

PARAMETRİK ÜÇ BOYUT TABANLI HESAPLANMIŞ FAZ DİRENÇLERİNE SAHİP KISA KUTUP VE TAM KUTUP ADIMLI AR MOTORLARININ PERFORMANS ANALİZİ

Kadir YILMAZ ve Serkan SEZEN

Elektrik Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Umuttepe 41380, Kocaeli
kavel@kou.edu.tr, serkansezen@kou.edu.tr

(Geliş/Received: 07.02.2007; Kabul/Accepted: 02.04.2008)

ÖZET

Bu makale, klasik anahtarlamalı relüktans motor (ARM) ile karşıt kuplajlı ARM (KKARM)' nun eşit bakır kayıpları altında karşılaştırmalı performans analizlerini sunmaktadır. Her iki motor için faz başına bakır sargı hacmi ve faz direnci, üç boyutlu parametrik SOLIDWORKS analizleri temel alınarak hesaplanmaktadır. Öngörülen metot, makinenin imal edilmesinden önce tasarımcının faz direncini yüksek doğrulukta tahmin edebilmesine ve her iki motorun eşit şartlar altında karşılaştırılmasına imkân vermektedir. Eşit bakır kayıpları için klasik ARM ve karşıt kuplajlı ARM' lere ait manyetik karakteristikler Maxwell 2D SEY program ile çıkarılarak sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Anahtar kelimeler: Kısa kutup adimli ARM, Tam kutup adimli ARM, Sargı sonu etkisi, Unipolar uyarma.

PERFORMANCE ANALYSIS BETWEEN SHORT PITCHED AND FULLY PITCHED SR MOTORS WITH COMPUTED PHASE RESISTANCE VALUE BASED ON 3-D PARAMETRIC DESIGN

ABSTRACT

This paper presents comparative analysis between conventional switched reluctance motor (SRM) and mutually coupled SRM (MCSR) for equal copper losses. Copper winding volume and electrical resistance per phase are calculated based on SOLIDWORKS analysis. The proposed method will enable the designers to accurately estimate the phase resistance ahead of the machine construction. In the final part, electrical and magnetic characteristics of both machines are compared based on MAXWELL 2D results.

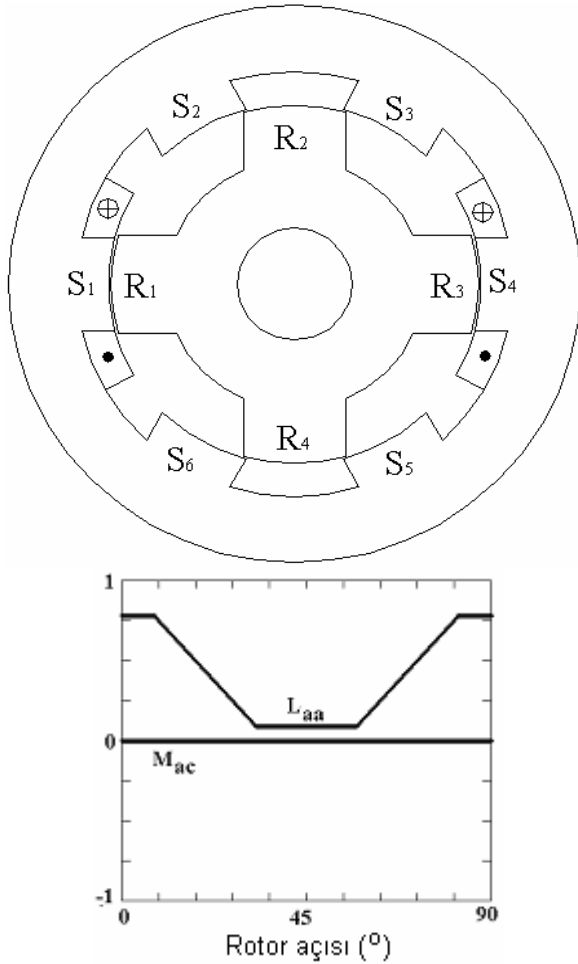
Keywords: Short pitched SRM, fully pitched SRM, end winding effect, unipolar excitation.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv, evsel uygulamalar ve uzay endüstrisi gibi çeşitli uygulamalar için Anahtarlamalı Relüktans Motorlara gün geçtikçe artan bir ilgi uyanmaktadır. Geniş sınırlar içinde yüksek moment çıkışı, değişen çalışma koşullarına karşılık kararlı çalışma ve düşük bakım masrafı, ARM nun diğer elektrik makinelerine göre en önemli avantajlarıdır. Diğer yandan, yüksek moment dalgalanması, akustik gürültü, rotor algılayıcı gereksinimi ARM nun görülen en temel dezavantajlarıdır. ARM çift çıkıntılı yapıya sahiptir ve sadece statorda sargı bulunmaktadır. Rotorda herhangi bir sargı bulunmamaktadır. Klasik sargı yapısında, sargılar tek bir stator kutbunun etrafına

sarılmaktadır. Son 10 yıl içinde araştırmacılar, klasik ARM nun güç yoğunluğunu arttırmak için çeşitli sargı yapıları öne sürmüşlerdir. Bu öne sürülen yaklaşımlardan biri de, faz sargıları arasındaki karşıt endüktans elektromekanik enerji dönüşümünü sağlamak için kullanmak olmuştur. Bu yaklaşımın tek yapısal farkı faz sargılarının birkaç stator kutbu etrafına sarılmasıdır. Sargıların bu genişliği sebebiyle bu tür motorlar tam adım sargılı ARM olarak adlandırılmaktadır.

Şekil 1, bir fazın iletimi durumunda kısa adimli sargı yapısını ve rotor pozisyonu ile endüktans değişimini göstermektedir.

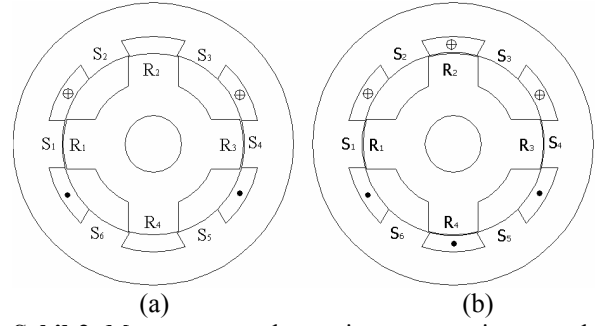


Şekil 1. Klasik ARM nin geometrisi ve uyarma yapısı (Geometry and excitation of conventional SRM)

Klasik ARM de fazlar tam olarak birbirinden bağımsızdır. Bu yüzden moment sargı öz endüktansındaki değişimin oranına bağlı olarak üretilmektedir. Bu durum, bir yarım elektriksel periyotta, her bir fazın pozitif moment üretimine katkısını etkin bir biçimde sınırlamaktadır. Eğer aynı motor tam adım sargılar ile sarılırsa, yeni yapının, momenti unipolar uyarım yapısını bozmadan ve tamamıyla fazlar arasındaki karşılıklı endüktansdaki değişiminin bir sonucu olarak ürettiği görülebilir. Klasik ARM ile karşılaştırıldığında bu yapı, her bir fazın en azından yarım veya 1/3 periyot boyunca pozitif moment üretimine katkıda bulunmasına imkan vermektedir ve dolayısıyla motor sürücü devresinden daha fazla yararlanmayı sağlamaktadır. Böylece verilen sargı yapısı için önemli derecede moment artışı olacağı tahmin edilmektedir.

Şekil 2a, iki fazın iletim durumunda unipolar uyarılmış tam adım sargı yapısına sahip ARM nu göstermektedir. Şekil 2b ise üç fazın iletimi durumunda bipolar uyarılmış tam adım sargı yapısına sahip ARM nu göstermektedir.

Karşıt kuplajlı ARM de kullanılan sargı yapısında kullanılan uyarma yaklaşımına bağlı olarak pozitif moment üretim mekanizması farklılık arz etmektedir. Unipolar sürücü devre tam adım sargı yapısına sahip



Şekil 2. Manyetomotor kuvveti ve momenti arttırmak için iki farklı yol (Two possible ways of increasing the MMF and torque capability)

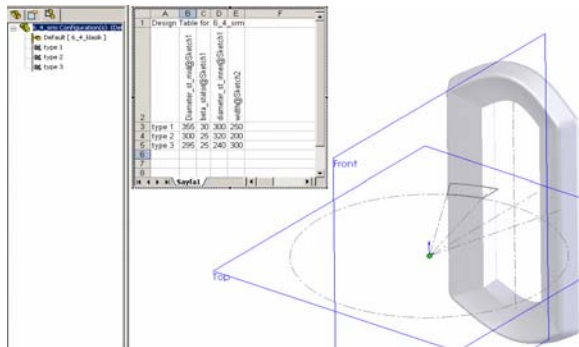
ARM nu sürmek için kullanılabilir ve bu tür uygulama Barras ve diğ. [5] de açıklanmaktadır. Unipolar faz akımlarını besleyen bir sürücü devre kullanılarak sargı akımı şekil faktörü artırılabilir ve moment dalgalanması azaltılabilir. Tam adım sargı yapısına sahip makine asimetrik yarım köprü devre üzerinden çalıştırıldığında bir anahtarlama elemanının görev çevrimi en fazla 2/3 periyot olmaktadır. Çünkü her bir faz elektriksel periyodun 2/3 ü boyunca uyarılmaktadır. Bu durum asimetrik yarım köprü evirici ile sürülen makine için ana sakıncayı teşkil etmektedir. Motor sürücü devresinden daha fazla faydalanılmasına bağlı olarak makinenin verimi Denklem 5 den anlaşılacağı üzere önemli miktarda artmaktadır. Böylece aynı momenti %45 daha düşük akımla verebilen KKARM nin elektriksel devreyi daha verimli kullandığı anlaşılmaktadır. Fakat anahtarlama elemanları üzerindeki iletim ve anahtarlama kayıpları iki katına çıkmaktadır.

Makine modellemede sargı sonu etkisi çok önemli bir konudur ve performans tahmin ederken dikkate alınmalıdır. Kısa adım ARM' de doğal olarak tam adım ARM' ye göre daha az sargı sonu etkisine sahiptir. Sargı sonunun daha uzun olması sargı direncinin daha fazla oluşunu beraberinde getirir ve bu durum motorun elektromekanik performansı ile birlikte termal performansını da etkiler. Bu makale, kısa adım ARM ile uzun adım ARM yi sargı sonu etkisi açısından karşılaştırmak amacıyla bir yaklaşım sunmaktadır. Bizim amacımız sargı sonu etkisini Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ve Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) kullanarak modele yansıtmaaktır. Bu amaçlara yönelik, iki tip ARM için faz direnci hesabının nasıl yapıldığı Bölüm 2' de sunulmaktadır. Bölüm 3' de, her iki makine tipinin sonlu elemanlar modeli ve performans şekilleri ele alınmaktadır. Bölüm 4' de SEY sonuçları karşılaştırılmaktadır.

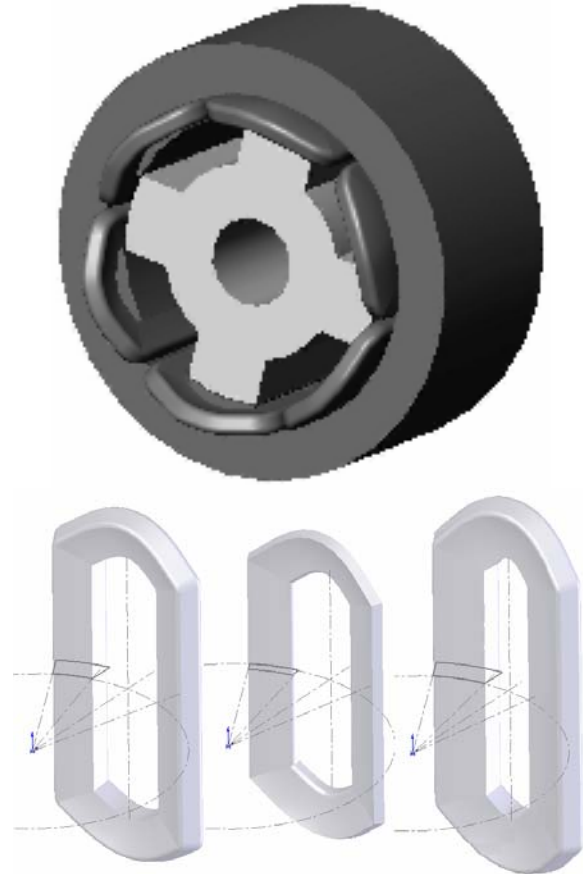
2. KISA VE TAM KUTUP ADIMLI AR MOTORLARIN FAZ DİRENÇLERİNİN PARAMETRİK CAD MODEL KULLANARAK HESAPLANMASI (CALCULATION OF PHASE RESISTANCE VALUES WITH SHORT-FULLY PITCHED SRM USING PARAMETRIC CAD MODEL)

Klasik ARM den farklı olarak KKARM de sargı yapısı yerleştirildiği oluğun tamamını kaplar. Bu iki motor tipinde sargı sonu etkisinden dolayı sargı uzunlukları farklı olacağından, faz direncindeki artış miktarı analiz sırasında hesaba katılmalıdır. Makinelere ait fiziksel boyutlarının değişmemesi gerektiğinden her iki makine de aynı manyetik çalışma koşulları altında veya eşit bakır kayıpları olacak şekilde çalıştırılmalıdır. Faz başına bakır sargı hacmi her iki makine için makinelere ait üç boyutlu parametrik SOLIDWORKS™ modeli kullanılarak hesaplanmaktadır. Elde edilen sonuçlar faz direncinde meydana gelen değişimleri tahmin etmek için kullanılmaktadır. Faz direncindeki artışın sadece motor imalinden sonra tahmin edilebildiği önceki metotlara [2,3] kıyasla bu makalede geliştirilen bu metot, tasarımcıya makine imalinden önce faz direncini yüksek doğrulukla tahmin etme imkânı sağlamaktadır. Diğer yandan günümüzde profesyonel elektrik motoru tasarımı amacıyla hazırlanmış, 3D yazılımlar (Magnet 3D, Flux 3D, Maxwell 3D) mevcut olup faz direnci bu yazılımlar kullanılarak da hesaplanabilir. Sargı hacmindeki değişimlerin hesaplanması için SOLIDWORKS ün 3 boyutlu parametrik katı modelleme programından faydalanılmaktadır. Bu metotta bir kılavuz çizgi ve gövde iskeletini oluşturmak için kılavuz bir çizgi boyunca uzanan çeşitli kesitler belirlenmesi gerekmektedir. Birinci adımda, kesitlerin üzerine yerleştirileceği çeşitli açılardaki düzlemler oluşturulmaktadır. Daha sonra, sargı çapına ve sipir sayısına bağlı olarak bir kesit şekillendirilmekte ve sonra yörünge üzerindeki dilimleri temsil edecek bir şekilde düzlemlere yerleştirilmektedir. Her bir sargı hacmi oluşturulurken motora ilişkin 4 parametre tanımlanmaktadır ve modeldeki kısıtlıklar, Şekil 3 de gösterilen bu 4 parametreye dayalı olarak türetilmektedir. Bu parametreler stator orta çapı, stator iç çapı, stator kutup açısı ve statorun eksensel uzunluğudur.

Parametrik CAD programlarında istenen ölçüler ve



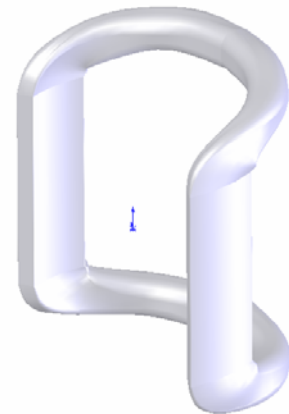
Şekil 3. Üç tip ARM modeli için tasarım tablosu (Design table structure for three types of a SRM model)



Şekil 4. Kısa adımlı ARM sargı yapısına ait üç boyutlu katı modeller (3D Solid models for the short pitched SRM winding structure)

parametreler “Design Table” fonksiyonu kullanılarak bir EXCEL dosyasına transfer edilmektedir ve belirli ayarlamalardan sonra Şekil 5 de gösterildiği gibi, bir modelden birkaç model üretmek mümkün olmaktadır. Bu çalışmada bu metot ile ilk ARM e KKARM den farklı boyutlarda yeni modeller oluşturulmuştur. Böylece kullanıcılar istenilen sargı tipini seçebilirler ve Tasarım tablosu içinde yer alan parametrelere yeni değerler girerek yeni sargı geometrisini kolayca

	A	B	C	D	E	F
1	Design Table for B_4_mcsrm					
2		Diameter_st_mid@Sketch1				
3		beta_stator@Sketch1				
4		diameter_st_inner@Sketch1				
5		width@Sketch2				
6		type 1	355	30	300	250
7		type 2	300	25	320	200
8		type 3	295	25	240	300
9		type 3	295	25	240	300
10		type 3	295	25	240	300



Şekil 5. Üç tip KKARM modeli için tasarım tablosu (Design table structure for three types of MCSR model)



Şekil 6. Tam adımlı ARM sargı yapıları için üç boyutlu katı modeller (3D solid models for the fully pitched SRM winding structures)

oluşturabilirler. Bu sayede klasik ARM, karşıt kuplajlı ARM olarak sarıldığında parametrik model ile sargı hacmindeki artışı kolay bir şekilde hesaplanabilir. Şekil 6, çeşitli KKARM ler için sargı yapılarını göstermektedir.

Programın Kütle Özellikleri (Mass Properties) komutu kullanılarak farklı geometriler için nümerik hesaplamalar yapılmaktadır. Bu hesaplamaların sonucunda, klasik ARM sargısı ile KKARM sargısı arasında %59-%62 oranında bir hacim artışı olduğu

Tablo 1. ARM ve KKARM için faz başına hesaplanan sargı hacimleri (Copper winding volume per phase calculated for both SRM and MCSRM)

	Sargı sayısı	Her bir sargı için hacim (mm ³)	Toplam hacim (mm ³)
Klasik ARM	6	658,4	3950,4
KKARM	3	2106,43	6319,29
% Hacim			59

gözlenmektedir. Tablo 1 de, Kısa adımlı ARM ile tam adımlı ARM sargı hacimleri karşılaştırılmalı olarak gösterilmektedir. Bu artış, direnç sargı uzunluğu ile orantılı olacağından sabit bir oluk alanındaki direnç değerine ve doluluk oranına da yansiyacaktır.

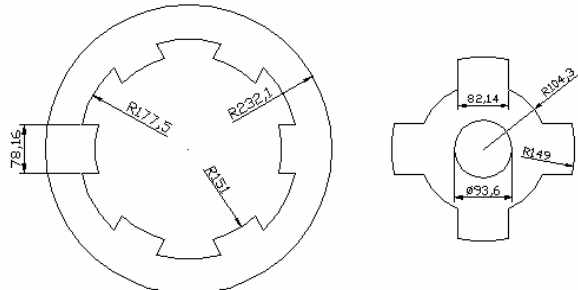
3. KISA ADIM VE UNİPOLAR UYARTIMLI TAM ADIMLI ARM LERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK MANYETOSTATİK ANALİZİ (MAGNETOSTATIC ANALYSIS OF SHORT PITCHED AND UNIPOLAR EXCITED FULLY PITCHED SRMs BY USING FINITE ELEMENT METHOD)

Bu bölümde kısa adımlı ve uzun adımlı ARM lerin SEA (Sonlu Elemanlar Analizi) ele alınmaktadır. İki boyutlu SEY modelleri 4000 eleman ve 14000 ağ (mesh) dan oluşmaktadır. ARM lerin doğrusal olmayan manyetik modelinin oluşturulması ve çözümünün gerçekleştirilmesi için sonlu elemanlar analiz programı olan Maxwell 2D kullanılmıştır. Moment profilini ve manyetik karakteristiği elde etmek için, rotor pozisyonunun her 5° artışında, 15 – 250 A arasındaki çeşitli akım seviyeleri için kısa adımlı ARM nin SEY ile analizleri yapılmıştır. Aynı akım aralığı ve rotor konumları için benzer bir çalışma tam adımlı ARM için de yapılmıştır. Tam adımlı ARM de artan sargı sonu etkisine bağlı olarak sargı direnci artmaktadır ve daha fazla bakır kayıpları olacağı tahmin edilmektedir. Dirençte hesaplanan artış % 60 civarındadır.

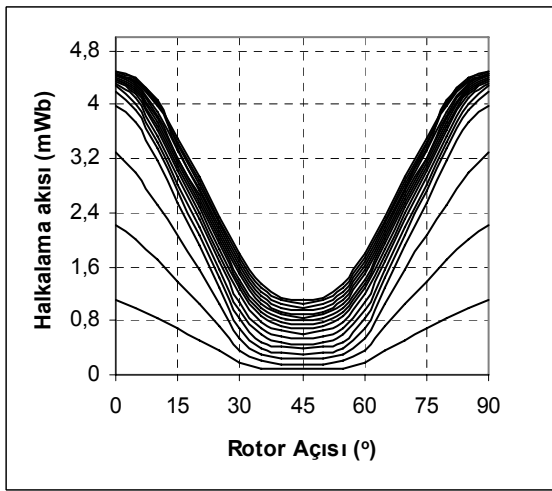
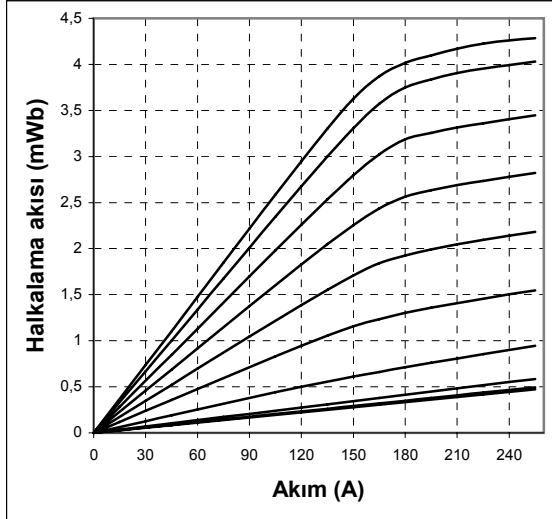
3.1. Kısa Adımlı ARM'nin Analizi (Analysis of Short Pitched SRM)

Şekil 7 de üç fazlı ARM yapısı gösterilmektedir. Nüve saç paketinin uzunluğu 298,1 mm dir ve M19 saç levhalardan oluşmaktadır. Stator ve rotor 6/4 çıkıntılı kutup yapısına sahiptir. Motor maksimum gücü ve gerilimi sırasıyla 34 KW ve 300 V dur. Kısa adımlı ARM nin çalışma karakteristikleri maksimum motor akımına kadar gerçekleştirilen SEA ile elde edilmektedir.

Verilen ARM için akılar Şekil 8 de gösterildiği gibi tüm çalışma noktalarını kapsayacak biçimde bir biçimde hesaplanabilir. Şekil 8' den doymanın 165 A

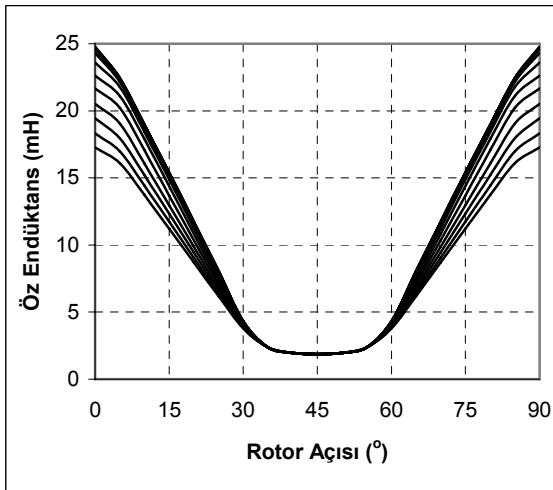


Şekil 7. Kısa adımlı ve uzun adımlı ARM lerin geometrik yapıları (Construction of short pitched and fully pitched SRMs)

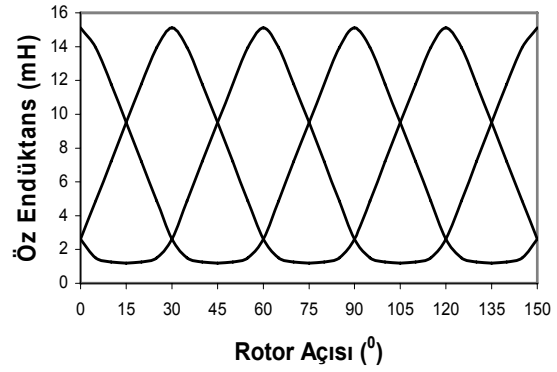


Şekil 8. Kısa adımlı ARM için akı eğrileri (Plot of flux linkages of short pitched SRM)

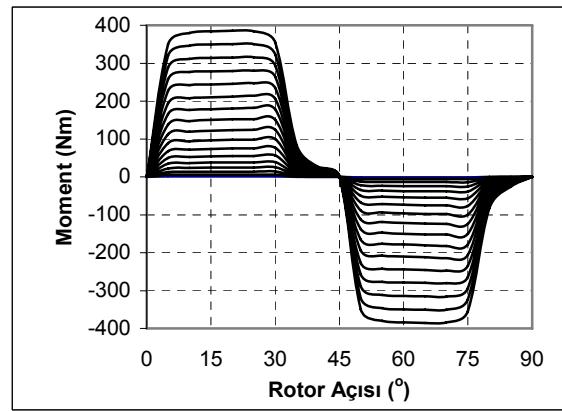
civarında başladığı görülmektedir. Bu akımdan daha düşük akımlar doğrusal bölgede yer almaktadır. Akı karşılıklı konumda ($\theta = 0^\circ$) en büyük değerini almaktadır. Şekil 9 klasik ARM için rotor pozisyonuna göre



Şekil 9. Kısa adımlı ARM için endüktans eğrileri (Plot of self inductance of short pitched SRM)



Şekil 10. Kısa adımlı ARM için üç faz öz endüktans eğrileri (Variation of self inductance in SRM)



Şekil 11. Kısa adımlı ARM için moment eğrileri (Torque profiles of short pitched SRM)

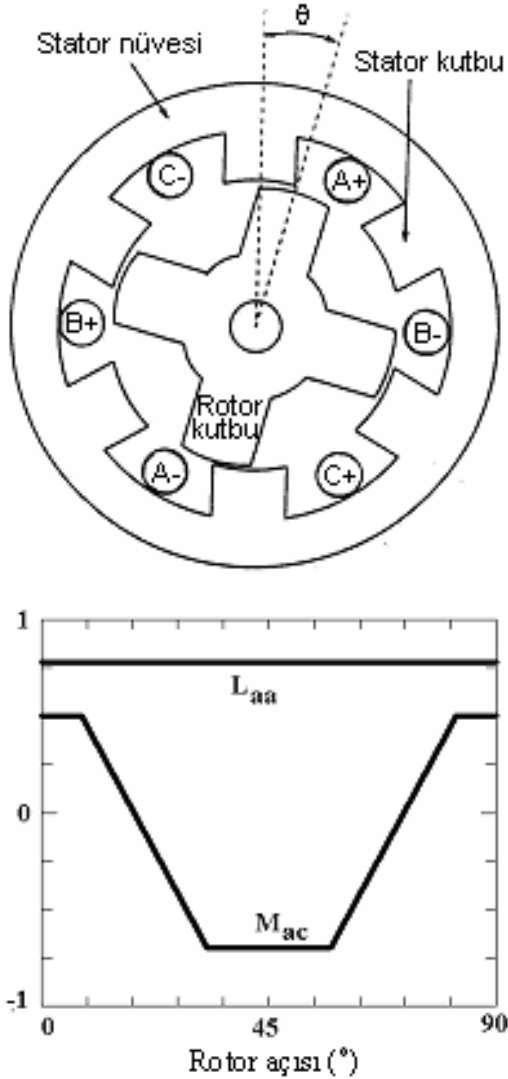
değişen öz endüktansın değişimini temsil etmektedir. Motorun pozitif moment ürettiği artan endüktans bölgesi yaklaşık 55° ile 90° arasındaki bölgedir. Eğer bu bölgenin sonunda fazın enerjisi kesilmese motor negatif moment üretir.

Şekil 10'dan, bir fazın endüktans eğrisi en yüksek seviyesinde iken diğer ikisinin en düşük seviye olduğu görülmektedir. Doğrusal bölgede endüktans eğrisi sabit bir akı değerine karşılık $L = f(\theta)$ şeklinde sadece rotor pozisyonunun bir fonksiyonudur. Diğer yandan doymuş bölgede ise öz endüktans $L = f(i, \theta)$ şeklinde hem akımın hem de rotor konumunun fonksiyonudur.

Statik moment eğrileri çeşitli rotor konumları ve akım seviyeleri için gerçekleştirilen SEA ile Şekil 11 de görüldüğü gibi elde edilebilir.

3.2. Unipolar Uyarımlı Tam Adımlı ARM'nin Analizi (Analysis of Unipolar Excited Fully Pitched SRM)

Şekil 12, herhangi bir anda en az iki fazı beraber enerjilendirilmesi gereken karşıt kuplajlı anahtarlamalı relüktans motor (KKARM) yapısını göstermektedir. Rotor hareket ettikçe bir fazın öz endüktans değeri sabit kalmaktadır. Bu sabit değer



Şekil 12. Karşit kupaçlı ARM geometrisi ve sargı yapısı (MCSR structure showing stator-rotor lamination geometry and winding configuration)

karşılıklı konumdaki endüktans değerine eşittir. Öz endüktans rotor konumundan bağımsız olduğundan, moment sadece fazlar arasındaki karşit endüktansların değişimi ile üretilmektedir [3,4].

KKARM nin her fazı elektriksel momentin üçte ikisi boyunca moment üretimine katkıda bulunmaktadır. Bu durum motor sürücü devrenin daha verimli kullanılmasını sağlamakla kalmayıp aynı akım seviyesi için daha yüksek moment ve zıt emk elde edilmesine imkân vermektedir. Denklem 1 de üretilen momentin matematiksel ifadesi gösterilmektedir [3,6].

$$T = i_a i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} + i_b i_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} + i_c i_a \frac{dM_{ca}}{d\theta} \quad (1)$$

Burada,

i_a, i_b, i_c : Sırasıyla A, B ve C faz akımları,

M_{ab}, M_{bc}, M_{ca} : Fazlar arasındaki karşit endüktans değerleridir.

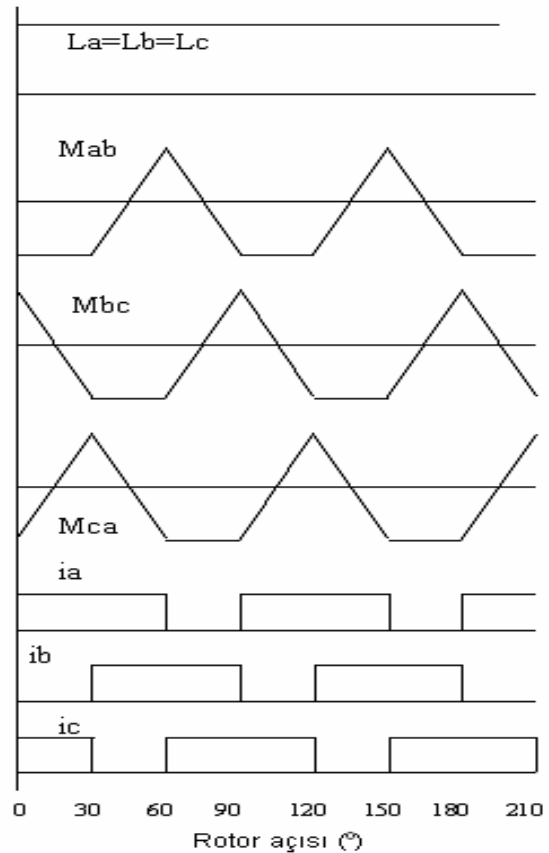
Amaç sürekli bir moment elde etmek olduğundan KKARM de bu amaca üç farklı uyarma yapısı kullanılarak ulaşılabilir. Bunlar “bipolar”, “unipolar” ve “üç fazlı” uyarma yapılarıdır. Bu çalışmada, eşit koşullar altında unipolar uyarımlı KKARM ile klasik ARM arasında performans karşılaştırması yapılmaktadır. Şekil 13 ideal karşit endüktans eğrileri faz akım dalga şekilleri ile birlikte gösterilmektedir.

Şekil 14 rotor pozisyonuna göre öz ve karşit endüktans değişimini göstermektedir. Bu şekil KKARM de öz endüktansın daima sabit olduğunu göstermektedir. Şekil 15 üç faz için karşit endüktans eğrilerini göstermektedir.

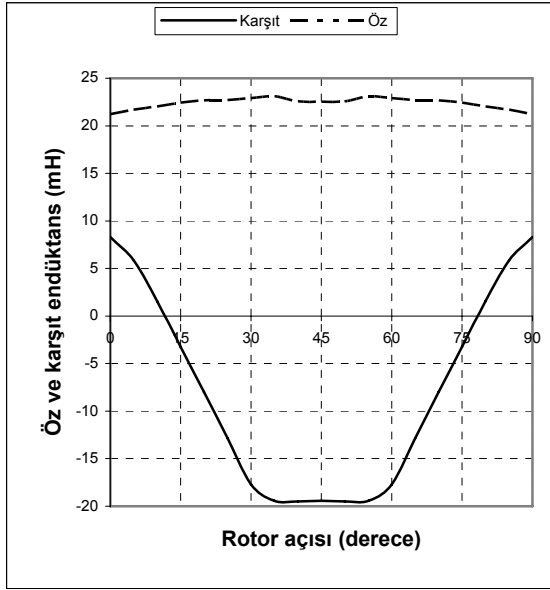
Her iki ARM tipini aynı bakır kayıpları için karşılaştırmak amacıyla sargı akımları Denklem 2 ve 3 e göre azaltılmalıdır. Bu denklemler tam adım ve kısa adım ARM nin eşit bakır kayıpları açısından karşılaştırılmasını özetlemektedir.

$$P_{sp} = \frac{1}{3} \cdot I_{sp}^2 \cdot R_{sp} \quad (2)$$

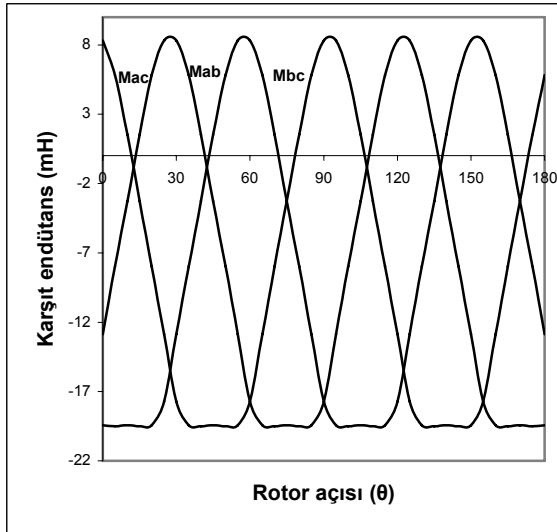
$$P_{fp} = \frac{2}{3} I_{fp}^2 \cdot R_{fp} \quad (3)$$



Şekil 13. Unipolar uyarma yapısı için ideal öz, karşit endüktans ve akımı dalga şekilleri (Idealized mutual inductance profile and excitation current waveforms for unipolar excitation scheme)



Şekil 14. Tam adımli ARM nin öz ve karşıt endüktans eğrileri (Self and mutual inductance profiles of short pitched SRM)

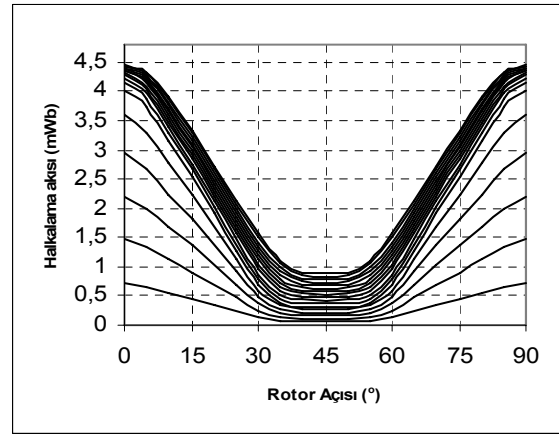
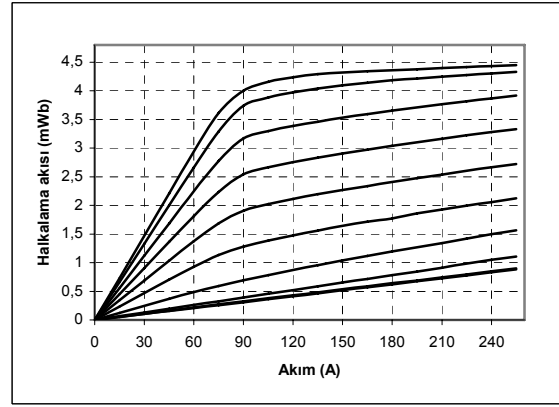


Şekil 15. KKARM de karşıt endüktans değişimi (Variation of mutual inductance in MCSRМ)

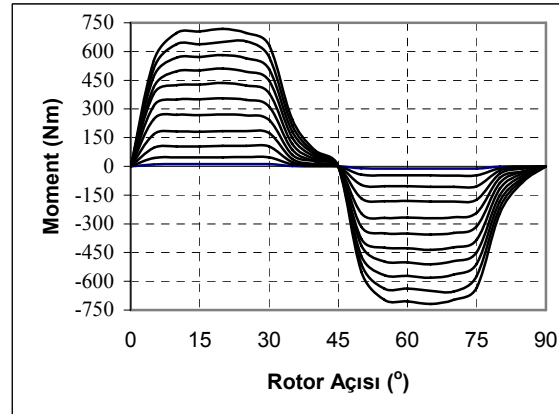
Burada,

- P_{sp} : Kısa adımli ARM için bakır kayıpları,
- I_{sp} : Kısa adımli ARM için faz akımları,
- R_{sp} : Kısa adımli ARM için faz sargı direnci,
- P_{fp} : Tam adımli ARM için bakır kayıpları,
- I_{fp} : Unipolar uyarımlı ve tam adımli ARM için faz akımları,
- R_{fp} : Tam adımli ARM için faz sargı direncidir.

Denklem 2' de 1/3 katsayısı kullanılmaktadır çünkü klasik ARM sargısı elektriksel periyodun yaklaşık üçte biri süresince iletimde olmaktadır. Benzer olarak KKARM' de faz sargıları elektriksel periyodun yaklaşık olarak üçte ikisi süresince iletimde olduğundan Denklem 3' te 2/3 katsayısı



Şekil 16. Unipolar uyarma yapısı için akı değişimi (Flux linkage variation for unipolar excitation scheme)

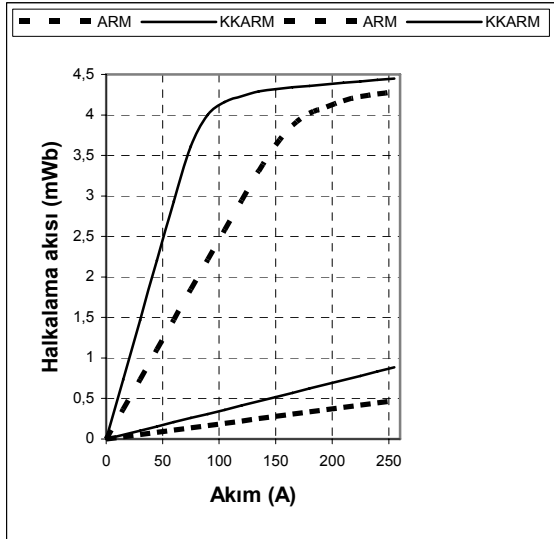


Şekil 17. Unipolar uyarma yapısı için moment eğrileri (Torque profile for unipolar excitation scheme)

kullanılmaktadır. Daha önce bahsedildiği üzere SOLIDWORKS ile yapılan hesaplamalar, KKARM faz direncinin klasik ARM' ye kıyasla %59–62 daha yüksek olduğunu göstermektedir. Eğer bu oranı %62 alırsak aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$R_{fp} = 1.62R_{sp} \quad (4)$$

Denklem 4' ü denklem 3' te yerine yazarsak P_{sp} değerinin P_{fp} değerine eşit olma durumundan faydalanarak aşağıdaki sonuca ulaşılabilir.



Şekil 18. İki tip ARM için mıknatıslanma eğrileri (Magnetization curves of two SRMs)

$$I_{fp} = 0.55I_{sp} \quad (5)$$

Bu sonucun bir yorumu olarak KKARM' nin, eşit bakır kayıpları için, klasik ARM ye göre %45 daha düşük akımla çalıştırılması gerektiği söylenebilir. Şekil 16'dan Şekil 21'e kadar olan şekiller iki tip ARM' ye ilişkin bazı akı ve moment dalga şekillerini göstermektedir.

Eğriler sonlu elemanlar analizi ile elde edilmektedir ve karşılaştırmalar Denklem 5'te KKARM için belirtilen oranda faz akımı azaltılması koşulunda yapılmaktadır.

4. SONLU ELEMANLAR ANALİZ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI (DISCUSSION ON FINITE ELEMENT ANALYSIS RESULTS)

İki sargı tipi için akı ve moment değişimi grafikleri elde edilmiştir. KKARM için tüm çalışma noktalarında bakır kayıpları klasik ARM ile aynı olmaktadır. Bölüm 3 de gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi mıknatıslanma karakteristikleri açısından Şekil 18, birkaç temel farkı göstermektedir. Karşılıklı ve ortalanmış konumlarda KKARM akı değerleri klasik ARM ye göre daha fazla olmaktadır. Unipolar uyarma yapısına sahip KKARM nin akı değerleri aynı faz akım seviyesi koşulunda klasik ARM ye göre daha fazla olmaktadır.

Moment dalga şekillerine bakıldığında genel olarak KKARM nin elektriksel ve manyetik devreyi daha verimli kullandığından yüksek moment üretme kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 19 ve 20 doğrusal ve doğrusal olmayan bölgede statik moment eğrilerini göstermektedir. Şekil 19 her iki makinanın doğrusal bölgede seçilen iki akım değeri

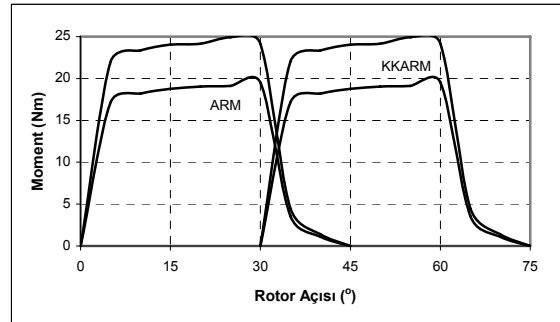
(KKARM; 30-60 A, ARM; 53-106 A) için moment dalga şekillerini vermektedir.

Tablo 2'deki moment değerleri ve Şekil 19'daki eğriler incelendiğinde doğrusal bölgede herhangi bir rotor konumu için daha az sargı akımı ile daha fazla moment elde edildiği görülmektedir. Uygulamada sargı akımının az olması güç devresinin maliyetini ve boyutunu azaltmaktadır.

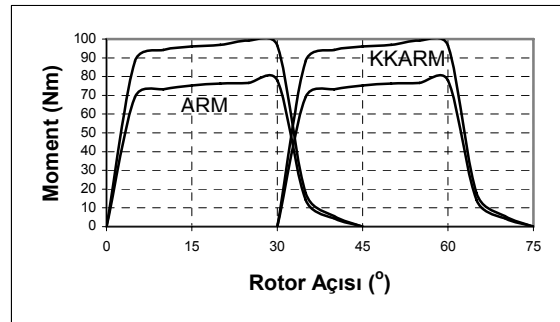
Tablo 2'deki moment değerleri ve Şekil 20'deki eğriler incelendiğinde doğrusal olmayan bölgede de herhangi bir rotor konumu ele alındığında daha az sargı akımı ile daha fazla moment elde edildiği görülmektedir. Sonuç olarak aynı akım ile uyarılan klasik ARM ve KKARM karşılaştırıldığında KKARM nin momenti daha fazla olmaktadır.

Moment ve moment dalgalanması değerleri her iki makine için moment dalga şekilleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Tablo 2 ve Tablo 3 de hesaplanan bu değerler gösterilmektedir.

Tablo 3'e göre güvenli çalışma akımı sınırında ve altındaki akım değerlerinde moment dalgalanmaları ARM ve KKARM için yakın olmaktadır. Fakat güvenli çalışma akımının üzerinde ise KKARM' deki dalgalanma miktarı ARM' e göre daha fazla olmaktadır. Yeni sargı yapı ile ortalama momentin artmasına rağmen anlık momentler problem teşkil etmeye devam etmektedir. Şekil 21 ve Şekil 22, ARM ve KKARM için endüktans ve moment değişimlerini göstermektedir.



a) KKARM 30 A ARM 53 A



b) KKARM 60 A ARM 106 A

Şekil 19. İki tip ARM için doğrusal çalışma bölgesinde statik moment eğrileri (Static torque curves of two SRMs in linear region)

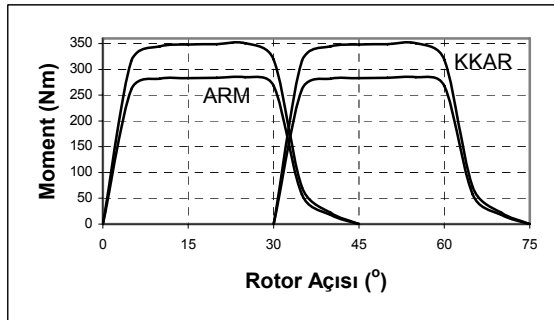
Tablo 2. ARM ve KKARM nin ortalama moment açısından karşılaştırması (Average torque output (T_a) comparisons between SRM and MCSRSM)

	ARM		KKARM Unipolar	Değişim
Akım (A.)	T_a (Nm)	Akım (A.)	T_a (Nm)	% ΔT_a
53	15,165	30	19.38	27.79
106	60.558	60	76.65	26.57
159	131,902	90	164.96	25.06
212	221.074	120	267.94	21.19
238.5	267.405	135	322.34	20.54

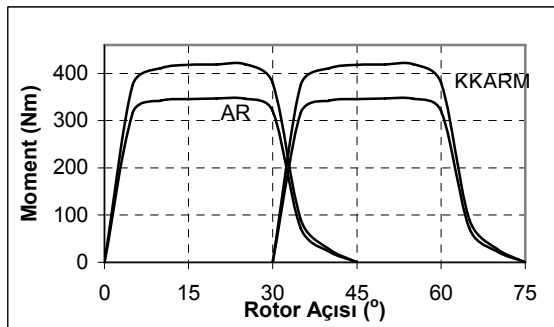
Tablo 3. ARM ve KKARM nin moment dalgalılığı ($\%T_r$) açısından karşılaştırması (Torque ripple ($\%T_r$) comparisons between SRM and MCSRSM)

	ARM		KKARM Unipolar	Değişim
Akım (A.)	T_a (Nm)	Akım (A.)	T_a (Nm)	% ΔT_a
53	29.88	30	29.78	-0.1
106	29.09	60	29.42	0.33
159	30.08	90	30.28	0.2
212	30.95	120	33.95	3
238.5	31.79	135	35.79	4

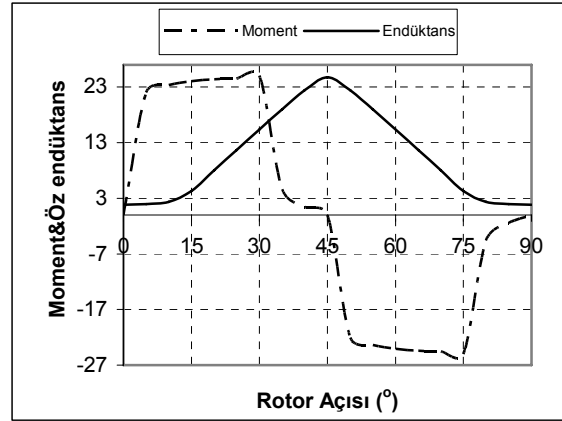
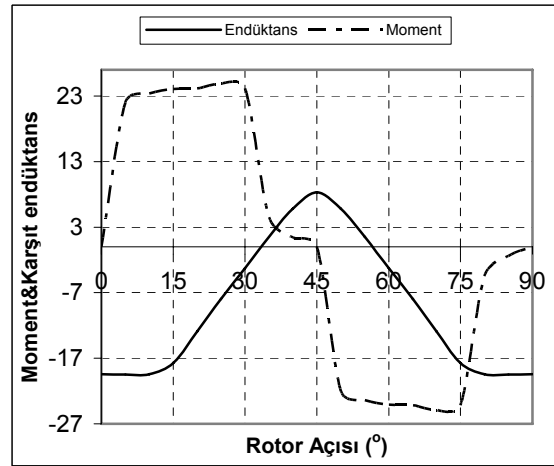
Bu grafiklerden daha az faz akımı ile aynı seviyede moment üretilebileceği de anlaşılmaktadır



a) KKARM 120 A ARM 212 A



b) KKARM 135 A ARM 238.5 A

Şekil 20. İki tip ARM için doğrusal olmayan bölgede statik moment eğrileri (Static torque curves of two SRMs in nonlinear region)**Şekil 21.** ARM için 60 A faz akımında endüktans ve moment eğrileri (Inductance and torque curves at 60 A phase current for SRM)**Şekil 22.** ARM için 30 A faz akımında endüktans ve moment eğrileri (Inductance and torque curves at 30 A phase current for MCSRSM)

7. SONUÇ (CONCLUSION)

Bugüne kadar yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde, Anahtarlı Relüktans Motorunun performansını arttırmaya yönelik çalışmalar görülmektedir. Başka bir deyişle ARM'nun elektrik ve manyetik devresinden maksimum yararlanma düşüncesi araştırmacıların sürekli gündeminde olan bir konudur. ARM'nun performansını arttırmaya yönelik genel olarak iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, Motorun manyetik devresinin tasarımını esas alan yöntem ikincisi ise Motorun kontrol devresinin tasarımını esas alan yöntemdir. Buradan hareketle; bu makalede klasik ARM'nun yeni bir sargı yapısı ile elektrik ve manyetik devreyi daha verimli kullanarak ortalama çıkış momentinde iyileştirme amaçlanmıştır.

Yapılan tüm bu çalışmaların sonucunda yeni sargı yapısına sahip KKARM klasik ARM'una nazaran uyarma yapısına bağlı olarak ortalama momentte %20-25'lik bir artış sağlamıştır. KKARM bu üstünlüğüne karşın iki olumsuz yanı beraberinde

getirmektedir. Bunlardan ilki makinede üretilen akının sadece rotor konumuna ve kendisini oluşturan faza değil aynı zamanda diğer fazlara da bağlı olmasından kaynaklanan analitik modeldeki karmaşıklığın artmasıdır. İkincisi ise zaten klasik ARM'nun yapısında var olan fakat yeni sargı yapısında da uyarıya bağlı olarak şiddetini arttıran, moment dalgalılık oranının yüksek olmasıdır. Bu durum makinedeki gürültü miktarının artması anlamına gelmektedir. Sonuç olarak aynı bakır kayıplarını ve aynı manyetik çalışma noktasını veren çıkış momentleri ve gücü aynı olan klasik ARM ve KKARM'da KKARM'nun boyutları daha küçüktür.

Bu makale klasik anahtarlamalı relüktans motor ile unipolar uyarıya yapısına sahip karşıt kuplajlı anahtarlamalı relüktans motoru eşit bakır kayıpları altında karşılaştırmaktadır. Yapılan çalışmalar, aynı faz akımı seviyesi için daha uzun sargı sonuna sahip KKARM' de meydana gelen bakır kayıplarının, klasik ARM' ye nazaran daha fazla olduğu görülmektedir. Eğer karşılaştırmalar eşit termal koşullarda yapılmak isteniyorsa, bakır kayıplarını eşitlemek için KKARM' nin akım seviyesi düşürülmelidir. Eşit termal koşullarda gerçekleştirilen karşılaştırmalar, KKARM' nin ürettiği moment klasik ARM' den daha fazladır. Diğer yandan, KKARM klasik ARM' ye göre özellikle yüksek moment seviyelerinde daha fazla moment dalgalılığına sahiptir.

SEMBOLLER (LIST OF SYMBOLS)

i_a, i_b, i_c	Sırasıyla A, B ve C faz akımları
M_{ab}, M_{bc}, M_{ca}	Fazlar arasındaki karşıt endüktans değeri
P_{sp}	Kısa adımlı ARM için bakır kayıpları
I_{sp}	Kısa adımlı ARM için faz akımları
R_{sp}	Kısa adımlı ARM için faz sargı direnci
P_{fp}	Tam adımlı ARM için bakır kayıpları
I_{fp}	Unipolar uyarımlı ve tam adımlı ARM için faz akımları
R_{fp}	Tam adımlı ARM için faz sargı direnci

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Miller, T.J.E., **Switched Reluctance Motors and Their Control**, Oxford Üniversitesi Yayınları, Oxford, 1993.
2. Lawrenson, P.J., Stephenson, J.M., Blenkinsop, P.T., Corda, J. ve Fulton, N.N., "Variable Speed Reluctance Motors", **IEE Proc. Inst. Elect. Eng.**, Cilt 127, Bölüm B, 253-265, 1980.
3. Mecrow, B.C., "Fully-Pitched Winding Switched Reluctance and Stepping Motor Arrangements", **IEE Proc. Elect. Power Appl.**, Cilt 140, Bölüm B, 61-70, 1993.
4. Mecrow, B.C., "New Winding Configuration For Doubly Salient Reluctance Machines", **IEEE Trans. On Industrial Applications**, Cilt 32, No 6, 1348-1356, 1996.

5. Barrass, P.G., Mecrow, B.C., ve Clothier, A.C., "Unipolar Operation of Fully-Pitched Winding Switched Reluctance Drives", **Proceedings of the IEE conference**, Cilt 412, 252-256, 1995.
6. Yılmaz, K., ELMA 2005
7. Garip, M., Ozoglu, Y., Mese, E., ve Arslan, F., "Excitation Comparison for Mutually Coupled Switched Reluctance Motors", **3rd International Conference On Mathematical and Computational Applications (ICMCA)**, Selçuk Üniversitesi, Konya/TÜRKİYE, 2002.
8. Ansoft Inc., Maxwell 2D Theory Manual - Revision 9, 1997.