

Yüzey Mıknatıslı Doğru Akım Motor Tasarımı

Design Of Surface Mounted Permanent Magnet Machines

Tayfun GÜNDOĞDU, Güven KÖMÜRĞÖZ

Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
tayfun.gundogdu@gmail.com, komurgoz@itu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada rotoru yüzey mıknatıslı üç farklı tip kalıcı mıknatıslı doğru akım motorunun (KMDAM) tasarım ve analizi yapılmış; elde edilen hız, verim, moment ve hava aralığı akı dağılımları incelenip, kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Tasarlanan makinaların birbirleriyle kıyaslanabilmesi için temel motor özelliklerinin yanı sıra aynı malzemelerden yapılmış, aynı geometrik ölçülere sahip mıknatıslar kullanılmıştır. Girdap akım etkisi, moment-hız karakteristikleri ve manyetik analizi de dahil olmak üzere, farklı rotor yapısındaki yüzey mıknatıslı üç motorun anma akımı, gerlimi, hızı, moment ve verimi MAXWELL programı kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışma, yüzeyi kalıcı mıknatıslı (KM) rotorlu motorların temel yapısıyla, manyetik özelliklerinin incelenmesi ve birbirleriyle kıyaslanması açısından faydalı bir kaynak olacaktır.

Abstract

In this study design and analysis were made in three different types of surface mounted permanent magnet direct current machines (PMDCM); speed, efficiency, torque and air-gap flux density which are obtained from the analysis were examined and were compared among themselves. The presented machines are designed as having the same geometrical dimensions and the same materials for comparison. The main machine rated current, voltage, speed, torque, efficiency and etc. of three surface mounted permanent magnet machines which have different rotor structures; including eddy current effect, torque-speed characteristics and magnetic analysis are investigated using MAXWELL program. This study will be a helpful resource in terms of examination and comparison of the basic structure and magnetic features of the surface mounted Permanent Magnet (PM) machines.

1. Giriş

Kalıcı mıknatıslar ve güç elektroniği elemanlarındaki önemli gelişmeler bu elemanların boyutlarının küçülmesini, ucuzlamasını ve daha verimli hale gelmesini sağladığı için kalıcı mıknatıslı motorların önemi gün geçtikçe artmaktadır. KM motorlar günümüzde kullanılan en yaygın motorlar değildir ancak, kompaktlık, yüksek güç yoğunluğu, yüksek moment, yüksek ivme/moment oranı, kolay sürülmesi ve

yüksek verim karakteristiklerinden dolayı, maliyeti düşüktüğü zaman içerisinde en yaygın motor haline gelecektir [1].

Kullanım alanına göre (sabit moment, sabit hız, sabit güç) bir çok farklı yapıda KM motor yapısı mevcuttur. Açık literatürdeki son çalışmalar, bir çok araştırmacı ve mühendisin KM motor tasarımı üzerine çalışmaya başladığını göstermektedir. Dajaku ve Gerling [2] tarafından yapılan bir çalışmada hibrit araçlarında kullanılan, farklı yapıdaki KM motorların parametreleri ve elektromekanik momentleri ANSYS programı kullanılarak incelenmiştir. Başka bir çalışmada, yüzey mıknatıslı KMDAM (kalıcı mıknatıslı doğru akım motoru) tasarımını optimize etmede yeni bir yaklaşım incelenmiştir [3]. KM motorların analitik hesaplanması, modellenmesi ve optimizasyonu üzerine başka çalışmalar da yapılmıştır [4-7].

Bu çalışmada, KMDAM'ların farklı mıknatıs konum ve şekillerine göre, sabit manyetik devre ölçüleri, güç ve aynı malzemeler kullanılarak incelenmesi MAXWELL programı kullanılarak yapılmıştır. Kıyaslama yapabilmek için tüm motorlarda farklı geometrik yapıda, aynı boyutta ve aynı kalıcı mıknatıs malzemesi kullanılarak, üç farklı KMDAM'in tasarımı yapılmıştır. Diğer yandan farklı rotor geometrisine sahip olan KMDAM'lar üzerine bir çok çalışma vardır ancak, bu çalışmada yapıldığı gibi mıknatıs geometrilerinin analizi ve kıyaslanmasını bir arada veren bir çalışmaya rastlanmamıştır.

2. Kalıcı Mıknatıslı Makinalar

KM'lerin elektrik makinalarında kullanılmasının yararları aşağıdaki gibi özetlenebilir [8]:

- Uyarım sistemi için enerji harcanmaz ve dolayısıyla verimin düşmesine neden olan uyarım kayıpları yoktur,
- Yüksek moment ve/veya çıkış gücü,
- Daha iyi dinamik performans,
- Daha basit yapı ve kolay bakım,
- Bazı makina tiplerinin maliyetinde azalma.

KM motorun statorunda klasik üç faz sargıları mevcuttur, rotorunda ise yüzeye yerleştirilen ya da rotora gömülen kalıcı mıknatıslar mevcuttur [2]. Bu motorlar geniş ölçüde hız kontrolü gerektiren; bilgisayar disk sürücülerin (CD-ROM, DVD), CD-video-kaset çalarlar, fotokopi makinası, lazer yazıcı, tarayıcı, fan gibi ofis araçları, endüstriyel robot, robotik kol gibi cihazlarda yaygın bir şekilde kullanılırlar.

2.1. Kalıcı Mıknatıslar (KM)

KM'ler elektromıknatıslarla, mıknatısiyet açısından aynı etkiyi gösterirler; bu yüzden elektrik makinalarında uyarıtıcı sağlamak için yaygın bir şekilde kullanılırlar. KM'ler manyetik enerjiyi depolayıp, bu enerjiyi makinanın işletimi sırasında harcamadıkları için kullanılışlıdır.

Günümüzde elektrik motorlarında en yaygın olarak kullanılan KM'ler şunlardır [8]:

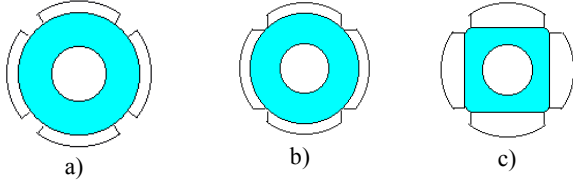
- Alnicolar : Al, Ni, Co, Fe;
- Seramikler (Feritler): Barium Ferit ve Strontium;
- Nadir toprak mıknatısları: Samarium-Cobalt (SmCo), Neodymium-Iron-Boron (NdFeB).

Yüksek akı yoğunluğu ve düşük sıcaklık değişimi bakımından seramik mıknatıslara göre alnico mıknatıslar daha avantajlıdır. Ancak; seramik mıknatıslara göre alnico mıknatısların mıknatıslığın bozulmasına daha düşük direnç göstermesine rağmen maliyetleri daha yüksektir. Nadir toprak mıknatısları çok iyi manyetik özellik gösterir ancak genellikle alnico ve seramik mıknatıslara göre daha pahalıdır.

2.2. Kalıcı Mıknatısların Konumu

Şekil 1, üç tip yüzey mıknatıslı KM motorun temel yapılarını göstermektedir. Temel olarak mıknatıslar rotorun yüzeyine yerleştirildikleri gibi rotor demirinin boyunduruk ve gövdesine de gömülebilirler. Ayrıca rotora bağlı olan mıknatıs konumları iç rotorlu ve dış rotorlu olarak da değişebilir. Bu çalışmada üç yüzey rotorlu KM motor tasarımları yapılmıştır.

Rotor yapısı ve rotora yerleştirilen mıknatısların konumunun motorun yapısına önemli etkileri vardır. Hava aralığındaki akı yoğunluğunu homojen yapmak ve daha düzgün akılar elde etmek için rotor yüzeyine yerleştirilecek mıknatısların yay şeklinde olması gerekmektedir. Bu da mıknatısların imalatında maliyeti artırmaktadır. Ancak gömülü tip mıknatıslı rotorlarda ise dikkörtgen şeklinde mıknatıslar kullanılacağından maliyeti daha ucuzdur.



Şekil 1: Yüzey mıknatıslı KM motorun farklı rotor yapıları; a) rotor miline dik olan yüzey mıknatıslar, b) rotor miline paralel olan yüzey mıknatıslar, c) Ekmek biçimli mıknatıslar [9].

3. Matematiksel Modelleme

Sistem simülasyonu ve performans değerlendirmesi için elektrik makinaları doğru bir matematiksel modele ihtiyaç duyarlar. KM motorları elektrik enerjisini önce manyetik enerjiye daha sonra da mekanik enerjiye çevirirler. Manyetik enerji, moment üretmede çok önemli rol oynar. Bu yüzden manyetik enerjiyi formüle etmek gerekmektedir. Bu enerjiyi formüle edebilmek için, manyetik vektör potansiyelinin manyetik alan şiddetine bağlı denklemini bilinmelidir. Bu denklemde de moment değerine ulaşılabilir. Hıza bağlı iki boyutlu manyetik alan denklemini aşağıdaki gibi ifade edilebilir [10].

$$\nabla \times v \nabla \times A = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla V + \nabla \times H_c + \sigma V \times \nabla \times A \quad (1)$$

Burada H_c kalıcı mıknatısın manyetik alan şiddeti, v dönen kısımların hızı, A manyetik vektör potansiyel, V elektriksel potansiyel, J_s kaynak akım yoğunluğu, σ özgül manyetik dirençtir. Yukarıdaki denklemin çözümünde SEY'e dayanan Maxwell programı kullanılmıştır. Böylece doğrudan moment değerine ulaşılabilir.

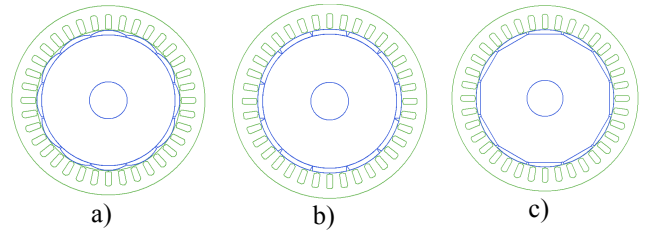
4. KMDA Motorların FEM Analizi

Bir KM motorun hava aralığındaki akı dağılımının detaylı bilgisi, motorun moment ve verim karakteristiklerinin doğru tahmininde çok önemli rol oynar. Çok basit geometriler için manyetik akı dağılımı analitik olarak hesaplanabilir. Çoğu durumda manyetik akı dağılımı; Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), Sonlu Farklar Yöntemi (SFY) veya Sınır Elemanları Yöntemi gibi nümerik metodlarla elde edilir.

Bu çalışmada, tasarlanan KMDA motorların manyetik analizi Maxwell 2D programı kullanılarak incelenmiştir. Simülasyon aşığıdaki adımlar kullanılarak tamamlanmıştır;

- 1) Geometrik model oluşturma,
- 2) Motorun yapısını oluşturan malzemelerin atanması,
- 3) Sınır koşullarının ve ağ oluşturma işleminin belirlenmesi,
- 4) Elektromanyetik uyarma kaynaklarının belirlenmesi (sargılara akımların atanması),
- 5) Hesaplanacak diğer büyüklüklerin belirlenmesi, (kuvvet, moment, ve kaçak akı gibi),
- 6) Çözümleme işleminin başlaması,
- 7) Sonuçların incelenmesi.

Bu adımların tamamlanmasının ardından Şekil 2'de verilen genel motor yapıları elde edilir ve aynı şekiller üzerinden manyetik akıların izledikleri yol, akı yoğunlukları, şiddetleri ve depo edilen manyetik enerjiler incelenebilir.



Hs0	0.7	mm	0.7mm
Hs1	0.7	mm	0.7mm
Hs2	13	mm	13mm
Bs0	1.2	mm	1.2mm
Bs1	6	mm	6mm
Bs2	7	mm	7mm
Rs	2	mm	2mm

Şekil 2: Tasarlanan motorların genel görünümü ve oluk boyutları [9].

5. Motor Geometrisi

5.1. Tasarılan KM Motorların Parametreleri

Bu çalışmada, 12 kutuplu rotor nüvesi NdFeB mıknatıslarından ve 36 oluklu stator nüvesi Çelik 1008 malzemesinden yapılmış olup stator oluklarına bakır bobinler yerleştirilmiştir. Tüm analizler sabit güç değerine (160 W) göre yapılmıştır. Bu nedenle motorların hız değişimleri 220 ile 224 d/d arasındadır. Tasarılan motorların boyutları; akım cinsine, anma hızına, motor sarğı katsayılarına ve motorun gücü gibi büyüklüklere bağlıdır.

Tasarılan motorların genel geometrisi Şekil 2’de verilmiştir. Tasarılan motorların anma değerleri, stator ve rotor geometrileri Tablo 1-3’de verilmiştir. Motorların farklı bölümleri için kullanılan malzemeler Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 1: Tasarılan tüm motorların parametreleri

Anma Çıkış Gücü (kW)	0.16
Anma Gerilimi (V)	24
Kutup Sayısı	12
İstenen Anma Hızı (d/d)	160
Sürtünme Kayıpları (W)	1,88235
Rüzgar Kayıpları (W)	0.833706
Rotor Pozisyonu	İçsel
Yük Türü	Sabit Güç
İşletim Sıcaklığı (°C)	75

Tablo 2: Statorun geometrik parametreleri

Stator Oluk Sayısı	36
Statorun Dış Çapı (mm)	202
Statorun İç Çapı (mm)	150
Stator Nüvesinin Uzunluğu (mm)	66
Stator Nüvesinin İstif Faktörü	0.97
Çelik Tipi	Çelik 1008

Tablo 3: Rotorun geometrik parametreleri

Hava Boşluğu (mm)	0.6
İç Çap (mm)	40
Rotor Uzunluğu (mm)	66
Demir Nüvenin İstif Faktörü	0.97
Çelik Tipi	Çelik 1008
Mekanik Kutup Katsayısı	0.92
Elektriksel Kutup Katsayısı	0.934872
Maks. Mıknatıs Kalınlığı (mm)	5
Mıknatıs Genişliği (mm)	35,6846
Mıknatıs Tipi	NdFeB35

Tablo 4: Kullanılan malzemeler

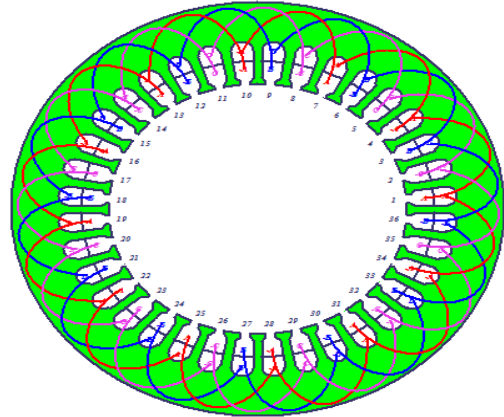
Stator	Çelik 1008
Rotor	Çelik 1008
Stator İletken Tipi	Bakır
Kalıcı Mıknatıs Tipi	NdFeB35
Hava Boşluğu	0.6 mm
Mil	Paslanmaz Çelik

5.2. Sargı Topolojisi

Elektrik makinalarının çalışma prensibi; makinanın sargılarından akan akımın oluşturduğu manyetik alana ve manyetik alanların birbirleriyle olan etkileşimi temelinde dayalıdır. İletken boyutlarına, ağırlığına, verime ve motorun güç yoğunluğuna bağlı olarak çok çeşitli yapıda sargı tipleri kullanılabilir. Bu çalışmada, tüm motorlar için dağıtılmış iki tabakalı sargı tipi kullanılmıştır. Makinanın sargı topolojisinde

dikkat edilecek en önemli unsurlardan biri de; stator sargılarında üretilen manyetomotor kuvvetin (MMK) olabildiğince sinüzoidal olmasıdır.

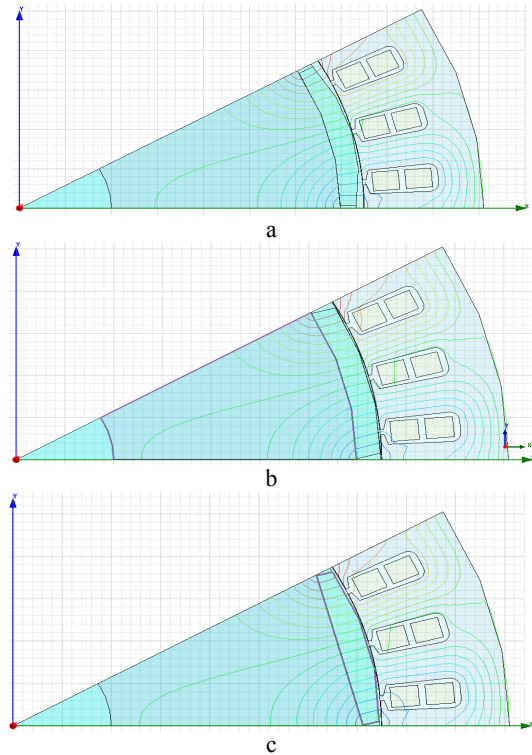
Bu çalışmada, motorlardaki faz sayısı üç ve her oluktaki sargı sayısı 40 olarak tasarlanmıştır. Şekil 3’de stator bobinleri ve bobinlerin iki tabakalı yapısı net bir şekilde görülmektedir. Tasarılan motorlar altı transistörden oluşan bir devre ile sürülür. Devrede kullanılan bu transistörlerin amacı komütasyonu sağlamaktır. Her komütasyon sırasında motor statorunun sadece ilk bobini pozitif gerilimle, ikinci bobini negatif gerilimle yüklenir. Bu devre sayesinde elde edilen kare dalga ile motor kesintiye uğramadan çalışır [11].



Şekil 3: Motorların stator ve bobin yapısı

6. Analiz Sonuçları

Makina parametreleri ve elektromanyetik moment hususları elektrik makinalarının tasarımı ve analizi için çok önemlidir.



Şekil 4: Tasarılan motorların manyetik akı çizgileri.

Tasarlanmış motorlarda rotorun saç paket yapısına göre aynı boyutlarda kalıcı mıknatıslar yerleştirilmiş ve buna göre manyetik analizi yapılmıştır (Tasarlanan motorların akı çizgileri Şekil 4'deki gibidir). Simülasyon sonuçları eğri ve grafiklerle Şekil 4-8 ve Tablo 6'daki gibi sırayla verilmiştir. Yapılan manyetik analizlerle motorların potansiyel manyetik akı yoğunlukları incelenmiştir. Ve anma çalışma sınırlarının kabul edilebilir değerlerde olduğu anlaşılmıştır.

Rotorda kullanılan NdFeB mıknatısının ve statorda kullanılan Çelik 1008 malzemelerinin BH eğrilerinin sırayla 2.10 T ve 1,23T noktalarında doymaya gitmektedirler. Bu doyma noktaları ile Tablo 5' de verilen motorların manyetik verileri kıyaslanınca tüm motorların doyma noktasının altında çalıştığı görülmektedir.

Tablo 5: Manyetik veriler.

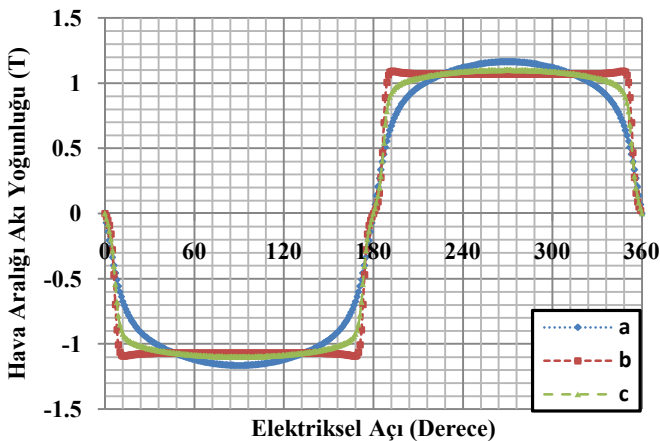
Manyetik Veri (B: Akı Yoğunluğu)	a	b	c
Stator-Dış B (T)	2,028	1,894	1,931
Stator-Boyunduruğu B (T)	1,897	1,890	1,944
Rotor- Boyunduruğu B (T)	0,391	0,410	0,401
Hava Aralığı B (T)	1,164	1,074	1,099
Mıknatıs B (T)	1,039	1,112	1,089

Akı dağılımı rotor, hava aralığı ve stator üzerinden düzgün bir şekilde (hava aralığında kırılmaya uğramadan) devresini tamamlar. Bunun anlamı tasarlanan motorların hava boşluk alanının uygun değerde olduğudur. Ayrıca motorların performans eğrileri ve tablolarından da, bırakılan hava aralığı değerlerinin kabul edilebilir bir aralıkta olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 6: Üç motorun analiz sonuçları.

Özellik/Motor Tipi	a	b	c
Toplam Net Ağırlık (kg)	15,744	15,851	15,844
Anma Hızı (d/d)	220,69	224,71	223,18
Anma Momenti (N.m)	6,9305	6,8066	6,8510
Toplam Kayıp (W)	34,618	34,961	34,755
Çıkış Gücü (W)	160,17	160,17	160,11
Giriş Gücü (W)	194,79	195,13	194,87
Verim (%)	82,228	82,083	82,165

Hava aralığı akı yoğunluğunun değişimi Şekil 5'deki gibi elde edilmiştir. Tasarlanan KM motorların hava aralığı akı yoğunlukları ikizkenar yamuk ve sinüzoidal şeklindedir.



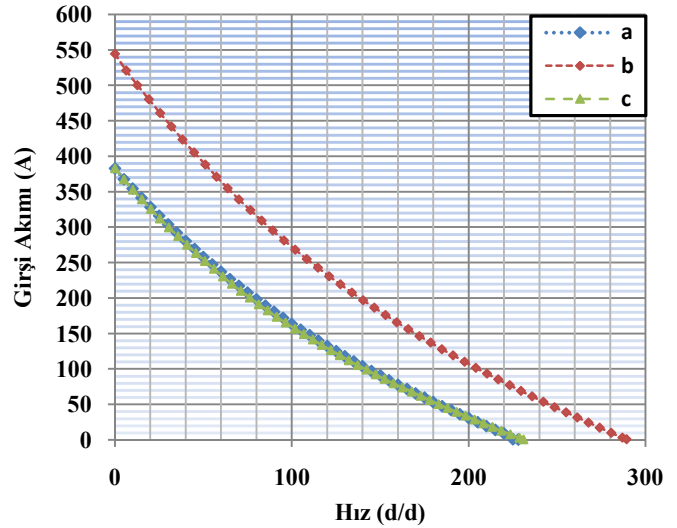
Şekil 5: Hava aralığı akı yoğunlukları.

Basitleştirilmiş motor eşdeğer devresi kullanılarak hız değeri Eşitlik 2'deki gibi bulunur[12].

$$n = \frac{30}{\pi} \left(\frac{V_0 - IR}{k_e} \right) \quad (2)$$

Burada V_0 giriş gerilimi, I giriş akımı, R eşdeğer (rotor ve stator) direnci, k_e EMK sabiti ve n hızdır.

Şekil 6 ve Eşitlik 2'de görüldüğü gibi motor yolılırken, başlangıçta hız sıfır olduğundan şebekeden aşırı akım çeker. Motor anma hızına ulaştığında, şebekeden yaklaşık 8 A çekmektedir.

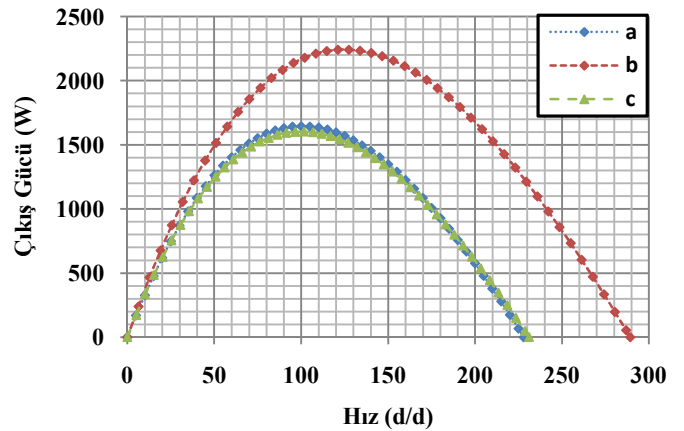


Şekil 6: Akım-Hız eğrileri

Genel motor verimi aşağıdaki denklemden yaklaşık olarak hesap edilebilir [12]:

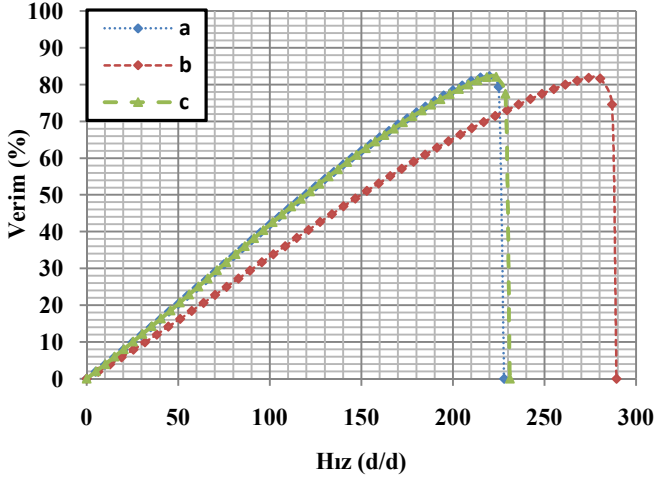
$$\eta \cong \frac{P_{out}}{P_{in}} \cong \frac{wk_e I}{I^2 R + wk_e I + P_{Dk}} \quad (3)$$

Burada w açısal hız, P_{out} ve P_{in} sırayla çıkış ve giriş güçleridir. P_{Dk} ise bakır kayıpları dışındaki diğer kayıpları ifade etmektedir. Eşitlik 3'de motor veriminin hangi büyüklüklere bağlı olduğu verilmiştir.



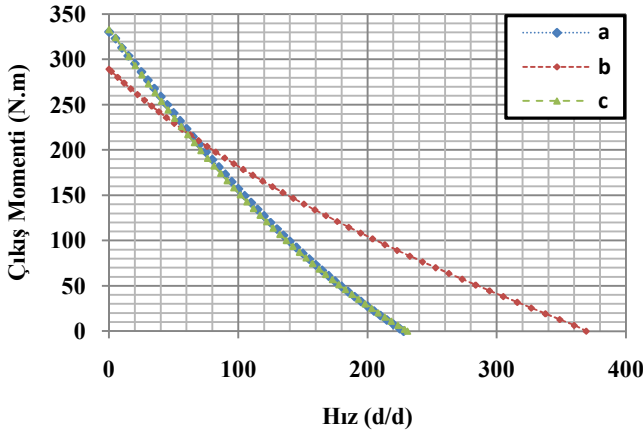
Şekil 7: Çıkış Gücü-Hız eğrileri

Çıkış gücünün hızla olan değişimi Şekil 7’de gösterilmiştir. Burada b tipi motorun güç-hız değişimi diğer motorlardan daha geniştir. Bu yüzden bu tip motorlar geniş aralıklarda güç-hız değişimi gerektiren yerlerde kullanılırlar. Tasarlanan motorların verim-hız eğrileri Şekil 8’deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 8: Verim-Hız eğrileri.

Daha önceden de bahsedildiği gibi moment ile hız birbirine ters orantılıdır ve tasarımı yapılan motorların moment-hız eğrileri Şekil 9’daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 9: Moment-Hız eğrileri.

Bir elektrik makinasının moment-hız eğrisinin lineer olması istenir. Tasarlanan motorların moment-hız eğrilerinin yaklaşık lineer olduğu görülmektedir.

Çalışma sonucunda elde edilen grafiklerden de anlaşılacağı gibi tüm motorlarda aynı boyutlarda ve aynı türde kalıcı mıknatıslar kullanılmasına rağmen a ve c motorlarının değerleri birbirine çok yakın çıkarken b motorunun farklı çıkmıştır. Bu durum mıknatısların rotor yüzeyini kaplamasıyla ilgilidir. Şekil 1 ve 8’de görüldüğü gibi, mıknatıslar rotor yüzeyine ne kadar çok yayılırsa aynı verimde daha yüksek hızlara çıkabilmekteler. Benzer şekilde mıknatıslar rotor yüzeyini kaplayacak şekilde yerleştirilirse aynı hızda daha yüksek çıkış gücü elde edilebilir.

7. Sonuç

Bu çalışmada, üç farklı yapıdaki yüzey mıknatıslı KMDA motorunun genel ve manyetik analizi Maxwell programı kullanılarak yapılmış ve analiz sonuçları; topoloji, boyut, manyetik alan, hava aralığı akısı, gerilim, moment, hız, kayıplar, ağırlık ve verim açısından kıyaslanmıştır. Yapılan analizlerden sonra bu yapıdaki ve güçlerdeki makinaların verimlerinin birbirine yakın olduğunu anlaşılmıştır. Akı dağılımları ve manyetik alan şiddetleri optimize edilerek daha küçük boyutlarda ve daha ekonomik makinalar tasarlamak mümkündür.

8. Kaynaklar

- [1] D. C. Hanselman, *Brushless Permanent-Magnet Motor Design*. New York: McGraw-Hill, 1994 ch. 5
- [2] G. Dajaku and D. Gerling, “Design of Permanent Magnet Machines for Hybrid Vehicles,” ANSYS Conference & 25th CADFEM Users’ Meeting 2007.
- [3] N. Bianchi and S. Bolognani, “Electrical Machines and Drives,” IEEE Eighth International Conference (Conf. Publ. No. 444), 1997
- [4] A. Marino, “Analytical Modeling and Optimization of a Radial Permanent Magnets Synchronous Machine,” LEROY-SOMER, France.
- [5] J. H. Seo, S. Y. Kwaka, T. K. Chungb, S. Y. Jungc and H. K. Junga, “Optimal design of interior-permanent magnet synchronous machine for vehicle using improved niching genetic algorithm,” International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 29 (2009), pp 37–45,2009.
- [6] S.R. Holm , H. Polinder, J.A. Ferreira, M.J. Hoeijmakers, P. van Gelder and R. Dill, “Analytical Calculation of the Magnetic Field in Electrical Machines due to the Current Density in an Airgap Winding,” Proc. International Conference on Electrical Machines (ICEM 1996), pp. 348–352.
- [7] D. Zarko, D. Ban, and T. A. Lipo, “Analytical Calculation of Magnetic Field Distribution in the Slotted Air Gap of a Surface Permanent-Magnet Motor Using Complex Relative Air-Gap Permeance,” IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 42, No. 7, July 2006.
- [8] J. F. Gieras, *Permanent Magnet Motor Technology Design And Applications*. Second Edition, Revised And Expanded, New York: Marcel Dekker, 2002, ch. 1.
- [9] Ansoft Maxwell RMXprt Program, Version 12.2.0, 1989-2009 Ansoft LLC.
- [10] Ansoft Maxwell Online Help, Version 12.2.0, 1989-2009 Ansoft LLC.
- [11] *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. – Microchip, Pedmarja Yedamale Microchip Technology Inc. – 2003.
- [12] Stephen J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, Fourth Edition, McGraw-Hill, New York, 2005, ch. 8.