

**FIRÇASIZ DA JENERATÖRÜ KULLANAN DÜŞÜK GÜÇLÜ BİR
RÜZGAR TÜRBİNİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Emin YILDIRIZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2008
ANKARA**

Emin YILDIRIZ tarafından hazırlanan FIRÇASIZ DA JENERATÖRÜ KULLANAN DÜŞÜK GÜÇLÜ BİR RÜZGAR TÜRBİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. M. Timur AYDEMİR
Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Osman GÜRDAL
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, G. Ü.

Yrd. Doç. Dr. M. Timur AYDEMİR
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G. Ü.

Doç. Dr. İres İSKENDER
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G. Ü.

Tarih: 07 / 07 / 2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Emin YILDIRIZ

FIRÇASIZ DA JENERATÖRÜ KULLANAN DÜŞÜK GÜÇLÜ BİR RÜZGAR TÜRBİNİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Emin YILDIRIZ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Temmuz 2008

ÖZET

Enerji talebindeki artış ve hammadde sıkıntısı nedeniyle tüm dünyada, mevcut potansiyelleri en iyi ve verimli şekilde kullanmak büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle şimdiye kadar, çevre dostu olan ve havadan elektrik enerjisi üreten rüzgar türbinlerinin farklı konfigürasyonları üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, bu konfigürasyonlardan nüvesiz statorlu eksenel akıllı sürekli mıknatıslı bir rüzgar türbininin prototipi gerçekleştirilmiştir. Kırsal kesimlerde kullanılmak üzere oluşturulan basit yapılı, düşük güçlü bu jeneratörün aynı ölçü ve özelliklerinde 3 boyutlu modeli, Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanan bir paket programda oluşturulmuştur. Sonlu Elemanlar yöntemi ve deneysel çalışmaların sonuçları, farklı hız değerlerinde, yüklü ve yüksüz durumlarda incelenmiş ve oluşturulan modelin gerçeğe çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bilim Kodu : 905.1.038
Anahtar Kelimeler : Sonlu elemanlar yöntemi, eksenel akıllı, sürekli mıknatıslı jeneratör, rüzgar türbini
Sayfa Adedi : 61
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. M. Timur AYDEMİR

**A LOW POWER WIND TURBINE IMPLEMENTATION USED BRUSHLESS
DC JENERATOR**

(M.Sc. Thesis)

Emin YILDIRIZ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

July 2008

ABSTRACT

As a result of the tremendous increase in energy demand and shortage of raw materials, efficient use energy of sources have become extremely important. Wind energy is one of the most available renewable energy sources and various wind turbine configurations have been studied to obtain electrical energy from wind in the most effective way. An axial flux, coreless stator, permanent magnet brushless motor have been implemented in this thesis. The simple structure of the prototype machine makes it proper for rural applications. 3-D model of the generator has been analyzed by finite element method. Results obtained from the model and experimental work at different power and speed operations have been compared and found in very good approximation.

Science Code : 905.1.038

**Key Words : Finite element method, axial flux, permanent magnet generator,
wind turbine**

Page Number: 61

Adviser : Assist. Prof. Dr. M. Timur AYDEMİR

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Yrd. Doç. Dr. M. Timur AYDEMİR'e, sonlu elemanlar yöntemiyle ilgili konularda değerli bilgileriyle desteğini esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Osman GÜRDAL'a ve Kocaeli Üniversitesi öğretim üyesi hocam Yrd. Doç. Dr. Metin AYDIN'a, pratik çalışmalar süresince sınırsız yardımlarından dolayı Nuriş Elektrik ve Kaynak makinaları San. ve Tic. AŞ.'ye ve başta AR-GE mühendisi Oğuz ŞİMŞEK olmak üzere tüm çalışanlarına, deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin bir bölümünü hibe eden Uzun Mühendislik sahibi Sn. Ferhat UZUN'a, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan sevgili aileme, çok değerli arkadaşım Gülsüm YILMAZER'e ve can dostum Öğr. Gör. Koray ÖZSOY'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. SÜREKLİ MIKNATISLI MAKİNELER	6
2.1. Radyal Akılı SM Makineler.....	8
2.1.1. Rotor içte radyal akılı SM makineler.....	9
2.1.2. Rotor dışarıda RASM makineler	9
2.2. Eksenel Akılı SM Makineler	10
2.2.1. Tek taraflı EASM makineler.....	11
2.2.2. Çift taraflı EASM makineler.....	12
2.2.3. Çoklu disk yapılı EASM makineler.....	15
2.3. Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Topolojilerden Bazılarının Karşılaştırılması	17
3. NÜVESİZ STATORLU EKSENEL AKILI JENERATÖRÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE TEST DÜZENEĞİ.....	19
3.1. Statorun Elde Edilmesi	19

Sayfa

3.2. Rotorun Elde Edilmesi	22
3.3. Doğrultucular ve Batarya Şarj Kontrolü.....	24
3.4. Test Düzeneği	26
4. JENERATÖRÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ	28
4.1. Stator Modeli	28
4.2. Rotor Modeli.....	29
5. DENEYSEL SONUÇLARLA SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	34
5.1. SEY Sonuçları.....	34
5.2. Test Düzeneği Sonuçları.....	42
5.2.1. Kısa devre testi	42
5.2.2. AA gerilim testi	42
5.2.3. DA gerilim testi	42
5.2.4. Yüklü ve yüksüz durum testleri.....	43
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR.....	51
EKLER.....	53
Ek-1 Stator ve rotor disklerinin yapılışı.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	61

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Stator malzemeleri.....	19
Çizelge 3.2. Stator sargılarının özellikleri	20
Çizelge 3.3. Rotor disklerinde kullanılan malzemeler.....	22
Çizelge 3.4. Sürücü AA motor ve AA kontrolün özellikleri.....	27

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. En sık kullanılan manyetik materyallerin BH eğrileri	7
Şekil 2.2. Rotor içte RASM	9
Şekil 2.3. Rotor dışarıda RASM	10
Şekil 2.4. Tek taraflı EASM ve rotor dengeli tek taraflı EASM	11
Şekil 2.5. TORUS makinenin temel kesit görünüşü.....	12
Şekil 2.6. NN ve NS tip TORUS makine.....	13
Şekil 2.7. NN ve NS tipi oluklu statora sahip çift taraflı EASM	14
Şekil 2.8. Oluksuz ve oluklu çift taraflı rotor içte EASM.....	14
Şekil 2.9. Çoklu disk yapılı EASM	15
Şekil 2.10. Nüvesiz statorlu EASM 1: Stator sargıları, 2: Rotor çeliği, 3: SM'ler, 4: Çerçeve, 5: Rulman, 6: Mil.....	16
Şekil 2.11. Nüvesiz statorlu EASM'de manyetik akı yolu	16
Şekil 2.12. Nüvesiz disk tipi sürekli mıknatıslı makine 1: Nüvesiz stator sargıları, 2: SM'ler, 3: Rotorlar, 4: Mil, 5: Rulmanlar, 6: Çerçeve	17
Şekil 3.1. Sargı ölçüleri.....	20
Şekil 3.2. Jeneratörün kurulumu.....	24
Şekil 3.3. Sargıların yıldız bağlanması ve 5 fazlı doğrultucu	25
Şekil 3.4. Şönt regülatör devresi.....	25
Şekil 4.1. EASM makinenin 3 boyutlu stator modeli	28
Şekil 4.2. EASM makinenin 3 boyutlu rotor disk modeli.....	29
Şekil 4.3. Rotor modelinde kullanılan çeliğin BH eğrisi	30
Şekil 4.4. EASM makinenin oluşturulmuş modelinin tamamı.....	32

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. 3 boyutlu modelin gözelenmiş görünümü	32
Şekil 5.1. SEY modelindeki B manyetik akı yoğunluğu	34
Şekil 5.2. SEY modeldeki H manyetik alan şiddeti.....	35
Şekil 5.3. Hava aralığı akı yoğunluğu.....	35
Şekil 5.4. Rotor konumlarına bağlı akı değişimleri a) Bir sargı içerisindeki, b) Yan yana konumlandırılmış iki sargı içerisindeki	37
Şekil 5.5. Rotor konumlarına bağlı indüklenen gerilimler a) Farklı hızlarda bir sargıda, b) 200 d/d mil hızında yan yana bulunan iki sargıda.....	38
Şekil 5.6. 5 fazlı jeneratör çıkış gerilimi.....	39
Şekil 5.7. Jeneratör çıkışındaki 5 fazlı AA ve doğrultucu DA çıkış işareti	39
Şekil 5.8. Jeneratör hızı ile çıkış DA gerilimin değişimi	40
Şekil 5.9. Rotorların 0. konumunda 1. sargının akım yoğunluğu	40
Şekil 5.10. Yük ile manyetik akılardaki bozulmalar a) Rotorların 0. konumlarında, b) Rotorların 6. konumlarında.....	41
Şekil 5.11. Yüklü ve yüksüz durumda 1. sargıda indüklenen gerilimler.....	41
Şekil 5.12. Bir faz gerilimi osiloskop ölçümü.....	43
Şekil 5.13. 200 d/d hızda yüksüz durumda yan yana bulunan iki sargıdaki gerilimler.....	44
Şekil 5.14. 200 d/d hızda yüksüz durumda fazlar arası gerilimler	44
Şekil 5.15. 200 d/d hızda yüksüz durumda doğrultucu çıkış gerilimi	45
Şekil 5.16. 200 d/d hızda yük altında bir sargı gerilimi.....	45
Şekil 5.17. 150 d/d hızda sabit yükte fazlar arası gerilim	46
Şekil 5.18. 200 d/d hızda sabit yükte fazlar arası gerilim.....	46
Şekil 5.19. Yüksüzken ölçülen DA çıkışın hızla değişimi.....	47

Şekil	Sayfa
Şekil 5.20. Sabit yükte jeneratör hızıyla çıkış gücünün değişimi.....	47
Şekil 5.21. Sabit hızlarda çıkışın I-V değişimi.....	48

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Stator kalıbı.....	21
Resim 3.2. Rotorun son hali	23
Resim 3.3. Test düzeneği	26

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simge ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
AA	Alternatif akım
B	Manyetik akı yoğunluğu
B_g	Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu
B_r	Mıknatıs kalıcı akı yoğunluğu
(BH)_{max}	Manyetik enerji yoğunluğu
D	Çap
DA	Doğru akım
e(t)	Sargıda indüklenen AA gerilim
F	Sargı geriliminin frekansı
H	Manyetik alan şiddeti
H_c	Koersivite kuvveti
H_{ci}	Artık mıknatıslık
J	Akım yoğunluğu
M_p	Mıknatıslanma
N	Sargı sarım sayısı
n	Jeneratör hızı
p	Toplam kutup sayısı
R_{DA}	Doğru akım sargı direnci
R_{AA}	Alternatif akım sargı direnci
Q	Doğrultucu çıkış DA gerilimi
μ_r	Bağıl geçirgenlik
Φ_g	Hava aralığı manyetik akısı
θ	Rotor açısal konumu
ω	Sargı açısal hızı

Kısaltmalar**Açıklama****EİE**

Enerji İşleri Etüt İdaresi

TÜREB

Türkiye Rüzgar Enerji Birliği

SEY

Sonlu Elemanlar Yöntemi

PWM

Darbe Genişlik Modülasyonu

SM

Sürekli Mıknatıslı

RASM

Radyal Akılı Sürekli Mıknatıslı

EASM

Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı

NdFeB

Neodyum-Demir-Boron

SmCo

Somaryum-Kobalt

1. GİRİŞ

Yaşadığımız dünyada insan nüfusu ve teknolojiden yararlanma miktarı her geçen gün artmakta ve kişi başına düşen enerji miktarı, insanoğlunu tüm enerji potansiyellerini mümkün olan en verimli şekilde kullanmaya sevk etmektedir. Fosil yakıtlarının tükenişinin yaklaşması ile birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi giderek artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de rüzgardır.

Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) Genel Müdürlüğünün Aralık 2006 verilerine göre, dünya genelinde kurulu rüzgar enerjisi güç kapasitesi 74 223 MW'tır. Bu gücün ülkelere göre dağılımı incelendiğinde ise büyük bir kısmının Avrupa ülkelerinde olduğu görülmektedir [1]. Avrupa Birliği kapısındaki ülkemizde ise son yıllarda kazanılan yüksek ilerleme ivmesine rağmen, Türkiye Rüzgar Enerji Birliği'nin (TÜREB) 03.12.2007 tarihli rüzgar enerji sektör raporuna göre, işletmedeki kurulu güç 146,25 MW, inşaatı devam eden projeler 276,90 MW, 2009 yılı ilk yarısına kadar rüzgar türbini tedarik sözleşme imzalı kurulu güç 624,86 MW'tır. Yani 2009 yılının ilk yarısı sonunda toplam kurulu gücümüz 1 048,01 MW olacaktır. Türkiye'nin teknik rüzgar enerji potansiyelinin 83 000 MW olduğu ve bu potansiyelin teorik olarak Türkiye'nin elektrik ihtiyacının tamamını karşılayabilecek yeterlilikte olduğu ifade edilmektedir [2]. Ancak bunun için, bazı Avrupa ülkelerinde olduğu gibi ciddi yatırımların ve teşviklerin yapılması gerekmektedir.

Dünya genelinde yatırımların artmasıyla birlikte rüzgardan elektrik enerjisi üretim maliyeti, diğer kaynaklar ile rekabet edebilecek düzeye ulaşmıştır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğünün 2003 verilerine göre, rüzgar enerjisi ile elektrik enerjisi üretiminin birim maliyeti 3,5-4,5 cent/kWh iken ülkemize de kurulması düşünülen nükleer enerjinin birim maliyeti 7,5 cent/kWh'tir [2]. Rüzgar kaynaklı enerji üretiminin olumlu ve olumsuz yönleri incelenmiş ve alınacak küçük önlemler ile rüzgar enerjisi, kullanılması gereken önemli bir değer olarak gösterilmiştir [3].

Genel olarak 1MW ve daha güçlü rüzgar türbinlerinin kurulum maliyetlerinin kW başına düşünüldüğünde, düşük güçlü türbinlerden daha az olduğu, ancak sistemli çalışmayla bu durumun tersine çevrilebileceği vurgulanmıştır [4]. Ülkemiz nüfusunun büyük bir kısmı kırsal kesimde yaşamakta ve geçimini çiftçilikten sağlamaktadır. Çok sayıda kurulacak düşük güçlü rüzgar türbinleri ile bu bölgelerin enerji ihtiyacı karşılanabilir. Hatta binlerce belki de milyonlarca küçük rüzgar türbinin şebekeye bağlanması sağlanabilirse, ülkemizin enerjide dışa bağımlılığı ortadan kalkabilir. Bu nedenle bu çalışmada, önemi giderek artan rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde kullanılmak üzere sürekli mıknatıslı düşük güçlü bir rüzgar türbini incelenmiştir.

Yatırımların artmasıyla rüzgar türbinleri üzerine yapılan çalışmalar da artmakta ve çok değişik konfigürasyonlar ortaya çıkmaktadır. Rüzgar türbinleri, rotorun konumuna göre yatay eksenli ve dikey eksenli olmak üzere ikiye ayrılabilir. Her iki rüzgar türbini de rüzgardan güç üretmek için aerodinamik kaldırmayı kullanır ve aynı alt sistemlere sahiptirler [5]. Ancak genel olarak yatay eksenli rüzgar türbini daha fazla üretilmekte ve kullanılmaktadır.

Rüzgar türbinleri, yapılarına göre ise dişli kutusu kullananlar ve kullanmayanlar olarak sınıflandırılabilir. Geleneksel bir rüzgar güç sisteminde, tipik bir rüzgar türbininin rotoru 20-200 d/d hız ile döner ve jeneratörün dönüş hızı genelde 1000-1500 d/d hızlarındadır. Bunun anlamı, türbin ile jeneratör arasında bir dişli kutusuna ihtiyaç olduğudur. Jeneratör direkt olarak şebekeye bağlanabilir. Bu da basit bir elektrik sistemini oluşturur [6]. Dişli kutusu kullanan rüzgar türbinlerinde jeneratörün dönüş hızı yüksektir ve çok düşük rüzgar hızlarında bile enerji üretimi sağlanabilmektedir. Rizk ve Nagrial (2000) çalışmalarında sürekli mıknatıslı jeneratörü, 1:5,5'lik dişli kutusuyla birlikte kullanmışlardır [5]. Ancak rüzgar türbinlerinde kullanılan dişli kutusu; pahalı, düzenli bakım isteyen ve bakımı zor olan, sistemde ek gürültü ve titreşim oluşturan, mekanik kayıpları arttıran bir yapıdır [6, 7]. Chen (2005) çalışmasında aynı çıkış gücüne sahip iki ticari rüzgar türbini karşılaştırmış ve dişli kutusuz rüzgar türbinin, aynı hızlarda daha yüksek enerji

üretimi sağladığını göstermiştir [6]. Bu nedenle dişli kutusunun sistemden kaldırılmasıyla, sürekli mıknatıslı rüzgar türbinleri üzerine çalışmalar yaygınlaşmıştır.

Dişli kutusunun kaldırılmasıyla yukarıda bahsedilen dezavantajlar ortadan kalkar. Ancak bu yapı da beraberinde bazı gereklilikleri getirir. Değişken hızlı bu yapıda, türbine direkt bağlanan ve düşük hızlarda dönen bir jeneratör ile çıkışın şebekeye bağlanabilmesi için bir frekans dönüştürücüsüne ihtiyaç vardır. Frekans dönüştürücüsünün kullanılması ek bir maliyet gibi görünse de sabit hızlı çalışma yerine değişken hızlı çalışmanın kullanılmasıyla, türbinlerde % 10-15 oranında daha fazla enerji tutulabilir [8].

Düşük hızla dönen bir jeneratör ise çok sayıda kutba sahip olmalıdır. Sürekli mıknatıslı makinelerde, mıknatıs sayısı artırılarak kutup sayısı çok kolay bir şekilde arttırılabilir. Bu da sürekli mıknatıslı makinelerin tercih edilme sebeplerinden biridir. Rüzgar türbinlerinde kullanılan sürekli mıknatıslı jeneratörler, manyetik akının yönüne göre eksenel akılı, radyal akılı ve enine akılı jeneratörler olarak sınıflandırılır. Svecharenko (2007) çalışmasında enine akılı bir jeneratörün rüzgar türbin uygulamasını incelemiştir [9], ancak genel görüşe göre bu yapının rüzgar türbin uygulamalarında kullanması uygun değildir [10, 11].

Sürekli mıknatıs teknolojisinde, yüksek enerji yoğunluklu mıknatısların geliştirilmesiyle birlikte değişik yapılarda jeneratörler tasarlanmıştır. Literatürde radyal ve eksenel akılı makinelerle ilgili birçok çalışma mevcuttur.

Rizk ve Nagrial (2000) çalışmalarında rüzgar türbin uygulaması için, 8 kutuplu, anma gücü 5 kW olan radyal yapıli sürekli mıknatıslı bir jeneratör kullanmışlardır [5]. Makinenin statoru, aynı anma gücündeki bir asenkron motorla aynıdır. Rotorda ise gömülü mıknatıslar kullanılmıştır. Ancak kullanılan mıknatısların ebatları, aynı güçteki farklı topolojilere göre oldukça büyüktür.

Eksenel akılı jeneratörler, disk şeklindeki yapıları nedeniyle rüzgar türbinleri ile mekanik olarak daha iyi uyum sağlayabilirler. Mıknatıs teknolojisindeki gelişmelerle birlikte farklı eksenel akılı tasarımlar geliştirilmiştir [12]. Bu tasarımların incelenmesinde klasik yöntemler, nümeriksel yöntemler ya da ikisinin karışımı yöntemler kullanılmıştır. Wang ve ark. (2005) çalışmalarında nüvesiz statorlu eksenel akılı sürekli mıknatıslı bir jeneratörün performansını, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ve teoriksel analizin bileşimi olan bir yöntem kullanarak hesaplamış ve üretilen prototip ile sonuçları karşılaştırmışlardır [13].

Hwang ve ark. (2004) çalışmalarında rüzgar enerji sistem uygulamaları için 60 Hz, 10 kVA, 300 d/d çift eksenel akılı sürekli mıknatıslı bir senkron jeneratörün tasarım ve karakteristik analizini incelemiştir [14]. Jeneratörün karakteristiklerini belirlemek için R ve RL yüklerde deneyler yapılmış ve test sonuçları ile sonlu elemanlar analiz sonuçlarının karşılaştırması sunulmuştur. Stator sargıları kendi aralarında seri bağlanarak, statorda indüklenen gerilimler eklenmiştir. Disk tipi rotorda ise 24 kutup ve kutup başına bir sürekli mıknatıs vardır. Jeneratöre, değişken frekanslı darbe genişlik modülasyonu (PWM) dalga sürücü ile beslenen bir motor tarafından yol verilmiş ve 300 d/d hızda çıkış frekansı 60 Hz olarak görülmüştür.

Eksenel akılı yapının başka bir örneği TORUS makinedir. TORUS makine; oluksuz, toroidal sargılı, çift taraflı, eksenel akılı, disk tipi, sürekli mıknatıslı, fırçasız bir makinedir. Chalmers ve ark. (1999) çalışmalarında TORUS makine olarak bilinen yapının üstün yönlerini açıklamış ve 5 kW, 200 d/d, 28 kutuplu bir makinenin tasarım karakteristiklerini incelemiştir [15].

Eksenel akılı makinelerde verimliliği arttırmak için nüveler kaldırılabilir. Lombard ve Kamper (1999) çalışmalarında nüvesiz statorlu sürekli mıknatıslı bir eksenel akılı makinenin analizini, tasarımını ve performansını sunmuşlardır [16]. Sıfır nüve kaybına sahip olduğundan, böyle bir yapının verimi oldukça yüksektir fakat geniş hava aralığında, gerekli hava aralığı akı yoğunluğunu sağlamak için daha fazla mıknatıs hacmine ihtiyaç duyulur. Gieras J.F. ve Gieras I.A. (2002) çalışmalarında

nüvesiz statorlu eksenel akılı bir yapının, motor olarak çalışmasını incelemişlerdir [17]. Bu yapı ile ferromanyetik nüveli silindirik bir yapı karşılaştırılmıştır. Disk tipi nüvesiz sürekli mıknatıslı yapı, % 1,2 daha fazla verime ve % 82 daha yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Bu durumda, “Sürekli mıknatıslı makinelerde ferromanyetik nüve gerekli midir?” sorusu gündeme gelmektedir. Sorunun yanıtı “hayır, gerekli değildir.” biçimindedir.

Tezin 2. bölümünde, sürekli mıknatıslı makine topolojileri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

3. Bölümde, [18]’de açıklanan sürekli mıknatıslı nüvesiz statorlu eksenel akılı bir rüzgar türbininin gerçekleştirilmesi anlatılmıştır.

4. Bölümde, gerçekleştirilen sürekli mıknatıslı jeneratörün sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan modeli incelenmiştir.

5. Bölümde, sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen analiz sonuçları ve hazırlanan test düzeneğinde yapılan deney sonuçları sunulmuştur.

6. Bölümde, çalışmanın sonuçları özetlenmiştir.

2. SÜREKLİ MIKNATISLI MAKİNELER

Sürekli mıknatıslı (SM) makineler terimi, manyetik uyarmayı sürekli bir mıknatısın yaptığı tüm elektromanyetik enerji dönüşümü yapan aygıtları kapsar [5]. Son yıllarda mıknatıs teknolojisindeki gelişmelerle ve yüksek yoğunluklu mıknatısların geliştirilmesiyle, performans olarak da elektromıknatıs uyarımlı makinelerle rekabet edebilir düzeye ulaşmışlardır. Diğer taraftan manyetik uyarımı yaparken sargı kullanımının ortadan kalkmasıyla, verim artarken daha sade ve daha kompakt yapılar oluşmuştur.

Elektrik makinelerinde, sürekli mıknatıslı yapıların kullanılması oldukça yaygındır. Mıknatıs yapılarını; Alnico, Seramik (Ferit) ve Azrak (Nadir)-Toprak (Somaryum-Kobalt ve Neodyum-Demir-Boron) olarak sınıflandırabiliriz.

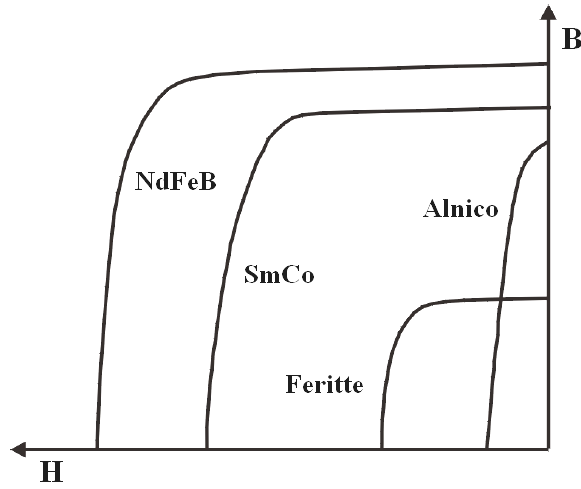
Alnico mıknatıslar; demir, kobalt, nikel, alüminyum ve bazı metallerin alaşımından oluşur. Bu mıknatıslar oldukça kırılmandır. Yüksek kalıcı manyetik akı yoğunluğuna ve düşük sıcaklık katsayısına sahiptirler. Ancak koersivite kuvveti H_c , oldukça düşüktür. Bunun anlamı, Alnico'nun mıknatıslanmasının kolay olduğu gibi mıknatıslığını kaybetmesinin (demagnetizasyon) de kolay olmasıdır. Ferit mıknatıslar bulunana kadar bu mıknatıslar yaygın olarak kullanılmıştır.

Ferit mıknatıslar; Alnico'dan yüksek koersivite kuvvetine, aynı zamanda da düşük kalıcı manyetik akı yoğunluğuna sahiptir. Ferit mıknatısların en büyük avantajları; düşük fiyata, yüksek sıcaklık sabitesine ve sürekli mıknatıs hacminde daha az girdap akımı kayıpları anlamına gelen yüksek elektrik direncine sahip olmasıdır.

Azrak-Toprak mıknatıslar, yüksek enerji yoğunluğu $(BH)_{max}$ 'a sahiptirler. Somaryum-Kobalt (SmCo); yüksek kalıcı mıknatıs akı yoğunluğuna, yüksek koersivite kuvvetine, yüksek manyetik enerji yoğunluğuna, doğrusal ters mıknatıslanma karakteristiğine ve düşük sıcaklık sabitesine sahiptir. Ancak Sm ve Co'nun her birinin pahalı olması nedeniyle maliyetleri fazladır. Neodyum-Demir-

Boron (NdFeB) mıknatıslar, oldukça hafif olmalarına rağmen yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler. Ancak sıcaklıktan oldukça fazla etkilenirler.

Bir malzemenin manyetik kararlılığın iyi olması, BH eğrisinin dikdörtgenselliğe sahip olması biçiminde kendini gösterir. Şekil 2.1’de elektrik makinelerinde en sık kullanılan manyetik malzemelerin BH eğrileri görülmektedir.



Şekil 2.1. En sık kullanılan manyetik materyallerin BH eğrileri

Özellikle Neodyum-Demir-Boron (NdFeB) mıknatısların geliştirilmesi sonucunda düşük mıknatıs boyut ve ağırlıklarında yüksek hava aralığı manyetik akı yoğunluğu sağlanabilmiş, bu da çok farklı jeneratör yapılarının geliştirilmesine olanak tanımıştır. NdFeB mıknatıslar, ferit mıknatıslarla karşılaştırıldıklarında daha yüksek manyetik akı yoğunluğuna sahiptir. Samaryum-Kobalt (SmCo) mıknatıslar da yüksek yoğunluğa sahiptir. Ancak maliyetleri yüksektir. NdFeB’den daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirler. NdFeB mıknatısların sıcaklıkla kalıcı akı yoğunlu değişimi, SmCo’a göre daha fazladır. Ancak rüzgar türbin uygulamalarında çalışma sıcaklığı yüksek değildir. Ferit mıknatısların maliyetleri oldukça düşüktür. Bu nedenle Ferit mıknatıs kullanarak olabilecek tasarımlar incelenmiş, ancak kısıtlı çap boyutlarında tatmin edici sonuçlar elde edilememiştir [15]. Bu nedenle çalışmada NdFeB mıknatıslar kullanılmıştır.

Mıknatıslar nüvede kullanılırken, yüzey yerleştirmeli (surface mounted) ya da gömülü (buried) şekilde monte edilir. Yüzey yerleştirilmeli yapıda hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, mıknatısın kalıcı akı yoğunluğundan daha küçüktür. Ancak makine yapısı daha basittir. Gömülü yapıda ise hava aralığı manyetik akı yoğunluğu, kalıcı akı yoğunluğundan daha büyük olabilir [19]. Gerçekleştirilen rüzgar jeneratöründe yüksek yoğunluklu NdFeB mıknatıs kullanıldığından basit yapılı, elle gerçekleştirilebilir, kolay üretim için yüzey yerleştirmeli yapı tercih edilmiştir.

Rüzgar türbinlerinde kullanılan sürekli mıknatıslı jeneratörler, hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun yönüne göre radyal akılı ve eksenel akılı olmak üzere iki bölümde incelenir. Enine akılı yapı da mevcuttur, ancak rüzgar güç uygulamalarında kullanılması bir kazanç getirmez [7].

2.1. Radyal Akılı SM Makineler

Ticari radyal akılı sürekli mıknatıslı (RASM) makine, rüzgar türbin uygulamalarında sıklıkla kullanılır. RASM makine, basit bir statora ve sürekli mıknatısların konumlandırıldığı rotora sahiptir. Stator nüvesi, asenkron motorlarınkine benzerdir. Üzerine oluklar açılan çelik sacların preslenmesiyle oluşturulur ve oluklara faz sargıları yerleştirilir. Rotorda bulunan sürekli mıknatıslar ise radyal yönde mıknatıslandırılarak, gömülü ya da yüzey yerleştirmeli şeklinde rotora konumlandırılır. Yüzey yerleştirmeli RASM makinelerde, rotorun silindirik yapısından dolayı mıknatıslar da dikdörtgen değil silindiriktir.

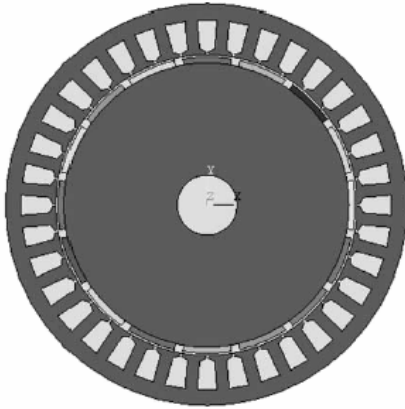
Yaygın kullanımı nedeniyle değişik yapılar tasarlanmıştır. Stator oluklu olabildiği gibi oluksuz statorlu yapılar da mevcuttur ama sargı sonu uzunluğu dolayısıyla bakır kayıpları fazladır. Üstelik bu yapıda geniş hava aralığından dolayı akı yoğunluğu azalır [20]. Bunun yanında çoklu rotor ve statora sahip RASM makinelerde tasarlanmıştır. Qu ve Lipo (2004) çalışmalarında iki rotor ve bir statora sahip yapının oluklu ve oluksuz tiplerini incelemişlerdir [21]. Çift (dual) rotor radyal akılı sürekli mıknatıslı makine olarak adlandırılan bu yapılarda, mıknatıs sayısı artmakta ve yapı

karmaşık hale gelmektedir. Bu nedenle, maliyeti düşürmek için ferit mıknatıslar kullanılmıştır.

Tipik olarak RASM makineler iki alt başlıkta incelenebilir.

2.1.1. Rotoru içte radyal akılı SM makineler

Durağan endüvi sargılarının içerisinde dönen, yüzey yerleştirmeli sürekli mıknatıs kutuplarıyla tipik bir radyal akılı jeneratör, Şekil 2.2’de görülmektedir. Stator, dağıtılmış sargılardan ve elektriksel olarak yalıtılmış çelik saclardan oluşur. Rotor, rulmanlara bağlı bir mil ile birlikte silindir şeklindedir. Bir kutup çiftinde gerekli manyetomotor kuvveti iki mıknatıs sağlar. Bu mıknatıslar, ani bir kısa devrede, endüvi reaksiyonunun neden olduğu ters mıknatıslanmaya etkili bir şekilde direnç gösterebilirler. Hava aralığı akı yoğunluğu, manyetik remenans ve manyetik çalışma noktasıyla çok ilişkilidir. Düşük remenanslı mıknatıslarla yüksek hava aralığı akı yoğunluğu elde etmek, bu yapıda zordur [6].

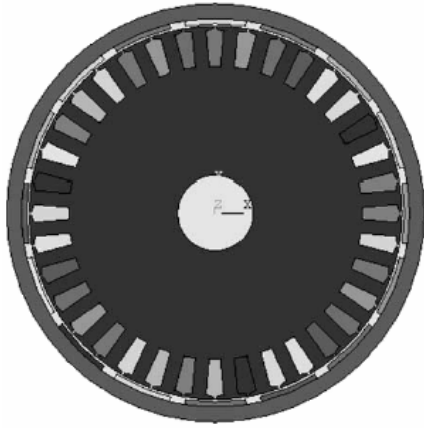


Şekil 2.2. Rotor içte RASM [6]

2.1.2. Rotor dışarıda RASM makineler

Şekil 2.3’de görüldüğü gibi, dış rotor konfigürasyonunda stator sargıları durağandır ve makinenin merkezinde yer alır. Mıknatıslar, rotorun iç kısmına yerleştirilmiştir.

Manyetik devre rotor içte radyal akılı makine ile aynıdır. Ama rüzgar türbin bıçakları, rüzgar türbini ve sürekli mıknatıslı jeneratör arasında, direkt bağlantıyı sağlamak için tamburun ön yüzüne uygun olarak vidalanır. Dış rotor tamburunun büyütölmüş dış kenarından dolayı, çok kutuplu yapı kolaylıkla sağlanabilir ve bu nedenle, manyetik yolun toplam uzunluğu azalır. Rotor, direkt rüzgara maruz kalır. Mıknatıslar için soğutma durumu sağlanır ve böylece, yüksek sıcaklıkta ters mıknatıslanma direnci büyür [6].



Şekil 2.3. Rotor dışarıda RASM [6]

Genel olarak RASM makinelerin imalatı, büyük ölçekli fabrikasyon gerektirir. Bu nedenle, ticari amaçlı olarak orta ve büyük güçlü rüzgar türbinlerinde kullanılmak üzere imal edilirler.

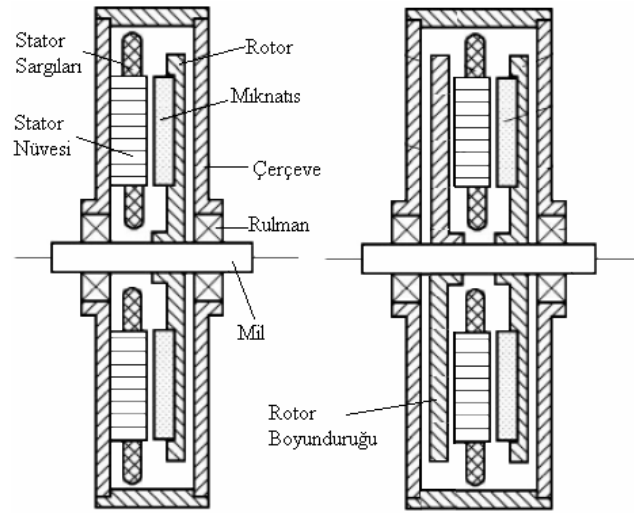
2.2. Eksenel Akılı SM Makineler

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı (EASM) makinelerin geometrisinde, RASM makinelerin aksine eksenel uzunluk daha fazladır. Bu nedenle, geometrik sınırlamaların olduğu, bataryalı tekerlekli sandalyeler gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek güç yoğunluğunun yanında, disk şeklindeki yapısı, bu tip makinelerin özellikle rüzgar türbinleriyle mekaniksel entegrasyonunu

kolaylaştırmaktadır [13]. Bu nedenle de enerji üretiminde düşük ve orta ölçekli güç jeneratörü olarak kullanılmaktadır.

EASM makinelerin disk şeklindeki yapısı, çok farklı tasarımların üretilmesine olanak tanımıştır. Bu yapılar; statorun ve rotorun konumuna göre, stator nüvesinin oluklu ya da oluksuz olmasına göre, mıknatısların nüve içerisine gömülü olması ya da yüzey yerleştirmeli olarak konumlandırılmasına göre, yapının çift taraflı ya da tek taraflı olmasına göre isimlendirilirler. EASM makineler, aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [12].

2.2.1. Tek taraflı EASM makineler



Şekil 2.4. Tek taraflı EASM ve rotor dengeli tek taraflı EASM [12]

Şekil 2.4’de tek taraflı yüzey yerleştirmeli mıknatıslara sahip bir eksenel akılı makine ve tek taraflı rotor dengeli eksenel akılı bir makine görülmektedir. Tek taraflı eksenel akılı makineler, çift taraflı yapı ile karşılaştırıldıklarında daha düşük güçlüdürler. Yapı oldukça basittir. Tek stator ve rotordan oluşmaktadır. Stator oluklu ya da oluksuz olabilir. Mıknatıs miktarı da yarı yarıya azaldığı için güçle birlikte maliyet de azalmaktadır. Ancak tek taraflı rotordan dolayı, stator ve rotor arasında etkili bir çekim kuvveti vardır. Rotoru, eksenel yönde hareketten korumak için özel

bir rulman kullanılmalıdır. Yapıya ek bir stator ya da rotor boyunduruğu eklenerek çekim kuvveti dengelenebilir [7].

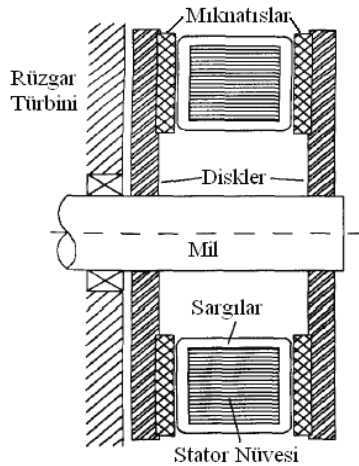
2.2.2. Çift taraflı EASM makineler

Bu yapıda, tek taraflı EASM makinelerden daha fazla hava aralığı mevcuttur. Bu nedenle, gerekli hava aralığı akı yoğunluğu elde edebilmek için mıknatıs miktarı artırılır. Ancak üretilen moment ve güç, tek taraflı EASM makineden daha büyüktür.

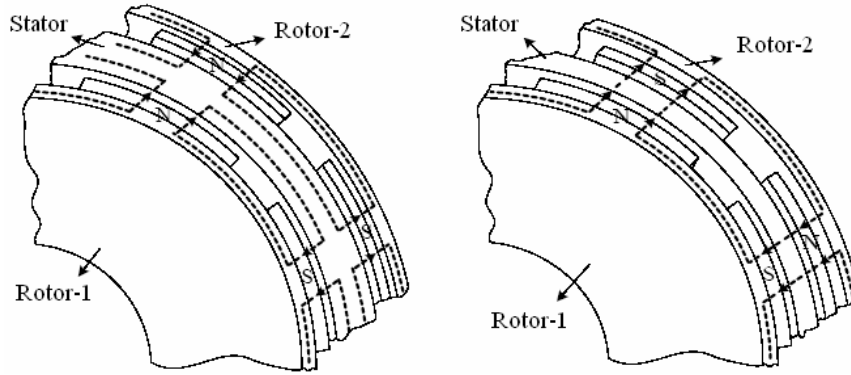
Çift taraflı, statoru içte EASM makineler

Bu yapıda, stator nüvesi oluklu ya da oluksuz olabilir. TORUS makine olarak da bilinen bu yapıda, çok fazlı endüvi sargılarının bulunduğu stator nüvesi, iki rotor nüvesi arasına konumlandırılır. Eksenel olarak mıknatıslandırılan sürekli mıknatıslar, rotor üzerinde gömülü ya da yüzey yerleştirmeli olarak yapıştırılmış olabilir.

TORUS makine; oluksuz, toroidal sargılı, çift taraflı, eksenel akılı, disk tipi, sürekli mıknatıslı, fırçasız bir makinedir [15, 20]. Şekil 2.5’de, temel kesit görünüşü görülmektedir. Şekil 2.6’da görüldüğü gibi TORUS makine, karşılıklı rotorlardaki mıknatısların konumlarına göre, NN ve NS TORUS olarak isimlendirilir.



Şekil 2.5. TORUS makinenin temel kesit görünüşü [15]

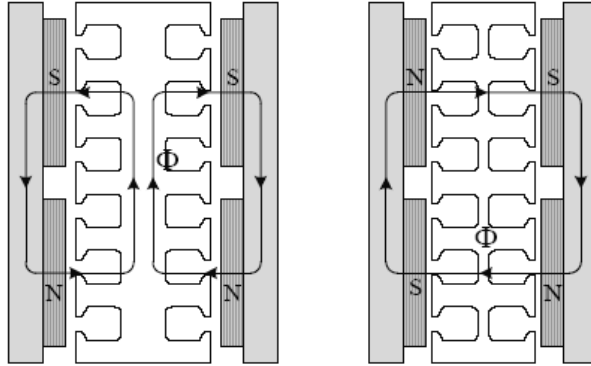


Şekil 2.6. NN ve NS tip TORUS makine [20]

TORUS makinenin özelliklerinden bazılarını şöyle sıralayabiliriz [15].

- Makinenin topolojisi kısa bir eksen uzunluğuna yol açar. Bu nedenle yüksek güç/ağırlık oranı sağlanır. Kompakt jeneratör kurumları için rüzgar türbinleriyle direkt entegrasyonları mümkündür.
- Oluksuz hava aralığı sargıları, düşük, ortak ve kaçak indüktans değerleri verir. Eksenel yönde sargı sonu uzunluğu oldukça kısa olduğundan direnç küçüktür. Bu nedenle, gerilim regülasyonu bu uygulamalar için kabul edilebilir bir düzeydedir.
- Olukların olmayışı, vurutu momentinin yok edilmesini sağlar. Böylece çok küçük düzeyde gürültü oluşur. Titreşim ve yüksek frekanslı rotor kayıpları da (stator oluk açısıyla ilgili) ihmal edilir.

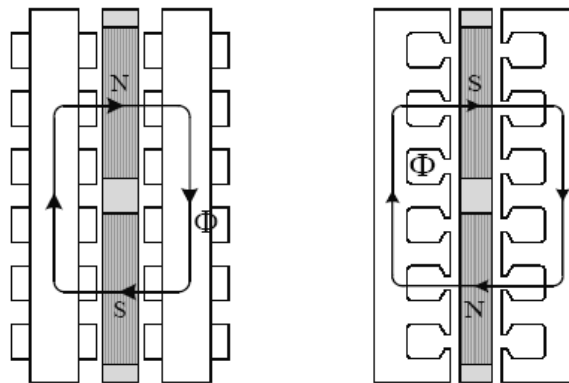
Oluklu yapıda ise, hava aralığı küçük (1 mm'den daha az) olduğundan, hava aralığı manyetik akı yoğunluğu $0,85 \text{ T}$ 'yi aşabilir. Mıknatıs hacmi % 50 oranında azalır [20]. Oluklu statora sahip çift taraflı, statoru içte konfigürasyonun 2 boyutlu görünümü Şekil 2.7'de görülmektedir. NS tipi mıknatıs düzeneğinde, daha küçük bir stator boyunduruğuna ihtiyaç duyulur; çünkü manyetik devre, stator nüvesi üzerinden değil, rotor nüveleri üzerinden kapanır.



Şekil 2.7. NN ve NS tipi oluklu statora sahip çift taraflı EASM [20]

Çift taraflı, rotoru içte EASM makineler

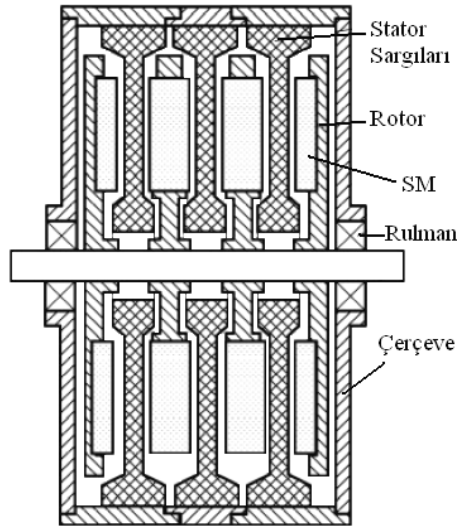
Bu yapıda da stator oluklu ya da oluksuz olabilir. Stator nüvesinde oluk yoksa faz sargıları epoksi ile gömülür. Böylece, hem sargılar arasındaki boşluk doldurulup sağlamlık artırılır hem de daha kolay ısı aktarımı sağlanır. Bu yapıda da rotor boyunduruğu içerisinde bir manyetik akı dolaşımı olmadığından, rotor nüvesi mekanik dayanım da dikkate alınarak kaldırılabilir ya da rotor nüvesi olarak manyetik olmayan bir malzeme kullanılarak ağırlık azaltılabilir [22]. Şekil 2.8’de, oluklu ve oluksuz çift taraflı, rotoru içte yapının 2 boyutlu çizimi görülmektedir.



Şekil 2.8. Oluksuz ve oluklu çift taraflı rotor içte EASM [22]

2.2.3. Çoklu disk yapılı EASM makineler

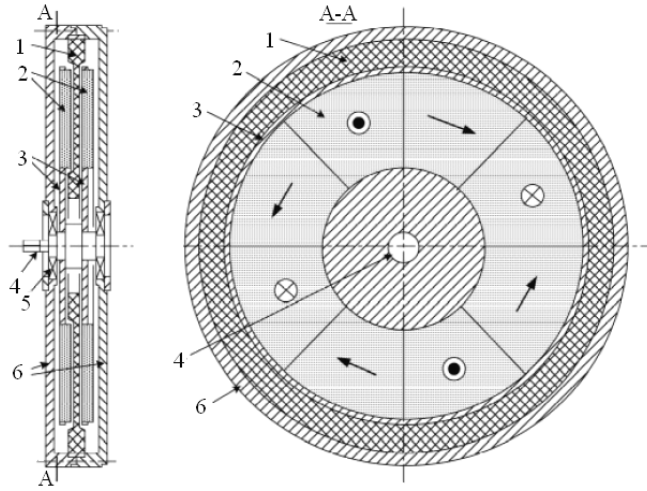
Eksenel akıllı disk tipi makineler, birkaç MW güce kadar yapılabilir. EASM makinenin çıkış gücü arttıkça, anma değeriyle karşılaştırıldığında, rotor ile mil arasındaki temas yüzeyi küçülür. Çıkış gücünün yüksek değerlerinde, rotor-mil mekaniksel bağlantısının, yüksek mekaniksel dayanıklılığa sahip olacağı bir tasarım yapmak oldukça zordur. Rotor-mil bağlantısının mekaniksel dayanıklılığını arttırmak için genel kullanılan çözüm, çok diskli yapı tasarlamaktır [12]. Şekil 2.9'da, 3 katmanlı çoklu disk yapılı bir EASM makine görülmektedir.



Şekil 2.9. Çoklu disk yapılı EASM [12]

Gerekli hava aralığı manyetik akı yoğunluğunu sağlayacak boyutlarda mıknatıslar kullanıldığında, stator nüvesi ya da hem stator hem de rotor nüvesi kaldırılabilir. Böylece, nüve kayıpları yok edilir. Şekil 2.10'da, tipik bir nüvesiz EASM makinenin şematik şekli görülmektedir. Makine, dış tarafta iki rotora ve ortada bir tane nüvesiz statora sahiptir. Karşılıklı rotor diskleri üzerinde, yüzey yerleştirmeli sürekli mıknatıslar bulunur. Nüvesiz stator sargısı, tek katmanlı ikizkenar yamuk şeklinde sargılara sahiptir. Bu sargılar, daha kolay oluşturulması ve diğerlerine göre kısa

toplam maliyeti, nüveli silindirik tip makinenin % 209,3 katıdır. Bu maliyet farkına, kullanılan büyük hacimli özel mıknatıslar neden olmuştur. Şekil 2.12’de, nüvesiz disk tipi sürekli mıknatıslı yapı görülmektedir.



Şekil 2.12. Nüvesiz disk tipi sürekli mıknatıslı makine 1: Nüvesiz stator sargıları, 2: SM'ler, 3: Rotorlar, 4: Mil, 5: Rulmanlar, 6: Çerçeve [17]

Yukarıdaki sınıflandırmada da görüldüğü gibi, daha bir çok yapı çeşidi mevcuttur. Rüzgar türbin uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmakta olan radyal ve eksenel akılı yapılardan bahsettikten sonra, artık bunlar arasında karşılaştırma yapılabilir.

2.3. Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Topolojilerden Bazılarının Karşılaştırılması

Makineler arasında tam bir karşılaştırma yapmak, ayrıntılı bir çalışma gerektirir. [7]'de, rüzgar güç sistemlerinde yaygın şekilde kullanılan 7 yapı, 1-200 kW arasında 7 farklı güç seviyesinde yapılmıştır. Bu topolojiler; rotor içte radyal akılı yapı, rotor dışarıda radyal akılı yapı, çift taraflı rotor içte EASM yapı, çift taraflı stator içte EASM yapı, tek taraflı EASM yapı, güç dengeli stator, güç dengeli rotor ve TORUS eksenel akılı yapıdır. Karşılaştırılan tüm makineler, yüzey yerleştirmeli mıknatıslar (NdFeB) ile yapılmıştır ve iki kategoride gruplandırılmıştır. Birinci grup, 50-100 d/d gibi düşük hızlarda çalışan direkt bağlantılı jeneratörler ve ikinci grup, 1200 d/d ile

yüksek hızlarda çalışan makinelerdir. Karşılaştırma için kullanılan ölçüt; moment yoğunluğu, aktif malzeme ağırlığı, dış yarıçap, toplam uzunluk, toplam hacim ve verimdir. Karşılaştırma sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Eksenel akılı oluklu makinenin, verilen güç değerlerinde küçük bir hacme ve yüksek bir güç yoğunluğuna sahip olduğu sonucuna varılır. Ancak güç değeri arttıkça, dış yarıçap da genişlemeye başlar. Bu nedenle mekaniksel dayanım, eksenel akılı makine için düşünülmelidir.
- Çift taraflı eksenel akılı yapılar, tek taraflı eksenel akılı yapılardan üstündür. Ancak tek taraflı yapılar daha az bakır kullanır ve iletken kayıpları daha azdır. Ayrıca bu tip makinelerin yapısı oldukça basittir.
- Tüm karşılaştırmalar için rotoru dışarıda radyal akılı yapılar, rotoru içte radyal akılı makinelerden daha üstündür. Bu yapılar, kolay kurulum ve soğutma gibi avantajlara sahiptir. Bu yüzden rotoru dışarıda yapılar, rüzgar güç sistemlerine uygulamak için daha kullanışlıdır.
- TORUS yapı basittir ve üzerinde çok araştırma yapılmıştır. Ancak yapı, stator sargılarını barındırmak için ek hava aralığı gerektirdiğinden, daha fazla mıknatıs ağırlığına ihtiyaç vardır. Güç değeri arttıkça, mıknatıs ve sargı ihtiyacı artmaya başladığından, hava aralığı ve hava aralığı reaktansı da artar. Bu nedenle bu yapılar, düşük güçlü rüzgar türbinleri için daha kullanışlıdır.
- Karşılaştırmaların çoğu için, düşük hızlı yapılar, yüksek hızlı yapılardan üstündür. Bu nedenle, çok kutuplu sürekli mıknatıslı jeneratörler; küçük, dişli kutusuz, düşük hızlı rüzgar sistemlerinin uygulamalarında tercih edilir.

Bu çalışmada, kırsal kesimlerde kullanılmak üzere önerilen, çift taraflı nüvesiz statorlu eksenel akılı yapı, imalatı karmaşık fabrikasyon gerektirmediğinden, düşük maliyetle ihtiyaç duyulan gücü karşılayabileceğinden tercih edilmiştir.

3. NÜVESİZ STATORLU EKSENEL AKILI JENERATÖRÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE TEST DÜZENİĞİ

Küçük rüzgar türbinleri, düşük hızlı jeneratörlere ihtiyaç duyar. Düşük hız da düşük güç/ağırlık oranı demektir. Ancak 24 tane geniş neodyum mıknatısa sahip incelenen makine bunun dışındadır. Normal şartlarda maksimum çıkış 500 W, 5 m/s rüzgar hızında ortalama güç 100 W ve günlük enerji üretimi 2.5 kWh civarındadır [18].

Dişli kutusu ve jeneratör üzerinde manyetik yolu engelleyecek saclı yapı olmadığı için kalkış momenti çok küçüktür. Bunun anlamı, rüzgar türbinin çok düşük hızlarda bile hemen kullanılabilir bir enerji üretebileceğidir [18].

Eksenel akılı jeneratörün nüvesiz statorunu ve mıknatısların bulunduğu rotor disklerini oluşturmak için gerekli kalıplar hazırlanmıştır. Stator ve rotor diskleri elde edildikten sonra, jeneratör bir düzenek üzerinde toplanmıştır. Stator ve rotor disklerinin hazırlanması ile ilgili ayrıntılar EK-1’de sunulmuştur.

3.1. Statorun Elde Edilmesi

Stator Kalıbı 10 sargıdan oluşmaktadır. Statoru oluşturmak için gerekli malzemeler, Çizelge 3.1’de verilmiştir. İletkenin kesiti, çıkış gerilimi ve beklenen çıkış gücü dikkate alınarak seçilmiştir.

Çizelge 3.1. Stator malzemeleri

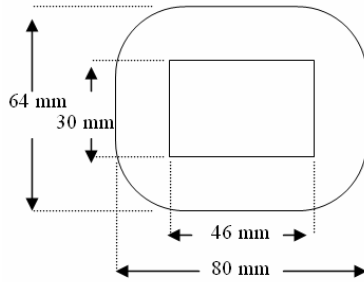
1,15 mm ² kesitinde emaye bakır tel	3,1 kg
Polyester reçine	600 gr
Talkım tozu	400 gr
Kalıp için kontrplak	13 mm kalınlığında
Bal mumu, katalizör, fiberglas kağıt	Kalıp için yeterli miktarda

Stator sargıları, mıknatıs tarafından tam olarak halkalanacak şekilde ve mümkün olan en üst düzeyde manyetik akı yoğunluğundan yararlanacak ölçüde olmalıdır. Stator sargılarını sarmak için hazırlanan kalıp vasıtasıyla, tüm sargılar benzer ölçü ve özelliklerde elde edilmiştir. Çizelge 3.2’de sarılan her bir faz sargının özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. Stator sargılarının özellikleri

Sarım sayısı	150 tur
Sargı direnci	$R_{DA} = 0,69 \, \Omega$, $R_{AA} = 0,75 \, \Omega$
Sargı indüktansı	1,425 mH
Ağırlık	310 gr

Sargılar sarılırken tel gerginliği, mümkün olduğu kadar sabit tutulmalı ve teller birbirine mümkün olduğu ölçüde yakın ve düzgün olarak sarılmalıdır. Aksi takdirde sargıların özellikleri ve boyutları farklı olacaktır. Şekil 3.1’de, sargıların sahip olması gereken ölçüler görülmektedir.



Şekil 3.1. Sargı ölçüleri

Sargıların ölçüleri ve sarımı kadar çıkışa etki eden bir diğer önemli noktada sargıların konumlarıdır. Sargıların her birinin konumu ve sargılar arasındaki elektriksel açı farkı sabit olmalıdır. Aksi durumda sargı gerilimlerinin dalga şekli değişmez ancak fazlar arasında potansiyel farkı oluşturan bir faz açısı değişimi meydana gelir. Bu da jeneratörün uçlarına bağlanan 5 fazlı köprü tipi doğrultucunun çıkışında görülen DA gerilimde farklı dalgalanmalara neden olur.

Oluşturulan 10 sargı, kendi aralarında yıldız bağlanmıştır. Bağlantı esnasında sargıların sarım yönlerine ve giriş-çıkış uçlarına dikkat edilmelidir. Örneğin, karşılıklı iki sargı arasında 180° faz farkı olması gerekirken bağlantı ters olursa aynı fazlı gerilimler elde edilebilir. Sargıların bağlantıları yapıldıktan sonra toplam 10 sargı ucu ve yıldız noktası olmak üzere dış devreye 11 uç çıkartılmıştır.

Sargıların bağlantıları yapıldıktan sonra kalıbı dökme işlemi gerçekleştirilir. Polyester reçine ve talkım tozu ile birlikte katalizör ve sertleştirici karıştırılır. Bu karışım, sargıların konumlarına dikkat edilerek hazırlanan kalıp içerisindeki sargıların üzerine dökülür. Bu sırada reçinenin sıçrama ihtimalini göz ardı etmemek gerekir. Çünkü reçine, insan sağlığı için zararlı bir kimyasal malzemedir. Karışım döküldükten sonra, kalıp dikkatlice bir miktar sallanarak kalıp içerisinde hava boşluklarının kalmamasına dikkat edilmelidir. Hava boşluklarının kalması hem dayanıklılığı etkileyecek hem de manyetik akı değişiminde küçük de olsa dalgalanmalara neden olacaktır. Karışım tamamen döküldükten sonra kalıbın üzeri kapatılarak sertleştirilmeye bırakılır. Bir süre beklendikten sonra kalıp dikkatlice sökülmelidir. Resim 3.1’de tamamlanmış bir statorun şekli görülmektedir.



Resim 3.1. Stator kalıbı

3.2. Rotorun Elde Edilmesi

Rotor disklerinde kullanılan malzemeler Çizelge 3.3’de verilmiştir. Göbeğe sabitlenebilmeleri için çelik disklerin üzerine delikler açılır. Rotor kalıbı, stator kalıbına benzer şekilde alt ve üst kapaklar, orta kalıp ve adadan oluşur. Daire şeklindeki orta kalıbın çapı, disk çapından 1 cm büyüktür. Böylece çelik diskin epoksiye tamamen gömülmesi sağlanır.

Çizelge 3.3. Rotor disklerinde kullanılan malzemeler

Çelik disk x 2	D = 300 mm, Kalınlık = 8 mm
12 Mıknatıs x 2	46x30x10 mm NdFeB
Polyester reçine	400 gr x 2
Talkım tozu	250 gr x 2
Fiberglas kağıt	Orta kalıp ebatlarında x 2

Statorda sargıların konumlandırılması gibi rotor üzerine yüzey yerleştirilmeli olarak konumlandırılan mıknatısların da konumları çok önemlidir. Mıknatıslar rotor boyunduruğuna monte edilmeden önce, boyunduruk üzerine konumlandırmayı kolaylaştırmak için, rotor diski çapında ve üzerinde mıknatıs konumlarına göre mıknatıs ölçülerinde boşluklar açılan ince bir kalıp (jig) yerleştirilir. Mıknatıslar da bu jig üzerinde bırakılan 12 boşluğa yönleri dikkatli bir şekilde kontrol edilerek yerleştirilir. Mıknatıslar boyunduruk üzerine yapıştırıldıktan sonra jig çıkartılır. Bu şekilde elde edilen iki eksenel rotor, statora benzer şekilde hazırlanan kalıp içerisine konulur ve hazırlanan reçine karışımı kalıba dökülerek mıknatısların epoksiye gömülmesi sağlanır.

NdFeB mıknatısların önemli dezavantajlarından biri korozyona duyarlı bir malzeme olmasıdır. Bu etkinin iki temel sonucu vardır. Birincisi, oksijen NdFeB yüzeyinde metalurjik değişime neden olur. Dolayısıyla da H_{ci} , öz artık mıknatıslığın (intrinsic coercivity) azalmasıyla bu yüzeyde mıknatıslığın bozulma riskinin artmasıdır. İkincisi, özellikle nemin yüksek olduğu durumda NdFeB ile atmosferik hidrojenin

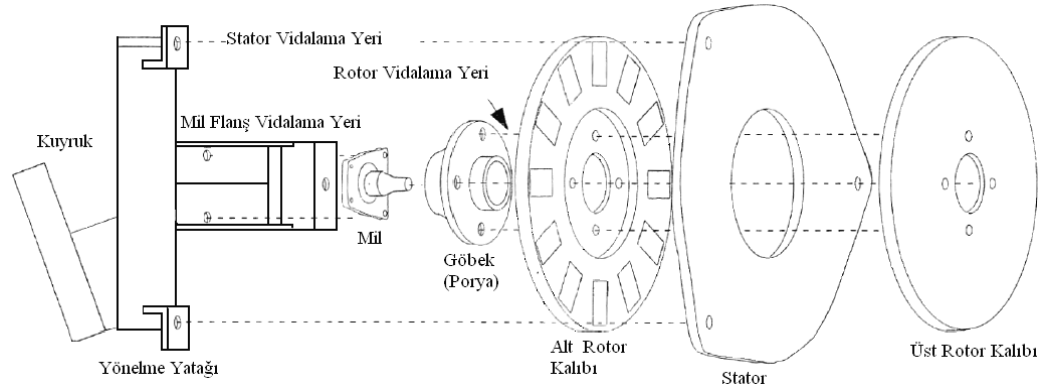
reaksiyonudur. Hidrojen neodyum ile reaksiyona girer ve mıknatıs üzerinde gözeneklerin oluşmasına ve bunun sonucunda da bir süre sonra mıknatıslığın yok olmasına neden olur [23]. Bu nedenle karışım dökülürken mıknatısların tamamen epoksiye gömülmesine ve hava kabarcıklarının kalmamasına dikkat edilmelidir. Resim 3.2’de bu şekilde hazırlanmış rotorlardan biri görülmektedir.



Resim 3.2. Rotorun son hali

Stator ve rotorlar hazırlandıktan sonra jeneratörün kurulumu Şekil 3.2’de görüldüğü gibi gerçekleştirilir. Mil, yönelme yatağına önceden belirlenen mil flanş vidalama yerlerinden vidalanır yada kaynaklanarak sabitlenir. Yönelme yatağının arka kısmına, rüzgar türbinine takılacak olan bıçakların ön yüzünü rüzgara döndürmek ya da aşırı rüzgarda bıçakların yönünü değiştirerek sistemi koruyan kuyruk yerleştirilir. Hareketli başlığı üzerinde barındıran göbek ise iyi bir şekilde yağlandıktan ve bilyeler kontrol edildikten sonra mile yerleştirilir ve milin üst kısmından vidalanır. Alt rotor, mil üzerinde rahatlıkla dönebilen göbek (porya, hub) üzerine 5 noktadan vidalanır. Stator ise dengeli 3 noktadan yine yönelme yatağı üzerine monte edilir. Üst rotor, alt rotorun da monte edildiği göbek üzerinden çıkan yeterli uzunluktaki saplamalara vidalanır. Ancak üst rotor sabitlenirken, iki rotor diskinde karşılıklı gelen mıknatısların ters yönlü olmalarına dikkat edilmelidir. Burada iki rotor diski

arasında sandviç gibi yerleştirilen statorun her iki rotor ile arasında 1 mm hava aralığı bırakılmıştır. Hava boşluğu üst rotor sabitlenmeden önce ayarlanmalıdır. Manyetik devrenin kapanması nedeniyle rotorlar birbirlerini büyük bir kuvvetle çekerler. Bu nedenle üst rotor saplamalara geçirildikten sonra hava aralığını ayarlamak oldukça güçtür.

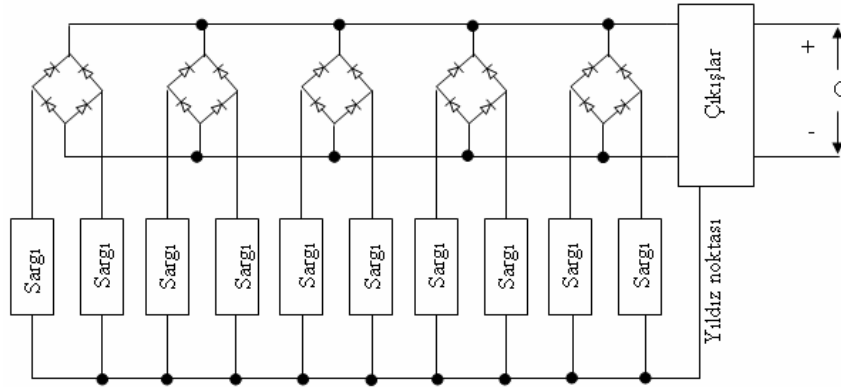


Şekil 3.2. Jeneratörün kurulumu [18]

Jeneratörün kurulumu gerçekleştirildikten sonra dışarıya çıkarılan 10 sargı ucu, alüminyum kutu içerisinde bulunan 5 adet bir fazlı köprü tipi doğrultucuya bağlanmıştır. Test ölçümlerinde kullanılmak üzere sargıların yıldız noktasından alınan uç da aynı kutu içerisine çıkarılır.

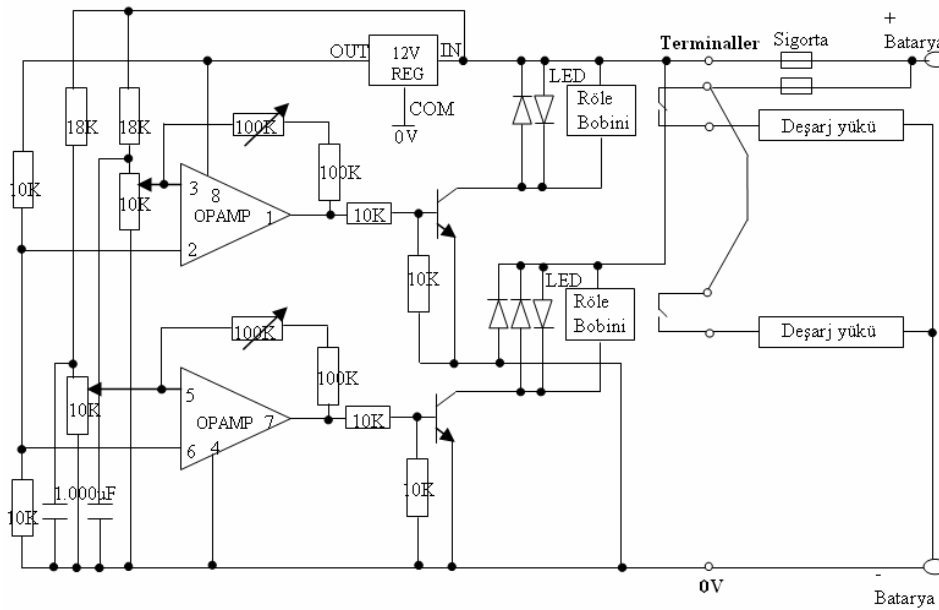
3.3. Doğrultucular ve Batarya Şarj Kontrolü

Rüzgar enerji sistemlerinde, rüzgarın süreksizliğinden dolayı kullanılabilir enerji için üretilen alternatif gerilim doğrultucularda doğrultularak bataryalarda depo edilir. Bataryaları ise aşırı şarj olmaktan veya tamamen deşarj olmaktan korumak gerekir. İndüklenen sargı gerilimlerini doğrultmak için Şekil 3.3'deki 5 fazlı doğrultucu devresi kullanılmıştır. Batarya gerilimini otomatik olarak kontrol etmek için ise Şekil 3.4'deki elektronik devre kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Sargıların yıldız bağlanması ve 5 fazlı doğrultucu

Bataryalar yüksek akımla şarj edildiklerinde, bataryalar ısınacak ve plakalar zarar görecektir. Bu nedenle bataryaları küçük akımla sürekli şarj etmek en iyi yoldur. Devre gerilimi anma değerinden fazla olunca batarya şarj akımı artacaktır. Böyle bir durumda röleler, kontaklarını kapatarak bataryaya paralel bağlı boşaltma (şönt) yüklerini devreye alırlar. Devredeki LED'ler, batarya geriliminin durumunu göstermek için kullanılmıştır. Böylece rüzgarsız günlerde bataryanın gerilim seviyesi kontrol edilebilir.

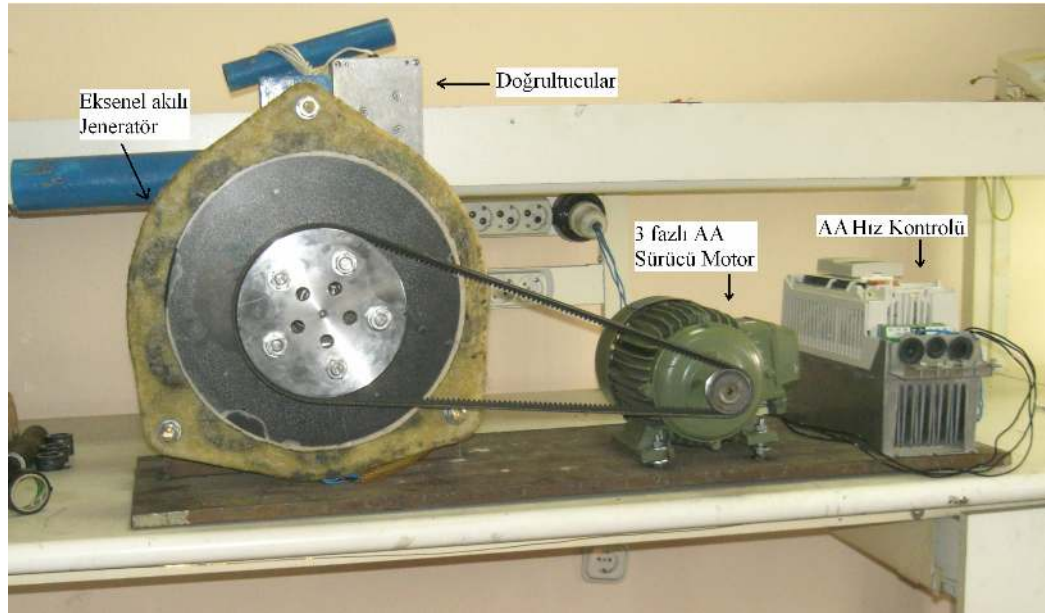


Şekil 3.4. Şönt regülatör devresi [18]

Şiddetli rüzgar olduğu zaman ise birden fazla batarya devreye bağlanabilir. Ya da bataryayı korumak için doğrultucu çıkışına bağlanacak olan devre kesici anahtar kullanılarak jeneratör kısa devre edilmelidir. Rüzgar türbinlerinde kullanılmak üzere hazırlanan bıçaklar, ortalama 3m/s rüzgar hızında 167 d/d hız ile çalışacak şekilde seçilmiştir. Aşırı hız bıçaklara zarar verecektir [18]. Böylece rüzgar türbininin bıçakları ve jeneratör ile birlikte şarj kontrol devresi ve bataryalar korunmuş olur. Çünkü hazırlanan test düzeneği ile yapılan bir yüksek hız deneyinde, jeneratör 1700 d/d ile döndürülmüş ve doğrultucu çıkış gerilimi 156 V olarak ölçülmüştür.

3.4. Test Düzeneği

Hazırlanan test düzeneği, Resim 3.3’de görülmektedir. Jeneratör, bir AA hız kontrol sürücüsü ile hızı kontrol edilebilen bir asenkron motor tarafından sürülmüştür. Jeneratör, test yüzeyine dik olacak şekilde sabitlenmiştir.



Resim 3.3. Test düzeneği

Jeneratörde rotor disklerinin bağlandığı saplamaların üzerine ve sürücü motorunun miline, aynı eksenli kasnaklar monte edilmiştir. Böylece vibrasyon engellenerek

jeneratörün ayarlanan hızda sabit ve dengeli dönmesi sağlanmıştır. Kayışın gerginliğini ayarlayabilmek için, test yüzeyinin üzerinde sürücü motorun monte edildiği yerde, vidalı kontrol düzeneği yapılmıştır. Kayış gerginliği ayarlandıktan sonra sistem sabitlemiştir.

Test düzeneğinde kullanılan sürücü motorun ve değişken hızı sağlayan eviricinin özellikleri Çizelge 3.4’de verilmiştir. Doğrultucudan alınan gerilim, jeneratörün dönüş hızına bağlıdır. Ancak doğrultucu çıkışına bir yük bağlandığında jeneratörün hızı düşmektedir. Bu nedenle jeneratör hızını düzenli olarak kontrol edebilmek için değişken hızlı bir sürücü sistemine ihtiyaç vardır.

Çizelge 3.4. Sürücü AA motor ve AA kontrolün özellikleri

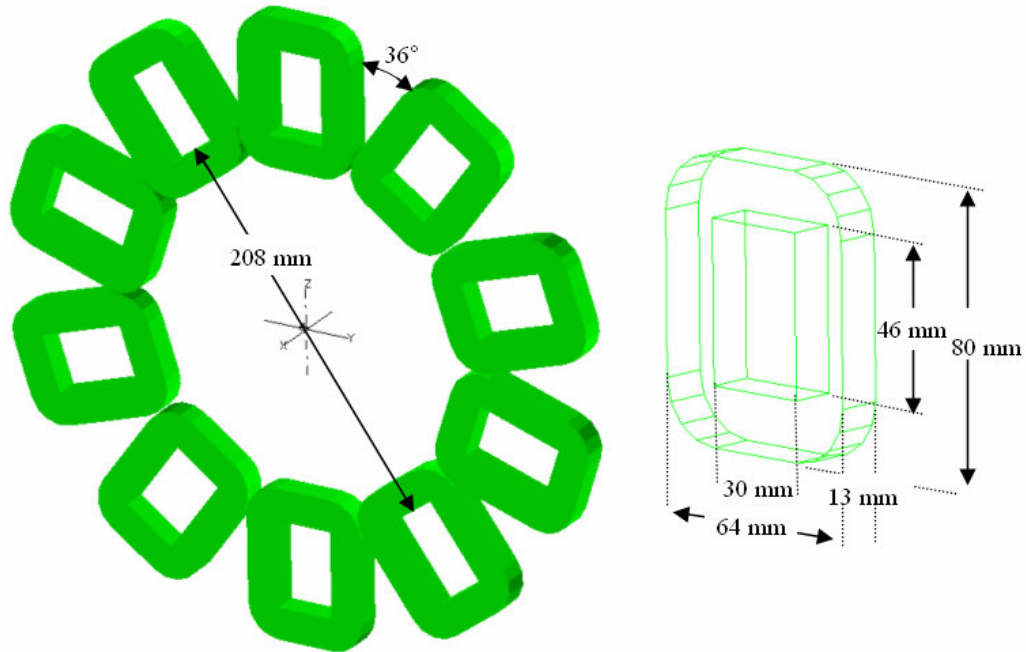
3 Fazlı AA Sürücü Motor	• 3 fazlı, 50 Hz • Δ/YY 1450/2880 d/d • 2,2 A, 750 W
AA Hız Kontrolü (Evirici)	• 0-250 Hz • 0-480 V • 2,2-37 kW

4. JENERATÖRÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), doğrusal ve doğrusal olmayan kısmi diferansiyel eşitliklerin çözümünde kullanılan nümerik bir yöntemdir [4]. SEY, makinenin yapısını değiştirmek, malzeme özelliklerini değiştirmek, rotor ve statordaki manyetik uyarmayı değiştirmek için kullanılabilir. Analiz, 2 boyutlu ya da 3 boyutlu yapılabilir.

2 boyutlu yaklaşım, analizi gerçekleştirilecek makinenin tamamı yada simetrik bir bölümünün ele alınmasıyla gerçekleştirilebilir ve yaklaşık sonuçlar sunar. 3 boyutlu analiz ise daha fazla zaman gerektirir, ancak neredeyse tam doğru sonuçlar verir. Bu nedenle basit yapılı olan nüvesiz statorlu EASM makinenin manyetik analizinde 3 boyutlu analizi gerçekleştirilmiştir.

4.1. Stator Modeli



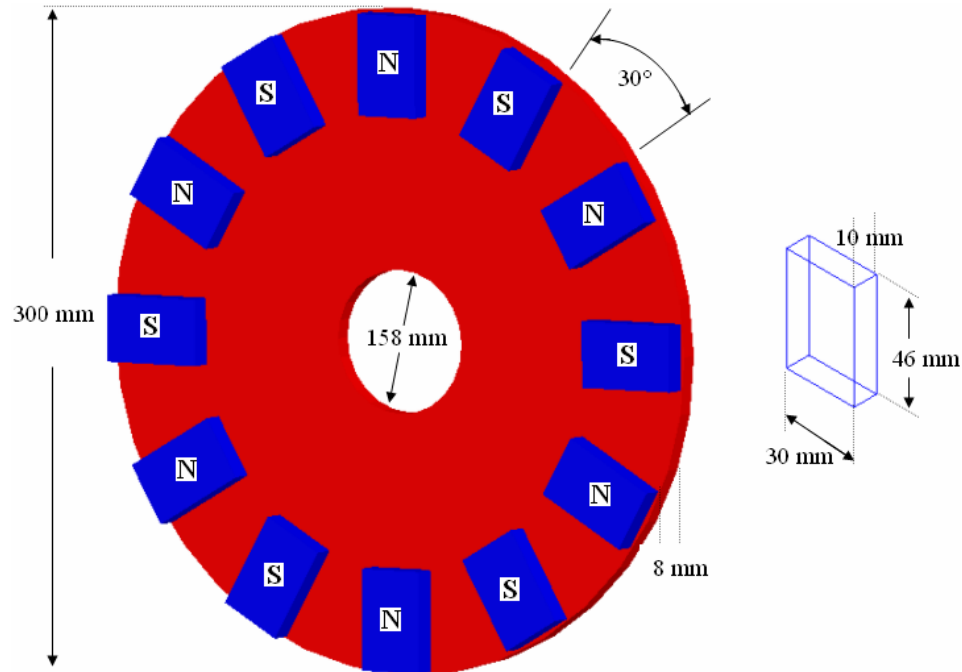
Şekil 4.1. EASM makinenin 3 boyutlu stator modeli

Modelleri oluşturmaya başlamadan önce programın kullandığı ölçü birimine dikkat edilmelidir. Gerçekleştirilen sargıların ölçülerine göre 10 sargı, Ansoft Maxwell programında 3 boyutlu olarak oluşturulmuştur. Sargılar, aralarında 36° açısal fark olacak şekilde yerleştirilirler. şekil 4.1’de oluşturulan sargıların 3 boyutlu modeli görülmektedir.

Sargı modellerinin içerisinden geçen manyetik akıyı görebilmek için, her bir sargının i boşluğunun eksenel ortasında yüzey elemanları oluşturulur. Bu elemanların malzeme özellikleri hava olarak girilmiştir. Böylece analize bir etkileri olmamıştır.

Paket programda, sargılar için materyal olarak bakır atanmıştır. Bakırın bağıl geçirgenliği $\mu_r = 0,999991$ ve iletkenliği $5,8 \times 10^7$ olarak girilmiştir. Stator kalıbında kullanılan polyesterin bağıl geçirgenliği 2,3 olup havaya oldukça yakın olduğundan analizde küçük bir hata ile ihmal edilmiştir.

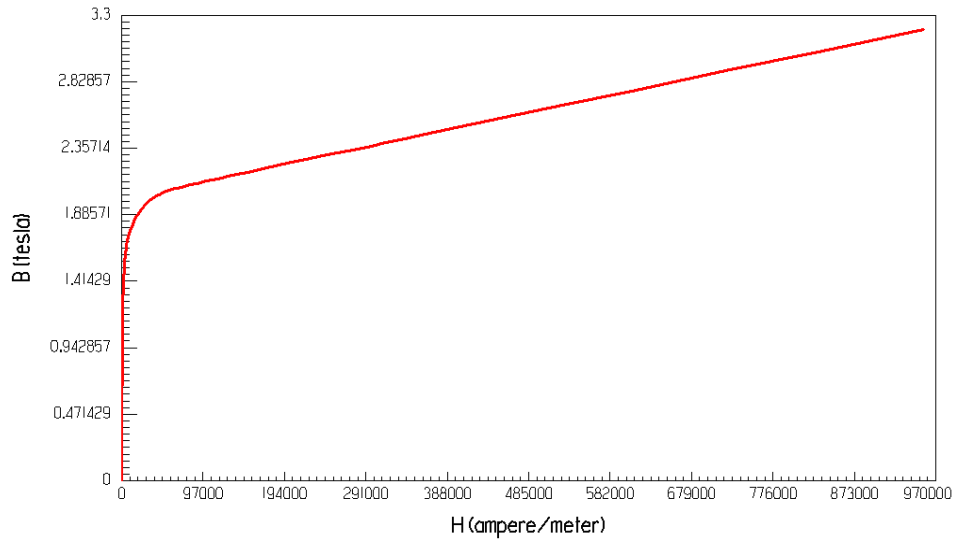
4.2. Rotor Modeli



şekil 4.2. EASM makinenin 3 boyutlu rotor disk modeli

Gerçek ölçülerinde modellenen 12 mıknatıs, aralarında 30° açı ile oluşturulmuştur. Bu mıknatıslar çelik disk üzerine yerleştirileceğinden mıknatıs modellerinin hemen arkasına çelik disk çizilir. Gerçekleştirilen rotor disklerinde, NdFeB mıknatısları korumak ve sabit bir hava aralığı sağlamak için epoksi dökülmüştür. Rotor disklerinin modeli oluşturulurken statorda olduğu gibi polyester tabaka ihmal edilmiştir. Şekil 4.2’de rotor disklerinden bir tanesinin modeli görülmektedir.

Diğer rotor diski, aynalama yöntemi ile oluşturulan modelden yansıtılarak elde edilir. Böylece tekrar model oluşturmaya gerek kalmaz. Bir malzemenin manyetik özelliği kolaylıkla bozulabiliyorsa bu tür malzemelere yumuşak manyetik malzeme denir [19]. Analiz yapılırken yumuşak manyetik bir malzeme olan çeliğin BH eğrisi belirtilmelidir. Çalışmamızda elektrik makine analizlerinde yaygın olarak kullanılan SA1010 çeliği seçilmiştir. Bu çeliğin BH eğrisi Şekil 4.3’de görülmektedir.



Şekil 4.3. Rotor modelinde kullanılan çeliğin BH eğrisi

Sert manyetik malzemelerin yüksek koersivite ve düşük geçirgenlik özellikleri onların mıknatıslanmalarını ve mıknatıslıklarını kaybetmelerini zorlaştırır. Bu tür malzemeler bir kez mıknatıslanıp ondan sonra uzun süre bu mıknatıslanmalarını korumalarından dolayı sürekli mıknatıslar olarak adlandırılırlar [19]. Kullanılan

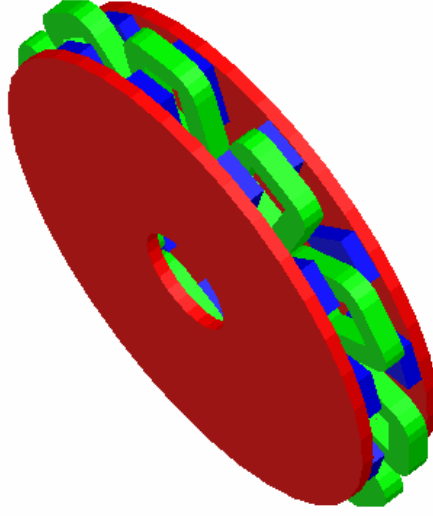
NdFeB mıknatısların özellikleri ise Çizelge 4.1’de verilmiştir. Modeldeki bir bölüm mıknatıs olarak atandığında mıknatıslanma yönleri de belirtilmelidir. Mıknatıslar, eksenel yönde, yanında bulunan mıknatısın yönüne göre mıknatıslandırılmıştır.

Çizelge 4.1. Kullanılan NdFeB mıknatısın özellikleri

Bağıl Geçirgenlik (μ_r)	1,0997785406
İletkenlik	6,25e+005 Siemens/metre
Koersivite kuvveti (H_c)	-9,75e+005 Amper/metre
Kalıcı akı yoğunluğu (B_r)	1,34747191166 Tesla
Mıknatıslanma (M_p)	1072284,07709 amper/metre

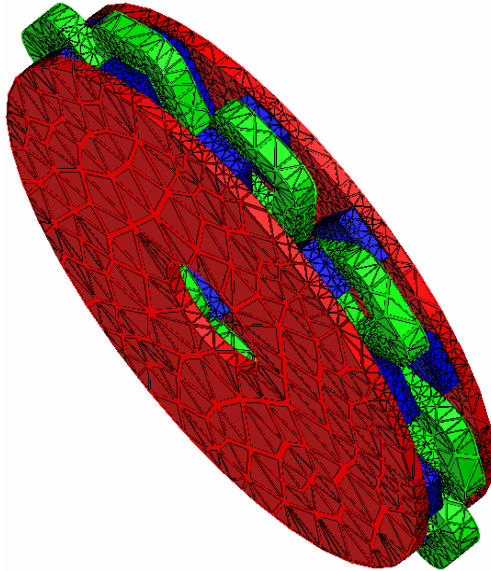
Rotor disklerinde karşılıklı gelen mıknatısların mıknatıslanma yönlerinin zıt olduğuna dikkat edilmelidir. Bu nedenle mıknatıslara isim verilirken rakamlar kullanılmıştır ve tek rakamlı mıknatıslar eksen yönünde, çift rakamlı mıknatıslar ise eksenin tersi yönünde mıknatıslandırılmışlardır. İki rotor diski arasındaki mesafe 15 mm olmalıdır. Böylece sandviç şeklindeki modelde statorun her iki rotor diski ile arasındaki hava aralığı 1 mm olarak ayarlanmış olur.

Stator ve rotor modelleri oluşturulduktan sonra tüm modeli içine alan bir bölge tanımlanır. Bu bölge içerisindeki malzeme hava olarak girilir. Böylece modelleme tamamlanmış olunur. Oluşturulan modelin tamamı Şekil 4.4’de görülmektedir.



Şekil 4.4. EASM makinenin oluşturulmuş modelinin tamamı

Modelin göze işlemi, isteğe göre elle ya da otomatik olarak yapılabilir. Elle gözelemede, hava aralığı ya da mıknatıs yüzeyleri gibi önemli bölgeler, daha fazla sayıda elemana bölünerek sonucun gerçeğe yaklaşması sağlanabilir. Otomatik gözeleme işleminde eleman sayısı artırılarak da benzer sonuçlar elde edilebilir. Şekil 4.5’de tüm modelin gözelenmiş hali görülmektedir.



Şekil 4.5. 3 boyutlu modelin gözelenmiş görünümü

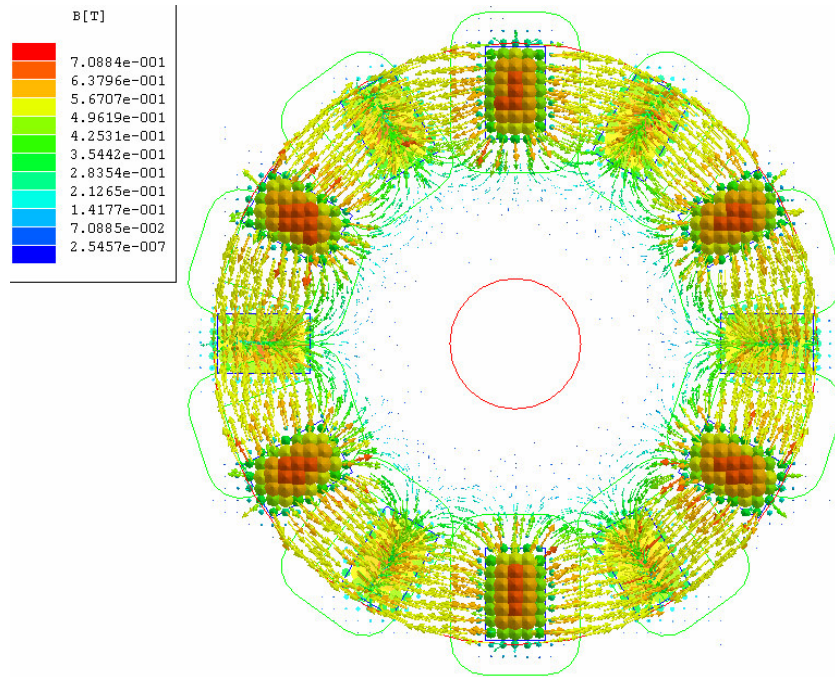
Oluşturulan model, gözeleme işlemi ile 200 000 elemana bölünmüştür. Bir sargıda indüklenen gerilim, rotor disklerinin eksenel yönde 60° dönmesiyle bir dönemini bitirir. Bunun için modelin çözümü, 60 adımda gerçekleştirilmiştir. Her adımda rotor diskleri, 1° döndürülerek yeni modeller oluşturulmuş ve her model için analiz tekrarlanmıştır. Böylece bir sargıda indüklenen gerilimin tam dönemi, modelin toplamda 60° döndürülmesi ile sağlanmıştır.

5. DENEYSEL SONUÇLARLA SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde, Ansoft Maxwell paket programı kullanılarak oluşturulan jeneratör modeli üzerinde yapılan manyetik analizin sonuçları ile gerçekleştirilen test düzeneğinden ölçülen veriler karşılaştırılmıştır.

5.1. SEY Sonuçları

($\vec{B}$) Manyetik akı yoğunluğunun büyüklüğü ve yönü ile ($\vec{H}$) manyetik alan şiddeti, elektrik makinelerinin analizinde en önemli parametrelerdir ve bu parametreler maxwell eşitliklerinden yararlanarak elde edilirler.

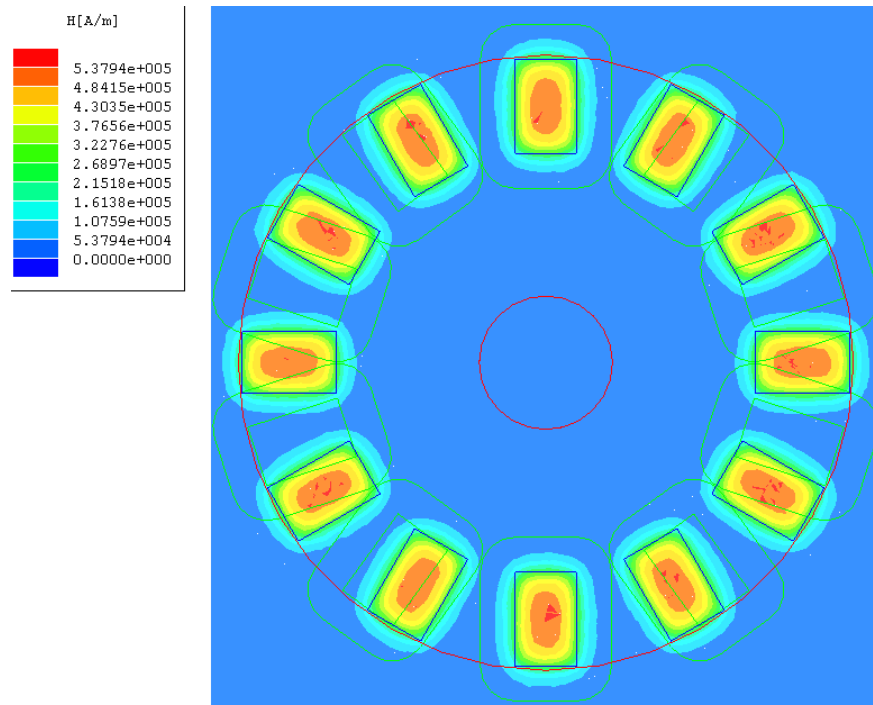


Şekil 5.1. SEY modelindeki B manyetik akı yoğunluğu

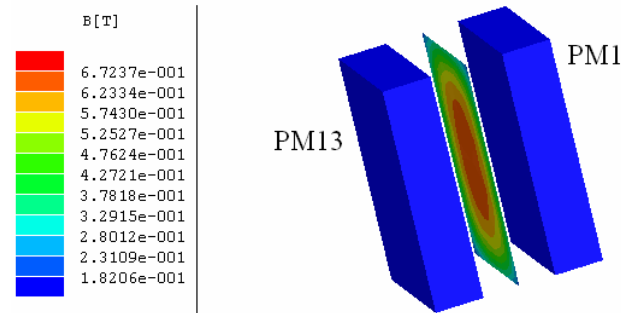
Şekil 5.1’de elde edilen model üzerindeki B manyetik akı yoğunluğunun vektörel dağılımı, Şekil 5.2’de ise, modelin eksenel yönde tam ortasından alınan kesit alanı

üzerindeki manyetik alan şiddeti görülmektedir. Tahmin edileceği üzere, H mıknatısın merkez ekseninde maksimum değerini almakta ve merkezden uzaklaştıkça dairesel şekilde azalmaktadır.

Ansoft Maxwell programı, sargıların modellenmesi aşamasında oluşturulan yüzey alanları üzerindeki manyetik akı yoğunluğunu tanımlayabilmektedir. Şekil 5.3'de bu yüzey alanındaki manyetik akı yoğunluğu görülmektedir.



Şekil 5.2. SEY modeldeki H manyetik alan şiddeti



Şekil 5.3. Hava aralığı akı yoğunluğu

$$\phi_g = \int_s B_g \cdot ds \quad (5.1)$$

Hava aralığındaki manyetik akı miktarı Eş. 5.1’de görüldüğü gibi tanımlı yüzey alanında yüzey integrali alınarak hesaplanır. Burada; Φ_g hava aralığı akısı ve B_g hava aralığı manyetik akı yoğunluğudur. Rotor disklerinin her konumu için elde edilecek manyetik akı miktarları bu yolla tespit edilebilir. Rotor disklerinin 1° aralıklarla döndürülmesi sonucu elde edilen 60 model için yapılan analiz sonuçları, MATLAB programına aktarılarak çizilmiştir.

Şekil 5.4’de, rotor disklerinin eş zamanlı olarak 60° hareketi sonucunda bir sargının iç kısmında tanımlanan yüzeydeki manyetik akının değişimi ve yan yana konumlandırılmış olan iki sargının yüzey alanlarında manyetik akıların değişimi gösterilmiştir. Bir sargıdaki manyetik akı, pozitif ve negatif tepe değerlerine rotorun 30° hareketinden sonra ulaşmaktadır. Ancak tepe değerleri birbirlerine eşit değildir. Yan yana bulunan iki sargıdaki manyetik akı incelenirse, iki manyetik akı değişimi arasında rotorun 6° hareketi vardır. Bu durum da bize, iki manyetik akı değişimi arasında 36° faz farkı olduğunu gösterir. Ayrıca sargıdaki manyetik akıların tepe değerleri de farklıdır.

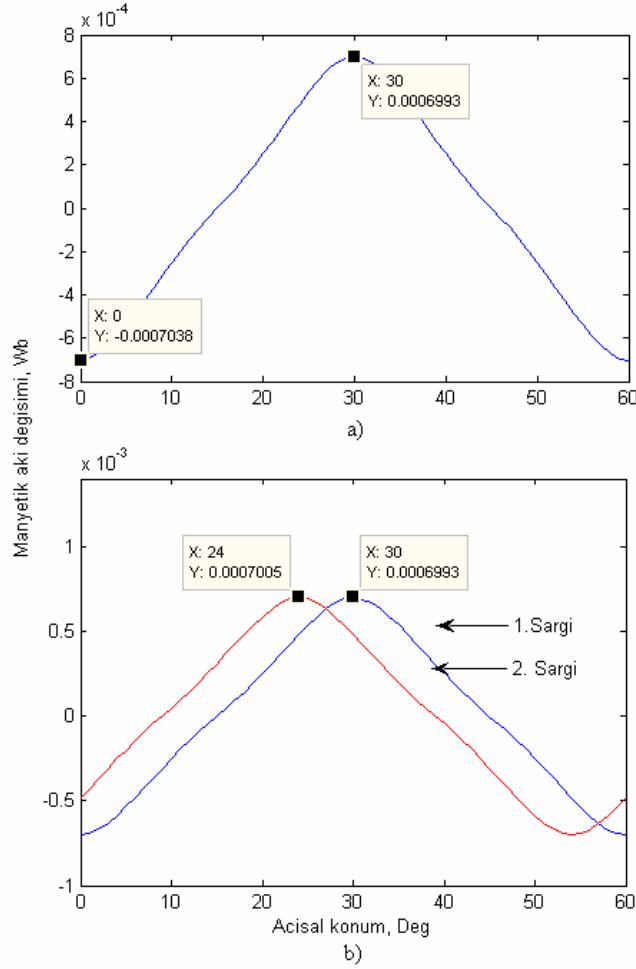
Sargılarda indüklenen gerilim ise manyetik akıdan 90° faz farklıdır. Yani manyetik akının maksimum olduğu ve mıknatısın tam sargı boşluğuna geldiği anda, sargıda indüklenen gerilim sıfırdır ve indüklenen gerilim;

$$e(t) = N \cdot \frac{d\phi_g}{dt} \quad (5.2)$$

$$e(t) = N \cdot \frac{d\phi_g}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (5.3)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (5.4)$$

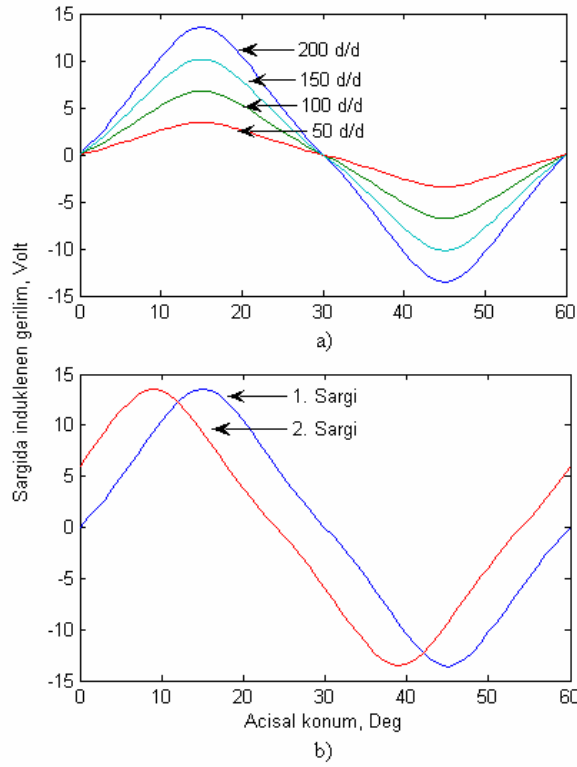
$$e(t) = N \cdot \omega \cdot \frac{d\phi_g}{d\theta} \quad \text{'den hesaplanır.} \quad (5.5)$$



Şekil 5.4. Rotor konumlarına bağılı akı değışimleri a) Bir sargı içerisindeki, b) Yan yana konumlandırılmış iki sargı içerisindeki

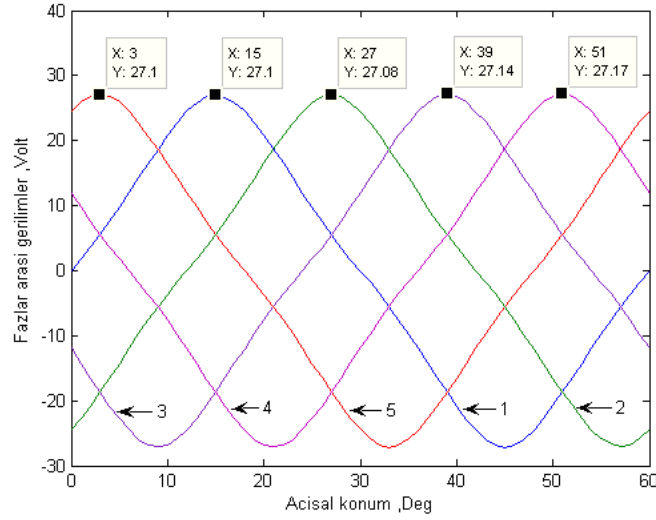
Burada; N sargı sarım sayısı, ω bir sargının açısal hızı, θ rotor açısal konumunu ifade eder. Sargıda indüklenen gerilim, sargının sarım sayısı ve manyetik akı miktarı sabit olduğuna göre jeneratörün hızı ile orantılıdır. Bir rotor diski üzerinde 12 çift mıknatıs olduğundan 6 tane kapalı kutup manyetik yolu (path) bulunur. Bunun anlamı rotor bir devir döndüğünde bir sargıda indüklenen gerilim 6 tam dönemi tamamlar. Yani indüklenen gerilimin açısal frekansı mil hızının 6 katıdır. Şekil 5.5’de jeneratör 50,

100, 150 ve 200 d/d ile dönerken bir sargıda indüklenen gerilimleri ve jeneratör 200 d/d hız ile dönerken yan yana iki sargıda indüklenen gerilimlerin 60° rotor dönüşü sonrasındaki değişimi görülmektedir.

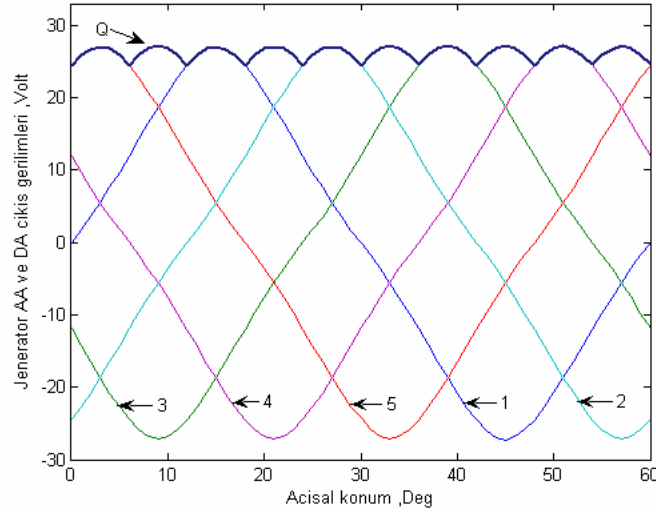


Şekil 5.5. Rotorların konumlarına bağlı indüklenen gerilimler a) Farklı hızlarda bir sargıda, b) 200 d/d mil hızında yan yana bulunan iki sargıda

Tasarlanan modelde, sargıların yıldız bağlanması sonucu 200 d/d mil hızında oluşacak 5 fazlı alternatif çıkış işareti Şekil 5.6'da görülmektedir. Rotorların referans konumu (0. konum) olarak P1 ve P13 mıknatıslarının sargı-1'in tam ortasındaki konumu alınmıştır (Bkz. Şekil 5.1). 5. faz, rotorun 3. konumunda tepe değerini alırken, 1. faz, 12 derece sonra 15. rotor konumda aynı gerilim değerine ulaşmaktadır. Gerilimler, rotorun 60° hareketinde tam dönemlerini tamamladıklarına göre, iki faz arasındaki faz farkı 72° olmaktadır. Fazlar arasındaki gerilimler birbirlerine çok benzemektedir.

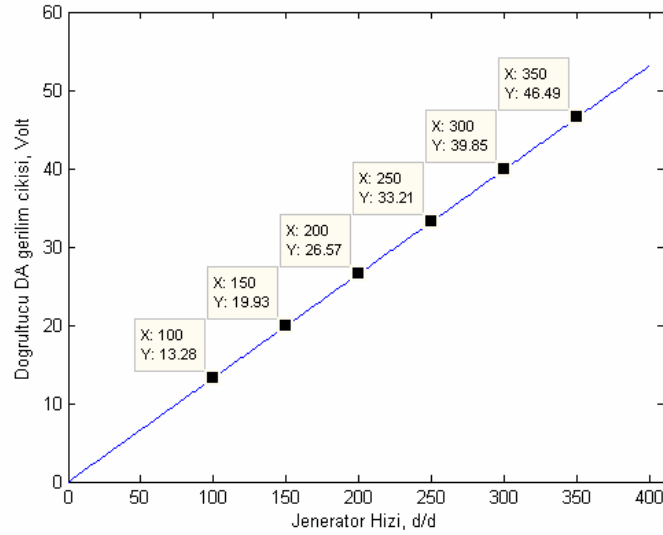


Şekil 5.6. 5 fazlı jeneratör çıkış gerilimi



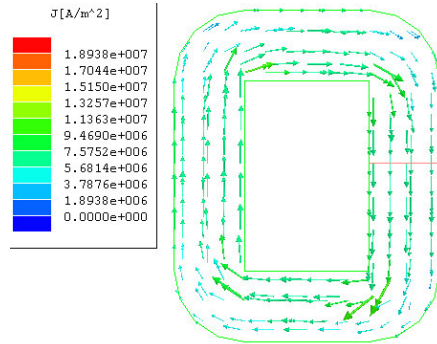
Şekil 5.7. Jeneratör çıkışındaki 5 fazlı AA ve doğrultucunun DA çıkış işareti

Şekil 5.7’de ise jeneratör çıkışında elde edilen 5 faz gerilimleri ile birlikte doğrultucu çıkışı görülmektedir. Doğrultucu çıkışının ortalama değeri alındığında ise 26,5687 Volt gerilim hesaplanmıştır. Jeneratör dönüş hızı değiştiğinde yüksüz durumda, sargı gerilimleri ve dolayısıyla doğrultucu çıkışında görülen DA gerilim değişecektir. Şekil 5.8’de 0-400 d/d hız aralığında DA çıkışın değişimi görülmektedir.



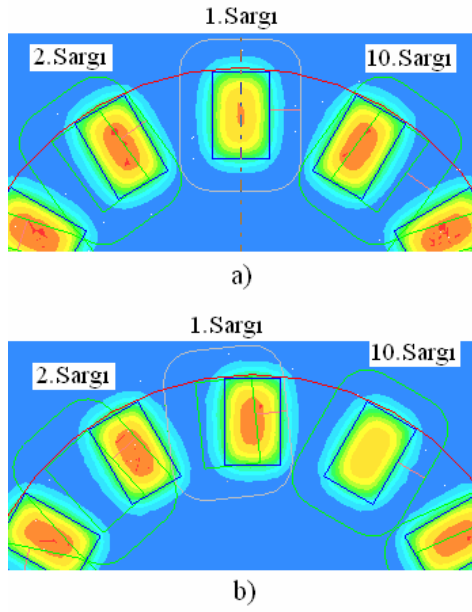
Şekil 5.8. Jeneratör hızı ile çıkış DA gerilimin değişimi

Doğrultucu çıkışına bir yük bağlandığı zaman sargılar üzerinden geçen yük akımı, mıknatıs çiftlerinin oluşturduğu manyetik akıyı azaltacak şekilde bir alan oluşturur. Şekil 5.9'da bu akı azalmasına neden olan bir sargıdaki J (A/m^2), akım yoğunluğu görülmektedir.



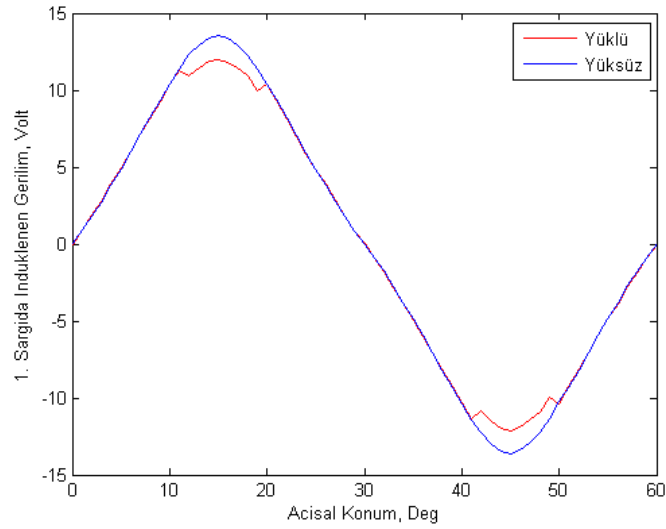
Şekil 5.9. Rotorların 0. konumunda 1. sargının akım yoğunluğu

0. konum ve 6. konumda mıknatıs çiftlerinin oluşturduğu manyetik akılara yük akımının etkisi Şekil 5.10'da görülmektedir. 0. konumda yük akımı 1. sargı üzerinden geçerken rotorların 6° dönmesi sonucunda yük akımı, 10. sargı üzerinden geçmektedir.



Şekil 5.10. Yük ile manyetik akılardaki bozulmalar a) Rotorların 0. konumlarında, b) Rotorların 6. konumlarında

Bu akım yoğunluğu ile jeneratör yüklendiğinde 1. sargıda indüklenen gerilim Şekil 5.11’de görüldüğü gibidir.



Şekil 5.11. Yüklü ve yüksüz durumda 1. sargıda indüklenen gerilimler

Görüldüğü gibi sargı gerilimin tepe değerlerine yakın konumlarda sargılar üzerinden yük akımı geçmektedir ve bu akımın etkisiyle sargı gerilimi azalmaktadır. Diğer rotor konumlarında yük akımı diğer sargı çiftlerinden geçecektir.

5.2. Test Düzeneği Sonuçları

Deneyler gerçekleştirilmeden önce jeneratörün doğru olarak çalışıp çalışmadığını gözlemlemek için ön testlerin yapılması gerekir.

5.2.1. Kısa devre testi

Kısa devre testi, stator sargı çıkışları doğrultucuya bağlanmadan önce yapılmalıdır. Statorun aynı yarı parçasında bulunan iki sargının çıkışı kısa devre edilir. Jeneratörün dönüşü sert olmaya başlamalıdır. Böylece mıknatısların doğru konumda olduğu ve kısa devre olan sargı üzerinde büyük kısa devre akımları oluşturduğu anlaşılır. Statorun aynı yarı parçasında bulunan 5 sargı çıkışı da kısa devre edildiğinde moment, düzgün ve çok sert olacaktır.

5.2.2. AA gerilim testi

Bir önceki testten kalan stator sargılarının kısa devreleri sökülür. Statorun aynı yarı parçasında bulunan iki sargı çıkışı arasına bir AA voltmetre bağlanır. Sargılar arasındaki faz farkına bağlı olarak iki farklı gerilim ölçülür. Ölçülen değer çıkışın etkin değeridir. Verilen herhangi bir hız değeri için DA çıkış bu değer $\sqrt{2}$ katından 1.5 Volt eksiktir.

5.2.3. DA gerilim testi

Sargı çıkışları doğrultucuya bağlanır ve jeneratör döndürülerek DA çıkış gözlenir. Çıkıştaki dalgalanmaları gözlemlemek zor olabilir. Böyle bir durumda AA sargı

çiftleri arasına veya yıldız noktası ile bir sargı çıkışı arasına frekans metre bağlanarak çıkış frekansı izlenir.

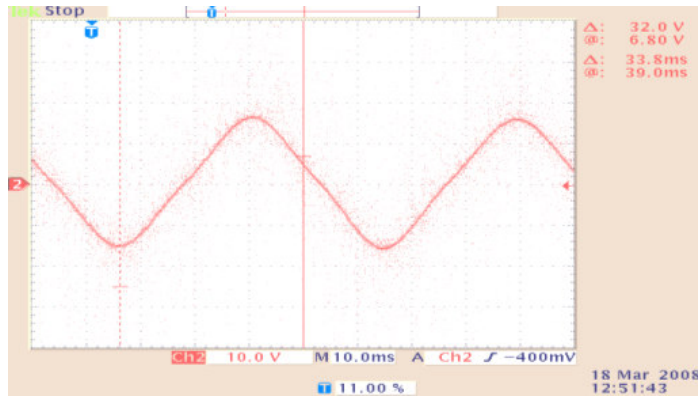
$$F = \frac{n \cdot p}{120} \quad (5.6)$$

Burada; n d/d cinsinden jeneratör hızı, p toplam kutup sayısıdır. Eş. 5.6'a göre 200 d/d ile döndürülen bir jeneratörün, bir sargısında indüklenen gerilimin frekansı 20 Hz olmalıdır.

5.2.4. Yüklü ve yüksüz durum testleri

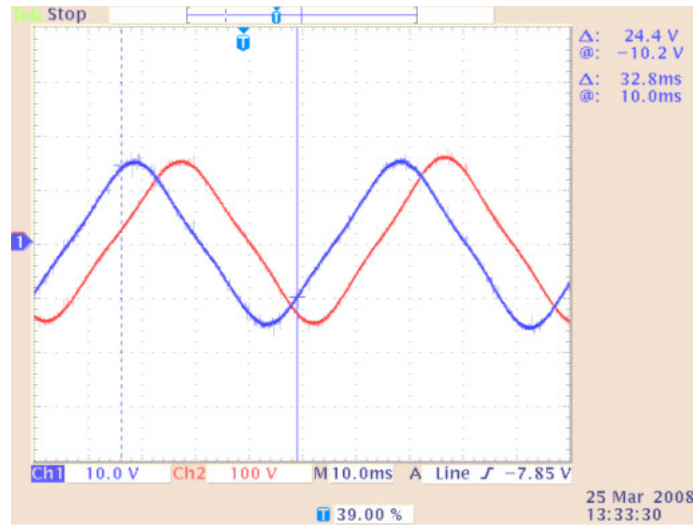
Düşük hızlarda doğrultucunun DC çıkışları kısa devre olursa jeneratör dönmeye devam eder. Ancak jeneratör hızı, saniyede 5 devire ulaşınca jeneratörün dönüşü zorlanmaya başlar. Bunun nedeni, doğrultucudaki diyotların iletme geçmesi için gerekli gerilimin elde edilmesidir [18].

Hazırlanan test düzeneğinde sürücü motorun hızı değiştirilerek kasnak sistemiyle jeneratörün farklı hızlarda dönmesi sağlanmıştır. Şekil 5.12'de jeneratör 200 d/d ile dönerken yüksüz durumda bir sargı ucuyla yıldız noktası arasındaki bir faz gerilimi görülmektedir.



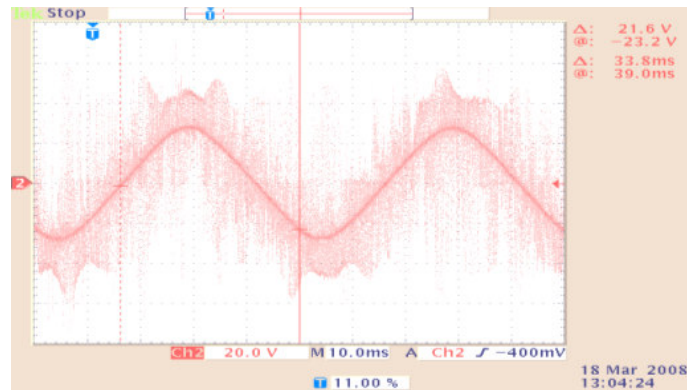
Şekil 5.12. Bir faz gerilimi osiloskop ölçümü

Şekil 5.13’de ise yan yana bulunan iki sargının gerilimleri görülmektedir. Eğer sargıların konumları doğru şekilde yapıldıysa bu iki sargı gerilimleri arasında 36° faz farkı olmalıdır.



Şekil 5.13. 200 d/d hızda yüksüz durumda yan yana bulunan iki sargıdaki gerilimler

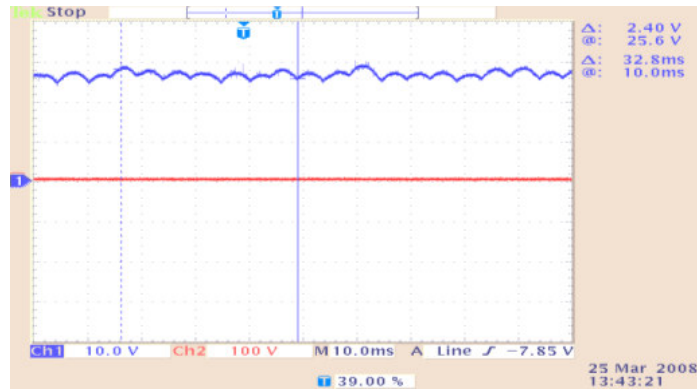
Gerilimlerin tepe değerleri yaklaşık olarak birbirlerine eşittir ve aralarında 36° faz farkı bulunmaktadır. Sargıların Frekansı da 20 Hz olarak tespit edilmiştir. 5 fazlı doğrultucunun girişindeki iki faz arası gerilimlerden biri ölçüldüğünde ise Şekil 5.14’de görülen fazlar arası gerilim elde edilmiştir. Bu ölçüm esnasında da jeneratör hızı 200 d/d ve sistem yüksüzdür.



Şekil 5.14. 200 d/d hızda yüksüz durumda fazlar arası gerilimler

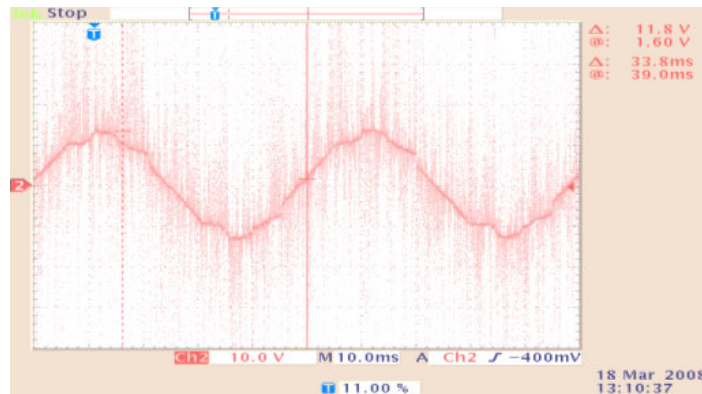
Görülen sinyaldeki gürültüler sürücü motoru istenen hızda döndüren AA hız kontrolünün anahtar tetikleme frekansından kaynaklanmaktadır. Gerçekleştirilen sistem ile doğrudan bir ilgisi yoktur.

Doğrultucu girişine gelen bu 5 faz doğrultulduğunda, Şekil 5.15'deki çıkış sinyali elde edilir. Bu sinyalin ortalama değeri, 26,6 Volt olarak ölçülmüştür. Sonlu elemanlar yönteminde elde edilen çıkışa benzer şekilde, bazı sargı gerilimlerindeki farktan dolayı dalgalanmalarda küçük farklar görülmektedir.



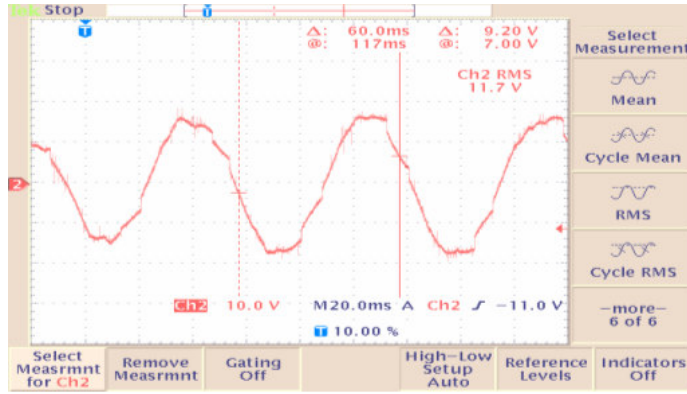
Şekil 5.15. 200 d/d hızda yüksüz durumda doğrultucu çıkış gerilimi

Jeneratör yüklendiğinde, sargı geriliminde ve dolayısıyla fazlar arası gerilimde bozulmalar olmaktadır. Şekil 5.16'da, 200 d/d hızda, yüklü durumda bir sargı gerilimindeki bozulma görülmektedir.

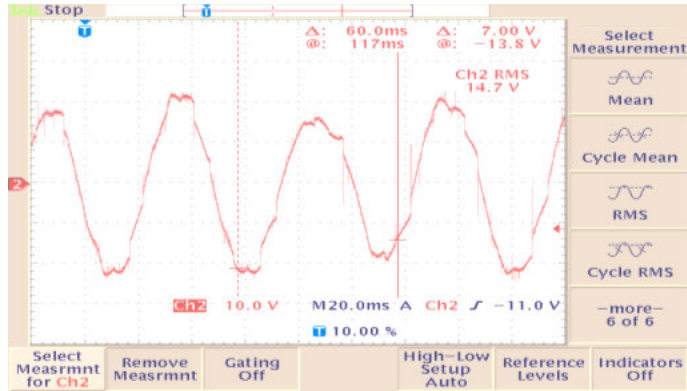


Şekil 5.16. 200 d/d hızda yük altında bir sargı gerilimi

Yük altında bir fazdaki bu bozulma fazlar arası gerilimlere de yansır. Şekil 5.17’de ve Şekil 5.18’de aynı yük altında, sırasıyla 150 d/d ve 200 d/d hızda fazlar arası gerilimin değişimi görülmektedir.

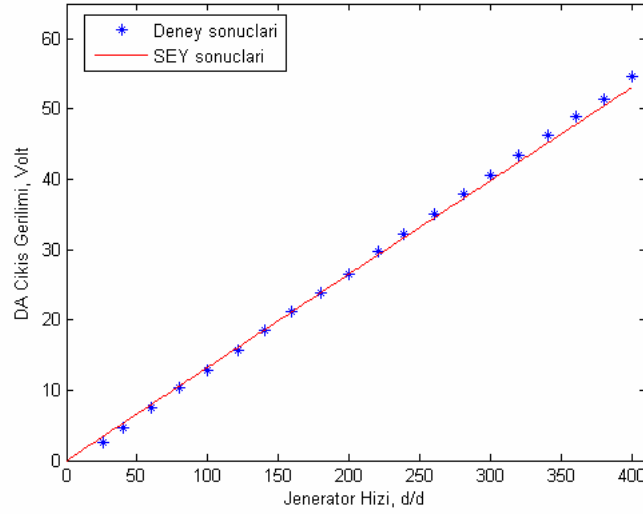


Şekil 5.17. 150 d/d hızda sabit yükte fazlar arası gerilim



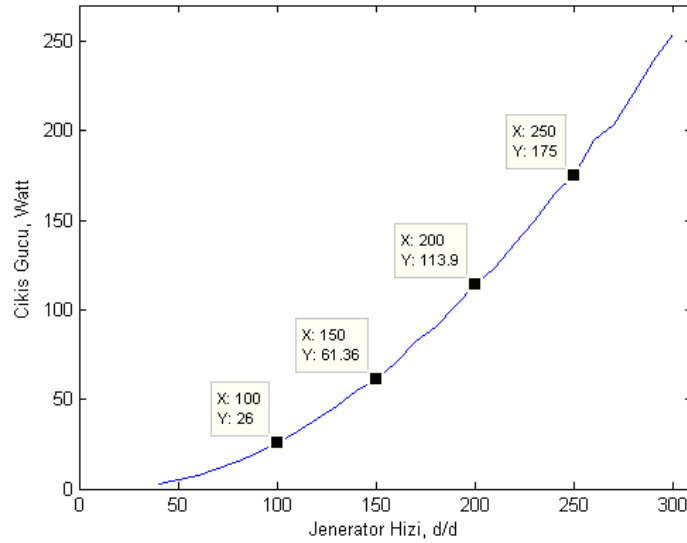
Şekil 5.18. 200 d/d hızda sabit yükte fazlar arası gerilim

Şekil 5.19’da yüksüz durumda değişik hızlarda DA çıkışın nasıl değiştiği görülmektedir. Ölçülen değerler, SEY sonuçlarına oldukça yakındır.



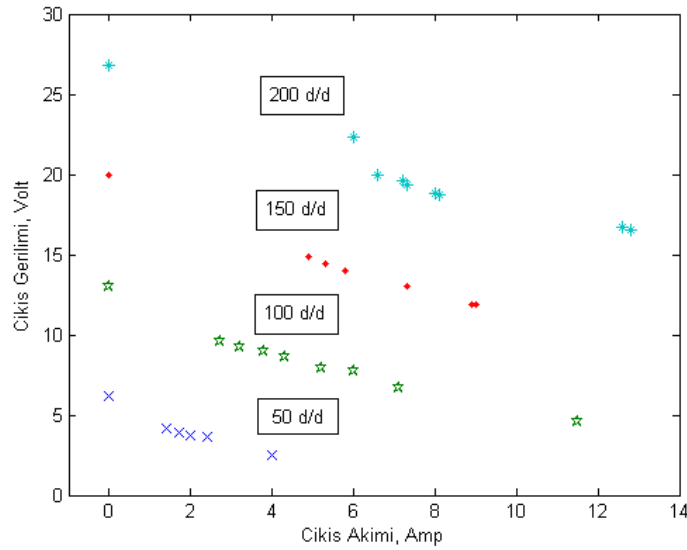
Şekil 5.19. Yüksüzken ölçülen DA çıkışın hızla değişimi

Doğrultucunun DA çıkışı, jeneratörün hızıyla doğrusal şekilde değişmektedir. Türbin hızının artmasıyla, çıkışa aktarılan güç de artmaktadır. Şekil 5.20’de, jeneratör çıkışına, sabit 4 Ω yük bağlı iken hız ile çıkış gücünün değişimi görülmektedir.



Şekil 5.20. Sabit yükte jeneratör hızıyla çıkış gücünün değişimi

Sistemde yük her zaman sabit olmayabilir. Yük değeri değiştikçe, jeneratörün hızı ve dolayısıyla da çıkış gerilimi değişmektedir. AA hız kontrolü ile jeneratörün hızı sabit tutulursa, DA çıkış akım ve geriliminin değişimi gözlenerek jeneratörün sabit hızda maksimum güç noktası belirlenebilir. Şekil 5.21’de, sabit hızlarda çıkış akımı ile çıkış geriliminin değişimi görülmektedir.



Şekil 5.21. Sabit hızlarda çıkışın I-V değişimi

Jeneratörün çıkış gücü, jeneratör hızının karesiyle orantılıdır. Bu nedenle, düşük hızlarda ölçüm yapmak zorlaşmaktadır. Şekil 5.18’de görüldüğü gibi, jeneratör hızı sabit olsa da yük arttıkça çıkış geriliminde azalmalar olmaktadır. Bunun nedeni, sargılardan geçen akımın, endüvi reaksiyonu etkisiyle hava aralığı manyetik akısını bozmasıdır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Rüzgar türbininde sürekli mıknatıslı yapıların kullanılması giderek artmaktadır. Bu yapılardan bir tanesi de nüvesiz statorlu çift rotorlu eksenel akılı jeneratördür. Nüvenin kalkmasıyla yapının verimi artarken aynı zamanda yapı daha sade ve kompakt bir hal almaktadır. Rüzgar türbinlerinde kullanılan sürekli mıknatıslı yapıların SEY ile incelenmesiyle ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur. Ancak bu çalışmaların çoğu, büyük güçlü prototipler için yapılmış ya da incelenen yapıların karmaşıklığından dolayı analizi daha kısa sürede gerçekleştirmek için 2 boyutlu analizler incelenmiştir. Bu tezde, kırsal kesimlerde kullanılmak üzere önerilen ve daha önce literatürde yer almış düşük güçlü bir EASM makinenin 3 boyutlu modeli oluşturularak SEY ile analizi yapılmış ve gerçekleştirilen prototip rüzgar türbininin deneysel sonuçları ile oluşturulan modelin analiz sonuçları farklı hızlarda karşılaştırılmıştır.

SEY ile yapılan analiz sonucuna göre, 200 d/d hızda doğrultucu çıkışı 26,5687 Volt iken deneysel çalışmada bu gerilim 26,6 Volt olarak ölçülmüştür. Bu da bize oluşturulan modelin gerçek prototip ile aynı özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Doğrultucu çıkışları incelendiğinde, SEY ile elde edilen sinyalde çok fazla bir bozulma söz konusu değilken deneysel ölçümde farklı dalgalanmalar görülmektedir. Her ne kadar dikkatli şekilde mıknatıs ve stator sargılarının konumu belirlenmeye çalışılsa da, küçük bir konum değişikliği bu sonucu doğuracaktır. Jeneratöre yük bağlandığında sargı akımları mıknatıs çiftlerinin manyetik akısını azaltacağından sargı gerilimlerinde bu bölümlerde zayıflama olmaktadır. Yükün etkisi deneysel çalışmada osiloskop ile görülmüş ve benzer bir etki SEY ile de elde edilmiştir. Dolayısıyla SEY ile sargıdan geçen akım değeri bilindiği sürece sargıda indüklenen gerilimdeki bozulma ve çıkışta bu bozulmanın yansıması belirlenebilir.

Nüvesiz statorlu EASM jeneratörün 3 boyutlu modeli incelendiğinde, manyetik alandan daha fazla yararlanılabileceği görülmektedir. Bir mıknatıs çiftinin altına bir yerine üç sargı konulması durumunda, manyetik alandan daha fazla yararlanılabilir.

Böyle bir yapının statorunda 30 sargı olacaktır. Böyle bir durumda sargılar, statorun bir bölümünde üst üste geleceğinden sargı sonları kıvrılmalıdır. Bu da sargı boyunun uzaması anlamına gelecektir. Ayrıca sargıların iç boşlukları biraz daha geniş yapılarak mıknatıs çiftlerinin manyetik alanından daha fazla yararlanılabilir. Bu durum, sargı sonu boyunun uzaması ve sargı direncinin artması anlamına gelse de manyetik alandan daha fazla yararlanılacağı için verim ve güç artacaktır. Mıknatıs ve sargı şekillerinin ikiz kenar yamuk şeklinde yapılması manyetik yolu kısaltacağı gibi aynı disk ölçülerinde kutup sayısının arttırılmasına olanak tanır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Enerji İşleri Etüt İdaresi, “2006 yılı Dünya Rüzgar Enerjisi Kurulu Gücün Dağılımı”, http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/dunya_RES.html (2008).
2. Çağlar, Ü., Cengiz, C., Çakan, E., Onan, M.T, Kocaoğlu, Ş. “ Türkiye’nin Atıl Enerji Kaynağı: Rüzgar Enerjisi”, **2. Ulusal İktisat Kongresi**, İzmir, 62-78 (2008).
3. Varınca, K.B., Varank, G., “Rüzgâr Kaynaklı Enerji Üretim Sistemlerinde Çevresel Etkilerin Değerlendirilmesi ve Çözüm Önerileri”, **Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları / Enerji Yönetimi Sempozyumu**, Kayseri, 367-376 (2005).
4. Desai, V.K., “Scope of Small Wind Turbines in INDIA”, **Bulletin on Energy Efficiency**, Rajkot, India, 7:1-2 (2006).
5. Rizk, J., Nagrial, M., “Design of permanent-magnet generators for wind turbines”, **Power Electronics and Motion Control Conference**, Beijing, China, 1: 208-212 (2000).
6. Chen, Y., “Novel Design Configurations for permanent magnet wind generators”, Doktora Tezi, **Clarkson University Department of Electrical and Computer Engineering**, United States, 1-4, 14-15 (2004).
7. Chen, Y., Pillay, P., Khan, A., “PM Wind Generator Topologies”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, 41 (6): 1619-1626 (2005).
8. Keppola, H., Perälä, R., Söderlund, L., Vihriälä, H., “Preliminary Test Results Of An Axial Flux Toroidal Stator Wind Power Generator”, **ICEM 2000 Proceedings**, Espoo, Finlandia, 3: 1480-1484 (2000).
9. Svechkarenko, D., “On Analytical Modeling and Design of a Novel Transverse Flux Generator for Offshore Wind Turbines”, Lisans Tezi, **KTH Royal Institute of Technology Electrical Engineering**, Sweden, 19-38 (2007).
10. Spooner, E., Williamson, A.C., “Direct coupled, permanent magnet generators for wind turbine applications”, **IEE Proceedings: Electric Power Applications**, 143 (1): 1-8 (1996).
11. Soderlund, L., Eriksson, J.T., “A permanent-magnet generator for wind power applications,” **IEEE Trans. Magn.**, 32 (4): 2389-2392 (1996).

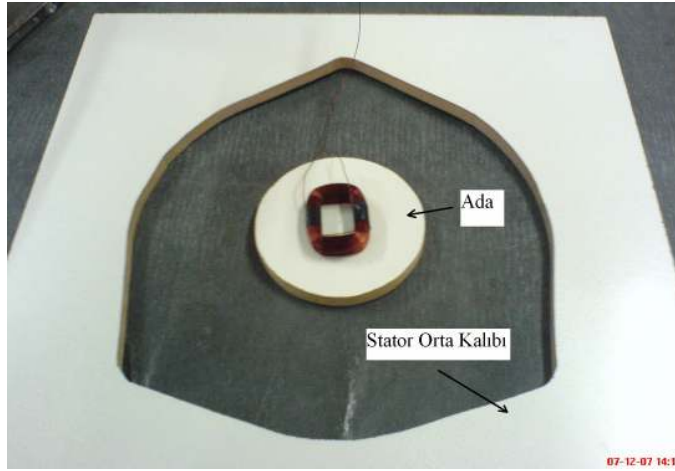
12. Gireas, J.K., Wing, M., "Permanent Magnet Motor Technology", *Marcel Dekker Inc.*, New York, 314-331 (2002).
13. Wang, R.J., Kamper, M.J., Weshuizen, K.V., Gireas, J.F., "Optimal Design of a Coreless Stator Axial Flux Permanent Magnet Generator", *IEEE Transactions on Magnetics*, 41 (1): 55-64 (2005).
14. Hwang, D., Lee, K., Kang, D., Kim, Y., Choi, K., Park, D., "An Modular-type Axial-flux Permanent Magnet Synchronous Generator for Gearless Wind Power Systems", *The 3Mh Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Busan-Korea, 1396-1399 (2004).
15. Chalmers, B.J., Wu, W., Spooner, E., "An Axial-Flux Permanent-Magnet Generator for a Gearless Wind Energy System", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14 (2): 251-257 (1999).
16. Lombard, N.F., Kamper, M.J., "Analysis and Performance of an Ironless Stator Axial Flux PM Machine", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14 (4): 1051-1056 (1999).
17. Gieras, J.F., Gieras, I.A., "Performance Analysis of a Coreless Permanent Magnet Brushless Motor", *Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting*, Pittsburgh, USA, 4: 2477-2482 (2002).
18. Piggott, H., "How To Build A Wind Turbine", *A Centre for Alternative Technology Publication*, Powys, İngiltere, 1-54 (2004).
19. Gireas, J.F., Wang, R.J., Kamper, M.J., "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines", *Kluwer Academic Pub.*, New York, 79-116 (2004).
20. Aydın, M., "Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Disc Motors for Smooth Torque Traction Drive Applications", Doktora Tezi, *University of Wisconsin, Electrical and Computer Engineering*, Madison, 33-72 (2004).
21. Qu, R., Lipo, T.A., "Dual-Rotor, Radial-Flux, Toroidally-Wound, Permanent-Magnet Machines", *Industry Applications, IEEE Transactions*, 40 (3): 771-779 (2004).
22. Aydın, M., Huang, S., Lipo, T.A., "Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review", *In Conf. Record of SPEEDAM*, Capri-Italy, 61-71 (2004).
23. Parviainen, A., "Design of axial-flux permanent-magnet Low-speed machines and performance Comparison between radial-flux and Axial-flux machines", Doktora Tezi, *Lappeenranta University of Technology*, Finland, 28-29 (2005).

EKLER

EK-1 Stator ve rotor disklerinin yapılışı [18]

Stator

Stator kalıbı; alt ve üst kapaklar, orta kalıp ve ada olmak üzere 4 bölümden oluşur. Kalıbı dökülen stator orta kalıp ölçülerinde olacaktır. Resim 1.1’de, Stator kalıbı ve içerisinde de ada görülmektedir. Stator sargıları hazırlanıp bağlantıları yapıldıktan sonra bu kalıp içerisinde kalıp dökülerek stator elde edilir.



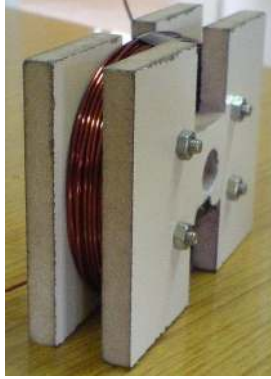
Resim 1.1. Stator orta kalıbı ve ada

Stator orta kalıbı ve ada, kalınlığı 13 mm olan bir kontrplaktan belirlenen ölçülerde kesilerek elde edilir. Epoksi tabaka döküldükten sonra kalıbın rahat şekilde çıkartılabilmesi için stator kalıplarının etrafına bal mumu yada cila sürülmelidir. Bu işlemlerden sonra stator sargılarını hazırlama işlemine başlanır.

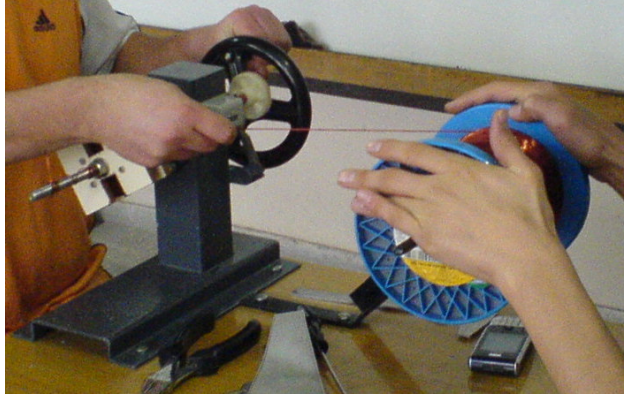
Stator sargıları, mıknatıs tarafından tam olarak halkalanacak şekilde yapılmalı ve tüm sargıların özellikleri birbirine yakın olmalıdır. Bu nedenle sargılar, hazırlanan bir makara üzerine, telin gerginliğinin sabit olmasına dikkat edilerek sarılmalıdır. Resim 1.2’de sargı makarası, Resim 1.3’de bir sargının sarılma işlemi görülmektedir. Sargıların sarıldığı sistemde bir numarator bulunmaktadır. Böylece sargıların sarım

EK-1 (Devam) Stator ve rotor disklerinin yapılışı

sayısı tam olarak bilinmektedir. Yine de emin olmak için sargılar tartılmıştır. Sargılar sarılırken sarım yönüne ve sargıların giriş çıkış uçlarına dikkat edilmelidir.



Resim 1.2. Sargı makarası ve sarılı bir sargı



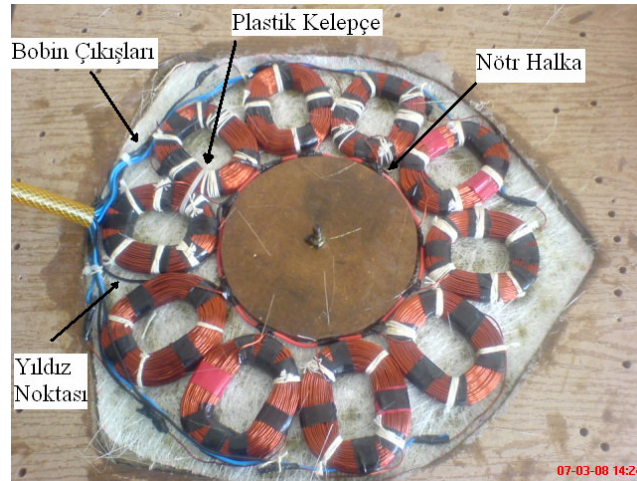
Resim 1.3. Tel gerginliğine dikkat edilerek bir sargının sarılma işlemi

Eşdeğer özellikte elde edilen 10 sargı, giriş uçları üstte olacak şekilde yıldız noktası amacıyla kullanılan nötr halkanın etrafına aynı yönlü olarak yerleştirilirler. Yıldız bağlantısını sağlayan halka şeklindeki yalıtkan kılıflı iletken üzerinde, sargıların konumlarına bağlı olarak yalıtkan kılıf soyulur. Sargıların giriş uçları, telin üst kısmındaki emaye soyulduktan sonra nötr halka üzerinde açılan kısımlara lehimlenir.

EK-1 (Devam) Stator ve rotor disklerinin yapılışı

Böylece sargıların yıldız bağlantısı sağlanır. Sargıların çıkış uçları ve yıldız noktasından alınan bir uç, bu uçlara bağlanan esnek iletken kablolar ile doğrultucuya bağlanmak ve ölçüm yapabilmek için kalıbın belirlenen bir noktasında Resim 1.4’de görüldüğü gibi toplanır.

Sargıların konumlarına dikkat edilmelidir. Sargıların konumlarını sabit tutmak için birbirlerine ve nötr halkaya plastik kelepçeler ile bağlanmıştır. Karşılıklı sargıların iç boşlukları arasındaki mesafe 208 mm olmalıdır. Böylelikle sargının biri, karşılıklı mıknatıs çiftlerinden birini tam olarak halkaladığında, bu sargının tam karşısındaki sargıda bir başka mıknatıs çiftini tam olarak halkalayacağından indüklenen gerilimler maksimum olacaktır.



Resim 1.4. Uçların dışarıya alınması ve sargıların sabitlenmesi

Stator sargıları hazırlandıktan sonra kalıp dökme işlemine başlanabilir. Reçinenin solvent buharını dağıtmak için bu işlem iyi havalandan bir yerde yapılmalıdır. Sargıların altına kalıbın sağlamlığını arttırmak için bir miktar fiberglas kağıt konulmalıdır. Öncelikle bir kap içerisinde 200 gr polyester reçine ile 3 cc katalizör,

EK-1 (Devam) Stator ve rotor disklerinin yapılışı

reçinenin rengi tamamen değişene kadar karıştırılır. Ardından vakit kaybetmeden kalıbın kenarlarına, sargı uçlarının çıkış noktasına, nötr halka ve sargı üzerine dökülür. Bu ince karışımın ardından aynı kap içerisinde bu kez 400 gr polyester, 400 gr talkım tozu ve 6 cc katalizör karıştırılır (Resim 1.5). Karıştırılırken fazla hava kabarcığının oluşmasından kaçınılmalıdır. Reçine ile talkım tozu tamamen birbirine karıştıktan sonra bu karışım, sargıların üzerine dökülür (Resim 1.6). Sargılar arasındaki hava kabarcıklarını çıkartmak ve sargıların arasına karışımın tamamen sızmasını sağlamak için sargıların konumları etkilenmeyecek şekilde kalıp sallanır. Sargıların üzerine tekrar bir parça fiberglas kağıt konularak fırça ile kağıdın reçineyi emmesi sağlanır (Resim 1.7). Bu işlemlerin ardından kalıbın üzerine üst kapak kapatılarak sıkıca vidalanır.



Resim 1.5. Epoksi karışımı

EK-1 (Devam) Stator ve rotor disklerinin yapılışı



Resim 1.6. Epoksinin kalıba dökülmesi



Resim 1.7. Epoksi döküldükten sonra statorun görünümü

EK-1 (Devam) Stator ve rotor disklerinin yapılışı

Kapaklar kapatıldıktan sonra kalıp sertleştirmeye bırakılır. Katalizör miktarı artırılarak kalıbın daha kısa sürede sertleşmesi sağlanabilir. Ancak böyle bir durumda da epoksinin dökülmesi hızlı şekilde yapılmalıdır. Stator kalıptan sökülürken dikkat edilmelidir. Reçine sertleşmeden önce ısınır ve bu ısının etkisiyle de kalıba yapışabilir. Böyle bir durumda kalıba hafifçe vurarak stator kalıptan çıkartılabilir.

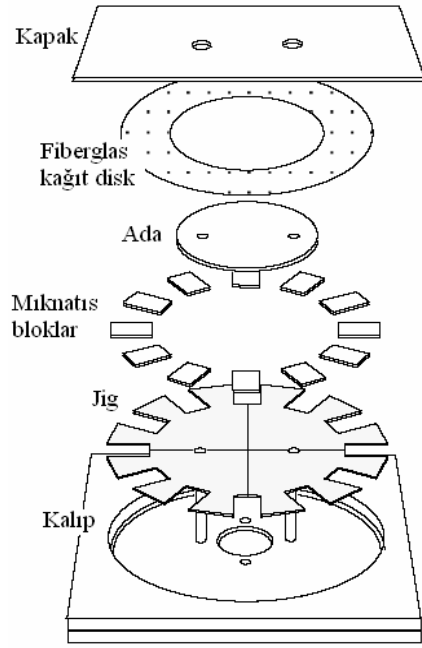
Rotor

Disk şeklindeki rotorları oluşturmak için de statora benzer şekilde kalıplar oluşturulur. Kalıp, alt ve üst kapaklar, iç kısmından 310 mm çapında bir daire kesilen orta kalıp ve 158 mm çapında adadan oluşur. Çelik, kalıba konulduktan sonra üzerine mıknatısları konumlandırmak için jig konulur. Jig, rotor disk çapında kesilen ince kontrplaktan daire şeklinde bir kalıptır. Jig üzerinde mıknatıs konumlarını tam olarak belirleyebilmek için mıknatıs ölçülerinde parçalar kesilir. 12 adet NdFeB mıknatıs jig üzerinde hazırlanan bu boşluklara, kutuplarına dikkat edilerek mıknatıslar sırayla yerleştirilir ve yapıştırılır. Bir mıknatıs jig üzerindeki boşluğa konulmadan önce dikkatli bir şekilde yanındaki mıknatısın üzerine, araya manyetik olmayan bir malzeme konularak yaklaştırılır. Mıknatıslar birbirlerini itiyorlarsa mıknatısın yönü doğrudur ve mıknatıs bu şekilde jig'in boşluğuna konularak yapıştırılır. Bu işlem tüm mıknatıslar için tekrarlanır.

Mıknatıslar çelik disk üzerine yapıştırıldıktan sonra jig çıkartılır ve kalıp dökme işlemine başlanır. Epoksi karışımını hazırlamadan önce diğer rotor bloğu içinde aynı işlemler yapılır. Üzerine yüzey yerleştirmeli olarak yapıştırılan mıknatıslara sahip çelik disk, kalıp içerisine konur. Ada, çelik üzerine tam konumlandırıldıktan sonra bunların üzerine diskin çapında kesilmiş fiberglas kağıt konulur (Şekil 1.1). Epoksi; 800 gr polyester reçine, 500 gr talkım tozu ile 12 cc katalizörden oluşur. Epoksi, mıknatısların üzerine dolana kadar dökülür. Statorda olduğu gibi hava kabarcığının

EK-1 (Devam) Stator ve rotor disklerinin yapılışı

kalmadığından emin olmak için kalıp biraz sarsılır. Aynı işlem diğer rotor bloğu içinde gerçekleştirildikten sonra kalıpların üzerine üst kapaklar sıkıca vidalanır. Kalıp, sertleşmek üzere düz bir zemin üzerinde beklemeye bırakılır.



Şekil 1.1. Rotor kalıbının parçaları [18]

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILDIRIZ, Emin
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 17.12.1981 Edirne
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (284) 224 68 14
e-mail : e_yildiriz@yahoo.com.

Eğitim

Derece

Lisans

Lise

Eğitim Birimi

Gazi Üniversitesi/Elektrik Bölümü

Edirne Teknik Lisesi

Mezuniyet Tarihi

2004

1999

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Seyahat etmek, Müzik dinlemek, Bilgisayar teknolojileri.