

6/4 ve 8/6 Stator/Rotor Yapılarında ARM Tasarımı, Analizi ve Karşılaştırması Design, Analysis & Comparison of SRM for 6/4 and 8/6 Stator/Rotor Structures

Can Emre İYDE, Abdullah POLAT, Lale T. ERGENE

Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
iyde@itu.edu.tr, polata@itu.edu.tr, ergenel@itu.edu.tr

Özet

Anahtarlama Relüktans Motorlar (ARM) yüz yılı aşkın bir süredir bilinmelerine rağmen dalgalı momentleri, gürültülü çalışmaları ve kontrol devrelerindeki zorluklar alternatif motorların gerisinde kalmalarına yol açmıştır. Yarı iletken teknolojisi alanındaki ilerlemeler ARM sürücülerinin daha ulaşılabilir ve ucuz olmasını sağlamıştır. Bu doğrultuda, ARM ile ilgili araştırmalar son yıllarda büyük önem kazanmıştır. Bu bildiride ARM'nin popüler yapılarından olan 6/4 ve 8/6 stator/rotor yapısında, 1.5kW değerinde iki motor tasarlanarak; akım ve moment karakteristiklerinin, güç ve moment yoğunluklarının ve manyetik özelliklerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) yardımıyla incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca aynı güç değerleri için tasarlanan motorlar arasında, elde edilen sonuçlar ışığında bir karşılaştırma sunulmuştur.

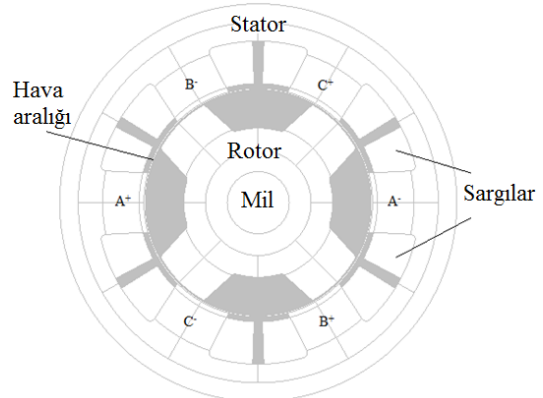
Abstract

Switched Reluctance Motors (SRM) are known more than hundred years but their rippled torque, acoustic noise and difficulties for controlling made them to fall behind from alternative motors throughout the history. Improvements about semiconductors area made possible to make SRM drive circuits more available, cheaper and easier to build and in recent years SRMs gained great importance. This paper aims the design of 1.5 kW SRM with popular structures as 6/4 and 8/6 stator/rotor combinations and give an analyze of their characteristics in terms of current profiles, torque outputs, power and torque densities and magnetic field profiles with the help of Finite Element Method (FEM). Also a brief comparison is given for the designed motors according to results.

1. Giriş

Relüktans motorlar dönebilen kısımlarının akı yolunun relüktansını azaltma eğilimi prensibiyle moment üreten elektrik makineleridir. Senkron ve anahtarlama olarak iki ayrı tipte bulunmaktadır. Bu bildiride; anahtarlama relüktans motorlar (ARM) ele alınmıştır. ARMler basit bir yapıya sahip olup stator ve rotorları laminasyonlardan oluşmaktadır. Sargılar sadece statorda bulunmakta ve rotorda mıknatıs, fırça ve sargı gibi yapılar bulunmamaktadır. Bu sayede, motor sağlam ve basit bir yapıdan oluşmaktadır [1].

ARM rotorunun aktif fazdaki endüktansını maksimize etme eğilimiyle çalışırlar. Stator kutuplarındaki faz sargıları bu hareketin devamlılığı için sırasıyla aktifleştirilirler ve tek seferde sadece bir faz aktiftir.



Şekil 1: ARM yapısı.

En önemli avantajları arasında basit yapısı bununla paralel olarak kolay üretilebilirliği ve ucuzluğu gelmektedir. Rotor kısmında sargı bulundurmaması bakır kayıplarıyla meydana gelecek verim düşümünü azaltmaktadır. Rotorunun sadece laminasyondan oluşup mıknatıs ve fırça bulundurmaması ise pahalılığı ve bakım gerekliliğini azaltmaktadır. Bu avantajlarının yanında dalgalı momentleri, gürültülü çalışmaları, farklı yapılar için farklı sürücü devreleri gerektirmeleri ve anahtar kontrolü için hareket algılayıcı sensörlerin gerekliliği önemli dezavantajlar olarak göze çarpmaktadır [2, 3]. ARM 2 beygirden 420 beygire kadar geniş bir güç aralığında kullanım alanı bulmaktadır. Bilgisayar alanında yüksek hız ve düşük moment gerekliliğiyle hard disk sürücüsü ve yazıcı motorunda, yüksek verimli çamaşır makinesi ve kurutucularda, havacılık alanında jet motoru yol vericilerinde, yüksek moment ve dayanıklılık ihtiyacı sebebiyle madencilik alanında, otomotiv alanında elektrikli araçlarda hub motoru olarak, kapı hareket düzeneklerinde ve kompresörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [4, 5, 6].

2. ARM Tasarımı

ARM tasarım aşaması stator/rotor kombinasyonlarına karar verilerek başlamaktadır. Bu bildiride 6/4 ve 8/6 yapısında iki motor tasarlanacaktır. Tasarım adımları genel hatlarıyla şu şekilde sıralanabilir;

- ∞ Motor gücü 1.5 kW, devir sayısı 2000, besleme gerilimi 200 V ve analitik hesaplara göre faz akımı 9.75 A olacaktır. Motor parametreleri kullanılarak çıkış momenti 7.16 N.m olarak hesaplanabilir.
- ∞ IEC standartları ile motor çerçeve uzunluğu 63 mm, hava aralığı 0.3 mm ve mil yarı çapı 14 mm olarak belirlenmiştir.
- ∞ Çıkış gücü (P); rotor çapı (L), çerçeve uzunluğu, hız (N_r), stator kutupları akı yoğunluğu (B) ve motorun manyetik ve elektrik yüklenme parametreleriyle çıkarılıp tasarım için referans olarak kullanılmıştır [7].

$$P = k_e \cdot k_d \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot B \cdot A_s \cdot D^2 \cdot L \cdot N_r \quad (1)$$

- ∞ Tasarım için belirlenen büyüklükler ve standartlar doğrultusunda seçilen değerler ve yukarıdaki denklem kullanılarak, rotor çap boyutu 62 mm olarak hesaplanır.
- ∞ Stator kutup açısı (β_s) ve rotor kutup açısı (β_r) belirlenirken, β_s 'nin β_r 'den büyük olması, komşu iki rotor kutbu arasındaki açının da β_s 'den büyük olmasına dikkat edilmelidir. Bu doğrultuda; her iki yapı için ayrı stator kutup sayısı (P_s) ve rotor kutup sayısı (P_r) kullanılarak kutup açıları belirlenmiş ve Çizelge 1'de gösterilmiştir.

$$\min[\beta_s] = \frac{4\pi}{P_s P_r} \quad (2)$$

$$\beta_r \geq \beta_s \quad (3)$$

Çizelge 1: Stator ve rotor kutup açıları

	β_s	β_r
6/4	30°	32°
8/6	16°	18°

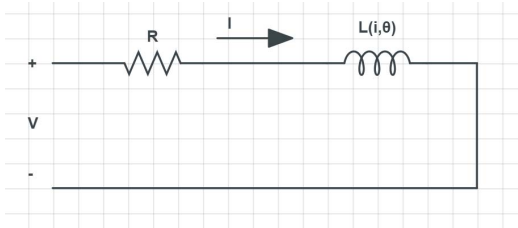
- ∞ Kutup açıları hesaplandıktan sonra manyetik denklemden yola çıkılarak sarım sayısı ve stator kutup uzunluğu hesaplamaları ile beraber dış çap uzunluğu Çizelge 2'de görüldüğü gibi elde edilmiştir.

Çizelge 2: Sarım sayıları stator kutup uzunluğu ve dış çap.

	Sarım sayısı	Stator kutup uzunluğu (mm)	Dış çap uzunluğu (mm)
6/4	94	20	123
8/6	94	18	116

2.1. Matematiksel Model

ARM lineer olmayan bir manyetik karakteristiğe sahip olmasına rağmen karşılıklı endüktanslar ihmal edilerek basit bir eşdeğer devre ile ifade edilebilmektedir.



Şekil 2: ARM basit eşdeğer devresi.

Bir fazdaki gerilim denkleminde yola çıkılarak ve eşdeğer devre kullanılarak anlık moment ifadesi denklem (6)'da görüldüğü gibi elde edilmektedir [8].

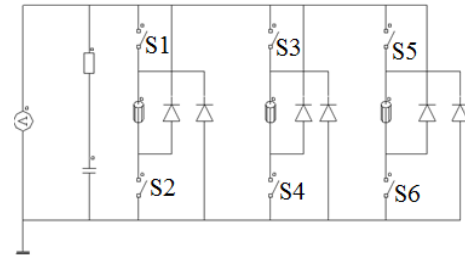
$$V = Ri = \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \quad (4)$$

$$V = Ri + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \quad (5)$$

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \quad (6)$$

2.2. Sürücü Devresi

Tasarlanan 6/4 ve 8/6 ARM'ları için sırasıyla üç ve dört fazlı olmak üzere asimetrik köprü devresi kullanılmıştır. ARM sürücü devrelerinde asimetrik köprü çeviriciye ek olarak C-Dump ve R-Dump devreleri sıkça kullanılmaktadır [9].



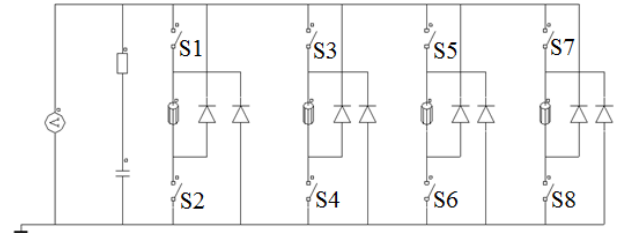
Şekil 3: 6/4 ARM üç fazlı sürücü devresi.

Şekil 3'te gösterilen üç fazlı sürücü devresi için anahtarlama açıları Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3: 6/4 anahtarlama açıları.

	İletim açısı	Kesim açısı
S1 S2	60°	90°
S3 S4	30°	60°
S5 S6	0°	30°

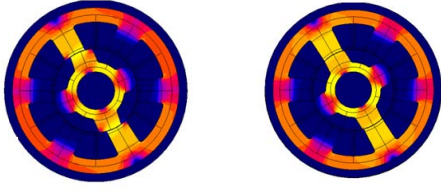
8/6 ARM için dört fazlı sürücü devresi ve anahtarlama açıları sırasıyla Şekil 4 ve Çizelge 4'de görülmektedir.



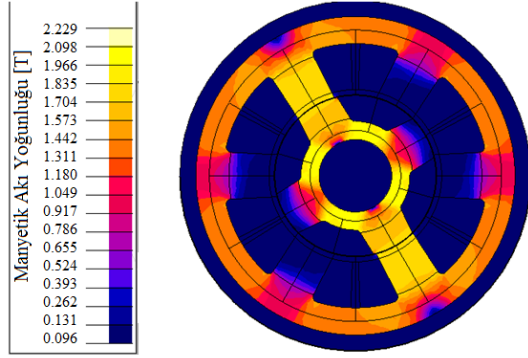
Şekil 4: 8/6 ARM dört fazlı sürücü devresi.

Çizelge 4: 8/6 anahtarlama açıları.

	İletim açısı	Kesim açısı
S1 S2	45°	60°
S3 S4	30°	45°
S5 S6	15°	30°
S7 S8	0°	15°

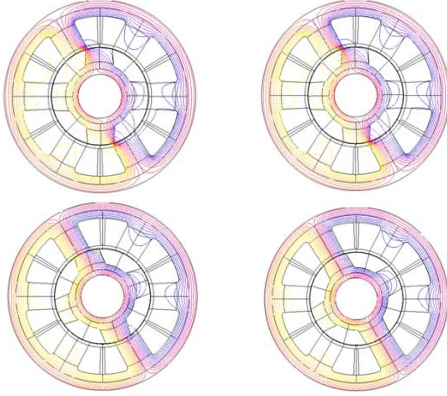


Şekil 11: Rotor pozisyonlarına göre akı yoğunlukları.



Şekil 12: Hizalı pozisyonda akı yoğunluğu.

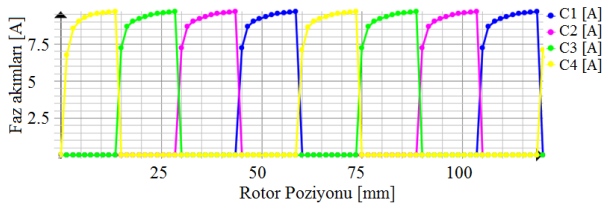
Şekil 13'de eş akı çizgilerinin rotor pozisyona göre değişimi verilmiştir.



Şekil 13: Rotor pozisyonuna göre eş akı çizgileri.

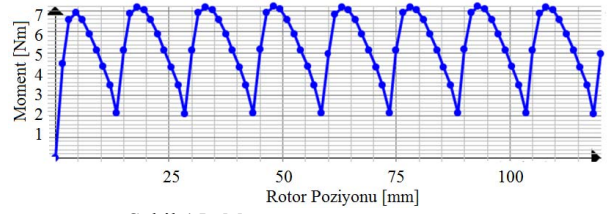
3.1.2. 8/6 ARM

Fazlara göre akım karakteristikleri Şekil 14'te verilmiştir. Faz akımları anahtar aktif olduğu anda yükselip bir süre sonra anahtar kapanana dek sabit kalmaktadır. Akımın maksimum değeri 9.68 A olarak ölçülmüştür.



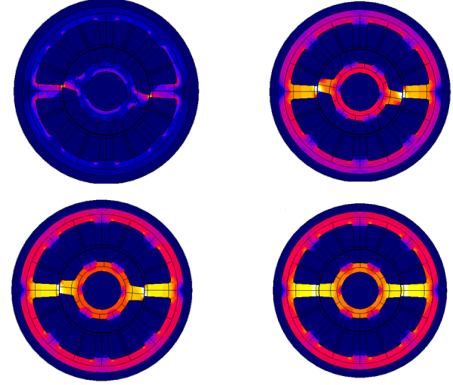
Şekil 14: Fazların akım karakteristikleri.

Momentin rotor pozisyonuna göre değişimi Şekil 15'te gösterilmiştir. Maksimum moment değeri 7.212 N.m minimum değer 2.12 N.m olarak ölçülmüştür.

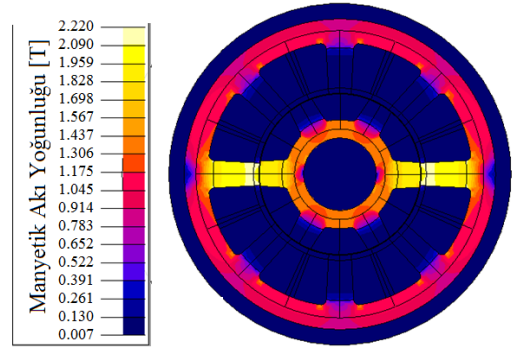


Şekil 15: Moment vs. rotor pozisyonu.

Akı yoğunluklarının rotor pozisyonuna göre değişimi Şekil 16'da dört adımda verilmiştir. Hizalı pozisyondaki akı yoğunluğu Şekil 17'de yer almaktadır ve akımın en yüksek değerini aldığı bölge olarak göze çarpmaktadır.

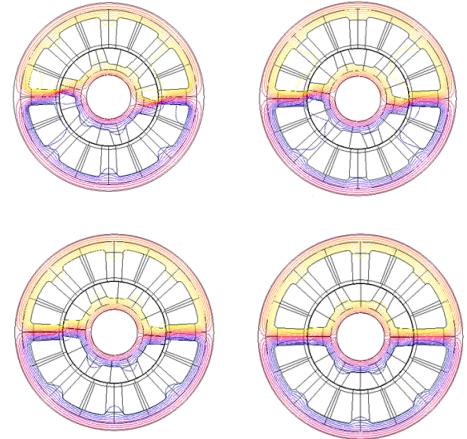


Şekil 16: Rotor pozisyonlarına göre akı yoğunlukları.



Şekil 17: Hizalı pozisyonda akı yoğunluğu.

Eş akı çizgilerinin rotor pozisyonuna göre değişimi dört adımda Şekil 18'de verilmiştir.



5. Sonuçlar

Bu bildiride aynı güç çıkışına sahip 6/4 ve 8/6 olarak farklı stator/rotor kombinasyonuna sahip iki motor tasarlanmıştır. Her iki yapıya sahip motor için de gerekli hesaplamalar doğrultusunda motor geometrileri elde edilmiştir. Elde edilen geometriler kullanılarak SEY ile yapılan analizler ışığında motorlar; akım karakteristikleri, moment çıkışları, akı yoğunlukları ve akı çizgileri bakımından incelenmiştir. Analizler sonucunda elde edilen akım ve moment değerleri tasarım aşamasında yapılan hesaplamalarla tutarlılık göstermiştir. Akı yoğunlukları ve eş akı çizgileri sayesinde her iki motor da rotor pozisyonuna göre ortaya çıkan manyetik davranışları açısından incelenmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda moment dalgalılığının stator/rotor kutup sayısı arttıkça azaldığını ve güç ve moment yoğunluklarının stator/rotor sayısı ile doğru orantılı olduğunu gösterilmiştir.

6. Kaynaklar

- [1] M. Krishnamurthy, C. S. Edrington, A. Emadi, P. Asadi, M. Ehsani and B. Fahimi, "Making the case for applications of switched reluctance motor technology in automotive products," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 21, no. 3, pp. 659-675, May 2006.
- [2] K. Masoudi, M. R. Feyzi and A. Masoudi, "Reduction of vibration and acoustic noise in the switched reluctance motor by using new improved stator yoke shape," 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Mashhad, 2013, pp. 1-4.
- [3] M. M. Alaei, E. Afjei and S. Ataei, "A New Resonant Driver for Switched Reluctance Motor," Electrical Engineering, 2007. ICEE '07. International Conference on, Lahore, 2007, pp. 1-3.
- [4] T. S. Low, H. Lin, S. X. Chen and K. T. Chang, "Design and analysis of 4-phase (in-hub) mini-switched reluctance motor for spindle motor in hard disk drive," Power Electronics and Drive Systems, 1995., Proceedings of 1995 International Conference on, 1995, pp. 645-650 vol.2.
- [5] M. Asgar, E. Afjei, A. Behbahani and A. Siadatan, "A 12/8 double-stator switched reluctance motor for washing machine application," Power Electronics, Drives Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 2015 6th, Tehran, 2015, pp. 168-172.
- [6] K. Kiyota and A. Chiba, "Design of Switched Reluctance Motor Competitive to 60-kW IPMSM in Third-Generation Hybrid Electric Vehicle," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, no. 6, pp. 2303-2309, Nov.-Dec. 2012.
- [7] Krishnan, R. (2001) "Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis and Application." Florida: CRC Press.
- [8] Miller, T.J.E. (2001) "Electronic Control of Switched Reluctance Machines" Newnes.
- [9] Xu Liu and Zaiping Pan, "Study on switched reluctance motor using three-phase bridge inverter: Analysis and comparison with asymmetric bridge," Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on, Wuhan, 2008, pp. 1354-1358.

Şekil 18: Rotor pozisyonuna göre eş akı çizgileri.

4. Sonuçların Karşılaştırılması

6/4 ve 8/6 olmak üzere farklı stator/rotor kombinasyonuna sahip her iki motor da aynı çıkış gücü verecek şekilde tasarlanmış ve bu doğrultuda gerekli hesaplamalar ve analizler yapılmıştır.

Çizelge 5'te giriş ve çıkış güçleri ile beraber verimlilikler gösterilmiştir.

Çizelge 5: Güç ve verimlilik karşılaştırması

	Giriş gücü (W)	Çıkış gücü (W)	Verimlilik (%)
6/4	2156	1535	71.2
8/6	2130	1510	70.9

Yukarıda görüldüğü üzere 8/6 motor aynı güç için daha az akım çekmesine rağmen 6/4 motordan daha az verimlidir. Buna sebep olarak 8/6'da bulunan fazla fazdaki anahtarlama kayıpları gösterilebilir.

Çizelge 6'da dış çap uzunlukları güç ve moment yoğunlukları ile beraber verilmiştir.

Çizelge 6: Güç ve moment yoğunlukları.

	Dış çap (mm)	Güç yoğunluğu (kW/m ³)	Moment Yoğunluğu (N/m ²)
6/4	123	127.49	608.84
8/6	116	143.35	673.53

Yukarıda görüldüğü üzere 8/6 motor 6/4 motora oranla hem güç yoğunluğu hem de moment yoğunluğu bakımından daha iyi bir sonuç vermiştir.

Güç yoğunluğuna bakıldığında 8/6 motorun 6/4'e göre 11.06% daha fazla avantaj sağladığı, moment yoğunluğuna bakıldığında ise yine 8/6 motorun 6/4'e oranla 9.6% daha avantajlı olduğu görülmektedir. Beklenildiği üzere stator/rotor kutup sayılarının artması ile aynı güç ve momenti elde etmek için daha küçük boyutlarda bir ARM tasarımı yapılabilir.

Çizelge 7'de çıkış momentlerinin maksimum ve minimum değerleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 7: Maksimum ve minimum moment değerleri.

	Maksimum moment (N.m)	Minimum moment (N.m)
6/4	7.33	2.14
8/6	7.212	2.12

Şekil 7'deki sonuçlar incelendiğinde maksimum ve minimum momentler arasındaki farklar göze alınarak 8/6 motorun 6/4 motordan 1.89% daha az dalgalı moment çıkışı verdiği görülmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda, stator/rotor kutup sayılarının artmasının moment dalgalılığında azalmaya yol açtığı sonucuna ulaşılabilir.