



Anahtarlamalı Relüktans Motorunun Atalet Momentinin ve Faz Direncinin Maxwell Tabanlı Tahmin Edilmesi ve Sonlu Elemanlar Analizi

Maxwell-Based Prediction and Finite Element Analysis of Inertia Torque and Phase Resistance of Switched Reluctance Motor

Serkan Sezen , Ercüment Karakaş* , Kadir Yılmaz 

Kocaeli Üniversitesi, Enerjisi Sistemleri Müh. Bölümü, Kocaeli, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, üç fazlı 6/4 kutuplu kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip klasik bir Anahtarlamalı Relüktans Motorun (ARM) Ansoft/Maxwell kullanılarak sonlu elemanlar analizi yapılmakta ve atalet momenti ile faz sargı direncinin tahmin edilmesi için bir yöntem önerilmektedir.

Atalet momentinin hesaplanması aşamasında Maxwell programının hassas alan hesaplama özelliğinden ve rotorun geometrik verilerinden faydalanılarak rotor kütlesi ve atalet momenti hesaplanmaktadır. Benzer şekilde motorun geometrik verilerinden faydalanarak bir faza ait sargı uzunluğu ve faz direnci değeri hesaplanmaktadır. Çalışmanın son kısmında ise motorun Sonlu Elemanlar analizi yapılmaktadır. Analiz sonucunda literatüre uygun olarak elde edilen akı, endüktans ve moment karakteristikleri ayrıntılı grafikler ile gösterilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Anahtarlamalı relüktans motor, Atalet momenti, Faz direnci, Maxwell

Abstract

In this study, a finite element analysis is performed using a three-phase 6/4-pole short-pole stepped winding with a conventional Switched Reluctance Motor (ARM) using Ansoft / Maxwell and a method is proposed for estimating phase-winding resistance with inertia torque.

In calculating the inertia torque, the rotor mass and the inertia torque are calculated by taking advantage of the precise area calculation feature of the Maxwell program and the geometric data of the rotor. Similarly, the coil length and phase resistance value of an enclosure are calculated by taking advantage of the geometric data of the motor. In the last part of the work, finite element analysis is done. As a result of the analysis, the flux, inductance and torque characteristics obtained according to the literature are shown in figures.




Keywords: Switched reluctance motor, Inertia torque, Phase resistance, Maxwell

1. Giriş

Mevcut endüstri tesislerinde elektrik motorlarının kullanım alanları sürekli artmaktadır. Gelişen teknolojinin bir ürünü olarak ortaya çıkan mikroişlemciler ve gelişmiş güç elektroniği elemanları sayesinde, otomasyonda karmaşık denetim tekniklerinin uygulanabilirliği gün geçtikçe daha da artmaktadır. Yüksek derecede özellik arz eden motor sürücülerini düşük gürültü, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek performans

özellikleri bakımından en iyi hale getirmek pahalı tasarımlar ve yoğun çalışmalar gerekmektedir. Bu zorluğu aşmak güvenilir, doğru ve pratik benzetim metodları sayesinde oldukça kolaylaşmıştır. İyi bir benzetim çalışması ile istenilen performans karakteristikleri ve buna karşılık gelen tasarım şekilleri gerçek prototip üretilmeden belirlenebilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), karmaşık geometriye, manyetik doymaya ve deri etkisine sahip dönen elektrik makinelerinin modellenmesinde başarı ile uygulanmaktadır (Zhou vd. 2012). Bunun sonucunda, çalışması için sürücü devreye gereksinim duyan ve denetimi güç olan motorlar otomasyonda yeni bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Anahtarlamalı Relüktans Motorlar bu süreçte önem kazanan motorlara iyi bir örnek olarak sunulabilir.

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: erckarakas@gmail.com

Serkan Sezen  orcid.org/0000-0001-7273-7376
Ercüment Karakaş  orcid.org/0000-0003-4219-5160
Kadir Yılmaz  orcid.org/0000-0002-0819-3420

Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM), değişken hızlı sürücülerde yapısal basitlik, yüksek güvenilirlik ve düşük maliyet gibi avantajları nedeniyle diğer elektrik makineleri içinde cazip bir seçenek haline gelmektedir. ARM'ler ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, (Sahoo vd. 2003) ARM için model tabanlı bir moment tahmin edicisi yapmışlardır (Parvizi vd. 2009). ARM moment tahmini için yapay zekâ tabanlı modeller kullanmışlardır (Cheshmehbeigi vd. 2009). üç boyutlu Sonlu Elemanlar Metodu kullanarak ARM'nun tasarım ve analizini gerçekleştirmişlerdir (Pérez Cebolla vd. 2009). ARM'nun eşdeğer devre parametrelerini deneysel olarak tespit etmişlerdir (Faiz vd. 2010). ARM tasarım parametrelerinin motorun dinamik davranışına etkisini araştırmışlar ve analizini gerçekleştirmişlerdir (Qinghai vd. 2011). Üç fazlı 6/4 kutuplu bir ARM için parametre tasarımı ve Sonlu Elemanlar Metodu analizi yapmışlardır (Takeno M. vd. 2012). 50 kW gücünde bir ARM tasarımı yapmışlar moment iyileştirmelerini test sonuçlarında tespit etmişlerdir (Hieu vd. 2015). İki fazlı yüksek hızlı 4/3 kutuplu bir ARM tasarımı gerçekleştirmişler ve parametrelerini tespit etmişlerdir (Nezamabadi vd. 2016). yeni bir ARM'un tasarımını, FEM ve dinamik elektromanyetik analizini gerçekleştirmişlerdir (Fleming and Edrington 2016). Manyetik eşdeğer devreler yolu ile ARM'un gerçek zamanlı emülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Parametre tespitini yapmışlardır (Perez-Cebolla vd. 2016). ARM çekirdek kayıplarını göstermek için lineer olmayan devre modeli oluşturmuşlar ve parametrelerini tespit etmişlerdir (Chen ve Wang 2016). Anahtarlamalı lineer relüktans motorun yapısını inceleyerek elektromanyetik analizini gerçekleştirmişlerdir. Anahtarlamalı Relüktans Motorda rotor konumuna ve uyarma akımına bağlı olarak değişen faz endüktansı, makinenin dinamik performansını belirlemektedir (Srinivas ve Arumugam 2002).

Bu çalışmada motorun dinamik performansını belirleyen çalışma karakteristikleri SEY ile tahmin edilmiştir. Ayrıca motorun geometrik verilerinden ve Maxwell programının hassas alan hesaplama özelliğinden faydalanılarak atalet momenti ile faz sargı direnci tahmin edilmektedir.

2. Gereç ve Yöntem

Günümüzde Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), mühendislik ve matematik problemlerinin çözümünde geniş uygulama alanına sahip genel bir yöntem olarak tanınmaktadır. Yöntemin elektromanyetik alan problemlerine uygulanması ilk olarak 1968 yılında gerçekleştirilmiştir (Garip 2002). Yüksek derecede özellik arz eden motor sürücülerini düşük

gürültü, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek performans özellikleri bakımından en iyi hale getirmek pahalı tasarımlar ve yoğun çalışmalar gerekmektedir. Bu zorluğu aşmak güvenilir, doğru ve pratik benzetim metotları sayesinde oldukça kolaylaşmıştır. İyi bir benzetim çalışması ile istenilen performans karakteristikleri ve buna karşılık gelen tasarım şekilleri gerçek prototip üretilmeden belirlenebilmektedir. SEY, karmaşık geometriye, manyetik doymaya ve deri etkisine sahip dönen elektrik makinelerinin modellenmesinde başarı ile uygulanmaktadır. Anahtarlamalı Relüktans Motorda rotor konumuna ve uyarma akımına bağlı olarak değişen faz endüktansı, makinenin dinamik performansını belirlemektedir. Bu çalışmada motorun dinamik performansını belirleyen çalışma karakteristikleri SEY ile tahmin edilmiştir.

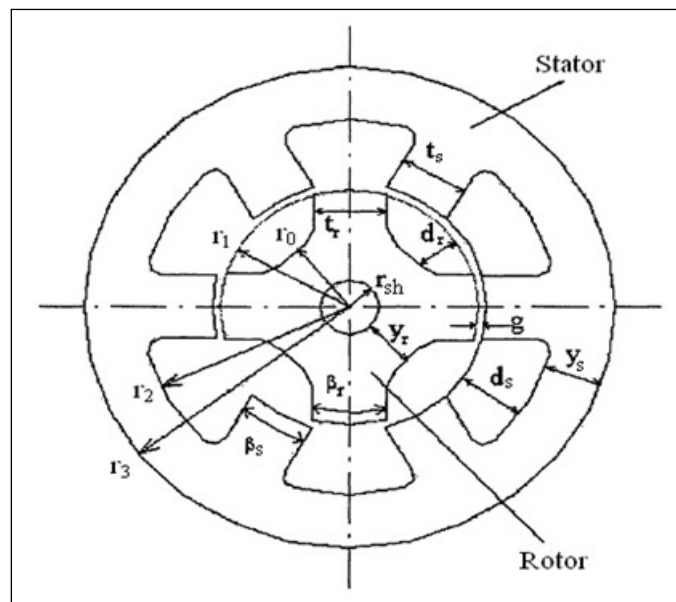
2.1. Kullanılan Motorun Özellikleri

Çalışmada kullanılan 6 stator 4 rotor kutup yapısına sahip kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip klasik ARM'na ait boyutlar ve motorun kesit görünüşü Şekil 1'de gösterilmektedir.

Kullanılan ARM'nun geometrik boyutları ve bu boyutların değerleri SI birim sistemi kullanılarak Çizelge 1'de verilmiştir. Ayrıca motorun plaka değerleri Çizelge 2'de verilmektedir.

2.2. Atalet Momentinin Hesaplanması

Bu kısımda Maxwell programının alan hesaplama özelliğinden yararlanılarak motorun atalet momentinin hesaplanması



Şekil 1. ARM'nun kesit görünüşü ve boyutları.

ele alınmaktadır. Elde edilen alan değeri ile model derinliği (model depth) çarpılarak hacim hesabı yapılmaktadır. Hesaplamalar sırasında çeliğin özağırlığı 7860 kg/m^3 alınmıştır. Rotor atalet momentinin bulunuşuna ilişkin işlem basamakları aşağıda sıralanmaktadır;

1. Rotor alanının hassas olarak Maxwell programı ile hesaplanması
2. Rotor hacminin hesaplanması
3. Rotor kütesinin hesaplanması
4. Rotorun geometrisine göre atalet momentinin hesaplanması

Maxwell programı kullanılarak hesaplanan rotor alanları Çizelge 3’de gösterilmektedir.

Rotorun atalet momentinin hesaplanması için rotor geometrisi Şekil 2’de gösterildiği gibi iki ayrı geometrik

Çizelge 1. Kullanılan ARM’nun geometrik boyutları.

Parametre Adı	Sembolü	Değeri
Stator kutup yüksekliği	ds	0,0265
Rotor kutup yüksekliği	dr	0,0447
Motor derinliği	md	0,2981
Hava Aralığı	g	0,0020
Stator kutup genişliği	ts	0,07816
Rotor kutup genişliği	tr	0,08214
Stator kutup sayısı	Ns	6
Rotor kutup sayısı	Nr	4
Stator boyunduruk kalınlığı	ys	0,0546
Rotor boyunduruk kalınlığı	yr	0,0575
Rotor boyunduruk yarıçapı	r0	0,1043
Rotor kutup yarıçapı	r1	0,1490
Stator iç boyunduruk yarıçapı	r2	0,1775
Stator dış boyunduruk yarıçapı	r3	0,2321
Mil yarıçapı	rsh	0,0468
Stator kutup açısı	β_s	30
Rotor kutup açısı	β_r	32

Çizelge 2. Kullanılan ARM’nun etiket değerleri.

Parametre	Değeri
Maksimum güç (Pmax)	34 KW
Sürekli güç (Pc)	23 KW
D.A. gerilim (Vda)	300 V
Nominal hız (Vnom)	1200 d/dk
Maksimum hız (Vmax)	6000k

şekle ayrılmıştır. Bunlardan birincisi rotordan kutupların çıkarılmasıyla elde edilen içi boş silindirdir. Diğeri ise rotor kutbuna ait geometrik şekildir.

Şekil 3’de gösterilen içi boş halka silindirin atalet momenti Denklem (1)’deki gibi hesaplanmaktadır.

$$J_{HS} = \frac{1}{2} m_{HS} (R_1^2 + R_2^2) \quad (1)$$

Burada;

J_{HS} : Halka silindirin atalet momenti (kg.m^2)

m_{HS} : Halka silindirin kütlesi (kg)

R_1, R_2 : Halka silindire ait sırasıyla iç ve dış yarıçaplar (m)

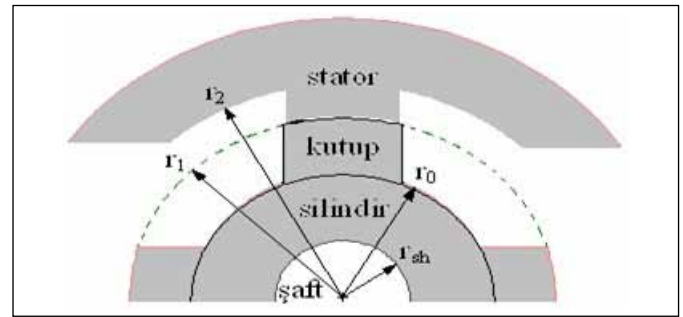
Denklem (1)’den halka silindirin atalet momenti aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$J_{HS} = \frac{1}{2} m_{HS} (r_{sh}^2 + r_0^2) = \frac{1}{2} (63,919)[(0,0468)^2 + (0,1043)^2]$$

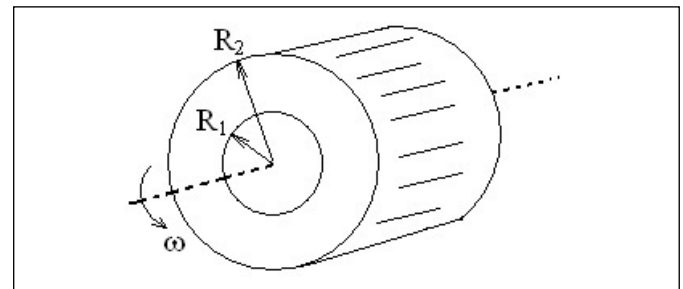
$$J_{HS} = 0,417 \text{ Kg.m}^2$$

Çizelge 3. Rotora ilişkin fiziksel büyüklükler ve hesaplanan değerler.

	Alan (m^2)	Hacim (m^3)	Ağırlık (Kg)
Şaft	$6,877.10^{-3}$	$2,050.10^{-3}$	-
Kutup	$3,744.10^{-3}$	$1,1161.10^{-3}$	8,77
Silindir	$27,28.10^{-3}$	$8,132.10^{-3}$	63,919
Toplam rotor	$4,225.10^{-2}$	$12,59.10^{-3}$	99,012



Şekil 2. Rotor geometrisi.



Şekil 3. Halka biçimli silindir.

Şekil 4'de rotor kutuplarından biri gösterilmektedir. Kutup ataleti bulunurken, rotor kutbunun geometrik şekli dikdörtgenler prizmasına benzetilmektedir ve prizmanın ağırlık merkezi bulunduktan sonra kutbun tüm ağırlığının bu noktada toplandığı düşünülerek noktasal atalet ilkesine göre atalet hesabı yapılmaktadır.

Ağırlığı m , dönme ekseninden uzaklığı R olan noktasal cismin ataleti Denklem (2)'den bulunabilir.

$$J_K = m_K \cdot R^2 \quad (2)$$

Buradan bir kutbun ataleti;

$$J_K = m_K \left(r_0 + \frac{dr}{2} \right)^2 = 8,77 \cdot (0,1266)^2 = 0,14 \text{ Kg.m}^2$$

Toplam rotor ataleti, içi boş silindir ataleti (J_{HS}) ve 4 adet kutbun meydana getirdiği ataletin toplamına eşittir. Buna göre toplam atalet momenti aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$J = J_{HS} + 4 \cdot J_K = 0,417 + 4 \cdot (0,14) = 0,977 \text{ Kg.m}^2$$

2.3. Faz Direncinin Hesaplanması

Şekil 5'de AR motorunun tasarımında dikkate alınan stator, rotor ve sargı ebatları gösterilmektedir. Sargı uçlarından alınan dıştan dışa uzunluk (L_e) paketleme uzunluğu (L_{stk}) artı her iki taraftaki sargının iki sarkması ile Denklem (3)'de ifade edildiği şekilde elde edilir:

$$L_e = L_{stk} + 2L_{oh} \quad (3)$$

L_e muhafazanın bir boyutudur. Sargıların sarkmasından dolayı her iki uçtaki sarkma uzunluğu (L_{oh}) kabaca $1,2 t_s$ olarak tahmin edilebilir, burada t_s stator kutup genişliğidir. Buna göre Denklem (4)'deki ifade elde edilir:

$$L_e \approx L_{stk} + 2,4t_s \quad (4)$$

Motorun bir fazının sargı uzunluğu (L_{st}) Denklem (5)'deki gibi hesaplanmaktadır (Gürdal 2001):

$$L_{su} = L_e \cdot 2 \cdot n_s \cdot 2 = 4 \cdot L_e \cdot n_s = 4 \cdot (L_{stk} + 2,4t_s) \cdot n_s \quad (5)$$

burada n_s , aynı faza ait sargılardan birinin sipir sayısıdır ve bu çalışmadaki motor için 16'dır.

$$L_{su} = 4 \cdot (0,2981 + 2,4 \cdot 0,07816) \cdot 16 = 31,0837 \text{ m}$$

Literatürde relüktans motor için iletken seçiminde akım yoğunluğu 7 Amper/mm^2 alınmaktadır (Miller 2002). Buradan hareketle 165 A nominal motor akımı için uygun iletken kesiti,

$$S = \frac{165 \text{ A}}{7 \text{ A/mm}^2} = 23,571 \text{ mm}^2$$

olarak bulunmaktadır.

Özdirenci, uzunluğu ve kesiti bilinen bir iletkenin direncinin

bulunuşuna ilişkin ifade Denklem (6)'da gösterilmektedir. Burada r , iletkenin özdirenci ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$), L , iletkenin uzunluğu (m), S , iletkenin kesitidir (mm^2).

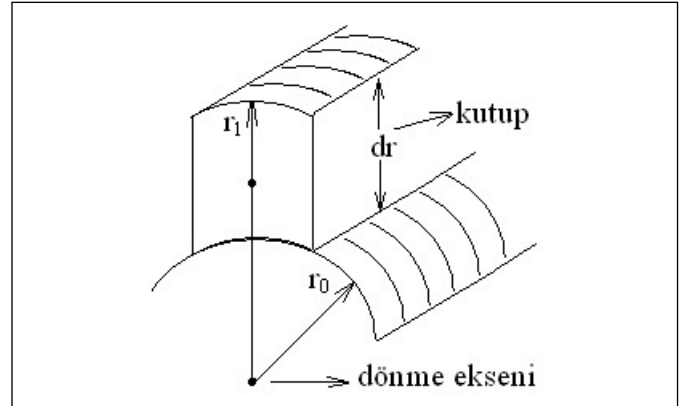
$$R = \frac{\rho \cdot L}{S} \quad (6)$$

Denklem (6)'dan faz direnci aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

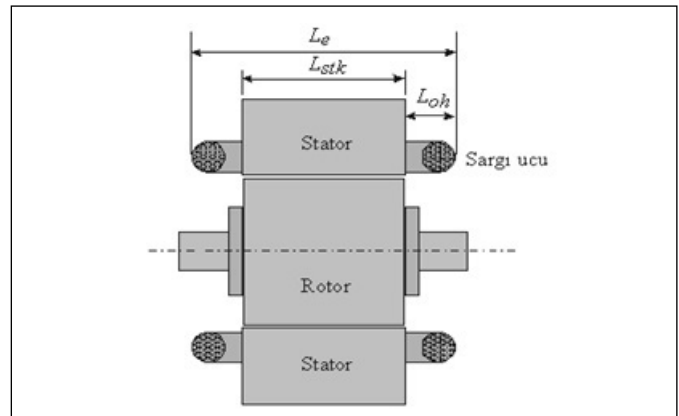
$$R_a = \frac{0,017857 \cdot 31,0837}{23,571} = 0,0235 \Omega$$

2.4. ARM'nun Çalışma Karakteristiklerinin Elde Edilişi

Çalışma karakteristiklerinden ilk önce akı karakteristiği incelenmiştir. Daha sonra ARM'nun endüktans ve moment karakteristiği incelenmektedir. Motorun karakteristikler elde edilirken nominal çalışma akımı olan 165 A 'in altındaki ve üstündeki akım değerleri için çözümler yapılarak doymanın olduğu ve olmadığı durumlarda motor karakteristikleri incelenmektedir. Şekil 6'da ARM'na ait halkalanma akısı-akım değişimi gösterilmektedir. Analiz yapılırken motorun faz akımı $0-255 \text{ amper}$ arasında 15 'er amperlik artımlarla arttırılmıştır ve bu akımlara karşılık gelen halkalama akılarına bakılmıştır. $0^\circ - 45^\circ$ arasındaki akı verileri $45^\circ - 90^\circ$ arasındaki



Şekil 4. Rotor kutbu geometrisi.



Şekil 5. ARM'nun muhafaza boyutları.

veriler dikey eksene göre simetrik olduğundan analizlerin 0°- 45° arasında yapılması yeterli olmaktadır. Şekil 6'dan doymanın 165 A civarında başladığı görülmektedir. Akı karşılıklı konumda en büyük değerini almaktadır.

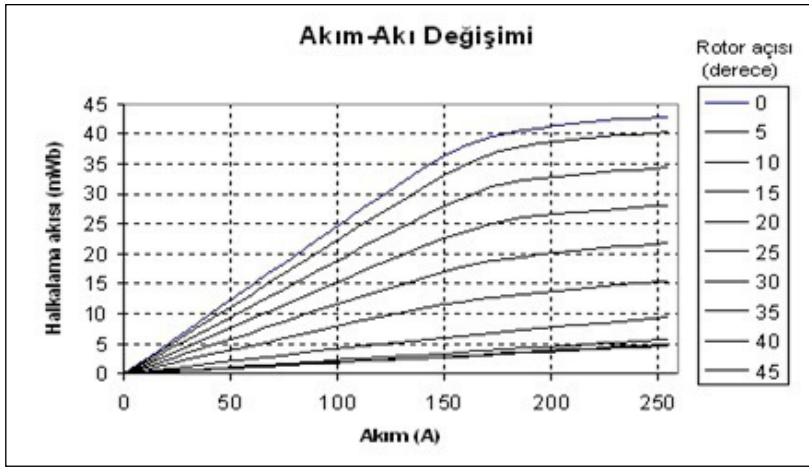
Şekil 7'de ARM'nun öz endüktans eğrisi gösterilmektedir. Endüktans eğrisi en büyük değerini karşılıklı konumda, en küçük değerini ise ortalanmış konumda almaktadır. Motorun pozitif moment ürettiği artan endüktans bölgesi yaklaşık 55° ile 90° arasındaki bölgedir. Eğer bu bölgenin sonunda fazın enerjisi kesilmezse motor negatif moment üretir.

6/4 kutuplu relüktans motorunun her 30° lik dönüşünde (adım açısı) bir rotor kutup çifti ile stator kutup çifti karşılıklı

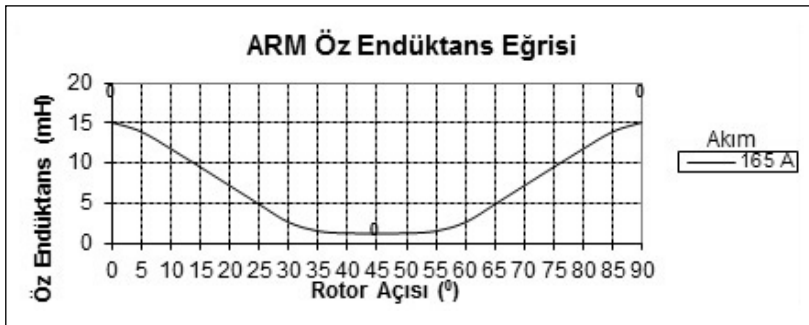
duruma geldiğinden fazların öz endüktans eğrileri arasında 30° faz farkı vardır. Bu durum Şekil 8'de görülmektedir.

Stator ve rotor konumuna bağlı olarak endüktansla birlikte akı yolu da değişmektedir. Bu durum makinenin tasarım kısmında dikkate alınan önemli göstergelerden biridir. Bilindiği gibi karşılıklı konumda öz endüktans değeri en büyük değerine ulaşmaktadır. Şekil 9'da karşılıklı konuma ait akı haritası gösterilmiştir. Akının tamamının rotor ve stator kutup uçlarından, rotor ve stator boyunduruklarından geçerek düzgün bir şekilde devresini tamamladığı görülmektedir.

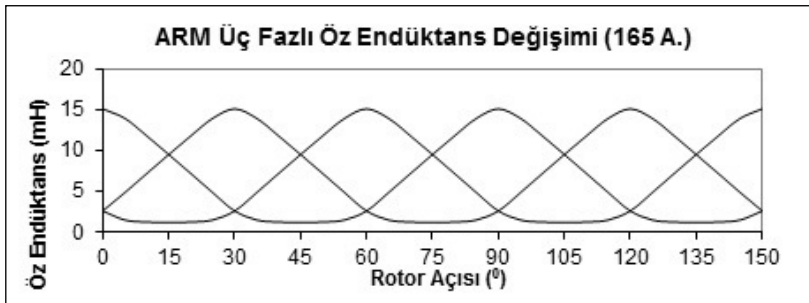
Şekil 10'da rotor konumunun karşılıklı konumdan ayrılırken ara konumuna ait akı haritası gösterilmektedir. Bu akı



Şekil 6. ARM halkalanma akısı-akım eğrisi.



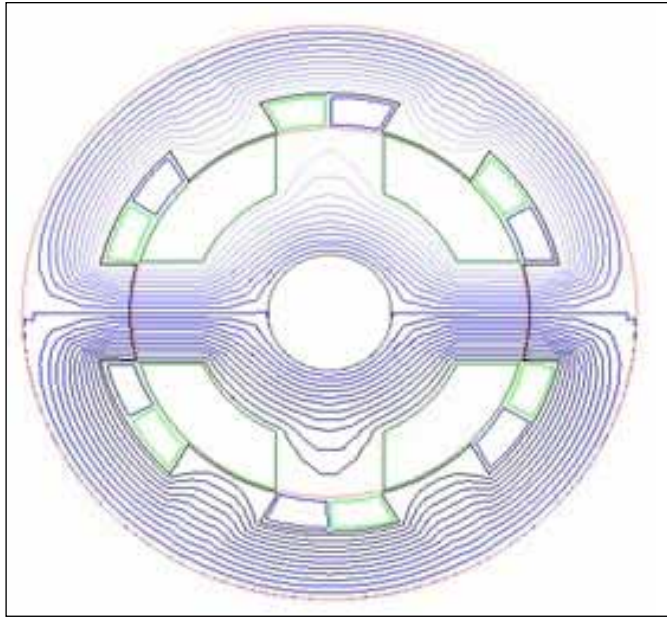
Şekil 7. ARM bir faz öz endüktans eğrisi (165A).



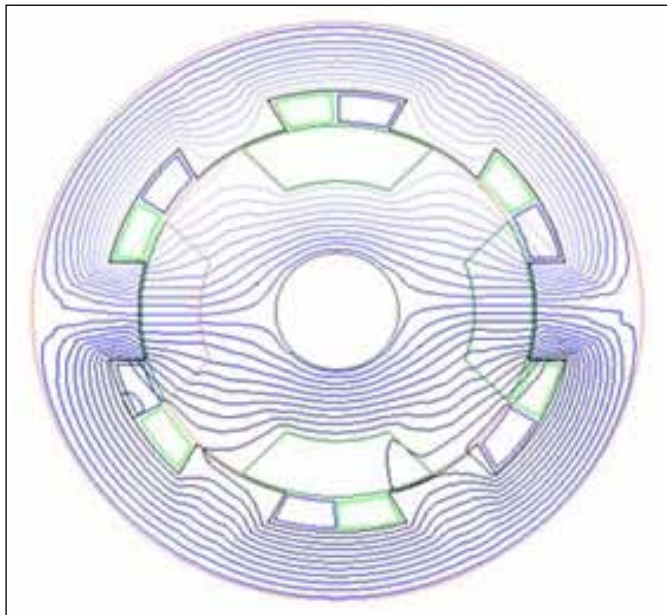
Şekil 8. ARM üç fazlı öz endüktans değişimi.

haritasında, akının artık kutup köşelerine yığıldığı ve akı düzeninin kısmen bozulduğu görülmektedir. Öz endüktans değeri düşmeye başlamıştır. Şekil 11'de ortalanmış konuma yani endüktansın en küçük olduğu konuma ait akı çizgileri verilmektedir. Dikkat edilirse akı çizgileri son derece dağınık durumdadır. Bu durum aynı zamanda akı yolunun en düzensiz olduğu konumdur.

Analizler sonucunda elde edilen bir faza ait statik moment eğrileri Şekil 12'de gösterilmektedir. Öz endüktansın değeri-



Şekil 9. ARM akı haritası (karşılıklı konum, 90°).

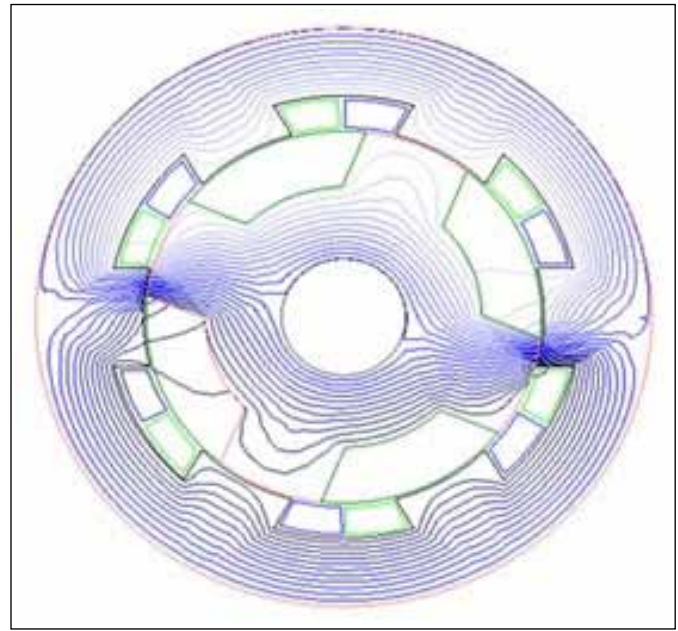


Şekil 11. ARM akı haritası (ortalanmış konum, 45°).

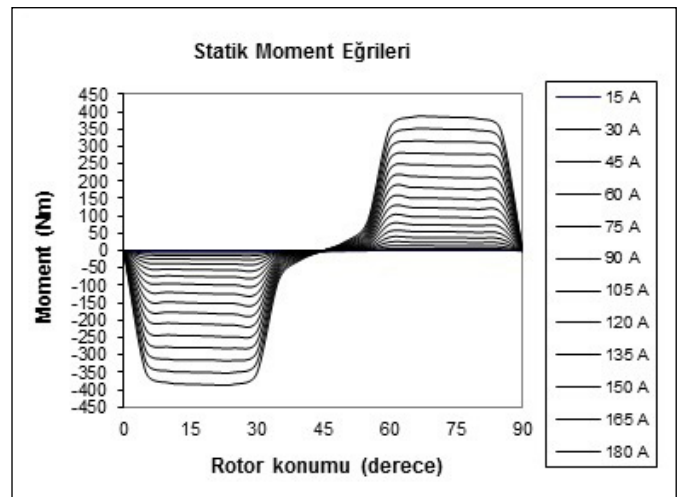
şim oranı ve akımın karesi moment ifadesini oluşturan bileşenlerdir. Moment eğrilerinin, stator ve rotor kutuplarının karşılıklı olduğu (0° ve 90°) konumda ve ortalanmış konumda (45°) yön değiştirdiği görülmektedir.

3. Sonuçlar

ARM gibi karmaşık elektrik sistemlerinin dinamik davranışına ilişkin benzetim çalışmaları moment dalgalılığının azaltılması veya değişken hız kontrolü uygulamaları açısından daima dikkate değer bir öneme sahiptir. Tasarımcı bu benzetimler aracılığıyla sistemin davranışını geniş çalışma sınırları içinde tahmin edebilmektedir. Sistem



Şekil 10. ARM akı haritası (ara konum, 22.5°).



Şekil 12. ARM statik moment eğrileri.

performansını en iyi hale getirmek için denetim parametreleri herhangi bir anda kolayca ayarlanabilmektedir. Ancak ARM'nin doğrusal olmayan dinamik modelinin oluşturulabilmesi için sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen akı, endüktans ve moment verilerinin yanı sıra atalet momenti, faz direnci ve sürtünme katsayısı gibi parametrelerin de bilinmesine ihtiyaç vardır. Bu parametreler genellikle motor prototipi üretildikten sonra deneysel olarak tespit edilmektedir. Bu durum tasarımcılar için ayrı bir zorluk olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada motorun dinamik performansını belirleyen çalışma karakteristikleri, atalet momenti ve faz direnci Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ve önerilen hesaplama yöntemleri ile literatüre uygun olarak tahmin edilmiştir.

4. Öneriler

Analizi yapılan ARM'nin yüksek güçlü (23kW) olması özelliği ile de hibrit elektrikli araç uygulamaları için uygun olacağı düşünülmektedir. Elde edilen analiz verileri kullanılarak dinamik motor modelinin oluşturulması ve çalışmanın bu yönde devam ettirilmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir.

5. Kaynaklar

- Chen, H., Wang, Q. 2016.** Electromagnetic Analysis on Two Structures of Bilateral Switched Reluctance Linear Motor. *IEEE T. Appl. Supercon.*, 26: 5205109.
- Cheshmehbeigi, HM., Yari, S., Afjei, E. 2009.** Design and analysis of Low Torque Ripple Switched Reluctance Motor using 3-Dimensional Finite Element Method. *In: Proceedings of the European Conference on Circuit Theory and Design*, Turkey, 857–861.
- Faiz, J., Shahgholian, G., Ghazizadeh, H. 2010.** Analysis of Dynamic Behavior of Switched Reluctance Motor-Design Parameters Effects. *In: Proceedings of the 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON 2010)*, Malta, 532–537.
- Fleming, FE., Edrington, CS. 2016.** Real-Time Emulation of Switched Reluctance Machines via Magnetic Equivalent Circuits. *IEEE T. Ind. Electron.*, 63: 3366–3376.
- Garip, M. 2002.** Tam Kutup Adımlı Anahtarlamalı Relüktans Motorun Kutup Başlarını Şekillendirerek Moment Dalgalılığının İyileştirilmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 19s.

- Gürdal, O. 2001.** Elektrik Makinalarının Tasarımı, Nobel Yayınevi.
- Hieu, PT., Lee, DH., Ahn, JW. 2015.** Design of Novel High Speed 2-Phase 4/3 Switched Reluctance Motor for Air-Blower Application. *In: Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Korea, 1520–1524.
- Miller, TJE. 2002.** Speed's Electric Motors. University of Glasgow.
- Nezamabadi, MM., Afjei, E., Torkaman, H. 2016.** Design, Dynamic Electromagnetic Analysis, FEM, and Fabrication of a New Switched-Reluctance Motor with Hybrid Motion. *IEEE T. Magn.*, 52: 8201708.
- Parvizi, A., Aris, RM., Lachman, T., Rom, TM. 2009.** Artificial Intelligent Based Approaches of Estimating of Torque for Multi-Teet per Pole Switched Reluctance Motor. *In: Proceedings of the Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications (CITISIA 2009)*, Malaysia, 81–86.
- Pérez Cebolla, FJ., Martínez, A., Martín, B., Bernal, C., Bono-Nuez, A. 2016.** Nonlinear Lumped-Circuit Model for Switched Reluctance Motors Exhibiting Core Losses. *IEEE T. Ind. Electron.*, 63: 3433–3445.
- Pérez Cebolla, FJ., Martínez, A., Martín, B., Laloya, E., Montaña, CE., Méndez, S., Vicuña, JE. 2009.** Experimental Equivalent Circuit Parameters Identification of a Switched Reluctance Motor. *In: Proceedings of the IEEE 35th Annual Conference of Industrial Electronics*, Portugal, 1140–1145.
- Qinghai, WU., Xiaofeng, HE., Defei, JIN., Shasha, WU., Zhang, T. 2011.** Parameter Design and FEM Analysis for 3-phase 6/4 Poles Switched Reluctance Motor. *In: Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, China, 3636–3639.
- Sahoo, SK., Zeng, Q., Panda, SK., Xu, JX. 2003.** Model-based Torque Estimator for Switched Reluctance Motors. *In: Proceedings of the Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Singapore, 959–963.
- Srinivas, KN., Arumugam, R. 2002.** Finite Element Analysis Combined Circuit Simulation of Dynamic Performances of Switched Reluctance Motors. *Elec. Pow. Comp. Syst.*, 30: 1033–1045.
- Takeno, M., Chiba, A., Hoshi N., Ogasawara, S., Takemoto, M., Rahman, MA. 2012.** Test Results and Torque Improvement of the 50-kW Switched Reluctance Motor Designed for Hybrid Electric Vehicles. *IEEE T. Ind. Appl.*, 48: 1327–1334.
- Zhou, P., Stanton, S., Zoltan, JC. 2012.** Dynamic Modeling of Electric Machines. Ansoft Corporation, Pittsburg.