

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE YÜKSEK GÜÇLÜ BİR ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN PERFORMANS ANALİZİ

Serkan SEZEN¹ Kadir YILMAZ² Ercüment KARAKAŞ³

Elektrik Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi
Kocaeli Üniversitesi, 41380, Umuttepe, Kocaeli

¹e-posta: serkansezen@kou.edu.tr

²e-posta: kayel@kou.edu.tr

³e-posta: karakas@kou.edu.tr

Anahtar sözcükler: Sonlu Elemanlar Yöntemi, Anahtarlama Relüktans Motor, Manyetostatik Analiz

ABSTRACT

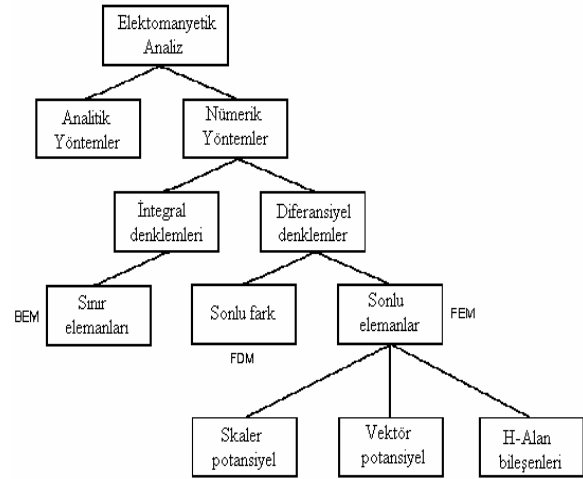
Phase inductance in Switched Reluctance Motor (SRM) which changes according to rotor position and excitation current, determines dynamic performance of motor [1]. In this paper, working characteristics which defines dynamic performance of 6/4 poles high power SRM is estimated with Finite Element Method (FEM). Analyses have been performed with FEM based packed software programme named Maxwell 2D. Flux, inductance and torque characteristics which have vital importance to achieve dynamic model of SRM and to control SRM successfully, are obtained and presented with detailed graphics.

1. GİRİŞ

Elektrik mühendisliğinde transformatör, motor, jeneratör gibi elektrik makinelerinde manyetik alan dağılımının ve manyetik alana ilişkin büyüklüklerin belirlenmesi için analog veya sayısal yöntemler kullanılabilir. Analog yöntemlerin zorlukları ve yetersizlikleri sayısal yöntemlerle aşılabılır. Manyetik alan problemlerinin çözümünde farklı sayısal yöntemlerden yararlanır. Bunlardan bazıları; Sonlu Farklar Yöntemi, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Monte Carlo Yöntemi, Sınır Elemanları Yöntemi, Yük Benzetim Yöntemidir. En fazla kullanılan sayısal yöntemlerden birisi de Sonlu Elemanlar Yöntemidir (SEY). Şekil-1'de Elektromanyetik analiz yöntemleri gösterilmektedir [2].

SEY, fiziksel matematiğin sınır değer problemlerine yaklaşık çözümler üretmek için kullanılan bir sayısal yöntemdir. Yöntem yaklaşık kırk yıllık bir geçmişe sahiptir. İlk olarak 1940'lı yıllarda önerilmiş 1950'li yıllarda uçak tasarımında kullanılmaya başlanmıştır. Bundan sonra, yöntem geliştirilmiş ve yapı analizi ile ilgili problemlere çok yaygın olarak, diğer alanlardaki problemlere de daha az yaygın olarak uygulanmıştır. Günümüzde 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 [3].



Şekil-1. Elektromanyetik analiz yöntemleri

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 [4].

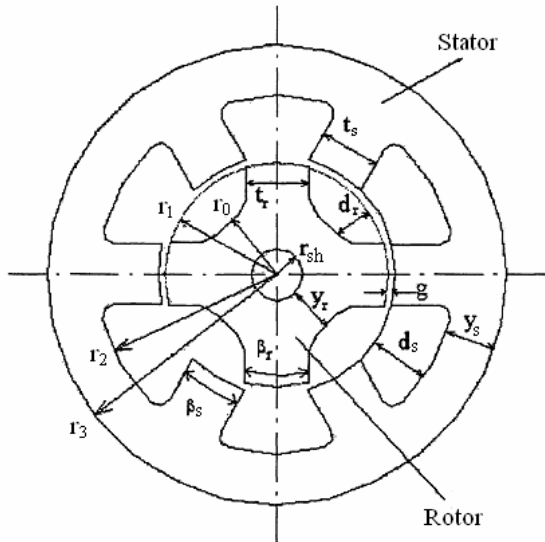
ARM gibi karmaşık elektrik sistemlerinin dinamik davranışına ilişkin benzetim çalışmaları daima dikkate değer bir öneme sahiptir. Tasarımcı bu benzetimler aracılığıyla sistemin davranışını geniş çalışma sınırları içinde tahmin edebilmektedir. Sistem performansını en iyi hale getirmek için denetim parametreleri herhangi bir anda kolayca ayarlanabilmektedir.

2. MANYETOSTATİK ANALİZ

Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi ile kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip anahtarlı relüktans motorunun çalışma karakteristikleri elde edilmektedir. Sonlu Elemanlar Yöntemini ARM'na uygulamak amacıyla ANSOFT şirketi tarafından ticari bir yazılım olarak hazırlanan Maxwell 2D sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır. Bu program Maxwell denklemlerini kullanarak manyetik analizleri gerçekleştirmektedir. Manyetik analiz yazılımı iki boyutlu manyetostatik çözüm yapmakta ve doğrudan sargının halkaladığı akıyı hesaplayabilmektedir. Rotor pozitif moment bölgesinde, karşılıklı konumdan ortalanmış konuma kadar farklı ara konumlarda sabit tutulmakta ve her bir konumda farklı akım değerleri için manyetik analiz hesaplamalarıyla $\lambda(i,\theta)$ değişimi belirlenmektedir. Örneğin, üç fazlı (6/4) motor için ($0^\circ \dots 45^\circ$) aralığında 10 adet rotor konumu ve (15A...255A) aralığında 17 adet akım değeri için toplam 170 adet farklı hesaplama ile motora ilişkin $\lambda(i,\theta)$ değişimi belirlenmektedir. Yapılan analizler iki boyutludur ve gerçek motorda sargı başlarında oluşan kaçak akıları hesaba katmamaktadır. Dolayısıyla iki boyutlu alan analiziyle elde edilen halkalama akısı sonuçlarıyla gerçek motordaki halkalama akısı arasındaki farkın bilinmesi önemlidir (Krishnan ve diğ. 1988, Lawrenson ve diğ. 1980).

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-2'de gösterilmektedir (Shyam 2001).



Şekil-2. ARM'nun kesit görünüşü ve boyutları

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

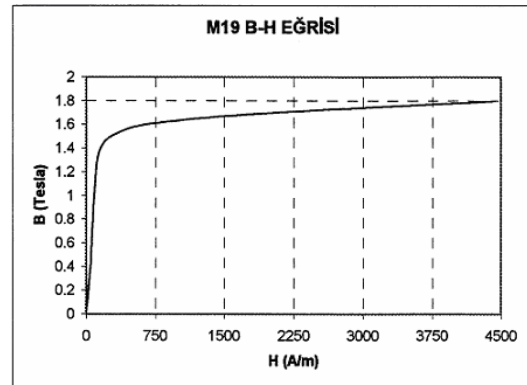
Tablo-1. Kullanılan ARM'nun geometrik boyutları

Parametre Adı	Sembol	Değeri
Stator kutup yüksekliği	d_s	0,0265
Rotor kutup yüksekliği	d_r	0,0447
Motor derinliği	m_d	0,2981
Hava Aralığı	g	0,0020
Stator kutup genişliği	t_s	0,07816
Rotor kutup genişliği	t_r	0,08214
Stator kutup sayısı	N_s	6
Rotor kutup sayısı	N_r	4
Stator boyunduruk kalınlığı	y_s	0,0546
Rotor boyunduruk kalınlığı	y_r	0,0575
Rotor boyunduruk yarıçapı	r_0	0,1043
Rotor kutup yarıçapı	r_1	0,1490
Stator iç boyunduruk yarıçapı	r_2	0,1775
Stator dış boyunduruk yarıçapı	r_3	0,2321
Mil yarıçapı	r_{sh}	0,0468
Stator kutup açısı	β_s	30
Rotor kutup açısı	β_r	32

Tablo-2. Kullanılan ARM'nun etiket değerleri

Parametre	Değeri
Maksimum güç (P_{max})	34 KW
Sürekli güç (P_c)	23 KW
D.A. gerilim (V_{da})	300 V
Nominal hız (V_{nom})	1200 d/dk
Maksimum hız (V_{max})	6000 d/dk

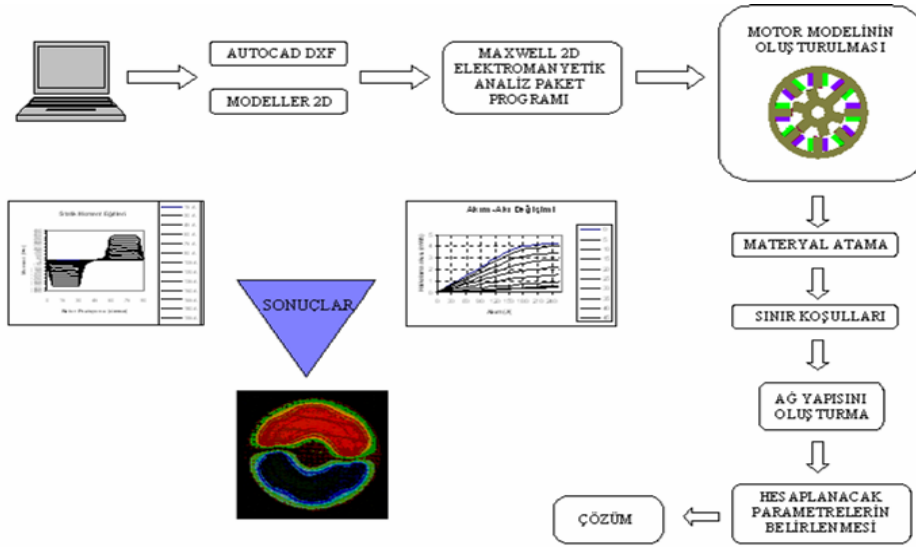
Rotor ve Stator gövdesi doymuş saç malzemeden (M19) yapılmış olup malzemenin B-H eğrisi Şekil-3'de gösterilmektedir. Eğri incelendiğinde ARM'nun lineer olmayan bir malzeme karakteristiğine sahip olduğu görülmektedir. Bu karakteristiğin hatasız olarak tanımlanması, ilerleyen kısımlarda motorun davranışlarını doğru bir şekilde elde etmek için son derece önemlidir.



Şekil-3. Motorda kullanılan malzeme için B-H eğrisi

Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Elektromanyetik alan problemleri çözümlenirken farklı aşamalarda işlemler gerçekleştirilerek bir bütün halinde model oluşturulur. Bu aşamalar Şekil-4'de gösterilmektedir.

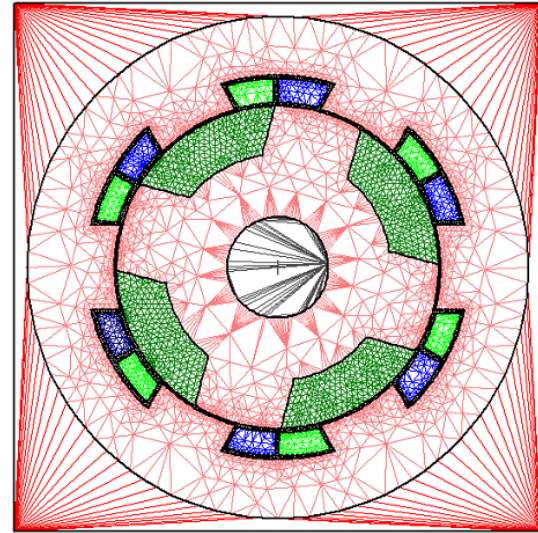


Şekil-4. Program akış şeması

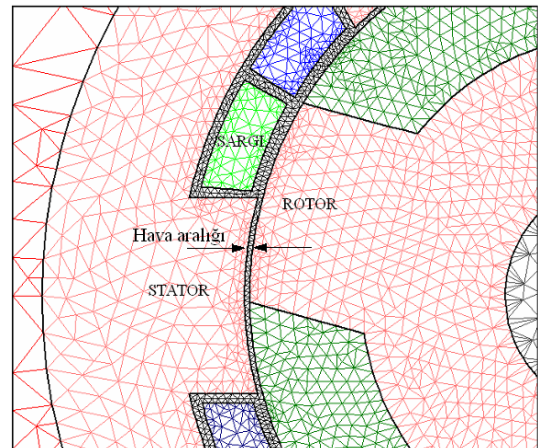
Geometrinin modellenmesi aşamasında motorun geometrisi ölçülerine uygun olarak oluşturulmuştur. Maxwell 2D programının bir alt programı olan 2D Modeler bu iş için kullanılmaktadır. Ayrıca Maxwell 2D herhangi bir CAD programı ile çizilen IGES/DXF uzantılı dosyaları da tanımaktadır. Model geometrisi çizildikten sonra modelde kullanılan malzeme tipleri tanımlanmalıdır. Bunun için programın içinde yer alan kütüphaneden tanımlanacak malzeme seçilerek materyal atama işlemi gerçekleştirilir. Eğer atanacak materyal kütüphane içinde yoksa malzemenin B-H karakteristiği tanımlanarak program kütüphanesine ilave materyal eklenebilmektedir.

Model oluşturulurken, Şekil-5 ve Şekil-6'dan görüldüğü gibi, gerek sargılarda gerekse stator ve rotor kutup uçlarında stator ve rotor kutup uçlarına göre, daha seyrek elemanlar kullanılmaktadır. Kutup uçlarına doğru gittikçe daha sıklaşan elemanlar stator ve rotor kutup uçlarına gelindiğinde en sık ve en yoğun halini almaktadır. Çünkü bu noktalar yüksek hassasiyet gerektiren noktalar. Sonuçların en iyi şekilde elde edilmesi için akı çizgilerinin yoğun olduğu bölgelerin çok iyi modellenmesi gerekmektedir. Bilhassa stator ve rotor kutup uçlarında ve hava aralığında çok sayıda eleman kullanılarak modelin hassasiyeti artırılmalıdır [5]. Ayrıca makine hava aralığındaki relüktans değişiminden moment ürettiği için bu bölgenin katlı bölge olması statik sonuçların daha iyi olmasını sağlayacaktır.

Çözümün her aşamasında rotor 5 derece döndürülmüştür ve bu konumda sabit akım altında motor parametreleri belirlenmiştir. Manyetik alan çözümlerinden genel olarak kuvvet, moment, kayıplar, endüktans ve akı parametrelerini hesaplamak mümkündür. Bunların dışında akı yoğunluğu, akı çizgileri, manyetik alan şiddeti gibi dağılımlar da model üzerinde görülebilmektedir.



Şekil-5. ARM'nun SEY ile modellenmiş hali

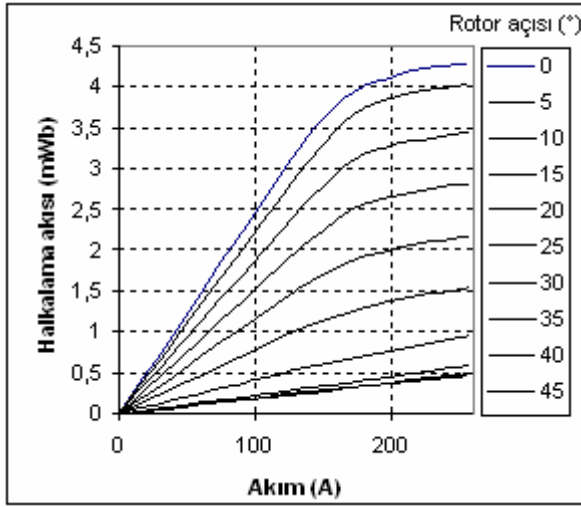


Şekil-6. Hava aralığı ve kullanılan elemanlar

ARM'nun çalışma karakteristiklerinin elde edilişi

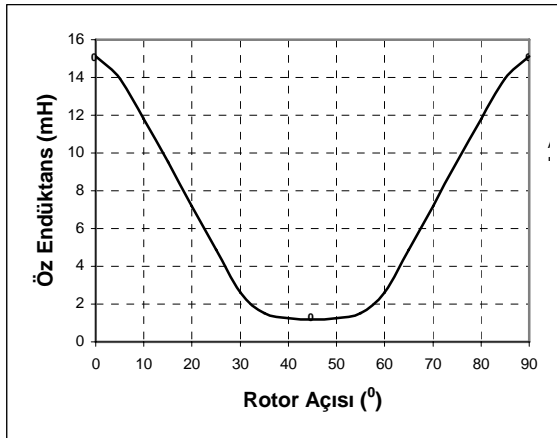
Çalışma karakteristiklerinden ilk önce akı karakteristiği incelenmiştir. Daha sonra ARM'nun endüktans ve moment karakteristiği incelenmektedir.

Motorun çalışma karakteristikleri elde edilirken nominal çalışma akımı olan 165 amperin altındaki ve üstündeki akım değerleri için çözümler yapılarak doymanın olduğu ve olmadığı durumlarda motor karakteristikleri incelenmektedir. Şekil-7’de ARM’na ait halkalanma akısı-akım değişimi gösterilmektedir. Analiz yapılırken motorun faz akımı 0-255 amper arasında 15’er amperlik artımlarla artırılmıştır ve bu akımlara karşılık gelen halkalama akılarına bakılmıştır. 0°- 45° arasındaki akı verileri 45°-90° arasındaki veriler dikey eksene göre simetrik olduğundan analizlerin 0°- 45° arasında yapılması yeterli olmaktadır. Şekil-7’den doymanın 165 A civarında başladığı görülmektedir. Akı karşılıklı konumda (0°) en büyük değerini almaktadır.



Şekil-7. ARM'nun halkalanma akısı-akım eğrisi

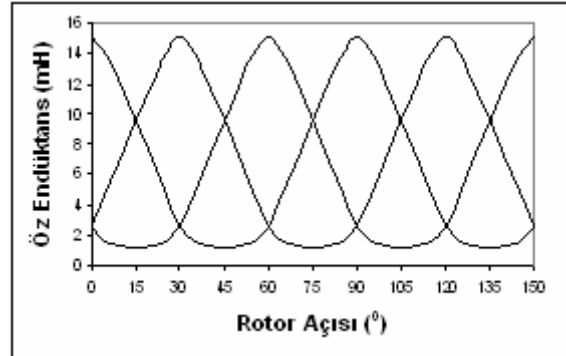
Şekil-8’de ARM’nun öz endüktans eğrisi gösterilmektedir. Endüktans eğrisi en büyük değerini karşılıklı konumda, en küçük değerini ise ortalanmış konumda almaktadır. Motorun pozitif moment ürettiği artan endüktans bölgesi yaklaşık 55° ile 90° arasındaki bölgedir. Eğer bu bölgenin sonunda fazın enerjisi kesilmezse motor negatif moment üretir.



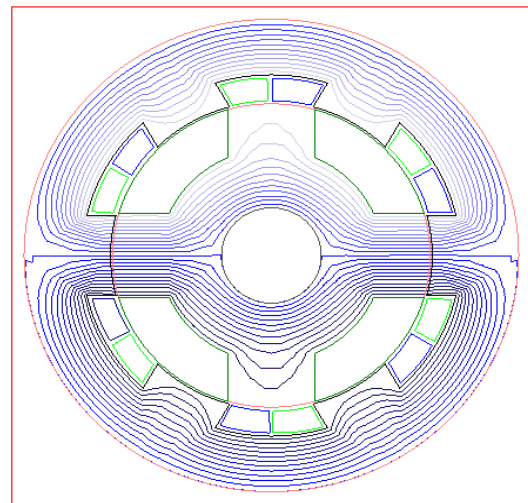
Şekil-8. ARM bir faz öz endüktans eğrisi (165A)

6/4 kutuplu AR 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-9’da görülmektedir.

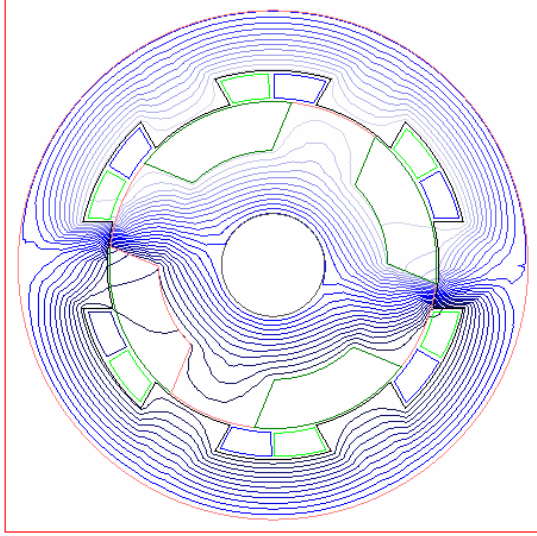
Stator ve rotor konumuna bağlı olarak endüktansla birlikte akı yolu da değişmektedir. Bu durum makinenin tasarım kısmında dikkate alınan önemli göstergelerden biridir. Bilindiği gibi karşılıklı konumda öz endüktans değeri en büyük değerine ulaşmaktadır. Şekil-10’da karşılıklı konuma ait akı haritası gösterilmiştir. Akının tamamının rotor ve stator kutup uçlarından, rotor ve stator boyunduruklarından geçerek düzgün bir şekilde devresini tamamladığı görülmektedir. Şekil-11’de rotor konumunun karşılıklı konumdan ayrılırken ara konumuna ait akı haritası gösterilmektedir. Bu akı haritasında, akının artık kutup köşelerine yığıldığı ve akı düzeninin kısmen bozulduğu görülmektedir. Öz endüktans değeri düşmeye başlamıştır. Şekil-12’de ise 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.



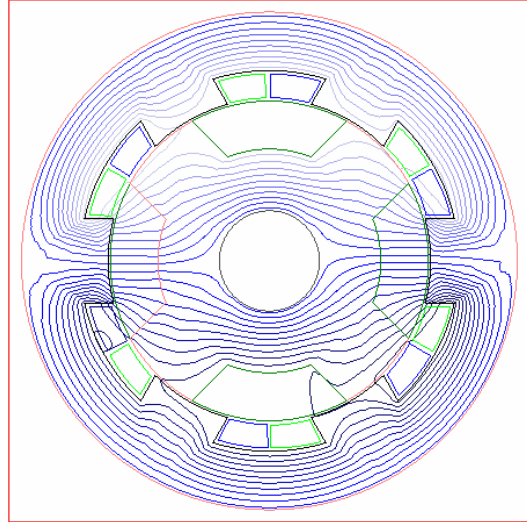
Şekil-9. ARM üç fazlı öz endüktans değişimi (165 A)



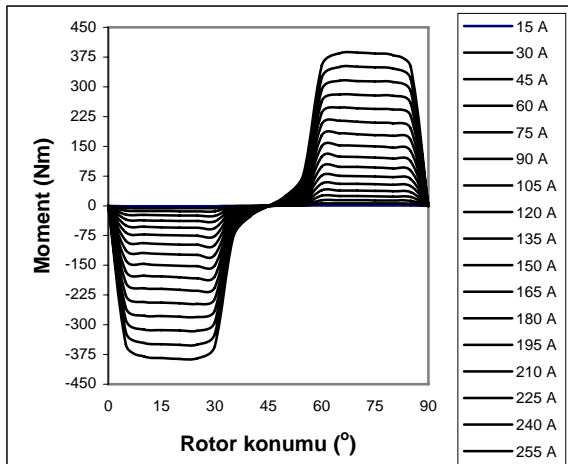
Şekil-10. ARM akı haritası (karşılıklı konum, 90 °)



Şekil-11. ARM akı haritası (ara konum, 22,5 °)



Şekil-12. ARM akı haritası (ortalınmış konum, 45 °)



Şekil-13. ARM statik moment eğrileri

Analizler sonucunda elde edilen bir faza ait statik moment eğrileri Şekil-13'de gösterilmektedir. Daha önceden belirtildiği üzere öz endüktansın değişim oranı ve akımın karesi moment ifadesini oluşturan bileşenlerdir. Moment eğrilerinin, stator ve rotor kutuplarının karşılıklı olduğu (0° ve 90°) konumda ve ortalınmış konumda (45°) yön değiştirdiği görülmektedir.

3. SONUÇ

Bu çalışmada Sonlu Elemanlar Yöntemi ile klasik Anahtarlama Relüktans Motorunun çalışma karakteristikleri elde edilmektedir. Elde edilen verilere bakıldığında Sonlu Elemanlar Yönteminin ARM gibi karmaşık geometriye ve doğrusal olmayan karakteristiğe sahip elektrik makinalarının karakteristiklerinin elde edilmesinde başarılı bir şekilde uygulanabileceği sonucuna varılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] SRINIVAS, K.N. and ARUMUGAM, R., 2002. Finite Element Analysis Combined Circuit Simulation of Dynamic Performances of Switched Reluctance Motors. Electric Power Components and Systems, pp. 1033-1045.
- [2] ANSOFT CORP., 2001. Introduction to the Finite Element Method. Training Seminar for Maxwell 2D/3D and EMSS.
- [3] GARİP, M., 2002. Tam Kutup Adımlı Anahtarlama Relüktans Motorun Kutup Başlarını şekillendirerek Moment Dalgalılığının İyileştirilmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [4] ZHOU, P., STANTON, S. and ZOLTAN, J. C. Dynamic Modeling of Electric Machines. Ansoft Corporation, Pittsburg.
- [5] YILMAZ, K., 2004. Anahtarlama Relüktans Motorunun Sargı Yapısı Değiştirilerek Moment Performansının İyileştirilmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi.