3818.

- [30] Shi, J., Chai, F., Li, X., & Cheng, S. (2011). Study of the number of slots/pole combinations for low speed high torque permanent magnet synchronous motors. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, 1-3.
- [31] Aghazadeh, H., Afjei, E., & Siadatan, A. (2019). Sizing and detailed design procedure of external rotor synchronous reluctance machine. Iet Electric Power Applications, 13, 1105-1113.
- [32] Sawhney, A. K., & Chakrabarti, A. (2010). Course in electrical machine design. Delhi: Dhanpat Rai.
- [33] Boldea, I., & Nasar, S. A. (2010). The induction machines design handbook. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis. Formun Altı
- [34] Gürdal, O. (2001). Elektrik makinalarının tasarımı. İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım.
- [35] Joksimović, G., Melecio, J.I., Tuohy, P.M., & Djurović, S. (2020). Towards the optimal 'slot combination' for steady-state torque ripple minimization: an eight-pole cage rotor induction motor case study. Electrical Engineering, 102, 293-308.
- [36] Gundogdu, T., Zhu, Z., & Mipo, J. (2017). Influence of rotor slot number on rotor bar current waveform and performance in induction machines. 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 1-6.
- [37] Kamper, M. J., Van der Merwe, F. S., & Williamson, S. (1996). Direct finite element design optimisation of the cageless reluctance synchronous machine. IEEE Transactions on Energy Conversion, 11(3), 547-555.
- [38] Ibrahim, M. N. F., Sergeant, P., & Rashad, E. (2016). Simple design approach for low torque ripple and high output torque synchronous reluctance motors. Energies, 9(11), 942.
- [39] Moghaddam, R. R. (2007). Synchronous reluctance machine (SynRM) design. KTH Electrical Engineering.