

YENİ TİP 5 – FAZLI SEGMENTAL ROTORLU ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORA AİT DURUM DENKLEMLERİNİN VE DİNAMİK SİMÜLASYON SONUÇLARININ İNCELENMESİ

Erdal BÜYÜKBİÇAKCI^{1*}, Ali Fuat BOZ²

¹Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Güç Elektroniği Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi

² Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, TÜRKİYE

Öz

Bu çalışmada, 5-fazlı, 10/8 kutup konfigürasyonlu, segmental rotorlu olarak tasarlanmış ve literatüre girmiş olan yeni bir model anahtarlamalı relüktans motorun (SARM) yapısal özelliklerinin bir incelemesi sunulmuştur. SARM'nin klasik yapıda bir anahtarlamalı relüktans motorla (ARM) farklılıkları açıklanmıştır. Beş fazlı SARM'nin durum denklemleri temel elektrik motorları modeli kullanılarak farklı bir rotor yapısına sahip SARM'ye ait faz akımları, manyetik akı değişimleri ve faz durumları, görünür endüktans profilinin hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Çalışmanın devamında SARM'den elde edilen durum denklemleri kullanılarak dinamik simülasyon sonuçları geliştirilmiştir. Bilgisayar ortamında ilgili yazılım dili ile geliştirilen algoritmada çalıştırılan kod parçaları, SARM'in 0°'den 90°'ye kadar 1°'lik açı ile döndürülerek ideal akım kaynakları ile uygulanan akımın fonksiyonunun değişimi görülmüştür. SARM'nin her dönüş açısında bitişik olan iki fazı ortak endüktans oluşturacak şekilde enerjilendirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde elde edilen akımın değişimleri her bir faz için faz akımlarının simülasyon sonucu değişimleri görselleştirilerek açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Anahtarlamalı relüktans motor, matematiksel model, dinamik simülasyon.

INVESTIGATION OF STATE EQUATIONS AND DYNAMIC SIMULATION RESULTS OF A NEW TYPE 5-PHASE SEGMENTAL ROTOR SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Abstract

In this study, a review of the structural features of a new model switched reluctance motor (SARM), which was designed as a 5-phase, 10/8 pole configuration, segmental rotor and entered the literature, is presented. The differences between SARM and a switched reluctance motor (ARM) were obtained. The phase currents, magnetic flux changes and phase states of the SARM with a different rotor structure were figured out by calculating the profile of the apparent inductance, using the basic electric motor model of the five-phase SARM's equations of state. Besides these, the dynamic simulation results of a new five phases segmental switched reluctance motor were developed by using gained statement equations of them. In computer media, the SARM was rotated from 0° to 90° by 1° increment to see the change of function of current by using algorithmic code parts. In every rotation angle of SARM, the adjacent two phases were energized to generate common inductance. In analyses, the variation of obtained phase currents was explained by simulating and visualizing every current.

Keywords: Switched reluctance motor, mathematical model, dynamic simulation.

1. GİRİŞ

Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM), rotor profilinin yapısına göre farklı rotor–stator birleşimlerine göre tasarlanabilen, değişen relüktans ve endüktansın etkisi ile elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirirken rotor pozisyon bilgisi ve sürücü devresi kullanımı gerektiren basit yapısı yanında üstün özelliklere sahip özel elektrik makinasıdır. ARM’ler basit mekanik ve geometrik yapılarının yanında düşük rotor kayıplarından dolayı da değişken hızlı yüksek moment istenilen endüstriyel uygulamalarda yaygın oranda kullanılmaktadır [1]. ARM’lerin 1838 yılında elektrikli lokomotif hareket ettirmek amacıyla başlayan yolculuğu, 1960’lı yılların başında güç elektroniğindeki gelişmelere bağlı olarak motorun sürücü devresi tekniğindeki olumlu gelişimler sonucunda ancak devam eder hale gelmiştir. Gelişimi oldukça uzun zaman dilimine dayanan bir motor tipi olmasına rağmen bu motorların daha detaylı olarak incelenerek araştırılması, geliştirilmesi ve uygulamada diğer motorlarla rekabet edebilir duruma getirilmesi yakın yıllar

içinde yer almaktadır. ARM'ler üzerinde yapılan farklı bilimsel çalışmaların artması ve hem ticari hem de değişik endüstriyel uygulama alanlarında yer bulmasının 1980 yılından sonra artarak yoğunlaştığı görülmektedir [2-4]. Bu motorların günümüzde imalatının basit ve ucuz olması; elektrikli otomobil, uzay araçları, ev araçları, radarlar, madencilik, havacılık sanayi, enerji üretim sektörleri, çamaşır makineleri, su pompaları, yazıcılar, hızlı trenler, otomatik kapı sistemleri gibi çok değişik kullanım alanlarında pay sahibi olmayı sağlamıştır.

ARM'lerin en önemli genel özelliği, rotor pozisyon bilgisine ve faz akımlarına bağlı olarak manyetik devresinin doğrusal olmayan yapıda olmasıdır. Bu yüzden ARM'ler maksimum dönme momenti üretebilmek ve moment dalgalanmasını en aza indirebilmek amacıyla güçlü bir denetleyici devreye ihtiyaç duyarlar [5]. Klasik anahtarlama relüktans motorların geometrik yapı, moment performansı ve sürücü devre geliştirme teknolojilerinden elde edilen başarılı sonuçların yanında ilgili çalışmanın tabanını oluşturan segmental rotorlu ve bitişik iki faz enerjilendirme esasına dayanan anahtarlama relüktans motorlar yerine SARM kullanılarak yapılan bilimsel çalışmalarda da önemli ilerlemeler yaşanmıştır. Literatürde matematiksel model çıkarımları kullanılarak değişik rotor geometrileri tasarımları, sürücü optimizasyonları ve farklı kontrol teknikleri kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır.

Anahtarlama relüktans motorlar yapıları gereği direkt olarak enerji kaynağına bağlı olarak çalışmadıklarından dolayı bir sürücü sistemine ihtiyaç duymaktadırlar.

ARM ifadesinde, stator ve rotor arasındaki hava mesafesinde çıkıntılı kutup yapısı gereği relüktans değişimi meydana geldiği için ve bir sürme sistemi birlikte kullanıldığı için böyle adlandırılmıştır [6, 7]. ARM'nin çalışma prensibi elektromanyetik alan kuralı gereği rotor ve statorunda oluşan manyetik akının minimum relüktansa doğru ilerlemesi ilkesine dayanmaktadır. Manyetik devredeki relüktans değerinin değişimi rotor konumuna göre halkalanma akılarının izlediği yolun değişmesi sonucunda oluşmaktadır.

Davidson ilk olarak ARM'yi 1838 yılında İskoçya'da elektrikli tren lokomotifini hareket ettirmek için kullanırken karşılaşmıştır [8]. W.H. Taylor ise 19. yy. başında bugün ki ARM'lerin özelliklerini taşıyan ilk relüktans motoru yapmıştır [9]. İki faz enerjilendirme yöntemine sahip, asimetrik yapıda ve yüksek moment uygulamalarında kullanılmak üzere 12/10 kutup yapısına sahip anahtarlama relüktans motor Khor ve Sotudeh tarafından sunulmuştur [10]. Motor performansına

yönelik rotor ve statorun kutup geometrilerinde yapılan değişikliklere ait çalışmalar 2005 yılında Pandey ve Rajagopal tarafından yapılmıştır [12]. ARM'lerin farklı tasarımından elde edilen olumlu gelişmeler sonucunda bu motorların robot uygulamalarında da kullanılması ile ilgili olarak ilk çalışma 2006 yılında Ashok ve Tesar tarafından gerçekleştirilmiştir [12].

ARM'ler aynı zamanlar otomotiv sektöründe taşıtın tekerlek jantının içine yerleştirilmesi amacıyla doğrudan tahrikli dış rotorlu ve radyal akı yoluna sahip olarak geliştirilmeye başlayan sistemlerde kullanılmaya başlanmıştır [13, 14]. Aynı yıllarda stator yapısı farklılaştırılarak E tipi ve Helisel yapıya sahip iki fazlı ARM tasarımları geliştirilerek deneysel sonuçları literatürde paylaşılmıştır [15]. ARM'ler mekanik enerjinin ihtiyaç duyulduğu ev aletlerinde de kullanılmaya aynı dönemlerde başlamıştır. Ekram, Ravi, Rajagopal ve Mahajan yaptıkları çalışmada bir çırpıcı uygulamasını ARM ile gerçekleştirerek sonuçlarını paylaşmışlardır [16]. Franke, Brutscheck ve Schmucker tarafından tekerlek rotorlu ARM uygulaması geliştirerek hata tolerans kapasitesine bağlı olarak performansına ilişkin olarak etkili sonuçları göze çarpmaktadır [17]. 2009 yılında Daldaban ve Ustkoyuncu MagLev tren ve asansörleri etkisi altında çalışan yeni bir doğrusal ARM tasarımı, sürücü uygulaması gerçekleştirmişlerdir [18]. Bu çalışma günümüzde doğrusal ARM için asansör ve trenlerinde kullanımın temelinin teşkil etmektedir.

Brauer ve Arkadaşları 2009 ve 2010 yılında da Ruba, Bentia ve Szabo, ARM'lerin farklı sargılarında arıza olmasına rağmen çalışmalarını devam ettireceklerini göstermek amacıyla kritik güvenlik katsayısı olan uygulamalarda sürme hassasiyeti çok yüksek olan 5 faklı sargı için hata oluşturarak çalışma yapısını ve tercih edilme nedenlerini ortaya koymaya çalışmıştır [19, 20].

Klasik yapıda olan ARM'lerin performans ve yapılarından elde edilen sonuçlara paralel olarak çalışmamızda kullandığımız segmental rotor yapısına ve bitişik faz enerjilendirme prensibine göre çalışan SARM'ler üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda da önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Literatürde bu konu ile ilgili olarak Lawrenson ve Agu 1964 yılında çok fazlı relüktans makinelerin teorisi ve performansı başlığıyla ilk çalışmayı gerçekleştirilmiştir [21]. Bu çalışmanın devamında 1967 yılında Lawrenson ve Gupta, segmental rotorlu relüktans motorlar için deneysel ve teorik olarak yaptıkları iyileştirmeleri açıklamış [22] olsalar da yarı iletken teknolojisindeki eksiklikler motorun sürülmesinde karşılaşılan zorlukları beraberinde getirmiş ve bu alanda yapılan çalışmalar 90'lı yıllara kadar geliştirilememiştir. Yüksek moment uygulamaları gerektiren yerler için Toliyat

ve Lipo tarafından gerçekleştirilen çalışmada 5 fazlı ARM tasarlanmıştır [23]. 1992 yılında yalıtılmış SARM tasarımı Horst tarafından bulunarak patentte sunulmuştur [24]. Chris ve Arkadaşları tarafından 8/6 konfigürasyona sahip bipolar ARM için hava boşluğundaki elektromanyetik kuvvetin bileşenlerinin Maxwell yöntemi kullanılarak deneysel modellenmesi ile beraber bu alanında yapılan çalışmalar da hız kazanmıştır [25]. Bu gelişmeler neticesinde otomotiv bipolar teknoloji otomotiv sektörüne yönelik kayda değer gelişmeleri beraberinde getirmiştir. SARM ağırlığına ve hacmine göre moment üretme kapasitesi çok yüksek olan yeni bir SARM deneysel olarak farklı SARM yapılarıyla kıyaslanarak 2008 yılında Nareshi ve Arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada tanıtılmıştır [26].

ARM'lerin denetim sistemlerine yönelik olarak literatür incelendiğinde birbirinden farklı birçok çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Lawrenson 1989 yılında gerçekleştirdiği çalışmada yüksek hız ve tork çalışma aralığı için daha az anahtarlama devrelerine sahip, performanslı sürücü devresi ortaya koymuştur [27]. Gan ve Arkadaşları ise doğrusal yapıda olmayan servo sistemlerin kontrolünü esas alan yüksek kararlılık seviyesinde çalışan bir ARM denetleyicisi geliştirmiştir [28]. Farklı bir önemli çalışma olarak gösterilen Pollock ve Arkadaşları 1997 yılında ARM statorunda radyal titreşimleri engelleyen sürücülerinde üç aşamalı komitasyon yöntemi kullanarak akustik gürültüyü gidermeye yönelik deneysel çalışmalarını simüle ederek karşılaştırmalı sonuçlarla sunmuşlardır [29]. Rahman ve Arkadaşları da dinamik yapıda bir ARM geliştirerek moment, referans akım ve hız gibi değerleri yapay sinir ağları kullanarak motor sürücüsü ile tüm rejimlerde optimal kontrolünü gerçekleştirmeye ait bir çalışma ortaya koymuşlardır [30]. Klasik yapıda tasarlanan ARM ve rotor yapısının değiştirildiği SARM için motor sürücülerini, denetleyicileri üzerine gerçekleştirilmiş PWM, PI ve/veya PID denetleyicilere yapay sinir ağları, bulanık mantık gibi algoritmaların kullanıldığı kapsamlı çalışmalar 1999-2021 yılları arasında kesintisiz devam etmiştir.

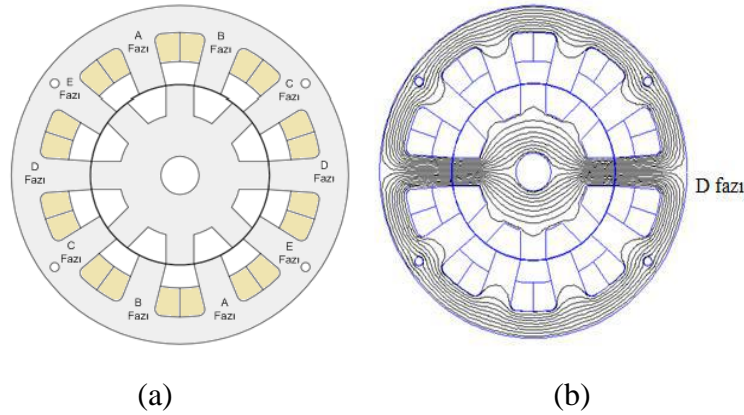
Çalışmamızın yapısını oluşturan yeni tip 5-fazlı SARM'nin klasik ARM yapısından değişik olarak rotor yapısının, geometrisinin değiştirilerek uyarma yönteminde farklılıklar barındırması kısaca özetlenebilir. Her iki tip motorun aynı kaymaktan beslenmeleri durumunda üretilen moment miktarları ve motorların faz başına sargılarında oluşan akı miktarları, sargıların endüktansları ve fazlarda oluşan ortak endüktans değerlerine göre farklılık göstermektedir. Bu çalışmada, 5-faz

yapısında 10/8 kutup konfigürasyonuna sahip, SARM olarak tasarlanmış ve daha önce literatüre girmiş olan SARM yapısının karmaşık durumunu çalışma şartları dikkate alınarak, geliştirilecek sürücü/denetleyici devrelerine açıklık getirebilmek amacıyla temel elektrik motorları denklemlerinden de yararlanılarak SARM'nin durum denklemleri ortaya konulmuştur. Aynı zamanda çalışmada, SARM için elde edilen durum denklemleri kullanılarak dinamik simülasyon sonuçları geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde elde edilen akımın değişimleri her bir faz için faz akımlarının simülasyon sonucu değişimleri de görselleştirilerek açıklanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. 5-Fazlı SARM'nin Yapısal Özellikleri

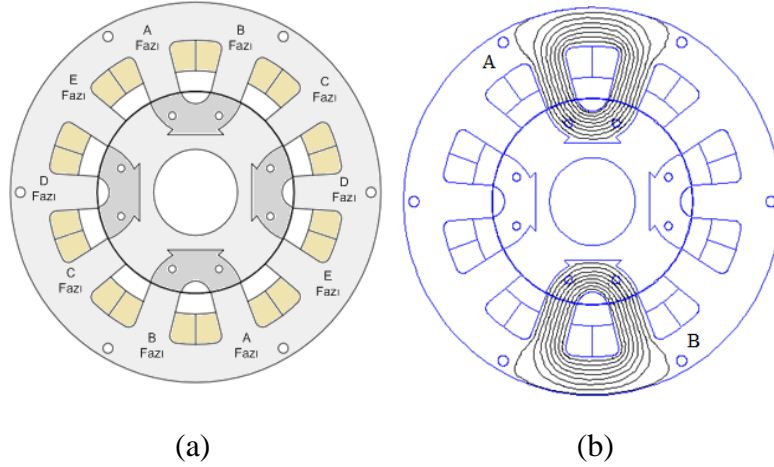
Bu bölümde SARM'ye ait motorun yapısal ve karakteristik özelliklerinden ve klasik ARM ile olan farklılıklarından bahsedilmiştir. Bipolar uyarımlı SARM ile aynı konfigürasyona sahip (5- fazlı 10/8) klasik ARM nin Şekil 1 (a)'da kesit görüntüsü sunulmaktadır. Şekil 1 (b)'de stator ve rotor kutuplarının karşılıklı olarak aynı eksene geldiklerinde endüktans en büyük değerinde oluşmaktadır. Klasik ARM yapısı ile çalışmada kullanılan SARM'nin yapısı, faz enerjilendirme durumu ve aksenal akı dağılımları birbirinden tamamen farklılıklar göstermektedir.



Şekil 1. a) Klasik ARM'nin kesit gösterimi b) 5 Fazlı Klasik ARM' de oluşan akı yollarının bir faz için görünümü

Çalışmamızda kullanılan SARM için klasik ARM ile olan farklılıkları da düşünülerek elde edilen sonuçlar Şekil 2 (a) 'daki kesit görünümü üzerinden şu şekilde ifade edilebilir. 10/8 konfigürasyona sahip SARM, klasik ARM rotor kutup geometrisine ve yapısına sahiptir. Ancak rotor yapı olarak;

silisli saclardan oluşturulmuş olan paketlerden ve bu paketlerin yerleştirildiği dayanıklılığı yüksek alüminyum bir bloktan oluşmaktadır. Alüminyum diğer metal elementlere göre hafif oluşu, oluşan manyetik alanı sınırlama özelliği ve mekanik dayanıklılığının yüksek oluşu gibi nedenlerden dolayı kullanımını klasik ARM rotor yapısına göre önemli farklılıklar doğurmuştur.

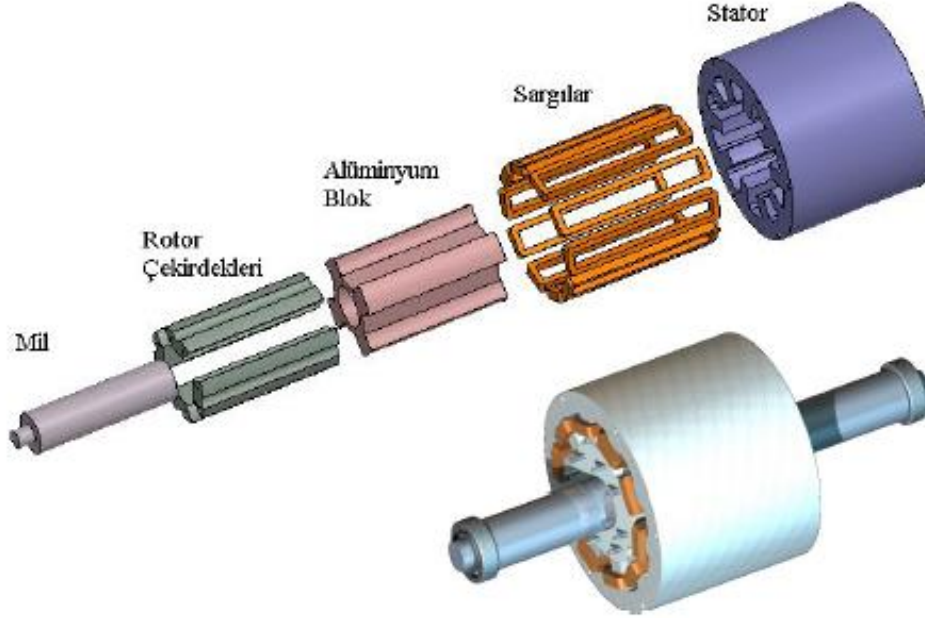


Şekil 2. a) Yeni SARM'nin kesit gösterimi b) SARM' de karşılıklı A ve B fazları için oluşan akı yollarının durumu

Aynı zamanda motordan elde edilecek moment değeri de Nm/kg başına düşen ağırlık azalacağından dolayı önemli ölçüde artacaktır. Model olarak kullanılan SARM'de bitişik iki fazı besleme yöntemi klasik ARM'lerde kullanılan karşılıklı fazları enerjilendirme yöntemine göre motorun verimliliği açısından daha avantajlı olmaktadır. Bu yöntemle elde edilen önemli katkı ise motorun manyetik kutuplarının daha kısa akı yolu takip ederek çalıştığı, klasik ARM yapısına göre önemli farklılıkları arasında sayılmaktadır. Bu durumda akı yollarının kısalması motor saclarındaki sıcaklık değerinin ve kayıpların azalmasına katkı sağlayacaktır. Şekil 2 (b)'de görüldüğü gibi SARM modelinde karşılıklı fazların klasik ARM'den ayrı olarak uzun akı yolları yerine daha kısa akı yolları kullanarak çalışmaktadır. Çalışma anında karşılıklı iki faz enerjili kaldığı için fazlar arasında oluşacak ortak endüktans SARM'nin doğrusal olmayan matematiksel modelinin ortaya konulmasında karmaşıklık oluşturacağı ön görülmektedir.

Şekil 3'de, model SARM yapısında bulunan parçalarına ait katı görünüm vermiştir. SARM statorunun gövdeye yerleştirilmesi ve dış bağlantıların yapılarak yatak, kapakların birleştirilmesi ile elde edilmiş olan SARM'nin genel görünüşleri Şekil 4'te verilmektedir. SARM'nin tasarıma

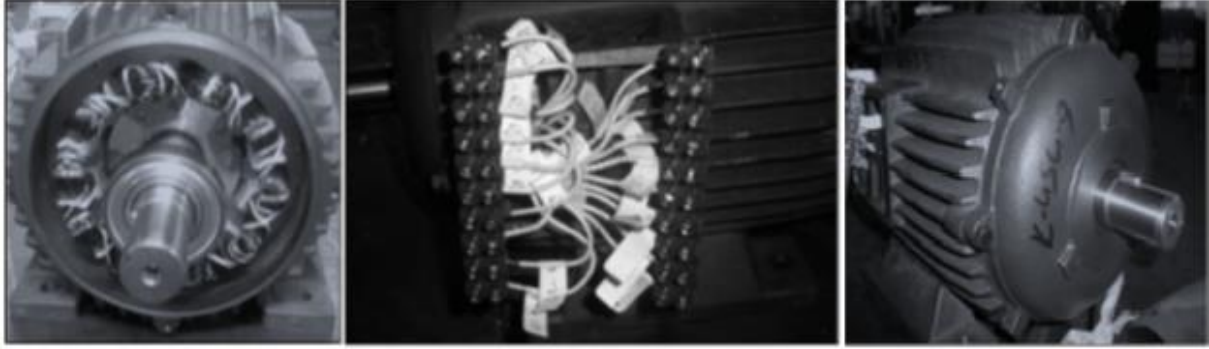
esas analiz parametreleri, yapısal ve fiziksel ölçü değerleri ile ilgili detaylı bilgiler Tablo 1’de sunulmaktadır.



Şekil 3. (a) Yeni SARM’nin katı görünümü

Tablo 1. Prototip SARM’a ait yapısal ve fiziksel özellikler

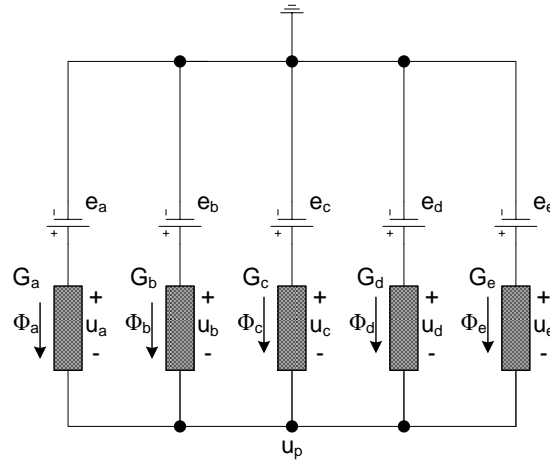
Model SARM Tasarım Ölçüleri	Değeri
Faz durumu	5
Stator/rotor sayısı	10/8
Stator dış çap uzunluğu	150 mm
Rotor dış çap uzunluğu	79.4 mm
Motor boyunduruğu uzunluğu	120 mm
Hava aralığı uzunluğu	0.3 mm
Stator kutup açısı	0.314 rad
Rotor kutup açısı	0.331 rad
Faz başına sarım sayısı	100
Stator/rotor malzemesi	M530-50A silikon çelik (0.5 mm kalınlığında)
Bakır tel çap kesiti	1.25 mm
Faz başına düşen sargı direnci	0.56 Ω
Maksimum faz indüktansı	67.91 mH



Şekil 4. 5 Fazlı 10/8 konfigürasyonlu bipolar uyarımlı segmental tip ARM için prototip görüntü

2.2. SARM'nin Durum Denklemleri

Genel olarak elektrik makinalarının sınıflandırılmasında motor–generatör çalışma durumlarının daha iyi anlaşılabilmesi, deneysel ve/veya simülasyon uygulamalarının doğru bir şekilde sonuçlandırılabilmesi, oluşabilecek hata-arıza gibi problemlerinin çözümlerine kalıcı çözümler bulunabilmesi gibi amaçlarla matematiksel modellerinin ortaya konulması gerekmektedir. Bu bölümde 5-fazlı model olarak kullanılan SARM çalışması temel alınarak ve temel motor denklemleri de kullanılarak motora ve denetleyicisine ait matematiksel model ortaya konulmuştur. Şekil 3’de, 5-fazlı SARM’a ait manyetik eşdeğer devresi verilmiştir. Model SARM’de klasik ARM yapısında olduğu gibi akı stator kutbundan çıkarak hava aralığı üzerinden rotor kutbuna geçmemektedir. SARM’de akı stator kutbu, hava yolu ile rotor kutbunun ön yüzeyindeki alüminyum blok yüzeyine ulaşmaktadır. Dolayısıyla SARM’de akı yolu daha kısa olmaktadır. Klasik yapıdaki ARM’lerin çalışma prensibi relüktans kuvvetine dayanmakta ve rotorun, bulunduğu manyetik devre içerisindeki akının, en kolay yol bulabileceği, relüktansın en küçük olduğu konumuna kadar kuvvet uygulanarak çekilmesi şeklinde esasına dayanmaktadır.



Şekil 3. Segmental ARM'nin manyetik eşdeğer devresi

Klasik yapıdaki ARM temel denklemlerine göre motorun ürettiği moment değeri doğrusal akı modeline göre ve değişen ko-enerjiye bağlı olarak açısal değişim de dikkate alınarak denklem (1) de görüldüğü gibi yazılmıştır:

$$T(\theta, i) = -\frac{\partial W_C(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (\lambda = \text{Sabit}) \quad (1)$$

Denklem (1) ifadesi kullanılarak SARM'nin ürettiği moment, eşdeğer devre modeli ve motorun her bir fazı fazları kullanılarak hesaplanırsa;

$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{dL_{aa}}{d\theta} i_a^2 + \frac{dL_{bb}}{d\theta} i_b^2 + \frac{dL_{cc}}{d\theta} i_c^2 + \frac{dL_{dd}}{d\theta} i_d^2 + \frac{dL_{ee}}{d\theta} i_e^2 \right) + i_a i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} + i_a i_c \frac{dM_{ac}}{d\theta} + i_a i_d \frac{dM_{ad}}{d\theta} + i_a i_e \frac{dM_{ae}}{d\theta} + i_b i_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} + i_b i_d \frac{dM_{bd}}{d\theta} + i_b i_e \frac{dM_{be}}{d\theta} + i_c i_d \frac{dM_{cd}}{d\theta} + i_c i_e \frac{dM_{ce}}{d\theta} + i_d i_e \frac{dM_{de}}{d\theta} \quad (2)$$

elde edilir. Denklem (2) de T üretilen momenti (Nm), L çakışık konum faz endüktansını (mH), θ rotor konum açısını (derece), M ortak endüktansı (mH), i faz akımını (amper) göstermektedir.

Kirşof'un akı kuralına göre genel olarak şu denklem yazılabilir:

$$\phi_a + \phi_b + \phi_c + \phi_d + \phi_e = 0 \quad (3)$$

ϕ_x (x=a, b, c, d, e olmak üzere) faz akılarını göstermesi için kullanılmıştır. Her bir faza ait akı değişim değerleri Manyetik iletkenliğe de bağlı olarak denklem (4) deki gibi ifade edilmektedir:

$$\phi_x = G_x(\theta) u_x \quad (4)$$

Burada ifade edilen G_x fazlar için manyetik geçirgenliği temsil ederken u_x gerilim düşümünü olarak alınmıştır. Ayrıca kaynakların değerleri denklem (5) deki gibi hesaplanır:

$$e_x = N \cdot i_x \quad (5)$$

e_x kaynağın her faz için ürettiği zıt elektromotor kuvvet değerini, N her faza ait sarım sayısını ve i_x fazlara ait akımı ifade etmektedir. u_p potansiyelin mmk değeri olarak düşünülürse;

$$u_x = e_x - u_p \quad (6)$$

ifadesine ulaşılmış olunmaktadır. Bu genişletilmiş denklemden faz akıları denklem (7) deki gibi hesaplanabilir;

$$\phi_x = G_x(\theta)(e_x - u_p) \quad (7)$$

Model SRM' nin tüm fazlarına akı bağıntıları $\lambda_x = N \cdot \phi_x$ ile ifade edildiğinden denklem (3) deki akı bağıntısı için kullanılarak ayrıca akı bağıntıları aşağıdaki denklemle de ifade edilir ve;

$$\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c + \lambda_d + \lambda_e = 0 \quad (8)$$

şeklinde yazılır. Her fazın manyetik geçirgenliği aynı zamanda fazların endüktanslarının bir fonksiyonu olarak düşünüldüğünde;

$$G_x = \frac{L_x}{N^2} \quad (9)$$

elde edilir. Fazlara ait akı bağıntıları denklem (9) a bağlı olarak genişletildiğinde;

$$\lambda_x = L_x(\theta) \left(\frac{e_x - u_p}{N} \right) \quad (10)$$

olmaktadır. $i_p = \frac{u_p}{N}$ olmak üzere isteğe bağlı bir akım tanımlanırsa;

$$\lambda_x = L_x(\theta)(i_x - i_p) \quad (11)$$

ifadesine ulaşılır. Bulmuş olduğumuz bu ifade ise denklem (8) de yerine konursa;

$$\begin{aligned} L_a(\theta)(i_a - i_p) + L_b(\theta)(i_b - i_p) + L_x(\theta)(i_x - i_p) + L_c(\theta)(i_c - i_p) \\ + L_d(\theta)(i_d - i_p) + L_e(\theta)(i_e - i_p) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

bulunur. Bu denklemden i_p değeri çekilerek çıkarıldığında;

$$i_p = \frac{L_a(\theta)i_a + L_b(\theta)i_b + L_c(\theta)i_c + L_d(\theta)i_d + L_e(\theta)i_e}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (13)$$

elde edilir. Bunun sonucunda denklem (9), tekrar denklem (11) e göre işlem yaparak düzenlendiğinde SARM' nin A fazı için akı değeri olan denklem (14) bulunur:

$$\lambda_a = \left(L_a(\theta) - \frac{L_a^2(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \right) i_a - \left(\frac{L_a(\theta)L_b(\theta)i_b + L_a(\theta)L_c(\theta)i_c + L_a(\theta)L_d(\theta)i_d + L_a(\theta)L_e(\theta)i_e}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \right) \quad (14)$$

Aynı ifade diğer fazlar için de aynı durumlar elde ederek yazılabilir. Denklem (14) den de rahatlıkla anlaşılacağı üzere, A fazı için öz-endüktans değeri;

$$L_{aa} = L_a(\theta) - \frac{L_a^2(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (15)$$

olarak görülmektedir. SARM'nin yalnızca yan yana bulunan A ve B fazları için enerjilendirildiğini kabul ederek bu iki faz arasındaki endüktans değeri denklem (14) kullanılarak bulunur. Aynı şekilde ortak endüktans değerleri ise A ve B fazları arasında;

$$M_{ab} = - \frac{L_a(\theta)L_b(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad \text{elde edilmektedir.} \quad (16)$$

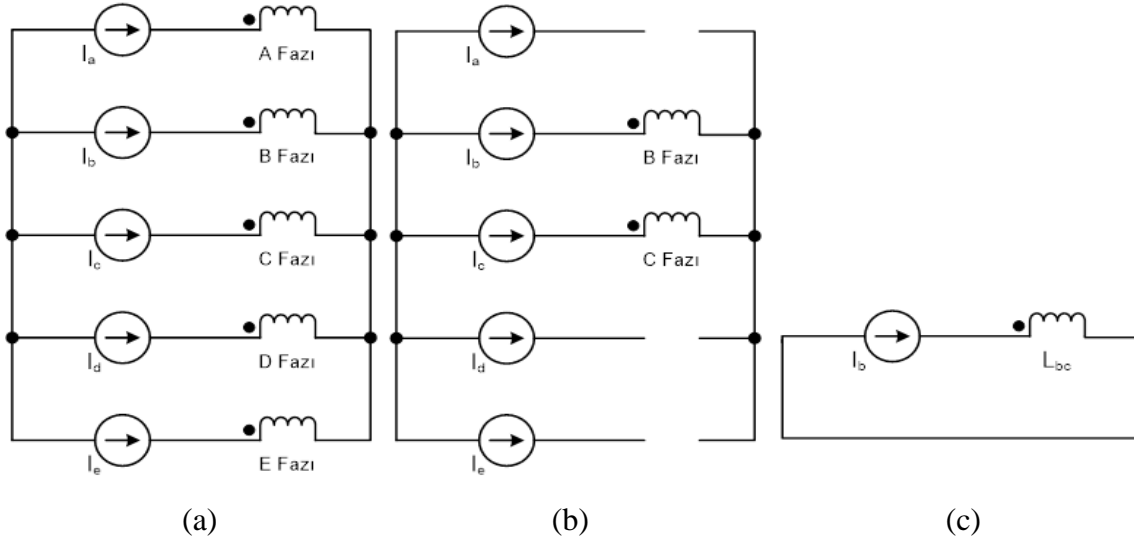
Diğer fazlar arasında da ortak endüktans değerleri aynı matematiksel ifade kullanılarak ve bitişik fazlar dikkate alınarak ifade edilebilir.

2.3. SARM'nin Görünür Endüktans Profili

Model SARM için görünür endüktans profillerinin elde edilmesi çalışmasının daha açık şekilde anlaşılması için önem taşımaktadır. Görünür endüktans değerlerinin bulunabilmesi amacıyla SARM'nin fazlarının ideal akım kaynağı ile sürüldüğü kabul edilerek her anda farklı fazların durumları da ortaya çıkarılarak endüktansların değerleri bulunmaktadır. Şekil 4 (a)'da hesaplama yöntemi gereği faz dirençleri ihmal edilerek, fazların yıldız olarak bağlantısı görülmektedir.

Tablo 2'de, model olarak kullanılan SARM'nin herhangi bir çalışma zamanı için fazların beraber çalışacağı durumlar verilmiştir. Buna göre ilk anda SARM'de yalnızca B ve C fazlarının sürüldüğü

düşünülürse Şekil 4 (b)'deki devre elde edilecektir. Aynı zamanda en basit hali ile eşdeğer devre Şekil 4 (c)'deki şekliyle de elde edilmektedir.



Şekil 4. a) SARM'nin ideal akım kaynakları kullanıldığında eşdeğer devresi, b) Sadece B ve C fazları enerjilendirildiğinde eşdeğer devrenin durumu, c) B ve C fazları için elektriksel eşdeğer devre

Model SARM'nin B ve C fazlarının ideal akım kaynağı ile sürüldüğü durumda;

$$i_b = -i_c, \quad i_a = 0, \quad i_d = 0, \quad i_e = 0 \quad (17)$$

eşitlik grubu elde edilebilir. Bu enerjilendirme durumu için akı bağıntılarını λ_b ve λ_c için ayrı ayrı bulunarak ifade edebiliriz. Akının takip ettiği yol; A fazının hava aralığından geçerek B fazına geçen akının değeri $\lambda_{ab} = \lambda_a - \lambda_b$ olduğu için;

$$\lambda_{bc} = \left(\frac{L_b(\theta) + L_c(\theta) - \frac{L_b^2(\theta) + L_c^2(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} + \frac{2L_b(\theta)L_c(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \right) i_b \quad (18)$$

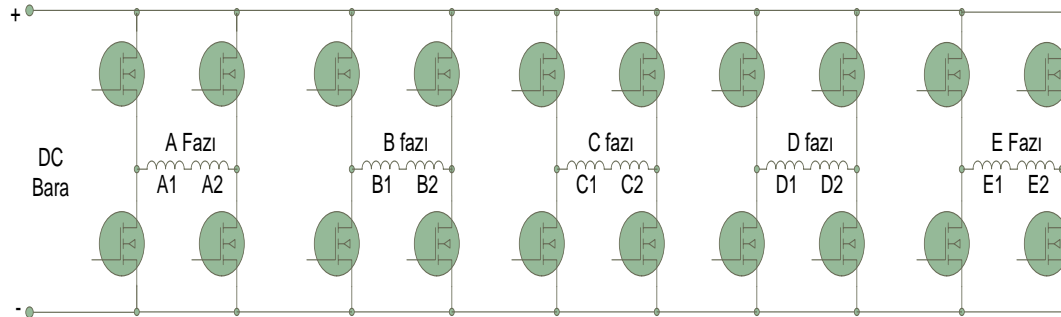
ifadesine ulaşılmaktadır. L_{bc} olarak adlandırdığımız görünür endüktans değeri ise daha önce ifade edilen akı ifadesi kullanılarak $L = \lambda/i$ eşitliğinde yerine konularak hesaplanmıştır. Bulunan bu ifade; B ve C fazları arasındaki ortak endüktans eşitliği olup;

$$L_{bc} = L_b(\theta) + L_c(\theta) - \frac{L_b^2(\theta) + L_c^2(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} + \frac{2L_b(\theta)L_c(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (19)$$

olarak elde edilmektedir.

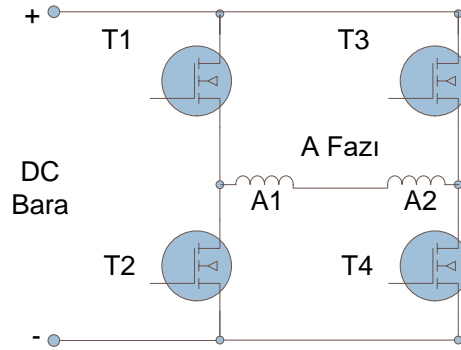
2.4. Bipolar Sürülen SARM Konvertörü

Model SARM'nin sürülmesi ve üzerinde farklı deneylerin gerçekleştirilerek sonuçların alınabilmesi amacıyla H – köprü konvertör kullanılmıştır. Bu sürücü devresi modüler durumda ve fazların herhangi birinde oluşacak hatanın otomatik olarak diğer fazlardan izole edildiği, yani fazları tamamen birbirinden ayırma topolojisini kullandığı için tercih edilmiştir. SARM'nin denetimi için tasarlanan H-köprü konvertör devresi Şekil 5'de görülmektedir. Bu sistem hata tolerans topolojisi özelliği ile birçok uygulamada rahatlıkla kullanılabilir özelliktedir.



Şekil 5. Model SARM' nin sürülmesinde kullanılan 5-fazlı bipolar topolojiye sahip H-köprü konvertör devresi

SARM'nin denetiminde kullanılan H-köprü çevirici devresi sadece bir faz için gösterilecek olursa Şekil 6'daki devre elde edilmektedir.



Şekil 6. Bir faz için basitleştirilmiş H-köprü konvertör devresi

SARM'nin bir fazı için geçerli olan Şekil 6'daki devre tüm fazlar için geçerli olup motor 5-faz yapısına sahip olduğundan çalışma esnasında kısa akı yolları oluşturmak amacıyla bitişik fazların birbirlerine göre ters polarite oluşturacak şekilde tetiklenmesi gerekmektedir. SARM'nin miline bağlı olan 5 adet optik sensörden gelen rotor konum bilgisine göre tetikleme sinyallerinin frekansı motor hızına da bağlı olarak bir düzen almaktadır. Bu durumu daha iyi anlaşılabilmesi için SARM milinin saat yönünde (CW) 90° dönüşü süresinde her 18° aralığında motor sargılarından geçen akımın yönü değiştiği için 5 döngümlük tetikleme durumları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Model SARM'nin 90° dönüşü boyunca fazlardaki akım yönlerinin değişimi

Fazlar	$0^\circ-18^\circ$	$18^\circ-36^\circ$	$36^\circ-54^\circ$	$54^\circ-72^\circ$	$72^\circ-90^\circ$
A Fazı	0	+	0	0	-
B Fazı	0	0	-	0	+
C Fazı	-	0	+	0	0
D Fazı	+	0	0	-	0
E Fazı	0	-	0	+	0

Tablo 2'deki durum daha geniş bir ifade ile açıklanacak olursa; Şekil 6'da verilen sargının C-fazına ait olduğu düşünüldüğünde bu fazın iletimde kalma aralığı $0^\circ-18^\circ$ aralığındadır. Bu durumda şekle göre faz sargısından varsayıma göre “-” yönde akım geçirmek için T1 ve T4 MOSFET'lerinin tetiklenmesi gerekmektedir. C-faz sargısının iletime geçtiği bir sonraki aralık $36^\circ-54^\circ$ “+” yöndeki aralıktır. Fakat bu durumda bir öncekinin tersine sargıdan geçen akım yönünün değiştirilmesi gerektiğinden, T2 ile T3 MOSFET'lerinin tetiklenmesi gerekmektedir.

Tablo 2’ de “0” olarak adlandırılan durumlar ise o faza ait sargı ya da sargı gruplarının iletimde olmadığı anlamını taşımaktadır. Gerçekleştirilmiş olan model ve simülasyonlarda bu durum dikkate alınarak kodlama yapılmıştır.

2.5. Bipolar Sürülen SARM’ye Ait Durum Denklemleri ve Dinamik Simülasyonlar

Model SARM’nin akı bağıntılarının sadece pozisyonun bir fonksiyonu değil aynı zamanda akıma göre değişim gösteren parametreler olarak dikkate alınması gerekmektedir. Bu ifadeye göre akı değişiminin aslında akımın bir fonksiyonu olduğu hatırlanırsa aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\lambda_x = f(i_a, i_b, i_c, i_d, i_e, \theta) \quad (20)$$

Genel elektrik makinaları denklemlerinde bahsedildiği üzere motorda üretilen zıt emk akının zamana bağlı değişiminin bir fonksiyonu olmaktadır. Buna göre herhangi bir faza ait zıt EMK

değerleri açısal hızın pozisyonun bir fonksiyonu olduğunu düşündüğümüzde ($\omega = \frac{d\theta}{dt}$) aşağıdaki

denklem (21) elde edilir

$$e_x = \frac{d\lambda_x(t)}{dt} = \frac{\partial\lambda_x(t)}{\partial i_a} \frac{di_a(t)}{dt} + \frac{\partial\lambda_x(t)}{\partial i_b} \frac{di_b(t)}{dt} + \frac{\partial\lambda_x(t)}{\partial i_c} \frac{di_c(t)}{dt} + \frac{\partial\lambda_x(t)}{\partial i_d} \frac{di_d(t)}{dt} + \frac{\partial\lambda_x(t)}{\partial i_e} \frac{di_e(t)}{dt} + \frac{\partial\lambda_x(t)}{\partial \theta} \omega \quad (21)$$

Bu ifadeye göre tüm fazlara ait zıt emk’lar matris formuna dönüştürülerek, eşdeğer devrenin çözümü için düğüm gerilimleri metodu da kullanıldığında motor faz uçları yıldız bağlı olduğu için, ortak nokta V_{com} olarak değerlendirilerek faz gerilimleri şu şekilde ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \\ e_d \\ e_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a - V_{com} - i_a R \\ V_b - V_{com} - i_b R \\ V_c - V_{com} - i_c R \\ V_d - V_{com} - i_d R \\ V_e - V_{com} - i_e R \end{bmatrix} \quad (22)$$

Denklem (22) ve fazların zıt emk ifadesi matris formunda birleştirildiğinde;

$$\begin{bmatrix} V_a - V_{com} - i_a R \\ V_b - V_{com} - i_b R \\ V_c - V_{com} - i_c R \\ V_d - V_{com} - i_d R \\ V_e - V_{com} - i_e R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial \theta} \omega \\ \frac{\partial \lambda_b(t)}{\partial \theta} \omega \\ \frac{\partial \lambda_c(t)}{\partial \theta} \omega \\ \frac{\partial \lambda_d(t)}{\partial \theta} \omega \\ \frac{\partial \lambda_e(t)}{\partial \theta} \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial i_a} & \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial i_b} & \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial i_c} & \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial i_d} & \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial i_e} \\ \frac{\partial \lambda_b(t)}{\partial i_a} & \frac{\partial \lambda_b(t)}{\partial i_b} & \frac{\partial \lambda_b(t)}{\partial i_c} & \frac{\partial \lambda_b(t)}{\partial i_d} & \frac{\partial \lambda_b(t)}{\partial i_e} \\ \frac{\partial \lambda_c(t)}{\partial i_a} & \frac{\partial \lambda_c(t)}{\partial i_b} & \frac{\partial \lambda_c(t)}{\partial i_c} & \frac{\partial \lambda_c(t)}{\partial i_d} & \frac{\partial \lambda_c(t)}{\partial i_e} \\ \frac{\partial \lambda_d(t)}{\partial i_a} & \frac{\partial \lambda_d(t)}{\partial i_b} & \frac{\partial \lambda_d(t)}{\partial i_c} & \frac{\partial \lambda_d(t)}{\partial i_d} & \frac{\partial \lambda_d(t)}{\partial i_e} \\ \frac{\partial \lambda_e(t)}{\partial i_a} & \frac{\partial \lambda_e(t)}{\partial i_b} & \frac{\partial \lambda_e(t)}{\partial i_c} & \frac{\partial \lambda_e(t)}{\partial i_d} & \frac{\partial \lambda_e(t)}{\partial i_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_a(t)}{dt} \\ \frac{di_b(t)}{dt} \\ \frac{di_c(t)}{dt} \\ \frac{di_d(t)}{dt} \\ \frac{di_e(t)}{dt} \end{bmatrix} \quad (23)$$

elde edilmektedir. Benzer şekilde düğüm akımları yöntemi ile fazlara ait akımların toplamı

$i_a + i_b + i_c + i_d + i_e = 0$ olacağı için akımların türevi alındığında $(\frac{di_a}{dt} + \frac{di_b}{dt} + \frac{di_c}{dt} + \frac{di_d}{dt} + \frac{di_e}{dt} = 0)$ ve

Bilinenler ve bilinmeyenler düzenli olacak şekilde denklem tekrar düzenlenir ise;

aşağıdaki matris formu elde edilir;

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a(t)}{dt} \\ \frac{di_b(t)}{dt} \\ \frac{di_c(t)}{dt} \\ \frac{di_d(t)}{dt} \\ \frac{di_e(t)}{dt} \\ V_{com} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial i_a} & \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial i_b} & \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial i_c} & \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial i_d} & \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial i_e} & 1 \\ \frac{\partial \lambda_b(t)}{\partial i_a} & \frac{\partial \lambda_b(t)}{\partial i_b} & \frac{\partial \lambda_b(t)}{\partial i_c} & \frac{\partial \lambda_b(t)}{\partial i_d} & \frac{\partial \lambda_b(t)}{\partial i_e} & 1 \\ \frac{\partial \lambda_c(t)}{\partial i_a} & \frac{\partial \lambda_c(t)}{\partial i_b} & \frac{\partial \lambda_c(t)}{\partial i_c} & \frac{\partial \lambda_c(t)}{\partial i_d} & \frac{\partial \lambda_c(t)}{\partial i_e} & 1 \\ \frac{\partial \lambda_d(t)}{\partial i_a} & \frac{\partial \lambda_d(t)}{\partial i_b} & \frac{\partial \lambda_d(t)}{\partial i_c} & \frac{\partial \lambda_d(t)}{\partial i_d} & \frac{\partial \lambda_d(t)}{\partial i_e} & 1 \\ \frac{\partial \lambda_e(t)}{\partial i_a} & \frac{\partial \lambda_e(t)}{\partial i_b} & \frac{\partial \lambda_e(t)}{\partial i_c} & \frac{\partial \lambda_e(t)}{\partial i_d} & \frac{\partial \lambda_e(t)}{\partial i_e} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_a - i_a R - \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial \theta} \omega \\ V_b - i_b R - \frac{\partial \lambda_b(t)}{\partial \theta} \omega \\ V_c - i_c R - \frac{\partial \lambda_c(t)}{\partial \theta} \omega \\ V_d - i_d R - \frac{\partial \lambda_d(t)}{\partial \theta} \omega \\ V_e - i_e R - \frac{\partial \lambda_e(t)}{\partial \theta} \omega \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

olur. Elde edilen matris formu basitleştirilerek $[x]=[y]^{-1}[z]$ formunda yazıldığında durum denklemleri geliştirilen iterasyon metodu ile nümerik olarak çözümlendikten sonra elde edilen kısmi türevler aşağıdaki gibi özetlenebilir (Örnek olarak A fazındaki değişim göz önünde bulundurulmuştur. Bu ifadeler diğer fazlar için çoğaltılabilir).

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial i_a} &\cong \frac{\Delta \lambda_a(t)}{\Delta i_a} = \frac{\lambda_a(i_a + \Delta i, i_b, i_c, i_d, i_e, t) - \lambda_a(i_a, i_b, i_c, i_d, i_e, t)}{\Delta i} \\ \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial i_b} &\cong \frac{\Delta \lambda_a(t)}{\Delta i_b} = \frac{\lambda_a(i_a, i_b + \Delta i, i_c, i_d, i_e, t) - \lambda_a(i_a, i_b, i_c, i_d, i_e, t)}{\Delta i} \\ \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial i_c} &\cong \frac{\Delta \lambda_a(t)}{\Delta i_c} = \frac{\lambda_a(i_a, i_b, i_c + \Delta i, i_d, i_e, t) - \lambda_a(i_a, i_b, i_c, i_d, i_e, t)}{\Delta i} \\ \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial i_d} &\cong \frac{\Delta \lambda_a(t)}{\Delta i_d} = \frac{\lambda_a(i_a, i_b, i_c, i_d + \Delta i, i_e, t) - \lambda_a(i_a, i_b, i_c, i_d, i_e, t)}{\Delta i} \\ \frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial i_e} &\cong \frac{\Delta \lambda_a(t)}{\Delta i_e} = \frac{\lambda_a(i_a, i_b, i_c, i_d, i_e + \Delta i, t) - \lambda_a(i_a, i_b, i_c, i_d, i_e, t)}{\Delta i} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Sistemdeki küçük pozisyon değişimleri dikkate alındığında ve bu etkilerin motor performansını, indüktans değişimini ve moment üretimini doğrudan etkilediği göz önünde bulundurulduğunda;

$$\frac{\partial \lambda_a(t)}{\partial \theta} \cong \frac{\Delta \lambda_a(t)}{\Delta \theta} = \frac{\lambda_a(i_a, i_b, i_c, i_d, i_e, \theta + \Delta \theta, t) - \lambda_a(i_a, i_b, i_c, i_d, i_e, t)}{\Delta \theta} \quad (26)$$

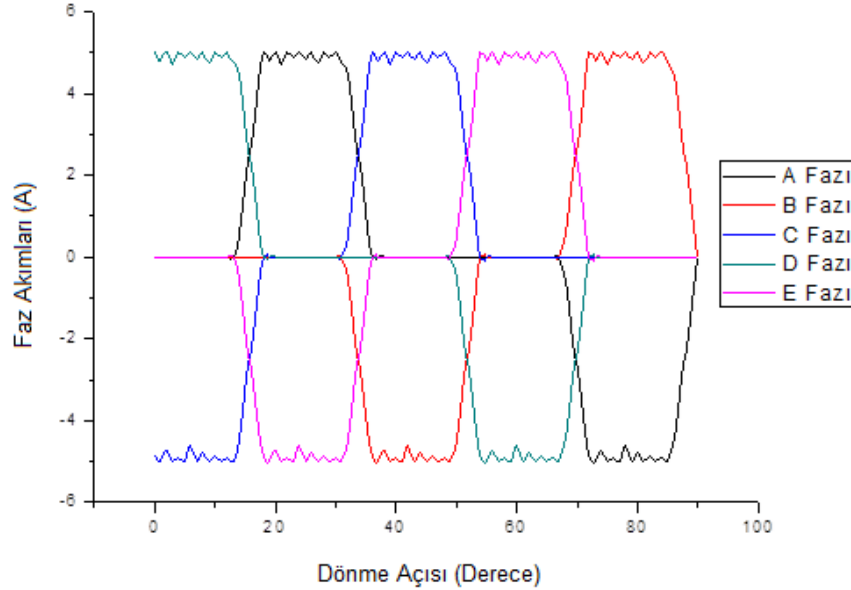
yalnızca A fazı için eşitliği elde edilir. Kısmi türevler çözüldükten sonra, $[y]$ matrisi ve $\left[\frac{di(t)}{dt} \right]$,

$[x] = [y]^{-1} [z]$ eşitliğinden hesaplanabilir. Euler metodu kullanılarak $t+dt$ zamanındaki yeni akım değerleri de aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$\begin{bmatrix} i_a(t+dt) \\ i_b(t+dt) \\ i_c(t+dt) \\ i_d(t+dt) \\ i_e(t+dt) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{di_a(t)}{dt} dt + i_a(t) \\ \frac{di_b(t)}{dt} dt + i_b(t) \\ \frac{di_c(t)}{dt} dt + i_c(t) \\ \frac{di_d(t)}{dt} dt + i_d(t) \\ \frac{di_e(t)}{dt} dt + i_e(t) \end{bmatrix} \quad (36)$$

Bu eşitlik kullanılarak yapılan hesaplamalarda $\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c + \lambda_d + \lambda_e = 0$ eşitliğinin sürekli olarak sağlanması gerektiği unutulmamalıdır. Gerçekleştirilen analizlerde elde edilen akım değişimleri

FEMM 4.2 programında LUA yazılımı dilinde geliştirilmiş script kodlar yardımı ile Tablo 2. referans alınarak Şekil 7' deki gibi görselleştirilmiştir.



Şekil 7. Faz akımlarının simülasyonlar sonucu değişimi

Çizelge 2. tekrar incelendiğinde 90° derecelik bir dönme periyodunda 0° - 18° derece aralığında D ile C, 18° - 36° derece aralığında A ile E, 36° - 54° derece aralığında C ile B, 54° - 72° derece aralığında E ile D ve 72° - 90° derece aralığında ise B ile A fazlarının birlikte enerjilendirildiği görülmektedir.

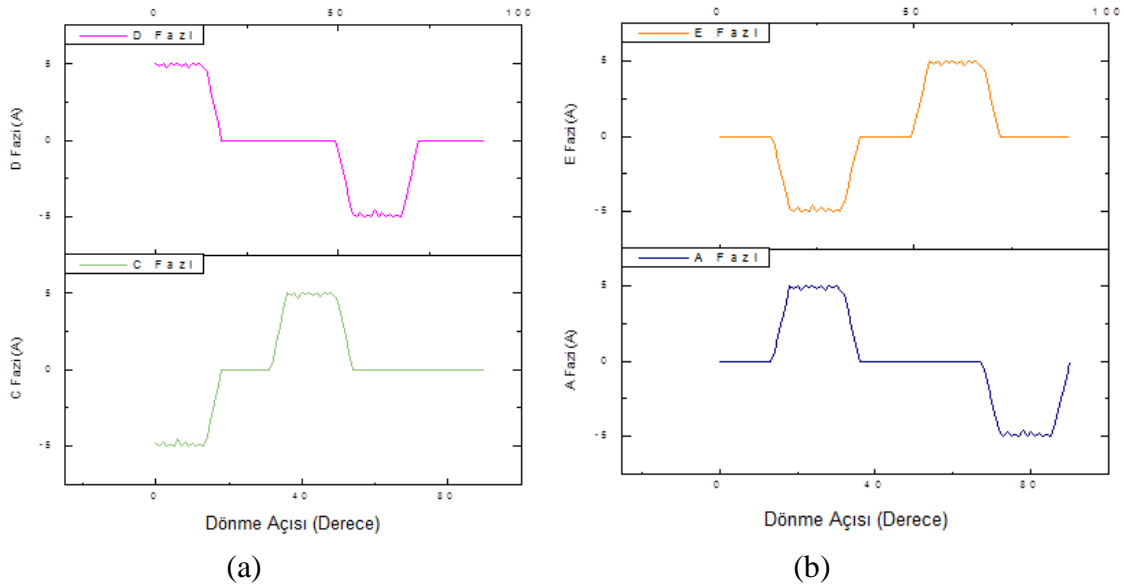
3. BULGULAR

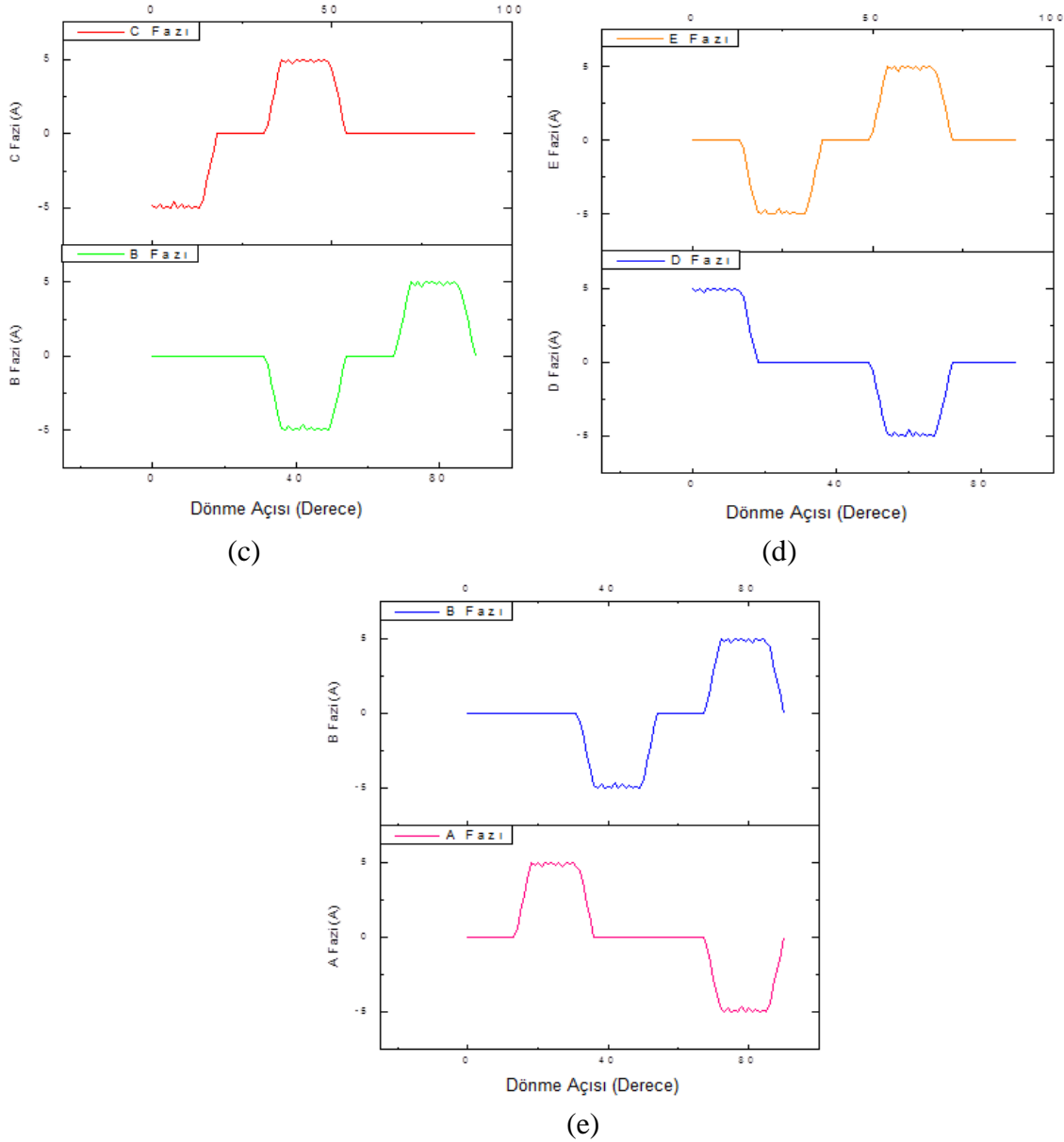
Yukarıda yapılan matematiksel analizler ile amaçlanan; SARM için benzetim ve deneysel çalışmaların yapılabilmesi, kaynak kodların doğru yazılabilmesi ve dinamik simülasyonların yapılabilmesi amacıyla detaylı bir şekilde ilgili motorun durum denklemleri çıkartılmıştır. Durum denklemleri geliştirilerek iterasyon ve nümerik olarak çözümlenerek motorun her fazı için akım değişimi değerleri simülasyon sonuçları ile beraber verilmiştir. Motorun 0° - 90° derecelik bir dönme periyodunda her bir faz akımının durumları ayrı ayrı incelenmek üzere simülasyon sonuçları sunulmuştur.

Klasik ARM ve SARM için rotorun çakışık ve çakışık olmayan konumlarında herhangi bir moment üretmediği rotorun ara konumlarında ise tasarlanan yeni SARM'nin bazı durumlarda klasik ARM'nin iki katından daha fazla moment ürettiği matematiksel model üzerinden hesaplanabilmektedir.

Durumun daha net görülebilmesi FEMM programının kullanabileceği ve LUA yazılım dili ile geliştirilmiş bir script kullanılmıştır. Geliştirilen dönme scriptleri ile akım fonksiyonlarının kodları SARM için 0°'den 90°'ye kadar 1° açı ile döndürülmüş her dönme açısında motora ideal akım kaynakları ile uygulanan akımın fazlara göre dağılımı bulunmuştur. Bu değerler kullanılarak motorun endüktans değerleri her an için hesaplanabilmektedir.

Şekil 8'de SARM'nin değişik her fazı için her dönüş açısında klasik ARM'nin sadece bir fazı enerjilendirilirken SARM'nin bitişik olan iki fazı ortak endüktans oluşturacak şekilde ve fazlardan birisinin de uyarım yönü değiştirilerek enerjilendirilmesi durumunda ortaya çıkan faz akımlarının simülasyon sonuçları ve akım profillerinin fazlara göre dağılımları görülmektedir.





Şekil 8. a) C ve D fazları enerjili iken, b) A ve E fazları enerjili iken, c) B ve C fazları enerjili iken, d) D ve e fazları enerjili iken, e) A ve B fazları enerjili iken (0-18 derece aralığında) faz akımlarının durumları

Yapılan analiz sonuçlarının bir değerlendirmesi yapılırsa SARM'nin klasik ARM'ye göre karşılıklı tek faz enerjilendirme yönteminin yerine bitişik iki faz enerjilendirme yöntemi yapılarak motorda üretilen moment değeri yapılan analitik hesaplar sonucu 2 kat artırılmış olmakla beraber sargılar uygun şekilde yerleştirildiğinde daha kısa akı yollarını takip ettiği görülmüştür. Akı yollarının kısalması, sac kayıplarının ve motor saclarının sıcaklık değerinin azalmasına önemli katkı sunmaktadır. Aynı

zamanda SARM klasik ARM yapısından farklı olarak manyetik özelliği olmayan, hafif bir alüminyum bloktan oluşan rotor yapısına sahiptir. Bu özelliği sayesinde üretilen moment değeri artırılmış olmakta ve her bir kutup altında manyetik direnci oluşturabilmek amacıyla akı bariyeri olarak etkin bir rol almaktadır.

4. SONUÇ

Bu araştırma çalışmasında, beş fazlı segmental tip anahtarlamalı relüktans motorun (SARM) çalışma şartları dikkate alınarak ve temel elektrik motorları modeli kullanılarak durum denklemleri elde edilmiştir. SARM'den elde edilen durum denklemleri kullanılarak dinamik simülasyon sonuçları geliştirilmiştir. Klasik ARM'den farklı bir rotor ve uyarım yapısına sahip bu yeni beş fazlı SARM' un faz akımları ve endüktanslar cinsinden manyetik akı değişimleri; manyetik eşdeğer devresi kullanılarak bulunmuştur. Farklı yapıdaki bu motorlar arasındaki farkın daha açık şekilde anlaşılabilmesi için ortak endüktans profilleri her anda farklı fazların durumları ortaya konularak endüktansların değerleri hesaplanmıştır. Son olarak, motorun moment üretimi endüktans eşitliğinden yararlanılarak elde edilmiştir. Konunun daha iyi anlaşılabilmesi için FEMM programının kullanabileceği ve LUA yazılım dili ile geliştirilmiş bir script kullanılmıştır. Geliştirilen dönme scriptleri ile akım fonksiyonlarının kodları yardımı ile yeni tasarım segmental tip ARM 0°'den 90°'ye kadar 1° açı ile döndürülmüş her dönme açısında motora ideal akım kaynakları ile uygulanan akımın fazlara göre dağılımı bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Chen. X., Deng Z., Wang. X., Peng. J., Li. X., New Designs of Switched Reluctance Motors With Segmental Rotors, 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), Brighton, UK, April 2010, pp. 213-218, 2010
- [2] Uygun. D, Bal. G, Sefa. I, Linear Model of a Novel 5-Phase Segment Type Switched Reluctance Motor, Elektronika Ir Elektrotehnika Journal, vol.20, pp. 3-7, 2014
- [3] Büyükbıçakcı. E, Bipolar Uyarımlı Segmental Rotorlu 5-Fazlı Bir Anahtarlamalı Relüktans Motor İçin PI Denetimli Sürücü Sisteminin Tasarımı ve Uygulaması, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013

- [4] Zhen. ZY, Martin T.W, Balda J.C, An Investigation Of Multiphase Excitation Nodes Of A 10/8 Switched Reluctance Motor With Short Flux Path To Maximize Its Average Torque, Industrial Electronics IEEE International Symp.,4-8 Dec., vol. 2, pp. 390-395. 2000
- [5] Elmas. C., Akçayol. M.A., Yiğit. T., 2 Bulanık PI Denetleyici İle Bir Anahtarlamalı Relüktans Motorun Hız Denetimi, Gazi Üni. Müh. Mim. Fak. Dergisi, C 22, S 65-72, 2007
- [6] Bal. G., Özel Elektrik Makinaları, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2004
- [7] Arslan. M., Anahtarlamalı Relüktans Motorun Genetik Bulanık Mantık Kullanılarak Tork Rıpıl Minimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2020
- [8] Miller. T.J.E., Electronic Control Of Switched Reluctance Machines, Newnes Power Engineering Series, Oxford, U.K., 2001
- [9] Polloc. C., Williams B.W., Power Converter Circuits for Switched Reluctance Motors with the Minimum Number of Switches, IEE Proceedings, vol.137, pp. 374-384, 1990
- [10] Khor. M.T., Sotudeh. R., A 3-Phase 12/10 Asymmetrical Switched Reluctance Motor, European Conference on Power Electronics and Applications, 11-13Sept., pp. 1-9, 2005
- [11] Pandey. K., Rajagopal. K.R., Novel Pole Shapes For Improved Performance Of Switched Reluctance Hub Motors, Intermag IEEE International Magnetics Conference, 4-8 April, pp. 749-750, 2005
- [12] Ashok. P., Tesar. D., Computer Aided Design of Switched Reluctance Motors for Use in Robotic Actuators, World Automation Congress, 24-26 July, pp 1-7, 2006
- [13] Fujishiro. S., Ishikawa. K., Kikuchi. S., Nakamura. K., Ichinokura. O., Design Of Outer-Rotor-Type Multipolar Switched Reluctance Motor For Electric Vehicle, Journal of Applied Physics, vol.99, pp. 08R324 - 08R324-3, 2006
- [14] Kachapornkul. S., Jitkreeyarn. P., Somsiri. P., Tungpimolrut. K., Chiba. A., Fukao. T., A Design Of 15 Kw Switched Reluctance Motor For Electric Vehicle Applications, ICEMS International Conference on Electrical Machines and Systems, 8-11 Oct., Seoul-Korea, pp.1690-1693, 2007
- [15] Chewoo. L.E.E., Krishnan. R., Lobo. N.S., Novel Two-phase Switched Reluctance Machine Using Common-Pole E-Core Structure: Concept, Analysis, and Experimental Verification, IEEE Industry Applications Conference, 42nd IAS Annual Meeting, pp.2210-2217, 2007

- [16] Ekram. S., Ravi. N., Rajagopal. K.R., Mahajan. D., Design and Development of a High Efficiency Switched Reluctance Motor for a Mixer-Grinder Application, IECON IEEE Industrial Electronics Society, 5-8 Nov, Taipei-Taiwan, pp.193-197, 2007
- [17] Franke. M., Brutscheck. M., Schmucker. U., Modeling And Simulation Of A Rolling Rotor Switched Reluctance Motor, 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology, 13-17 May, pp.1-6, 2009
- [18] Daldaban. F., Üstkoşuncu. N., A New Linear Switched Reluctance Motor With Maglev Effect, ELECO International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 5-8 Nov., Bursa-Turkey, pp.420-422, 2009
- [19] Brauer. H.J., Kasper. K.A., D.E. Doncker. R.W., Design And Analysis Of A Pancake Switched Reluctance Machine For Use In Household Applications, International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2-5 Nov., Taipei-Taiwan, pp. 1050-1055, 2009
- [20] Ruba. M., Bentia. I., Szabo. L., Novel Modular Switched Reluctance Machine For Safety-Critical Applications, XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), 6-8 Sept., Rome-Italy, pp.1-6, 2010
- [21] Lawrenson. P.J, Agu. L.A., Theory And Performance of Polyphase Reluctance Machine, Proceedings of the Institution of Electrical Engineer, vol.8, pp.1435-1445, 1964
- [22] Lawrenson. P.J., Gupta. S.K., Developments İn The Performance And Theory Of Segmental-Rotor Reluctance Machines, Proceedings of the Institution of Electrical Engineer, vol.5, pp.645–653, 1967
- [23] Toliyat. H.A., Xu. L., Lipo. T.A., A Five Phase Reluctance Motor, With High Specific Torque, Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, vol.28, pp.659–667, 1992
- [24] Horst. G.A., Isolated Segmental Switched Reluctance Motor, U.S. Patent No. 5 111 096, 1992
- [25] Chris. S., Edrington. T., Mahesh. K., Babak. F., Bipolar Switched Reluctance Machines: A Novel Solution for Automotive Applications, IEEE Transactions On Vehicular Technology, vol.54, pp.795-808, 2005
- [26] Naresh. V.V., Rallabandi. B., Fernandes. G., A Novel High Torque and Low Weight Segmented Switched Reluctance Motor, IEEE PESC Power Electronics Specialists Conference, 15-19 June, Rhodes-Greece, pp.1223–1228, 2008



- [27] Lawrenson. P.J., Design And Performance of Switched Reluctance Drives With High Performance Of Drive Characteristics, in Proc. Int. Conf. Power Conversion and Intel. Motion, pp. 1-11, 1989
- [28] Gan. M.G., Murphy. J.M.D., Kenneally. P.F., Lawton. J.V., A High Performance Variable Reluctance Drive: Achieving Servomotor Control, in Proc. Motorcon, pp.161-168, 1985
- [29] Pollock. C., Wu. C.Y., Acoustic Noise Cancellation Technique For Switched Reluctance Drives, IEEE Transaction on Industry Application, vol. 33, pp.477-484, 1997
- [30] Rahman. K.M., Suresh. G., Fahimi. B., Rajarathnam. A.V., Ehsani. M., Optimized Torque Control of Switched Reluctance Motor at all Operational Regimes Using Neural Network, IEEE Transaction on Industry Application, vol.37, pp.904-913, 2001