



Eksenel akıllı tam adım sargılı anahtarlamalı relüktans makinasının stator/rotor kutup şekillerinin motor performansına etkisi

The effect of stator/rotor pole shapes of the fully pitched axial flux switched reluctance machine on the motor performance

Cihan Şahin*

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik Programı, cihan.sahin@cbu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6430-7827>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 20 Şubat 2022
Revizyon 16 Mart 2022
Kabul 9 Nisan 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

*Eksenel,
Anahtarlamalı relüktans makinası,
Tam adım sargı*

ÖZ

Anahtarlamalı Relüktans Makinaları (ARM) çeşitli teknolojik alanlarda özellikle de elektrikli araç teknolojisinde tercih edilen elektrik motorlarından biridir. Düşük maliyeti, güvenilirliği, sağlamlığı ve yüksek hata tolerans yeteneği gibi özellikleri, tercih edilmelerinin en önemli sebeplerindedir. Ayrıca, son yıllarda elektrik makinalarının radyal tasarımı yerine eksenel tasarımı ile ilgili araştırmalar da giderek artmaktadır. Literatürde, eksenel akıllı ARM'ler üzerine geometrik tasarım ve kontrolü hakkında çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar incelendiğinde genel olarak kısa adım sargılı olarak da bilinen geleneksel ARM'ler tercih edilmiştir. Bu çalışmada tam adım sargılı eksenel akıllı ARM'nin stator/rotor kutup şekillerinin motor performansına etkisi incelenmiştir. Tam adım sargılı ARM'ler sargı yapısından dolayı fazlar arasında oluşan karşıt kuplaj etkisiyle, geleneksel ARM'lere göre daha yüksek moment üretmektedirler. Çalışma kapsamında, Model-1(kavisli), Model-2 (keskin) ve de Model-3 (yuvarlak) olmak üzere üç farklı stator/rotor kutup yapısına sahip tam adım sargılı eksenel akıllı ARM modeli önerilmiş, tüm modellerin 3B (üç boyut) magnetostatik analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları karşılaştırılarak, tasarlanan modeller için en uygun kutup yapısının keskin köşeli Model-2 yapısı olduğu görülmüştür.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 February 2022
Received in revised form 16 March 2022
Accepted 9 April 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

*Axial,
Switched reluctance machine,
Fully-pitched winding*

ABSTRACT

Switched Reluctance Machines (SRMs) are one of the preferred electric motors in various technological fields, especially in electric vehicle technology. Features such as low cost, reliability, robustness and high fault tolerance are the most important reasons for their preference. In addition, in recent years, researches on axial design instead of radial design of electrical machines have been increasing. In the literature, there are various studies on geometric design and control of axial flux SRMs. When these studies are examined, conventional SRMs, also known as short pitched winding, have been preferred. In this study, the effect of stator/rotor pole shapes of the fully pitched axial flux SRM on the motor performance was investigated. Fully pitched SRMs produce higher torque compared to conventional SRMs with the mutual coupling effect between phases due to their winding structure. Within the scope of the study, a fully-pitched winding axial flux SRM model with three different stator/rotor pole structures, Model-1 (curved), Model-2 (sharp) and Model-3 (round), was proposed, and all models were 3D (three-dimensional) magnetostatic analyzes were carried out. By comparing the obtained analysis results, it has been seen that the most suitable pole structure for the designed models is the Model-2 structure with sharp corners.

Doi: 10.24012/dumf.1076302

* Sorumlu Yazar

Giriş

Son yıllarda hibrit ve elektrikli araçların üretiminde gözle görülür bir artış olmaktadır. Bunun en önemli sebebi hiç kuşkusuzdur ki fosil yakıtların azalması ve çevre kirliliğinde meydana gelen artıştır. Hibrit ve elektrikli araçlar, yakıt noktasında verimliliği ve düşük emisyonları nedeniyle gelecek yıllarda, taşımada önemli bir role sahip olacaktır [1]. Verimlilik, yüksek güç yoğunluğu, daha yüksek moment, düşük gürültü ve daha az maliyet, taşıma araçları için üretilen çekiş motorlarından istenen en temel özelliklerdir [2]. Literatürde hibrit ve elektrikli araçlar için relüktans, sabit mıknatıslı vb. farklı elektrik motorları tercih edilmektedir [3]. Günümüzde, bu motorlar içerisinde sabit mıknatıslı motorların yaygın olarak tercih edildiği görülmektedir [3]. Fakat bu noktada mıknatıs, motor üreticileri için büyük bir sorun olarak karşısına çıkmaktadır. Üretim hacminin artması ve mıknatısın doğa da nadir olarak bulunması motor ve bu motorları kullanacak olan araç üreticilerini gelecek noktada kaygılandırmaktadır [4]. Bu durum; üreticileri, otomotiv uygulamalarında çekiş motoru olarak mıknatıs azaltılmış veya mıknatıssız motorları tercih etmeye yönlendirmektedir [5]. ARM'ler, rotorunda mıknatıs veya sargı bulundurmadığından dolayı, hibrit ve elektrikli araçlar için alternatif çekiş motorlardan biri olarak gösterilmektedir [4-7]. Ayrıca, dört bölgeli çalışma, genişletilmiş hız, sabit güç aralığı gibi özelliklere sahip olması da ARM'leri otomotiv uygulamaları için uygun bir motor konumuna getirmektedir [8]. Tüm bunlara ilave olarak düşük kayıplı silikon çelik ve konsantre stator sargılarına ihtiyaç duyması yüksek sıcaklıklarda çalışma avantajını da sağlamaktadır [9]. Ekonomik açıdan incelendiğinde ise ARM'ler sabit mıknatıslı motorlara göre daha sağlam, yapımı daha kolay ve ucuzdur [10]. ARM'ler yüksek hata tolerans yeteneği, zorlu ortamlarda çalışabilme gibi birçok avantaja sahip olmasının yanında, ayarlanabilir hız uygulamaları için de güçlü bir aday olması otomotiv uygulamalarına ilave olarak elektrikli uçak uygulamaları için de uygun bir elektrik motorudur [6],[11]-[13].

ARM'ler bu avantajlarının yanında bazı dezavantajlara da sahiptir. Doğrusal olmayan moment üretimi nedeniyle yüksek moment dalgalılığına sahiptir [14]. Stator ve rotor çıkıntılı olduğundan faz değişim periyotlarında meydana gelen yüksek moment dalgalanmasının bir sonucu olarak ARM'lerde akustik gürültü ve salınımlar meydana gelmektedir [15],[16]. Elektrikli araçlarda ve de servo sistemlerde yüksek performans elde etmek için düşük salınımlar ve düşük akustik gürültü oldukça önemlidir. Bunun için moment dalgalılığının azaltılması gerekmektedir [14]. ARM'lerin moment dalgalılığını azaltmak için literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Tüm bu çalışmalar genel olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bunlardan biri makinanın geometrik yapısında yapılan optimizasyonlar diğeri ise kontrol algoritmalarında yapılan çalışmalardır [11],[17]. Burada dikkat edilmesi gereken önemli nokta stator ve rotor kutup açıları, kutup sayısı, hava aralığı gibi geometrik yapıda gerçekleştirilen düzenlemeler mevcut ve kullanılmakta olan motorlara uygulanamamaktadır. Makinanın manyetik karakteristiğini iyileştirmek için kullanılan bu yöntem diğer bir ifadeyle yeni bir ARM tasarımı demektir [18],[19]. Moment dalgalılığını azaltmak

için kontrol yöntemi olarak da akıllı algoritmalar (bulanık mantık, sinir ağı vb), anlık moment kontrolü ve uyarlanabilir kayan mod gibi farklı kontrol teknikleri kullanılmaktadır [11],[20]. Kullanılmakta olan ARM'ler için kontrol yöntemi yazılımları güncellenerek uygulanabilmektedir [19].

ARM'lerin faz sargıları incelendiğinde ise, kısa adım olarak stator kutuplarının etrafına sarıldığı görülmektedir. Bundan dolayı geleneksel ARM'ler kısa adım ARM'ler olarak da bilinmektedirler. Tam adım sargı yönteminde ise faz sargıları stator oluklarına dağıtılmaktadırlar [21]. Gerçekleştirilen bu çalışmada eksenel akılı tam adım sargılı ARM için farklı stator/rotor kutup modelleri önerilmiş, 3B olarak magnetostatik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmanın bölümleri ise şu şekilde düzenlenmiştir. Giriş bölümünün ardından ikinci bölümde tam adım sargılı ARM'ler hakkında genel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde eksenel akılı ARM'ler hakkında genel bilgiler verilerek kısa ve tam adım sargılı eksenel ARM karşılaştırılması sunulmuştur. Dördüncü bölümde ise önerilen eksenel akılı tam adım sargılı ARM modelleri ve genel özellikleri verilmiştir. Ayrıca bu bölümde magnetostatik analizlerden elde edilen veriler karşılaştırılarak sunulmuş, elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Son olarak sonuç bölümünde ise çalışmanın ve elde edilen sonuçların kısa bir özeti sunulmuştur.

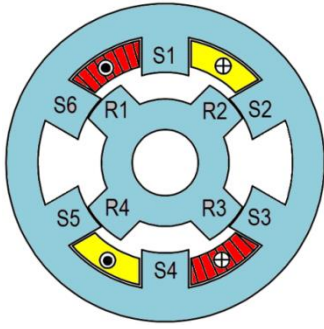
Tam Adım Sargılı ARM'lerin Genel Yapısı

ARM'ler geleneksel elektrik motorları gibi stator ve rotor'dan oluşmaktadır. Yapısal olarak adım motorlarına benzemelerine rağmen; onların aksine, daha az kutup, daha büyük adım açısı ve daha yüksek çıkış gücü kapasitesine sahiptirler [22].

ARM'lerde moment üretimi; rotor ve stator arasındaki hava boşluğuna bağlı olarak değişen relüktansa göre üretilmektedir. Uygun durumda olan faz enerjilendirildiğinde, rotor, devrenin relüktansını azaltacak yönde hareket eder. ARM'nin genel moment denklemi eşitlik 1 de verilmektedir. Burada "T" toplam momenti (Nm); "i" faz akımlarını (Amper); "L" faz endüktanslarını (Henry); "M" fazlar arasındaki karşıt endüktansı (Henry) ve "θ" rotor konum açısını (Derece) ifade etmektedir [21],[23].

$$T = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{\partial L_a}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{\partial L_b}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{\partial L_c}{\partial \theta} + i_a i_b \frac{\partial M_{ab}}{\partial \theta} + i_b i_c \frac{\partial M_{bc}}{\partial \theta} + i_c i_a \frac{\partial M_{ca}}{\partial \theta} \quad (1)$$

Tam adım sargılı ARM'lerde ise moment fazlar arasında oluşan karşıt endüktans değişimine bağlı olarak üretilmektedir [23]-[25]. Bundan dolayı tam adım sargılı ARM'ler karşıt kutuplu ARM olarak da bilinmektedirler [24]. Şekil 1'de 3-fazlı, 6/4-kutuplu tam adım sargılı ARM stator-rotor yapısı görülmektedir.



Şekil 1. 3 faz 6/4 kutuplu tam adım sargılı ARM

Tam adım sargılı ARM'de, fazlar arasında karşıt endüktans elde etmek için, iki faz sargısının aynı anda enerjilendirilmesi gerekmektedir [24],[26]. Bu yüzden, tam adım sargılı ARM'de her bir faz, etkili moment üretimi için enerjilendirme periyodunun üçte ikisine katkıda bulunmaktadır [21]. Tam adım sargılı ARM'de moment denklemi, öz endüktans'lar ihmal edildiğinden, eşitlik 2'de verildiği şekli almaktadır [24].

$$T = i_a i_b \frac{\partial M_{ab}}{\partial \theta} + i_b i_c \frac{\partial M_{bc}}{\partial \theta} + i_c i_a \frac{\partial M_{ca}}{\partial \theta} \quad (2)$$

Eksenel Akılı ARM'ler

Eksenel akılı ARM'lerin manyetik hava boşluğu, Radyal-akılı ARM'lerin aksine dönme eksenine paraleldir [27]. Bu nedenle manyetik akı, radyal makinaların aksine eksenel doğrultuda akmaktadır [28]. Hava aralığı boşluğu radyal makinalarda makine uzunluğuna bağlı olarak eksenel yapılarda makine çapına bağlıdır [29]. Ayrıca, artan hava aralığı nedeniyle manyetik akı daha etkili bir şekilde kullanılmaktadır [30]. Bundan dolayı da moment yoğunluğunu arttırmak için eksenel yapılar radyal yapılara göre daha uygundur [29].

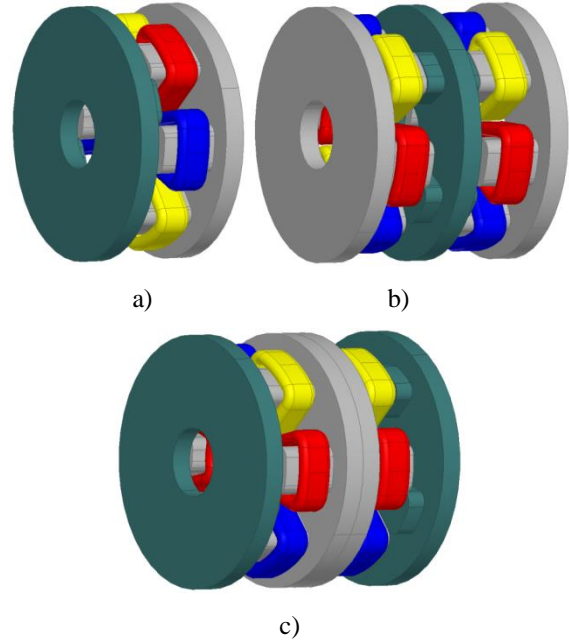
Eksenel akılı ARM geometrik açıdan genel olarak 3 ana kategoride incelenmektedir[31]. Bunlar, tek statorlu ve tek rotorlu eksenel akılı ARM, çift statorlu ve tek rotorlu eksenel akılı ARM, ve son olarak da tek statorlu ve çift rotorlu eksenel akılı ARM olarak sıralanabilirler [31]. Eksenel akılı ARM'lerde de faz sargıları radyal ARM'lerde olduğu gibi sadece statorda bulunmaktadır [32].

Tek statorlu ve tek rotorlu eksenel akılı ARM: Bu tasarımda motor, tek bir stator ve tek bir rotordan oluştuğundan dolayı tek bir hava aralığına sahiptir. Eksenel manyetik kuvvet dengesiz fakat önemlidir [31]. Şekil 2-a'da tek statorlu ve tek rotorlu eksenel akılı ARM görülmektedir.

Çift statorlu ve tek rotorlu eksenel akılı ARM: Bu tasarımda motor, iki stator ve tek bir rotordan oluşmaktadır. Bu modelin en önemli avantajı, eksenel kuvvetlerin dengeli olmasıdır. Rotor üzerindeki her statorun eksenel kuvveti, diğer statorun kuvveti ile dengelenmektedir [31]. Şekil 2-b'de çift statorlu ve tek rotorlu eksenel akılı ARM görülmektedir.

Tek statorlu ve çift rotorlu eksenel akılı ARM: Bu tasarımda motor, tek bir stator ve iki harici rotordan oluşmaktadır. Statorun ortada bulunması soğutma açısından karmaşık bir

durum yaratmaktadır [31]. Şekil 2-c'de tek statorlu ve çift rotorlu eksenel akılı ARM görülmektedir.



Şekil 2. Eksenel akılı ARM geometrik yapı modelleri a) Tek statorlu ve tek rotorlu, b) Çift statorlu ve tek rotorlu, c) Tek statorlu ve çift rotorlu [31]

Eksenel ARM ve radyal ARM eş hacimde karşılaştırıldığında maksimum endüktans eksenel yapılarda daha yüksektir [29]. Oluşan bu durum moment yoğunluğunun artmasına sebep olmaktadır [29]. Eksenel akılı ARM faz endüktansları Fourier serisi kullanılarak denklem 3-6 deki gibi yazılabilirler [32],[33].

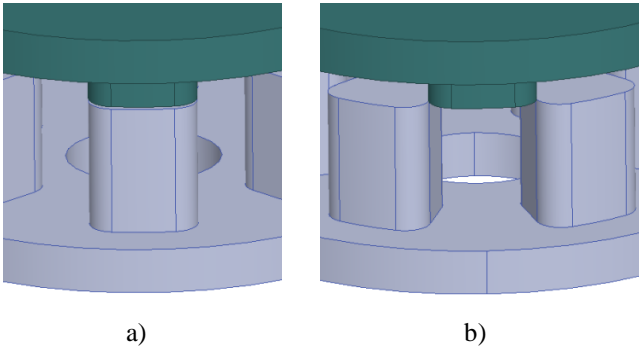
$$L(i, \theta) = L_0(i) + L_1(i) \cos(P_r \theta) + L_2(i) \cos(2P_r \theta) \quad (3)$$

$$L_0(i) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} (L_a + L_u) + L_m \right] \quad (4)$$

$$L_1(i) = \frac{1}{2} (L_a - L_u) \quad (5)$$

$$L_2(i) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} (L_a + L_u) - L_m \right] \quad (6)$$

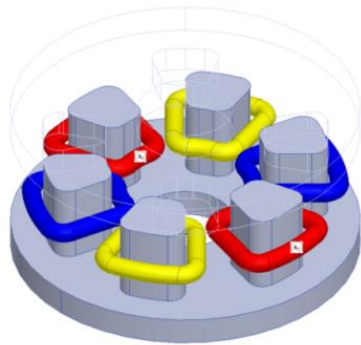
Burada " θ " rotor konumunu, " i " faz akımını, " P_r " rotor kutup sayısını, " L_a " ve " L_u " sırasıyla stator/rotor kutuplarının hizalı ve hizalanmamış durumuna göre değişen endüktans değerlerini, " L_m " ise hizalı ve hizalanmamış pozisyonların ortasındaki konumda elde edilen endüktans değerini ifade etmektedir. Şekil 3'de stator/rotor kutuplarının hizalı ve hizalanmamış durumları görülmektedir.



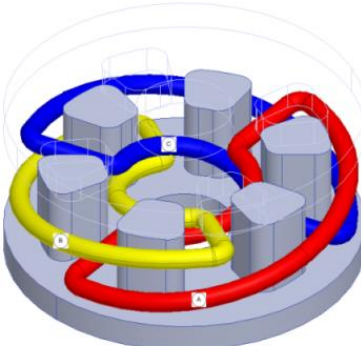
Şekil 3. Stator/rotor kutuplarının birbirlerine karşı durumları a) hizalı b) hizalanmamış

Eksenel akılı ARM'lerin avantajları bütün olarak değerlendirildiğinde ise, düz şekli ve yüksek boy oranıyla teker içi motor (in-wheel motor, IWMs) uygulamaları için oldukça uygun yapıdadırlar [30]. Eksenel akılı ARM'ler sahip oldukları bu fonksiyonel yapıları sayesinde, elektrikli araçlar, scooter, rüzgar türbinleri ve fan gibi uygulamalarda tercih edilmektedirler [28].

Şekil 4-a'da eksenel akılı kısa adım sargılı ARM ve Şekil 4-b'de eksenel akılı tam adım sargılı ARM geometrik yapıları görülmektedir. Sargı yapıları haricinde her iki makineye ait tüm geometrik ölçüler aynıdır. Kısa adım sargı yapısında sargılar kutup etrafına sarılırken, tam adım sargı yapısında oluklara dağılmaktadır [34].



a)

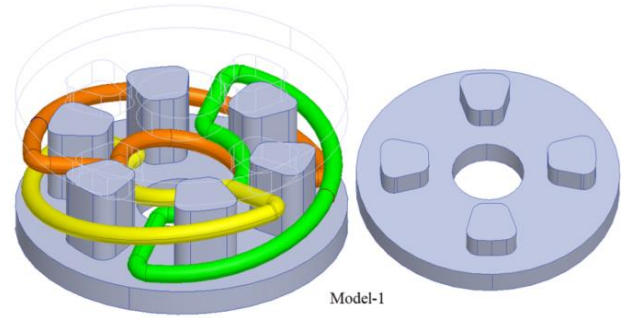


b)

Şekil 4. Eksenel akılı ARM a) Kısa adım sargılı, b) Tam adım sargılı [34]

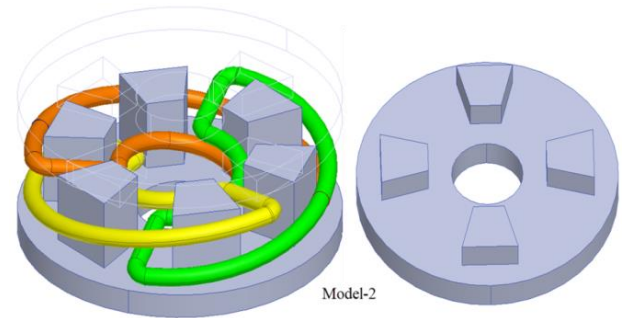
Önerilen Eksenel Akılı Tam Adım Sargılı ARM Modelleri ve Magnetostatik Analizleri

Eksenel akılı tam adım sargılı ARM modellerinin stator/rotor kutup şekillerinin motor performansına etkilerinin incelenmesi amacıyla üç farklı model önerilmiştir. Bunlar, Model-1 (kavisli), Model-2 (keskin) ve de Model-3 (yuvarlak) olarak adlandırılmıştır. Her üç modelin stator/rotor kutup şekilleri haricinde geriye kalan tüm geometrik özellikleri aynıdır. Stator/rotor kutup kombinasyonu olarak da 6/4 kombinasyonu tercih edilmiştir. 6/4 kombinasyonu, ARM'deki en temel yapıdır. Bu nedenle, bu kombinasyon yeni bir türün teorik olarak değerlendirilmesi için en uygun yapıdır [29]. Şekil 5-a'da Model-1, Şekil 5-b'de Model-2, Şekil 5-c'de ise Model-3 görülmektedir. Modellere ait genel geometrik ölçüler ve nominal değerler tablo-1'de verilmektedir.



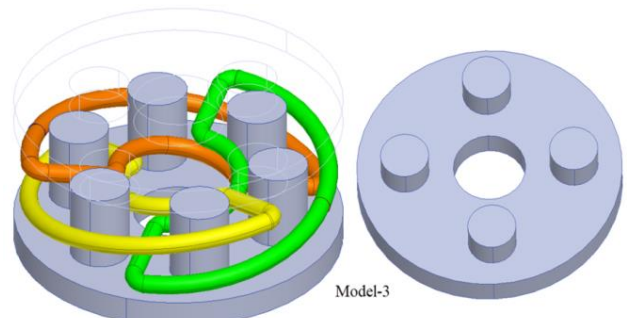
Model-1

a)



Model-2

b)



Model-3

c)

Şekil 5. 6/4 kutuplu eksenel akılı tam adım sargılı ARM modelleri a) Model-1 (kavisli), b) Model-2 (üçgen), c) Model-3 (yuvarlak)

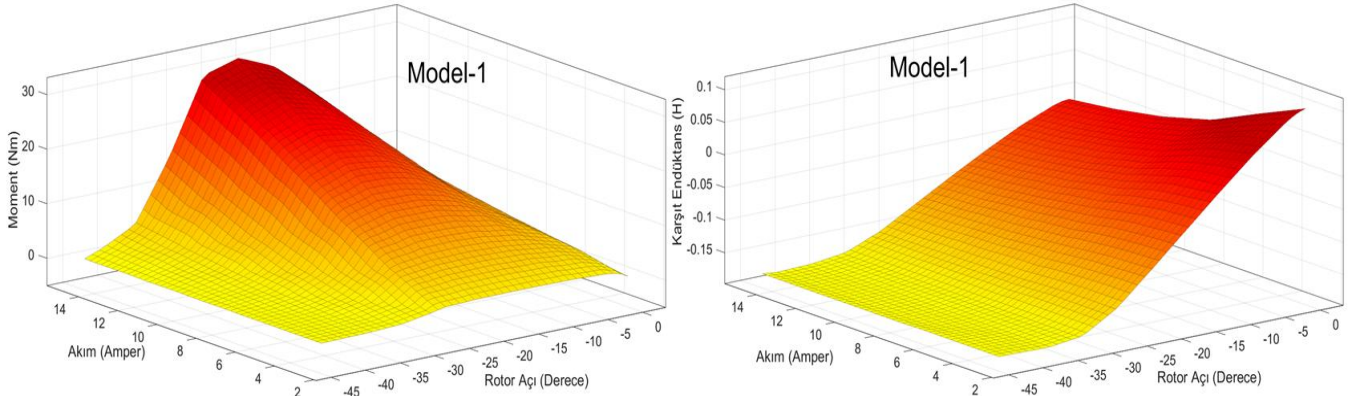
Tablo 1. Geometrik ölçüler ve nominal değerler.

Geometrik özellikler	Değer
Stator/Rotor kutup sayısı	6/4
Stator/Rotor dış çap uzunluğu (mm)	220.00
Stator boyunduruk kalınlığı (mm)	17.50
Stator dış eksenel uzunluğu (mm)	50.00
Rotor boyunduruk kalınlığı (mm)	17.50
Rotor dış eksenel uzunluğu (mm)	16.50
Hava aralığı uzunluğu (mm)	1.00
Sargı sipir sayısı	300
Anma akımı (Amper)	10
Anma gücü (Watt)	2200
Anma hızı (rpm)	1500

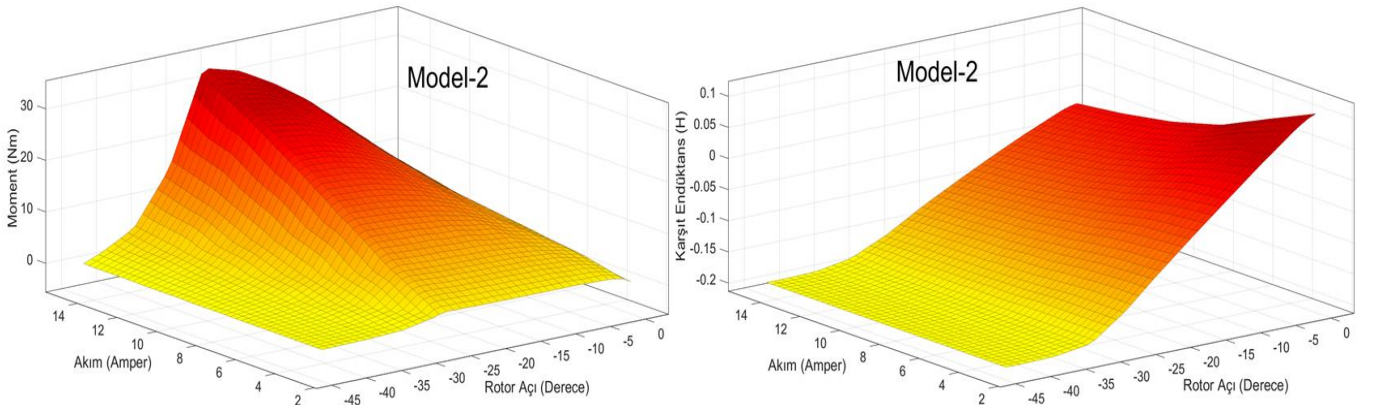
Elektrik makinalarının elektromanyetik özelliklerini incelemek amacıyla literatürde çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Uygulanan bu yöntemler genel olarak nümerik ve analitik olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Nümerik yöntemlerden elde edilen sonuçlar analitik yöntemlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında, daha yüksek doğrulukta olduğu görülmektedir. Bu nedenle, nümerik yöntemler kullanıcılar tarafından daha çok tercih edilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) analizi de en yaygın olarak kullanılan nümerik yöntemlerinden biridir [35]. SEY yazılımları, tasarlanacak elektrik makinalarının

davranışlarının modellenmesini sağlamaktadır [36]. Ayrıca, literatürde elektrik makinalarının magnetostatik analizleri 2B ve 3B olarak gerçekleştirilmektedir. 2B-SEY analiz hesaplama süresi 3B-SEY analizi hesaplama süresinden daha kısadır [37]. Fakat, hava bölgelerindeki karmaşık akı yollarından dolayı eksenel akılı makinalarının analizleri mutlaka 3B-SEY olarak gerçekleştirilmelidir [38],[39].

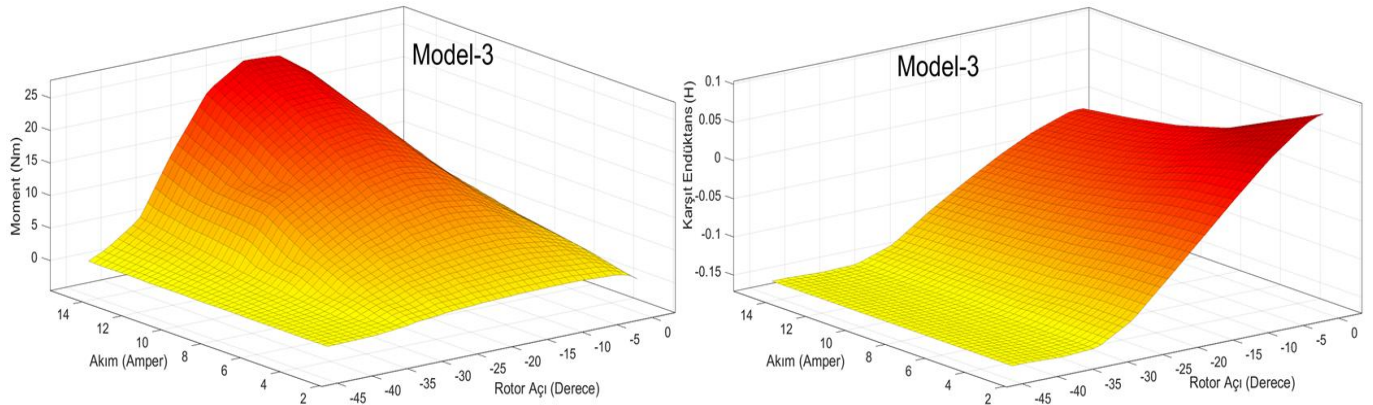
Önerilen her üç model de 2.5 Amper adımlarla 15 Amper'e kadar analiz edilmiştir. Analiz şartları her üç model içinde aynı tutulmuştur. Analizler arasındaki tek fark, önerilen modellerin stator/rotor kutup şekilleridir. Şekil 6'da her üç modelin analizlerden elde edilen açı-akım-moment ve açı-akım-karşıt endüktans değişimleri, Şekil 7'de ise her üç modelin 12.5 Amper'de elde edilen moment grafiğinin karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6'da moment ve karşıt endüktans grafikleri incelendiğinde her üç modelin de karakteristik olarak birbirine benzediği, maksimum değerlerin farklı olduğu görülmektedir. Şekil 7'de önerilen üç modelin 12.5 Amper'de elde edilen moment eğrileri ayrıntılı olarak incelendiğinde ise moment eğrilerinin kesişim noktalarının, diğer bir ifadeyle anlık moment minimum değerlerinin ($M_{ani(min)}$) birbirine yakın olduğu, anlık moment maksimum değerlerinde ($M_{ani(max)}$) ise Model-2'nin en yüksek değere ulaştığı görülmektedir.



a)

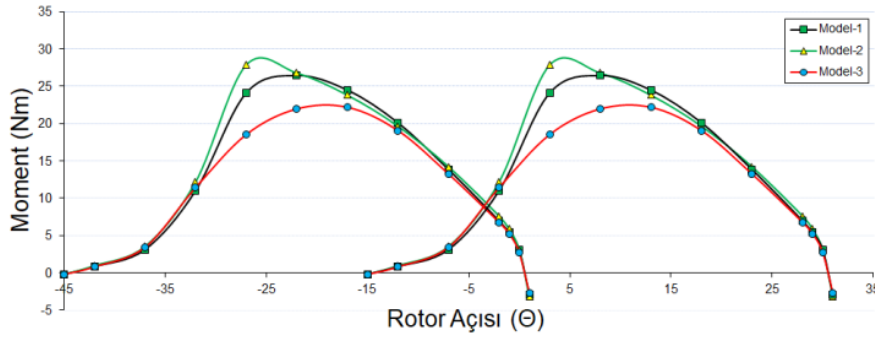


b)



c)

Şekil 6. Rotor açığı-akım-moment ve rotor açığı-akım-karşıt endüktans değişimleri a) Model-1, b) Model-2, c) Model-3



Şekil 7. Model-1, Model-2 ve Model-3'ün 12.5 Amper'de elde edilen moment eğrileri

Her üç modelin ortalama moment ve moment dalgalılıklarını karşılaştırmak için denklem 7-8 kullanılmıştır. Moment dalgalılığını (M_d) hesaplamak için anlık moment (M_{ani}) ve ortalama moment (M_{or}) tanımlanmalıdır. Kararlı durumda ortalama moment'in yüzdesi olarak ifade edilen maksimum ve minimum anlık moment arasındaki fark moment dalgalanması olarak ifade edilmektedir [21]. Denklem 7'de moment dalgalılığı, denklem 8'de ortalama moment eşitliği görülmektedir [21]. Her üç modelin magnetostatik analizlerinden elde edilen verilerden denklem 7-8

kullanılarak elde edilen karşılaştırmalı sonuçları tablo 2'de görülmektedir.

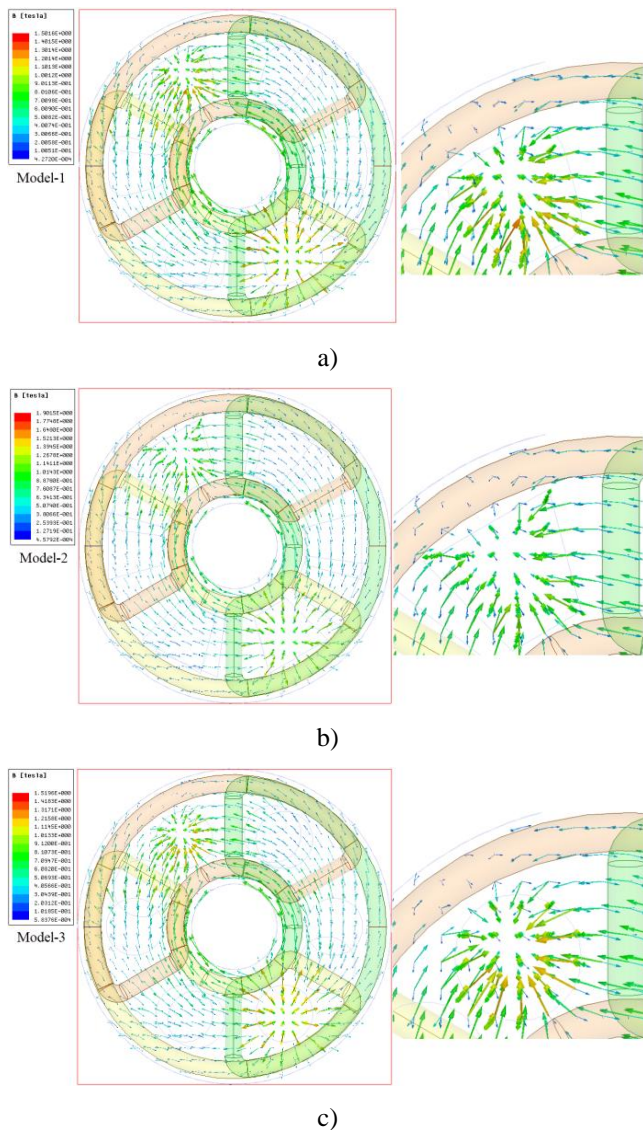
$$(M_d) = \frac{M_{ani(max)} - M_{ani(min)}}{M_{or}} \times 100 \quad (7)$$

$$M_{or} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{ani} dt \quad (8)$$

Tablo 2. Önerilen modellerin magnetostatik analiz sonuçları

Akım (Amper)	Model-1 (kavisli)		Model-2 (keskin)		Model-3 (yuvarlak)	
	M_{or} (Nm)	M_d (%)	M_{or} (Nm)	M_d (%)	M_{or} (Nm)	M_d (%)
2.5	1.29	36.64	1.39	33.29	1.22	33.31
5	4.86	41.95	5.31	39.38	4.66	34.58
7.5	9.16	48.17	9.77	46.40	8.81	37.39
10	13.52	50.90	14.24	49.25	12.72	38.88
12.5	17.65	49.73	18.72	48.70	15.52	42.93
15	21.23	47.91	22.45	49.76	18.44	42.40

Tablo 2'den verilen sonuçlar değerlendirildiğinde farklı akımlarda en düşük moment dalgalılığına Model-3'ün sahip olduğu görülmektedir. Fakat ortalama moment değerleri incelendiğinde Model-1 ve Model-2'nin Model-3'e göre daha yüksek performans sağladığı görülmektedir. Model-1 ve Model-2'nin ortalama moment değerinin yüksek olması; daha yüksek performans sağlaması, kutuplardaki alanın Model-3'e göre daha geniş olmasından kaynaklanmaktadır. Model-1 ve Model-2 kendi arasında değerlendirildiğinde ise benzer şekilde kutuplarda daha geniş bir yüzey alanına sahip olan Model-2 daha yüksek performans göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde önerilen üç model arasında Model-2 (keskin) diğer iki modele göre daha yüksek performansa sahip eksenel akıllı tam adım sargılı ARM olarak bir adım öne çıkmaktadır. Her üç modele ait akı dağılımları ise Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. 12.5 Amperde elde edilen akı dağılımları a) Model-1, b) Model-2, c) Model-3

Elektrik makinalarının tasarımında düzenli akı dağılımları oldukça önemlidir. Akı dağılımlarında oluşacak düzensizlikler, makine momentini olumsuz etkiler ve dolayısıyla da makine performansının düşmesine sebep

olmaktadır. Tam adım sargılı ARM'lerde iki faz aktif olduğundan, akı dağılımı iki faz sargısı arasında yoğunlaşmaktadır. Şekil 8'de, önerilen modellerin akı dağılımlarını daha net görebilmek için sadece üstten görünümü verilmiştir. Her üç modelin de akı dağılımlarında kaçak akı gibi olumsuz durumlar görülmemektedir.

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma da magnetostatik analizlerle eksenel akıllı tam adım sargılı ARM'nin stator/rotor kutup şekillerinin makina performansına etkisi incelenmiştir. ARM'ler son yıllarda çeşitli uygulamalarda özellikle de elektrikli araç teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Yapısında doğada nadir olarak bulunan ve gelecekte hammadde bazında motor üreticilerini kaygılandıran mıknatıs bulundurmaması, ARM'leri diğer motorlardan bir adım öne çıkarmaktadır. ARM'ler de diğer elektrik makineleri gibi eksenel olarak da üretilebilmektedir. Eksenel akıllı motorlar aynı hacim ve ağırlığa sahip radyal tip motorlarla karşılaştırıldığında, birim hacim başına daha yüksek moment üretmektedirler. Eksenel akıllı motorlar özellikle teker içi motor olarak oldukça uygun yapılarıdır. Çalışmada önerilen Model-1 (kavisli), Model-2 (keskin) ve Model-3 (yuvarlak)'ün stator/rotor kutup şekilleri haricinde diğer tüm özellikleri aynı tutunulmuştur. Model-2'nin kutuplarındaki geniş yüzey alanı dolayısıyla en iyi motor performansı sunduğu görülmüştür. Yapılan çalışmayla öncelikle geleneksel kısa adım sargılı ARM'lerden daha yüksek performans sağlayan tam adım sargılı ARM ve eksenel yapının bir arada kullanıldığı "eksenel akıllı tam adım sargılı ARM" nin önemini vurgulamak ve tercih edilen bir makina olmasını sağlamaktır. Ayrıca bu çalışma, eksenel akıllı tam adım sargılı ARM alanında kontrol ve geometrik yapısı üzerine çalışacaklar için de temel bir çalışma olması sağlanmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi 2021-035 numaralı alt yapı projesi tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] H. Cheng, H. Chen, and Z. Yang, "Design indicators and structure optimisation of switched reluctance machine for electric vehicles," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 9, no. 4, pp. 319-331, Apr. 2015.
- [2] E. Bostanci, M. Moallem, A. Parsapour, and B. Fahimi, "Opportunities and Challenges of Switched Reluctance Motor Drives for Electric Propulsion: A Comparative Study," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 3, no. 1, pp. 58-75, Mar. 2017.
- [3] M. Ma, Z. Chang, Y. Hu, F. Li, C. Gan, and W. Cao, "An Integrated Switched Reluctance Motor Drive Topology With Voltage-Boosting and On-Board Charging Capabilities for Plug-In Hybrid Electric

- Vehicles (PHEVs)," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1550-1559, Dec. 2018.
- [4] N. Kurihara, J. Bayless, H. Sugimoto, and A. Chiba, "Noise Reduction of Switched Reluctance Motor With High Number of Poles by Novel Simplified Current Waveform at Low Speed and Low Torque Region," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no.4, pp. 3013-3021, Apr. 2016.
- [5] J. W. Jiang, B. Bilgin, and A. Emadi, "Three-Phase 24/16 Switched Reluctance Machine for a Hybrid Electric Powertrain," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 3, no.1, pp. 76-85, Feb. 2017.
- [6] H. Wang and F. Li, "Design Consideration and Characteristic Investigation of Modular Permanent Magnet Bearingless Switched Reluctance Motor," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 67, no.6, pp. 4326-4337, July 2020.
- [7] A. Fenercioglu, M. Ş. Kurt, A. Şahin, H. Z. Keleş, and T. Kocaer, "Effect of rotor geometry on performance of 6/4 switched reluctance motors," *DUJE*, vol. 12, no. 3, pp. 459-469, June 2021.
- [8] J. Ye, B. Bilgin, and A. Emadi, "An Extended-Speed Low-Ripple Torque Control of Switched Reluctance Motor Drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 3, pp. 1457-1470, Apr. 2015.
- [9] K. Kiyota, T. Kakishima, A. Chiba, and M. A. Rahman, "Cylindrical Rotor Design for Acoustic Noise and Windage Loss Reduction in Switched Reluctance Motor for HEV Applications," *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 52, no. 1, pp. 154-162, Aug. 2016.
- [10] M. Tursini, M. Villani, G. Fabri, and L. Di Leonardo, "A switched-reluctance motor for aerospace application: Design, analysis and results," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 142, pp. 74-83, Jan. 2017.
- [11] A. Shahabi, A. Rashidi, M. Afshoon, and S. M. Saghalian Nejad, "Commutation angles adjustment in SRM drives to reduce torque ripple below the motor base speed," *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, vol. 24, no. 2, pp. 669-682, Jan. 2016.
- [12] W. Sun, Q. Li, K. Liu, and L. Li, "Design and analysis of a novel rotor-segmented axial-field switched reluctance machine," *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 1, no. 3, pp. 238-245, Sep. 2017.
- [13] N. Ali, Q. Gao, C. Xu, P. Makyš, and M. Štulrajter, "Fault diagnosis and tolerant control for power converter in SRM drives," *J. Eng.*, vol. 2018, pp. 546-551, Feb. 2018.
- [14] D. Marcsa and M. Kuczmann, "Design and control for torque ripple reduction of a 3-phase switched reluctance motor," *Comput. Math. Appl.*, vol. 74, no. 1, pp. 89-95, July 2017.
- [15] H.-S. Ro, K.-G. Lee, J.-S. Lee, H.-G. Jeong, and K.-B. Lee, "Torque Ripple Minimization Scheme Using Torque Sharing Function Based Fuzzy Logic Control for a Switched Reluctance Motor," *J Electr Eng Technol*, vol. 10, no. 1, pp. 118-127, Jan. 2015.
- [16] X. Y. Ma, G. J. Li, G. W. Jewell, Z. Q. Zhu, and H. L. Zhan, "Performance Comparison of Doubly Salient Reluctance Machine Topologies Supplied by Sinewave Currents," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no.7, pp. 4086-4096, July 2016.
- [17] X. Deng, B. Mecrow, H. Wu, and R. Martin, "Design and Development of Low Torque Ripple Variable-Speed Drive System With Six-Phase Switched Reluctance Motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 33, no.1, pp. 420-429, Mar. 2018.
- [18] Q. Sun, J. Wu, C. Gan, Y. Hu, and J. Si, "OCTSF for torque ripple minimisation in SRMs," *IET Power Electron.*, vol. 9, no. 14, pp. 2741-2750, Nov. 2016.
- [19] H. Ishikawa, T. Imai, and H. Naitoh, "New Drive Circuit for Reducing the Switching Current Ripples in Switched Reluctance Motors," *Electr Eng. Jpn.*, vol. 203, no. 2, pp. 47-57, Jan. 2018.
- [20] E. Daryabeigi, M. M. Namazi, A. Emanian, A. Rashidi, and S. M. Saghalian-Nejad, "Torque ripple reduction of switched reluctance motor (SRM) drives, with emotional controller (BELBIC)," presented at the *Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Orlando, FL, USA, 5-9 Feb. 2012.
- [21] C. Sahin, A. E. Amac, M. Karacor, and A. Emadi, "Reducing torque ripple of switched reluctance machines by relocation of rotor moulding clinches," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 6, no. 9, p. 753-760, Nov. 2012.
- [22] W. Ding, Y. Hu, and L. Wu, "Analysis and Development of Novel Three-Phase Hybrid Magnetic Paths Switched Reluctance Motors Using Modular and Segmental Structures for EV Applications," *IEEE/ASME Trans. Mech.*, vol. 20, pp. 2437-2451, Jan. 2015.
- [23] B. C. Mecrow, "Fully pitched-winding switched-reluctance and stepping-motor arrangements," *IEE Proceedings B*, vol. 140, no. 1, pp. 61-70, Jan. 1993.
- [24] M. A. Kabir and I. Husain, "Design of Mutually Coupled Switched Reluctance Motors (MCSRMs) for Extended Speed Applications Using 3-Phase Standard Inverters," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 31, no.2, pp. 436-445, Dec. 2016.
- [25] J. Sun, S. Wang, Z. Kuang, and H. Wu, "Torque ripple comparison of short-pitched and fully-pitched winding switched reluctance machine," presented at the *15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sapporo, Japan, 21-24 Oct. 2012.
- [26] P. Azer, B. Bilgin, and A. Emadi, "Mutually Coupled Switched Reluctance Motor: Fundamentals, Control, Modeling, State of the Art Review and Future Trends," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 100099-100112, July 2019.
- [27] E. S. Sanches and J. A. Santisteban, "Mutual Inductances Effect on the Torque of an Axial Magnetic Flux Switched Reluctance Motor," *IEEE Lat. Am. Trans*, vol. 13, no. 7, pp. 2239-2244, July 2015.

- [28] H. Torkaman, A. Ghaheri, and A. Keyhani, "Axial flux switched reluctance machines: a comprehensive review of design and topologies," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 13, no. 3, pp. 310-321, Jan 2019.
- [29] H. Arihara and K. Akatsu, "Basic Properties of an Axial-Type Switched Reluctance Motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no.1, pp. 59-65, Jan.-Feb. 2013.
- [30] J. Ma, J. Li, H. Fang, Z. Li, Z. Liang, Z. Fu, *et al.*, "Optimal Design of an Axial-Flux Switched Reluctance Motor With Grain-Oriented Electrical Steel," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no.6, pp. 5327-5337, Nov.-Dec. 2017.
- [31] M. H. Belhadi, G. Krebs, C. Marchand, H. Hannoun, and X. Mininger, "Evaluation of axial SRM for electric vehicle application," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 148, pp. 155-161, July 2017.
- [32] R. Shiwakoti, B. Poudel, E. Amiri, M. Divandari, and A. Damaki, "Design and Analysis of Modular Axial Flux Switched Reluctance Motor," presented at the *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 12-15 May 2019.
- [33] M. J. Kermanipour and B. Ganji, "Modification in Geometric Structure of Double-Sided Axial Flux Switched Reluctance Motor for Mitigating Torque Ripple," *Can. J. Elect. Comput. E.*, vol. 38, no. 4, pp. 318-322, Fall 2015.
- [34] C. Sahin and M. Karacor, "Principle, design and analysis of a novel axial flux switched reluctance machine with fully pitched winding structure," *Electrical Engineering*, to be published DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01417-z>
- [35] R. Alipour-Sarabi, Z. Nasiri-Gheidari, and H. Oraee, "Development of a Three-Dimensional Magnetic Equivalent Circuit Model for Axial Flux Machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no.7, pp. 5758-5767, July 2020.
- [36] M. Çeçen and B. GÜMÜŞ, "Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak farklı tip sargılar için güç transformatörün 2B analiz sonuçlarının karşılaştırılması," *DUJE*, vol. 9, no. 2, pp. 701-712, Sep. 2018.
- [37] K. Kiyota, S. Nakano, and A. Chiba, "A Fast Calculation Method of Optimal Ratio of Outer Diameter and Axial Length for Torque Improvement in Switched Reluctance Motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 6, pp. 5802-5811, June 2018.
- [38] W. Sun, Q. Li, L. Sun, L. Zhu, and L. Li, "Electromagnetic Analysis on Novel Rotor-Segmented Axial-Field SRM Based on Dynamic Magnetic Equivalent Circuit," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 55, no. 6, pp. 1-5, Mar. 2019.
- [39] K. Deguchi, S. Sumita, and Y. Enomoto, "Analytical Method Applying a Mathematical Model for Axial-Gap-Switched Reluctance Motor," *Electr Eng. Jpn.*, vol. 196, no. 3, pp. 30-38, Nov. 2016.