



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN ENİNE AKILI DİSK GENERATÖR
TASARIMI, BENZETİMİ VE OPTİMİZASYONU**

BURAK CAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK- ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR.ÜYESİ EMİN YILDIRIZ**

DÜZCE, 2019

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN ENİNE AKILI DİSK GENERATÖR
TASARIMI, BENZETİMİ VE OPTİMİZASYONU

Burak CAN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Emin YILDIRIZ

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Emin YILDIRIZ

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Emre ÇELİK

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Adem DALCALI

Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 09/08/2019

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

09 Ağustos 2019

Burak Can

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr.Öğr.Üyesi Emin Yıldırım'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve değerli arkadaşım Erhan Tuncel'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

09 Ağustos 2019

Burak CAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR.....	x
SİMGELER	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. AMAÇ VE KAPSAM	3
1.2. ENİNE AKILI MAKİNELER	4
1.3. SABİT MIKNATISLI MAKİNELERİN SINIFLANDIRILMASI	8
1.3.1. Doğrusal Makine	8
1.3.2. Dairesel Makine.....	8
1.3.2.1. Radyal Makine	8
1.3.2.2. Eksenel Akılı Makine.....	9
1.3.3. Enine Akılı Makine	9
1.3.4. Tek Taraflı Enine Akılı Makineler	11
1.3.4.1. Yüzey Yerleştirmeli U Nüveli	11
1.3.4.2. Yüzey Yerleştirmeli U Nüveli Köprülü	11
1.3.4.3. C Statorlu.....	11
1.3.4.4. Akı Yoğunluklu U Nüveli.....	12
1.3.4.5. Akı yoğunluklu U Nüveli Köprülü	13
1.3.5. Çift Taraflı Enine Akılı Makineler	13
1.3.5.1. Çift Taraflı Yüzey Yerleştirmeli U Nüveli	13
1.3.5.2. Çift Taraflı U,Z,E Akı Yoğunluklu.....	14
1.3.6. Peçce Sistemli Enine Akılı Makine.....	15
1.4. RADYAL, EKSENEL VE ENİNE AKILI MAKİNELERİN	
KARŞILAŞTIRILMASI.....	16
2. TASARLANAN DİSK MAKİNE.....	17
2.1. ÖN TASARIM.....	17
2.2. GEOMETRİK BOYUTLAR VE KISITLAR.....	19
2.3. KULLANILAN MALZEMELER	22
2.3.1. Mıknatıs Seçimi	22
2.3.2. Rotor ve Stator İçin Malzeme Seçimi.....	23
2.4. ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	24
3. ÖNERİLEN DİSK TİPİ EAM GENERATÖRÜNÜN	
BENZETİMİ.....	28

3.1. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	28
3.2. ÖNERİLEN EAM'NİN MANYETOSTATİK BENZETİMİ	30
3.3. BOYUT BELİRLEME VE AÇIK DEVRE ANALİZİ.....	34
3.4. VURUNTU TORKU İYİLEŞTİRME	37
3.5. EAM GENERATÖRDE REGÜLASYON VE GÜÇ ANALİZİ	42
4. SONUÇLAR.....	47
5. KAYNAKLAR.....	48
ÖZGEÇMİŞ	54



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Weh'in tasarladığı klasik enine akılı makine [11].	2
Şekil 1.2. Sabit mıknatıslı makine a) Doğrusal makine b) Radyal makine c) Eksenel makine [49].	9
Şekil 1.3. Klasik enine akılı makine.	10
Şekil 1.4. Yüzey yerleştirmeli U nüveli köprülü.	11
Şekil 1.5. Klasik iç rotorlu C stator modeli [54].	12
Şekil 1.6. Akı yoğunluklu EAM.	12
Şekil 1.7. Akı yoğunluklu u nüveli köprülü EAM.	13
Şekil 1.8. Çift taraflı yüzey yerleştirmeli EAM.	14
Şekil 1.9. Çift taraflı akı yoğunluklu EAM.	14
Şekil 1.10. Çift taraflı EAM a) E nüveli EAM [56] b) Z nüveli EAM [57].	15
Şekil 1.11. Pençe sistemli EAM.	15
Şekil 2.1. Önerilen 3 fazlı EAM.	19
Şekil 2.2. Tasarlanan makinenin tek fazı için verilen boyutlar.	20
Şekil 2.3. Tasarlanan generatörün üstten görünüşü.	22
Şekil 2.4. Üretilen mıknatısların değişimi [65].	23
Şekil 2.5. M36_26G malzemenin B-H eğrisi.	24
Şekil 2.6. Çelik malzemenin B-H eğrisi.	24
Şekil 2.7. Önerilen enine akılı generatörün 3 faz modeli.	25
Şekil 2.8. Rotor konumuna göre akı yolları.	25
Şekil 2.9. Manyetik eşdeğer devre.	26
Şekil 2.10. EAM'nin elektriksel eşdeğer devresi.	27
Şekil 2.11. EAM'nin fazör diyagramı.	27
Şekil 3.1. İmport etme.	32
Şekil 3.2. Sınır belirleme araçları.	32
Şekil 3.3. Akı yoğunluğu.	33
Şekil 3.4. Mesh çizimi.	33
Şekil 3.5. Farklı rotor iç yarıçaplarında back emf değerleri.	34
Şekil 3.6. İç yarıçapa göre zıt-emk gerilim dalga şekilleri.	35
Şekil 3.7. Rotor iç yarıçapı 55 mm ve 50 mm için zıt emk değerleri.	35
Şekil 3.8. Rotor iç yarıçapı 55 mm ve 50 mm b fazları için zıt emk değerleri.	36
Şekil 3.9. Rotor iç yarıçapı 50 mm.	36
Şekil 3.10. Toplam vuruş torkunun rotor iç yarıçapı ile değişimi.	38
Şekil 3.11. Mıknatıs kaydırma yöntemi a) kayk=0 b) kayk= α	39
Şekil 3.12. Rotor pozisyonu 0 derecedeki vuruş torki değerleri.	40
Şekil 3.13. Rotor pozisyonu 0 derecedeki toplam vuruş tork değeri.	40
Şekil 3.14. Farklı kaydırma açılarında vuruş torkları.	41
Şekil 3.15. Rotor pozisyonu 0,5 derecedeki toplam vuruş tork değeri.	41
Şekil 3.16. Rotor pozisyonu 1 derecedeki toplam vuruş tork değeri.	42
Şekil 3.17. Farklı açılarda vuruş torki sonuçları.	42
Şekil 3.18. External sekmesi.	43
Şekil 3.19. Edit external.	43

Şekil 3.20. Devre elemanı ekleme.	44
Şekil 3.21. Export etme sekmesi.....	44
Şekil 3.22. Akım değerleri.....	45
Şekil 3.23. Gerilim değerleri.....	45
Şekil 3.24. Generatörün farklı yükler için ürettiği gerilim.	45
Şekil 3.25. Generatörün farklı yükler için ürettiği güç.	46



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 1.1. Sabit mıknatıslı makinelerin sınıflandırılması.....	8
Çizelge 1.2. Akı yoğunluklarına göre sınıflandırma.....	10
Çizelge 2.1. Tasarlanan makinenin tek fazı için verilen boyut değerleri	21
Çizelge 2.2. Tasarlanan generatörün genel özellikleri.	21
Çizelge 3.1. İç yarıçapa göre 1 faz zıt emk THD'leri.....	37



KISALTMALAR

A	Amper
C1	Sargı genişliği
C2	Stator oluk boyu
Deg	Derece
d/dk	Devir/dakika
EAM	Enine akılı makine
EASMM	Enine akılı sabit mıknatıslı makine
EMK	Elektro motor kuvvet
Gb	Gigabyte
H1	Hava aralığı
Kc	Dolgunluk faktörü
Kh	Histeresiz kayıp katsayısı
MED	Manyetik eşdeğer devre
M1	Mıknatıs çapı
M2	Mıknatıs yüksekliği
m ³	Metre küp
Mm	Milimetre
Nm	Newtonmetre
R1	Rotorun derinliđi
R2	Rotorun genişliđi
R3	Rotorun yüksekliđi
Rin	Rotor iç yarıçapı
Rout	Rotor dış yarıçapı
S1	Statorun derinliđi
S2	Statorun genişliđi
S3	Statorun yüksekliđi
S4	Stator oluk genişliđi
SEY	Sonlu elemanlar yöntemi
TFM	Transverse flux machine
THD	Toplam harmonik bozulum
W	Watt

SİMGELER

°
°C Derece
Santigrat



ÖZET

RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN ENİNE AKILI DİSK GENERATÖR TASARIMI, BENZETİMİ VE OPTİMİZASYONU

Burak CAN

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Emin YILDIRIZ

Ağustos 2019, 53 sayfa

Enine akılı makineler (EAM); yapılan yeni topoloji önerileri ile birlikte, elektrikli araçlar ve doğrudan tahrikli rüzgâr türbinleri gibi düşük hız-yüksek tork uygulamalarında önemli bir seçenek haline gelmiştir. EAM'ler ile yüksek tork yoğunluğu kolaylıkla elde edilebilirken, en büyük sakıncaları güç faktörlerinin düşük olması ve vuru torkunun yüksek olmasıdır. Ancak son yıllarda geliştirilen yeni modeller ile kaçak akılar azaltılmıştır. Mıknatıs kullanım oranı da artırılarak önemli iyileştirmeler yapılmıştır. EAM'ler, radyal ve aksel akılı makineler ile rekabet edebilir seviyeye gelmiştir. Bu çalışma ile, ülkemizde daha önce akademik olarak üzerinde fazla durulmamış EAM'ler ile ilgili literatürde incelenen modelleri tanıtmak, üstünlük ve sakıncalarını açıklayarak bir farkındalık oluşturulmak amaçlanmıştır. EAM'ler yapılarına göre (tek taraflı ve çift taraflı) ve mıknatıs konumuna göre (yüzey yerleştirmeli, gömülü) sınıflandırması yapılmıştır. Geleneksel lineer ve dairesel(radyal,aksel) tipteki EAM'lerde, ağırlıklı olarak disk tipi olanlar veya disk tipi modeli geliştirilebilir olanlar dikkate alınmıştır. 250 W gücünde makine tasarımı için ANSYS Maxwell paket programı kullanılmıştır. Rotor iç yarıçapı 70 mm, 65 mm, 60 mm, 55mm ve 50 mm olan makineler incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan zıt emk analizleri sonucu indüklenen gerilimlerin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Zıt emk analizleri yapılan makinenin boyutunun tam olarak belirlenebilmesi için vuru torku analizi yapılmıştır ve rotor iç yarıçapı 55 mm olduğu durumunda vuru torkunun daha düşük olduğu görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda rotor iç yarıçapının 55 mm olmasına karar verilmiştir. Bu tezde yeni bir üç fazlı enine akılı disk generatör modeli tanıtılmıştır. Modelin çalışma prensibi ve elektriksel devre modeli açıklanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, önerilen generatör modelinin rotor iç yarıçapına göre zıt-emk kuvvetinin değişimi elde edilmiştir. Bir diğer elektromanyetik analiz olarak vuru torku incelenmiştir. Enine akılı makinelerin genel sakıncalarından olan vuru torku, 6 Nm'den 0,38 Nm'ye düşürülmüştür. Bunun için 3 fazlı disk model kullanılmış ve her disk yapısında 0,5° mıknatıs kaykısı uygulanmıştır.

Anahtar sözcükler: Enine akılı makine, Doğrudan tahrikli, Rüzgâr türbini, Disk tipi senkron generatör

ABSTRACT

DESIGN, SIMULATION AND OPTIMIZATION OF TRANSVERSE FLUX DISK GENERATOR FOR WIND TURBINES

Burak CAN

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical-Electronic
Engineer Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Emin YILDIRIZ

August 2019, 53 pages

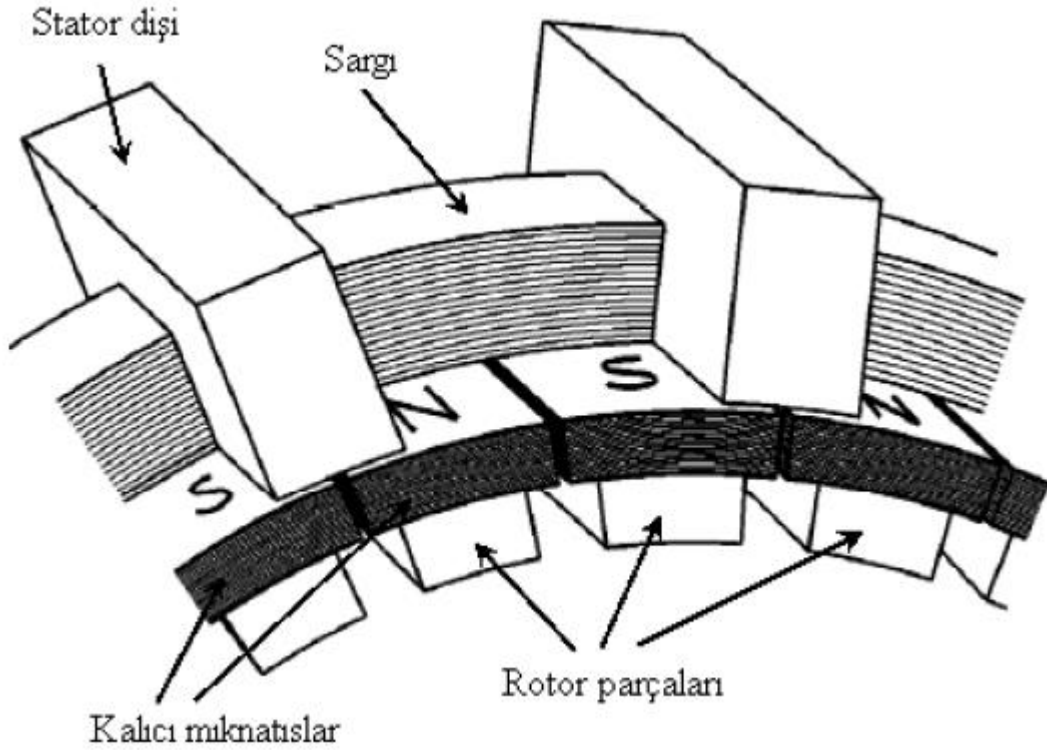
Transverse flux machines (TFM); along with the new topology recommendations made, it has become an important option in low speed-high torque applications such as electrical vehicles and direct drive wind turbines. High torque density can be easily obtained with TFMs but the biggest drawbacks are low power factors and high cogging torque. However, the new models developed have reduced the leakage in recent years. Significant improvements have been made by increasing the use of magnets. TFMs can compete with radial and axial flux machines. With this study it is aimed to introduce the models examined in the literature related with TFMs which have not been discussed academically in our country and to create an awareness by explaining their advantages and disadvantages. TFMs are classified according to their structure (single-sided and double-sided) and magnet position (surface-mounted, embedded). In conventional TFMs of linear and circular (radial, axial) type, predominantly disc type or disc type model can be developed. ANSYS Maxwell program was used for dimension analysis for 250 W machine design. Machines with inner radius of 70 mm, 65 mm, 60 mm, 55 mm and 50 mm were examined. As a result of back emf analysis, the induced voltages were close to each other. Cogging torque analysis was performed to determine the exact size of the machine and when the rotor had an internal radius of 55 mm, the cogging torque was lower. As a result of the analysis, it was decided that the inner radius of the rotor should be 55 mm. In this thesis, a novel three phase transverse flux disc generator model is introduced. The working principle of the model and the electrical circuit model are explained. Using the finite element method, the back-emf force change was obtained according to the rotor inner radius of the proposed generator model. As another electromagnetic analysis, cogging torque was examined. The cogging torque one of the general drawbacks of transverse flux machines, it was reduced from 6 Nm to 0,38 Nm. To achieve this a three phase disc model was used and $0,5^\circ$ magnet skewing was applied to each disc structure.

Keywords: Transverse flux machine, Direct drive, Wind turbine, Disk type synchronous generator

1. GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde enerji tüketimi elektrik enerjisi üzerinden olmaktadır. Elektrik enerjisi üretiminde ise daha çok fosil yakıtlar kullanılmaktadır ve ülkemiz elektrik üretimini yeterli düzeyde karşılayabilmek için dışarıdan doğal gaz ithal etmektedir. Bu da ülkemizin ekonomik olarak dışa bağımlılığını ve yüksek maliyetlere enerji elde etmesine sebep olmaktadır. Ülkemizin bu ekonomik bağımlılıktan kurtulabilmesi için yeni ve daha verimli enerji araçları üretmesi ve geliştirmesi son derece önemlidir. Temiz ve yenilenebilir enerjinin önemi burada ortaya çıkmaktadır. Hidroelektrik santrallerin çevreye verdiği zarardan ve yöre halkının buna karşı çıkmasından dolayı daha farklı yenilenebilir enerji alanına dönülmesi zorunlu olmuştur. Bu noktada devreye rüzgâr enerjisi girmektedir. Rüzgâr enerjisinin zararı neredeyse yok denecek kadar azdır. Ancak ülkemizde rüzgâr enerji potansiyeli her yerde eşit ve yeterli seviyede değildir. Bu sebepten ötürü rüzgâr enerjisinde kullanılan generatörlerin en verimli, en az maliyetli ve ihtiyaca göre en uygun generatörlerin üretilip geliştirilmesi gerekmektedir. Sabit mıknatıslı makineler rüzgâr türbinlerinde sıkça kullanılmaktadır ve bu makinelerden biri olan enine akılı makineler düşük ve orta hız uygulamalarında daha çok tercih edilmektedir [1]. Yine sabit mıknatıslı makinelerden olan aksel akılı makinelerde orta hızlı uygulamalarda kullanılmaktadır [2]. Günümüzde baktığımız zaman bazı toprak elementlerinin kullanımının artması ve geliştirilmesiyle birlikte mıknatısların daha verimli üretilmesi olanağı doğmuştur ve böylece sabit mıknatıslı generatörlere geçiş hızlanmıştır. Neodim mıknatısların 1980’li yıllarda ortaya çıkmasıyla sabit mıknatıslı makinelere olan ilgide büyük bir hızlanma görülmüştür [3]. Sabit mıknatıslı makinelerin gelişmesinde yüksek güç yoğunluklarına sahip olması, düşük vuruş torku, yüksek tork gibi sonuçlar etkili olmuştur [4]-[6]. Sabit mıknatıslı senkron generatörler sincap kafesli asenkron generatör ve dışarıdan uyartımlı senkron generatörlerle kıyaslandığı zaman sabit mıknatıslı makinelerin verimlilik, güvenilirlik ve kararlılık gibi üstünlükleri olduğu görülür [7], [8]. Sabit mıknatıslı makine olan enine akılı makineler doğrudan tahrikli uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlardan biri olan rüzgâr türbinlerinde kulenin ağırlığını azaltmak için enine akılı senkron generatörün hafif olması gerekmektedir. Aynı zamanda bu generatörlerin küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde

kullanılması onların yüksek verimli, kararlı ve yüksek güç yoğunluklarının olmasından ileri gelmektedir. Ayrıca enine akılı makinelerin özelliklerinin gelişmesi ve maliyetlerinin düşmesi bu makinelerin daha çok ilgi çekmesine ve geliştirilmesine olanak sağlamaktadır [9], [10]. Enine akılı sabit mıknatıslı makinelere baktığımız zaman ilk olarak Weh ile birlikte literatüre girmiştir. Weh tasarlamış olduğu makineyi rüzgâr türbinlerine uyarlayıp tasarım kriterlerini belirlemiştir. Şekil 1.1’de Weh’in tasarladığı makine olan enine akılı makinenin en temel hali gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Weh’in tasarladığı klasik enine akılı makine [11].

Weh’in tasarlamış olduğu makineye baktığımız zaman karşılıklı yerleştirilmiş zıt kutuplu mıknatısların olduğu gözükmektedir. Rotor tek parçadan oluşmaz, segmentlerden oluşur. Segmentli parçaların bir bütün haline getirilmesi zor olduğundan üretimde yaşanan zorluk bu modelin önemli sakıncalarından biridir. Sargılar ise statordaki nüvelerin arasına sarılmıştır. Rotor hareket ettikçe stator sarım akımları ile rotor akımları arasında manyetik alan oluşur ve bu manyetik alan sonucu makine hareket eder.

1.1. AMAÇ VE KAPSAM

Dünyada insanoğlunun olmazsa olmazlarından olan enerji eski çağlardan günümüze kadar önemini korumuştur. Ateşle başlayan bu yolculuk elektrik enerjisi ile devam etmektedir. Elektrik enerjisi elde edebilmek amacıyla hidroelektrik santraller, rüzgâr türbinleri, solar sistemler gibi sistemlerin yanında fosil kaynaklı diğer enerji elde etme yöntemleri de uygulanmaktadır. Dünyamızda gittikçe artan hava kirliliği, buzulların erimesi insanların daha temiz bir enerji elde etmesini zorunlu kılmıştır. Bu tezde 3 fazlı özgül enine akılı disk şeklinde bir makine geliştirilmiştir. Enine akılı makinelerde vuruğu torku kaçınılmazdır. Geliştirilen enine akılı disk makinenin vuruğu torkunun rotor iç yarıçapı ile ve mıknatıs kaykısıyla değişimi gözlemlenmiş ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen bu makine rüzgâr türbinleri ve elektrikli araçlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır.

Bu tez hazırlanırken makinenin çıkış gücü 250 W olarak belirlenmiştir. EN 15194 Avrupa standartlarında pedal destekli elektrikli bisikletlerin özellikleri belirlenmiştir. Buna göre bir aracın bu sınıfa girebilmesi için motor nominal gücü en fazla 250 Watt olmalıdır. 250 W gücünde olan makinenin boyutunun küçük olmasına dikkat edilmiştir. Bu sayede hacimden tasarruf edilmesi amaçlanmıştır. Aynı zamanda incelenen farklı rotor iç yarıçaplarında gerilim değerlerini yüksek tutmak ve ihtiyacımız olan çıkış gücüne ulaşabilmek hedeflenmiştir.

Makinenin boyutlarının belirlenmesi için indüklenen gerilimlerin ölçülmesi gerekmektedir. Farklı rotor iç yarıçaplarındaki zıt emk analizleri yapılmıştır. Değerlerin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Daha sonra ise vuruğu torku değerlerine bakılmıştır. Amacımız en düşük vuruğu torkunu elde etmektir. Enine akılı makinelerde muhakkak bir problem olarak karşımıza çıkan vuruğu torku istenmeyen bir kuvvettir ve olabildiğince minimize edilmesi gerekmektedir. Bu tezde, disk tipi bir 3 fazlı enine akılı makinede vuruğu torkunu azaltmak için mıknatıs kaykı yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem sayesinde vuruğu torku 6 Nm'den 0.38 Nm'ye düşürülmüştür. Manyetik akı yolları 3 boyutlu olduğundan tüm analizler 3 boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Mesh hassasiyetini arttırmak için, modelin simetrik 1/6'lık parçasında analizler yapılmıştır.

1.2. ENİNE AKILI MAKİNELER

Enine akılı makinelere baktığımız zaman bundan yaklaşık olarak 150 yıl öncesine kadar gelişimi mevcuttur [12], [13]. Literatüre baktığımız zaman enine akılı birçok makine üzerinde çalışmalar olmuştur. Sabit mıknatıslı makineler verimlilik, güvenilirlik ve kararlılık gibi üstünlükleri vardır. Doğrudan tahrikli uygulamalarda kullanılmak için oldukça avantajlıdır. Enine akılı makineler birçok tasarıma olanak sağlarlar. Enine akılı makineler düşük hızlı uygulamalara uygun olduğu için tercih edilirler. Rüzgâr türbinlerinde dişli sistem kullanılmasını gerektirmezler [14]-[16]. Enine akılı makineler kullanım alanı olarak elektrikli araçlar, rüzgâr türbinleri, robotik kontrol, gemi itiş-çekiş sistemleri, trenler, römorklar gibi sistemlerde güç kaynağı olarak kullanılabilir [17]-[19]. Yüksek tork elde etmek için elverişlidirler [20]. Küçük boyutta olup yüksek güç yoğunluklarına sahip olmalarından dolayı da tercih edilirler [21], [22]. Yüksek hızda dönme sonucu rotor kısmı zarar görebilir bu yüzden tasarımın dikkatli yapılması gerekmektedir. Enine akılı makinelerde vuruş torku önemli bir sorun olduğu için de tasarımın çok iyi yapılması gerekmektedir. Enine akılı makineler yüksek hızlarda ısınmalar yaşanıp makineye zarar verebilir bu sebepten soğutma işlemi yapılmalı veya makine sacları hava girişine izin vermelidir. Enine akılı makinenin performansını test etmek için yüzey yerleştirmeli tek taraflı dıştan rotorlu bir makine rüzgâr türbinlerinde kullanılabilir [23]. Rüzgâr türbinlerinde sıklıkla kullanılan enine akılı makinenin çıkış harmoniklerinin azaltılması ve generatörün kendinden uyarılması için dairesel NdFeB mıknatıslar kullanımı uygundur [24]. Rüzgâr türbinlerinde ve küçük güçlerde sıklıkla kullanılan enine akılı makineler büyük güçlü doğrudan tahrikli uygulamalar için de kullanılabilir [25], [26]. Sabit mıknatıslar sayesinde dışarıdan herhangi bir döndürme koluna gereksinim duymadan kendinden uyarılır. Enine akılı makineler disk şeklinde tasarlandığı zaman rüzgâr türbinlerinde düşük hız-yüksek tork uygulamalarında yararlı olurlar [27]. Enine akılı makinelere baktığımız zaman küçük boyutlarda olup çok kutuplu makineler olabilirler. Bu sebepten ötürü düşük rüzgâr hızlı uygulamalarında dişli sisteme ihtiyaç kalmadan kullanıma olanak sağladığından tercih edilebilirler [28]-[30].

Bu kapsamda aşağıda yazarların yapmış olduğu manyetik eşdeğer devre yöntemiyle sonlu elemanlar yöntemini karşılaştırma, sabit mıknatıslı makinelerin motor/generatörün tork, güç yoğunlukları ve vuruş torkunu azaltma teknikleri hakkında yapmış oldukları bazı araştırmalar kısaca özetlenmiştir.

Mignot ve arkadaşları elektrikli araçlar ve doğrudan tahrikli uygulamalar için manyetik eşitlik devresi geliştirmişlerdir. Bu manyetik eşitlik devresine göre analitik modellemeyi gerçekleştirmişlerdir. Sabit mıknatıslı makine olan enine-eksenel akılı makinenin manyetik eşdeğer devre ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçları karşılaştırmış ve uyumlu olduğunu söylemişlerdir [31].

Reza ve arkadaşları enine akılı sabit mıknatıslı makinelerin (EASMM) üç boyutlu yapıları sebebiyle bu makinelerin tasarım ve analizleri uzun zaman almakta olduğunu söylemişlerdir. Bu çalışmada yazarlar enine akılı makinenin boyutlandırılması için bir formül geliştirmişlerdir. Makine performansını değerlendirmek için formüle ettikleri 3 boyutlu manyetik eşdeğer devre (MED) yöntemini kullanmışlardır. Bu formüle göre tasarımın ve analizlerin daha kısa süreceğini söylemişlerdir. Manyetik eşdeğer devre ve sonlu elemanlar yöntemi ile makinenin zıt emk ve vuru tork değerleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucuna göre MED ile SEY arasında uyum olduğunu göstermişlerdir [32].

Ifektar ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarında sonlu elemanlar analizine alternatif olacak bir manyetik eşdeğer devre yöntemi kullanmışlardır. Enine akılı çift taraflı ve akı yoğunluklu makinenin manyetik eşdeğer devre analizi ile sonlu elemanlar yöntemi analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Manyetik eşdeğer devre analizi, sonlu elemanlar yöntemine göre daha kısa zamanda gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Bu da zamandan tasarruf sağlamıştır. Analiz sonucuna göre MED, %50 daha kısa sürede analizi bitirmiştir. MED sonucu ile sonlu elemanlar analiz sonucu %5 'ten daha az hata ile uyum içinde olduklarını söylemişlerdir [33].

Bastawade ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarında enine akılı makinelerde görülen düşük güç faktörü, sıkça karşılaşılan yüksek sızıntı ve yapısal zorluklara karşı çözüm için bir araştırma yapmışlardır. Önerilen makinede rotor üzerinde aynı alan akısına stator üzerinde ise farklı sargı düzenlemesine sahip olduğunda sızıntının azalacağını ve böylece daha iyi sonuçlar vereceğini söylemişlerdir. Literatürde karşılaşılan düşük güç faktörü, yüksek sızıntı gibi problemlere karşı önermiş oldukları çözüm, manyetik eşdeğer devre yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Her iki yöntem ile yapılan analizlerin uyumlu sonuçlar verdiğini söylemişlerdir [34].

Manyetik eşdeğer devre ve sonlu elemanlar yöntemi karşılaştırıldığı zaman görülüyor ki bu iki yöntem birbiriyle uyum içerisindedir. Hatta manyetik eşdeğer devre yöntemi sonlu elemanlar yöntemine göre zamansal olarak daha avantajlıdır.

Sabit mıknatıslı makinelerin sahip olduğu tork yoğunluğu, güç yoğunluğu ve ısınmalar ile ilgili bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Pippuri ve arkadaşları radyal, aksel ve enine akılı makinelerin motor güç yoğunluklarını araştırmışlardır. Test düzeneğinde 10 kW-200 d/dk'lık bir motoru test edip 20 kutuplu radyal makinenin aksel ve enine akılı makineye göre daha iyi tork değerleri sunduğunu söylemişlerdir [35].

Hadi Bendib ve arkadaşları sabit mıknatıslı senkron motorun yüksek tork yoğunluğu elde edebilmesi için hibrit enine aksel akılı yeni bir motor analizi yapmışlardır. Sonlu elemanlar analizi ile manyetik alan, vuru torki ve tork değerlerine farklı mıknatıs açılarında bakmışlardır. Bu yeni yapı sayesinde enine aksel akılı makinenin elde edeceği tork değerinin yüksek olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca motorun araç çekiş sistemleri için uygun olduğuna değinmişlerdir [36].

Barranco ve arkadaşları enine akılı disk şeklinde bir generatörü yüksek tork yoğunluk elde edebilmesi amacıyla rüzgâr türbinleri için tasarlamışlardır. Tasarımı biten generatörü sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edip rüzgâr türbinlerinde 10 MW'lık bir güç için optimize etmişlerdir [37].

Jia ve arkadaşları rüzgâr enerji üretiminin düşük olduğu yerler için ve generatörün tork yoğunluğunun artırılması amacıyla statoru çember biçiminde olan yeni bir enine akılı disk generatör önermişlerdir. Generatörün sahip olduğu akı yoğunluğu, vuru torki, emk(elektro motor kuvvet) ve sargı endüktansını hesaplamak için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Yazarlar analizler sonucu üretmiş oldukları enine akılı generatörü simülasyon sonuçları ile karşılaştırmışlardır ve sonuçların uyumlu olduğunu söylemişlerdir [38].

Kou ve arkadaşları düşük hızlı ve yüksek tork içeren doğrudan tahrikli uygulamalar için dıştan rotorlu enine akılı yeni bir motorun analizini ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Tasarımını yaptıkları yeni makinenin düşük hızlı ve yüksek torklu uygulamalar için kullanımının faydalı olduğundan bahsetmişlerdir [39].

Li ve arkadaşları rüzgâr türbinlerinde kullanılmak üzere tasarlanan sabit mıknatıslı senkron generatörün sahip olacağı yüksek güç yoğunluğundan ve hızlı dönmesinden ötürü ısınmalar olacağından bahsetmiştir [40].

Yukarıda enine akılı makinelerin kullanım yerleri, kullanılan analiz yöntemleri, sahip olunan tork yoğunlukları ve bazı problemlerin çözümüne dair açıklamalar yapılmıştır. Asıl problem olan vuru torki ise enine akılı makinelerin öncelikli olarak çözüme kavuşturulması gereken bir problemdir.

Enine akılı makinelerde vuruñtu torku kaçınılmazdır ve bu istenmeyen kuvvetin azaltılması son derece önemli ve gereklidir. Bu kapsamda literatürde vuruñtu torkunu azaltma adına yapılmış olan bazı çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Ueda ve arkadaşları vuruñtu torkunu azaltmak için önermiş oldukları enine akılı makinelerinde endüvi sargılarının radyal olarak kaydırılmasını incelemişlerdir ve vuruñtu torkunun seviyesinde ciddi düşüşler olduğunu kaydetmişlerdir [41].

Ueda ve arkadaşları yine enine akılı makinelerde vuruñtu torkunu azaltmak için farklı bir yöntem olan stator kutuplarını farklı pozisyonda yerleştirerek bir çözüme gitmişlerdir. Ve yaptıkları çalışmaya göre vuruñtu değerinin tepeden tepeye %82 azaldığını söylemişlerdir [42].

Aydın enine akılı sabit mıknatıslı makineler için vuruñtu torkunu azaltma yöntemlerini kısaca özetlemiştir ve vuruñtu torkunu azaltma yöntemlerinden biri olan mıknatıs kaydırma yöntemini detaylı olarak incelemiştir [43].

Liu ve arkadaşları sabit mıknatıslı enine akılı makine için mıknatısları kaydırma yöntemini ve farklı stator genişlikleri kullanarak vuruñtu torkunu düşürmeye çalışmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemiyle vuruñtu torku değerinin ölçüldüğü ve vuruñtu torkunun düştüğü bu çalışmada bildirilmiştir [44].

Noorozi ve arkadaşları küçük rüzgâr türbinleri için sabit mıknatıslı rotoru disk şeklinde enine akılı bir makine önermişlerdir. Enine akılı makinelerde vuruñtu torku kaçınılmaz olduğundan ve bu vuruñtuyu en aza indirmek adına rotor kısmını dökme demirden yapmışlardır. Bu sayede rotor üzerindeki mıknatıslar daha güvenli bir şekilde durduğunu ifade etmişlerdir. Bu yöntem sonucu vuruñtu torkunun azaldığını çalışmalarına eklemişlerdir [45].

Dobzhanskyi ve arkadaşları enine akılı makinelerde vuruñtu torkunu azaltmak için farklı bir teknik olan manyetik köprü kullanmayı test etmişlerdir. Manyetik köprünün önemini anlamak amacıyla iki farklı çalışma olan manyetik köprülü ve manyetik köprüsüz tipteki çalışmayı laboratuvarında tasarlayıp test etmişlerdir. Manyetik köprü kullanmadan ve kullanarak yaptıkları test sonucunda manyetik köprüsüz analiz sonuçlarının manyetik köprülü analiz sonucuna göre stator göbeklerinde akı sızıntısı ve vuruñtu torku dalgalanmasının fazla olduğu bazı dezavantajları yazarlar tarafından bildirilmiştir. Manyetik köprülü yapının diğerine göre dezavantajı ise manyetik köprü kullanımından ötürü daha ağır olduğunu ifade etmişlerdir [46].

Levin ve arkadaşları enine akılı makinelerde vuruñtu torkunu azaltmak amacıyla farklı yöntemler denemiştir ve bu yöntemler sayesinde vuruñtu torkunun düştüğünü ifade

etmişlerdir. Bu yöntemler; stator yuvalarının kaydırılması ayrıca rotor dişleri üzerine ve mıknatısları arasına eşit mesafede stator yuvaları açmak olduğunu söylemişlerdir [47]. Bu tezde 3 fazlı özgün enine akılı disk şeklinde bir makine tasarlanmıştır. Enine akılı makinelerde vuruş torku kaçınılmazdır. Tasarlanan enine akılı disk makinenin vuruş torkunun rotor iç yarıçapı ile ve mıknatıs kaykısıyla değişimi gözlemlenmiş ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

1.3. SABİT MIKNATISLI MAKİNELERİN SINIFLANDIRILMASI

Enine akılı makineleri hareket yönüne ve hava aralığını geçen manyetik akının yönüne göre Çizelge 1.1 ve Çizelge 1.2'deki gibi sınıflandırabiliriz.

Çizelge 1.1. Sabit mıknatıslı makinelerin sınıflandırılması.

SABİT MIKNATISLI MAKİNELER			
DOĞRUSAL	DAİRESEL		ENİNE
	RADYAL	EKSENEL	

1.3.1. Doğrusal Makine

Doğrusal bir düzlemde hareket sağlanan doğrusal makinelere bir örnek Şekil 1.2 (a)'da verilmiştir. Doğrusal servo sistemlerden, çok hızlı tepki vermesi, yüksek kuvvet yoğunluğu, esnek çalışma vb. özellikler istenir. Bu gereksinimleri karşılamak amacıyla çalışma şekli olarak doğrusal hareket eden makine tasarlanmıştır ve bu makinenin yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Literatürde önerilen pek çok enine akılı makine topolojisi, doğrusal yönde hareket sağlayacak şekilde tasarlanabilir.

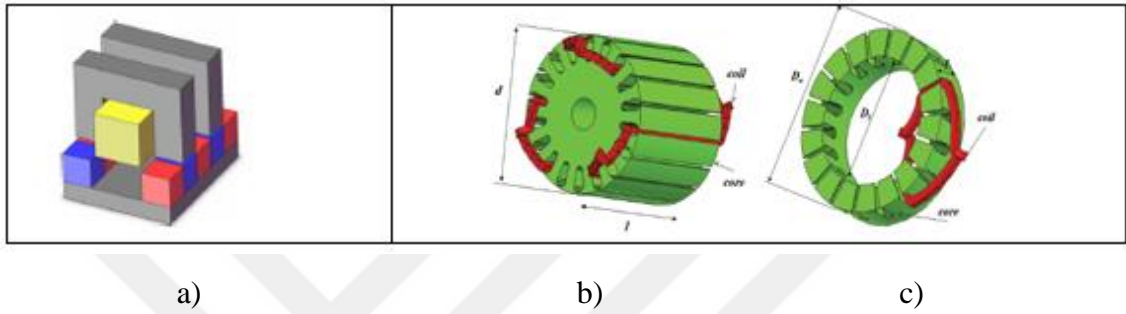
1.3.2. Dairesel Makine

Dairesel makineler akı hareket yönüne göre radyal veya eksenel olarak sınıflandırılır.

1.3.2.1. Radyal Makine

Radyal makineler sabit mıknatıslı makine içerisinde en yaygın olarak kullanılan sabit

mıknatıslı senkron makinelerdir. Hareketli rotor kısmı içeride olabileceği gibi rotoru dışarıda olan radyal makineler de vardır [48]. En geniş kullanım yeri olarak; rüzgâr güç sistemleri, gemi itiş gücü, robotik, çekiş gücü gösterilebilir. Şekil 1.2 (b)'de tipik bir radyal akılı makine gösterilmektedir. Endüvi akımı aksenal yönde ilerlerken, manyetik akı yolu ise radyal olarak yol alır. Radyal akılı sabit mıknatıslı makinelerin statoru geleneksel alternatif akımlı makinelere benzerler. Bu da onu daha kolay üretilebilen ve iyi kanıtlanmış bir ürünün parçası haline getirir.



Şekil 1.2. Sabit mıknatıslı makine a) Doğrusal makine b) Radyal makine c) Aksenal makine [49].

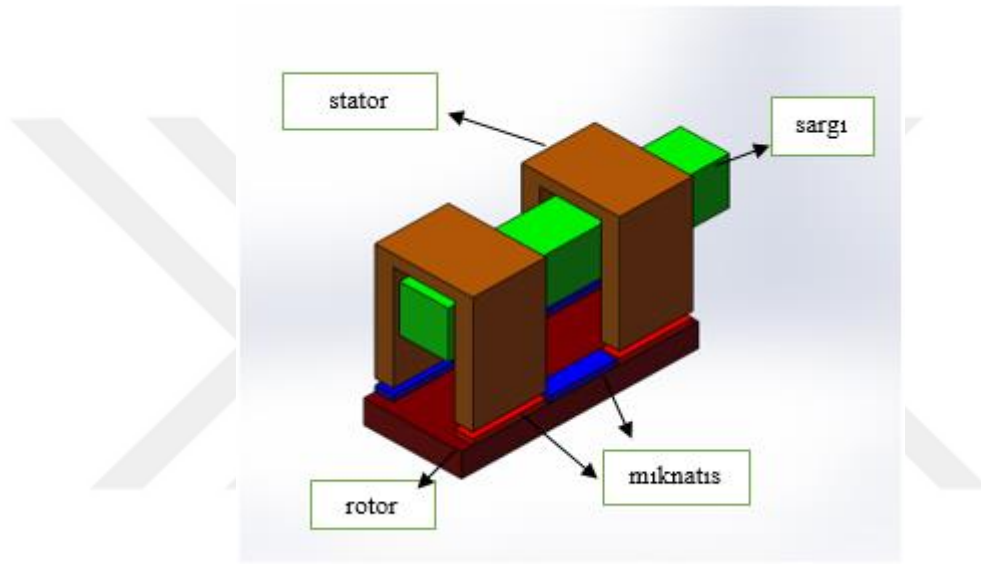
1.3.2.2. Aksenal Akılı Makine

Şekil 1.2 (c)'de ise aksenal akılı makinenin stator yapısı gösterilmiştir. Akı çizgileri hava boşluğunu aksenal yönde geçerken, sargılar radyal olarak düzenlenir. Şekilde görülebileceği gibi, bu topolojiye sahip makine, radyal akılı makinelere kıyasla daha büyük bir çap-aktif uzunluk oranına sahiptir. Eksen iki diskten oluşur: sabit mıknatıslı rotor disk ve diğeri de üç faz endüvi sargılarını taşıyan stator diskidir. Bu tip makineler, çekiş ve servo uygulamalarında, dağıtılmış üretim ve tahrik sistemlerinde kullanılır [50]. Doğrudan tahrikli rüzgâr türbin generatörü için TORUS tipi aksenal akılı makine tarafından önerilmiş ve büyük ilgi görmüştür [51]. Yıldırım ve Aydemir küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde kullanılmak üzere 12 kutuplu yüzey yerleştirmeli iki rotor ve nüvesiz tek statorlu aksenal akılı bir makinenin sargılarında indüklenen gerilimleri farklı hızlar ve yükler için sonlu elemanlar analizi ile incelemişlerdir [52].

1.3.3. Enine Akılı Makine

Son zamanlarda güç elektroniği ve sabit mıknatıslı makine teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte sabit mıknatıslı makinelerde yeni fikirler ve tasarımlar ortaya çıkmıştır. Enine aksenal akılı makineler yüksek tork/kütle oranına sahiptir. Doğrudan tahrikli

uygulamalarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu makineler yapıları itibariyle esnek olarak birçok tasarıma uygundur. Her makinede olduğu gibi bu makinenin de bazı olumsuzlukları mevcuttur. Birçok parçasından ötürü bu parçaların tutulması için harici bir aparata ihtiyaç vardır. Rotor üzerine yerleştirilen sabit mıknatıslardan ötürü kaçak akılar mevcuttur. Rotordaki mıknatıslar ve stator dişlerindeki çekimden kaynaklanan relüktans kuvvetinden ötürü istenmeyen vuruş torkuna sebep olurlar. Rüzgâr türbinlerinde normalde dişli sistemler kullanılır ama bu makine sayesinde dişli sisteme ihtiyaç duyulmaz. Şekil 1.3’de klasik enine akılı makine gösterilmektedir. Muljadi ve arkadaşları aksenal hava boşluklu EAM modelini önermişlerdir [53].



Şekil 1.3. Klasik enine akılı makine.

Çizelge 1.2. Akı yoğunluklarına göre sınıflandırma.

	TEK TARAFLI	ÇİFT TARAFLI	PENÇE
YÜZEY	U NÜVE U NÜVE KÖPRÜLÜ C STATORLU	U NÜVE	
AKI	U NÜVE U NÜVE KÖPRÜLÜ	U NÜVE Z NÜVE E NÜVE	

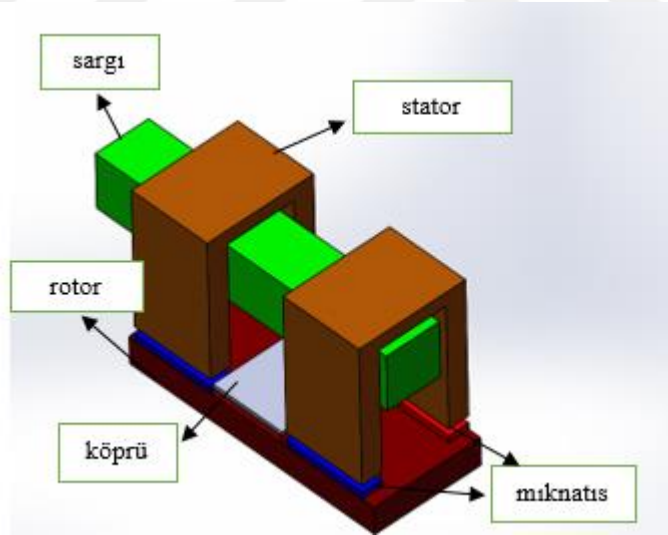
1.3.4. Tek Taraflı Enine Akılı Makineler

1.3.4.1. Yüzey Yerleştirmeli U Nüveli

Yüzey yerleştirmeli enine akılı makinede, tek parçadan oluşan rotor nüvesi üzerine ardışık olarak N ve S kutuplu sürekli mıknatıslar belirli bir aralıkta yapıştırılır. Stator üzerinde; mıknatısların akısına yol oluşturmak için U şeklinde ferromanyetik nüveler ve bu nüvelerin içine sarılmış endüvi faz sargıları bulunur. Bu çalışma mantığı doğrusal, aksenel ve radyal yapılar için de uygulanabilir.

1.3.4.2. Yüzey Yerleştirmeli U Nüveli Köprülü

Şekil 1.4’de görüldüğü gibi, yüzey yerleştirmeli bir enine akılı makinede, stator nüveleri ile tam hizalanmış olan mıknatısların dışında kalan mıknatıslara bir akı yolu sağlamak için manyetik köprüler kullanılır. Böylece mıknatıs kullanım oranı artarak enine akılı makinenin güç faktörü iyileştirilir. Eklenen I nüve ile birlikte toplam verim artar ancak makinenin ağırlığını arttırmaları ve iletken için ayrılmış olan hacmi sınırlandırmaları, köprülerin olumsuz tarafıdır.

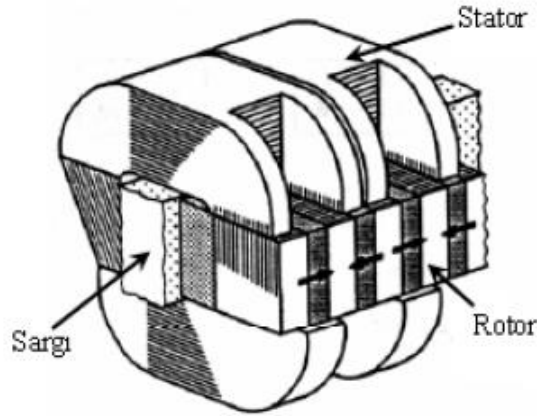


Şekil 1.4. Yüzey yerleştirmeli U nüveli köprülü.

1.3.4.3. C Statorlu

Klasik iç rotorlu makinelere bir diğeri olarak Weh’in tasarladığı C statorlu makinedir. Bu makinede Weh tek bir stator kullanmıştır ve rotorun gövdesini 3 taraftan sarmıştır. Bu yapıda köprülere gerek kalmadan bir tasarım gerçekleştirmiştir. Bu yapının olumsuz yönü olarak rotor gövdesini statora bakan iki taraftaki hava aralıkları makine boyunca eşit

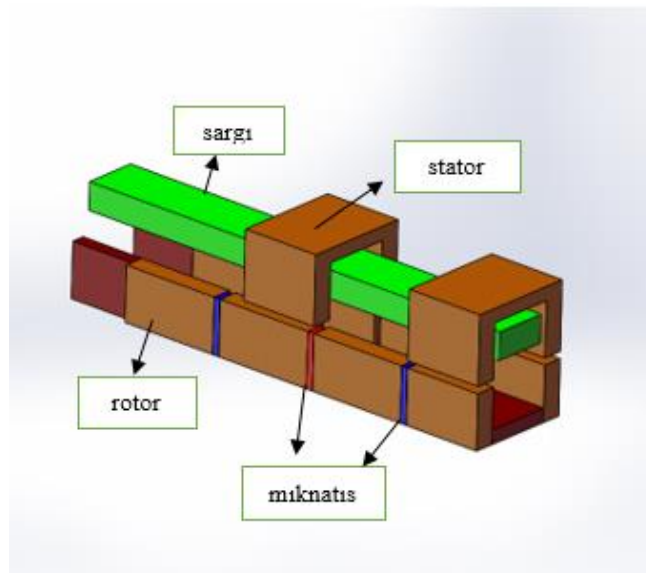
kalacak şekilde yataklama yapmasıdır. Şekil 1.5'te Weh'in tasarlamış olduğu makine gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Klasik iç rotorlu C stator modeli [54].

1.3.4.4. Akı Yoğunluklu U Nüveli

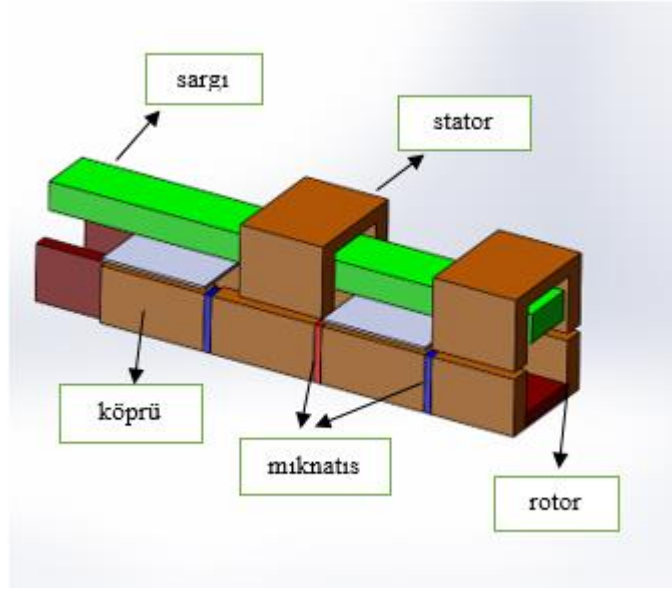
Bu konfigürasyon, kutup çifti başına tek U-şekilli stator nüvesinden oluşur ve stator oluklarında sargılar bulunur. Miknatıslar rotor göbeğinde gömülüdür. Her bir miknatıs ana stator akılarına katkıda bulunduğu için bu tür makinelerin çıkış gücü daha da artırılabilir. Oldukça artan karmaşıklık ve nispeten gevşek mekanik bir yapı bu topolojinin ana dezavantajlarıdır. Şekil 1.6'da akı yoğunluklu EAM'deki miknatıs yerleşimi ve farklı konfigürasyonlara uygulamaları gösterilmektedir. Çift taraflı akı yoğunluklu EAM'de stator nüveleri içerisindeki endüvi sargıları aynı faza aittir ve bu sargılarda 120° faz farklı gerilimler indüklenir.



Şekil 1.6. Akı yoğunluklu EAM.

1.3.4.5. Akı yoğunluklu U Nüveli Köprülü

Bu konfigürasyon, kutup çifti başına tek U-şekilli stator nüvesinden oluşur ve stator oluklarında sargılar bulunur. Çalışma şekli ve yapısı itibariyle akı yoğunluklu köprüsüz U nüveli modele benzemektedir. Mıknatıslar yine aynı şekilde rotor göbeğinde gömülüdür. Bu yapıda vuruğu torkunu azaltmak için boşta kalan karşılıklı mıknatıslara manyetik köprüler kullanılır. Şekil 1.7’de akı yoğunluklu U nüveli köprülü EAM gösterilmektedir.

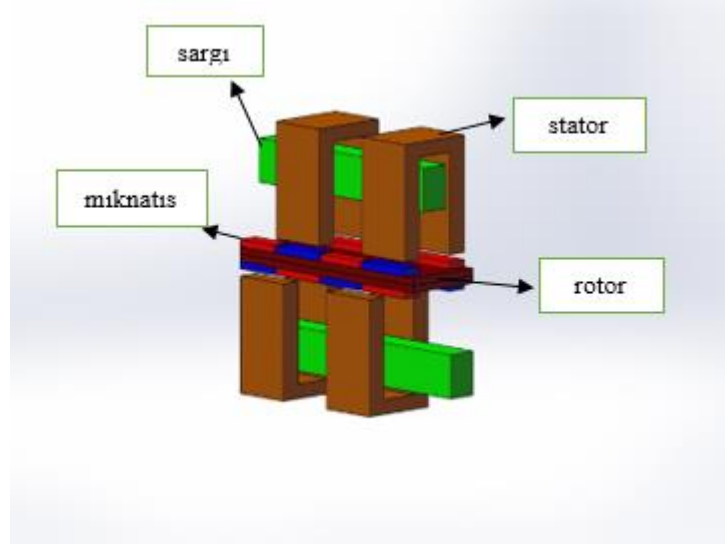


Şekil 1.7. Akı yoğunluklu u nüveli köprülü EAM.

1.3.5. Çift Taraflı Enine Akılı Makineler

1.3.5.1. Çift Taraflı Yüzey Yerleştirmeli U Nüveli

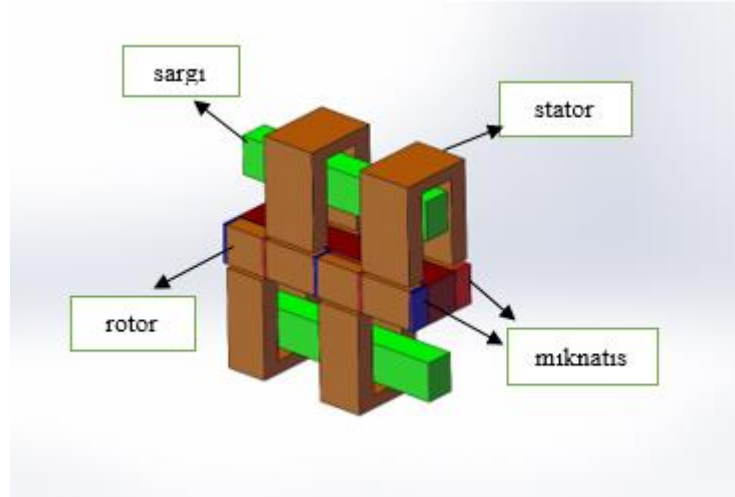
Tek statorlu bir yapıda bir kutup adımı boyunca kullanılmayan mıknatıslardan faydalanmak için çift statorlu yapı üretilmiştir. Bir kutup adımı boyunca bütün mıknatıslar ana akıya destek olurlar ve böylece daha fazla gerilim oluştururlar. Şekil 1.8’de çift taraflı yüzey yerleştirmeli EAM gösterilmektedir.



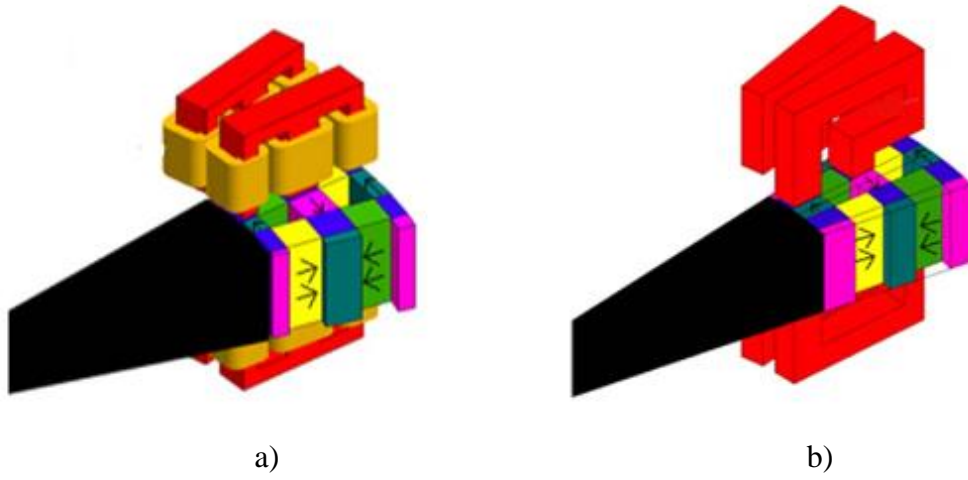
Şekil 1.8. Çift taraflı yüzey yerleştirmeli EAM.

1.3.5.2. Çift Taraflı U,Z,E Akı Yoğunluklu

Literatürde birçok enine akılı makine çeşidi mevcuttur. Şekil 1.9’da verilen sabit mıknatıslı modelde, çift statorlu akı yoğunluklu enine akılı makine gözükmemektedir. Şekil 1.10 (a)’da çift statorlu enine akılı makinenin statoruna toroidal sargı yerleştirilmiştir. Endüvi sargıları E nüvenin ayaklarına sarılarak Şekil 1.10 (b)’deki gibi dağıtılıp sargı şeklinde de çalışma olabileceği gösterilmiştir [55].



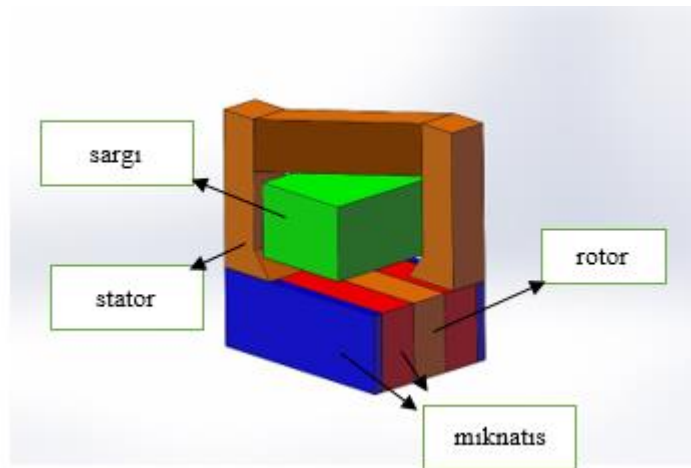
Şekil 1.9. Çift taraflı akı yoğunluklu EAM.



Şekil 1.10. Çift taraflı EAM a) E nüveli EAM [56] b) Z nüveli EAM [57].

1.3.6. Pençe Sistemli Enine Akılı Makine

Pençe şeklinde makine tasarlamasının amacı stator dişleriyle fazla akım çekmektir ve bunu gerçekleştirebilmek için de rotora uzun mıknatıslar yerleştirilir. Makinenin pençe olarak adlandırılması, stator dişlerinin fazla akı toplayabilmesi için rotor kısmına doğru yüzey alanını genişletmesinden ileri gelmektedir. Klasik enine akılı makinelerde mıknatıslar karşılıklı olarak yerleştirilir fakat bu yapıda rotor kısmına uzun mıknatıslar yerleştirilir. Bu sayede de fazla akı toplanmış olur. Yapının dezavantajı ise yapısı gereği sargı kısmına pek yer kalmadığından sargı rotor kısmından uzaklaştırılır ve makine çapı büyümüş olur. Şekil 1.11’de pençe sistemli enine akılı makine görülmektedir.



Şekil 1.11. Pençe sistemli EAM.

1.4. RADYAL, EKSENEL VE ENİNE AKILI MAKİNELERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Radyal, eksenel ve enine akılı makinelerin küçük akım yoğunluklu çalışmalarda, küçük elektriksel yüklerde, yüksek sıcaklık ve sabit hız gibi özellikler göz önüne alınarak performans karşılaştırılması yapılmış ve gözlenen bazı sonuçlar aşağıda verilmiştir [58].

- Radyal akılı ve enine akılı makineler yüksek verimlere sahip olabilirler.
- Radyal akılı ve eksenel akılı makinelerde güç faktörleri yüksektir.
- Eksenel akılı makineler düşük tork yoğunluğuna sahiptirler.
- Yüksek kutup sayılı enine akılı makineler, yüksek tork yoğunluğunun avantajını sunar. Uygun eksenel uzunluktaki bir enine akılı makine, radyal akılı makine ile rekabet edebilir ve düşük hızlı uygulamalar için enine akılı makinelerin kullanımını bir avantajdır.
- Radyal akılı makineler yüksek hızlı uygulamalar için en iyi seçenektir.

Enine akılı ve eksenel akılı makinelerin radyal akılı makinelere göre sahip olduğu bazı avantajlar aşağıda verilmiştir [59]-[61].

Enine akılı generatör yapısı, kısa eksenel uzunluğa izin verdiğinden, yüksek güç – kütle oranı ve çok kompakt bir yapıda generatör üretilmesine olanak sağlar. Enine akılı makineler doğrudan tahrikli uygulamalarda sıklıkla kullanılır. Eksenel akılı generatörler düzlemsel hava aralığına sahiptir. Enine-eksenel akılı generatörler radyal akılı makineye göre daha az nüve kullanılıp daha yüksek bir güç yoğunluğuna sahip olabilirler. Enine akılı generatörlerin topolojisi, istenilen güç veya tork değerini elde edebilmek için parça eklenip çıkarılmasına izin verir. Enine akılı ve eksenel akılı generatörler daha büyük çaplı olduklarından, kutup sayısı fazlaca yapılabilir ve bu da düşük hız uygulamalarına daha uygundur.

2. TASARLANAN DİSK MAKİNE

Tasarlanan disk makine doğrudan tahrikli uygulamalarda ve rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizin enerjide dışa bağımlılığını azaltmak için yenilenebilir enerji son derece önemli bir çözümdür. Son yıllarda hızla gelişmekte olan yenilenebilir enerji kaynakları içinde rüzgâr enerjisi oldukça popülerdir. Ülkemiz enerji elde ederken daha çok fosil yakıtlar kullanmaktadır. Fosil yakıtlar içerisinde en fazla paya sahip olan doğal gazdır. Doğal gaz ithalat yoluyla ülkemize gelmektedir. Elektrik enerjisinde en fazla doğal gaz kullanılmaktadır. Bu sebepten enerji üretiminde ülke ekonomisi dışa bağımlı olmuştur. Bu durumun değişmesi için yenilenebilir enerji kaynakları ön plana çıkarılmalıdır. Rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılan enine akılı makineler ilerde ülkemiz için son derece faydalı olabilir.

2.1. ÖN TASARIM

Enine akı motorundaki stator nüveleri, motor gövdesi içindeki boşluğu doldurmaz, dolayısıyla, boyutlandırma denklemi ile malzeme miktarı arasındaki ilişki, geleneksel motordaki kadar güçlü değildir, bu yüzden farklı boyutlandırma denklemleri oluşturulmuştur [62].

Genel olarak stator kaçak endüktansı ve direnç ihmal edilirse enine akılı makineler için genel güç eşitliği eşitlik (2.1)'deki gibi verilir [63], [64].

$$P = n \frac{m}{T} \int_0^T e(t)i(t)dt = nmk_p E_{pk} I_{pk} \quad (2.1)$$

Burada n ; makinenin verimini, m faz sayısını, T ; emk 'nın bir devir periyodunu, $e(t)$ ve E_{pk} ; zıt emk ve tepe değerini, $i(t)$ ve I_{pk} faz akımlarını ve tepe değerini, k_p ; güç dalga faktörünü göstermektedir. Eşitlik (2.2)'de güç dalga faktörü gösterilmektedir.

$$k_p = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{e(t)i(t)}{E_{pk} I_{pk}} dt = \frac{1}{T} \int_0^T f_e(t) f_i(t) dt \quad (2.2)$$

$f_e(t) = e(t)/E_{pk}$ ve $f_i(t) = i(t)/I_{pk}$ ifadeleri zıt emk ve akım dalga formlarını ifade etmek için kullanılmıştır.

Eksenel akılı makinelerde zıt emk eşitlik (2.3)'teki gibi verilir.

$$e(t) = k_e N_t B_\delta \frac{f}{p} (1 - \gamma^2) D_{ro}^2 f_e(t) \quad (2.3)$$

Burada N_t ; bir fazdaki sarım sayısını, B_δ ; hava aralığı akı yoğunluğunu, f ; frekansı, p ; kutup çifti sayısını, γ ; rotorun iç ve dış çap oranını, D_{ro} ; mıknatıs dış çapını, k_e ; sargı

dağıtım faktörünü içeren emk faktörüdür. Eğer E_{pk} ifadesini açık bir şekilde ifade edersek eşitlik (2.4)'teki gibi olur.

$$E_{pk} = k_e N_t B_\delta \frac{f}{p} (1 - \gamma^2) D_{ro}^2 \quad (2.4)$$

Disk şeklindeki enine akılı makinelerde K_e eşitlik (2.5)'teki gibi ifade edilir.

$$K_e = \frac{\sqrt{2}}{(1-\gamma)D_{ri}} wQ \quad (2.5)$$

Burada D_{ri} ; mıknatıs iç çapını, Q; stator çekirdek sayısını, w; stator çekirdek kalınlığını ifade etmektedir. Eğer E_{pk} ifadesini düzenlersek eşitlik (2.6) elde edilmiş olur.

$$E_{pk} = \sqrt{2} N_t B_\delta \frac{f}{p} (1 + \gamma) D_{ro} wQ \quad (2.6)$$

Akım dalga faktörünü göstermek için K_i tanımlanmıştır. Buna göre K_i ifadesi eşitlik (2.7)'de gösterilmiştir.

$$k_i = \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{i(t)}{I_{pk}} \right)^2 dt \right]^2 \quad (2.7)$$

Enine akılı makinede elektriksel yükü tanımlayacak olursak eşitlik (2.8)'deki gibi verilebilir.

$$A = \frac{2N_t I_{rms} m}{k_s L_e Q} \quad (2.8)$$

Burada ifade edilen L_e stator çekirdek uzunluğunu ifade etmektedir. Diğer bir ifade olan $k_s = L_{ss} / L_e$, L_{ss} burada stator boşluk uzunluğunu ifade etmektedir. Faz akımının tepe değerini ifade edecek olursak eşitlik (2.9) verilebilir.

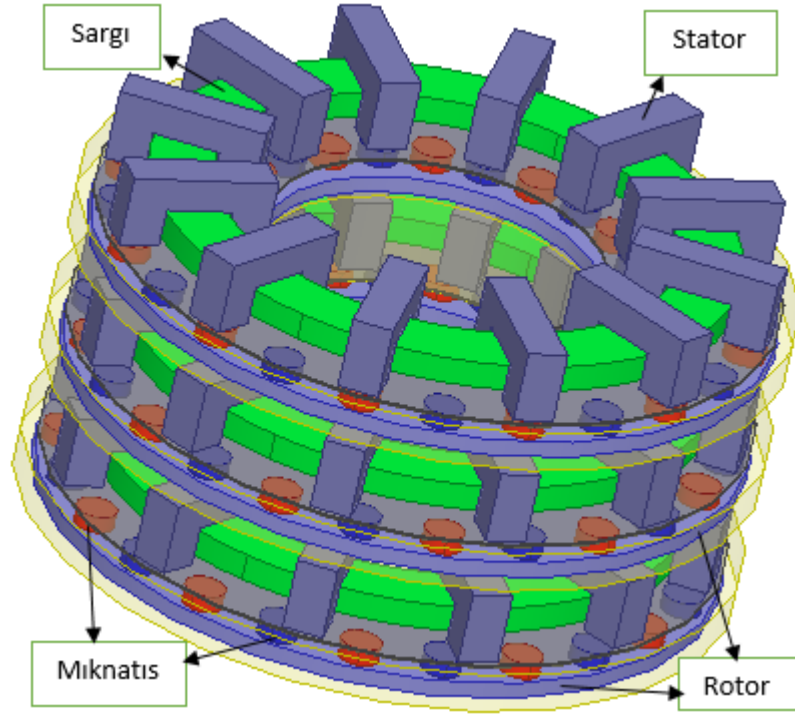
$$I_{pk} = k_i A \frac{k_s L_e Q}{2N_t m} \quad (2.9)$$

Boyutlandırma ifadesinin son halini yazacak olursak eşitlik (2.10) elde edilmiş olur.

$$P = \frac{\sqrt{2}}{2} n k_p k_i k_s B_\delta \frac{f}{p} (1 + \gamma) D_{ro} L_e w Q^2 A \quad (2.10)$$

Tasarlanan enine akılı disk şeklindeki özgün makine 3 fazlıdır. Tasarlanan bu makine rüzgâr türbinlerinde ve elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Enine akılı makinenin her bir fazında çelik malzeme olan disk şeklinde rotor mevcuttur. Yine enine akılı makinenin her bir fazında rotorun üzerinde sabit 48 adet neodim mıknatıslar bulunmaktadır. Enine akılı makinenin tek bir fazı 24 kutupludur ve 12 olukludur. Bu oluklar arasında toroidal sargılar mevcuttur. Toroidal sargıların sayısı 60 olarak belirlenmiştir. Stator malzemesi hali hazırda mevcut olan M36_26G seçilmiştir. Bu tez hazırlanırken enine akılı makinenin çıkış gücü 250 W olarak belirlenmiştir. EN 15194 Avrupa standartlarında pedal destekli elektrikli bisikletlerin özellikleri belirlenmiştir. Buna göre bir aracın bu sınıfa girebilmesi için motor nominal gücü en fazla 250 Watt

olmalıdır. 250 W gücünde olan makinenin boyutunun küçük olmasına dikkat edilmiştir. Bu sayede hacimden tasarruf edilmesi amaçlanmıştır. Enine akılı makinenin boyutları bir sonraki bölümde açıklanmıştır. Şekil 2.1’de önerilen 3 fazlı EAM modeli gözükmektedir.

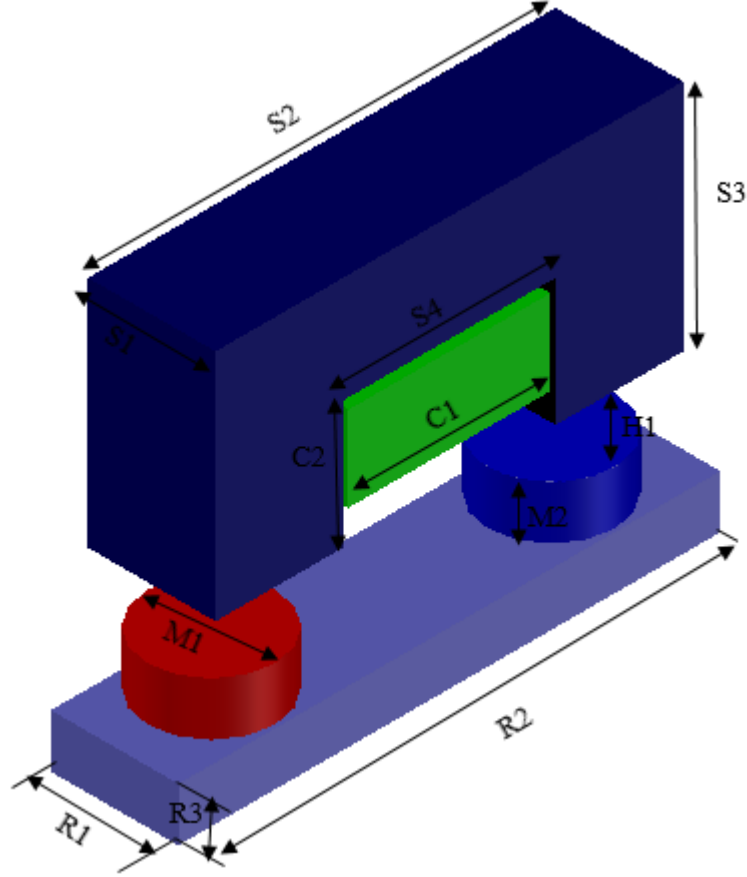


Şekil 2.1. Önerilen 3 fazlı EAM.

2.2. GEOMETRİK BOYUTLAR VE KISITLAR

Bu bölümde tasarlanan makinenin boyutları verilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan tüm analizler 3 boyutlu olduğundan uzun zaman almaktadır. Tasarlanan makinede güç ve torka etki eden birçok parametre mevcuttur. Analiz kolaylığı açısından bazı değerler sabit seçilmiştir. Örneğin; U nüvelerin boyu sabittir. Ayrıca elimizde yeterli güçte bilgisayar olmadığından dolayı hassasiyet noktaları özellikle mıknatıslar, stator dişlerinin yüzeyi ve hava aralıkları olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu noktalara daha fazla mesh atılarak olabildiğince doğru sonuç alınmaya çalışılmıştır. Üretim kolaylığı açısından mıknatıslar sabit daire şeklinde seçilmiştir. Nüveler içinse hali hazırda mevcut olan sabit sac malzeme kullanılmıştır. Şekil 2.2’de 3 fazlı olarak tasarlanan makinenin tek fazı gözükmektedir. Burada rotor, stator, sargı, hava aralığı, mıknatıs boyu ve yarıçapı ile ilgili boyutlar verilmiştir. Kolay anlaşılması bakımından rotor dikdörtgen olarak çizilmiştir. Şekil 2.1’de tasarlanan makinenin tam hali gözükmektedir. Burada S1;

statorun derinliğini, S_2 ; statorun genişliğini, S_3 ; statorun yüksekliğini, S_4 ; stator oluk genişliğini, C_1 sargı genişliğini, C_2 ; stator oluk boyunu, H_1 ; hava aralığını, M_1 ; mıknatıs çapını, M_2 ; mıknatıs yüksekliğini, R_1 ; rotorun derinliğini, R_2 ; rotorun genişliğini ve R_3 ; rotorun yüksekliğini göstermektedir. Çizelge 2.1’de tasarlanan makinenin boyutları verilmiştir. Çizelge 2.2’de ise generatörün genel özellikleri verilmiştir. Şekil 2.3’te rotor üzerinde yer alan mıknatısların yerleşme konumu, rotor iç yarıçapı olan R_{in} ve rotor dış yarıçapı R_{out} gösterilmiştir.



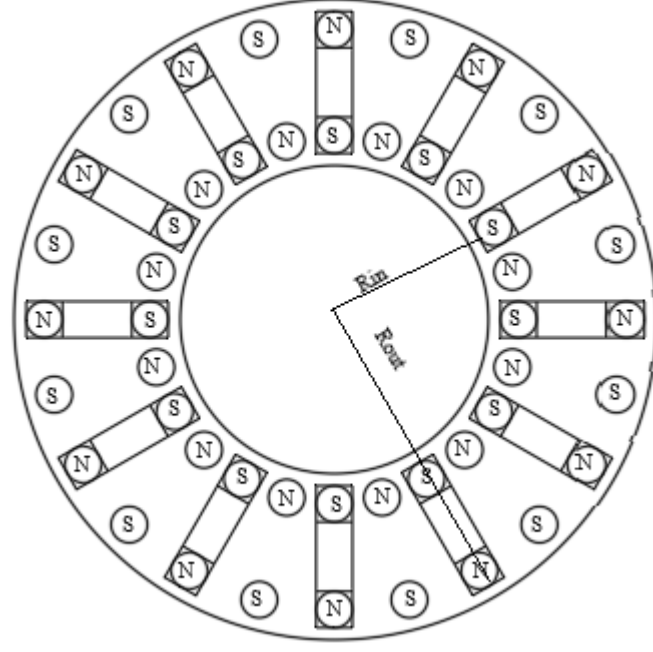
Şekil 2.2. Tasarlanan makinenin tek fazı için verilen boyutlar.

Çizelge 2.1. Tasarlanan makinenin tek fazı için verilen boyut değerleri.

S1(mm)	12
S2(mm)	44
S3(mm)	22
S4(mm)	20
C1(mm)	19
C2(mm)	12
M1(mm)	12
M2(mm)	5
R1(mm)	12
R2(mm)	51
R3(mm)	5
H1(mm)	1
Sarım sayısı(N)	60

Çizelge 2.2. Tasarlanan generatörün genel özellikleri.

Çıkış gücü(W)	250
Tek faz kutup sayısı	24
Dönme hızı(d/dk)	500
Doluluk faktörü	0.55
Mıknatıs tipi	NdFeB30
Çıkış gerilimi(V)	30



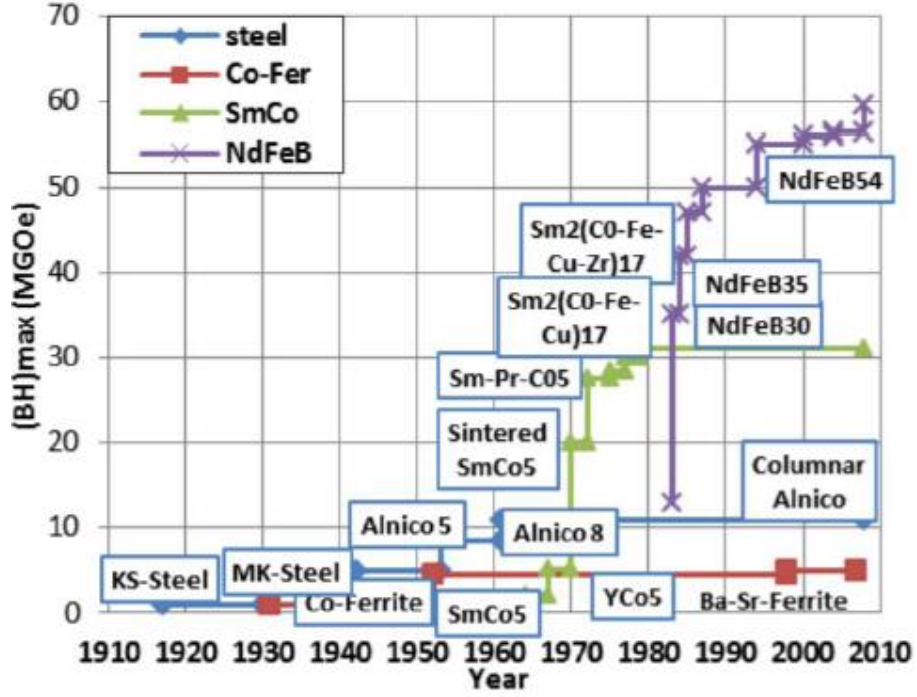
Şekil 2.3. Tasarlanan generatörün üstten görünüşü.

2.3. KULLANILAN MALZEMELER

Üretimde olan her eşya gibi günlük hayatta kullandığımız tüm malzemelerin kalitesi oldukça önemlidir. Yüksek kalite ile üretilen malzeme daha çok verimli daha çok kararlı olacaktır. Enine akıllı makinelerde de kullanacağımız malzemeler fiyat ve verim olarak karşılaştırıldığında tatmin edici sonuçlar vermelidir. Fiziksel olarak çok iyi bir tasarım gerçekleştirilse dahi doğru malzeme kullanımı olmazsa makine verimli çalışmayacaktır.

2.3.1. Mıknatıs Seçimi

Elektrik makinelerinde kalıcı mıknatıs olarak Ferrit, Alnico ve nadir toprak mıknatısları kullanılmaktadır. Nadir toprak mıknatısları yüksek güç yoğunlukları sayesinde ön plana çıkmaktadır. En yaygın alaşımları olarak Neodim-Demir-Bor (NdFeB) ve Samaryum-Kobalt (SmCo) olduğu görülmektedir. Şekil 2.4'te mıknatıs türlerinin son yüz yılda gelişimi görülmektedir. NdFeB mıknatısların maksimum enerji üretim yoğunluğundaki üstünlüğü net bir şekilde görülmektedir. Gündoğdu ve Kömürgöz hazırladıkları çalışmalarında çeşitli mıknatısların makine performansına olan etkisini incelemiştir [65]. Mıknatısların maliyet anlamında karşılaştırılmasının da yapıldığı bu çalışmada nadir toprak elementli mıknatısların pahalı olduğu ancak makine veriminin buna bağlı olduğu ifade edilmiştir.



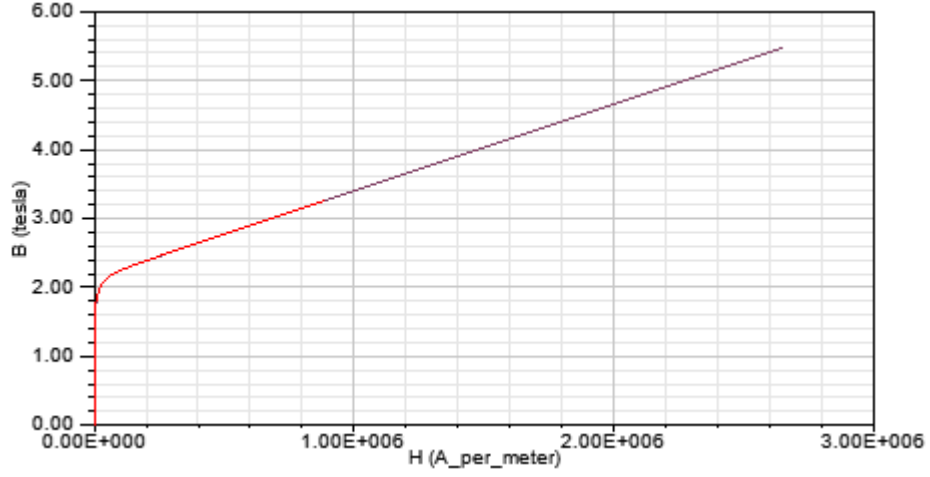
Şekil 2.4. Üretilen mıknatısların değişimi [65].

Bu tezde mıknatıs türü olarak yüksek güç yoğunluğundan ötürü NdFeB30 seçilmiştir.

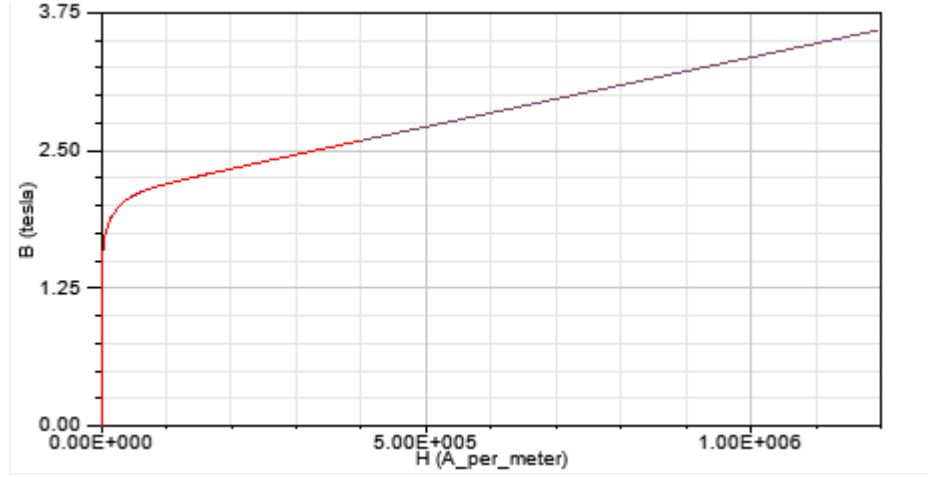
2.3.2. Rotor ve Stator İçin Malzeme Seçimi

Elektrik makinelerinde statorda kullanılacak sac malzeme demir kayıplarını azaltmak için ince lamineli olarak seçilir. Stator malzeme için M36_26G malzeme seçilmiştir. Bu malzemenin seçilmesindeki bir etken de hali hazırda elimizde mevcut olmasıdır. Bu malzemenin histeresiz kayıp katsayısı(kh); $211,6 \text{ w/m}^3$, doluluk faktörü(kc) $0,825 \text{ w/m}^3$ tür. Şekil 2.5'te bu malzemenin B-H eğrisi verilmiştir.

Rotor malzeme içinse katı bir malzeme olan saf çelik seçilmiştir. Bu malzemenin seçilmesinin sebebi rotorun yüksek hızlarda dönmesi ve bu hızlarda makinenin verimli, güvenilir ve kararlı olmasını sağlamak isteğidir. Şekil 2.6'da çelik malzemenin B-H eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.5. M36_26G malzemenin B-H eğrisi.

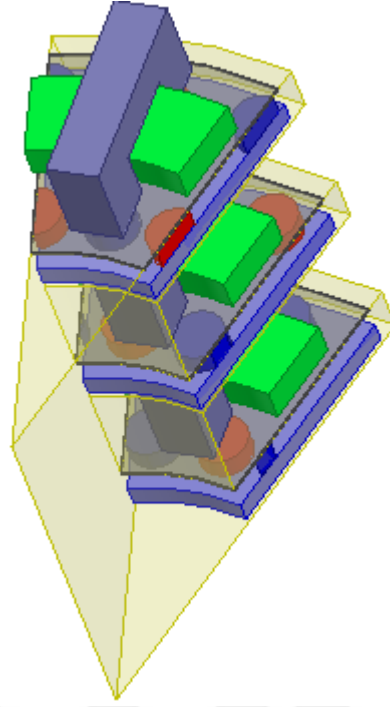


Şekil 2.6. Çelik malzemenin B-H eğrisi.

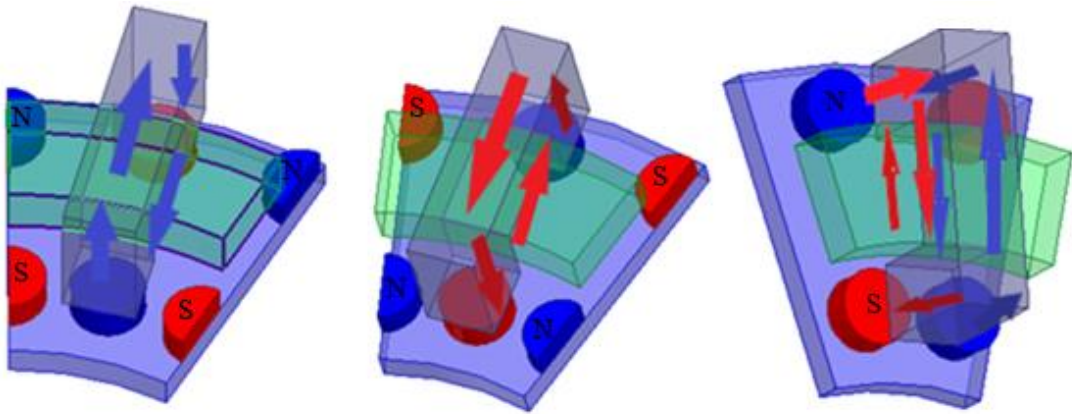
2.4. ÇALIŞMA PRENSİBİ

Faz farkı 120° elektriksel açı kullanılarak aynı mil üzerine yerleştirilen 3 adet diskten oluşan enine akılı generatör modeli şekil 2.7’de görülmektedir. Statorda U nüveler ve bu nüvelerin iç kısmına yerleştirilmiş toroidal endüvi sargıları bulunmaktadır. Aksenal olarak mıknatıslanmış 48 sürekli(sabit) mıknatıs, yüzey yerleştirilmeli olarak rotor diskine yapıştırılmıştır. Rotor üzerindeki sabit mıknatıslar sayesinde manyetik akı elde edilir. Mıknatısların dönme hareketi sonucu oluşturduğu manyetik akı, hava boşluğunu geçerek lamineli sac malzeme olan nüve üzerinden geçip zıt kutuplu mıknatısa gelerek çevrimini tamamlar. Önerilen modelin açık devre analizi için 500 d/dk’da 3 boyutlu

modelinin geçici durum analizi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS Maxwell paket program ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar bir sonraki bölümde verilmiştir. Şekil 2.8’de farklı rotor pozisyonlarında akı yolları gösterilmiştir.

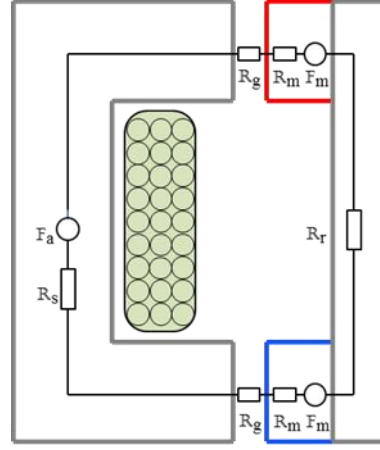


Şekil 2.7. Önerilen enine akıllı generatörün 3 faz modeli.



Şekil 2.8. Rotor konumuna göre akı yolları.

Basit manyetik eşdeğer devresi incelenirse; bir faz sargısında indüklenen gerilim kolayca elde edilebilir. Buna göre indüklenen gerilimin genel ifadesi ve etkin değeri sırasıyla eşitlik (2.11) ve eşitlik (2.12)’deki gibi verilebilir.



Şekil 2.9. Manyetik eşdeğer devre.

$$e(t) = Np \frac{d\varphi}{dt} = w_e Np \varphi_{max} \cos(wt) \quad (2.11)$$

$$E_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} w_e Np \varphi_1 \quad (2.12)$$

$$\varphi_1 = \frac{2}{\pi} \tau l_p B_{g1} K_a \quad (2.13)$$

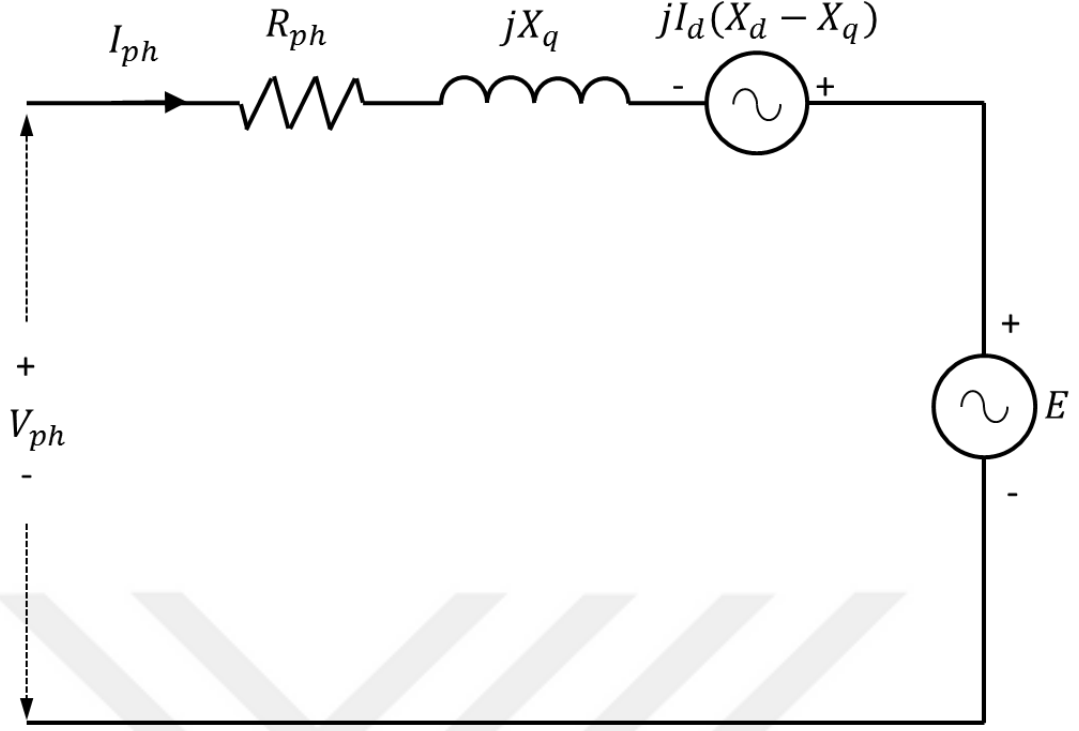
$$E_1 = \frac{\sqrt{2}}{60} p^2 N \tau l_p B_{g1} K_a n \quad (2.14)$$

Burada φ_1 sabit mıknatis tarafından uyarılan faz başına denk gelen kutup çifti manyetik akısının ilk harmoniğidir ve eşitlik (2.13)'teki gibi hesaplanır. Bir faz sargısında indüklenen gerilimin ifadesi ise eşitlik (2.14)'teki gibi olur. Burada τ ; ortalama kutup adımı, l_p ; stator kutup ayağının radyal uzunluğu, B_{g1} ; hava aralığı akı yoğunluğunun birinci harmoniği, K_a ; alan katsayısı, n ; d/dk cinsinden dönme hızıdır (d/dk).

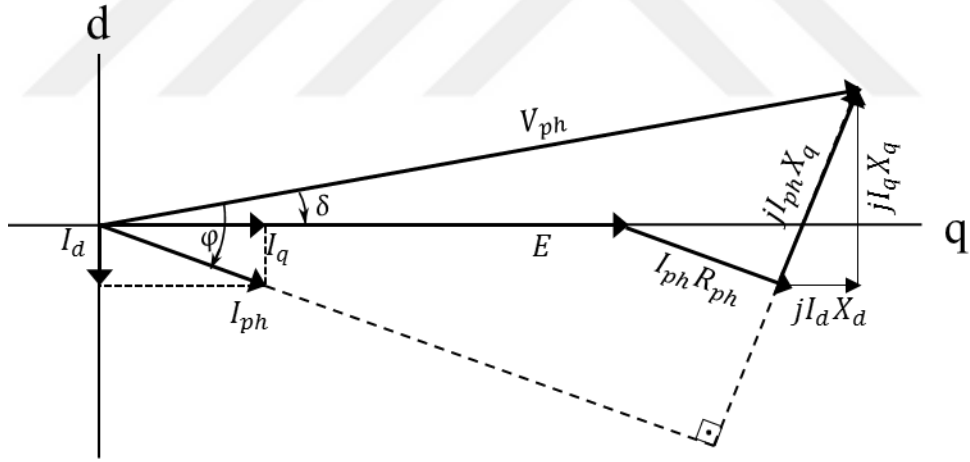
EAM'in elektriksel eşdeğer devresi Şekil 2.10'da ve fazör diyagramı Şekil 2.11'de verilmiştir. Buna göre genel güç eşitliği eşitlik (2.15)'teki gibi bulunur [24]. Burada $E I_q$ ifadesi, elektromekanik gücü temsil eder. Buna göre tork eşitliği eşitlik (2.16)'daki gibi elde edilir.

$$P_{input} = E I_q + I_d I_q (X_d - X_q) + R_{ph} I_{ph}^2 \quad (2.15)$$

$$T = \frac{E I_q}{n 2\pi / 60} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} p^2 N \tau l_p B_{g1} K_a I_q \quad (2.16)$$



Şekil 2.10. EAM'nin elektriksel eşdeğer devresi.



Şekil 2.11. EAM'nin fazör diyagramı.

3. ÖNERİLEN DİSK TİPİ EAM GENERATÖRÜNÜN BENZETİMİ

Makine geliştirmelerde sonlu elemanlar yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Manyetik alan, kaçak akı, vurutu torki, açık devre gerilimleri, tork, generatör yüklenmesi gibi analizleri kolaylıkla sonlu elemanlar yöntemiyle yapılabilir. Sabit mıknatıslı bir makinenin yapılacak olan manyetik alan analizleri sonlu elemanlar yöntemiyle yapılabilir [66]. Bu yöntemi kullanan Jmag, Flux, Consol vb. programlar olabilir. Bu tezde yapılan tüm analizler ANSYS Maxwell paket programı kullanılarak yapılmıştır. Bu programların hepsi sonlu elemanlar yöntemi kullanarak benzetim yapmaktadır.

3.1. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi 3 boyutlu modeller üzerinde kullanıldığı zaman hassas çözümler yaparak doğru sonuç almayı kolaylaştırır. Bu yöntem sayesinde elektrik makinelerinde manyetik alanlar, indüklenen gerilimler, tork değerleri gibi birçok parametreyi detaylı çözümler yaparak doğru sonuç alınmasına yardımcı olur [67]. Bu tez çalışmasında önerilen disk tipi enine akılı generatör 3 boyutlu ve nispeten karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu yüzden analizleri gerçekleştirirken 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. ANSYS Maxwell paket programı statik, transient manyetik alan problemlerini sonlu elemanlar yöntemi ile çözmektedir [2]. ANSYS Maxwell sabit mıknatısların oluşturduğu statik manyetik alanlar ile tork, endüktans ve kuvvetlerin hesaplanmasında kullanılır. Bu program sayesinde önerilen enine akılı makinenin tüm manyetik analizleri yapılmıştır. ANSYS Maxwell paket programı sayesinde geometrisi düzgün olmayan bölgelerdeki manyetik alanları belirlemek için çok sayıda dörtyüzlü eleman kullanılır. Bu elemanların toplamına mesh adı verilir. ANSYS Maxwell çözüm için otomatik olarak mesh üretir ve her bir mesh için ayrı ayrı çözüm yaparak hesaplama yapmaktadır. Önerilen enine akılı makinenin çözümünde rotor, stator ve mıknatıs üzerindeki meshler Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile manyetik analiz yapılırken Maxwell eşitlikleri kullanılır.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.4)$$

Burada \vec{J} akım yoğunluğunu (A/m^2) ifade eder. \vec{H} ise manyetik alan şiddetini (A/m) ifade eder. \vec{J} akım yoğunluğunu başka bir şekilde ifade edecek olursak eşitlik (3.5) yazılabilir.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = -\sigma \nabla V \quad (3.5)$$

Burada E ; elektrik alanı (V/m), σ ; malzemenin iletkenliğini (siemens/m), V ; elektrik potansiyelini ifade etmektedir. Akım yoğunluğu hesaplandıktan sonra manyetik alan çözücü eşitlik (3.6) ve eşitlik (3.7) denklemlerini çözer.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (3.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.7)$$

Burada \vec{B} ; manyetik akı yoğunluğunu (T) ifade eder. Manyetik akı yoğunluğu hesaplanacak olursa eşitlik (3.8) kullanılabilir.

$$\vec{B} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (3.8)$$

Burada ifade edilen μ_r ; bağıl geçirgenlik, μ_0 ; ise boşluğun geçirgenliği olarak ifade edilmektedir. Program çözüm yaparken Lorentz kuvvetini kullanır ve tork hesabını eşitlik (3.9)' a göre yapar [13].

$$T = \int \vec{r} \times (\vec{J} \times \vec{B}) dv \quad (3.9)$$

Burada r ; yer değiştirme vektörü olarak tanımlanmıştır [68].

Sonlu eleman eşitlikleri matrisel formda eşitlik (3.10)'daki gibi verilir.

$$\{[K] + j\omega\sigma[C]\}[A] = [J] \quad (3.10)$$

Eğer matrislerin açılımı verilirse eşitlik (3.11) ve eşitlik (3.12) elde edilir.

$$K_{ij}^e = \frac{v}{4\Delta_e} (b_i b_j + c_i c_j) \quad (3.11)$$

$$C_{ij}^e = \frac{\omega\sigma\Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Eğer akım vektörü kompleks değişken olarak tanımlanırsa eşitlik (3.13) elde edilir.

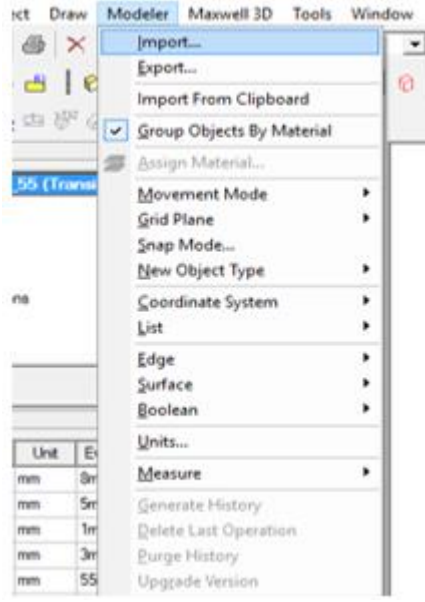
$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} (3(b_1^2 + c_1^2) - 2j\alpha\Delta_e^2) & (3(b_1b_2 + c_1c_2) - j\alpha\Delta_e^2) & (3(b_1b_3 + c_1c_3) - j\alpha\Delta_e^2) \\ & (3(b_2^2 + c_2^2) - 2j\alpha\Delta_e^2) & (3(b_2b_3 + c_2c_3) - j\alpha\Delta_e^2) \\ & \dots & (3(b_3^2 + c_3^2) - 2j\alpha\Delta_e^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1^c \\ A_2^c \\ A_3^c \end{bmatrix} \\
& = 4\mu\Delta_e^2 \begin{bmatrix} J_R + jJ_1 \\ J_R + jJ_1 \\ J_R + jJ_1 \end{bmatrix} \tag{3.13}
\end{aligned}$$

Burada $\alpha = \omega\sigma\mu$ olarak belirlenmiştir. ω ; açısal frekanstır. Δ_e ; üçgen elemanın alanını, A ; magnetik vektör potansiyelini, b ve c eleman katsayılarını ifade etmektedir.

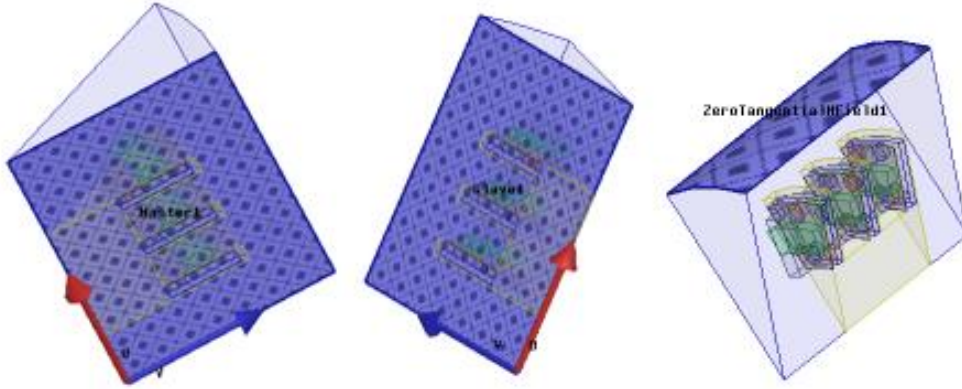
3.2. ÖNERİLEN EAM'NİN MANYETOSTATİK BENZETİMİ

Maxwell programı ile çözüm yapmak için öncelikle tasarlanan makinenin çizimi programa aktarılmalıdır veya program üzerinde çizilmelidir. Bu tezdeki enine akılı makine 3 boyutludur. Analizi yapılan modelin sınır koşullarının belirlenmesi için master, slave tanımlanmalıdır. Bunlar tanımlanırken Maxwell programı bazen bu sınırları tanımlamakta zorluk yaşayabilir veya bu sınırlamaları yapamaz. Bu durumda Maxwell programına, başka programda çizilen model import edilir. İport etmek için Maxwell programında modeller>import seçeneği seçilmelidir. Şekil 3.1'de import nasıl edilir gösterilmiştir. Bu sayede program üzerinde master, slave sınır koşulları daha kolay tanımlanabilir. Şekil 3.2'de sınır koşulları verilmiştir. Master, slave sınır koşulları belirlenirken Maxwell programının sunmuş olduğu çözüm tiplerinden bir tanesi seçilmelidir. Bu çözümler statik veya transient analiz olabilir. Tasarımı yapılan modelin gerekli parametreleri tanımlanmalıdır. Model üzerindeki stator, rotor, mıknatıs, sargı gibi malzemelerin materyal ataması yapılmalıdır. Tasarlanan modelin hassas ve detaylı çözüm vermesi için statora, rotora, mıknatıslara ve hava aralığına yüksek sayıda mesh değeri tanımlanmalıdır. Analizin başlaması için gerekli olan başlangıç, aralık ve bitiş zamanı belirtilmelidir. Program üzerinde analiz için tanımlanan aralık süresi arttırılırsa elde edilecek olan sinyallerin daha düzgün olarak çıkması kolaylaşacaktır. Ansoft Maxwell programında yapılan incelemeler sonucu seçilen generatörün burada sonlu elemanlar yöntemini kullanarak tek fazında meydana gelen akı yoğunluğuna bakılmıştır. Tasarlanan disk tipi EAM'de manyetik akı yolları 3 boyutludur. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılırken, 3 boyutlu bir model oluşturulmuştur. Şekil 3.3'te 1/6 simetrik modeldeki tek fazda meydana gelen akı yoğunluğu gözükmektedir. Özellikle mıknatıslar üzerinde ve statora geçiş kısmında yoğunluğun fazla olduğu gözükmektedir. Tek fazı bu

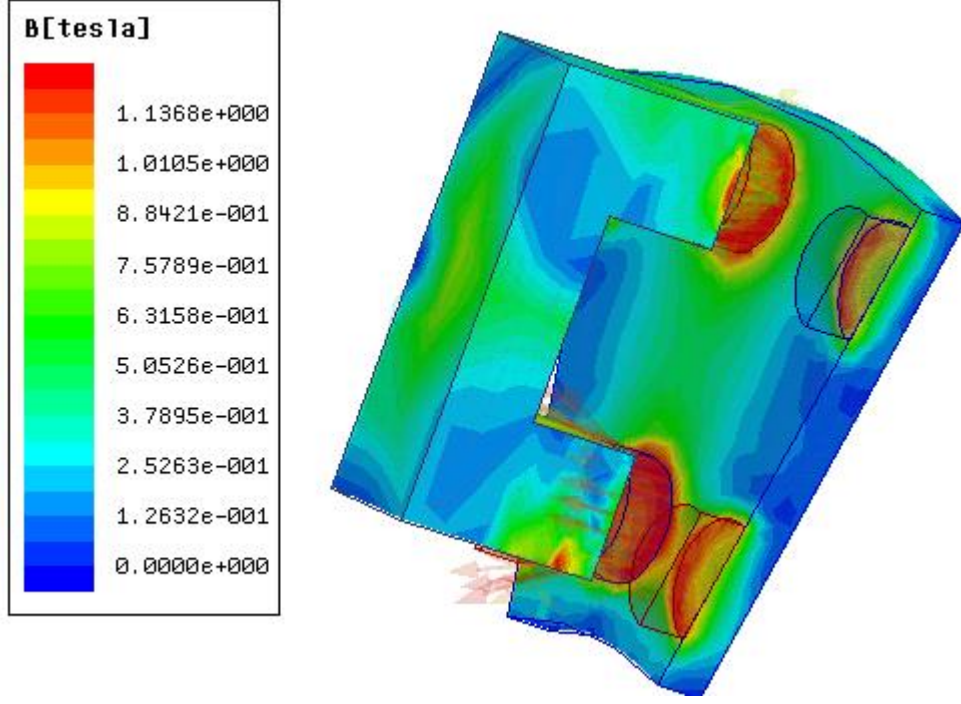
şekilde olan generatörün diğer fazları 120° elektriksel açı farkıyla arka arkaya yerleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde makine parçaları mesh diye ifade edilen çok küçük parçalara bölünerek analiz edilmektedir. Hassasiyet ne kadar arttırılırsa sonuç o kadar doğru çıkmaktadır. Bu tezde analizler yapılırken imkanlar kısıtlı olduğundan; yeterli güçte ekran kartı, ram ve işlemci olmadığından bu analizler uzun sürede ve düşük hassasiyetle yapılmıştır. Analiz sonuçlarının daha doğru çıkması için model üzerindeki mıknatıslara, hava aralığına, stator hava aralığına daha çok mesh atılmıştır. Şekil 3.4'te 1/6 simetrik modeldeki analizi yapılan modelin mesh hassasiyeti gözükmektedir. Özellikle mıknatıslara, hava aralığına, nüvenin mıknatıslara bakan yüzeylerine daha fazla mesh tanımlanmıştır. Nüvenin üst kısmında ise mesh sayısı daha az gözükmektedir. Enine akılı makinelerde vuruntu momenti mıknatıs ve nüve dişleri arasındaki etkileşimden oluşmaktadır. Vuruntu momentini daha iyi analiz edebilmek için mesh yoğunluğu özellikle mıknatıslara, nüve diş yüzeylerine ve hava aralığına daha fazla tanımlanmıştır. ANSYS Maxwell paket programı kullanılarak yapılan çözümün daha hassas ve daha doğru kılınması için mesh boyutu çok küçük olarak ayarlanabilir. Mesh yapısı çok küçük olarak ayarlandığı zaman çözümün doğruluğu artacaktır ancak bilgisayar işlem yapmakta zorlanacaktır ve ayrıca çözüm bilgisayarda oldukça büyük boyutlarda yer kaplayacaktır [69]. Yüksek hassasiyetli bir ayarda analiz yapmak için oldukça yüksek özelliklere sahip bir bilgisayar kullanılması zorunludur. Analizde eğer mesh yapıları büyütülür veya bazı parçalar gereksiz diye kaldırılırsa analiz süresi kısalmış ancak bu şekilde bir çözüm yanlış sonuçlar verebilir. Bu tezde yapılan analizler yaklaşık olarak 2 gün sürmüştür. Analizlerin toplamı yaklaşık olarak 30 Gb yer kaplamıştır.



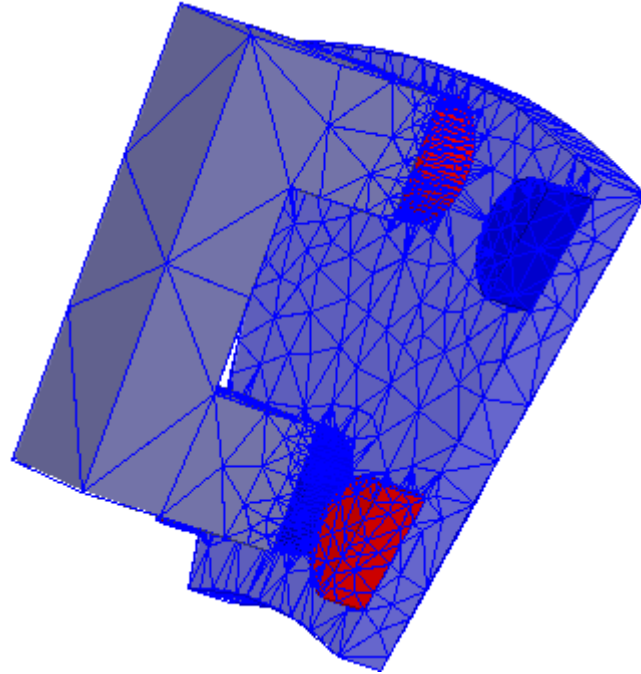
Şekil 3.1.İmport etme.



Şekil 3.2. Sınır belirleme araçları.



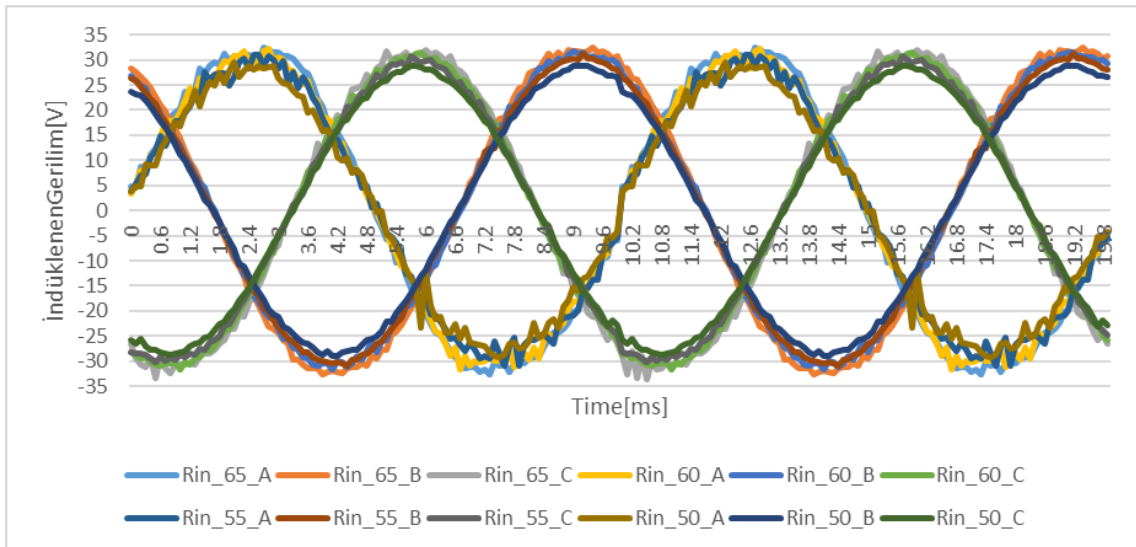
Şekil 3.3. Akı yoğunluğu.



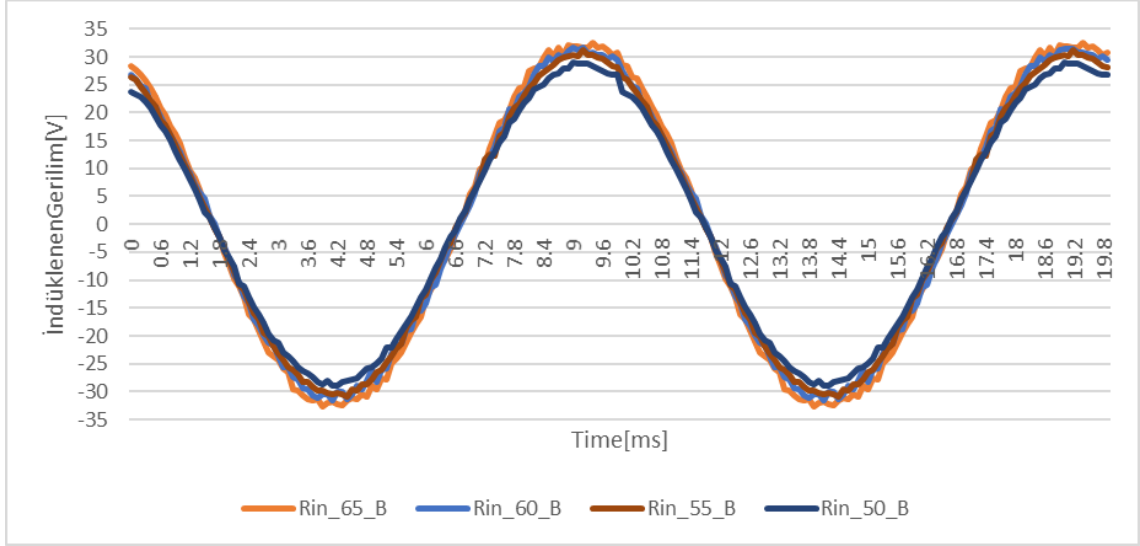
Şekil 3.4. Mesh çizimi.

3.3. BOYUT BELİRLEME VE AÇIK DEVRE ANALİZİ

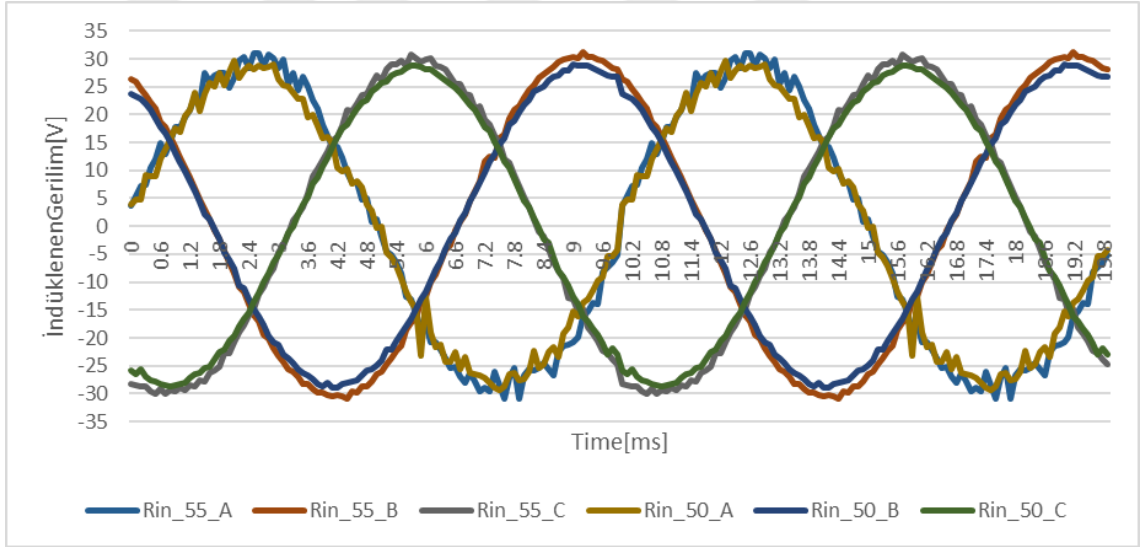
Rotor iç yarıçapları arttıkça enine akılı makinenin üretmiş olduğu zıt emk değerleri yükselmiştir. Bu bölümde farklı rotor iç yarıçaplarında yapılmış olan açık devre analizleri gösterilmiştir. Enine akılı makine açık devre analizinde anma hızında 500 d/dk'da döndürülmüştür. Sargıların üretmiş olduğu zıt emk'ya bakılmıştır. Rotor iç yarıçapları 65 mm, 60 mm, 55 mm ve 50 mm olan modeller oluşturulup zıt emk değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.5'te her bir modelin 3 faz zıt emk gerilim değerleri verilmiştir. Şekil 3.6'te farklı iç yarıçaplar için faz başına indüklenen zıt-emk gerilim değerleri verilmiştir. Eğrilerdeki titreşimler, modelde kullanılan mesh hassasiyeti ile ilgilidir. Yüksek mesh kalitesi ile daha düzgün sinyaller elde edilebilir. Ancak elde edilen veriler de iç çapın artmasıyla çıkış geriliminin tepe değerinin arttığını ve sinüs dalga şekline yaklaştığını göstermektedir. Şekil 3.7'de rotor iç yarıçapı 55 mm ve 50 mm olduğu durumdaki her bir fazda indüklenen gerilim değerleri verilmiştir. Yarıçap büyüdükçe indüklenen gerilim değerinin büyüdüğü gözlenmiştir. Şekil 3.8'de rotor iç yarıçapı 55 mm olduğu durumdaki sadece b fazlarındaki indüklenen gerilimler gösterilmiştir. Şekil 3.8'den rotor iç yarıçapı ile değişen gerilim gözükmemektedir.



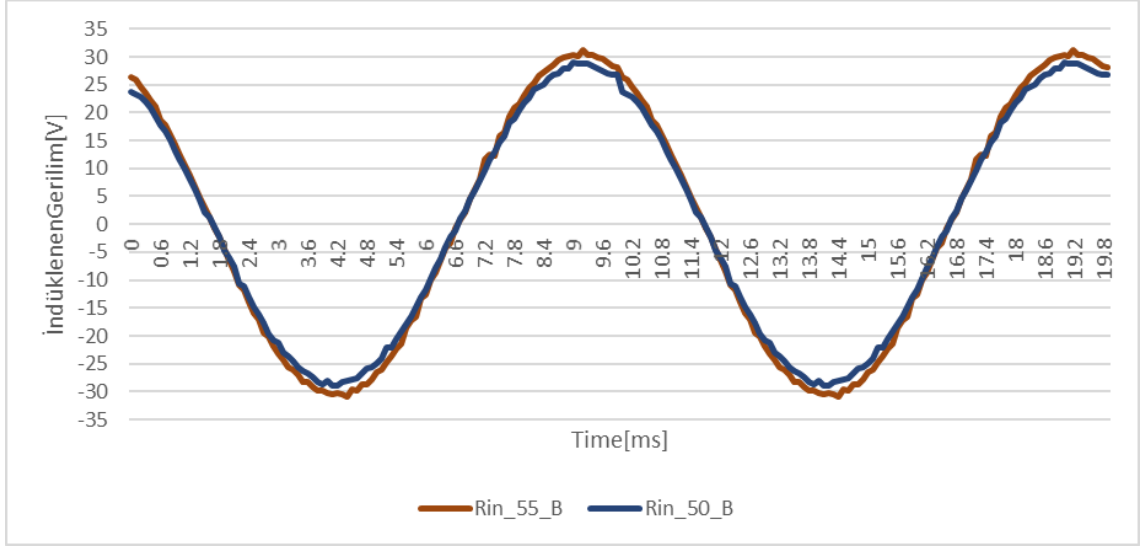
Şekil 3.5. Farklı rotor iç yarıçaplarında back emf değerleri.



Şekil 3.6. İç yarıçapa göre zıt-emk gerilim dalga şekilleri.

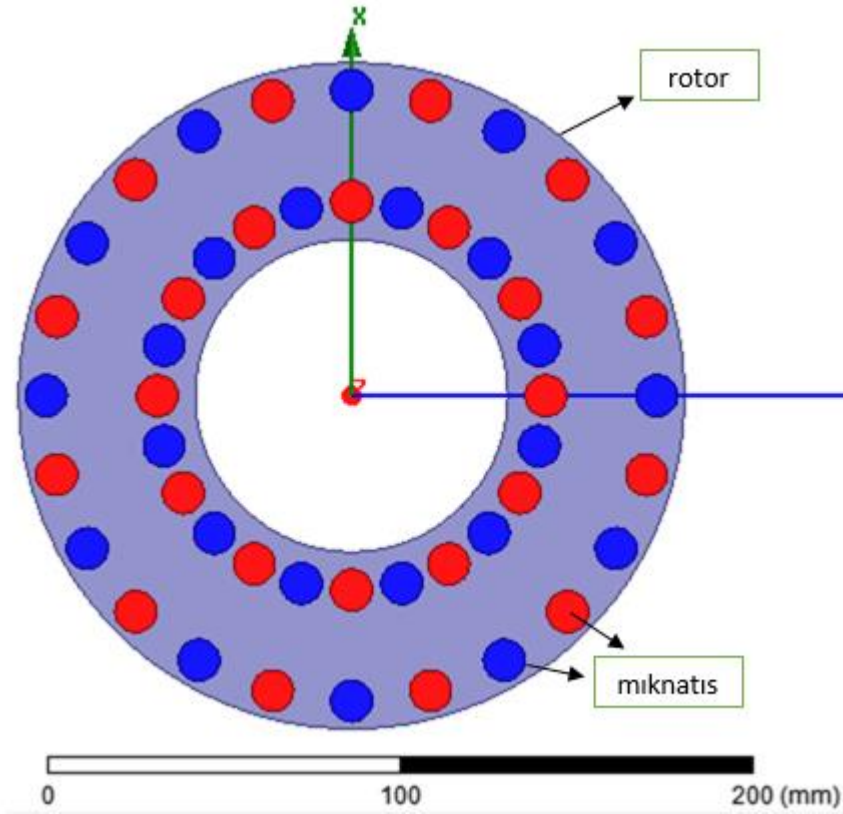


Şekil 3.7. Rotor iç yarıçapı 55 mm ve 50 mm için zıt emk değerleri.



Şekil 3.8. Rotor iç yarıçapı 55 mm ve 50 mm b fazları için zıt emk değerleri.

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde görülüyor ki farklı rotor iç yarıçaplarında rotor iç yarıçapı küçüldükçe zıt emk değerleri düşmektedir. Ayrıca rotor iç yarıçapı 50 mm olduğunda Şekil 3.9’da görüldüğü üzere mıknatıslar birbirine çok yakın olmaktadır. Bu nedenle bu modelde kaçak akının fazla olacağı düşünülmektedir.



Şekil 3.9. Rotor iç yarıçapı 50 mm.

Rotor iç yarıçapına göre indüklenen gerilimlerin harmonik incelemesi için toplam harmonik bozulmalarına (THD) bakılmıştır. Böylece zıt emk'ların 1. harmonikten ne kadar uzaklaştığı görülebilir. Bunun için eşitlik (3.14)'deki denklem kullanılır. Rotor iç yarıçapına göre THD değerleri Çizelge 3.1'deki gibidir. IEEE 519-2014' e göre, 1.0 kV'dan düşük gerilimlerde harmonik bozulma THD(%) = 8.0'in altında olmalıdır.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (3.14)$$

Çizelge 3.1. İç yarıçapa göre 1 faz zıt emk THD'leri

İç Yarıçap (mm)	1. Harmonik (Volt)	%THD
50	28.58	2.96
55	30.22	4.15
60	33.1	3.62
65	33.1	2.81

3.4. VURUNTU TORKU İYİLEŞTİRME

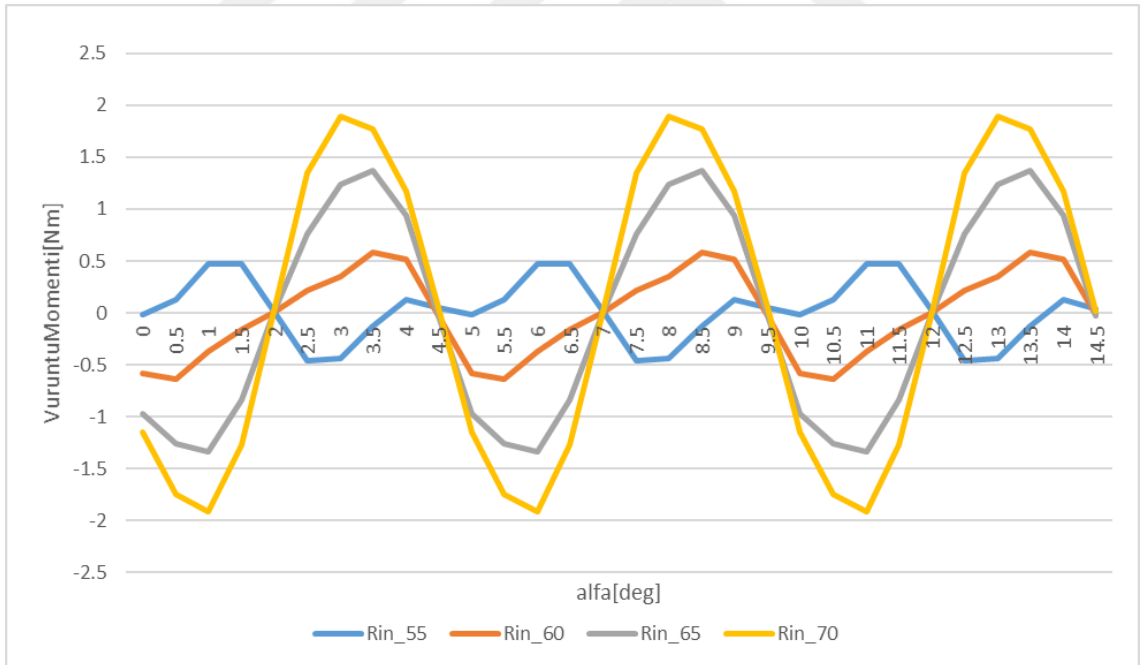
Enine akılı makinelerde rotordaki sabit mıknatıslar ile stator dişleri arasındaki etkileşimden kaynaklanan ve istenmeyen kuvvete vuruntu torku denir. Rotor milinde titreşimlere neden olan vuruntu torku minimize edilmesi gerekmektedir. Sürekli mıknatıslı bir makinenin vuruntu torku eşitlik (3.15)'teki gibi hesaplanır. Burada p kutup çifti sayısıdır. Stator ve rotor çekirdeğinin sonsuz geçirgenlikte olduğunu kabul edersek toplam enerji W eşitlik (3.16)'deki gibi yazılabilir.

$$T_{cog} = -p \frac{dW}{d\theta} \quad (3.15)$$

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int_{V_{air}} B_{air}^2 dV + \frac{1}{2\mu_{pm}} \int_{V_{pm}} B_{pm}^2 dV \quad (3.16)$$

EAM'lerin en büyük dezavantajlarından biri vuruñtu torkunun yüksek olmasıdır. EAM'lerde vuruñtu torkunu azaltmak için 3 fazlı disk modeli uygulanmaktadır [70]. Böylece tek faz başına yüksek olan vuruñtu torku toplamda azaltılır. Şekil 3.10'da rotor içyarıçapı 55 mm olan disk EAM modelinde, sonlu elemanlar analizi ile elde edilen faz başına ve toplam vuruñtu torkları verilmiştir. Faz başına 6 Nm tepe değeri vuruñtu torkları gözlenirken, 3 faza geçildiğinde toplam vuruñtu torku 0,5 Nm'lere düşmektedir.

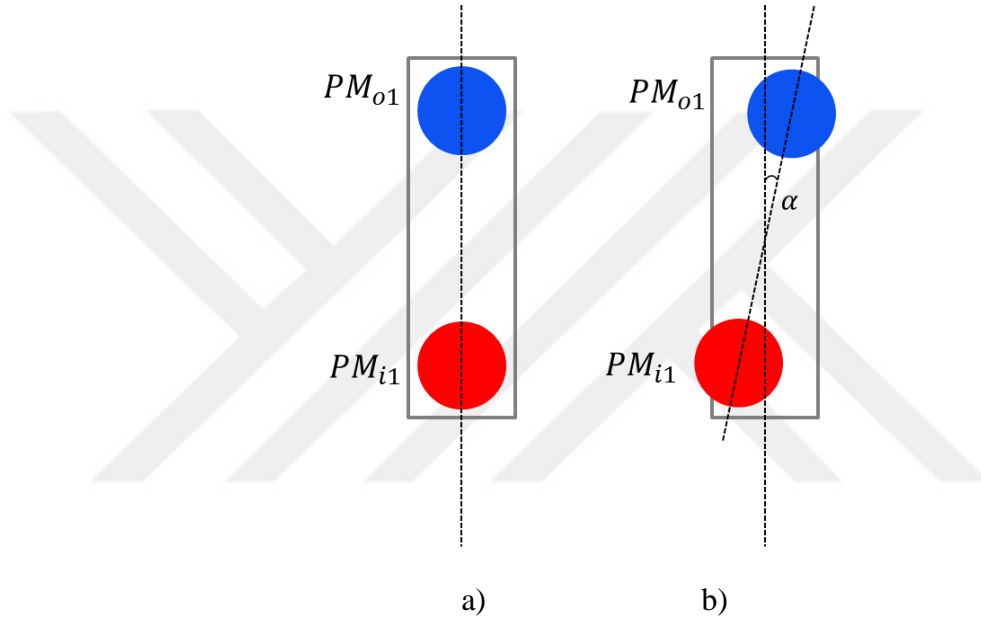
Bu tezde, rotor iç yarımçapının vuruñtu torkuna etkisi de incelenmiştir. Rotor iç yarımçapının artması, faz sargılarında indüklenen gerilimin dalga formu sinüse yaklaşmaktadır ancak rotor iç yarımçapını arttırmak vuruñtu torkunu arttırmaktadır. Bu durum Şekil 3.10'da görülebilir. En düşük vuruñtu torku 55 mm rotor iç yarımçapında görülmüştür. Bu sebepten ötürü rotor iç yarımçapı 55 mm olmasına karar verilmiştir. Ayrıca rotor açısına göre bir periyot boyunca vuruñtu torku 0 geçiş noktasından daha çok geçtiğinden, toplam vuruñtu torku etkisinin azaldığını söylenebilir.



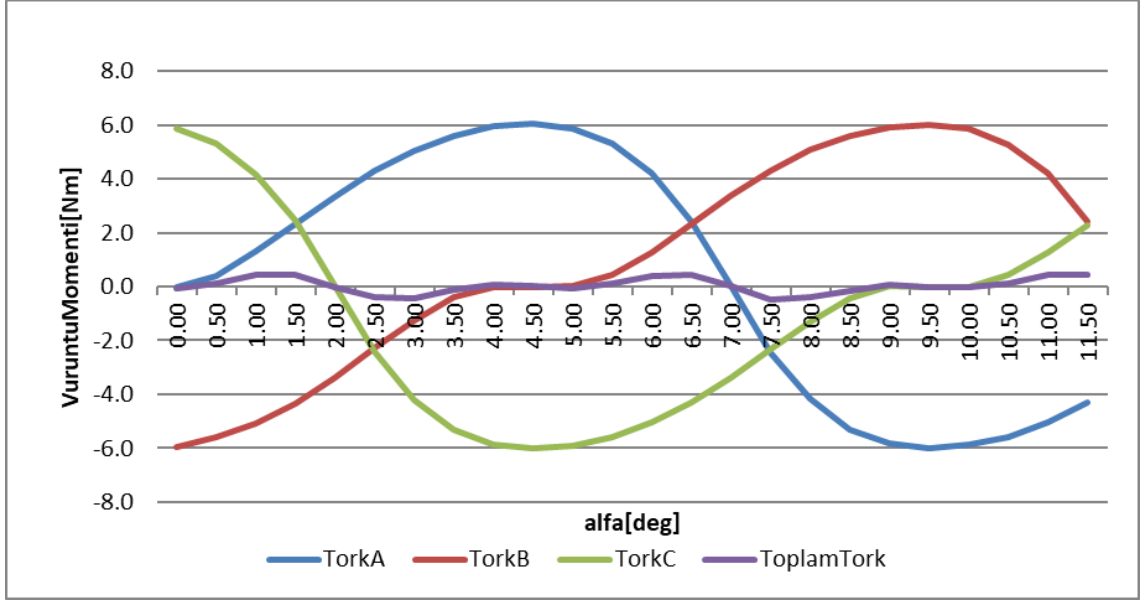
Şekil 3.10. Toplam vuruñtu torkunun rotor iç yarımçapı ile değişimi.

Enine akıllı makinelerde vuruñtu torkunu azaltmak için, nüvelere küçük oluklar açmak mıknatıs veya kutup uçlarının eğimli olması stator ve rotor disklerinde kaykık yapılması, stator ve rotorda simetrik olmayan kutupların kullanılması gibi yöntemler kullanılabilir [71]-[74]. Bu tezde üretim kolaylığı da dikkate alınarak Şekil 3.11'de görüldüğü gibi

mıknatıs kaykısının etkisi incelenmiştir. Mıknatıs kaykısı 0.5° olduğunda vuruntu torku azalırken, α büyüdükçe vuruntu torku tekrar artış göstermektedir. Buna göre en düşük vuruntu torku $\alpha = 0.5^\circ$ de görülmüştür. α açısı 0-1 derece arasında kaydırılarak vuruntu torkunun nasıl değiştiği gözlenmiştir. Şekil 3.12’de $\alpha = 0^\circ$ iken her bir fazdaki ve toplam vuruntu torku verilmiştir. Şekil 3.13’te $\alpha = 0^\circ$ ’deki toplam vuruntu torku verilmiştir. Şekil 3.14’te farklı kaydırma açılarındaki vuruntu torkları verilmiştir. Şekil 3.15’te $\alpha = 0.5^\circ$ iken vuruntu torkunun en düşük olduğu durum gösterilmiştir. Şekil 3.16’da α değeri büyüdükçe vuruntu torkunun tekrar arttığı gösterilmiştir. Şekil 3.17’de ise özet yapıp α açısıyla vuruntu torkunun değişimi gösterilmiştir.

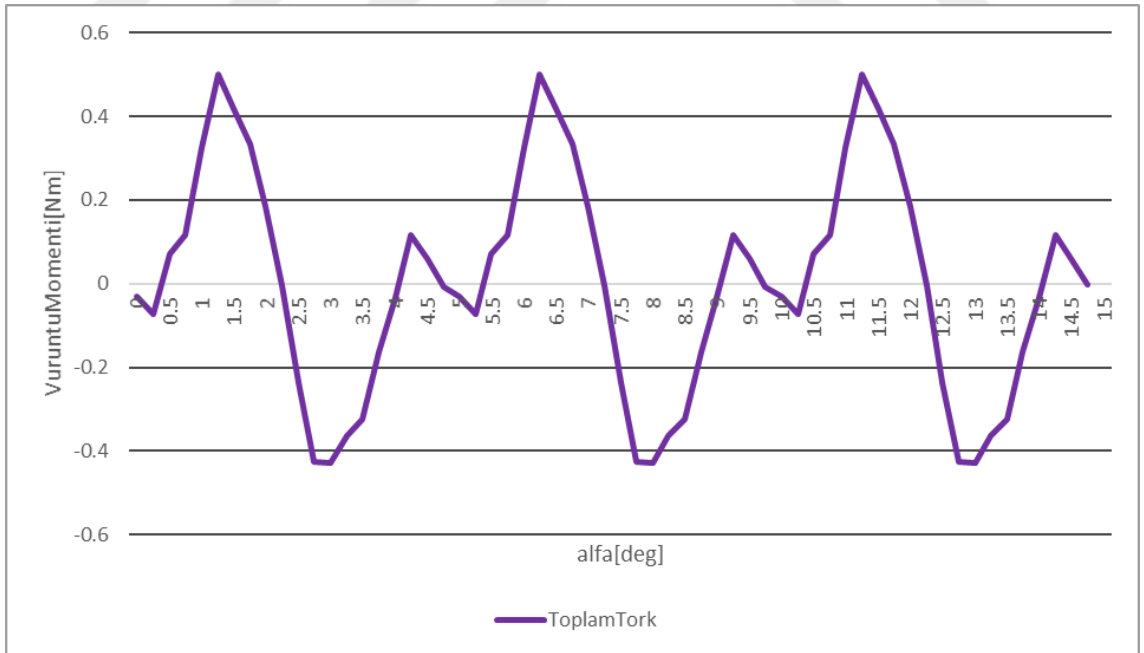


Şekil 3.11. Mıknatıs kaydırma yöntemi a) kaykısı=0 b) kaykısı= α



Şekil 3.12. Rotor pozisyonu 0 derecedeki vuruñtu torki değerleri.

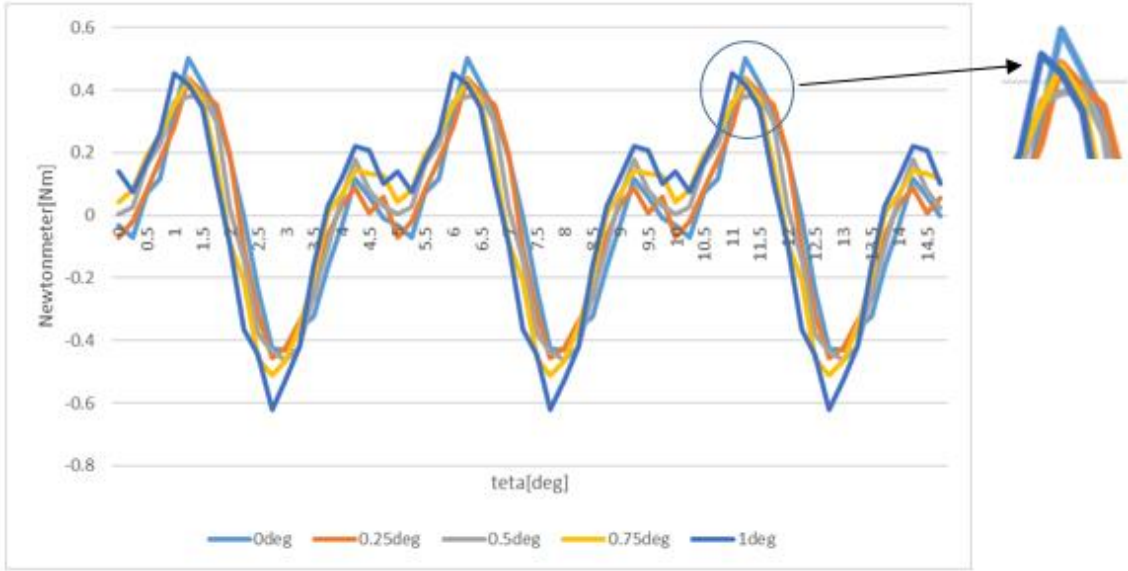
Şekil 3.11’de rotor pozisyonu 0 derece olduğunda fazlarda ve her fazın toplamı sonucu elde edilen toplam vuruñtu torki gösterilmektedir. Tasarlanan modele herhangi bir vuruñtu torki iyileştirme yapılmadığı zaman elde edilen sonuç yukarıdaki gibidir. Şekil 3.12’de ise 0 derecedeki vuruñtu torki daha anlaşılır bir şekilde verilmiştir.



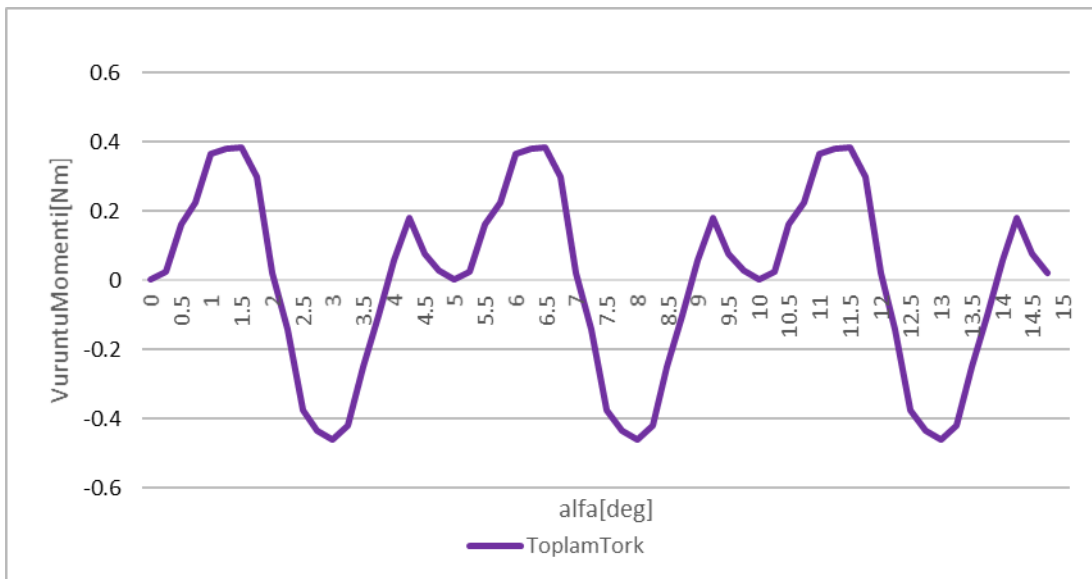
Şekil 3.13. Rotor pozisyonu 0 derecedeki toplam vuruñtu tork değeri.

Şekil 3.9 gösteriyor ki rotor iç yarıçapı küçüldükçe meydana gelen vuruñtu torki de düşmektedir. Farklı rotor iç yarıçaplarında yapılan zıt emk ve vuruñtu torki analizleri

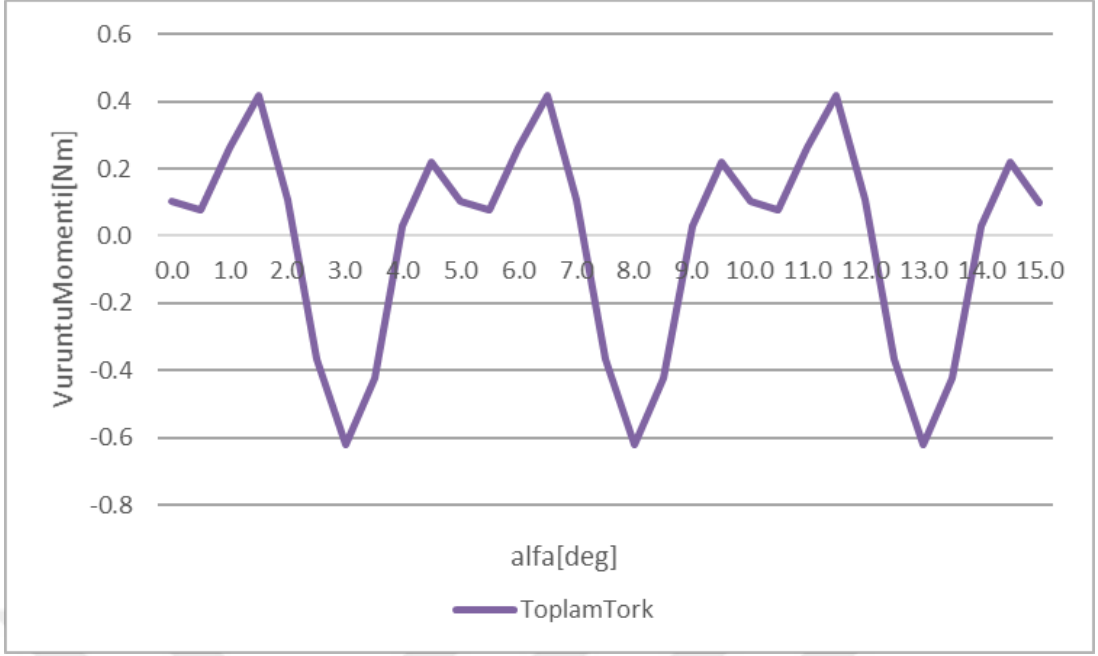
gösteriyor ki rotor iç yarıçapın 55 mm olduğu değer en makul olan değerdir. Bu bölümde faz başına 6 Nm gelen vuruñtu torki değeri rotor iç yarıçapı ve mıknatıs kaykısı yöntemiyle 0,38 Nm'ye düşürülmüştür. Literatürde vuruñtu torkunu düşürmek için başka yöntemler de vardır. Ueada ve arkadaşları endüvi sargılarının radyal olarak kaydırılması ile vuruñtu torkunun düştüğünü söylemiştir [75]. Dobzhanskyi ve arkadaşları enine akılı makinelerde manyetik köprü kullanarak vuruñtu torkunu azaltmaya çalışmışlardır [76].



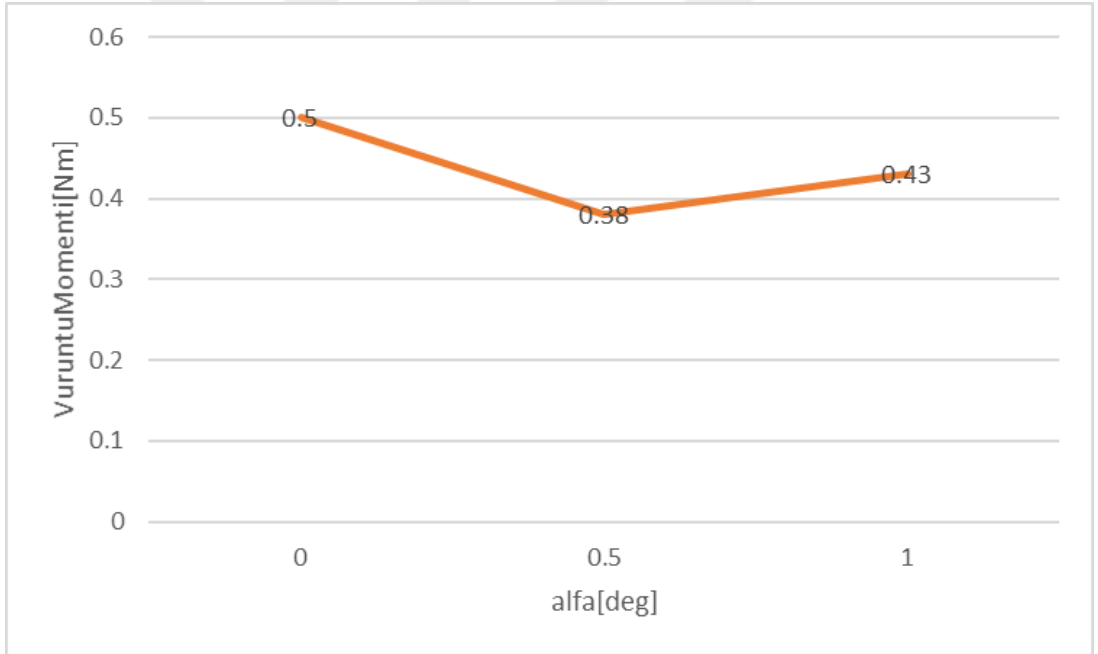
Şekil 3.14. Farklı kaydırma açılarında vuruñtu torkları.



Şekil 3.15. Rotor pozisyonu 0,5 derecedeki toplam vuruñtu tork değeri.



Şekil 3.16. Rotor pozisyonu 1 derecedeki toplam vuruntu tork değeri.

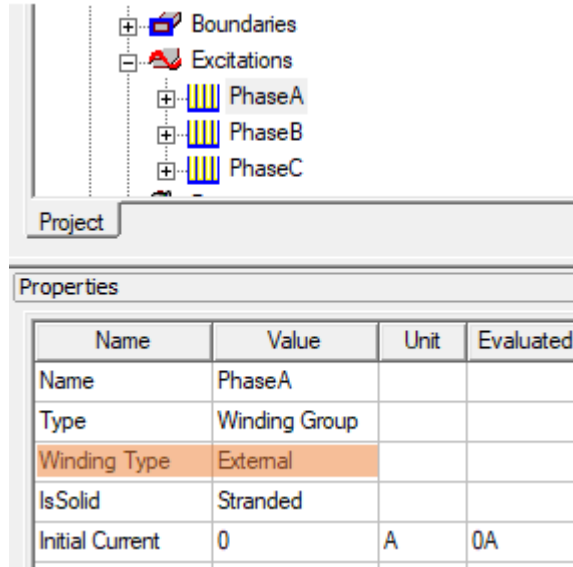


Şekil 3.17. Farklı açılarda vuruntu torki sonuçları.

3.5. EAM GENERATÖRDE REGÜLASYON VE GÜÇ ANALİZİ

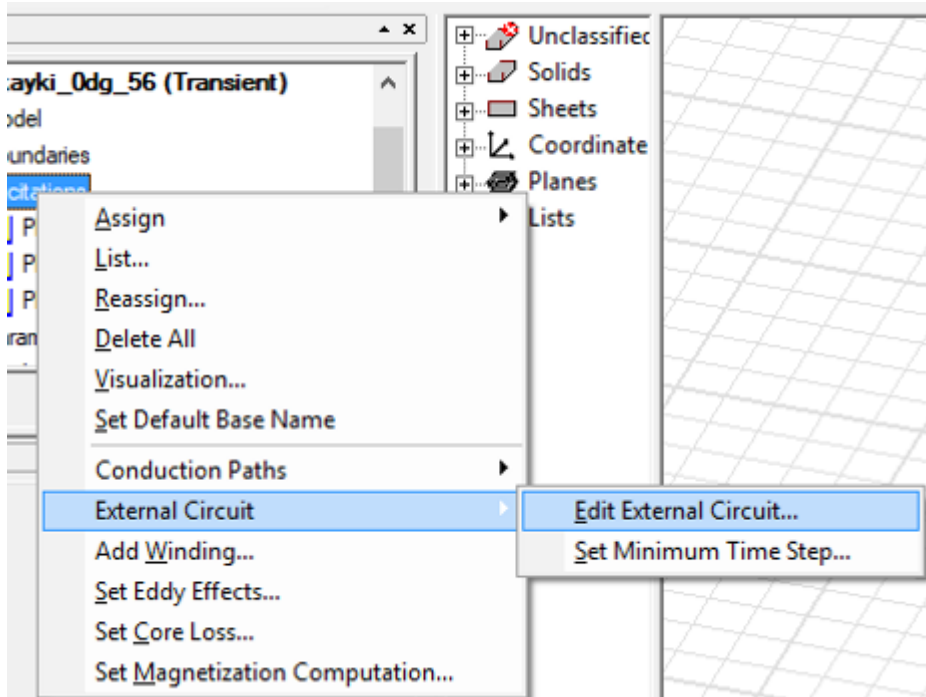
Bu bölümde generatörün çıkışına omik yük bağlanarak elde edilen güç hesaplanmıştır. ANSYS Maxwell programında tasarlanan model için L-R elektrik devresi oluşturulmuştur. Oluşturulan devrede 2 ohm, 3 ohm, 4 ohm, 4.7 ohm, 5 ohm, 6 ohm, 7 ohm ve 8 ohm değerleri kullanılarak generatörün ürettiği güç bulunmuştur. Program

üzerinde elektrik devresi oluşturmak için excitations>winding type sekmesinden external seçeneği seçilmiştir. Şekil 3.18 Maxwell programındaki external sekmesini göstermektedir.



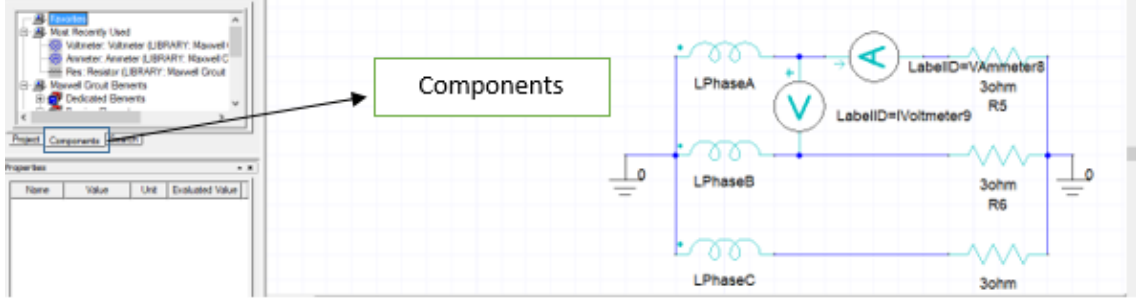
Şekil 3.18. External sekmesi.

Winding type seçildikten sonra excitations seçeneğine sağ tıklanıp external circuit ve ardından edit external circuit seçeneği seçilir. Şekil 3.19'da bu işlem gösterilmiştir.



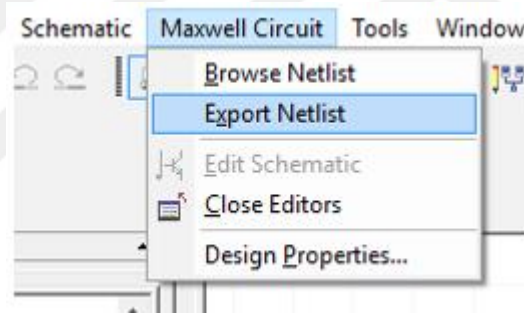
Şekil 3.19. Edit external.

Daha sonra açılan pencereden components sekmesi seçilir ve gerekli olan devre elemanları buradan seçilerek devre oluşturulur. Bu tezde oluşturulan devrede omik yükler yıldız olarak bağlanmıştır. Şekil 3.20’de oluşturulan devre ve bu devre elemanlarının nereden seçildiği gösterilmiştir.



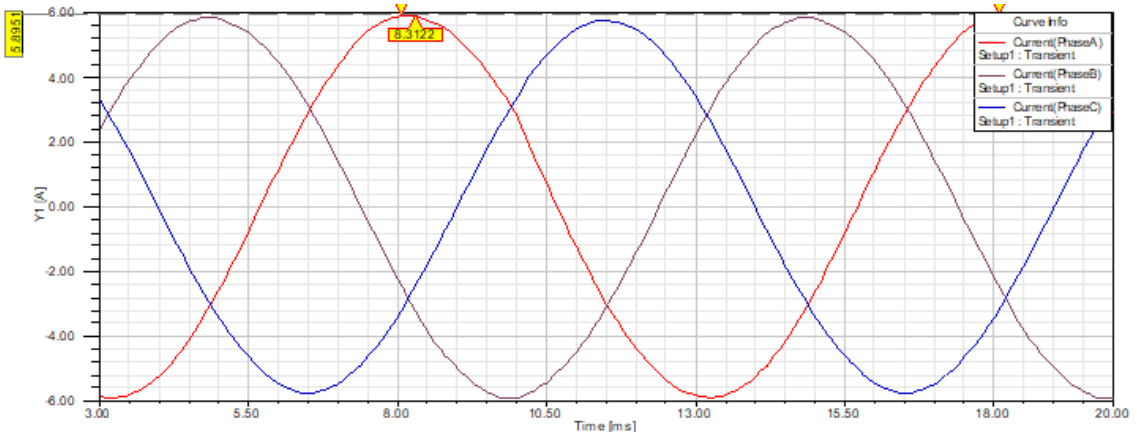
Şekil 3.20. Devre elemanı ekleme.

Oluşturulan devre kaydedildikten sonra Maxwell circuit > export sekmesine tıklanır ve dosya .sph uzantısı ile kaydedilir. Şekil 3.21’de bu işlem gösterilmiştir.

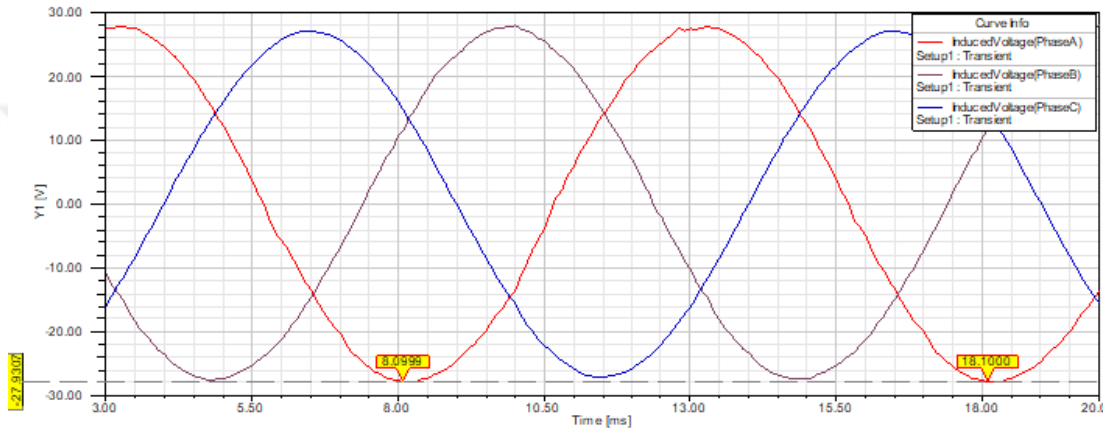


Şekil 3.21. Export etme sekmesi.

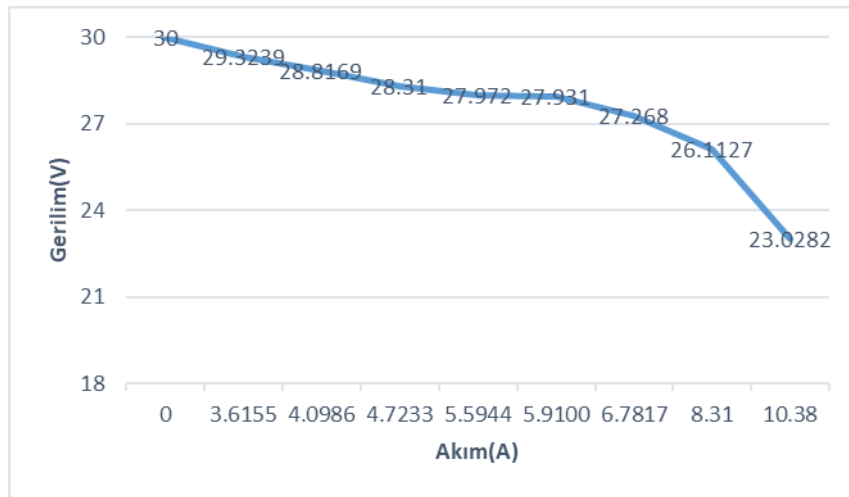
Maxwell programı üzerinde import circuit ekranı aktif olur. Buradan oluşturulan .sph dosyası seçilerek programa aktarılmış olur. Şekil 3.22 ve Şekil 3.23’te 4,7 ohm değeri için generatörün üretmiş olduğu faz akımları ve faz gerilimleri verilmiştir. Bu değer için generatörün üretmiş olduğu güç değeri 248 W değerindedir. Şekil 3.24 ve Şekil 3.25’te sırasıyla akım-gerilim ve akım-güç şekilleri verilmiştir.



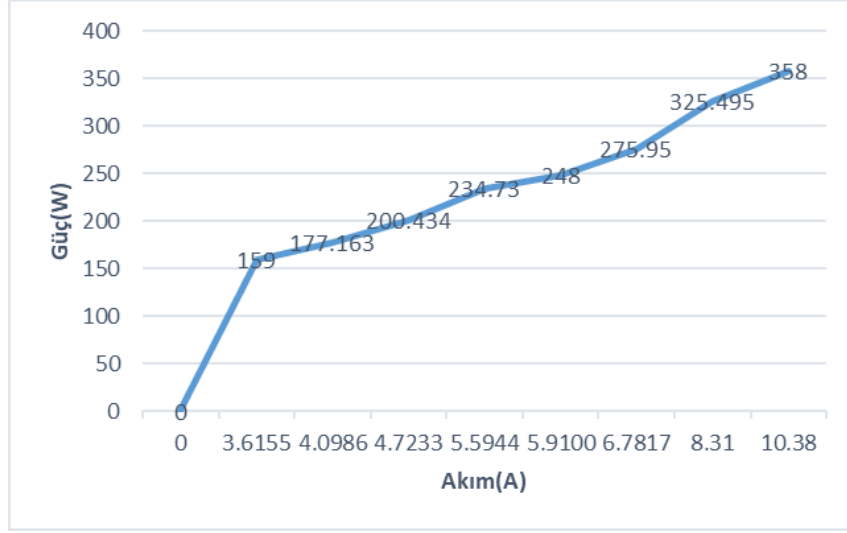
Şekil 3.22. Akım değerleri.



Şekil 3.23. Gerilim değerleri.



Şekil 3.24. Generatörün farklı yükler için ürettiği gerilim.



Şekil 3.25. Generatörün farklı yükler için ürettiği güç.



4. SONUÇLAR

Ülkemizin en temel sorunlarından biri artan enerji talebini karşılamakta yaşanan sıkıntılardır. Enerji talebini karşılamak için ülke koşullarının göz önünde bulundurulması ve bu koşullara uygun çözümlerin geliştirilmesi gerekir. Ülkemizde, enerji ihtiyacını karşılayan temel kaynakların başında gelen fosil kökenli yakıtlar yeteri kadar bulunmamaktadır. Fosil kökenli yakıtların ithalat yoluyla temini yurdumuza ek maliyet getirmektedir. Birçok ülkede olduğu gibi bizim ülkemizde de en fazla kullanılan enerji türlerinden biri elektrik enerjisidir. Elektrik enerjisinin elde edilme yöntemleri, ülke ekonomisini ve enerji problemlerinin çözümünü doğrudan etkilemektedir. Bundan dolayı, etkin ve ekonomik olarak elektrik enerjisi elde etme yöntemleri büyük bir önem teşkil etmektedir. Yapılacak etkin çalışmalarla, farklı teknikler kullanılarak, ülkemize katkı sağlayacak yerli imkan ve yöntemlerle elektrik enerjisi elde edilebilir. Elektrik enerjisini verimli ve uygun maliyetle elde edebilmenin temel şartlarından biri de uygun özellikte generatörler tasarlamak ve üretmektir. Yapılan literatür taramaları sonucunda, eksenel akılı sürekli mıknatıslı generatör tasarımı ve uygulamalarının dünya çapında, gün geçtikçe ilgi odağı haline geldiği kaçınılmaz bir gerçektir. Ülkemiz de ise bu konuyla ilgili pek çalışma yapılmamıştır. Bu sebeple bu tür çalışmaların ülke çapında geliştirilmesi önemlidir. Bu tezde tamamen özgün tasarımlarla enine akılı 3 fazlı disk şeklinde generatör tasarlanmıştır. 250 W güç olarak tasarlanan generatörün farklı yük altında vermiş olduğu değerler Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'te verilmiştir. 4,7 ohm değeri için generatörün gücü 248 W olarak hesaplanmıştır. Enine akılı makinelerde problem olarak karşımıza çıkan vuruğu momenti 6 Nm'den 0,38 Nm'ye düşürülmüştür. Vuruğu momentini düşürmek için 3 fazlı disk model oluşturulmuş ve mıknatıs kaykısı yöntemi kullanılmıştır. Bu sonuçlara göre önerilen disk tipi enine akılı makine rüzgâr türbinleri ve elektrikli araçlar gibi moment uygulamalarında kullanılabilir. Daha önce incelenmemiş olan disk tipi 3 fazlı enine akılı makine bu tez ile literatüre kazandırılmıştır.

5. KAYNAKLAR

- [1] T. Husain, I. Hasan, Y. Sozer, I. Husain, and E. Muljadi, "Design considerations of a transverse flux machine for direct-drive wind turbine applications," *IEEE Energy Conv. Cong. and Expo. (ECCE)*, Milwaukee, WI, ss. 1-8, 2016.
- [2] J. R. Bumby, and R. Martin, "Axial-flux permanent-magnet air-cored generator for small-scale wind turbines," *Proc. IEE- Electrical Power Appl.*, c. 152, sayı 5, ss. 63-73, 2006.
- [3] E. Yıldırım, ve M. T. Aydemir, "Küçük güçlü bir rüzgâr jeneratöründe kullanım için aksel akıllı bir sürekli mıknatıslı motorun analizi, tasarımı ve gerçekleştirilmesi," *Gazi Üniv.Müh.Mim.Fak.Der.*, c. 24, sayı 3, ss.525-531, 2009.
- [4] S. P. Barave, and B. H. Chowdhury, "Optimal design of induction generators for space applications," *IEEE Trans. Aerospace Electron. Sys.*, c. 45 sayı 3, ss. 1126-1137, 2009.
- [5] B. P. Singh, and S. Dwivedi, S, "A state of art on different configurations of parmenent magnet magnet brushless machines," *IE (I) Journal –El*, 7 c. 7, sayı 8, ss. 63-73, 2006.
- [6] N. Brown, and L. Haydock, L, "Full integration of an axial flux machine for reciprocating engine variable speed generating sets," *IEE Seminar, Axial Air-gap machines*, c. 6, sayı 16, ss. 1-10, 2001.
- [7] E. Yıldırım, ve M. T. Aydemir, "Küçük güçlü bir rüzgâr jeneratöründe kullanım için aksel akıllı bir sürekli mıknatıslı motorun analizi, tasarımı ve gerçekleştirilmesi," *Gazi Üniv.Müh.Mim.Fak.Der.* c. 24, sayı 3, ss. 525-531, 2009.
- [8] D. Guannan, W. Haifeng, G. Hui, and G. Guobiao G, "Direct drive permanent magnet wind generator design and electromagnetic field finite element analysis," *IEEE Tran. Appl. Superconductivity*, c. 20, sayı 3, ss. 1833-1887, 2010.
- [9] W. Wu, V. S. Ramsden, T. Crawford, and G. Hill, "A low speed, high-torque, direct-drive permanent magnet generator for wind turbines," *Industry Applications Conference IEEE*, Rome, 2000, c. 1, sayı 10, ss. 147-154.
- [10] H. Polinder, F.F.A. Van der Pijl, G.-J. De Vilder, and P.J. Tavner, "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines," *IEEE Trans. Energy Convers.*, c.21, sayı 3, ss. 753-733, 2006.
- [11] H. Weh, and H. May, "Achievable Force Densities for Permanent Magnet Excited Machines in New Configurations," *Proceedings of the International Conference on Electrical Machines*, c. 3, ss. 1107- 1111, Munich, 1986, Germany.
- [12] R.R. Wallace, T.A. Lipo, L.A. Moran, and J.A. Tapia, "Design and construction of a permanent magnet axial flux synchronous generator," *Electric Machines and Drives Conference IEEE*, Milwaukee, 1997, MA1/4.1 - MA1/4.3.

- [13] M. A. Rahman, "Analytical models for exterior type permanent magnet synchronous motors," *IEEE Trans. on Magnetics*, c. 23, sayı 5, ss. 3625-3627, 1987.
- [14] J.R. Bumby, and R. Martin, "Axial flux permanent magnet generator for engine integration," *Published at the 12th International Stirling Engine Conference*, 2005 Durham.
- [15] N. Al-Aawar, T. M. Hijazi, and A.A. Arkadan, "Design optimization of axial-flux permanent magnet generator," *Electromagnetic Field Computation (CEFC), 2010 14th Biennial IEEE Conference*, 2010, Chicago.
- [16] M. Mayouf, and A. Rachid, "Modeling and optimization of wind turbine driving permanent magnet synchronous generator," *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering JJMIE*, c. 5, sayı 6, ss. 489-494, 2011.
- [17] J.R. Bumby, and R. Martin, "Axial flux permanent magnet generator for engine integration," *Published at the 12th International Stirling Engine Conference*, 2005, Durham.
- [18] D. Patterson, and R. Spee, "The design and development of an axial flux permanent magnet brushless DC motor for wheel drive in a solar powered vehicle," *IEEE Industrial Applications Society Conf.*, Denver, c. 1, ss. 188-195, 1994.
- [19] N. Al-Aawar, T.M. Hijazi, and A.A. Arkadan, "Design optimization of axial-flux permanent magnet generator," *Electromagnetic Field Computation (CEFC), 2010 14th Biennial IEEE Conference*, 2010, Chicago.
- [20] B. Xia, M.J. Jin, J.X. Shen, and A.G. Zhang, "Design and analysis of an air-cored axial flux permanent magnet generator for small wind power application," *Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2010 IEEE International Conference*, Kandy, 2010, Sri Lanka, ss. 1-5.
- [21] M. Sadeghierad, H. Lesani, H. Monsef, and A. Darabi, "Detail modeling of high speed axial flux pm generator," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, c. 3, sayı 2, ss. 1467-1475, 2009.
- [22] H. Min-Fu, D.G. Dorrell, Y. Yu-Han, and S. Ekram, "Cogging torque reduction in axial flux machines for small wind turbines," *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE*, Porto, 2009, ss. 4435 – 4439.
- [23] W.M. Arshad, T. Backstrom, and C. Sadarangani, "Analytical Design and Analysis Procedure for A Transverse Flux Machine," *IEMDC 2001, IEEE International Electric Machines and Drives Conference*.
- [24] S. Hosseini, J. S. Moghani, N. F. Ershad, and B. B. Jensen, "Design, Prototyping, and Analysis of a Novel Modular Permanent-Magnet Transverse Flux Disk Generator," *in IEEE Transactions on Magnetics*, c. 47, sayı. 4, ss. 772-780, 2011.
- [25] B. Deok-Je, P. Henk, S. Ghanshyam, and A.F. Jan, "Ring-Shaped Transverse Flux PM Generator for Large Direct-Drive Wind Turbines," *Power Electronics and Drive Systems*,. PEDS 2009, International Conference.

- [26] H. Don-Ha, L. Ki-Chang, K. Do-Hyun, K. Yong-Joo, C. Kyeong-Ho, and P. C., Doh-Young, "An modular-type axial-flux permanent magnet synchronous generator for gearless wind power systems," *Industrial Electronics Society, IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE*, 2004, c. 2, sayı 1396 – 1399.
- [27] G. Xiao, X. Yanliang, and S. Wenxin," Design of Novel Disc Transverse Flux Permanent Magnet Machine," *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Hangzhou, 2014, China.
- [28] J.R. Bumby, and R. Martin, "Axial flux permanent magnet generator for engine integration," *Published at the 12th International Stirling Engine Conference, 2005*, Durham.
- [29] N. Al-Aawar, T.M. Hijazi, and A.A. Arkadan, "Design optimization of axial-flux permanent magnet generator," *Electromagnetic Field Computation (CEFC), 2010 14th Biennial IEEE Conference*, 2010, Chicago.
- [30] M. Mayouf, and A. Rachid, "Modeling and optimization of wind turbine driving permanent magnet synchronous generator," *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering JJMIE*, c. 5, sayı 6, ss. 489-494, 2011.
- [31] R. B. Mignot, C. Espanet, D. Chamagne and T. Martin, "Modeling of an Axial Flux PM Motor Using a 3D Magnetic Equivalent Circuit," *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Coimbra, 2014, ss. 1-9.
- [32] N.Z. Reza, A. Akbar Mohammadi, and A. Karim, "Proposing the Output Equations and 3-D MEC Modeling for U-Core TFPM Generators," *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. 2018.
- [33] I. Hasan, T. Husain, Y. Sozer, I. Husein, and E. Mulhadi," Analytical Model-Based Design Optimization of a Transverse Flux Machine," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Milwaukee, WI, 2016, USA.
- [34] P. Bastawade, B. N. Chaudhari, R.T. Ugale, and A. Pramanik, "Analytical and FEA based Analysis of Homopolar Poly-Phase Transverse Flux Machine," *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, 2016, (PEDES).
- [35] P. Jenni, M. Aino, K. Janne, and T. Kari, "Torque Density of Radial, Axial and Transverse Flux Permanent Magnet Machine Topologies," *IEEE Transactions On Magnetics*, c. 49, sayı 5, 2013.
- [36] B. Mohamed el Hadi, H. Mabrouk, and M. Fabrizio," Electromagnetic Design and Analysis of a Novel Axial-Transverse Flux Permanent Magnet Synchronous Machine," *Electric Power Components and Systems*, ss. 1–13, 2017.
- [37] B.A. Tovar, D. J. Gómez, H. A. López, and I. Villar, "High torque density transverse flux permanent magnet machine design for wind power generation," *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, 2016, ss. 782-788.
- [38] J. Zou, L. Heyun, F. Shuhua, and H. Yunkai, "A Novel Transverse Flux Permanent Magnet Generator With Double C-Hoop Stator and Flux-Concentrated Rotor," in *IEEE*

Transactions on Magnetics, c. 51, sayı 11, ss. 1-4, 2015.

[39] K. Bouqan, Y. Xiaobao, Z. Yiheng, L. Jun, and Z. Lu, "Analysis and optimization of a novel out-rotor transverse flux motor for direct-drive application," *2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, China, 2016, ss. 1-5.

[40] L. Jian, C. Da-Woon, and C. Y. Hyun, "Development of a natural cooled axial flux permanent magnet generator for wind turbine," *Industrial Electronics (ISIE), IEEE International Symposium*, Hangzhou, 2012, ss. 635-640.

[41] U. Yasuhito, T. Hiroshi, O. Akihito, and S. Takamitsu, "Experimental study on cogging-torque reduction of transverse-flux motor with skewed armature cores," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, c. 11, sayı 1, 2017.

[42] Y. Ueda, H. Takahashi, A. Ogawa, T. Akiba, and M. Yoshida, "Cogging-Torque Reduction of Transverse-Flux Motor by Skewing Stator Poles," in *IEEE Transactions on Magnetics*, c. 52, sayı 7, ss. 1-4, 2016.

[43] M. Aydin, "Magnet skew in cogging torque minimization of axial gap permanent magnet motors," *2008 18th International Conference on Electrical Machines, Vilamoura*, 2008, ss. 1-6.

[44] L. Cheng, Z. Jianguo, W. Youhua, L. Gang, and G. Youguang, "Cogging Torque Minimization of SMC PM Transverse Flux Machines Using Shifted and Unequal-Width Stator Teeth," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, c. 26, sayı 4, ss. 1-4, 2016.

[45] N. Mohammad Ali, M.S. Javad, and Y. Reza, "Passive-rotor disk-shaped transverse-flux permanent-magnet generator for small wind turbine application," *The 6th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC2015)*, Tehran, ss. 25-28, 2015.

[46] O. Dobzhanskyi, R. Gouws, and E. Amiri, "Comparison analysis of PM transverse flux outer rotor machines with and without magnetic shunts," *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Milwaukee, 2016, WI, ss. 1-8.

[47] N. Levin, S. Orlova, V. Pugachov, B. Ose-Zala, and E. Jakobsons, "Methods to Reduce the Cogging Torque in Permanent Magnet Synchronous Machines," *Elektronika Ir Elektrotehnika*, c. 19, sayı 1, ss. 1392-1215, 2013.

[48] J.F. Gieras, "Performance Characteristics of a Transverse Flux Generator," *IEEE Int. Conference on Electric Machines and Drives*, 2005, ss. 1293-1299.

[49] Z. Gheidari, and N. H. Lesani, *A Survey on Axial Flux Induction Motors*, 18 Temmuz 2017 tarihinde www.pe.org.pl/articles/2012/2/72.pdf adresinden alındı.

[50] M. J. Kamper, J.F. Gieras, and R.J.J. Wang, "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines," *Springer*, ss. 2-12, 2008.

[51] E. Spooner, and B.J. Chalmers, 'TORUS': A slotless, toroidal-stator permanent magnet generator. In *IEE Proc. Electric Power Applications*, c. 139, sayı 2, ss. 497-506.

- [52] E. Yıldırım, ve M.T. Aydemir, “Küçük güçlü bir rüzgâr jeneratöründe kullanım için aksel akıllı bir sürekli mıknatıslı motorun analizi, tasarımı ve gerçekleştirilmesi,” *Gazi Üniv.Müh.Mim.Fak.Der.*, c. 24, sayı 3, ss. 525-531, 2009.
- [53] E. Muljadi, C.P. Butterfield, and Y.H. Wan, “ Axial-flux modular permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind-turbine applications,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, c. 35, sayı 4, ss. 831-836, 1999.
- [54] H. Weh, “Transverse Flux Machines in Drive and Generator Application,” *Proceedings of IEEE Int. Symposium on Electric Power Engineering PowerTech*, 1995, ss. 75-80, Stockholm, Sweden.
- [55] T. Husain, Y. Sozer, I. Husain, and E. Muljadi,” Design of a modular E-Core flux concentrating axial flux machine,” *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal, QC, 2015, ss. 5203-5210.
- [56] T. Husain, I. Hasan, Y. Sozer, I. Husain, and E. Muljadi,” Design considerations of a transverse flux machine for direct-drive wind turbine applications,” *IEEE Energy Conv. Cong. and Expo. (ECCE)*, Milwaukee, 2016, WI, ss. 1-8.
- [57] T. Husain, Y. Sozer, I. Husain, and E. Muljadi,” Design of a modular E-Core flux concentrating axial flux machine,” *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal, 2015, QC, ss. 5203-5210.
- [58] A. Chen, R. Nilssen, and A. Nysveen, “Performance Comparisons Among Radial-Flux, Multistage Axial-Flux, and Three-Phase Transverse-Flux PM Machines for Downhole Applications,” *Ieee Transactions On Industry Applications*, c. 46, sayı 2, 2010.
- [59] C. Yicheng, P. Pillay, and A. Khan, "PM wind generator comparison of different topologies," *Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting*, c. 3, ss. 1405-1412.
- [60] L. Soderlund, and J-T. Eriksson, “A permanent-magnet generator for wind power applications,” *IEEE Trans. Magn.*, c. 32, sayı 4, ss. 2389-2392, 1996.
- [61] J.F. Gieras, R.J. Wang, and M. J. Kamper, "Axial flux permanent magnet brushless machines," *2nd Edition, Springer*, 2008.
- [62] X. Gong, Y. Xu, and W. Song, “Design of Novel Disc Transverse Flux Permanent Magnet Machine,” *17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Hangzhou, 2014, China.
- [63] P. Bastawade, B. N. Chaudhari, R.T. Ugale, and A. Pramanik, “Analytical and FEA based Analysis of Homopolar Poly-Phase Transverse Flux Machine,” *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, 2016, (PEDES).
- [64] S. Huang, J. Luo, and T. A. Lipo, “Analysis and Evaluation of the Transverse Flux Circumferential Current Machine,” *IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, 1997, New Orleans, Louisiana.
- [65] T. Gundogdu and G. Komurgoz, "The impact of the selection of permanent magnets on the design of permanent magnet machines—a case study: Permanent magnet

synchronous machine design with high efficiency," *Przeegląd Elektrotechniczny* 89.3a, ss. 103-108, 2013.

[66] T. F. Chan, L. L. Lai, and X. Shuming, "Field Computation for an Axial Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator," *Energy Conversion, IEEE Transaction*, c. 24, sayı 1, ss. 1-11, 2009.

[67] D. Guannan, W. Haifeng, G. Hui, and G. Guobiao, "Direct drive permanent magnet wind generator design and electromagnetic field finite element analysis," *IEEE Tran. Appl. Superconductivity*, c. 20, sayı 3, ss. 1883-1887, 2010.

[68] A. Fenercioğlu, ve İ. Tarımer, "Bir manyetik sistemin maxwell 3d alan simülatorü ile statik manyetik analizinin çözüm süreçleri," *Selçuk University, Journal of Technical, Online Volume* , c. 6, sayı 3, 2006.

[69] B. Xia, M. J. Jin, J. X. Shen, and A. G. Zhang, "Design and analysis of an air-cored axial flux permanent magnet generator for small wind power application," *Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2010 IEEE International Conference*, Kandy, 2010, Sri Lanka, ss. 1-5.

[70] J.G. Washington, G.J. Atkinson, and N.J. Baker," Reduction of Cogging Torque and EMF Harmonics in Modulated Pole Machines," *IEEE Transactions On Energy Conversion*, c. 31, sayı 2, 2016.

[71] T. Srisiriwanna and M. Konghirun, "A study of cogging torque reduction methods in brushless dc motor," *2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Phetchaburi, 2012, ss. 1-4.

[72] Y. Wang, J. Shen, Z. Fang, and W. Fei, "Reduction of Cogging Torque in Permanent Magnet Flux-Switching Machines," *Electromagnetic Analysis and Applications*, c. 1 sayı 1, 2009.

[73] M. Aydin, "Magnet skew in cogging torque minimization of axial gap permanent magnet motors," *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, Vilamoura, 2008, ss. 1-6.

[74] Y. Ueda, H. Takahashi, A. Ogawa, T. Akiba and M. Yoshida, "Cogging-Torque Reduction of Transverse-Flux Motor by Skewing Stator Poles," *in IEEE Transactions on Magnetics*, c. 52, sayı 7, ss. 1-4, 2016.

[75] U. Yasuhito, T. Hiroshi, O. Akihito, and S. Takamitsu," Experimental study on cogging-torque reduction of transverse-flux motor with skewed armature cores," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, c. 11, sayı 1, 2017.

[76] O. Dobzhanskyi, R. Gouws, and E. Amiri, "Comparison analysis of PM transverse flux outer rotor machines with and without magnetic shunts," *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Milwaukee, 2016, WI, ss. 1-8.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Burak Can
Doğum Tarihi ve Yeri : 15.07.1991, Düzce
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : zkuburak@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Zonguldak Karaelmas Üniversitesi	2015
Lise		Gümüşova İMKB Anadolu Lisesi	2009

YAYINLAR

CAN, B., & YILDIRIZ, E. (2019). Enine Akıllı Makinelere Genel Bir Bakış Ve Yeni Bir Enine Akıllı Disk Makine Modeli. Presented at the Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (Bahar) (IMASCON), KOCAELİ.