

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

EKSENEL AKILI SÜREKLİ MİKNATISLI
MOTORUN BENZETİMİ VE ÜRETİMİ

Ceyhan SEZENOĞLU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE
2009

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

EKSENEL AKILI SÜREKLİ MİKNATISLI
MOTORUN BENZETİMİ VE ÜRETİMİ

Ceyhun SEZENÖĞLU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
Yrd. Doç. Dr. Abdülkadir BALIKÇI

GEBZE

2009



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 09.10.2009 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ceyhan SE/ENOĞLU'nun tez çalışması "EKSENEL AKILLI SÜREKLİ MİKNATISLI MOTORUN BENZETİMİ VE ÜRETİMİ" Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç. Dr. Abdülkadir BALIKÇI

ÜYE

: Doç. Dr. Hakan HOCAOĞLU

ÜYE

: Doç. Dr. Ercan ERTÜRK

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/20... tarih ve sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI MOTORUN BENZETİMİ VE ÜRETİMİ

YAZAR ADI: CEYHUN SEZENOĞLU

İnsan hayatını kolaylaştırmak, daha rahat ve konforlu bir yaşam sağlamak için hayatın birçok alanında makineler kullanılmaktadır. Bu makinelerinin büyük bir çoğunluğu elektrik motoru ile çalışmaktadır. Gelecekte ulaşımda, özellikle bütün otomobillerde, elektrik motorlarının kullanılacağı öngörülmektedir. Elektrik motorlarının bu denli çok kullanım alanı olmasına karşın halen elektrik motorlarının büyük bir kısmının verimi düşüktür. Bu nedenle verimi çok daha yüksek sistemlere ihtiyaç vardır.

Yapılan bu çalışmada, geleneksel radyal akıllı motorlara karşılık boyutları daha küçük ve verimleri daha yüksek eksenel akıllı motorlara ait bir topoloji incelenmiştir. Öncelikle tasarlanan motorun teorik verileri bulunmuş, daha sonra da bir benzetim yazılımı ile benzetimi yapılmıştır. Son olarak alınan sonuçlar itibariyle motorun üretimi gerçekleştirilmiştir.

SUMMARY

TITLE: SIMULATION AND MANUFACTURING OF AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET MOTOR

AUTHOR: CEYHUN SEZENÖĞLU

Machines are used many areas of life for easing and providing a comfortable life. Many of these machines work with electric motor. Using electric motors in all automobiles is predicted in future. However electric motors are using lots of area, efficiency of electric motors is very low at present. Thus it needs to be high efficiency systems.

At this work, a topology of small and efficiency axial flux motors compared to radial flux motors is investigated. Before all else theoretical datas of designed motor was found out. Then it simulated with a simulation software. Last it was implemented on basis of designed structure.

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca gerek seminerler aşamasında gerekse tezimin hazırlanması aşamasında desteğini ve ilgisini esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Abdulkadir BALIKÇI'ya, beni teşvik eden değerli hocalarım Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU'na ve Doç. Dr. Ercan ERTÜRK'e, hazırlamış olduğum motorun üretiminde desteğini esirgemeyen Araştırma Görevlisi Mehmet ERMURAT'a, tezimin hazırlanmasında yanımda olan lisans arkadaşlarım; Yavuz S. KİREZ, M. Oytun OKTAY, Engin DUTAR ve Öner HATİPOĞLU'na, aynı mesleği paylaştığımız arkadaşlarım; Türev SARIKURT, Onur ÖZTÜRK, Dinçer ÖZTÜRK, Özgür KARACASU, Kadir DURGUT, Ahmet YILMAZ ve H. Arda ÜLKÜ'ye, aynı odayı paylaştığım arkadaşım Uğur HASIRCI'ya, yüksek lisans arkadaşlarım; Ahmet KÖKSOY, Umut ÖNDİN ve Erkan SUNAN'a, manevi desteğinin hiçbir zaman esirgemeyen arkadaşım İ. Şebnem KADIOĞLU'na ve son olarak manevi desteklerini ve sabırlarını esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
1 GİRİŞ	1
2 EASM MAKİNELER	3
2.1 Özellikler	3
2.2 EASM Makinelerin Türleri	4
2.3 Topoloji ve Geometrilere	5
2.4 EASM Makineler ile RASM Makinelerin Karşılaştırılması	8
2.5 Örnek Uygulamalar	10
2.6 EASM Makinelerin Güç Sınırları	11
2.7 Stator Nüvesiz EASM Motor	12
2.7.1 Avantaj ve Dezavantajları	12
2.7.2 Teori	12
3 BENZETİM (SİMÜLASYON)	24
3.1 CAD Modeli	24
3.2 Malzeme Yapısı	25
3.3 Benzetim Sonuçları	25
4 Üretim	28
4.1 Rotor	29
4.2 Stator	33
4.2.1 Bobinler	33

4.2.2 Manyetik Algılayıcılar (Hall Sensörler)	36
5 SONUÇLAR	38
KAYNAKÇA	41
ÖZGEÇMİŞ	43

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

EASM	: Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı
RASM	: Radyal Akılı Sürekli Mıknatıslı
NdFeB	: Neodyum – Demir – Bor
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer-Aided Design)
DA	: Doğru Akım
AA	: Alternatif Akım
SM	: Sürekli Mıknatıs
EMK	: Elektromotor kuvvet
P_{elm}	: Elektromanyetik Güç
T_d	: Elektromanyetik Tork

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 EASM makineler için akım dalga formları (a) kare dalga makine (b) sinüzoidal makine	4
Şekil 2.2 Muhtelif fırçasız EASM makine topolojileri	5
Şekil 2.3 Temel EASM makine topolojileri	6
Şekil 2.4 Çok katmanlı EASM makine	7
Şekil 2.5 Eksenel Akılı Makine ve Radyal Akılı Makine	8
Şekil 2.6 EASM makine ile RASM makinelerin performans karşılaştırmaları	9
Şekil 2.7 Nüvesiz statorlu iki rotorlu makinenin manyetik akı yolları	13
Şekil 2.8 Üç fazlı, sekiz kutuplu, EASM makinenin nüvesiz sargıları	16
Şekil 2.9 Nüvesiz sargıların şekilleri (a) tek bobin (b) üç bitişik bobin. 1- bobin kenarı, 2- iç kıvrım, 3- dış kıvrım.	16
Şekil 3.1 Benzetim için çizilen rotor ve mıknatısların üç boyutlu görüntüsü	25
Şekil 3.2 Rotor kalınlığı 5 mm iken oluşan manyetik akı vektörleri	26
Şekil 3.3 Sadece tek bir bobine akım uygulandığında görülen manyetik akı vektörleri	27
Şekil 3.4 Statordan akım geçerken oluşan manyetik akı vektörleri	27
Şekil 4.1 Mıknatısların Yerleşimi	29
Şekil 4.2 Üretim için çizilen rotorun (a) üstten ve (b) perspektif görüntüsü	31
Şekil 4.3 Üretimi yapılan rotorun görüntüsü	32
Şekil 4.4 N Kutuplu Mıknatıslar Yerleştirildiğinde	32
Şekil 4.5 Tek Bir Rotorun Son Hali	33
Şekil 4.6 Sarımı yapılan bobinlerin boyutları	34
Şekil 4.7 Sarılan Tek Bir Bobin	34
Şekil 4.8 Bobinlerin Dizilimi	35
Şekil 4.9 Üretimi yapılan statorun sargıları	36
Şekil 4.10 Statorun Motor İçinde Konumlandırılması	36
Şekil 4.11 Manyetik Sensörlerin Çıkışları ve Tetikleme Zamanlaması	37
Şekil 5.1 Motor Test Düzeneği	39
Şekil 5.2 Her Bir Fazın Akım Grafiği	39
Şekil 5.3 Her Bir Fazın Sürücü Çıkış Gerilim Grafiği	40

1 GİRİŞ

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı (EASM) makineleri eksenel olarak yönlendirilmiş hava aralığına sahiptir. Bundan dolayı manyetik akı da eksenel bir dağılıma sahiptir. Genellikle stator yüzük yapısında ve rotor disk şeklindedir. Statorun iç çapından dış çapına kadar olan radyal uzunluğu, motoru üreten etkin kısımdır. Çoğunlukla stator ile rotorun etkin iç ve dış çapları eşittir.

Eksenel akılı makineler yapıları gereği düşük hız, yüksek tork gerektiren uygulamalarda daha avantajlı sonuçlar vermektedir. Ek olarak eksenel akılı makinelerinin mekanik yapıları elektrikli araçlarda tekerlek motor olarak kullanılmak için çok uygundur.

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı makineler temelde dört farklı topolojiden oluşur: Tek stator, tek rotorlu yapı, Tek stator, çift rotorlu yapı, Çift stator, tek rotorlu yapı ve son olarak Çok katmanlı (birden fazla statora ve rotora sahip) yapı.

Bu tezde özel olarak içte tek statora sahip etrafında simetrik rotor çifti bulunan topoloji ile ilgilenildi. Yapılan literatür taraması sonucunda en avantajlı yapının tek stator iki rotorlu yapı olduğu öngörüldü.

Daha sonra motorun fiziksel özelliklerinin belirlenmesi üzerinde duruldu. Motorun yapısı halihazırda bulunan NdFeB mıknatıslar temel alınarak geliştirildi. Yapılan motorun 12 kutuplu olması planlandı. Statorun hava nüveli olmasına karar verildi.

Belirlenen motor özelliklerinin ardından, bu özelliklere dayanarak teorik hesaplamaları yapıldı. Teorik hesaplamaların sonucunda 1200 rpm'da, 732,6 W çıkış gücü elde edildi. Burada kayıplar hesaba katılmamıştır.

Ayrıntılı motor boyutlarına karar verildikten sonra benzetim (simülasyon) işlemine başlandı. Benzetim işlemi için öncelikle karar verilen motorun CAD çizimi

oluşturuldu. Manyetik benzetim yazılımının diğerk ayarlamaları yapıldıktan sonra sonuçlar elde edildi.

Son olarak yapılan hesaplamalara dayanarak motor üretimine geçildi. Rotoru üretmek için çelik malzemesi alındı ve üç boyutlu çizimleri oluşturuldu. Stator için gerekli sargılar yapıldı ve stator oluşturuldu.

2 EASM MAKİNELER

2.1 Özellikler

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı (EASM) makineleri eksenel olarak yönlendirilmiş hava aralığına sahiptir. Bundan dolayı manyetik akı da eksenel bir dağılıma sahiptir. Genellikle stator yüzük yapısında ve rotor disk şeklindedir. Statorun iç çapından dış çapına kadar olan radyal uzunluğu, motoru üreten etkin kısımdır. Çoğunlukla stator ile rotorun etkin iç ve dış çapları eşittir.

Disk tip makine olarak da bilinen eksenel akılı sürekli mıknatıslı (EASM) makine, tıkmaz yapısı ve yüksek güç yoğunluğundan dolayı, silindirik radyal akılı sürekli mıknatıslı (RASM) makinenin daha iyi bir alternatifidir. EASM motorlar bilhassa elektrikli araçlar, pompalar, fanlar, vana kontrolü, santrifüjler, makine elemanları, robotlar ve endüstriyel ekipmanlar için uygundur. Daha büyük çapta tasarlanabilen rotor ile eylemsizlik momenti sayesinde volan olarak kullanılabilir. EASM makineler küçük ve orta ölçekte güç üretiminde de kullanılabilirler. Çok kutuplu yapılabilmelerinden dolayı bu makineler elektromekanik çekiş sürücüler, vinçler veya rüzgar türbinleri gibi düşük hız uygulamaları için uygundur.

Disk şeklindeki rotor ve statoru sayesinde, birbirinden farklı özelliklere sahip, değiştirilebilir tasarımlar yapmak mümkündür. EASM makineleri tek hava aralıklı veya çok hava aralıklı, oluklu veya oluksuz hatta tamamen demirsiz endüvili şekilde tasarlanabilir. Düşük güçteki EASM makineleri genellikle oluksuz sargılı ve yüzey sürekli mıknatıslı şekilde tasarlanmaktadır. EASM makinelerinin çıkış gücü arttıkça, rotor ile şaft arasındaki temas yüzeyindeki güç azalır. Burada rotor ve şaftın mekanik tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gerekir aksi takdirde büyük ihtimalle disk tip makinelerde sorun olacaktır.

Bazı durumlarda, parça sayısını, hacmi, kütleyi, güç transferini ve bağlantı zorluğunu optimize etmek için rotor güç iletim parçasına gömülür. Örneğin; teker motorlu elektrikli araçlar için verimli ve düşük maliyetli güzel bir çözümdür.

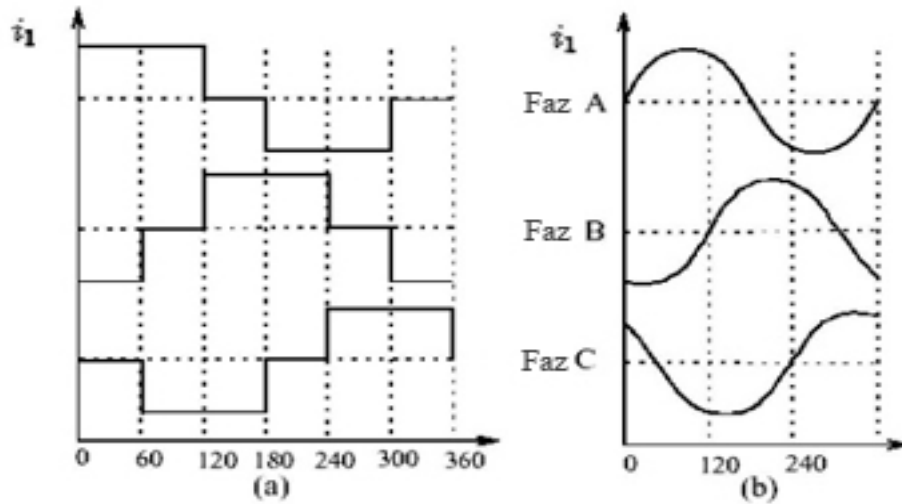
2.2 EASM Makinelerin Türleri

Esas itibariyle, her bir tip radyal akıllı makineye tekabül eden eksenel akıllı bir karşılığı vardır. Pratikte disk tip makineler şu üç tipte sınırlıdır:

- SM DA Anahtarlama makinaları;
- SM fırçasız DA ve senkron makinalar;
- İndüksiyon makinaları

EASM DA anahtarlama motorlar fan, küçük elektrikli araçlar, el aletleri vs. gibi endüstriyel, otomotiv ve yerel uygulamalarda halen çok yönlü ve ekonomik bir seçenektir.

Pratik olarak, DA fırçasız ve AA senkron makinalar her ne kadar teori ve çalışma prensipleri bakımından biraz farklı olsa da, aynı yapıya sahiptirler. Esas fark çalışırkenki akım dalga formunun farklı olmasıdır. DA akım fırçasız makinalar kare dalga formu ile çalışırken, AA senkron makinalar sinüzoidal dalga formu ile çalışmaktadır (Şekil 2.1).

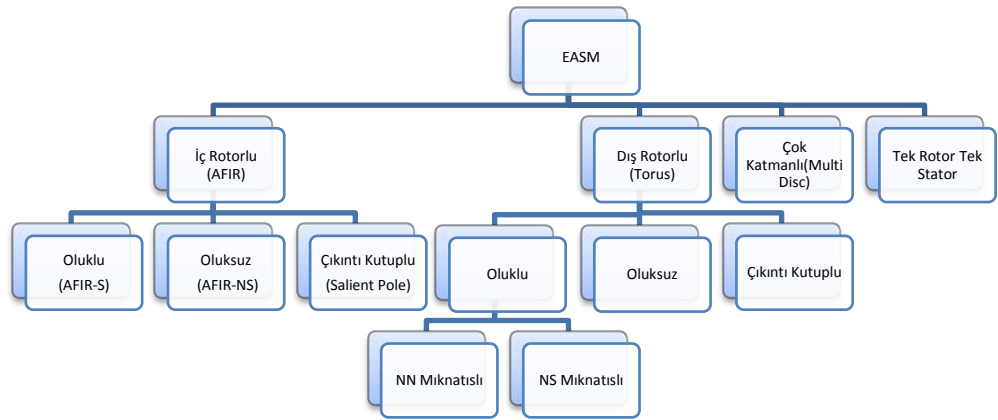


Şekil 2.1 EASM makineler için akım dalga formları (a) kare dalga makine (b) sinüzoidal makine

Disk tip indüksiyon makineler için kafes sargılı lamine rotor üretmek zordur. Bundan dolayı şimdiye kadar disk tip indüksiyon makinelerine ilgi olmamıştır.

2.3 Topoloji ve Geometriler

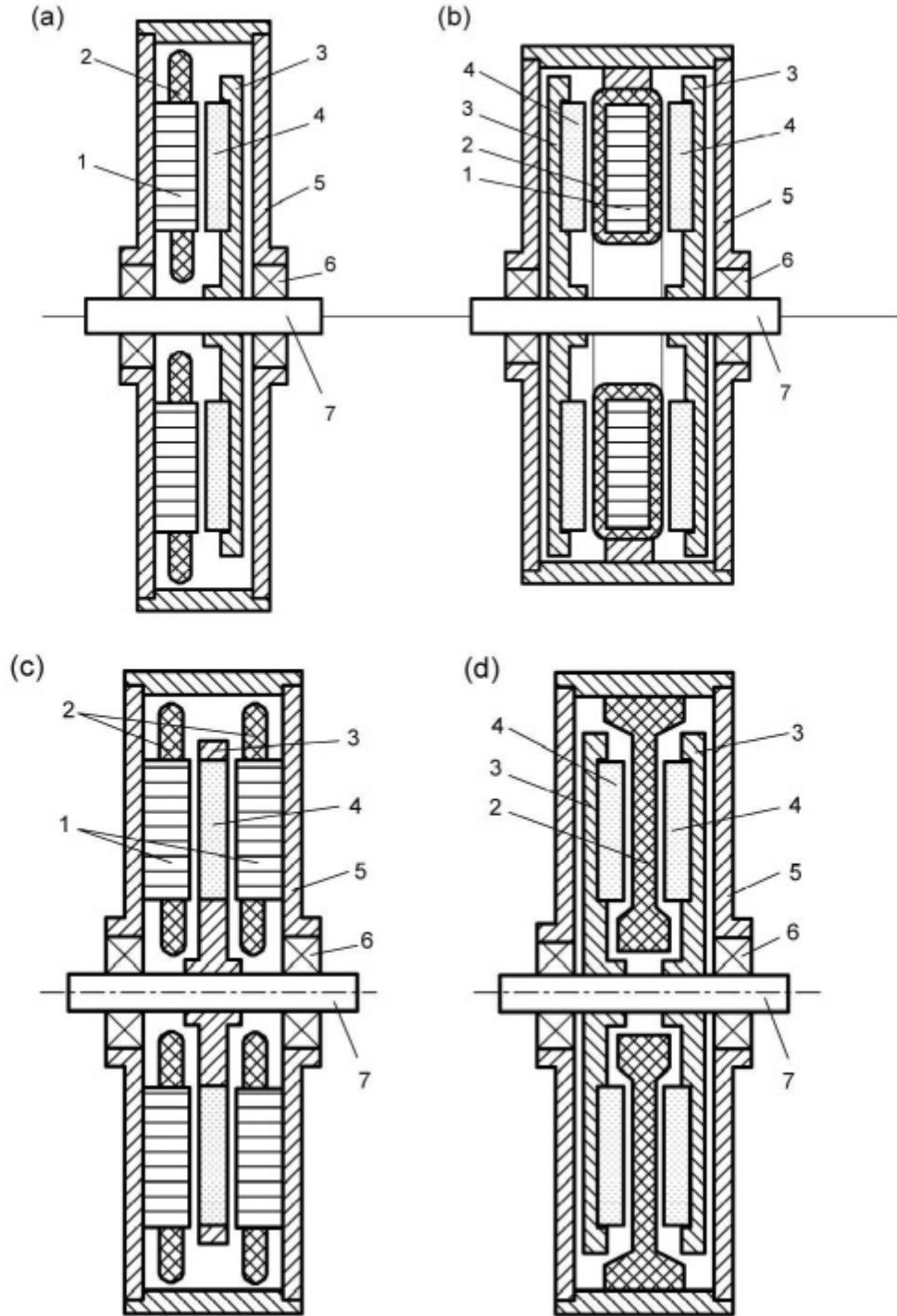
Eksenel akılı sürekli mıknatıslı makinelerin yapımları açısından bakıldığında tek yanlı ya da çift yanlı, oluklu ya da oluksuz endüvili, rotor ortada veya dışarıda, mıknatıslar gömülü veya yüzeye yapıştırmalı ve tek katmanlı veya çok katmanlı olarak tasarlanabilir (1).



Şekil 2.2 Muhtelif fırçasız EASM makine topolojileri

Eksenel akılı makineleri eksenel olarak yönlendirilmiş hava aralığı akısı dağılımına sahiptir. Genellikle stator yüzük yapıda, rotor disk şeklindedir. Etkin iç ve dış çapları birçok yapıda birbirine eşittir. Statorun iç çapından dış çapına kadar olan radyal uzunluğu; motorun torku üreten etkin kısmıdır. Eksenel uzunluk stator ile rotor arasındaki akı yoğunluğuna bağlıdır. Böylece uygun bir çift tasarımı ile hem rotordan hem statordan tamamen faydalanılabilir. Bu nedenle, eksenel akılı motorun etkin radyal kısmını değiştirmeden kutup sayısını artırdığınızda, eksenel uzunluk azalır ve güç yoğunluğu artar.

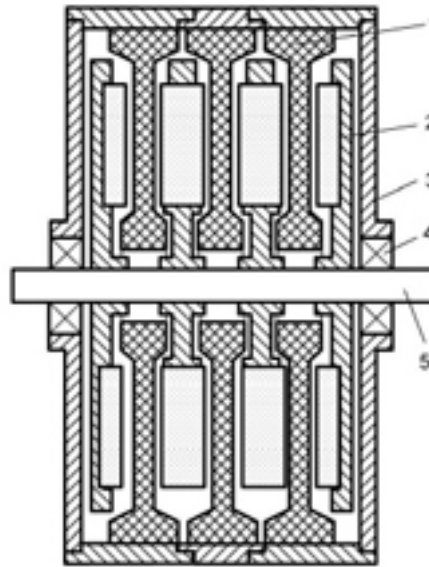
Tek rotor ve tek statorlu yapı en basit eksenel akılı sürekli mıknatıslı makine yapılarıdır (Şekil 2.3 a). Bu yapının eksi yönü rotor ile stator arasındaki düzensiz kuvvetler neticesinde daha karmaşık ve kalın mil ayrıca daha kalın rotor yapılması gerekmektedir.



Şekil 2.3 Temel EASM makine topolojileri

Tek stator iki rotorlu yapı, faz sarımları oluklu veya oluksuz stator etrafına sarılmış ve rotorlarda iki yanına yerleştirilmiş yapıdır (Şekil 2.3 b d). Bu yapıya “TORUS” tipi eksenel akılı makineler de denmektedir. İlk TORUS tipi sürekli mıknatıslı makine 1980 sonlarında oluksuz stator yapıda gerçekleştirildi. Toroid şeklinde sarılmış faz sarımları makine verimliliğini ve güç yoğunluğunu artırmak için kısa devre yapılmıştı. Bir mahsuru, statoru yapıya sabitlemek çok daha karmaşıktır. Ayrıca rotorun statorların arasında olduğu zıttı yapı ile karşılaştırılırsa sarımlar için daha az yer kalır.

Birkaç makineyi aynı shaft üzerine yerleştirerek daha karmaşık düzenlemeler bulunabilir(Şekil 2.4). Çoğu makineler gemi tahrik sürücüsü, pompa ve yüksek hızlı sürekli mıknatıslı jeneratör uygulamalarında ve araştırma amacıyla uygulanabilir.



Şekil 2.4 Çok katmanlı EASM makine

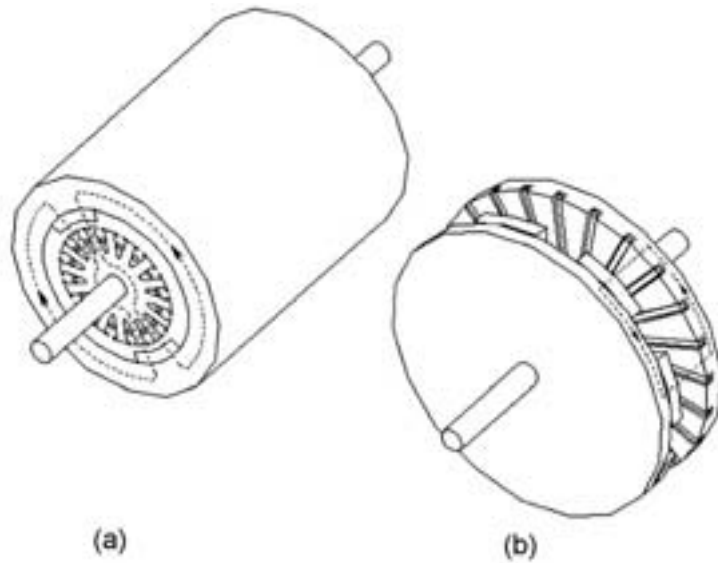
Rotordaki mıknatısların düzenleri ile ilgili olarak farklı varyasyonlar da bulunabilir. Mıknatısların düzeni stator ile rotor arasındaki esas akı yoluna etki eder, pekala sarım yapısını ile de mümkündür.

2.4 EASM Makineler ile RASM Makinelerin Karşılaştırılması

Yeni malzemelerin uygulamaları, üretim teknolojilerindeki buluşlar ve soğutma tekniklerindeki gelişmeler elektrik makinelerinin güç yoğunluğunun (hacim veya kütlenin çıkış gücüne oranı) daha da artmasını olanaklı kılmıştır. Geleneksel RASM makineleri için bu artışın, yapılarından kaynaklanan, sınırları vardır. Çünkü:

- Dış rotorlu indüksiyon ve DA komütatör makineler veya fırçasız makineler açısından rotor dışındaki ana akı yolu bir darboğaz oluşturur (Şekil 2.5 a);
- Şaft etrafındaki çoğu rotor çekirdeğini manyetik devre olarak kullanmak çok zordur;
- Stator sargılarındaki ısı stator çekirdeğine oradan da dış çerçeveye iletilir. Stator hava aralığında çok zayıf ısı iletimi vardır.

Bu sınırlamalar radyal akılı yapıya sahip makineleri yapıdan kaynaklı olarak sınırlar ve yeni bir topoloji uygulanmadan kolay kolay giderilemez. EASM makine, RASM makineye göre daha yüksek güç yoğunluğuna sahiptir ve RASM eşdeğerine göre daha tıknaz bir yapıya sahiptir, yani boyut olarak daha küçüktür.

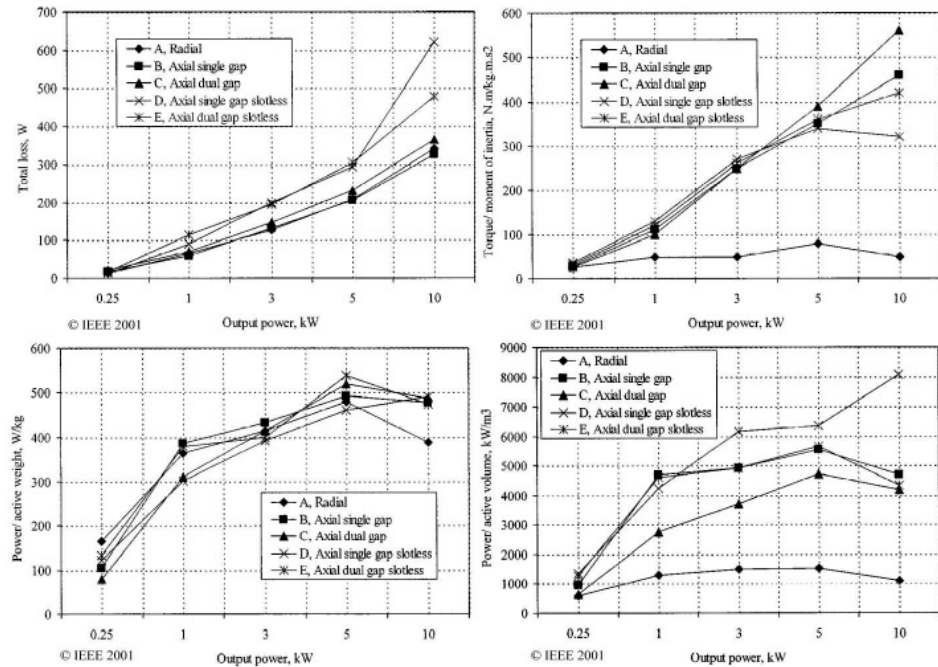


Şekil 2.5 Eksenel Akılı Makine ve Radyal Akılı Makine

Ayrıca, EASM makilerin iç çapı genellikle şaft çapından daha büyüktür (2), bu sayede daha iyi bir hava akımı ve soğutma sağlanabilmektedir. Belirli uygulamalarda EASM makinenin özellikleri genelde RASM makineye göre daha fazla avantaj sağlamaktadır. Bunları şu şekilde sıralayabiliriz:

- EASM makineler, RASM makinelere göre çok daha büyük çap-uzunluk oranına sahiptir;
- EASM makineler düzlemseldir ve bazı yapılanmalarda ayarlanabilir hava aralığına sahiptir;
- Çekirdek malzemesini daha tasarruflu kullanacak şekilde tasarlanabildiği için daha yüksek güç yoğunluğuna erişebilir;
- Bir EASM makinenin topolojisi gereği parçalı olarak tasarlanabildiği için, aynı sayıda parçalar ile güç veya tork gereksinimleri ayarlanabilmektedir;
- Çekirdeğin dış çapının daha büyük ve daha fazla sayıda kutup ile tasarlanabildiğinden, EASM makineleri yüksek frekans veya düşük hız uygulamaları için yapmak mümkündür.

Şekil’de görüldüğü gibi RASM makine ile beş farklı güç seviyesinde EASM makinelerin performans karşılaştırmalarında EASM makinenin, verilen güç oranına göre daha küçük hacme ve daha az etkin malzeme ağırlığına sahiptir.



Şekil 2.6 EASM makine ile RASM makinelerin performans karşılaştırmaları

2.5 Örnek Uygulamalar

EASM makineleri son yıllarda çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu uygulamaların bazı önemli örnekleri, makinenin çalışma hızı, güç aralığı ve tiplerine ilişkin bilgilerle birlikte aşağıda sıralanmıştır (3):

- Melez (hibrit) bir çekiş sistemindeki gaz türbini tarafından sürülen hızlı üreteç: 10, 30, 50 kW, 60000 dd'da üç tipte çok katmanlı EASM makinesi incelenmiştir.
- Volan-elektrik makinesine sahip melez elektrikli araba: tek rotor çift stator düzeni, halka şeklinde sarılmış sargılar, 25 kW tepe gücü (motor veya üreteç için) ve 30000 dd'nın üzerinde devire sahiptir.
- Elektrikli araçlar için tekerden direk tahrikli motor: verilen hızı 1000 dd'dan daha düşük, iç stator çift rotor yapı, oluksuz halka sargılı düzen ve yüzeye yapıştırılmış veya gömülü sürekli mıknatlara sahip rotorlar, veya çok katmanlı tipte oluksuz halka sargılı, su soğutmalı demirli düzen ile yüzeye yapıştırılmış mıknatlara sahip motorlar bulunmaktadır.
- Ayarlanabilen hızlı pompa uygulamaları: oluksuz stator nüvesinde yoğunlaştırılmış bobinler, yüzeye yapıştırılmış sürekli mıknatlara sahip rotor (maliyeti düşürmek için ferrit) 2800 dd'da 880 W üretmektedir.
- Gemi tahrik sisteminde, pervaneye direk bağlı, yan yana iki motor: oluksuz halka sarımlı oluksuz demir nüveli stator, yüzeye yapıştırılmış mıknatlara sahip rotor diskleri ile 195 dd'da 510 W güç sağlamaktadır.

Burada incelenmiş örnekler olduğu gibi, bunların dışında da birçok uygulama alanında kullanılmaktadır.

2.6 EASM Makinelerin Güç Sınırları

Şimdilerde EASM disk tip fırçasız makinelerin güç aralığı 1 Watt'tan daha küçük boyutlardan başlayıp yaklaşık Mega Watt mertebelerine kadar ulaşmaktadır. EASM makinenin çıkış gücü arttığı zaman rotor ile şaft arasındaki bağlantı yüzeyi, güce göre küçük kalmaya başlar. Çıkış gücünün daha yüksek olduğu aralıklarda rotor ile şaftın mekanik bütünlüğünü tasarlamak daha zordur. Rotor ile şaft arasındaki mekanik bütünlüğün yüksek güçlerde oluşturabileceği sorunu aşmak için genel çözüm çok katmanlı (multidisk) makine tasarlamaktır.

EASM makinenin tork kapasitesi çapın küpü ile doğru orantılı iken RASM makinenin tork kapasitesi çapın karesi ile doğru orantılıdır. Motorun güç seviyesi veya uzunluğunun çapına oranı arttığında eksenel akılı geometriye ilişkin avantajlar kaybolabilir. RASM makinenin uzunluğunun iki katı yarıçapa eşit olduğu noktada geçiş meydana gelir. Bu da, tek katmanlı disk makinenin güç oranı için sınırlı bir tasarım yapılmasına neden olur.

2.7 Stator Nüvesiz EASM Motor

2.7.1 Avantaj ve Dezavantajları

Uygulamaya ve çalıştırma ortamına bağlı olarak, EASM makinelerinin statorları manyetik nüveye sahip olabilir ya da tamamıyla nüvesiz(dolgusuz) olabilir. Nüvesiz statorlu EASM makineleri, bir iç statora ve ikili olan dış PM rotora sahiptirler(Şekil 1.2d). Kalıcı mıknatıslar, çelik diskli rotora veya manyetik olmayan destekleme yapılarına yapıştırılabilirler. İkinci husus olarak, SM'lar Halbach dizisine göre düzenlenir ve makine tamamıyla çekirdeksizdir. Çekirdeksiz ve fırçasız EASM makinesinden sağlanan elektromanyetik tork, açık olan akım taşıyıcı iletken tarafından üretilir-SM etkileşimi (Lorentz Force Teoremi). Nüvesiz yapıları demirsel manyetik malzemeleri ortadan kaldırır, örneğin çelik tabakalar ve statordan kaynaklanan SMC tozları, sonuç olarak ortak anafor akımı ve histerez çekirdek kayıpları engellenir. Çekirdek kayıplarının yokluğundan dolayı, nüvesiz statorlu EASM makinesi geleneksel makinelerden daha yüksek verimde çalıştırılabilir. Ancak, artırılmış manyetik olmayan hava boşluğuna bağlı olarak, bu tür makineler, demirsel manyetiğe sahip nüveli makinelerle göre daha fazla PM materyali kullanır.

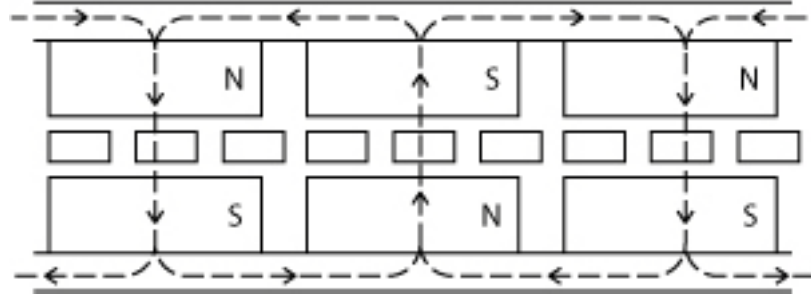
Bu bölümde, çekirdeksiz statorlu fırçasız EASM makineleri ve geleneksel SM hareketleri (çelik destek diske birleştirilmiş SM gibi) ele alınacaktır.

2.7.2 Teori

2.7.2.1 Manyetik Devre

Nüvesiz statorlu EASM makinelerde stator sargıları manyetik ve iletken olmayan bir yapıda bulunur. Hysteresis ve Eddy Akımı kayıpları gibi kayıplar görülmez. Mıknatıslardaki ve rotor çeliğindeki kayıplar ise önemsizdir. Bu tip tasarım sıfır cogging torkunda yüksek verim sağlar. Fakat hava aralığında mantıklı bir manyetik akı oluşturabilmek için stator nüveli EASM makinelerle karşılaştırıldığında daha büyük hacimde sürekli mıknatıslar kullanmak gereklidir.

Üzerinde çalışılan motorun, üç fazlı sargı düzeni, mıknatıs kutuplanmaları ve akı yolları Şekil 2.7'deki manyetik devrede görülmektedir. (4)



Şekil 2.7 Nüvesiz statorlu iki rotorlu makinenin manyetik akı yolları

2.7.2.2 Sargılar

Tek katmanlı bir sargıda, her bir tek oluğa sadece bir bobin kenarı gelmektedir. Tüm bobinlerin sayısı ise $s_1/2$ ve faz başına bobin sayısı $n_c = s_1/2m_1$ 'dir. Burada statordaki oluk sayısı s_1 ve faz sayısı da m_1 'dir. Çift katmanlı sargıda ise her bir oluğa farklı iki bobinin birer kenarı gelmektedir. Bu durumda tüm bobinlerin sayısı s_1 ve faz başına bobin sayısı $n_c = s_1/m_1$ 'dir. Kutup sayısı $2p$ olmak üzere, kutup başına oluk sayısı:

$$Q_1 = \frac{s_1}{2p} \quad (3.1)$$

Her fazın kutup başına oluk sayısı:

$$q_1 = \frac{s_1}{2pm_1} \quad (3.2)$$

Bobin başına düşen iletken sayısı şu şekilde hesaplanabilir:

- Tek katmanlı sargı için

$$N_c = \frac{a_p a_\omega N_1}{n_c} = \frac{a_p a_\omega N_1}{s_1/2m_1} = \frac{a_p a_\omega N_1}{pq_1} \quad (3.3)$$

- Çift katmanlı sargı için

$$N_c = \frac{a_p a_\omega N_1}{n_c} = \frac{a_p a_\omega N_1}{s_1/m_1} = \frac{a_p a_\omega N_1}{2pq_1} \quad (3.4)$$

Burada N_1 faz başına seri tur sayısı, a_p paralel akım yolu sayısı, a_ω paralel iletken sayısıdır. Oluk başına iletken sayısı hem tek katmanlı için hem de çift katmanlı sargı için aynıdır:

$$N_{sl} = \frac{a_p a_\omega N_1}{pq_1} \quad (3.5)$$

Tam bobin adımı $y_1 = Q_1$ eşitlik 3.1'deki oluk sayısı terimi şeklinde ölçülür. Kısa bobin adımı ise; verilen bir yarıçapa göre bobin adımı uzunluğu $\omega_c(r)$ ve aynı yarıçapa göre kutup adımı uzunluğu $\tau(r)$ olmak üzere, şu şekildedir:

$$y_1 = \frac{\omega_c(r)}{\tau(r)} Q_1 \quad (3.5)$$

Bobin adımının kutup adımına oranı yarıçaptan bağımsızdır:

$$\beta = \frac{\omega_c(r)}{\tau(r)} \quad (3.6)$$

Ana boşluk harmoniği $v = 1$ iken çok fazlı sargının dağılım katsayısı; fazör toplamının her bobinde indüklenen EMK'in aritmetik toplamına oranı şeklinde tanımlanır ve şu şekilde gösterilir:

$$k_{d1} = \frac{\sin(\pi/2m_1)}{q_1 \sin[\pi/(2m_1 q_1)]} \quad (3.7)$$

Ana boşluk harmoniği $v = 1$ iken adım katsayısı fazör toplamının her bir bobin kenarında indüklenen EMK'in aritmetik toplamına oranı şeklinde tanımlanır ve şu şekilde gösterilir:

$$k_{p1} = \sin\left(\beta \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.8)$$

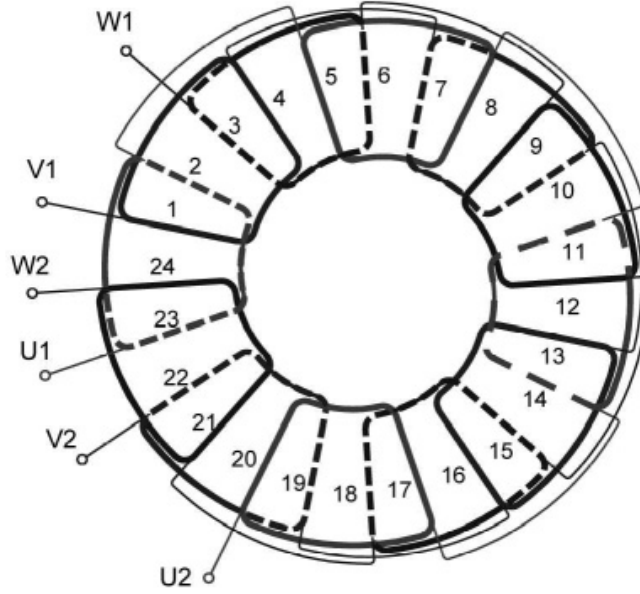
Temel sargı katsayısı dağılım katsayısı (eşitlik (3.7)) ile adım katsayısının (eşitlik (3.8)) çarpımı şeklindedir:

$$k_{\omega 1} = k_{d1} k_{p1} \quad (3.9)$$

Komşu iki oluk arasındaki elektriksel açı şu şekildedir:

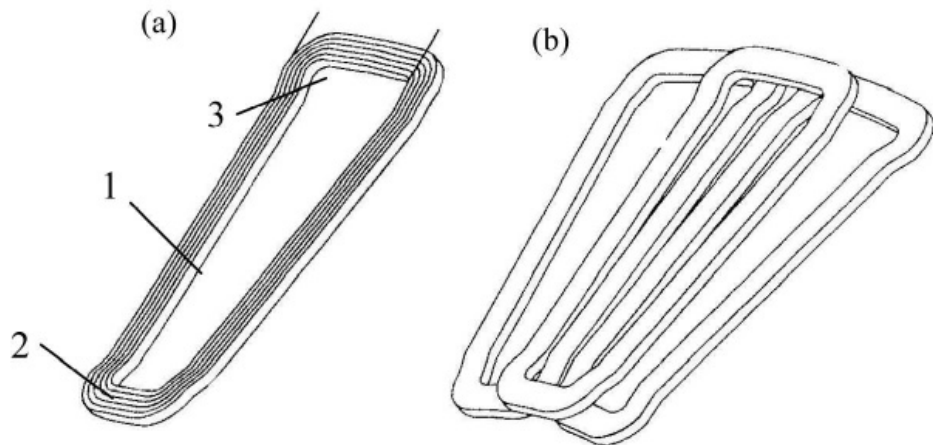
$$\gamma = \frac{360^\circ}{s_1} p \quad (3.10)$$

Şekil 2.8 Üç fazlı, sekiz kutuplu, EASM makinenin nüvesiz sargıları'de üç fazlı, sekiz kutuplu EASM makinesinin nüvesiz stator sargıları görülmektedir. Açıkçası, oluklu stator sargılarında kullanılan eşitlikler direk olarak nüvesiz stator sargılarında da kullanılabilir. Öyle ki eşitliklerde “oluk” terimi yerine “sargı kenarı” kullanılabilir.



Şekil 2.8 Üç fazlı, sekiz kutuplu, EASM makinenin nüvesiz sargıları

Nüvesiz statoru oluşturmayı kolaylaştırmak için genellikle trapezoid şekilli bobin katmanlarından oluşur. Statoru oluşturmak için ayrıca sargıların sonunun belirli bir açıda bükülmesi gerekmektedir. Öyle ki etkin sargı yüzeyleri aynı yüzeyde çift halinde uzanır ve sargı sonları birbirlerine yakın bir şekilde yerleştirilir. Sargılar; epoksi reçine veya sertleşen kompozit bir malzeme içinde birbirlerinden ayrılmayacak şekilde sabitlenir.



Şekil 2.9 Nüvesiz sargıların şekilleri (a) tek bobin (b) üç bitişik bobin. 1- bobin kenarı, 2- iç kıvrım, 3- dış kıvrım.

2.7.2.3 Tork Üretimi

EASM makinelerinin ölçüleri yarıçapın fonksiyonları şeklinde olduğu için elektromanyetik tork, yarıçapların sürekli dizisi üzerinden üretilir. Çünkü radyal makinelerdeki gibi yarıçap sabit değildir.

Eksenel akıli makinenin kutuplar arası mesafesi $\tau(r)$ ve kutup genişliği $b_p(r)$ yarıçap r 'nin birer fonksiyonlarıdır:

$$\tau(r) = \frac{2\pi r}{2p} = \frac{\pi r}{p} \quad (3.11)$$

$$b_p(r) = \alpha_i \tau(r) = \alpha_i \frac{\pi r}{p} \quad (3.12)$$

Denklemlerde görülen α_i ise hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun ortalama değeri B_{avg} 'nin tepe değeri B_{mg} 'ye oranıdır:

$$\alpha_i = \frac{B_{avg}}{B_{mg}} \quad \text{veya} \quad \alpha_i = \frac{B_{avg}}{B_{mg}} \quad (3.13)$$

Her iki kutup uzaklığı ve kutup genişliği yarıçapın birer fonksiyonudur, α_i parametresi normal olarak yarıçaptan bağımsızdır.

Çizgi akım yoğunluğu da yarıçapın bir fonksiyonudur. Böylece çizgi akım yoğunluğunun tepe değeri:

$$A_m(r) = \frac{m_1 \sqrt{2} N_1 I_a}{p \tau(r)} = \frac{m_1 \sqrt{2} N_1 I_a}{\pi r} \quad (3.14)$$

Disk üzerindeki yüzey (tangential) kuvvet Ampere eşitliği esas alınarak hesaplanabilir:

$$dF_x = I_a (dr \times B_g) = A(r) (dS \times B_g) \quad (3.15)$$

Burada $I_a dr = A(r)dS$, eşitlik (3.14)'den $A(r)dS = A_m(r)/\sqrt{2}$, dr yarıçap elemanı, dS yüzey elemanı ve B_g de hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun normal vektörüdür (disk yüzeyine dik). Bir EASM disk tip makine pratik olarak yarıçaptan bağımsız olarak B_g 'yi sağlar.

Varsayalım hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu B_{mg} yarıçaptan bağımsız, eşitlik (3.13)'den $dS = 2\pi r dr$ ve $B_{avg} = \alpha_i B_{mg}$ olmak üzere eşitlik (3.15) temel alınarak, elektromanyetik tork:

$$dT_d = r dF_x = r [k_{\omega 1} A(r) B_{avg} dS] = 2\pi \alpha_i k_{\omega 1} A(r) B_{mg} r^2 dr \quad (3.16)$$

Çizgi akım yoğunluğu $A(r)$ statorun etkin yüzeyindeki elektrik yüküdür.

2.7.2.4 Manyetik Akı

Sinüzoidal dağılımlı dalga formu için sürekli mıknatıslar tarafından oluşturulan ortalama manyetik akı yoğunluğu:

$$\begin{aligned} B_{avg} &= \frac{1}{\pi/p - 0} \int_0^{\pi/p} B_{mg} \sin(p\alpha) d\alpha = -\frac{p}{\pi} B_{mg} \left[\frac{1}{p} \cos(p\alpha) \right]_0^{\pi/p} \\ &= -\frac{1}{\pi} B_{mg} [\cos \pi - \cos 0] = \frac{2}{\pi} B_{mg} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Kutup başına düşen yüzey parçası $2\pi r dr / (2p)$ olduğu zaman, sinüzoidal olmayan bir manyetik akı yoğunluğu dalga formu için $B_{avg} = \alpha_i B_{mg}$ her kutupta mıknatıslar tarafından oluşturulan manyetik akı:

$$\Phi_f = \int_{R_{in}}^{R_{out}} \alpha_i B_{mg} \frac{2\pi}{2p} r dr = \alpha_i B_{mg} \frac{\pi}{p} \left[\frac{r^2}{2} \right]_{R_{in}}^{R_{out}} = \alpha_i B_{mg} \frac{\pi}{2p} (R_{out}^2 - R_{in}^2) \quad (3.18)$$

Burada B_{mg} hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun tepe değeri, p kutup çifti sayısı, $R_{out} = 0.5D_{out}$ sürekli mıknatısların dış yarıçapı, $R_{in} = 0.5D_{in}$ ise sürekli mıknatısların iç yarıçapıdır.

Sürekli mıknatısların iç yarıçapının dış yarıçapına oranını veya iç çapın dış çapa oranını kullanmak daha uygun olacaktır:

$$k_d = \frac{R_{in}}{R_{out}} = \frac{D_{in}}{D_{out}} \quad (3.19)$$

Böylece,

$$\Phi_f = \alpha_i B_{mg} \frac{\pi}{2p} [(0.5D_{out})^2 - (0.5D_{in})^2] = \alpha_i B_{mg} \frac{\pi}{8p} D_{out}^2 (1 - k_d^2) \quad (3.20)$$

2.7.2.5 Elektromanyetik Tork ve EMK

Eşitlik (3.14) ve eşitlik (3.16)'ya göre EASM motor tarafından üretilen ortalama elektromanyetik tork:

$$dT_d = 2\alpha_i m_1 I_a N_1 k_{\omega 1} B_{mg} r dr \quad (3.21)$$

Eğer yukarıdaki denklem r'ye göre $D_{in}/2$ 'den $D_{out}/2$ 'ye integrali alınırsa ortalama elektromanyetik tork şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{aligned} T_d &= \frac{1}{4} \alpha_i m_1 I_a N_1 k_{\omega 1} B_{mg} (D_{out}^2 - D_{in}^2) \\ &= \frac{1}{4} \alpha_i m_1 N_1 k_{\omega 1} B_{mg} D_{out}^2 (1 - k_d^2) I_a \end{aligned} \quad (3.22)$$

Eşitlik (3.20) eşitlik (3.22)'ye yerleştirilirse ortalama tork şöyle olur:

$$T_d = 2 \frac{p}{\pi} m_1 N_1 k_{\omega 1} \Phi_f I_a \quad (3.23)$$

Sinüzoidal akım ve sinüzoidal manyetik akı yoğunluğunda rms torku elde etmek için eşitlik (3.23), $\pi\sqrt{2}/4 \approx 1.11$ katsayısı ile çarpılmalıdır:

$$T_d = \frac{m_1}{\sqrt{2}} p N_1 k_{\omega 1} \Phi_f I_a = k_T I_a \quad (3.24)$$

Burada tork sabiti:

$$k_T = \frac{m_1}{\sqrt{2}} p N_1 k_{\omega 1} \Phi_f \quad (3.25)$$

Yüksüz durumdaki EMK manyetik akı dalga formunun birinci harmoniğinin türevi alınarak $\Phi_{f1} = \Phi_f \sin \omega t$ ve $N_1 k_{\omega 1}$ ile çarpılarak bulunur:

$$e_f = N_1 k_{\omega 1} \frac{d\Phi_{f1}}{dt} = 2\pi f N_1 k_{\omega 1} \Phi_f \cos \omega t$$

Manyetik akı Φ_f eşitlik (3.18) ve eşitlik (3.20) de açıklanmaktadır. EMK'in rms değeri ise tepe değeri $\sqrt{2}$ ile bölünerek bulunur:

$$E_f = \pi \sqrt{2} f N_1 k_{\omega 1} \Phi_f = \pi \sqrt{2} p N_1 k_{\omega 1} \Phi_f n_s = k_E n_s \quad (3.26)$$

Burada EMK sabiti (armatür sabiti):

$$k_E = \pi \sqrt{2} p N_1 k_{\omega 1} \Phi_f \quad (3.27)$$

2.7.2.6 Performans Hesabı

Performans hesabını yapabilmek için öncelikle tasarlanan motorun bilinen tüm verilerini sıralamamız gerekir.

Üç fazlı, 1200 dd'da dönmesi planlanan sürekli mıknatıslı disk motor; nüvesiz bir statora sahip ve çelikten imal edilmiş ikiz rotorda yüzeye yapıştırılmış mıknatıslar bulunmaktadır. Sürekli mıknatıslar NdFeB malzemeden olup, artık manyetik akı yoğunluğu veya artık mıknatıslanması $B_r = 1,2 T$ ve bağıl tepki geçirgenliği (relative recoil permeability) $\mu_{rec} = 1,045$ 'dir. Karşılıklı rotorlar içindeki mıknatıslar arasındaki manyetik olmayan mesafe $t = 8 mm$ ve bobin kalınlığı

$t_\omega = 4 \text{ mm}$ 'dir. Burada hava aralığı $g = 2 \text{ mm}$ 'dir. Eksenel hizada mıknatısların uzunluğu $h_M = 10 \text{ mm}$ dir. Sürekli mıknatısların dış çapı stator iletkenlerinin dış çapına eşittir $D_{out} = 0,165 \text{ m}$ ve $k_d = 1/\sqrt{3}$. Kutup sayısı $2p = 12$, manyetik devrenin doyma faktörü $k_{sat} = 1,02$ statordaki bobin kenarı (oluk sayısına eşittir) sayısı $s_1 = 36$, bir bobindeki sarım (tur) sayısı $N_{ct} = 14$, paralel iletken sayısı $a_\omega = 2$, bobin adımı $\omega_c = 2$ bobin kenarıdır. Toplam armatür akımını $I_a = 10 \text{ A}$ olarak düşünersek, EMK, tork ve kayıplar hariç çıkış gücünü şu şekilde bulabiliriz:

Tek katmanlı sargı için bir fazdaki bobin sayısı:

$$n_c = \frac{s_1}{2m_1} = \frac{36}{2 \times 3} = 6$$

Bir fazdaki toplam sarım (tur) sayısı:

$$N_1 = n_c N_{ct} = 6 \times 14 = 84$$

Bir fazın bir kutba düşen bobin kenarı sayısı:

$$q_1 = \frac{s_1}{2pm_1} = \frac{36}{12 \times 3} = 1$$

Kutup adım ölçüsü:

$$\tau_c = \frac{s_1}{2p} = \frac{36}{12} = 3$$

1200 dd'daki giriş frekansı:

$$f = n_s p = \frac{1200}{60} \times 6 = 120 \text{ Hz}$$

Her kutba manyetik gerilim düşüm eşitliği:

$$4 \frac{B_r}{\mu_0 \mu_{rrec}} h_M = 4 \frac{B_{mg}}{\mu_0} \left[\frac{h_M}{\mu_{rrec}} + \left(g + \frac{1}{2} t_\omega \right) k_{sat} \right]$$

Buradan,

$$B_{mg} = \frac{B_r}{1 + \left[\frac{\mu_{rrec} (g + 0,5 t_\omega)}{h_M} \right] k_{sat}}$$

$$= \frac{1,2}{1 + [1,045(2 + 0,5 \times 4)/10]1,02} = 0,841 \text{ T}$$

Eşitlik (3.20)'den manyetik akı,

$$\Phi_f = \alpha_i B_{mg} \frac{\pi}{8p} D_{out}^2 (1 - k_d^2)$$

$$= \frac{1}{8} \frac{2}{\pi} \frac{\pi}{3} 0,841 \times 0,165^2 \left[1 - \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^2 \right] = 0,0006296 \text{ Wb}$$

Sargılarla ilgili; dağılım katsayısı k_{d1} (eşitlik (3.7)), adım katsayısı k_{p1} (eşitlik (3.8)), sargı katsayısı $k_{\omega 1}$ (eşitlik (3.9)) şöyle bulunur:

$$k_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m_1}\right)}{q_1 \sin\left[\frac{\pi}{(2m_1 q_1)}\right]} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \times 3}\right)}{1 \sin\left[\frac{\pi}{(2 \times 3 \times 1)}\right]} = 1$$

$$k_{p1} = \sin\left(\beta \frac{\pi}{2}\right) = 0,866; \quad \beta = \frac{\omega_c}{\tau_c} = \frac{2}{3}$$

$$k_{\omega 1} = k_{d1} k_{p1} = 0,866$$

EMK sabiti eşitlik (3.27)'ye göre ve tork sabiti de eşitlik (3.25)'e göre sırasıyla şu şekilde bulunur:

$$k_E = \pi \sqrt{2} p N_1 k_{\omega 1} \Phi_f$$

$$k_E = \pi\sqrt{2} \times 6 \times 84 \times 0,866 \times 0,0006296 = 1,221 \text{ V/(tur/sn)} = 0,0204 \text{ V/dd}$$

$$k_T = \frac{m_1}{\sqrt{2}} p N_1 k_{\omega 1} \Phi_f = k_E \frac{m_1}{2\pi}$$

$$k_T = 1,221 \frac{3}{2\pi} = 0,583 \text{ Nm/A}$$

1200 dd'daki EMK:

$$E_f = k_E n = 0,0204 \times 1200 = 25,5 \text{ V}$$

Armatür akımını $I_a = 10 \text{ A}$ iken elektromanyetik tork:

$$T_d = k_T I_a = 0,583 \times 10 = 5,83 \text{ Nm}$$

Sonuç olarak elektromanyetik güç ise:

$$P_{elm} = 2\pi n T_d = 2\pi \frac{1200}{60} \times 5,83 = 732,6 \text{ W}$$

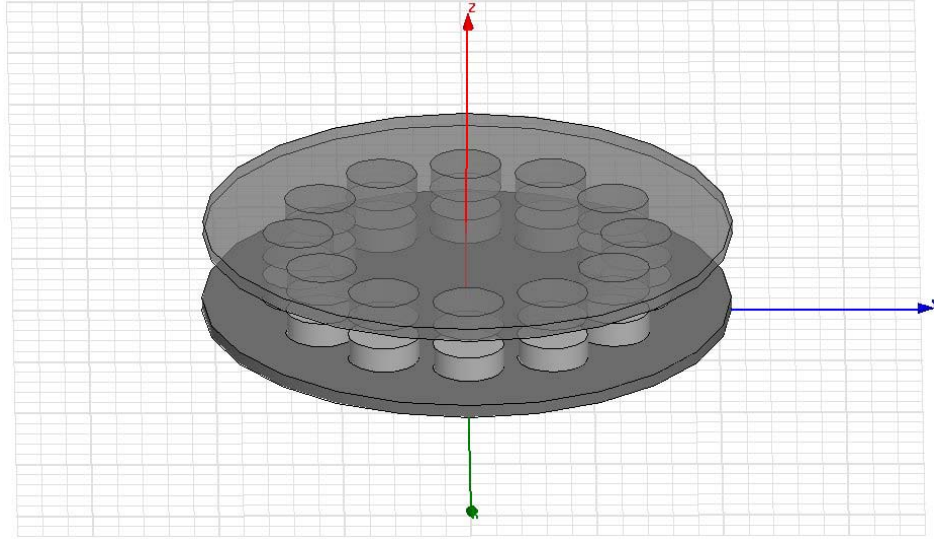
3 BENZETİM (SİMÜLASYON)

Benzetim işlemi Ansoft firmasının ürünü olan Maxwell 3D yazılımı ile gerçekleştirildi. Kullanılan manyetik modelleme programında bir motorun benzetimini yapmak için şu adımları izlemek gerekmektedir:

- İlk adımda, benzetimi yapılacak olan motorun fiziksel boyutlarının ayrıntılı olarak belirlenmeli ve ardından CAD modeli oluşturulmalı,
- İkinci adımda, CAD çizimi tamamlanan modelde kullanılan tüm parçaların her birinin malzeme yapısı tanımlanmalı,
- Üçüncü adımda, kullanılan mıknatısların manyetizasyon yönleri, bobinlerden geçecek akımın şiddeti ve yönü ve benzetim sonucu hangi parçadan hangi sonuçların (kuvvet veya tork) alınacağı belirlenmelidir. Burada bir püf noktası; birbirine temas eden bobinleri birbirinden yalıtımak gereklidir.
- Dördüncü adımda, benzetim işlemi için çözüm metodu ayarlanmalıdır, bu ayarlamalar işlem hızını ve hassasiyeti etkileyen ayarlamalardır.
- Son olarak benzetim işlemi başlatılır. İşlem tamamlandıktan sonra elde edilen veriler ile manyetik alan, manyetik akı yoğunluğu grafiği gibi grafikler elde edilebilmektedir.

3.1 CAD Modeli

İlk olarak, CAD modeli oluşturulmadan önce, yukarıda bahsedildiği üzere fiziksel boyutlar ayrıntılı olarak belirlendi. Burada tüm motorun fiziksel şeklini belirleyen en önemli etken mıknatıslar olmaktadır. Tasarım elimizde mevcut bulunan 28 mm çapında 10 mm kalınlığında daire şeklinde NdFeB mıknatıslar temel alınarak yapıldı. Mıknatıslar boyutlarından dolayı makine 12 kutuplu olarak tasarlandı. Mıknatıslar rotor yüzeyine yapıştırıldı. Her bir mıknatısın arası 6 mm olarak ayarlandı (5). CAD modeli oluşturulurken motorun tamamını çizmek yerine, manyetik benzetimi etkileyebilecek asgari parçalar çizildi. İlk olarak sadece rotorlar ve mıknatısların bulunduğu model oluşturuldu. Oluşturulan bu ilk model Şekil 3.1’de görülmektedir. Statorlar daha sonra CAD modeline eklendi.



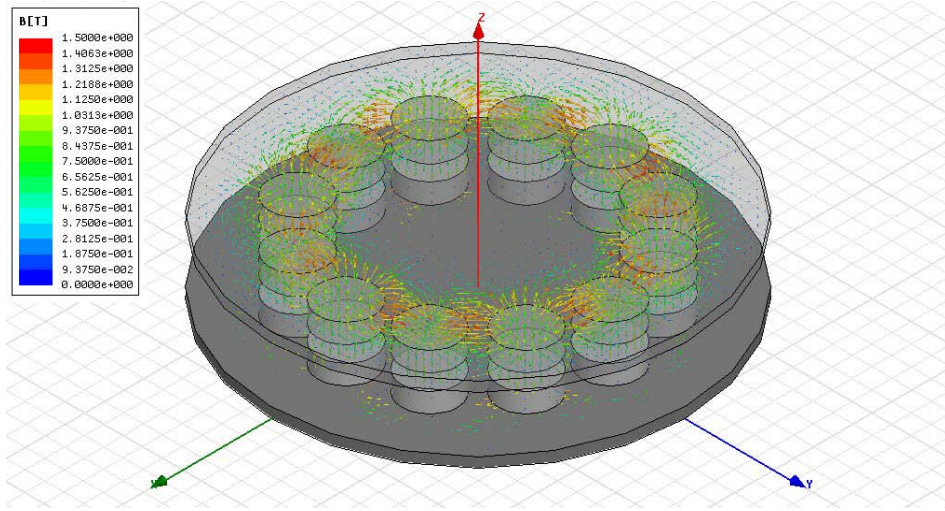
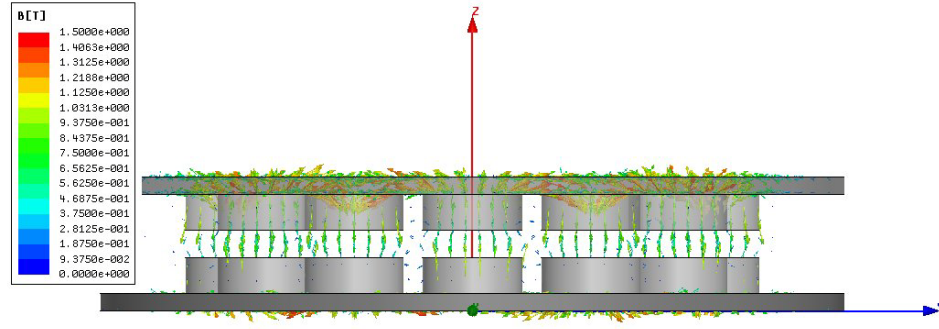
Şekil 3.1 Benzetim için çizilen rotor ve mıknatısların üç boyutlu görüntüsü

3.2 Malzeme Yapısı

Benzetimde toplam dört farklı malzeme kullanıldı. Mıknatıslar NdFeB (Neodyum-Demir-Bor), rotor çelik (steel 1008), bobinler bakır ve benzetim ortamı hava olmak üzere malzemeler tanımlandı.

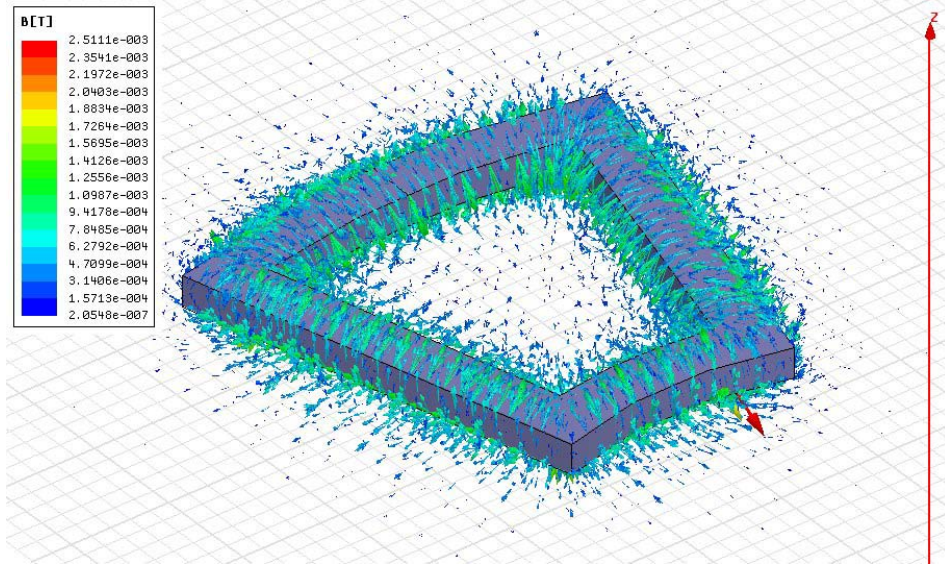
3.3 Benzetim Sonuçları

İlk yapılan benzetimler, optimum rotor kalınlığını belirlemek amacıyla yapıldı. Çünkü rotor kalınlığının asgari düzeyde tutulması gerekmektedir. Yapılan benzetimler sonucu en uygun kalınlığın 5 mm olduğu saptanmıştır. Şekil 3.2’de rotor kalınlığı 5 mm iken yapılan benzetim sonucundaki manyetik akı vektörleri görülmektedir.

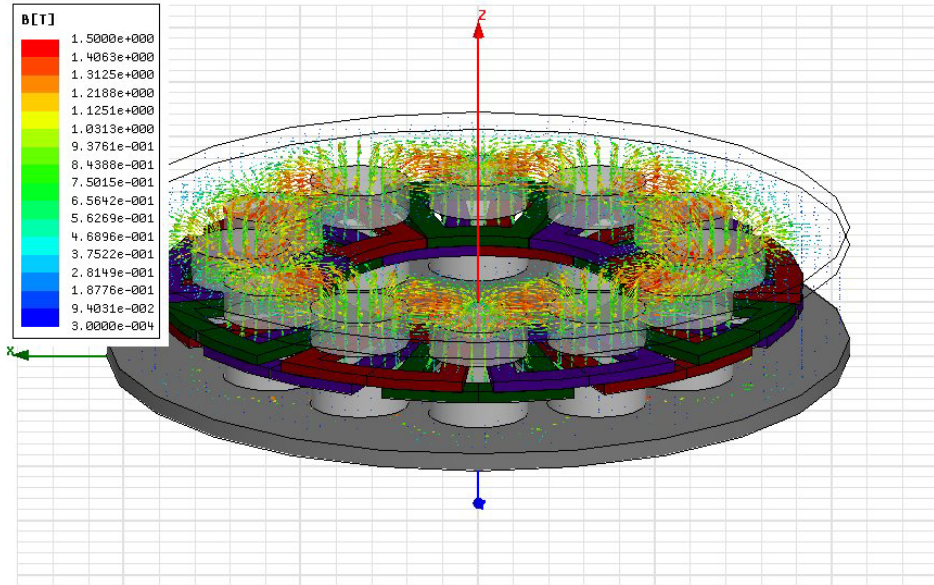


Şekil 3.2 Rotor kalınlığı 5 mm iken oluşan manyetik akı vektörleri

Bir sonraki aşamada sisteme stator sargıları eklenerek benzetimler yapılmıştır. Fakat burada elde edilen sonuçlar tatmin edici olmamıştır.



Şekil 3.3 Sadece tek bir bobine akım uygulandığında görülen manyetik akı vektörleri



Şekil 3.4 Statordan akım geçerken oluşan manyetik akı vektörleri

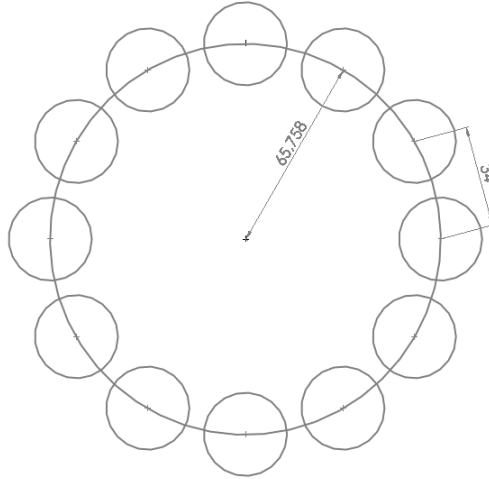
4 Üretim

Üretilecek olan motorun tüm tasarımını belirleyen ana etken alımı yapılmış olan 24 adet 28 mm çapında, 10 mm kalınlığındaki NdFeB mıknatıslardır. Buradan yola çıkılarak üretim için izlenecek adımlar şu şekilde sıralanabilir:

- Öncelikle alımı yapılmış olan 24 adet mıknatıs ile yapılacak motor topolojisinin belirlenmesi gerçekleştirildi.
- Motorun topolojisi “iki rotor tek stator” olacak şekilde belirlendi. Böylece her bir rotora 12 mıknatıs düşeceği için motor 12 kutup olacak şekilde tasarlandı.
- Mıknatısların rotordaki konumlarını, yerleştirileceği çemberi, belirlemek için, mıknatısların arasında 6 mm boşluk olacağı belirlendi (2). Buradan mıknatısların yerleştirileceği çemberin yarıçapı 65,758 mm olarak hesaplandı. Mıknatısların yerleşimi Şekil 4.1’de görülmektedir.
- Bir sonraki adımda; her bir kutup üzerine üç bobin kenarı gelecek şekilde bobin kenarlarının genişliği 8 mm olarak belirlendi. Kalınlığını ise hem mıknatısların birbirine olan mesafesini azaltmak hem de motorun toplam kalınlığını azaltmak amacıyla 2 mm olarak belirlendi. Bir tane bobinin boyutları Şekil 4.6’de görülmektedir.
- Böylece stator boyutu ve de rotor boyutu belirlendi.
- Rotorun kalınlığı için, yapılan benzetimler sonucu, yukarıda bahsedildiği üzere, uygun değer 5 mm olarak bulundu.
- Tüm boyutlar kesin olarak belirlendikten sonra ilk olarak rotorun üretimi gerçekleştirildi. İki rotorlu yapı üretim aşamasında, her iki rotorun simetrik olarak yapılabilmesi için, kolaylık sağlar. Bu aşamada Şekil 4.3’da görülen rotorun üretimi torna makinesinde yapıldı.
- Rotorun üretimi gerçekleştirilmesinin ardından belirlenen çapta, uygun yerlere mıknatıslar yerleştirildi. Mıknatıslar rotor çeliğine metal yapıştırıcısı ile yapıştırıldı.
- Belirlenen bobin ölçüleri doğrultusunda toplam her bir faza 6 adet bobin düşecek şekilde 18 adet bobin sarıldı. Bu bobinler mıknatıslara

karşılıklı gelecek şekilde, aynı çapta bir çember üzerine, yerleştirilerek bir kalıp ile sıkıştırıldı.

- Bir sonraki adımda, stator reçine içine gömülmeden önce, rotor konumunu belirlemek ve fazları doğru bir şekilde tetikleyebilmek için stator içine en az üç tane manyetik sensör yerleştirilmelidir. Sensör konumları 120° elektriksel açı olacak şekilde belirlendi.
- Hazırlanan bobinler milin etrafına uygun bir şekilde yerleştirilerek reçine içine gömüldü. Yapılan motorda sadece üç fazın uçlarını çıkarmak yerine tüm bobinlerin uçları çıkarıldı. Böylelikle statorda farklı bobin bağlantıları denenebilmektedir.



Şekil 4.1 Mıknatısların Yerleşimi

4.1 Rotor

Rotor üretimi için ilk olarak rotorun CAD çizimi ayrıntılı olarak, Solidworks yazılımı ile oluşturuldu.

Statorun bağlı olduğu ve rotorların üzerinde döneceği mil için 40 mm çapında delik oluşturulmuştur. Motor boyutlarına göre milin büyük olmasının nedeni laboratuvarında bulunan torkmetreye bağlayabilmektir. Bu noktada ikinci önemli husus rulman yuvalarıdır. Piyasada 40 mm iç çap için en çok 80 mm dış çaplı rulman

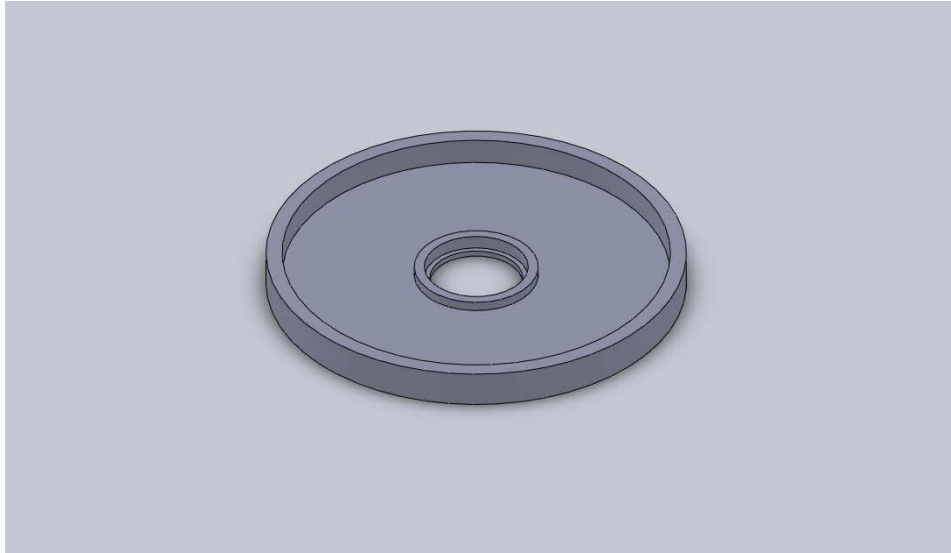
bulunmaktadır. Bu değer makinenin boyutları itibariyle büyük bir değerdir. Bu nedenle piyasada seyrek bulunan 52 mm dış çaplı rulman referans alınarak tasarım oluşturuldu. Rotor modelinin üç boyutlu CAD görüntüleri Şekil 4.2’de görölmektedir.

Oluşturulan çizim doğrultusunda gerekli olan elik malzeme alımı yapıldı. Bu elik malzeme torna makinesinde işlenerek teknik çizimi yapılan rotor üretildi.

İlk olarak üretilen bu rotor çeliğine mıknatıslar sabitlendi. Mıknatıslar elięi çok iyi çekmesine rağmen yerlerinden hareket etmemesi açısından, elik üzerine metal yapıştırıcısı ile yapıştırıldı. Mıknatısların rotor üzerine yapıştırılmış hali Şekil 4.4’de görölmektedir. Yine de motor dönmeye başladıktan sonra her bir mıknatıs üzerinde büyük bir merkezkaç kuvveti oluşacağından, tüm mıknatısların etrafında 3 mm kalınlığında bir reçine katman oluşturuldu. Tüm mıknatıslar bir reçine içinde gömölü olduğu için, motor çalıştırıldığında oluşacak merkezkaç kuvvet ile dışa doğru kopma engellendi.



(a)



(b)

Şekil 4.2 Üretim için çizilen rotorun (a) üstten ve (b) perspektif görüntüsü



Şekil 4.3 Üretimi yapılan rotorun görüntüsü



Şekil 4.4 N Kutuplu Mıknatıslar Yerleştirildiğinde



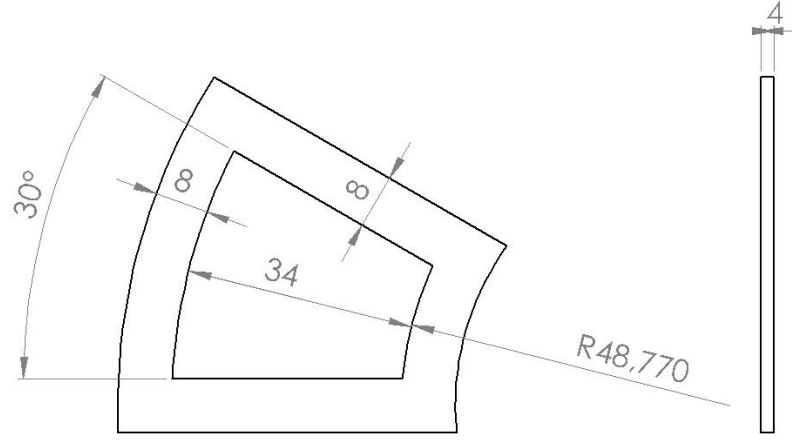
Şekil 4.5 Tek Bir Rotorun Son Hali

4.2 Stator

Yapılan benzetimler sonucunda ve motorun boyutlarını minimumda tutmak amacıyla stator kalınlığının 2 mm olması düşünüldü.

4.2.1 Bobinler

Yapılan literatür taraması sonucunda; bobin şeklinin trapezoid olması nüvesiz statorlu motorlar için en avantajlı sonucu verdiği görülmüştür. Mıknatısların çapının 28 mm olması ve yan yana iki mıknatıs arasındaki boşluğun 6 mm olması bobinlerin etkin kenar genişliğinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Çünkü yapılan üç fazlı makinede her bir kutubun üzerine üç bobin kenarı gelmektedir. Bu bağlamda bobinlerin etkin kenarının en fazla 8,51 mm olması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle bobinin etkin kenarının genişliği 8 mm olarak belirlendi. Oluşturulan bobinin boyutları Şekil 4.6'deki gibidir.



Şekil 4.6 Sarımı yapılan bobinlerin boyutları



Şekil 4.7 Sarılan Tek Bir Bobin

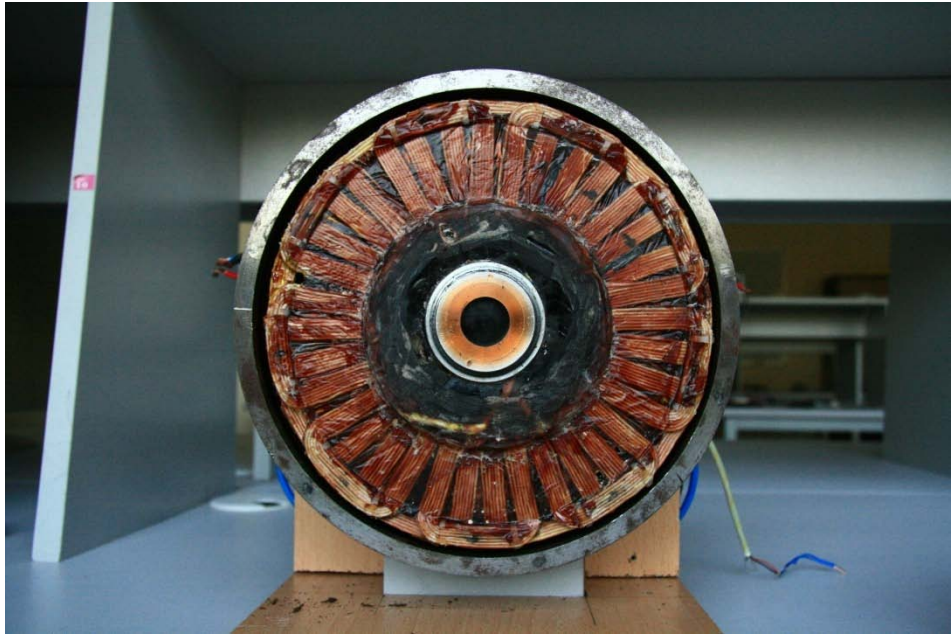


Şekil 4.8 Bobinlerin Dizilimi

Motorda toplam 18 bobin bulunmaktadır. Bobinleri sarmak amacıyla piyasada tel araştırması yapıldı. Bobin kesitinin çok küçük olması dolayısıyla, kesit alanını en verimli şekilde kullanmak için kare kesitli bakır tel araştırması yapıldı. Daha fazla tur sayısı elde etmek için de telin 1 x 1 mm olması düşünüldü. Yapılan araştırmalar sonucu piyasada 1 x 1 mm kalınlığında kare kesitli bakır tel bulunamadı. Bunun üzerine sarımlarda 1 mm çapında Litz teli uygulandı. Kullanılan 1 mm çapındaki litz teli 0,25 mm çapında 15 yalıtılmış bakır telin aynı anda sarılması ve etrafının manyetik olmayan bir malzeme ile, telleri bir arada tutması için, sarılmasıyla meydana gelmektedir. Bu telin normal yalıtılmış bobin teline göre artışı, veriminin yüksek olması, yüzey etkisini (yüzey akımı) azaltmasıdır. (6) Kullanılan bu teller ile toplam 18 adet bobin sarıldı.



Şekil 4.9 Üretimi yapılan statorun sargıları



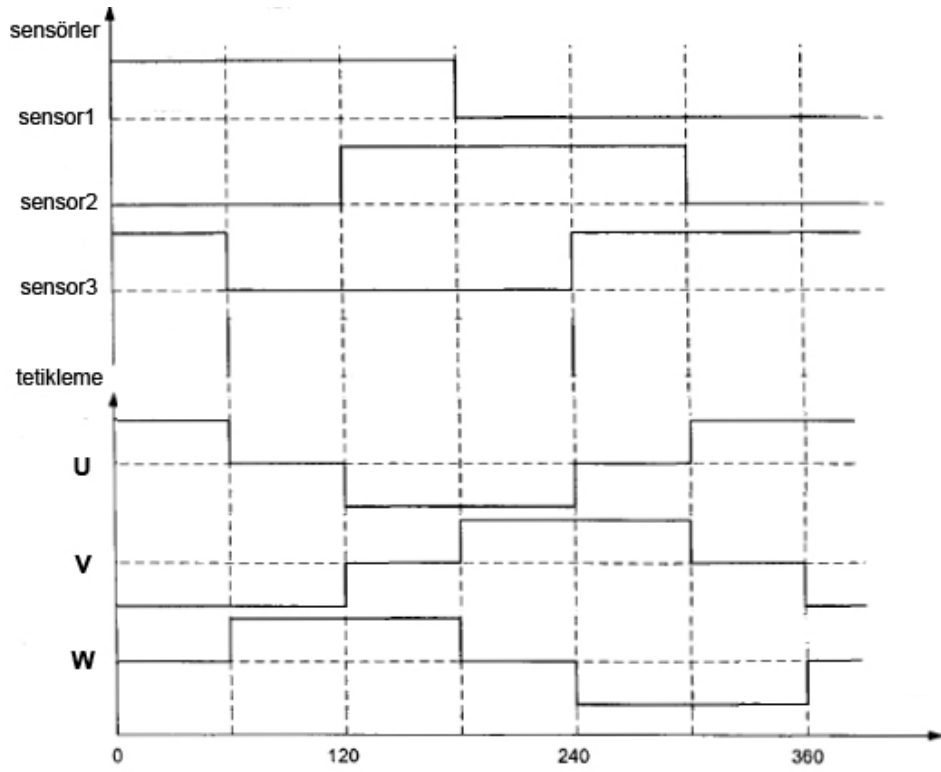
Şekil 4.10 Statorun Motor İçinde Konumlandırılması

4.2.2 Manyetik Algılayıcılar (Hall Sensörler)

Fırçasız SM motorların çalışması için rotorun konum bilgisine ihtiyaç vardır. Rotorun konum bilgisi öğrenmek için ise sensörlü ve sensörsüz olmak üzere iki

yöntem vardır. (Burada sensörsüz yapıya hiç değinilmeyecektir.) Sensörlü yapı, sensörlerden dolayı sisteme fazladan bir maliyet getirmektedir fakat günümüzde yarıiletken teknolojisinin gelişmesi ile sensör fiyatları da oldukça düşmüştür. Uygulama kolaylığı ve hassasiyet bakımından sensörlü yapı tercih edilmiştir. Burada kullanılan konum sensörü, çok çeşitli olabilir. En yaygın olanı ise, manyetik sensörüdür (hall effect sensörü). Rotorun konum bilgisini işlemciye göndererek fazların doğru bir şekilde tetiklenmesini sağlar.

Birbirine 120° elektriksel faz farkı ile yerleştirilen üç adet sensör kullanılır. Bu sensörler, manyetik alan etkisiyle aktif olur. Rotorda bulunan sürekli mıknatıslar, bu sensörleri etkileyerek rotor konumunu verir. Şekil 4.11’de manyetik sensörlerinin motorun konumunun değişmesiyle verdiği çıkışlar ve buna paralel olarak üç fazın tetikleme zamanlaması görülmektedir.



Şekil 4.11 Manyetik Sensörlerin Çıkışları ve Tetikleme Zamanlaması

5 SONUÇLAR

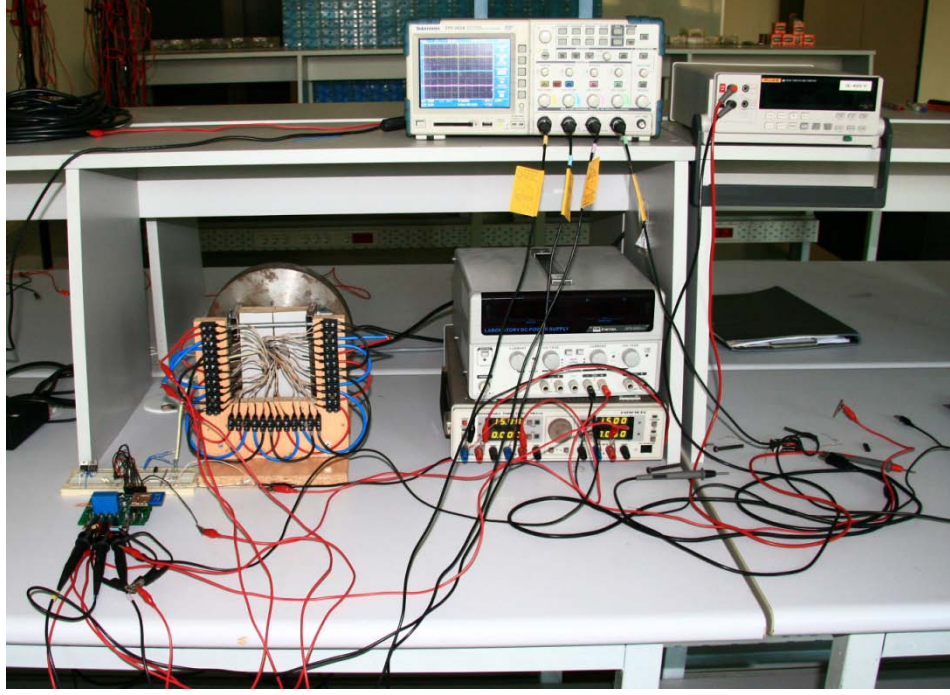
Bu tezde özel olarak içte tek statora sahip etrafında simetrik rotor çifti bulunan topoloji ile ilgilenildi. Elimizde bulunan mıknatıslar ve yapılan literatür taraması sonucunda en avantajlı yapının tek stator iki rotorlu yapı olduğu öngörüldü.

Daha sonra motorun fiziksel özelliklerinin belirlenmesi üzerinde duruldu. Motorun yapısı hâlihazırda bulunan NdFeB mıknatıslar temel alınarak geliştirildi. Bu hem kutup sayısında hem de motorun topolojisinde etkileyici bir rol almaktadır.

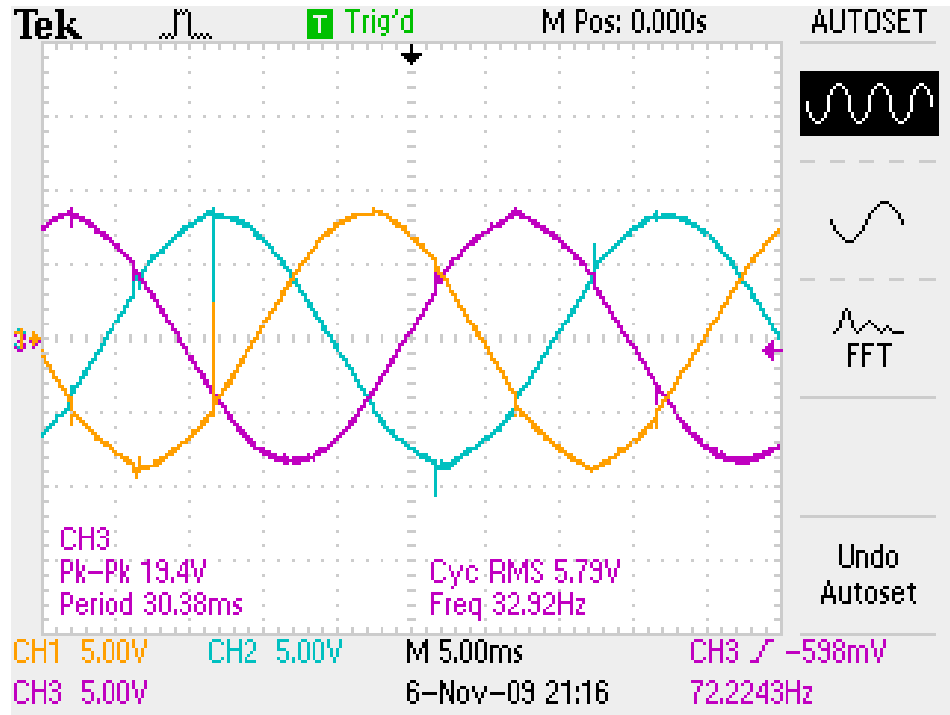
Belirlenen motor özelliklerinin ardından, bu özelliklere dayanarak teorik hesaplamaları yapıldı. Teorik hesaplamaların sonucunda 1200 dd'da, 732,6 W çıkış gücü elde edildi. Burada kayıplar hesaba katılmamıştır.

Ayrıntılı motor boyutlarına karar verildikten sonra benzetim işlemine başlandı. Benzetim işlemi için öncelikle karar verilen motorun CAD çizimi oluşturuldu. Manyetik benzetim yazılımının diğer ayarlamaları yapıldıktan sonra sonuçlar elde edildi.

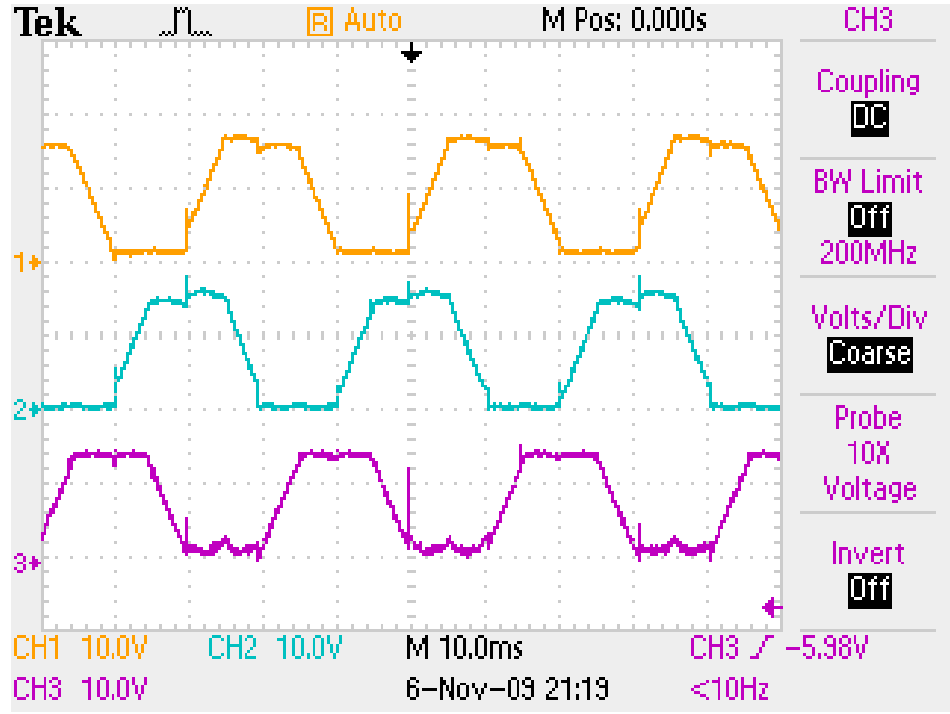
Daha sonra motorun üretimine geçildi. Rotorun ve milin üç boyutlu çizimleri oluşturuldu. Bu çizimlere dayanarak mil ve rotor için gerekli olan malzemeler alındı. Alınan malzemeler torna makinesi kullanılarak işlendi ve rotorlar ile mil üretildi. Alımı yapılan litz telleri ile bobinler sarıldı, daha sonra bobinlere istenilen şekiller verildi. Bobinler belirli bir düzende sıralanarak stator yapısı oluşturuldu. Rotor konumunu belirlemek amacıyla gerekli olan sensörler uygun yerlere yerleştirildi. Oluşturulan bu stator yapısını mile sabitlemek ve manyetik olmayan gövdesini oluşturmak amacıyla reçine kullanıldı. Tüm bobinler, sensörler ve mil bir kalıpta reçine içine gömüldü. Tüm bu işlemler tamamlandıktan sonra parçalar bir araya getirilerek motor oluşturuldu.



Şekil 5.1 Motor Test Düzenegi



Şekil 5.2 Her Bir Fazın Akım Grafiği



Şekil 5.3 Her Bir Fazın Sürücü Çıkış Gerilim Grafiği

Oluşturulan motorun çalışmasını test etmek için üzerinde mikrodnetleyici bulunan bir kontrol kartı kullanıldı. Her bir fazı sürmek için ise Mitsubishi firmasının ürettiği Akıllı Güç Modülü (DIP-IPM) kullanıldı. Yapılan testlerde motorun doğru bir şekilde çalıştığı görüldü.

KAYNAKÇA

1. **Francesco Profumo, Zheng Zhang, Alberto Tenconi.** Axial Flux Machines Drives: A New Viable Solution for Electric Cars. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. February, 1997, Cilt Vol.44, No.1.
2. **Parviainen, Asko.** *Design of Axial-Flux Permanent-Magnet Low-Speed Machines and Performance Comparison Between Radial-Flux and Axial-Flux Machines*. Lappeenranta : Lappeenranta University of Technology, 2005. 952-214-029-5.
3. **ŞAHİN, Funda.** *Design and Development of A High-Speed Axial-Flux Permanent-Magnet Machine*. Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2001. 90-386-1380-1.
4. **N. F. Lombard, M. J. Kamper.** Analysis and Performance of an Ironless Stator Axial Flux PM Machine. *IEEE Transaction on Energy Conversion*. December, 1999, Cilt Vol.14, No.4.
5. *Magnet Topology Optimization to Reduce Harmonics in High-Speed Axial Flux Generators.* **El-Hasan, T. S. Luk, P. C. K.** 2003, VOL 39; PART 5; PART 2, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS MAG, s. 3340-3342.
6. *Design Considerations of High Speed Axial Flux permanent magnet Generator with Coreless Stator.* **M. Sadeghierad, H. Lesani, H. Monsef, A.Darabi.** s.l. : The 8th International Power Engineering Conference, 2007. 978-981-05-9423-7.
7. **Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper.** *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. s.l. : Springer, 2008. 978-1-4020-6993-2.
8. **Kurt, Ünal.** *Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makineler için Yeni Tasarım Modeli Geliştirme*. Samsun : Ondokuzmayıs Üniversitesi, 2006.

9. **Ansoft.** *User's Guide - Maxwell 3D 11.* [User's Guide] s.l. : Ansoft.
10. **Hanselman, Duane C.** *Brushless permanent-magnet motor design.* New York : McGraw-Hill, 1994. 0070260257.
11. **Jacek F. Gieras, Mitchell Wing.** *Permanent magnet motor technology : design and applications.* New York : Marcel Dekker, 2002. 0824707397.

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Tokat'ın Erbaa ilçesinde doğan Ceyhun SEZENOĞLU, lisans eğitimini Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde 2006 yılında tamamladı. 2007 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olmuş ve halen aynı görevini sürdürmektedir.