



Elektrikli Araçlar İçin Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Değiştirilebilir Manyetik Alan Uygulaması

Commutable Magnetic Field on Brushless Direct Current Motor for Electrical Vehicle

Hasan TIRYAKI¹, Alper Sefa ÇAĞIŞLAR², Abdurrahim AKGÜNDOĞDU³, İlhan KOCAARSLAN⁴

¹Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksek Okulu, 71450 KIRIKKALE

²Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 71450 KIRIKKALE

Başvuru/Received: 20/03/2016

Kabul/Accepted: 07/05/2016

Son Versiyon/Final Version: 15/06/2016

Öz

Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılmak üzere yüksek verimli, güç yoğunluğu yüksek, çevresel etkilerden mümkün olduğunca az etkilenen bir fırçasız doğru akım motorunun tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu alanda uluslararası düzeyde rekabet edebilecek, öncelikli olarak elektrikli araç yarışlarında yeni bir bakış açısı ile elektrikli motorların en büyük sıkıntısı olan negatif yönde indüklenen gerilimi azaltmaya yönelik çalışmalara yer verilmiştir. Stator ve rotor arasındaki mesafeyi değiştirerek motorun nominal değerlerini değiştirmek hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar, çalışmada anlatılan yöntemin dünyada yaygın olarak kullanılan fırçasız doğru akım motorlarının yüksek hız uygulamalarında da kullanılmasını sağlayabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler

“Fırçasız Doğru Akım Motoru, Zıt Elektromotor Kuvvet, Kalıcı Mıknatıs, Elektromanyetik Tasarım, Ters İndüklenme”

Abstract

This study was included in the design of the brushless direct current motor that for the using in electric vehicles which has high efficiency and high power density, little affected by environmental factors and priority was given to a new perspective with the largest shortage of electric motors, and it is devoted to efforts to reduce the voltage induced in the negative direction to compete at the international level in this area. Changing the distance between stator and rotor is targeted to change the motor nominal value. The obtained results have shown that the method used in the study also provides the use in high speed applications commonly used brushless direct current motors.

Key Words

Brushless Direct Current Motor, Back Electromotive Force, Permanent Magnet, Elektromagnetic Design , Back Induction

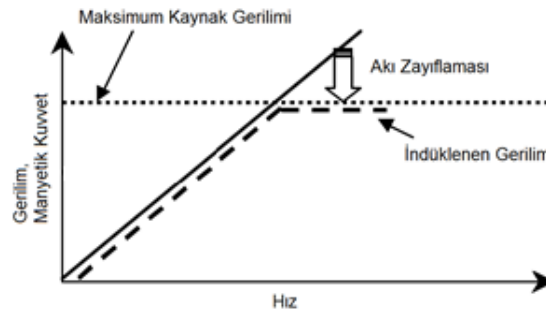
1.GİRİŞ

Doğru akım motorları endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Fırçalı modellerin bazı alanlarda kullanımının kısıtlı olması Fırçasız Doğru Akım Motorlarının öne çıkmasını sağlamıştır. Fırçalı tipteki motorların sürekli olarak bakıma ihtiyaç duyması, değişken koşullarda ve sürekli kullanılan alanlarda dezavantaj sağlamaktadır. Bu sebeple fırçasız doğru akım motorlarının geniş kullanım alanları vardır. Fırçasız doğru akım motorları yüksek performans değerleri ile ön plana çıkmaktadır. Yüksek moment ve eylemsizlik gerektiren uygulamalarda, dış rotorlu tipi olan fırçasız doğru akım motorları kullanılmaktadır. Araç silecek motoru, otomatik camlar, robotik, jeneratör, elektrikli araçlar, insansız hava araçları, beyaz eşya sektörü gibi birçok alanda bu tipteki motorlar kullanılmaktadır(Yedemale, 2003). Dış rotorlu uygulamalarda motor koruması ve sarsıntılara karşı görülen direnç gibi çeşitli dezavantajlar olmasına rağmen momentin doğrudan aktarımını (direct drive) sağlamaları nedeniyle

herhangi bir aktarım organına ihtiyaç duyulmaması diğer tip motorlara göre daha yüksek verim ihtiyacı olan uygulamalarda (özellikle elektrikli araçlarda) tercih edilmektedir. Bunun haricinde fırçasız doğru akım motorları için kullanılan motor sürücüler diğer motorlara nazaran daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Dış rotorlu fırçasız doğru akım motorlarının moment değerlerinin yüksek olması sebebiyle özellikle elektrikli araçlarda kullanılmalarına olanak sağlanır. İstanbul Üniversitesi'nde 2012 yılında başlayan "Elektrikli Binek Otomobilin Geliştirilmesi" projesi, binek araç konseptli bir aracın yerli olarak üretilmesine olanak sağlamıştır. Proje Türkiye'deki üniversiteler arasında üretilen ve başarılı bir şekilde 4650 km mesafelik Türkiye turu yapmış ilk ve tek elektrikli aracı olmakla birlikte öncelikli hedefi bu başarının tüm Türkiye'ye tanıtılması olmuştur. Bu sebeple projenin oluşumu aşamasında kullanılan elektrik motoru Fırçasız Doğru Akım Motoru olarak belirlenip motorun özellikleri (maksimum hız ve moment gibi) kullanım alanları göz önünde bulundurularak göre seçilmiştir.

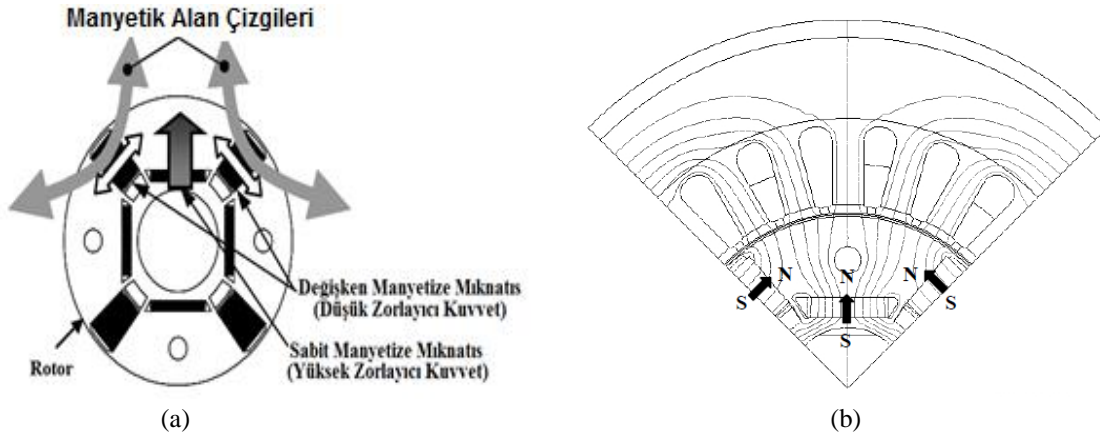
Dünya çapında gelişme sürecinde olan bu sektörde çeşitli ülkelerde elektrikli araçlar konusunda farkındalık yaratmak amacıyla çeşitli yarışmalar düzenlenmektedir. Çoğunlukla üniversite katılımlı olan bu yarışmalara ilginin artması Türkiye'de de bu yarışların düzenlenmesine zemin hazırlamıştır. Ülkemizde de uzun yıllardır gerçekleştirilen TÜBİTAK Alternatif Enerjili Araç Yarışları'nda 2014 yılından itibaren elektrikli otomobil (Elektromobil) kategorisinde yarışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada üniversite projesi olan MilAT (Milli Araç Tasarımı) 1453 Topluluğu elektromobil takımının aracında kullanılan elektrik motoru ele alınarak bu motordaki iyileştirme çalışmalarından bahsedilecektir. Bu tür motor uygulamalarında sisteme karşı oluşan yük, rotor ve stator arasındaki mesafeye bağlı olarak zıt bir kuvvet oluşturmaktadır. Radyal olan bu boşluk üzerindeki optimizasyon çalışmaları verimi arttırmayı sağlamıştır (Ajith, Bailey, McCleer, 1995). Kalıcı mıknatıslı motorlarda tork dalgalanmasını indirmek verimi önemli ölçüde etkilemektedir (Hanselman, D., 1994). Motorlarda boşta çalışma halinde rotorun dönüşü ile indüklenen gerilim verimi olumsuz etkiler. İndüklenen bu gerilim motor tasarımında dikkat edilen önemli bir etkendir (Ozturk, Toliyat, 2011). Şekil 1'de indüklenen bu gerilimin hızla bağlı değişimi görülmektedir (Kazuto, Yuki, Hashiba, Takahashi, Yasui, 2009);



Şekil 1. İndüklenen Gerilim-Hız grafiği.

Günümüzde kalıcı mıknatıslı motorlarda çeşitli değiştirilebilir manyetik alan uygulamaları bulunmaktadır (Kazuto, 2009). Bu uygulamalarda ters indüklenen gerilimi azaltmak için motora ait kalıcı mıknatıslara farklı mıknatıs çeşitleri ile manyetik zorlayıcı kuvvet (coercive force) oluşturulmuştur. Şekil 2'de bu şekilde oluşturulmuş motorun konfigürasyonu görülmektedir (Kazuto, 2009);



Şekil 2. (a) Değişken manyetik kuvvet hafızalı motorun konfigürasyonu (b) Manyetik Akı Çizgileri.

Bahsi geçen uygulamada köşe noktalarında 4 adet düşük zorlayıcı kuvveti olan yani maruz kaldığı manyetik alan kuvvetine göre mıknatıslanma miktarı değişen 4 adet yüksek zorlayıcı kuvveti olan mıknatıslar kullanılmıştır. Düşük zorlayıcı kuvveti olan mıknatıslar ile kalıcı mıknatıslara zorlayıcı manyetik alan kuvveti oluşturulmak istenmektedir. Rotoru içte olan motorlar için uygulanmıştır. Bu uygulamanın bazı olumsuz etkileri vardır. Düşük zorlayıcı kuvveti olan mıknatısların olduğu bölgelerde stator akı yoğunluğu olumsuz etkilenmiştir. Bu durum yüksek motor momentini azaltır ve akı kaybına yol açar. Sonuç olarak tetiklenen bu değerler motorun hızını arttırmasına rağmen verimi olumsuz etkilemektedir.

Bu çalışmada ise yukarıda bahsedilen uygulamadan farklı olarak fırçasız doğru akım motorları üzerinde fiziksel bir şekilde birkaç kademede stator ve rotorun arasındaki mesafeye bağlı olarak değiştirilebilir manyetik alan uygulaması yapılmıştır. Bu sayede ters indüklenme azaltılacak ve maksimum hız eşliği kademeli olarak değiştirilebilecektir.

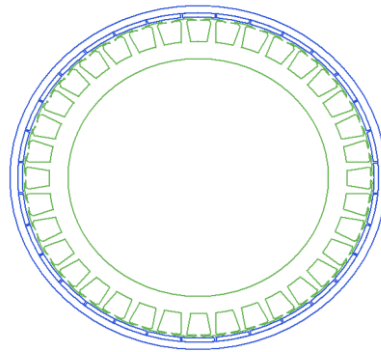
2.KULLANILAN FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNUN GENEL YAPISI VE MODELİ

Genel yapı olarak asenkron motorlarla benzerlik gösteren MilAT (Milli Araç Tasarımı) 1453 Topluluğu elektromobil takımının aracında kullanılan fırçasız doğru akım motorunda, durum değişkenlerine göre sürülebilmesi için konum (hall-effect) sensörleri kullanılmaktadır. Motor üç faz sargısına sahip olup kendisine ait temel özellikler Tablo 1’de gösterilmiştir;

Tablo 1. Kullanılan motorun özellikleri.

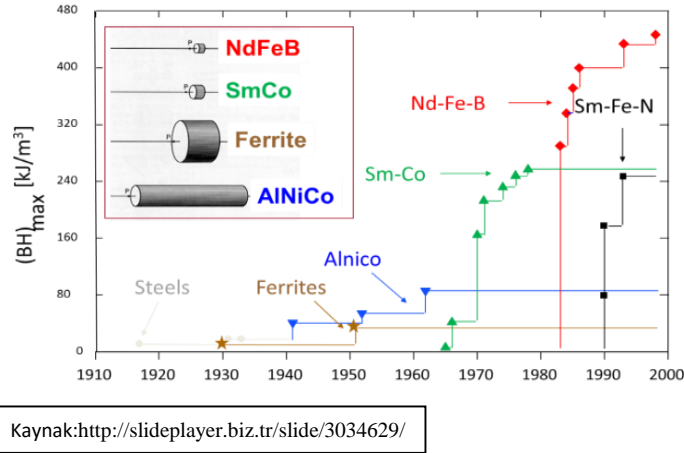
ÖZELİKLERİ	DEĞERLERİ
Çalışma Gerilim Aralığı	70-200V
Anma Çıkış Gücü	9 kW
Kutup Sayısı	32
Yuva Sayısı	36
Nominal Devir	810 rpm
İşletim Sıcaklığı	100 °C
Rotor Pozisyonu	Dışsal
Marka ve Model	MITSUBA M2096 D-II

Kullanılan motorun modellenmesi ANSYS Maxwell programının RMXprtDesign modülünde gerçekleştirilmiştir. Motorun bütünüyle elektriksel ve mekanik modellenmesi uygulanmıştır. Gerçeğe olabildiğince en yakın modelleme gerçekleştirilmiş ve bundan sonraki bölümde kullanılan grafik ve değerler bu modellemeye göre yapılmıştır. Bahsi geçen motor modeli Şekil 3’de görülmektedir;



Şekil 3. ANSYS Maxwell’de modellenen fırçasız doğru akım motoru.

Bahsi geçen motorda yüzeysel eğimli çap boyu manyetize edilmiş mıknatıs olarak adlandırılan mıknatıs tipi kullanılmıştır. Sert manyetik malzemelere duyulan ihtiyaç bu konudaki gelişmeleri beraberinde getirmiştir. Mıknatıs çeşitleri ve bu mıknatısların birbirlerine göre verdikleri maksimum enerji farklarının yıllar içindeki gelişimleri göz önünde bulundurularak Şekil 4’de gösterilmiştir;



Şekil 4. Mıknatıs çeşitlerinin yıllara göre gelişimi ve taşıdıkları güç miktarları.

3. DEĞİŞTİRİLEBİLİR MANYETİK ALAN TANIMI

Elektrikli araç yarışları için tasarlanan prototip modellerde uygulanacak olan Değiştirilebilir Manyetik Alanlı fırçasız doğru akım motoru, uygulanan aracın hız eşliğini arttırmaya yönelik bir amaç sağlayacaktır. Çalışmada aracın veriminin önceliğinin olmadığı durumlarda aracı rotor dönüş hızına bağlı olarak endüvi kısmında oluşacak olan zıt elektromotor kuvvetinin azaltılması hedeflenmektedir. Belirlenecek verim-hız eğrisinin tepe değerinde sert manyetik malzemeler tarafından uygulanan manyetik akının değişimi hareketli bağlantı elemanları vasıtasıyla gerçekleştirilecektir. Böylelikle stator üzerindeki zıt elektromotor kuvvetinin (zıt-EMK) azaltılması hedeflenmektedir.

3.1. Manyetik Etki Hesabı

Mıknatıslar tarafından oluşturulan zıt elektromotor kuvveti, stator dışında rotor hareketine bağlı olarak indüklenen gerilime eşittir ve aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Hendershot, Miller, 1994);

$$e_T = \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \omega_m \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \quad (1)$$

Burada Φ statorda hiçbir akan akım olmadığı durumda mıknatısa bağlı akı, e_T indüklenen gerilim, ω_m açısal hız, N sarım sayısı, t zaman indisi ve ξ ise rotor pozisyonudur. Akı yoğunluğuna bağlı olarak elde edilecek akının eşitliği şu şekildedir (Hendershot, Miller, 1994);

$$\Phi = N R L \int_{\theta_2}^{\theta_1} B(\theta) d\theta \quad (2)$$

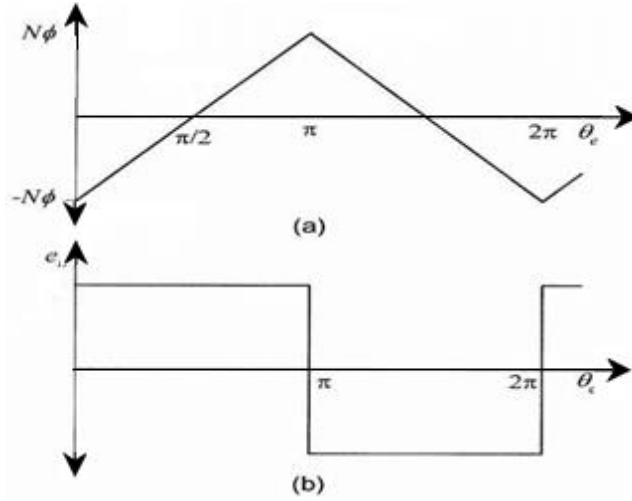
Burada B etkin diş üzerindeki mıknatıslar tarafından doğan akı yoğunluğudur. R eksenel stator yarıçapı, L eksenel yöndeki derinlik, N_s yuva sayısı, θ_1 ve θ_2 bir yuva üzerindeki bir kutbun geçiş pozisyonları olarak ifade edilmektedir (Hendershot, Miller, 1994). Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'den yararlanılarak aşağıdaki ifadeye ulaşılabilir;

$$e_T = N \omega_m R L \frac{\partial}{\partial \xi} \int_{\theta_2}^{\theta_1} B(\theta) d\theta \quad (3)$$

$V = \omega_m R$ olup motorun çizgisel hız değerini gösterir. B_1 ve B_2 mıknatısların birbirinin zıttı olan manyetik akı yoğunluklarıdır. ξ ve θ değerleri eşit veya sabit bir farklılık var ise indüklenen gerilim Eşitlik 4'deki gibi gösterilir;

$$e_T = N V (B_2 - B_1) L \quad (4)$$

Bir periyotta N sarımlı bir bobin üzerinde ki akı ve endüklenen gerilim Şekil 5'de verildiği gibidir (Hanselman, 2003);



Şekil 5. Rotor pozisyonuna bağlı (θ_e) (a) N sarımlı bobindeki akı miktarı (b) Endüklenen gerilim.

3.2 Sürekli Mıknatıs Mesafe Etkisi

Özel bir tasarım oluşturularak motorda kalkış anındaki yüksek moment gereksinimini sağlamak için Neodymium N50M sınıfı mıknatıslar kullanılmıştır ve bu mıknatısların özellikleri Tablo 2’de verildiği gibidir.

Tablo 2. N50M Tipi Neodymium Mıknatıs Özellikleri.

Derece	Çalışma Sıcaklığı Tw (°C)	(Artık Mıknatıslanma) Kalıcı İndüksiyon				Artık Mıknatıslanma Giderici Kuvvet (Zorlayıcı Kuvvet)				Maksimum Enerji Çarpımı	
		Br(T)		Br(kGs)		Hcb		Hcj		(BH)max	
		Normal	Min.	Normal	Min.	kA/m	kOe	kA/m	kOe	kJ/m ³	MGOe
N50M	100	1.45	1.39	14.5	13.9	≥1050	≥13.2	≥1114	≥14	374-406	47-51

Kaynak: <https://www.kjmagnetics.com/specs.asp>

Sert manyetik malzemelerin mesafeye göre sağladıkları manyetik yoğunluk değişmektedir. Uygulanması hedeflenen fırçasız doğru akım motorunda yüzey eğimli çap boyu manyetize edilmiş mıknatıs tipi kullanılmıştır. Bu mıknatısa göre olan değişimin hesaplaması aşağıdaki eşitlikte verildiği gibidir (Camacho, Sosaa, 2013).

$$B(z) = \frac{\mu_0 M}{\pi} \left[\arctan \frac{ab}{(z-c)\sqrt{a^2+b^2+(z-c)^2}} - \arctan \frac{ab}{(z+c)\sqrt{a^2+b^2+(z-c)^2}} \right] \quad (4)$$

Uzaydaki herhangi bir nokta için manyetik alan hesaplamaları aşağıdaki eşitliklerde gösterildiği gibidir (Camacho, Sosaa, 2013);

$$B_x(x, y, z) = \frac{\mu_0 M}{4\pi} \ln \frac{F_2(-x, y, -z)F_2(x, y, z)}{F_2(x, y, -z)F_2(-x, y, z)} \quad (5)$$

$$B_y(x, y, z) = \frac{\mu_0 M}{4\pi} \ln \frac{F_2(-y, x, -z)F_2(y, x, z)}{F_2(y, x, -z)F_2(-y, x, z)} \quad (6)$$

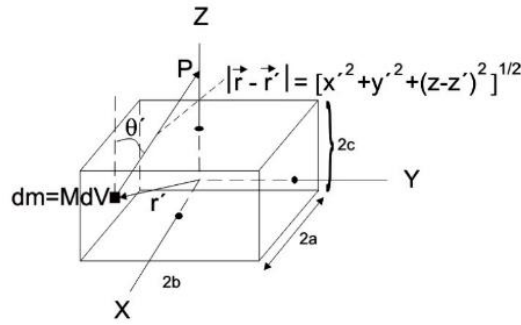
$$B_z(x, y, z) = -\frac{\mu_0 M}{4\pi} [F_1(-x, y, z) + F_1(-x, y, -z) + F_1(-x, -y, z) + F_1(-x, -y, -z) + F_1(x, y, z) + F_1(x, y, -z) + F_1(x, -y, z) + F_1(x, -y, -z)] \quad (7)$$

F₁ ve F₂ fonksiyonları şu şekilde tanımlanır (Camacho, Sosaa, 2013);

$$F_1(x, y, z) = \arctan \frac{(x+a)(y+b)}{(z+c)\sqrt{(x+a)^2+(y+b)^2+(z+c)^2}} \quad (8)$$

$$F_2(x, y, z) = \frac{\sqrt{(x+a)^2+(y-b)^2+(z+c)^2} + b - y}{\sqrt{(x+a)^2+(y+b)^2+(z+c)^2} - b - y} \quad (9)$$

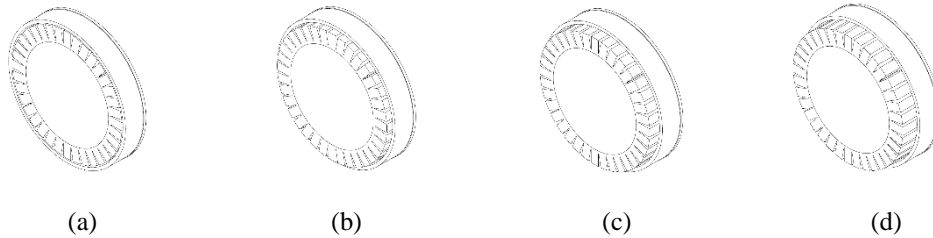
Şekil 6’da yukarıda hesaplamaları verilen mıknatısa ait uzayın gösterimi yapılmıştır. μ_0 havanın geçirgenliği, X,Y,Z üç boyutlu uzayın koordinat eksenleri, r mıknatısın merkezi, r’ üzerine düşecek manyetik akı yoğunluğu hesaplanacak noktayı, x, y, z ise hesaplanacak noktanın mıknatıs merkezinden kendi koordinatlarındaki mesafeleri ifade etmektedir. 2a, 2b, 2c mıknatısın ölçülerini göstermektedir (Camacho, Sosaa, 2013).



Şekil 6. Blok mıknatıs alan hesaplama şeması.

4. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNA UYGULANACAK SİSTEM

Fırçasız Doğru Akım Motoruna uygulanacak olan hareketli sistemin altyapısı üzerinde şu anda çalışılmakta ve çoğunluğunu mekanik sistemler oluşturmaktadır. Bu çalışmada bahsi geçen sistemin fiziksel olarak uygulanması durumunda elde edilecek sonuçlar simule edilmektedir. Sistemin oluşumunu sağlayacak temel yapı hareketleri 3 kademeli olarak belirlenmiştir. Şekil 7’de bu kademelere göre statorun ve rotorun alacakları pozisyonlar gösterilmiştir;



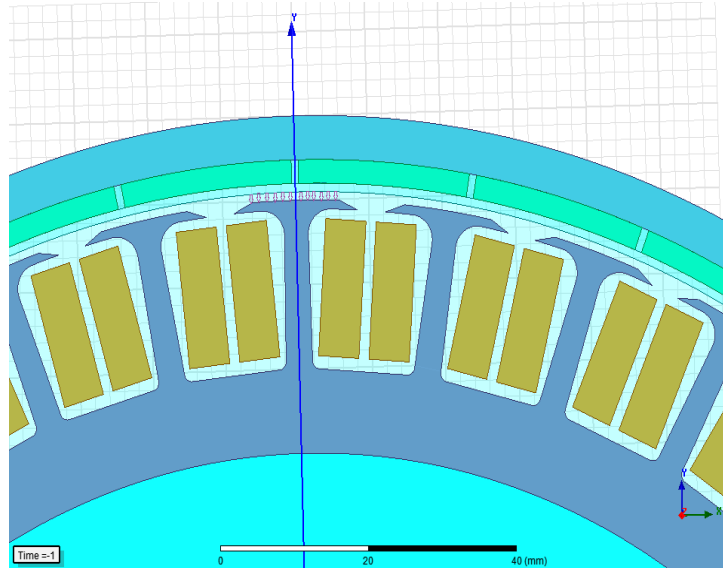
Şekil 7. (a) Rotorun olağan durumu (b) 1. Kademeye geçtikten sonraki durumu (c) 2. Kademeye geçtikten sonraki durumu (d) 3. Kademeye geçtikten sonraki durumu

Bu kademelerde rotorun stator kısmından mekanik bir tasarım ile ayrılması planlanmaktadır. Tasarlanan sistemin sağlayacağı kademelere göre rotorun statorda kalan ölçüleri aşağıdaki gibidir;

Tablo 3. Kademelere göre stator ve rotor pozisyonu.

PARÇA	ROTOR POZİSYONU			
	İLK DURUM	1. KADEME	2. KADEME	3. KADEME
Stator Uzunluğu	40mm	40mm	40mm	40mm
Rotorun Dışarda kalan uzunluğu	0mm	5mm	15mm	25mm

Stator ve rotor arasında hava boşluğu (air gap) olarak adlandırılan bir bölüm bulunur. Motor tasarlanırken bu alanın etkilediği manyetik akı yoğunluğu göz önünde bulundurulmalıdır. Bu boşluk indüklenen gerilimi ve bobinler üzerinde oluşan akımı etkiler. Motorda uygulanacak olan sistemin hava boşluğu her kademede 3 eksenli olarak değişmektedir. Bir önceki bölümde mesafenin bobinler üzerinde oluşturduğu manyetik akı hesabı gösterilmiştir. Modellenen fırçasız doğru akım motorunun ilk durumunda bu hava boşluğu 1,5 mm olarak belirlenmiştir ve Şekil 8’de modellenen motorun hava boşluğu gösterilmiştir;

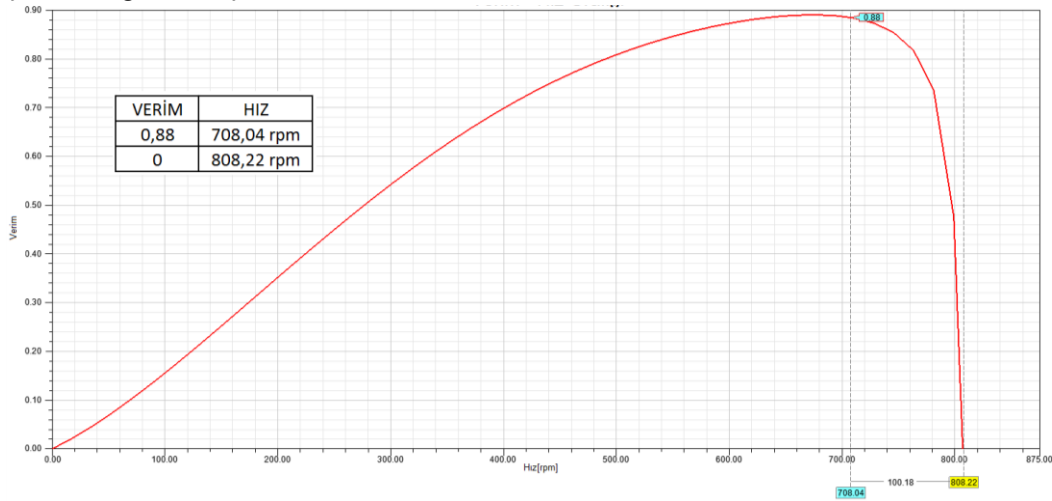


Şekil 8. ANSYS Maxwell 2D Design ile modellenen motorun hava boşluğu.

“

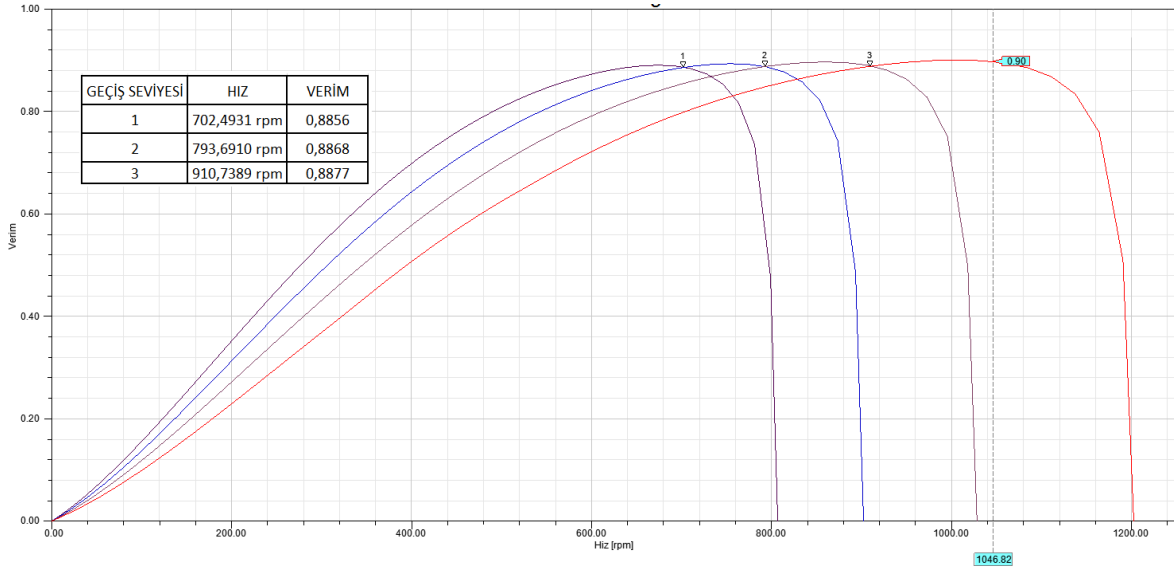
5. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Modellenmesi yapılan fırçasız doğru akım motorunun hareketli rotor sisteminin uygulandığı varsayılarak ANSYS Maxwell programının analiz bölümünde gerekli analizler yapılmıştır. İlk duruma göre verim eğrisinin tepe noktası ve maksimum hız değeri belirlenmiş ve Şekil 9’da gösterilmiştir;



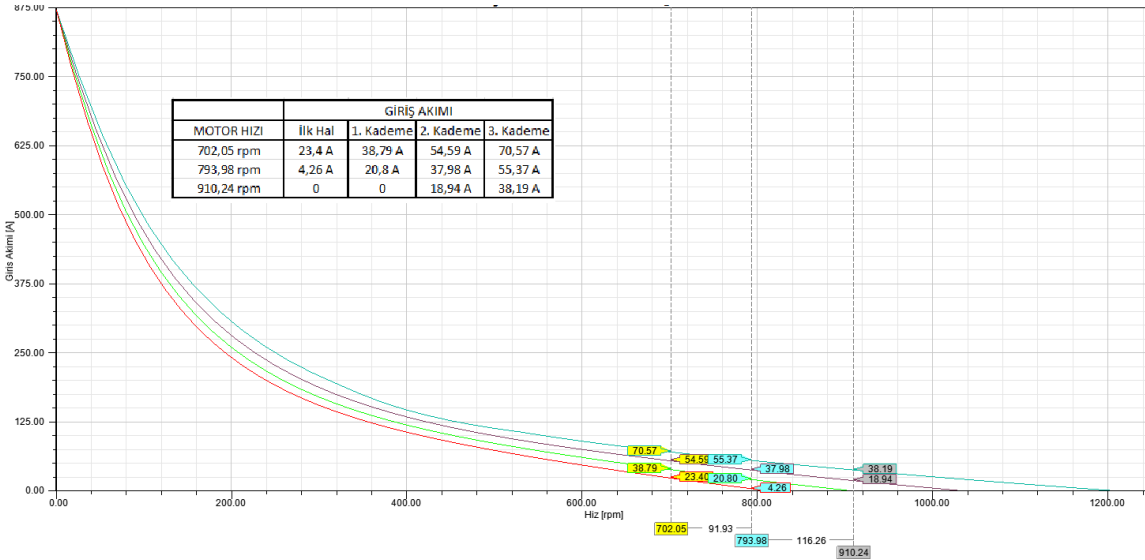
Şekil 9. İlk durumda Verim-Hız grafiği.

Buna göre geçiş noktaları motor veriminin maksimum olduğu noktalardan sonra gelecek kademe değişimi ile hızın artması beklenmektedir. Rotor pozisyonunun kademe değiştirmesi gerektiği düşünülmüştür. Bu yaklaşımla kademeler arasında yapılacak geçiş noktalarının, Şekil 10’da gösterildiği gibi olması gerektiği saptanmıştır;



Şekil 10. Modellenen sisteme göre uygulanan rotor pozisyonu için Verim-Hız eğrileri.

Şekil 10’da gösterilen geçiş noktalarında giriş akımında oluşan değişiklikler Şekil 11’de gösterilmiştir;



Şekil 11. Kademelere göre Giriş Akımı-Hız eğrileri.

Şekil 11 göz önünde bulundurularak sistemin çektiği toplam akımda değişiklik olduğu görülmüştür. Bobinlere karşılık gelen zıt elektro motor kuvvetinin azalması, çekilen toplam akımı arttırmış olmasına rağmen ulaşılabilecek maksimum hız aralığını arttırdığı gözlenmiştir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada fiziksel hareket sonucu oluşturulan değiştirilebilir manyetik alan uygulaması incelenmiştir. Her kademe daha farklı özelliklere sahip bir motor ortaya çıkmıştır. Bu durum değişken hızlı motorun (variable speed motor), değiştirilebilir manyetik alan sisteminin uygulanmasıyla elde edilebileceğini göstermiştir. Sonuç olarak uygulanması düşünülen değiştirilebilir manyetik alan sistemi, hız faktörünün önemli olduğu yarış organizasyonlarında veya binek ve ticari elektrikli araçlarda kullanılabileceğini ortaya çıkarmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 52033 numaralı ve “Değiştirilebilir Manyetik Alanlı Fırçasız DC Motor ve Sürücüsünün Üretimi” başlıklı GÜDÜMLÜ Projesi ile desteklenmiştir.

REFERANSLAR

Ajith H. Wiyenayake, J.M. Bailey, Patrick J. McCleer.(1995). Desing Optimization of an Axial Gap Permanent Magnet Brushless DC Motor For Electric Vehicle Applications. IEEE. doi: 10.1109/IAS.1995.530366.

Camacho J. M., V. Sosaa (2013). Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry. Revista Mexicana de Fisica E 59. Universidad Autonoma de Yucat ´ an.

Hanselman Dr. Duane.(2003). Brushless Permanent Magnet Motor Design(2 Edition). Magna Physics Publishing. ISBN: 1-881855-15-5. USA: Lebanon.

Hanselman, D.(1994). Minimum torque ripple, maximum efficiency excitation of brushless permanent magnet motors. IEEE . doi: 10.1109/41.293899.

Hendershot Jr., T.J.E Miller.(1994). Desingn of Brushless Permenant-Magnet Motors. Magna Physics Publishing. ISBN: 1-881855-03-1. USA: Hillsboro.

Kazuto Sakai, Kazuaki Yuki, Yutaka Hashiba, Norio Takahashi, Kazuya Yasui.(2009). Principle of the Variable-Magnetic-Force Memory Motor. IEEE. doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382812.

Ozturk, S.B, Toliyat, H.A (2011). Direct Torque and Indirect Flux Control of Brushless DC Motor. IEEE. doi: 10.1109/TMECH.2010.2043742.

Yedemale P., (2003), Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals(App. Note: DS00885A).USA:Microchip Technology Inc.

<http://slideplayer.biz.tr/slide/3034629/> (Son erişim tarihi 25.03.2016)

<https://www.kjmagnetics.com/specs.asp> (Son erişim tarihi 05.04.2016)