

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞRUDAN TAHRIKLİ RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN ENİNE-EKSENEL
AKILI KALICI MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Enes Selman EGE**

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

EYLÜL 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞRUDAN TAHRİKLİ RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN ENİNE-EKSENEL
AKILI KALICI MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Enes Selman EGE

(504071023)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31 Ağustos 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 02 Eylül 2009

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Deniz YILDIRIM (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ (İTÜ)

Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU (İTÜ)

EYLÜL 2009

Anneme, babama ve kardeşlerime,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak hazırlanmış bu çalışmada, bir buçuk yıllık zaman zarfında ilk günden son güne kadar her konuda beni aydınlatan, bana destek veren ve zaman ayırıp bilgi birikimini paylaşan danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Deniz Yıldırım'a, kardeşlerime, moral ve desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme, Yrd. Doç. Dr. Güven Kömürgöz'e ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürleri, kendime bir borç bilirim.

Ağustos 2009

Enes Selman Ege
(Elektrik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi	1
1.2 Rüzgâr Türbinlerinin Gelişmesi	4
1.3 Rüzgâr Enerjisinin Maddi Açıdan İncelenmesi	5
1.4 Tezin İçeriği	8
2. SABİT ve DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGÂR TÜRBİNİ SİSTEMLERİ.....	9
3. ENİNE-EKSENEL AKILI KALICI MIKNATISLI MAKİNELER	15
3.1 Klasik İç Rotorlu Enine-Eksenel Akıllı Makine	15
3.2 Çift Statorlu Enine-Eksenel Akıllı Makine.....	18
3.3 Pençeli Statorlu Enine-Eksenel Akıllı Makine	19
3.4 Dış Rotorlu Enine-Eksenel Akıllı Makine	21
3.5 Enine-Eksenel Akıllı Makineler Hakkında Genel Bilgi	22
4. YENİ ÇİFT ROTORLU ENİNE-EKSENEL AKILI KALICI	
 MIKNATISLI GENERATÖRÜN HESAPLAMALI ANALİZİ	25
4.1 Giriş	25
4.2 Çift Rotorlu Enine-Eksenel Akıllı Makinenin Yapısı ve Çalışma Prensibi.....	25
4.3 Çift Rotorlu Enine-Eksenel Makinede Kullanılan Malzemeler	29
4.4 Endüklenen Gerilim Hesabı.....	32
4.5 Gerilim Dalgasının Harmonik Hesabı	36
4.7 Sargı Kesiti Hesabına Bağlı Olarak Stator Dışının ve Makinenin Diğer	
Boyutlarının Belirlenmesi	47
4.7.1 Sargı kesiti	47
4.7.2 Stator ve rotor gövdelerinin hacim hesabı.....	49
4.9 Makinedeki Aktif Malzemelerin Kütlesinin Hesaplanması.....	51
4.9.1 Demir çekirdek kütlesi	51
4.9.2 Kalıcı mıknatısların kütlesi.....	51
4.9.3 Armatür sargısının kütlesi	52
4.10 Relüktans ve Armatür Reaktansı Hesabı	52
4.11 Makinedeki Kayıpların Hesabı.....	54
4.11.1 Bakır kayıpları	54
4.11.2 Demir kayıpları	54
4.12 Aktif Malzeme Maliyet Raporu	55

5. ÇİFT ROTORLU ENİNE-EKSENEL AKILI SABİT MİKNATISLI GENERATÖRÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ.....	57
5.1 Giriş.....	57
5.2 Çift Rotorlu Enine-Eksenel Akılı Makinenin Üç Boyutlu Analizi.....	57
6. SONUÇ ve ÖNERİLER	67
6.1 Çalışmanın Uygulama Alanı	68
6.2 Düşünce ve Hedefler	68
7. KAYNAKLAR.....	69

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Ülkelerin toplam kurulu rüzgâr santrali güçleri (2009’a kadar) [4]	3
Çizelge 1.2 : Ülkelerin 2008 yılında kurdukları toplam rüzgâr santralleri gücü [4]	3
Çizelge 1.3 : 2006 yılı fiyatlarına göre Avrupa’da 2 MW’lık tipik bir rüzgâr türbininin ortalama kurulum masrafları [2]	6
Çizelge 1.4 : Farklı santral tiplerinin maliyet (2007 fiyatları), verim ve kaynaklar açısından karşılaştırılması [7]	7
Çizelge 4.1 : Tasarım makinesinin anma büyüklükleri	38
Çizelge 4.2 : Makinenin demir çekirdeklerinin hacmi	50
Çizelge 4.3 : Makinedeki aktif malzemelerin kütlesi	52
Çizelge 4.4 : Makinenin anma değerleri ve boyutları	52
Çizelge 4.5 : Manyetik devredeki relüktans değerleri	54
Çizelge 4.6 : Aktif malzemelerin toplam maliyetleri	55

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Yıllara göre dünya ve AB'deki toplam rüzgâr santrali kurulu gücü [2].....	2
Şekil 1.2 : Gelecekte tüm dünyadaki toplam rüzgâr santrali kurulu güç tahmini [3]	2
Şekil 1.3 : Son dokuz yılda Türkiye'deki kurulu güç değişimi [4]	4
Şekil 1.4 : Kullanılan türbin rotoru kanat açıklıklarının zamanla artması [2]	5
Şekil 1.5 : İki farklı rüzgâr santralinde birim enerji masrafının bölgelere göre değişimi [2]	6
Şekil 2.1 : Sabit ve değişken hızlı sistemlerde rüzgâr hızına bağlı güç üretimi [12]	10
Şekil 2.2 : Değişken hızlı sistemlerde anma hızının altında dönüş hızının kontrolü	11
Şekil 2.3 : Değişken hızlı sistemlerde anma hızının üstünde dönüş hızının kontrolü	11
Şekil 2.4 : Ölçülen türbin hızının kontrolüne göre üretilen güç [12]	12
Şekil 2.5 : Sabit hızlı, kafesli asenkron generatörlü sistem [13]	12
Şekil 2.6 : Değişken hızlı, bilezikli asenkron generatörlü sistem [13]	13
Şekil 2.7 : Değişken hızlı, senkron generatörlü sistem [13]	13
Şekil 2.8 : Değişken hızlı sistemlerde çıkış gücünün hıza göre değişimi ve maksimum güç eğrisi	14
Şekil 3.1 : Klasik iç rotorlu EEAM [18]	15
Şekil 3.2 : Klasik iç rotorlu EEAM [25]	16
Şekil 3.3 : (a) İç rotorlu ve köprülü EEAM, (b) İç rotorlu, köprülü ve yoğunlaştırılmış akıllı EEAM [26]	17
Şekil 3.4 : İç rotorlu, iki taraflı "C" stator yapısı [27]	18
Şekil 3.5 : Çift statorlu, tek rotorlu EEAM [28]	18
Şekil 3.6 : (a) Çift statorlu, tek rotorlu, yoğunlaştırılmış akıllı EEAM, (b) Çift statorlu, tek rotorlu, yoğunlaştırılmış akıllı EEAM kesiti ve üzerindeki akı yolları [29]	19
Şekil 3.7 : Pençeli statorlu EEAM ve makinedeki akı yolları [23]	20
Şekil 3.8 : Başka bir tip pençeli statorlu EEAM ve makinedeki akı yolları [22]	20
Şekil 3.9 : Üç fazlı dış rotorlu EEAM [8]	21
Şekil 3.10 : (a) Dış rotorlu EEAM statoru, (b) Dış rotorlu EEAM rotoru [31]	22
Şekil 4.1 : Yeni çift rotorlu EEAM'yi oluşturan elemanlar	26
Şekil 4.2 : Birinci stator takımına ait bir dişin üzerindeki manyetik akı yolları	27
Şekil 4.3 : (a) Çift rotorlu EEAM'nin tek fazının görünümü, (b) Çift rotorlu EEAM'nin tek fazının başka bir görünümü	28
Şekil 4.4 : (a) Üç fazlı çift rotorlu EEAM görünümü, (b) Fazların arasındaki 120°'lik faz farkı	28
Şekil 4.5 : Çeşitli mıknatısların demanyetizasyon eğrileri [33]	29
Şekil 4.6 : Kalıcı mıknatısların gelişimi ve maksimum enerji seviyeleri [34]	30
Şekil 4.7 : Farklı mıknatıs tiplerinde maksimum BH enerji seviyesinin çalışma sıcaklığına bağlı değişimi [34]	30

Şekil 4.8 : N44 tipi kalıcı mıknatısın mıknatıslanma eğrileri.....	31
Şekil 4.9 : Stator ve rotor gövdesi için kullanılan çelik alaşımın BH-eğrisi	32
Şekil 4.10 : Rotorun hareketi sonucu statordaki akının ve endüklenen gerilimin dalga şekilleri	35
Şekil 4.11 : Endüklenen gerilim dalgasının ilk üç bileşeni	37
Şekil 4.12 : Stator dışındaki akı dalgasının ilk üç bileşeni.....	37
Şekil 4.13 : Bir stator ve iki rotordan oluşan manyetik devre ve akıların güzergâhı.....	39
Şekil 4.14 : Seçilen mıknatısın mıknatıslanma eğrisi ve makine anma gücünde çalışırken mıknatısın yük eğrisi	42
Şekil 4.15 : Makine boşta ve tam yükte çalışırken, mıknatısların yük eğrisi.....	44
Şekil 4.16 : (a) Stator dışına ait bazı büyüklükler, (b) İç rotor ve üzerindeki mıknatıslara ait bazı büyüklükler	46
Şekil 4.17 : Statorun eksenel gövde kesit alanının geniş hava aralığı uzunluğuna göre değişimi.....	46
Şekil 4.18 : Makine parçaları üzerinde büyüklüklerin gösterilmesi (ölçekli)	48
Şekil 4.19 : Sargı öz direncinin sıcaklığa bağlı değişimi	51
Şekil 4.20 : (a) Makinenin bir çift kutbunun görünümü (ölçekli), (b) Bir stator dişi için oluşturulan manyetik devre ve relüktanslar.....	53
Şekil 5.1 : Simülasyonu yapılan makine parçası	58
Şekil 5.2 : Makine parçasında oluşturulan sonlu elemanlar ağ yapısı	59
Şekil 5.3 : Boşta çalışmada verilen xz-düzleminde manyetik akı yoğunluğu dağılımı.....	60
Şekil 5.4 : Boşta çalışmada verilen xy-düzleminde manyetik akı yoğunluğu dağılımı.....	61
Şekil 5.5 : Boşta çalışmada verilen yz-düzleminde manyetik akı yoğunluğu dağılımı.....	62
Şekil 5.6 : Boşta çalışmada farklı açılardan modelin yüzeylerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı	63
Şekil 5.7 : Tam yükte çalışmada verilen xz-düzleminde manyetik akı yoğunluğu dağılımı	64
Şekil 5.8 : Tam yükte çalışmada verilen xy-düzleminde akı yoğunluğu dağılımı	65
Şekil 5.9 : Tam yükte çalışmada verilen yz-düzleminde akı yoğunluğu dağılımı.....	65

DOĞRUDAN TAHRİKLİ RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN ENİNE-EKSENEL AKILI KALICI MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR TASARIMI

ÖZET

Geleneksel rüzgâr türbinlerinde düşük hızla dönen türbin ile generatör arasında dişli kutusu bulunur. Böylece generatör 1000-1500 d./dak.'lık yüksek hızlarda döner. Ancak, bakım masrafları fazla olan ve toplam verimi düşüren dişli kutusunun sistemden kaldırılmasıyla doğrudan tahrikli bir sistem oluşturulabilir. Bu çalışmada, günümüzde gittikçe önem kazanan doğrudan tahrikli rüzgâr türbin sistemleri için bir senkron generatör tasarlanmıştır. Doğrudan tahrikli türbinler dakikada 10-50 devir yaparlar ve türbin, kuvveti ileten ortak bir mil yardımıyla senkron generatörü tahrik eder. Devir sayısı düşük olduğundan senkron makine çok kutupludur ve çapı birkaç metreyi bulabilir. Ayrıca bu sistemler farklı rüzgâr hızlarında optimum çalışma şartlarını oluşturarak yıllık enerji üretimini artırabilirler. Fakat bu generatörlerin özel olarak tasarlanması gerekmektedir, üretimleri zor ve pahalıdır.

Bu çalışmada son 20-30 yıldır sürekli yeni türleri ortaya atılan enine-eksenel akılı makine yapısı incelenmiş ve özgün bir çift rotorlu yapı tanıtılmıştır.

İlk bölümde rüzgâr enerjisinin önemi, dünya ve Türkiye'deki yeri hakkında genel bilgiler verilmiş, kurulu santral güçleri ve ortalama maliyetleri hakkında çeşitli istatistikler eklenmiştir. Değişken ve sabit hızlı türbin sistemleri ikinci bölümde anlatılmıştır. Çıkış gücü ile rüzgâr hızı arasındaki ilişki açıklanmış ve iki sistemin farklı özellikleri karşılaştırılmıştır.

Enine-eksenel akılı makinenin fikir babası sayılan Weh'in 80li yıllarda tasarladığı makinenin çalışma prensibi üçüncü bölümde anlatılmıştır. Bu bölümde ayrıca temel enine-eksenel akılı makine yapıları sınıflandırılmış ve açıklayıcı resimlerle tanıtılmıştır. Bugüne kadar yapılmış literatür çalışmaları özetlenmiş, üretilen bazı prototipler verilmiştir.

Bu çalışmanın asıl konusu olan yeni çift rotorlu enine-eksenel akılı makine yapısı dördüncü bölümde tanıtılmıştır. Çalışma prensibi, farklı resimlerle zenginleştirilerek açıklanmıştır. Makinede oldukça fazla sayıda kullanıldığı için ayrıntılı bir tasarım gerektiren kalıcı mıknatıslar hakkında bilgi verilmiş ve manyetik devre kurularak hava aralığı uzunlukları hesaplanmıştır. Statorun doymaya girmemesi için gereken en iyi ölçüler yapılan hesaplarla tespit edilmiştir. Rotorların hareketine bağlı olarak endüklenen gerilim ifadesi çıkarılmış ve gerekli dalga şekilleri verilmiştir. Stator dişlerinin arasına konumlandırılmış olan sargı boyutlandırılarak toplam hacmi minimum yapacak stator dişi boyutları bulunmuştur. Bundan yola çıkılarak makinenin tüm ölçüleri çıkarılmıştır. Örnek tasarım olarak 500 kW'lık bir makine seçilmiştir.

Beşinci bölümde yeni çift rotorlu yapının üç boyutlu analizi için yapılan simülasyonlar yer almaktadır. Boşta ve anma gücünde çalışma durumu için yapılan simülasyonlarda tasarım değerlerinin simülasyon değerleriyle büyük oranda örtüştüğü ve makinede manyetik doymaya gidilmediği gözlemlenmiştir.

Son olarak sonuç bölümünde ise hesaplama ve simülasyonlarla varılan sonuçlar özetlenmiştir. Makinenin olası uygulama alanlarından bahsedilmiş, bazı düşünce ve hedefler açıklanmıştır.

THE DESIGN OF A TRANSVERSAL FLUX PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE FOR DIRECT DRIVEN WIND TURBINES

SUMMARY

In traditional wind turbines, there is a gearbox present between the low speed turbine and the generator, which enables the generator to turn at speeds of 1000-1500 rpm. However, it is possible to remove the gearbox which has a high maintenance cost and reduces the total efficiency in order to build a direct-drive system. In this study, the design steps of a synchronous generator for direct-drive wind turbine systems which have recently become more and more important are given. Direct-drive turbines can operate at 10 to 50 rpm and the turbine drives the synchronous generator through a mutual axle. Because the rotation speeds are low, the synchronous machine has many poles and its perimeter can come in several meters. Moreover, these systems can increase the yearly energy production by constituting optimum operating conditions. However, these generators are to be designed in a very special way and are very difficult and expensive to be produced.

In this study the transverse axial flux machine structure that has seen many alternative propositions in the recent 20 years is analyzed and a unique dual-rotor structure is introduced.

In the first chapter the importance of wind energy and its place in energy production worldwide and in Turkey is given, and various statistics concerning present installed energy station powers and their average costs are added. In chapter two, variable and constant speed turbine systems are given. The relationship between output power and wind velocity is explained and the different features of both systems are compared.

The transversal flux topology which is first present by Weh is explained in the third chapter. Besides, basic transversal structures are classified and they are explained using some useful pictures. Basic studies in literature until today are summarized and some prototypes produced are given.

The novel dual-rotor transversal flux machine which is the main subject of this master thesis is clarified in the fourth chapter. The operation principles are explained with several drawings. Some useful information is given about permanent magnets for which a detailed design procedure is required. They are widely explained and air gap lengths are calculated using the magnetic equivalent circuit. The optimal dimensions are determined using extreme value problem structure in order not to cause stator cores to saturate. The induced voltage expression is obtained which depends on the movement of the rotors. Moreover the according waveforms are given in a proper order. Using the design procedure of the coil in the stator core necessary stator teeth dimensions are found which make the whole volume of the machine minimum. After that every dimension of the new machine is obtained. For the design, a sample machine of a 500 kW power is used.

The fifth chapter includes the 3D simulations of the novel double-rotor transversal flux generator. From the simulations it can be seen that the variables in the simulations coincide with the variables of the design for no-load and full-load conditions. It can be also said that it is not the case of a magnetic saturation in any point of the machine.

In conclusion the obtained results of the calculations and simulations are summarized. Possible areas of applications are mentioned and some ideas and goals are explained.

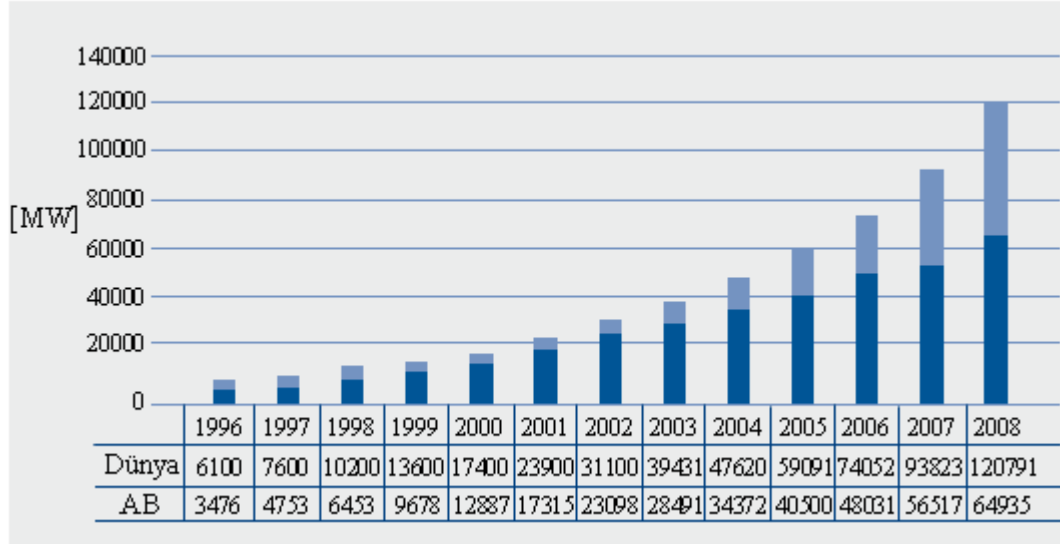
1. GİRİŞ

Günümüzde petrol kaynaklarının giderek tükenmekte olduğu herkesin bildiği bir gerçektir. Doğal bir kaynak olan petrolün tüm dünyaya eşit şekilde dağılmaması ve elde edilip ticaretinin yapılmasının belli ülkelerin tekelinde olması yüzünden yakın tarihte birçok anlaşmazlıklar, hatta çatışmalar yaşanmıştır. Bu çatışmalar, petrol fiyatlarının güçlü ülkelerin lehine değişmesine ve tüm dünyada ekonomik istikrarsızlıklar yaşanmasına sebep olmuştur. Doğal petrol kaynağı olmayan ülkeler, piyasayı kontrol eden ülkeler tarafından ekonomik olarak bağımlı hale getirilmiştir. Aslında tüm bunlar, büyük oranda tek bir enerji çeşidine bağlı olmanın getirdiği bir sonuçtur. Bunlardan başka; petrolün işlenmesi ve petrol bazlı yakıtların kullanılması ile ortaya çıkan maddelerin çevreye verdiği zararlar artık rahatça gözlemlenmektedir. Bu atık maddelerin doğal hayata, dolayısıyla insanlığa olan olumsuz etkileri geri döndürülemez niteliktedir. Sayılanlar göz önüne alındığında, daha temiz ve pratik olarak sınırsız sayılabilen yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmamız bir alternatif değil, bilakis bir zorunluluktur. Artık hibrit ve hidrojenli araçlar üretilmiş ve deneme aşamasındadırlar. Elektrik enerjisi üretiminde ise çevreye zararları herkesçe bilinen termik santrallerin yerini yavaş yavaş rüzgâr ve güneş santralleri almaya başlamıştır. Rüzgâr ve güneş enerjisi teknolojilerinde üretim maliyetleri, her yeni gelişmeye başlayan teknoloji dalında olduğu gibi başlangıçta yüksek olmasına rağmen, son yıllardaki teknik ilerlemelerle ümit verici bir şekilde azalmıştır. Bu, üretimin ileride daha da ucuzlayacağı anlamına gelmektedir. Bilim dünyası, başarılı gelişmeleri ileriye taşımalı, bu yöndeki çalışmalar hızlandırılmalıdır. Özellikle rüzgâr enerjisinden beklenti çok yüksektir. Dünyada rüzgâr enerjisi kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır.

1.1 Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi

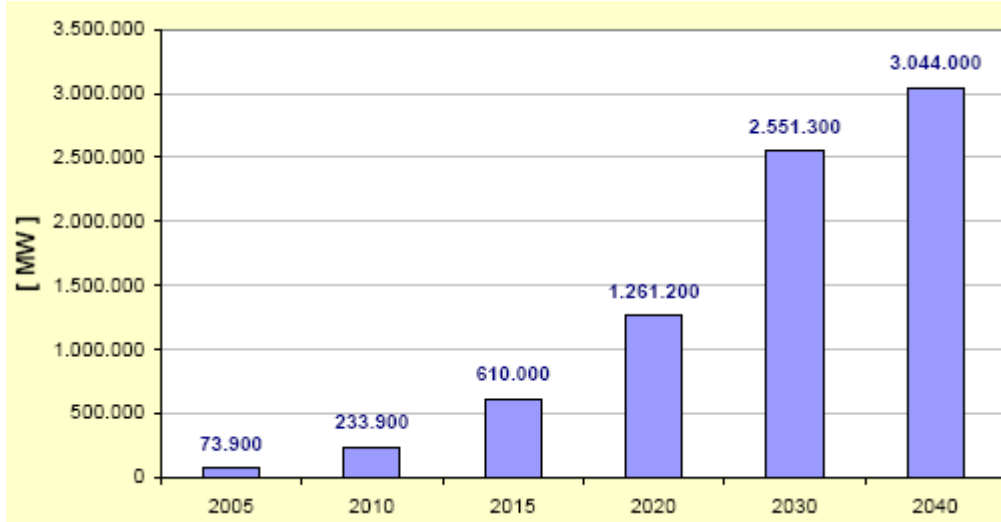
Dünya Rüzgâr Enerjisi Kurumu’na (*World Wind Energy Association*) göre çok yakın gelecekte dünyadaki rüzgâr santrallerinin kurulu gücü 200000 MW’ı aşacaktır [1].

Şekil 1.1’deki grafikte dünyadaki rüzgâr santrallerinin toplam kurulu gücünün yıllara göre değişimi verilmiştir.



Şekil 1.1 : Yıllara göre dünya ve AB’deki toplam rüzgâr santrali kurulu gücü [2]

2015’te dünyadaki toplam tahmini kurulu gücün 600 GW’ı aşacağı düşünülmektedir [3]. 2040 yılına kadar, gelecek hakkında öngörülen gelişmeler Şekil 1.2’deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 1.2 : Gelecekte tüm dünyadaki toplam rüzgâr santrali kurulu güç tahmini [3]

Şu anda Almanya ve İspanya, Avrupa’da rüzgâr enerjisi kullanımında öndedirler. Bu ülkeler 2020 yılında toplam enerji ihtiyaçlarının en az %25’ini rüzgâr enerjisinden karşılamayı planlamaktadır [4]. Bu hedef Danimarka’da 2025 yılı için %50 gibi büyük bir orandır [5]. Ülkelere göre toplam kurulu rüzgâr santrali gücü dağılımı, Çizelge 1.1’de görülmektedir.

Çizelge 1.1 : Ülkelerin toplam kurulu rüzgâr santrali güçleri (2009’a kadar) [4]

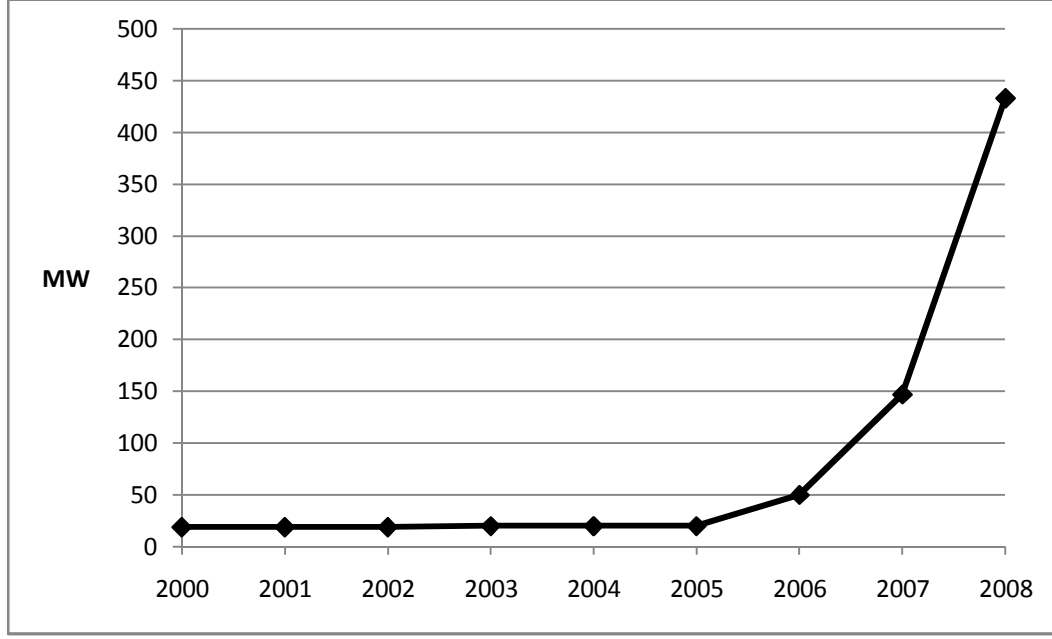
Ülkeler	ABD	Almanya	İspanya	Çin	Hindistan	İtalya
MW	25170	23903	16754	12210	9645	3736
%	20,8	19,8	13,9	10,1	8,0	3,1
Ülkeler	Fransa	B. Britanya	Danimarka	Portekiz	Diğer	Toplam
MW	3404	3241	3180	2862	16693	120798
%	2,8	2,7	2,6	2,4	13,8	100

Bu on ülke, dünyada rüzgâr enerjisi konusunda lider durumdadırlar. Rüzgâr enerjisinin önemini fark etmişler ve yatırımlarına devam etmektedirler. Çizelge 1.2’de, 2008 yılında en fazla rüzgâr santrali kuran on ülkenin işletmeye aldığı santrallerin MW cinsinden güçleri verilmiştir.

Çizelge 1.2 : Ülkelerin 2008 yılında kurdukları toplam rüzgâr santralleri gücü [4]

Ülkeler	ABD	Çin	Hindistan	Almanya	İspanya	İtalya
MW	8358	6300	1800	1665	1609	1010
%	30,9	23,3	6,7	6,2	5,9	3,7
Ülkeler	Fransa	B. Britanya	Portekiz	Kanada	Diğer	Toplam
MW	950	836	712	526	3285	27051
%	3,5	3,1	2,6	1,9	12,2	100

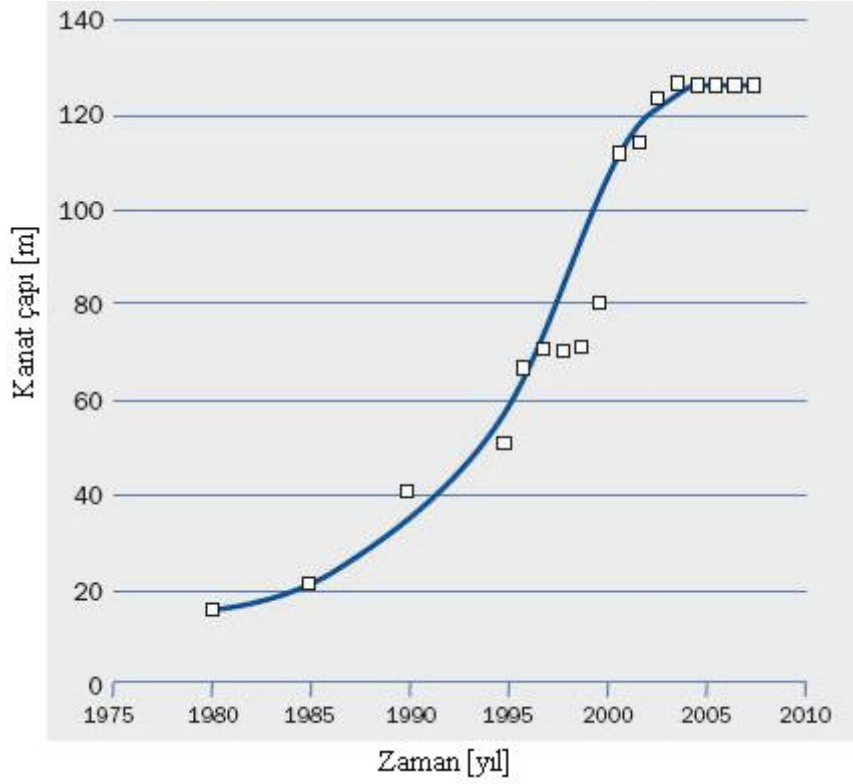
Dünya Rüzgâr Enerjisi Kurumu’nun 2008 yılı rüzgâr enerjisi raporuna göre Türkiye, 333,4 MW kurulu rüzgâr santrali gücüyle dünyada yirmi beşinci sıradadır [1]. Ülkemiz, kurulu gücüne 2008 yılında 126,6 MW ekleyerek 2007 yılına göre bir basamak yükselmiştir. En dikkat çekici gelişmeyi, 2008 yılında kurulu gücünü yaklaşık 6300 MW artırarak 12210 MW’a erişen Çin gerçekleştirmiştir. Çizelge 1.1’de de görüldüğü gibi, ABD ve Almanya dünya birinciliği için rekabet halindedirler. Danimarka, yüzölçümü küçük olmasına rağmen kıyıdan uzakta (*off-shore*) santral kullanma yoluna gitmiştir ve bu sayede enerji ihtiyacının yaklaşık %20’sini rüzgârdan karşılamaktadır. Ayrıca dünyanın rüzgâr enerjisi sektöründe önde gelen firmalarının da anavatanıdır. Bugün dünyada satılan türbinlerin %40’ı Danimarka’da üretilmektedir [5]. Enerji kesintilerinin sıkı sık yaşanmaya başladığı Türkiye de rüzgâr enerjisine hak ettiği önemi vermeli ve rüzgâr potansiyelini kullanarak üst sıralardaki yerini almalıdır. Şekil 1.3’te 2009 yılına kadar Türkiye’deki rüzgâr santrali kurulu gücünün yıllara göre değişimi gösterilmiştir. Halen 402 MW’lık gücün kurulum çalışmaları devam etmektedir [4].



Şekil 1.3 : Son dokuz yılda Türkiye’deki kurulu güç değişimi [4]

1.2 Rüzgâr Türbinlerinin Gelişmesi

Teknik olanaklar ilerledikçe büyük güçlü rüzgâr türbinleri üretilmeye başlanmıştır. Daha uzun türbin kanatları daha fazla moment ürettiğinden çıkış gücü de artmış olur. Şu anda üretimde olan dünyadaki en büyük rüzgâr türbini Alman Enercon firması tarafından Almanya’nın Emden şehrinde kurulmuştur. Kanat çapı 126 metre olup, kule yüksekliği 138 metredir. Anma gücü 6 MW’tır (yılda 20 MWh) olup, bu rakam Avrupa’da dört kişilik beş bin ailenin enerji ihtiyacına denktir. Türbin doğrudan tahriklidir ve dakikada 12 devir yapmaktadır [6]. Son zamanlarda, üretilen birim enerji daha ucuza geldiği için büyük güçlü türbinlere rağbet artmaktadır. Şekil 1.4’te, son 30 yılda kurulan türbinlerdeki kanat açıklığının zamanla artması görülmektedir.



Şekil 1.4 : Kullanılan türbin rotoru kanat açıklıklarının zamanla artması [2]

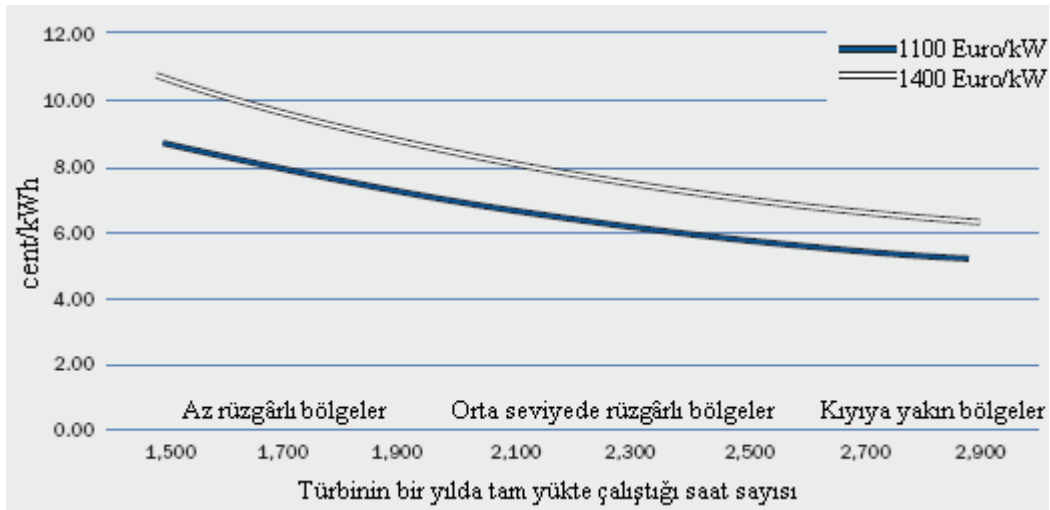
1.3 Rüzgâr Enerjisinin Maddi Açıdan İncelenmesi

Rüzgâr türbinleri gibi, enerjinin doğal ve yenilenebilir olduğu enerji dönüşüm sistemlerinde masrafların çok büyük bir bölümünü kurulum masrafları oluşturur. Oysa bir termik santralde toplam masrafın %40-70'i yakıt masraflarıdır. Rüzgâr enerjisi, ucuz bir enerji türü olmamasına rağmen, bir kere kurulduktan sonra bakım masraflarından başka bir maddi yük getirmez. Çevreye hiçbir olumsuz etkisi yoktur. 2006 yılı fiyatları temel alınarak yapılan 2 MW'lık bir türbinin kurulum masrafları Çizelge 1.3'te listelenmiştir.

Çizelge 1.3 : 2006 yılı fiyatlarına göre Avrupa’da 2 MW’lık tipik bir rüzgâr türbininin ortalama kurulum masrafları [2]

Yatırım kalemleri	Yatırım masrafı [Euro/MW]	Toplam masraftaki pay [%]
Türbin	928 000	75,6
Şebeke bağlantısı	109 000	8,9
Kurulum, inşa	80 000	6,5
Arsa kirası	48 000	3,9
Elektrik tesisatı, ekipman	18 000	1,5
Danışmanlık	15 000	1,2
Finansal masraflar	15 000	1,2
Yol inşası	11 000	0,9
Kontrol sistemleri	4 000	0,3
Toplam	1 227 000	100,0

Rüzgâr enerjisinin verimliliği deniz kıyısına yakın bölgelerde yüksek seviyelere ulaşır. Kıyıya yakın bölgelerde genel olarak rüzgâr yoğunluğu ve hızı, iç karasal bölgelere göre daha fazla olduğundan *kapasite faktörü* artar. Kapasite faktörü, bir enerji santralinin bir yıl boyunca ürettiği enerjinin, tüm yıl boyunca tam kapasiteyle çalıştığında ürettiği enerjiye bölümüdür. Rüzgâr türbininin bir yılda maksimum verimde çalıştığı saat sayısı arttıkça kapasite faktörü de büyür. Böylece deniz kıyısına yakın bölgelerde birim enerji üretim masrafları da düşer. Şekil 1.5’te, birim çıkış gücü masrafı birbirinden farklı rüzgâr santralleri farklı konumlarda karşılaştırılmıştır. Kıyıya yakın bölgelerdeki santrallerin birim enerji masrafının, az rüzgârlı bölgelere göre büyük oranda azaldığı görülmektedir.



Şekil 1.5 : İki farklı rüzgâr santralinde birim enerji masrafının bölgelere göre değişimi [2]

Çizelge 1.4'te, farklı tip santraller toplam maliyet, verim ve kullandıkları kaynaklar açısından karşılaştırılmıştır.

Çizelge 1.4 : Farklı santral tiplerinin maliyet (2007 fiyatları), verim ve kaynaklar açısından karşılaştırılması [7]

Santral tipi	Maliyet [Euro/MWh]		Verim [%]	Rezerv [yıl]
	2005	2030		
Gaz Santrali	35-70	40-85	40-50	64
Dizel santral	70-80	80-95	30	42
Termik santral	30-50	45-70	40-50	155
Nükleer santral	40-45	40-45	33	85
Biyoyakıt santrali	25-85	25-75	30-60	Yenilenebilir kaynaklar
Karada rüzgâr santrali	35-110	28-80	95-98	
Kıydan uzakta rüzgâr santrali	50-170	50-150	95-98	
Hidroelektrik santral	25-95	27-90	95-98	
Güneş santrali	140-430	55-260	-	

Rüzgâr türbinlerinden elektrik enerjisi elde etmek için asenkron veya senkron generatörler kullanılmaktadır. Eğer dönüş hızı yavaş olan rüzgâr türbiniyle makine arasında bir dişli kutusu yoksa sistem doğrudan tahrikli olur. Orta ve büyük güçlü türbinlerin dönüş hızı yavaş olduğundan (10-50 d./dak.) generatör çok kutuplu ve dolayısıyla büyük yarıçaplı olmalıdır. Dişli kutularının sürtünme kayıpları vardır, bakım masrafları fazladır ve akustik gürültüye sebep olurlar. Bu yüzden üreticilerin doğrudan tahrikli sistemlere olan ilgisi artmaktadır [8].

Enercon ve Lagerwey gibi rüzgâr enerjisi sektöründe öncü şirketler doğrudan tahrik teknolojisini 90ların başında kullanmaya başlamışlardır [9]. Ancak o sıralarda NdFeB (neodimyum-demir-bor) mıknatıs teknolojisi yeni geliştirildiği için maliyetler yüksekti. Bugün ise kalıcı mıknatıslı sistemler, düşen mıknatıs fiyatlarıyla birlikte uyarmalı makinelerle karşı avantajlı konuma gelmiştir, çünkü uyarma bakır kayıpları yoktur ve çok daha hafiftirler. Tek dezavantajları, kalıcı mıknatısların, uyarmalı makinelerin aksine manyetik alanlarının kontrol edilebilir olmamasıdır [10]. Bu yüzden son yıllarda düşen maliyetlerle beraber kalıcı mıknatıslı sistemler çekici hale gelmiştir ve geliştirilmeye açıktırlar.

Kalıcı mıknatıslı doğrudan tahrikli generatörler eksenel, radyal veya enine-eksenel yapıda olabilirler. Enine-eksenel akıllı makine, nispeten yeni bir yapı olması ve seri

üretiminin zor olması sebebiyle yaygınlaşmamıştır. Ancak diğerleriyle kıyaslandığında en yüksek tork/kütle oranına sahiptir. Negatif yönleri ise güç faktörünün düşük olması ve mekanik problemlere yol açabilecek karmaşık yapısıdır.

Enine-eksenel akıllı makineler, yüksek tork/kütle oranıyla rüzgâr türbinlerinden elektrikli araçlara, denizaltılardan [11] endüstriyel üretim robotlarına kadar geniş bir yelpazede, düşük devirde yüksek moment gerektiren birçok uygulamada kullanılabilir. Eğer rahatça üretime geçirilmesi için yapısı basitleştirilebilirse, teknik anlamda tüm insanlığa çok faydalı olacaktır.

1.4 Tezin İçeriği

Bu çalışmada yeni bir enine-eksenel akıllı makine yapısı incelenecektir. Söz konusu yeni çift rotorlu yapıda, stator sayısı artırılmış ve klasik enine-eksenel akıllı makinelerle oranla iki kat daha fazla gerilim üretilmesine olanak sağlanmıştır. Bu sağlanırken klasik dış rotorlu makinelerle göre dış yarıçapta bir artma olmamıştır. Çalışmada, dünyada ve Türkiye’de rüzgâr enerjisi kullanımının yaygınlaşması anlatılmış ve diğer enerji çeşitleriyle karşılaştırmalar yapılmıştır. Değişken ve sabit hızlı sistemler tanıtılmış, olumlu ve olumsuz yanları açıklanmıştır. Ayrıca günümüze kadar üretilen çeşitli enine-eksenel akıllı makine topolojileri verilmiş ve çalışma prensipleri şekillerle anlatılmıştır. Sonraki bölümde yeni çift rotorlu yapının çizimleri eklenmiş ve manyetik devre hesapları, makinenin temel boyut hesapları yapılmıştır. Kullanılan malzemelerin karakteristik eğrileri verilmiştir. Son olarak makinenin üç boyutlu sonlu elemanlar analizi yapılmış ve elde edilen grafikler yorumlanmıştır.

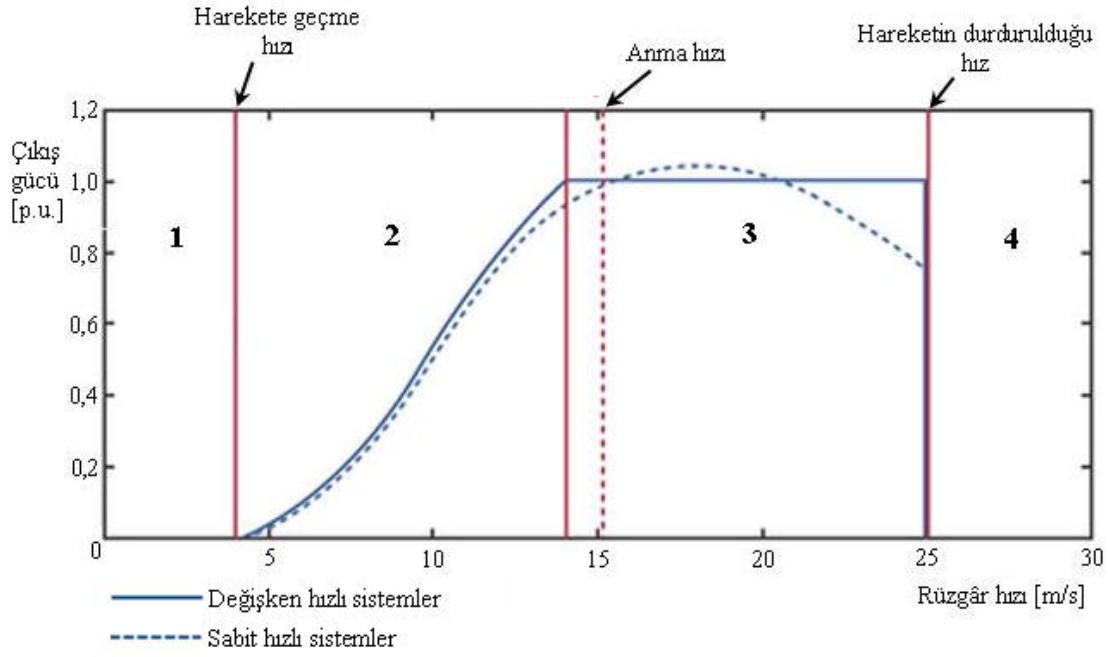
2. SABİT ve DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGÂR TÜRBİNİ SİSTEMLERİ

Rüzgâr hızı ve rüzgârdan alınabilecek güç arasındaki ilişkiyi Denklem 2.1 tanımlar.

$$P = \frac{1}{2} \rho_{hava} C_p A v^3 \quad (2.1)$$

Burada $P [W]$ gücü, $\rho_{hava} [kg/m^3]$ havanın yoğunluğunu, C_p türbinin yapısına göre değişen güç katsayısını, $A [m^2]$ türbin kanatlarının süpürdüğü alanı ve $v [m/s]$ de rüzgâr hızını belirtmektedir. C_p sadece, türbin kanat uçları hızının rüzgâr hızına oranına (λ) bağlıdır ve teorik olarak 16/27'den (*Betz limiti*) büyük olamaz. Karadaki rüzgâr türbinleri için en yüksek C_p 'yi veren optimum kanat ucu hızı 70 m/s'dir; çünkü daha yüksek hızlara çıkıldığında akustik gürültü artar. Ancak kıyıdan uzakta türbinlerde böyle bir sınırlama olmadığı için yüksek hızlarda yüksek C_p değerleri elde etmek mümkündür.

Şekil 2.1'de sistemin çıkış gücünün rüzgâr hızına bağlı değişim grafiği verilmiştir. Sürekli mavi çizgi değişken hızlı sistemleri, kesik mavi çizgi sabit hızlı sistemleri belirtmektedir. Grafik kırmızı çizgilerle dört bölgeye ayrılmıştır. 1-3 m/s'lik düşük hızlarda enerji dönüşümü olmaz (1. bölge). Türbin, ancak 3-5 m/s hızları arasındaki bir değerde harekete geçer. Anma gücüne ise 12-15 m/s arasındaki hızlarda erişilir. Anma hızının 15 m/s olduğu kabul edilmiştir.

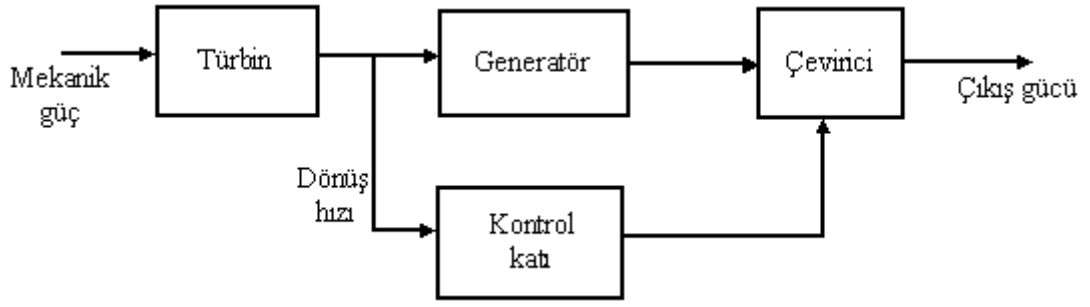


Şekil 2.1 : Sabit ve değişken hızlı sistemlerde rüzgâr hızına bağlı güç üretimi [12]

Rüzgâr hızının anma hızından düşük olduğu 2. bölgede, çeşitli kontrol sistemleri ve aerodinamik tasarımlarla rüzgâr enerjisinin dönme hareketine çevirmede maksimum türbin verimliliği hedeflenir. Bu bölgedeki verimlilik uç hızı oranına (λ) bağlıdır.

$$\lambda = \frac{v_{uç}}{v_r} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2 ifadesinde, $v_{uç}$ [m/s] rotor kanat uçlarının çevresel hızını ve v_r [m/s] rüzgâr hızını belirtmektedir. Sabit hızlı sistemlerde $v_{uç}$ sabit olduğundan λ kontrol edilemez. Bu yüzden, λ 'nın maksimum olacağı optimum bir sabit hız değeri seçilir ve türbin sisteminin tasarımı bu değere göre yapılır [12]. λ değeri, rüzgâr hızına göre değişir ve sistem tasarlanmış olan değere göre çalışır. Oysa değişken hızlı sistemlerde çevirici kullanılarak generatörün yüklenme durumu değiştirilerek, λ sistemin en verimli olduğu değere ayarlanabilir. Bu kontrol işlemi, rüzgâr hızını anemometre ile algılamak pratikte zor olduğundan rotor hızı referans alınarak gerçekleştirilir (Şekil 2.2).

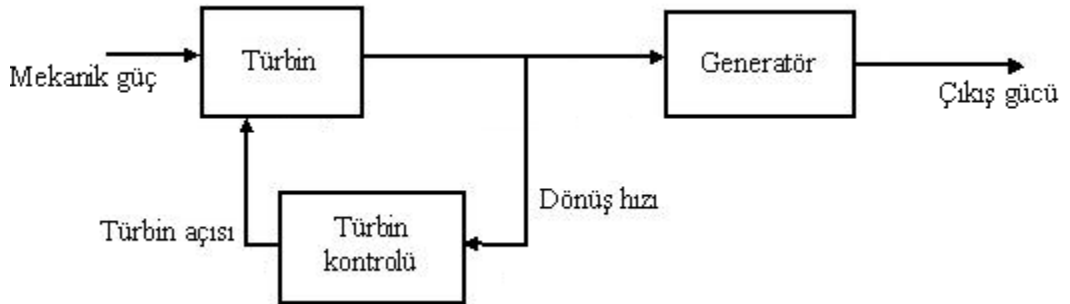


Şekil 2.2 : Değişken hızlı sistemlerde anma hızının altında dönüş hızının kontrolü

Anma gücünün üretilebildiği 3. bölgede, aşırı yüklenme tehlikesine karşı enerji dönüşümü verimliliği düşürülmelidir. Bunu gerçekleştirmek için iki yöntem uygulanır:

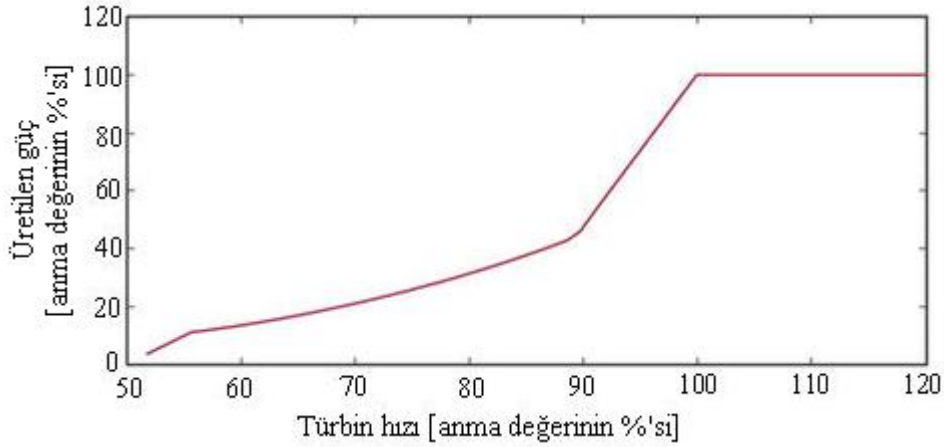
- Tutunma kaybı etkisinden (*stall effect*) yararlanılarak türbin kanatları, yüksek hızlarda verimliliği düşecek şekilde üretilir.
- Hidrolik veya elektriksel sistemler kullanılarak türbinin yön değiştirmesi ve rüzgârın kanatlara çarpma açısı değiştirilerek türbin verimliliği düşürülür.

Sabit hızlı sistemlerde birinci yöntem kullanılır. Türbin kanatları, anma hızının hemen üzerinde tutunma kaybı etkisine girecek şekilde tasarlanır. Böylece çıkış gücü yaklaşık olarak anma gücüne denk gelmiş olur (Şekil 2.1). Değişken hızlı sistemlerde ise daha çok ikinci yöntem kullanılır. Rüzgârın kanatlara çarpma açısı (türbin açısı) değiştirilerek türbin verimliliği azaltılmış olur (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : Değişken hızlı sistemlerde anma hızının üstünde dönüş hızının kontrolü

Aşırı rüzgâr hızlarının söz konusu olduğu 4. bölgede, olası zararlara karşı enerji üretimi durdurulur. Eğer rüzgâr hızının on dakikalık ortalama hızı yüksek değerlere çıkarsa sistem şebekeden ayrılır.

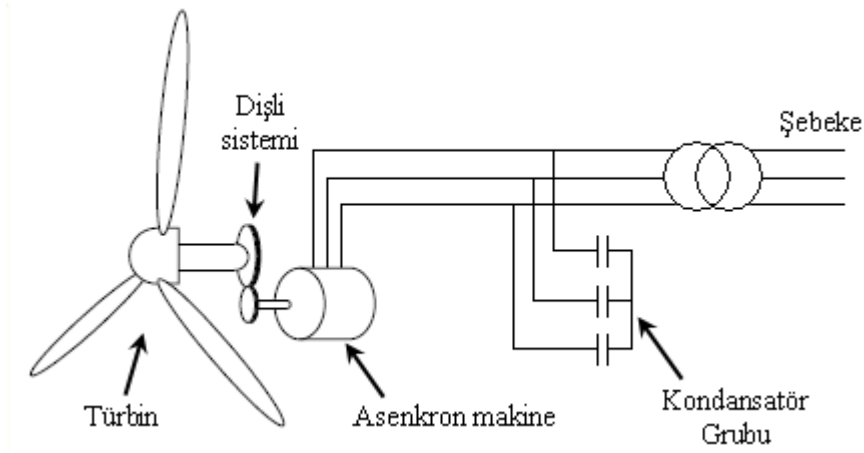


Şekil 2.4 : Ölçülen türbin hızının kontrolüne göre üretilen güç [12]

Genel olarak rüzgâr türbinleri, değişken ve sabit hızlı türbinler olarak ikiye ayrılabilir. Günümüzde en çok kullanılan üç sistem; kafesli asenkron generatörlü sabit hızlı türbinler, değişken hızlı bilezikli asenkron generatörlü türbinler ve değişken hızlı doğrudan tahrikli senkron generatörlü türbinlerdir [9].

a) Sabit hızlı kafesli asenkron generatörlü sistemler

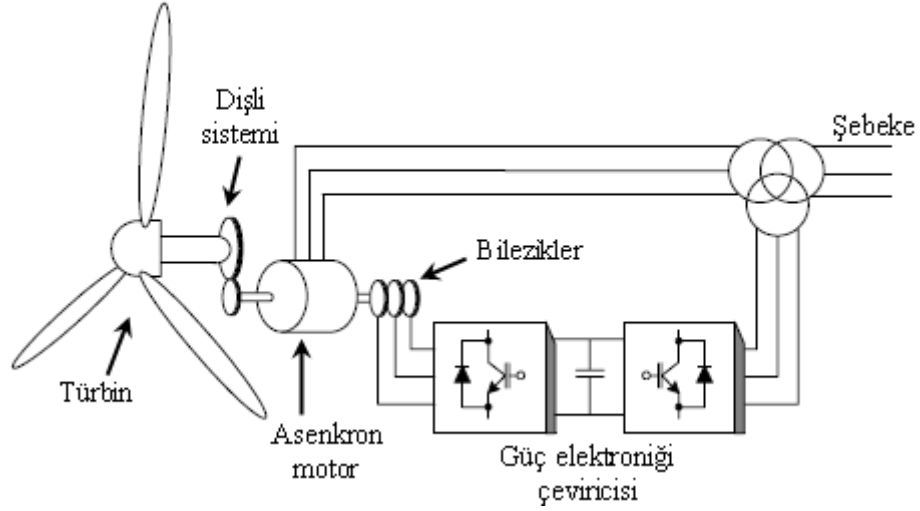
Sabit hızlı tipik bir rüzgâr türbini sistemi, bir dişli kutusu katından kafesli bir asenkron makineden ve basit bir reaktif güç kaynağından oluşur (Şekil 2.5). Kafesli asenkron makinelerin dönüş hızları yüksek olduğundan, türbin ile makine arasında yükseltici bir dişli sistemine ihtiyaç vardır. Ayrıca asenkron generatör, manyetik alanı üretecek sargılara sahip olmadığından harici bir reaktif güç kaynağına (şebekenin yüklenmemesi için bir kondansatör grubu) ihtiyaç duyar. Çıkış gerilimi ise bağlı olduğu şebeke yardımıyla sabit tutulur. Bu olumsuz yanlarına rağmen, tahrik hızı şebeke frekansından büyük olduğu sürece bir generatör olarak çalışabilir.



Şekil 2.5 : Sabit hızlı, kafesli asenkron generatörlü sistem [13]

b) Değişken hızlı bilezikli asenkron generatörlü sistemler

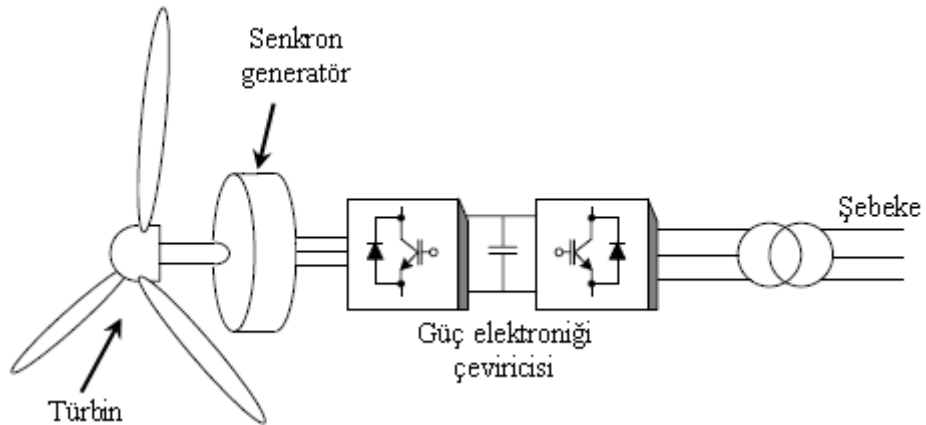
Bu sistemlerde de dişli sistemine ihtiyaç vardır. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi bilezikli asenkron motorun rotoru, güç elektroniği çeviricileriyle uyarılıp frekansı kontrol edilir. Bu kontrol avantajıyla λ değeri ayarlanabilir ve değişik hızlarda verimli çalışma sağlanır.



Şekil 2.6 : Değişken hızlı, bilezikli asenkron generatörlü sistem [13]

c) Değişken hızlı doğrudan tahrikli senkron generatörlü sistemler

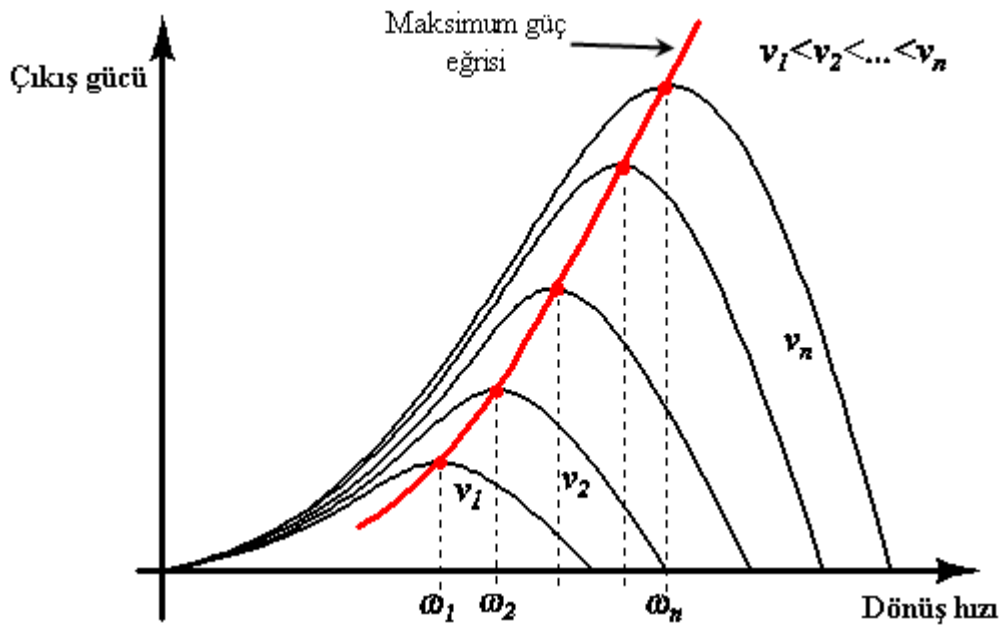
Bu sistemlerde, senkron generatör ile şebeke arasında bir güç elektroniği çeviricisi bulunur (Şekil 2.7). Bu sayede değişken hızlarda çalışma sağlanır. Sistem doğrudan tahrikli olduğu için dişli kutusuna ihtiyaç duyulmaz. Öte yandan, çok yavaş dönüş hızından dolayı özel çok kutuplu senkron makine yapıları tasarlanmalıdır. Çevirici düzeneği, rüzgârın hızıyla sürekli değişen makine frekansını şebeke frekansı seviyesine ayarlar.



Şekil 2.7 : Değişken hızlı, senkron generatörlü sistem [13]

Sabit hızda çalışan sistemler, basit yapıları nedeniyle ucuzdur ve makine boyutları standartlaştırılmıştır. Böylece istenen devir sayısına (3000, 1500, ... d/dak.) göre seri olarak üretilirler. Ancak üretimde, rüzgâr hızı değişimlerinden gelecek bozucu moment etkilerine karşı mekanik olarak dayanıklı malzemeler kullanılmalıdır. Bu sistemlerde, reaktif güç sağlayacak basit bir güç elektroniği sistemi yeterlidir. Olumsuz yanları ise bir dişli sisteminin gerekmesidir. Dişli kutularının kütlesi yüksek mertebelere ulaşabilir ve bu da rüzgâr türbini kulesinin mekanik olarak daha dayanıklı olacak şekilde tasarlanmasını zorunlu kılar. Ayrıca sürtünme kayıplarına yol açarak toplam verimi düşürürler. Ek olarak gürültülü çalışırlar ve düzenli bakım gerektirirler.

Değişken hızlı sistemlerin en önemli avantajı verilmiş bir rüzgâr hızı için daha fazla enerji üretmeleri ve çevirici yardımıyla aktif-reaktif güç kontrolünün yapılabilmesidir [14]. Bu sistemlerde çıkış gücü, türbinin hızına göre değişir (Şekil 2.8).



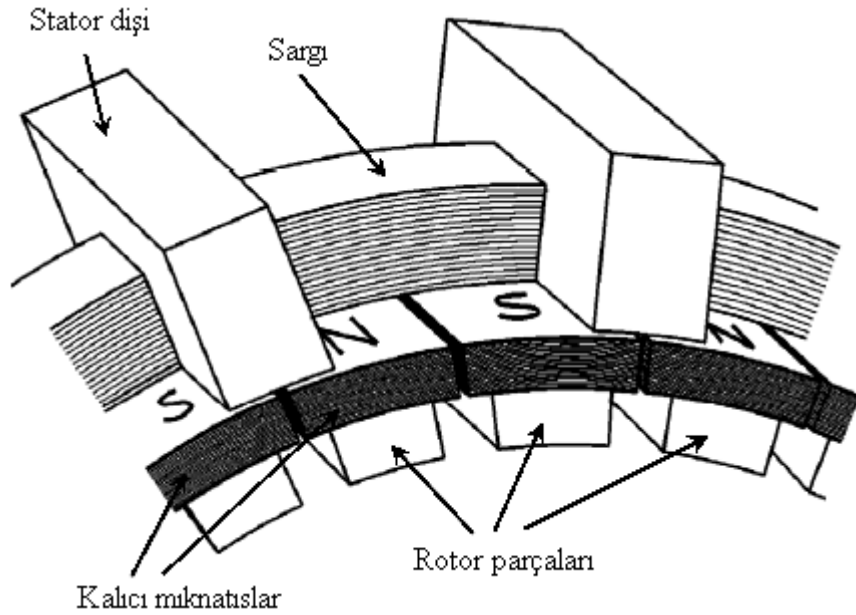
Şekil 2.8 : Değişken hızlı sistemlerde çıkış gücünün hıza göre değişimi ve maksimum güç eğrisi

Belli bir değere kadar hız arttıkça çıkış gücü de artar. Yüksek hızlarda ise aşırı yükleme durumu ortaya çıktığından verim düşürülmek zorunda kalınır. Her dönüş hızında maksimum çıkış gücünün üretildiği noktalar birleştirilerek maksimum güç eğrisi elde edilir. Bu eğri Şekil 2.8’de kalın çizilerek belirginleştirilmiştir.

3. ENİNE-EKSENEL AKILI KALICI MIKNATISLI MAKİNELER

Enine-eksenel akıllı kalıcı mıknatıslı makine teknolojisi, ilk kez 90lara doğru Weh tarafından ana hatlarıyla tanımlanıp isimlendirilmiştir. Weh, enine-eksenel yapıyı doğrudan tahrikli rüzgar türbinlerine uyarlayıp temel tasarım kriterlerini belirlemiştir [15, 16, 17, 18]. O zamandan beri birçok yeni tasarımlar gerçekleştirilmiştir [19, 20, 21, 22, 23, 24].

Şekil 3.1’de Weh’in tasarladığı enine eksenel akıllı sabit mıknatıslı senkron makine görülmektedir. Şekildeki yapı, enine-eksenel akıllı makine (EEAM) sınıfının en temel yapısını temsil etmektedir.



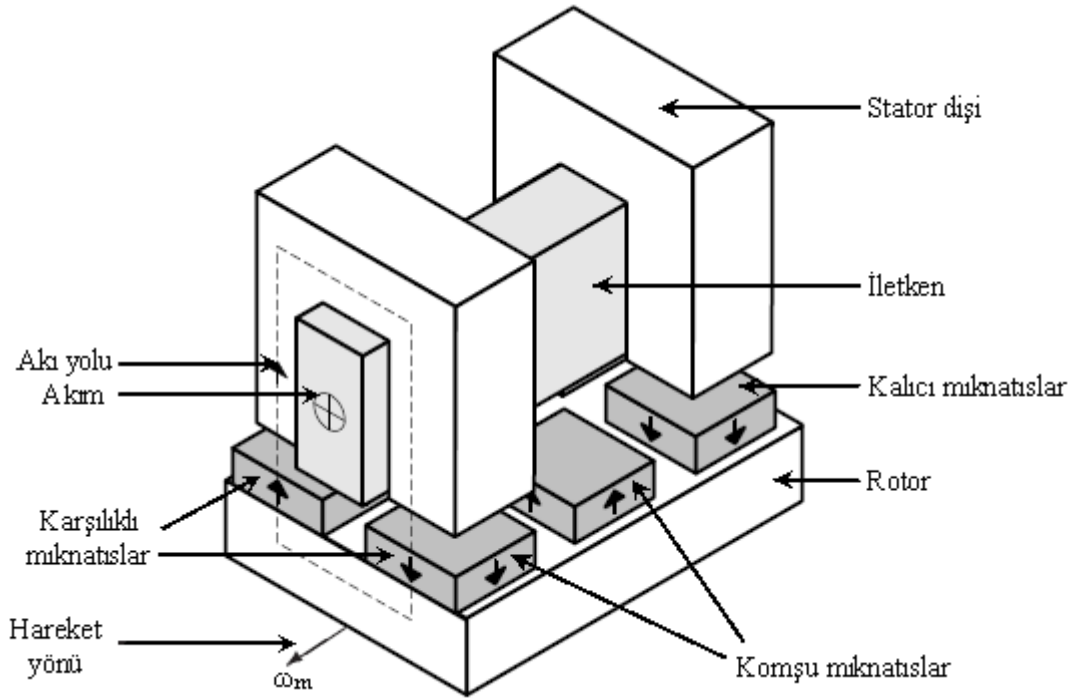
Şekil 3.1 : Klasik iç rotorlu EEAM [18]

3.1 Klasik İç Rotorlu Enine-Eksenel Akıllı Makine

Şekil 3.2’deki verilen EEAM yapısı, bir öncekinin biraz geliştirilmiş modelidir. Bu tasarımda rotor parçalardan oluşmaz; kesintisiz devam eder. Stator ve rotor, çelik alaşımlı laminasyonlar veya yumuşak manyetik maddeler gibi manyetik direnci çok düşük malzemelerden üretilmiştir. Rotorun üzerine belli aralıklarla kalıcı mıknatıslar yerleştirilmiştir. Karşılıklı mıknatısların mıknatıslanma yönleri birbirlerine göre

terstir. Böylece, oluşturdıkları manyetik akı, “U” şeklindeki stator dişi ve rotor üzerinden çevrimini tamamlar.

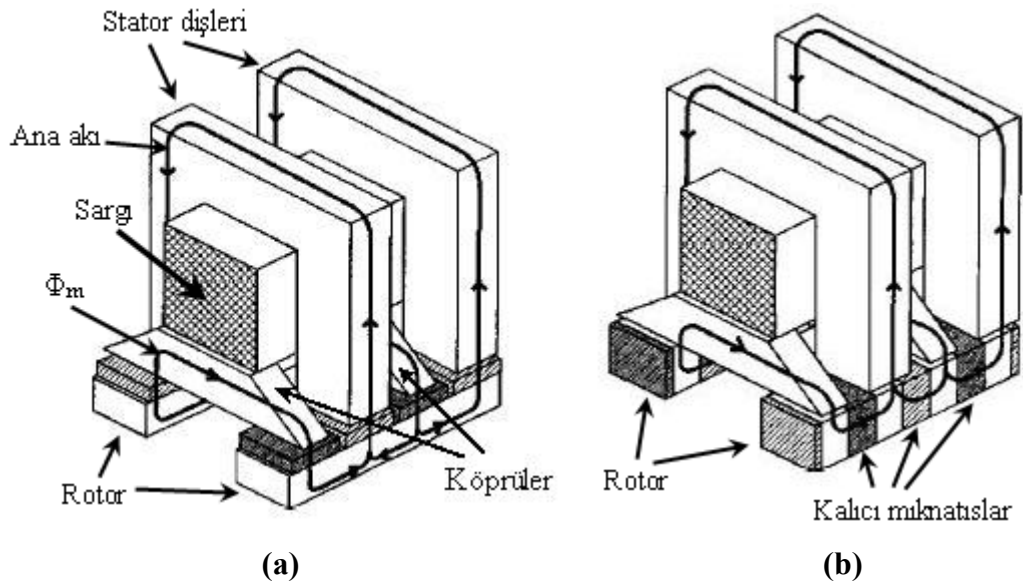
Karşılıklı iki mıknatısın oluşturduğu bir kutup adımı boyunca, statordan geçen akının yönü bütün dişler için aynıdır. Farklı yönde polarize olmuş diğer kutup adımı süresinde statorda dolaşan akı yön değiştirir. Bu sayede, rotorun dönme hareketi sonucu, zamana göre değişen akı tarafından halkalanan iletkende gerilim endüklenmiş olur. Rotorun hareket yönü (ω_m), akı yolu ve iletkenden akan akımın yönü şekilde gösterilmiştir. Anlatılacak tüm tasarımlarda, aksi belirtilmedikçe rotorun hareket yönünün Şekil 3.2’deki gibi olduğu varsayılmıştır. Mıknatısların üzerine çizilmiş olan oklar, mıknatıslanma yönünü belirtmektedir.



Şekil 3.2 : Klasik iç rotorlu EEAM [25]

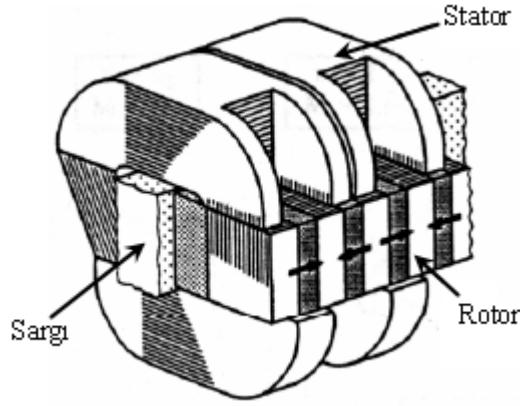
Klasik iç rotorlu EEAM’lerde, bir kutup adımı boyunca kullanılmayan ve komşularına göre ters yönde mıknatıslanmış olan karşılıklı mıknatısların sebep olduğu akılar, stator üzerinden iletkeni halkalayan ana akıyı zayıflatırlar. Bu yüzden stator dişlerinin arasına, Şekil 3.3 (a) ve (b)’de görüldüğü gibi yüksek manyetik geçirgenliğe sahip köprüler yerleştirilir. Böylece, bir kutup adımı boyunca kullanılmayan mıknatısların oluşturduğu akının (Φ_m) devresini kapatacağı bir yol sağlanmış olur. Böylece toplam verim artar; ancak makinenin ağırlığını artırmaları ve iletken için ayrılmış olan hacmi sınırlandırmaları, köprülerin olumsuz tarafıdır.

Şekil 3.3 (b)'de önceki EEAM'lerden farklı olarak yoğunlaştırılmış akı topolojisi kullanılmıştır. Kalıcı mıknatıslar rotorun üzerine değil, doğrudan içine yerleştirilmiştir. Mıknatısların arasında yer alan ve akının statora iletilmesini sağlayan kısım, radyal ve eksenel doğrultuda akı iletimini sağlamak için sıkıştırılmış demir tozundan oluşmaktadır. Yoğunlaştırılmış akılı sistemde kaçak akılar, mıknatısların rotorun üzerinde konumlandırıldığı diğer yapılara göre çok daha düşük seviyededir. Böylece aynı hacimde çıkış gücü artar [26].



Şekil 3.3 : (a) İç rotorlu ve köprülü EEAM, (b) İç rotorlu, köprülü ve yoğunlaştırılmış akılı EEAM [26]

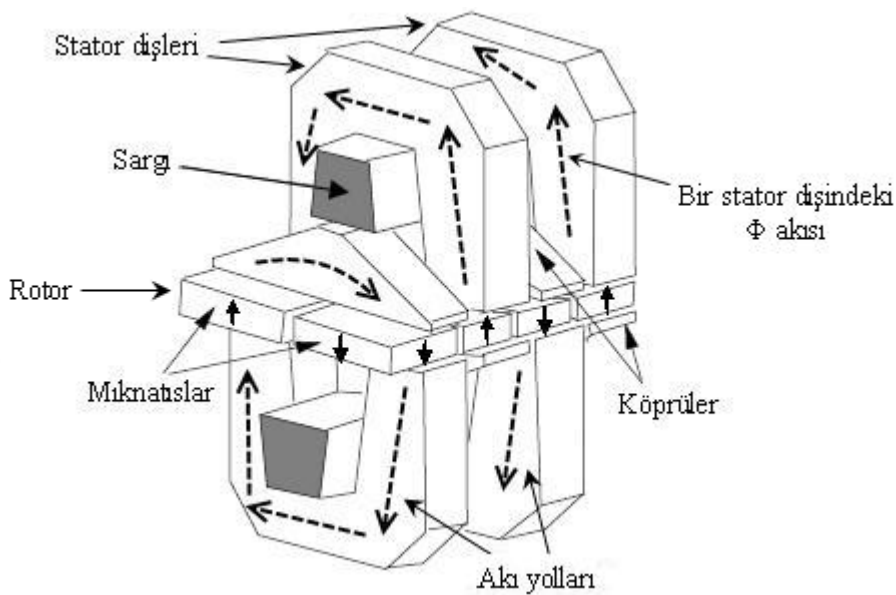
Şekil 3.4'te Weh'in tasarladığı yapılardan biri daha verilmiştir. Tek bir stator gövdesinden oluşmasına rağmen, "C" şeklindeki stator, rotor gövdesini üç yönden çevrelemiştir. Bu tasarım, Şekil 3.3 (b) ile kıyaslanacak olursa aynı çıkış gücünde daha az yer kaplar. Bunun sebebi, sargıların rotor gövdesinin ortasındaki boşluktan geçirilerek bu boşluğun değerlendirilmesidir. Ayrıca statora gerekli şekil verilmiş ve böylece köprülere ihtiyaç kalmamıştır. Öte yandan tasarımın olumsuz yanı, rotor gövdesini, statora bakan iki yüzündeki hava aralıkları tüm makine boyunca eşit kalacak şekilde yataklama problemidir.



Şekil 3.4 : İç rotorlu, iki taraflı “C” stator yapısı [27]

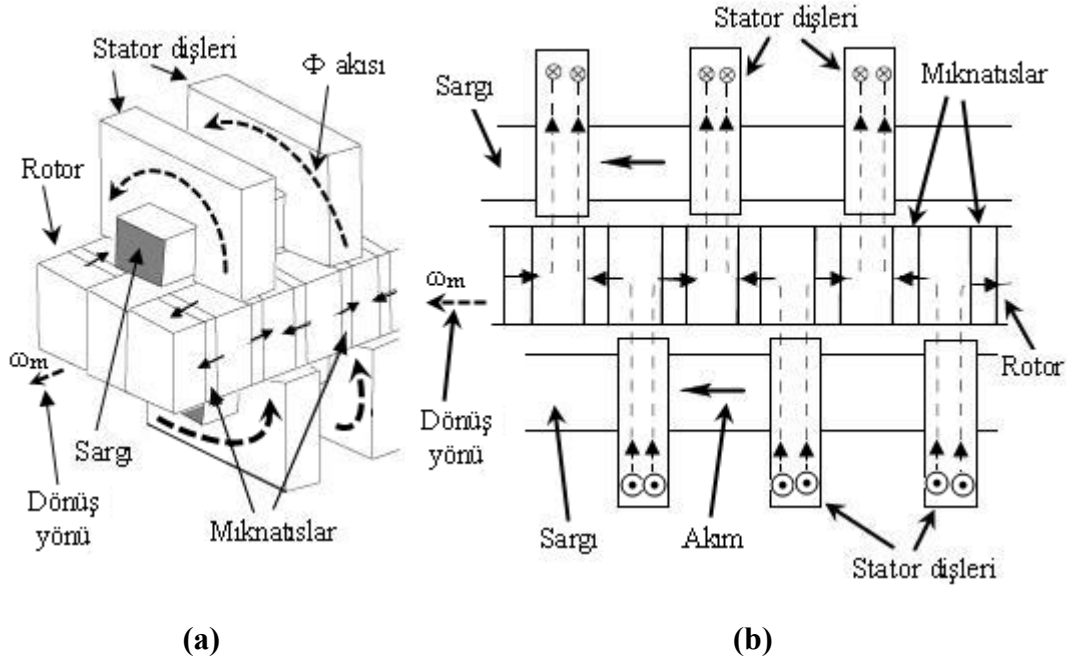
3.2 Çift Statorlu Enine-Eksenel Akılı Makine

Tek statorlu tasarımlarda bir kutup adımı boyunca kullanılmayan mıknatıslardan da yararlanmak için EEAM, Şekil 3.5’teki yapı gibi çift statorlu olarak üretilebilir. Bir kutup adımı boyunca tüm mıknatıslar ana akıya (Φ) katkıda bulundukları için iletkende daha yüksek genlikli gerilim endüklenir ve böylece makinenin çıkış gücü yükseltilebilir. Stator ve köprüler üzerinden çevrimini tamamlayan ana akı Şekil 3.5’te gösterilmiştir. İç rotorlu EEAM’lerle kıyaslanacak olursa, bütün bir rotor yapısı yerine köprüler kullanıldığı için ek olarak mıknatısları bir arada tutacak bir rotor gövdesi gerekmektedir. Mıknatısların oluşturduğu akıların sadece stator ve köprüler üzerinden dolaşması için bu rotorun manyetik geçirgenliği düşük bir malzemeden oluşması şarttır. Sonuç olarak üretilmesi son derece zor olan bir yapıdır.



Şekil 3.5 : Çift statorlu, tek rotorlu EEAM [28]

Klasik EEAM’lerde olduğu gibi, çift statorlu EEAM’lerde de yoğunlaştırılmış akılı yapılar mevcuttur (Şekil 3.6). Akıların statorda izlediği yollar şekilde kesik çizgili oklarla belirtilmiştir. İkinci şekildeki kesit gösterimde, mıknatısların mıknatıslanma yönlerine bağlı olarak stator dişleri üzerinden akıların takip ettiği çevrim ve sargıda oluşan akımın yönü verilmiştir. Bu yapının olumlu tarafı, kaçak akıların az oluşu ve böylece akımın en az kayıpla iki stator sargısında da gerilim endükledebilmesidir. Öte yandan, fazladan bir stator eklenmesi görüldüğü gibi makinenin ağırlığını artırır.

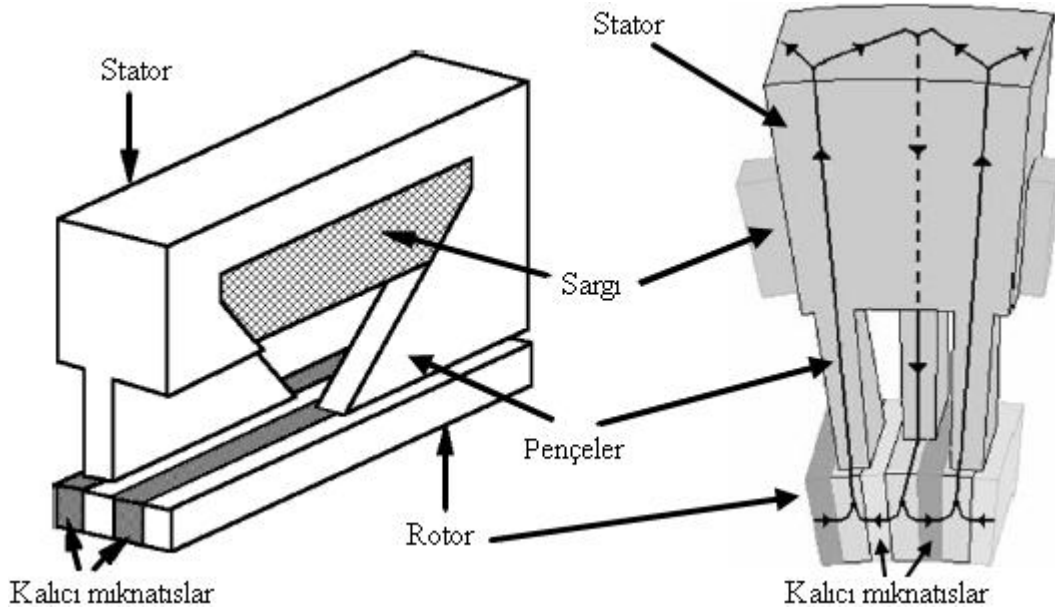


Şekil 3.6 : (a) Çift statorlu, tek rotorlu, yoğunlaştırılmış akılı EEAM, (b) Çift statorlu, tek rotorlu, yoğunlaştırılmış akılı EEAM kesiti ve üzerindeki akı yolları [29]

3.3 Pençeli Statorlu Enine-Eksenel Akılı Makine

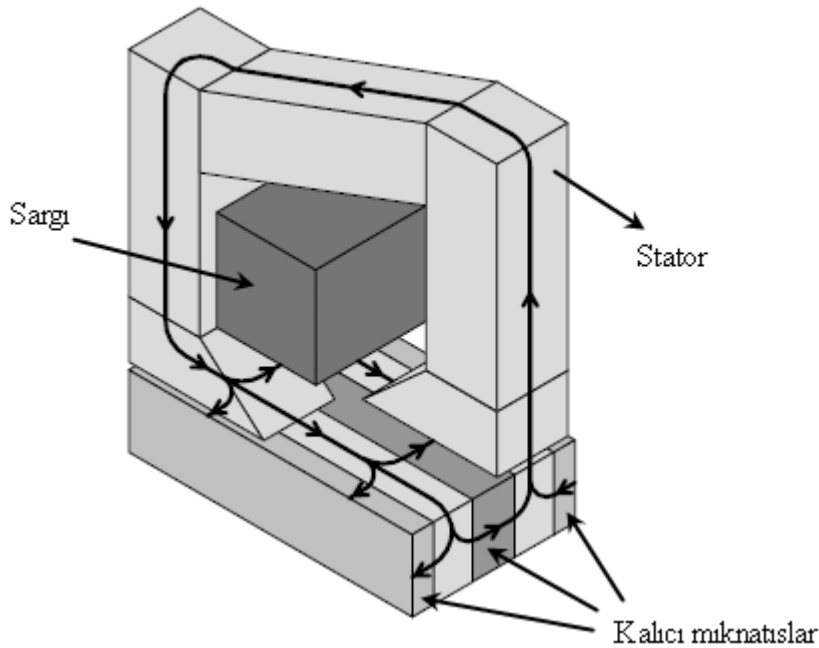
Rotor gövdesine eksenel doğrultuda daha uzun mıknatıslar yerleştirebilmek ve stator dişlerinin olabildiğince fazla miktarda akıyı çekebilmesi için “pençeli” statora sahip EEAM’ler geliştirilmiştir [30]. Pençe sözcüğünün kullanılması, stator diş bacaklarının daha fazla akı toplayabilmek için rotora doğru yüzey alanını genişletmesinden ileri gelmektedir (Şekil 3.7). Rotor gövdesine daha önceki yapılarda olduğu gibi karşılıklı iki mıknatıs yerine tek bir uzun mıknatıs kullanılmıştır. Böylece uzun mıknatısın ürettiği fazla akıdan en iyi şekilde yararlanabilmek için akı toplayıcı pençelere ihtiyaç duyulur. İçinden farklı yönlerde akıların geçtiği tek parçadan oluşan stator, lamine saclar yerine sıkıştırılmış demir

veya nikel alaşımlı tozlarından üretilmelidir. Bu tasarımın olumsuz tarafı, pençelerin sargı hacminin bir kısmını işgal etmeleri sonucu, sargının rotor gövdesinden uzaklaştırılma gereği ve sonuçta makine çapının büyümesidir. Şekil 3.7’de mıknatısların ürettiği akıların stator kat ettiği yollar belirtilmiştir.



Şekil 3.7 : Pençeli statorlu EEAM ve makinedeki akı yolları [23]

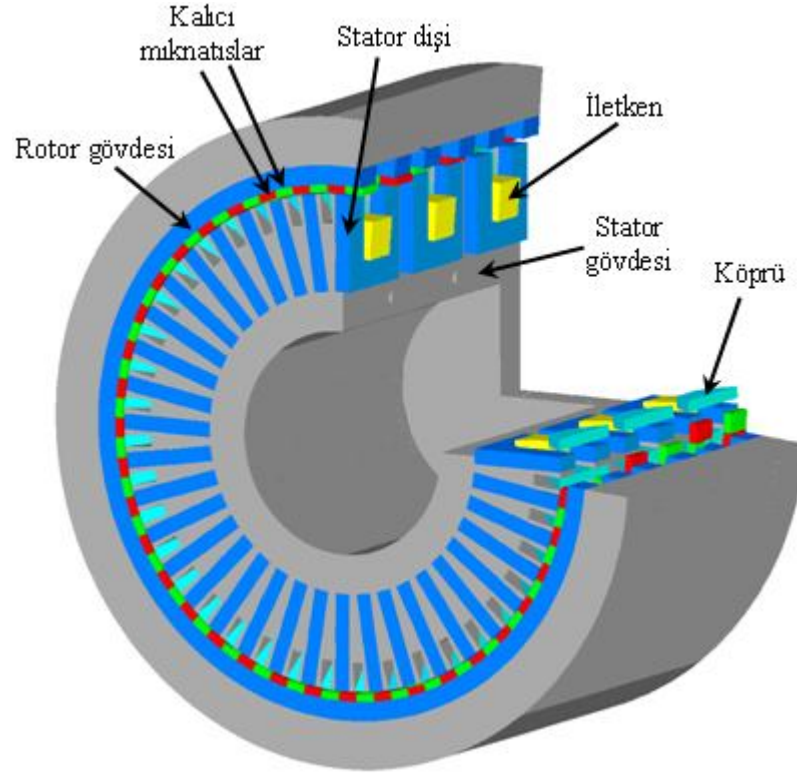
Şekil 3.8’deki tasarım da bir pençeli rotorlu EEAM’dır. Ancak stator gövdesi, Şekil 3.7’deki gibi tek parça değildir; klasik iç rotorlu yapıya benzer olarak bağımsız dişlerden oluşur. Bu yapının dezavantajı, değişik stator yapısının üretim zorluğudur.



Şekil 3.8 : Başka bir tip pençeli statorlu EEAM ve makinedeki akı yolları [22]

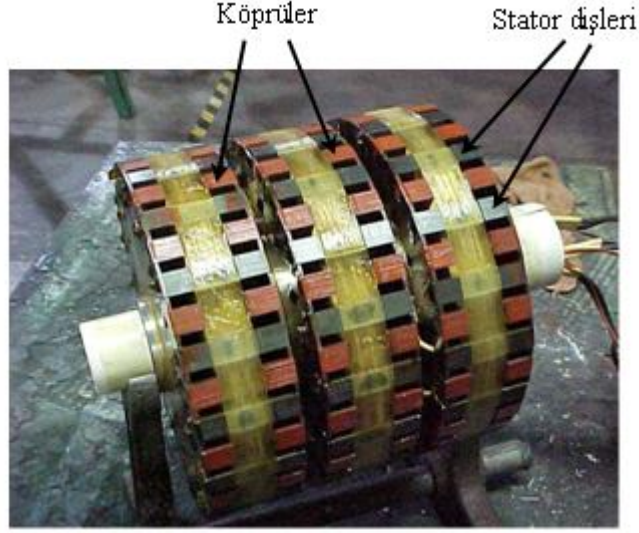
3.4 Dış Rotorlu Enine-Eksenel Akılı Makine

Dış rotorlu EEAMler basitçe, Şekil 3.6'daki yapıya benzetilebilir. Tek farkı dış statorunun olmamasıdır. Dış rotorlu makinelerin iç rotorlu klasik ve çift statorlu makinelere karşı büyük avantajları vardır. Bu yapılar aynı hacim için karşılaştırılacak olursa, dış rotorlu makineler, rotor çapı büyüdüğü için türbinden elde edilen momenti daha verimli kullanır. Rotor statorun dışında yer aldığından ısınma sorunu büyük oranda giderilmiş olur. Bu sayede, sıcaklık arttıkça maksimum enerji seviyeleri azalan kalıcı mıknatısların da ömrü uzar. Şekil 3.9'da üç fazlı dış rotorlu EEAM yapısı görülmektedir. Rotor gövdesindeki üç ayrı faz, aralarında elektriksel olarak 120° olacak şekilde yerleştirilmiştir. Köprülü yapı toplam verimi artırır.



Şekil 3.9 : Üç fazlı dış rotorlu EEAM [8]

Bu dış rotorlu EEAM'nin [31]'de küçük güçlü bir prototipi üretilmiştir. 6 kW anma gücüne sahip bu makinenin faz gerilimi, çıkış gücü gibi büyüklükleri ölçülmüş ve verim eğrisi çıkarılmıştır. Üretilen bu makine Şekil 3.11'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.10 : (a) Dış rotorlu EEAM statoru, (b) Dış rotorlu EEAM rotoru [31]

3.5 Enine-Eksenel Akıllı Makineler Hakkında Genel Bilgi

Son yıllarda güç elektroniği sistemleri ve kalıcı mıknatıs teknolojilerinin hızla gelişmesiyle, birçok kalıcı mıknatıslı makine tasarım fikirleri ortaya atılmıştır. Bunlar arasında EEAMler, yüksek tork/kütle oranı ve buna bağlı olarak düşük devirde doğrudan tahrikli sistemlere uygunluğuyla ön plana çıkmaktadır.

Normal bir uyarma sargılı senkron makinede, ana rotor akısının statora giriş yaptığı oluk dişleri, doymaya karşı belli genişlikte yapılmalıdır. Ancak aynı oluklarda stator sargısı yer alır. Oluk dişi ve oluk genişlikleri birbirlerini sınırlar. Bu yüzden makinenin gücünü artırmak için çapını daha fazla büyötmeye ihtiyaç vardır. Ancak

EEAMlerde akının dolaştığı stator devresi ve stator sargısı aynı hacim için rekabet etmez [20]. Sarım sayısı rahatlıkla artırılarak çıkış gerilimi büyük tutulabilir; bunun için gerekli hacim stator gövdesinde mevcuttur. Öte yandan özellikle yoğunlaştırılmış akıllı rotora sahip toplojilerde, kaçak akılar azalacağından tork/kütle oranı daha da büyür. EEAMler, diğer hiçbir elektrik makinesinin sahip olmadığı bir tasarım esnekliğine sahiptirler. Bu sayede, yeni bir makine türü olmasına rağmen birçok çalışmaya imza atılmıştır. Her çalışmada incelenen tasarımların kendi içinde olumlu ve olumsuz tarafları vardır.

Genel olarak EEAMlerin en kötü yanı, bağımsız parça adedinin fazla olmasından dolayı ortaya çıkan seri üretim zorluğudur. Çok hassas yataklama işlemleri ve parçaları bir arada tutmak için destek elemanları gerekmektedir. Ayrıca, kalıcı mıknatısların rotorun üzerine yerleştirildiği tasarımlarda, kaçak akılar önemli miktardadır. Öte yandan, rotordaki mıknatıslarla stator dişleri arasındaki çekimden kaynaklanan relüktans kuvvetleri, istenmeyen moment etkilerine (*cogging torque*) sebep olur [20].

Enine-eksenel akıllı kalıcı mıknatıslı senkron generatörlerin geliştirilmesi için son 20 yılda birçok araştırma yapılmıştır. Örneğin [19]'da 3 MW 'lık 15 d./dak hızında dönen türbin için 5 farklı generatör tipi karşılaştırılmıştır. Dişli kutulu sistemlere göre biraz pahalı olmasına rağmen, enerji getirisi en çok doğrudan tahrikli kalıcı mıknatıslı generatörlerdedir. Kalıcı mıknatıslarda ve makine ile şebeke arasına bağlanan güç çevirici sistemlerindeki gelişmeler göz önüne alındığında maliyet daha da düşürülebilir [8].

Yoğunlaştırılmış akıllı rotor gövdesinin mekanik olarak üretilmesi zor olduğundan, yeni fikirler ortaya atılmıştır. Bunlardan en dikkat çekici olanı, rotorları dikdörtgen kesitli oluklara ayrılmış şekilde imal etme düşüncesidir [32]. Daha sonra uzun kalıcı mıknatıslar istenen sayıda ve sırada bu oluklara sokulur. Böylece hem daha sağlam ve kesintisiz bir rotor gövdesi elde edilir, hem de zamanla deforme olmuş veya olumsuz sıcaklık şartlarıyla beraber mıknatıslıkları zayıflamış mıknatısları yenileriyle değiştirme imkânı doğar. Ayrıca kutup adımı genişlikleri ve buna bağlı olarak stator dişi sayılarında değişiklikler yapılabilir.

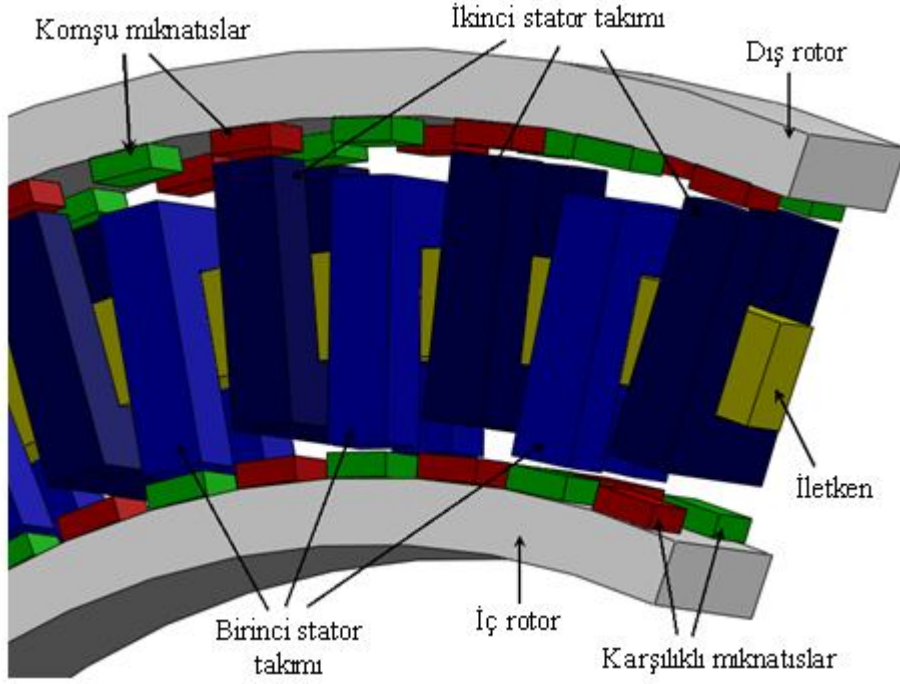
4. YENİ ÇİFT ROTORLU ENİNE-EKSENEL AKILI KALICI MIKNATISLI GENERATÖRÜN HESAPLAMALI ANALİZİ

4.1 Giriş

Çalışmanın bu bölümünde, yeni çift rotorlu enine-eksenel akılı sabit mıknatıslı generatörün yapısı ve çalışma şekli anlatılacaktır. Ayrıca bölümde, farklı açılardan resimler, tasarım büyüklüklerinin elde edilmesi, örnek bir parçasının manyetik analizi, endüklenen gerilimin matematiksel analizi, toplam kütle ve maliyet hesabı yer almaktadır. Yeni çift rotorlu EEAM, sadece kavramsal olarak incelenmiş, mekanik tasarım esaslarından bahsedilmemiştir. Çalışma prensibinin daha açık anlatılması amaçlanarak bu bölümdeki makineyi tanıtan renkli şekiller ölçeksiz çizilmiş, ölçekli çizilenler ise şekil altı açıklamalarda belirtilmiştir.

4.2 Çift Rotorlu Enine-Eksenel Akılı Makinenin Yapısı ve Çalışma Prensibi

Bu çalışmada incelenecek olan enine-eksenel akılı makinenin en büyük özelliği iki tane rotorunun ve temel yapıdaki makinenin sahip olduğu stator dişlerinden iki kat daha fazla stator dişine sahip olmasıdır. Böylece makinede, klasik iç rotorlu EEAM'lere göre iki kat daha fazla gerilim endüklenebilir. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi biri statorun iç tarafında, biri de dış tarafında olmak üzere iki adet rotor söz konusudur. İç ve dış rotor birbirlerine mekanik olarak bağlıdır. Rotorların statora bakan taraflarında kalıcı mıknatıslar yerleştirilmiştir. Bir yöne bakan "U" şeklindeki stator dişlerinin sayısı, kutup çifti sayısını verir. Bir kutup çifti sayısı kadar stator dişi, iç kısımdaki rotora; bir kutup çifti sayısı kadar stator dişi de dış kısımdaki rotora bakmaktadır. Tez çalışmasında, iç rotora bakan stator dişlerinin oluşturduğu kümeye birinci stator takımı; dış rotora bakan stator dişlerinin oluşturduğu kümeye ikinci stator takımı adı verilmiştir. Bir rotor ve bu rotora bakan stator dişleri tek bir makine gibi düşünülürse, bu yapıda aslında iki makine yer almaktadır. Yani aynı hacimde iki kat daha fazla gerilim üretme imkânı doğar.

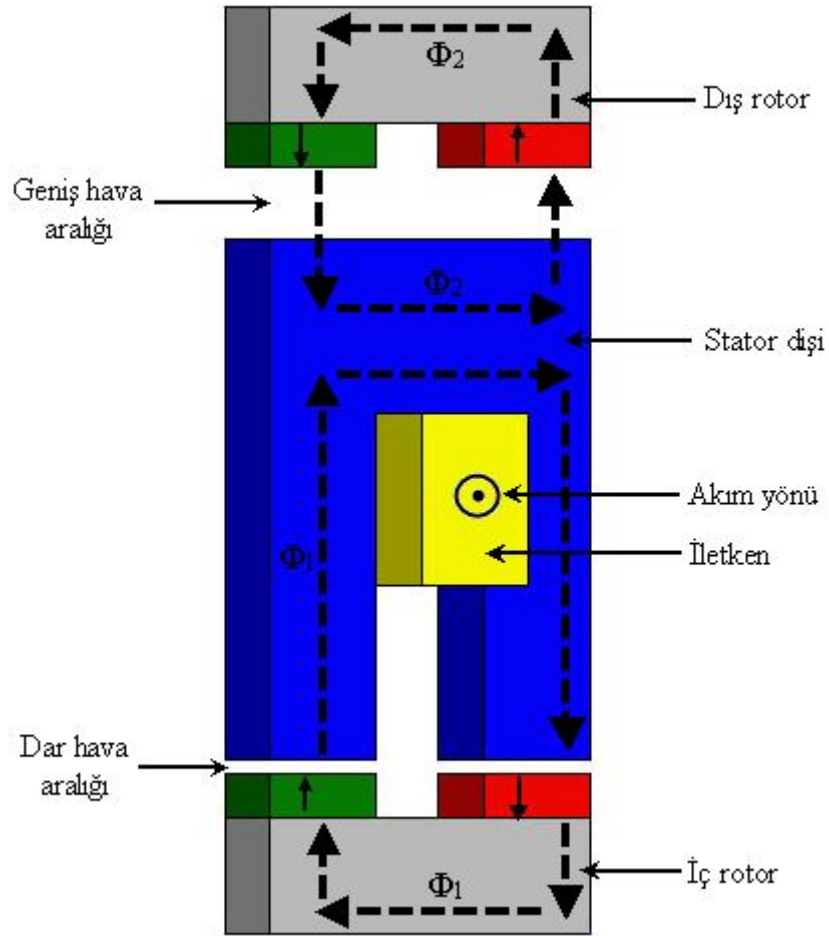


Şekil 4.1 : Yeni çift rotorlu EEAM'yi oluşturan elemanlar

Bir kutup adımı boyunca bir yöne bakan stator dişleriyle beraber bir rotor, gerilim endükleme görevini üstlenir. Şekil 4.1'deki mavi renkli olan birinci stator takımı ve iç rotor göz önüne alınırsa, kalıcı mıknatıslarda sabit genlikli manyetik akı üretilmesine rağmen, dönme hareketiyle birlikte stator dişlerinde zamana göre değişen bir akı oluşur. Mıknatıslar stator hizasına gelmeden stator dişlerindeki akı miktarı sıfırdır. Rotorun hareketiyle akı miktarı artar ve mıknatıslar stator dişinin tam karşı konumuna geldiğinde en yüksek değerine ulaşır. Daha sonra da azalarak sıfıra iner. Bu şekilde bir kutup adımı mesafesi aşılmış olur. Bu olay aynı anda, aynı yöne bakan birinci takım olarak adlandırılan tüm stator dişleri için geçerlidir. Birinci stator takımının üzerinde yer alan dış rotordaki mıknatısların ürettiği akı, bu kutup adımı süresince iletkeni halkalamaz ve kendi devresini birinci stator takımı dişlerinin aksenal kısmı ve geniş hava aralığı üzerinden kapatır (Şekil 4.2). Bu yüzden birinci stator diş takımının dış rotora bakan tarafındaki Φ_2 akısının geçtiği hava aralığı daha büyük yapılmıştır. Böylece stator dişinin aksenal gövdesinde meydana gelebilecek olası manyetik doymadan kaçınılmaya çalışılmıştır. İleride de bahsedileceği gibi yapılan simülasyonlar sonucu manyetik doymanın söz konusu olmadığı gözlenmiştir.

Bir rotoru göz önüne alırsak, zıt yönde mıknatıslanmış olan mıknatıslar karşılıklı olarak yerleştirilmiştir. Şekillerde bu mıknatıslar yeşil ve kırmızı renkte gösterilmiştir. Manyetik akı stator dişini dolaşıp karşı mıknatıs ve rotor üzerinden

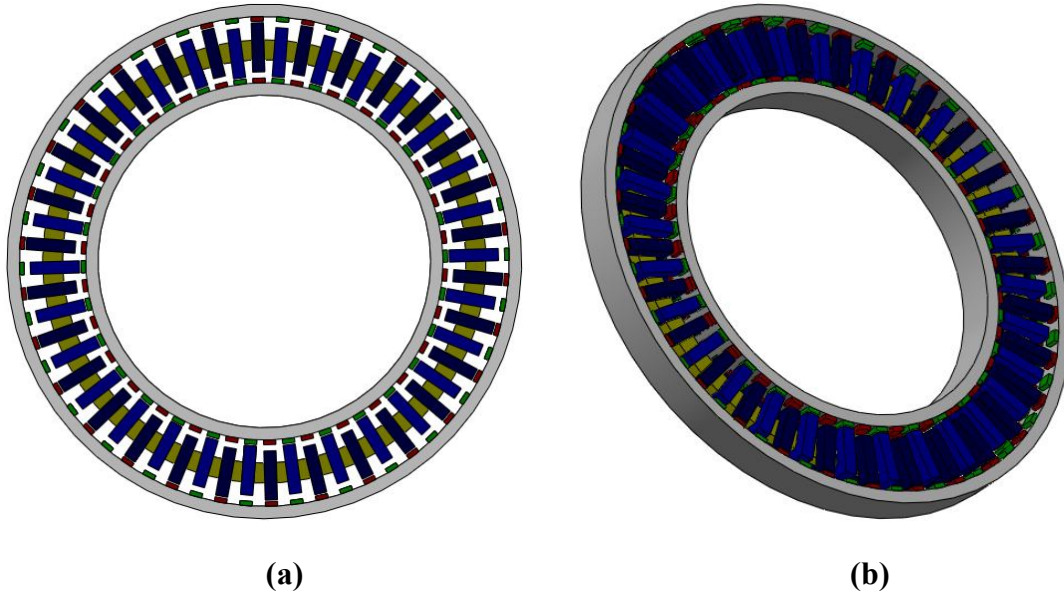
devresini kapatır. Akı, bunu yaparken manyetik direnci düşük yolları tercih eder. Bu yüzden kalıcı mıknatıslarla akının dolaşması istenen stator dişleri arasındaki hava aralığı olabildiğince küçük tutulmuştur. Makine boyutları büyüdükçe mekanik sebeplerden dolayı hava aralığı da büyüyecektir. 1 MW 'tan daha büyük güçte makinelerde hava aralığı, $3\text{--}4\text{ mm}$ olarak öngörülür [25]. Şekil 4.2'de, dar hava aralığı üzerinden devresini kapatan Φ_1 akısı ve bu akının Lenz yasası uyarınca iletkende oluşturduğu akımın yönü görülmektedir. Mıknatısların üzerindeki oklar mıknatıslanma yönlerini belirtir.



Şekil 4.2 : Birinci stator takımına ait bir dişin üzerindeki manyetik akı yolları

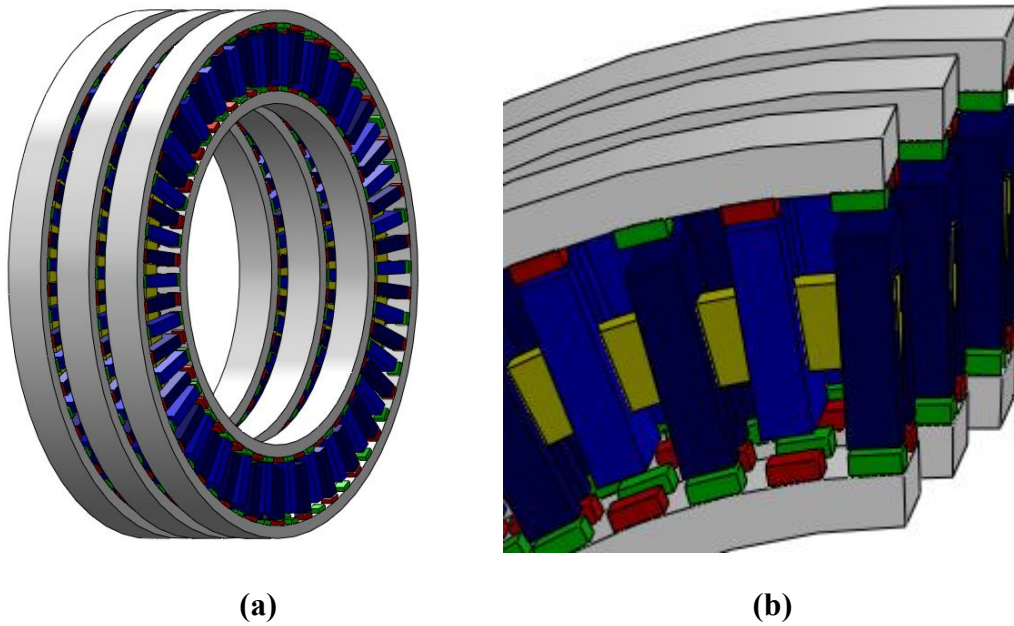
Birinci ve ikinci stator takımları arasında kalan boşluktan sargı iletkenleri geçer ve makinenin çevresi boyunca devam eder. Faraday kanununa göre, rotorların dönme hareketi sonucu stator takımlarında oluşan alternatif manyetik akı, sargılarda gerilim endüklenmesini sağlar, endüklenen gerilim de sargı direncine ve yüklenme durumuna bağlı olarak bir akım akıtır. Sargının nasıl boyutlandırılacağı ileride anlatılacaktır.

Makinenin tek bir fazının resimleri, Şekil 4.3'te değişik açılardan verilmiştir.



Şekil 4.3 : (a) Çift rotorlu EEAM'nin tek fazının görünümü, (b) Çift rotorlu EEAM'nin tek fazının başka bir görünümü

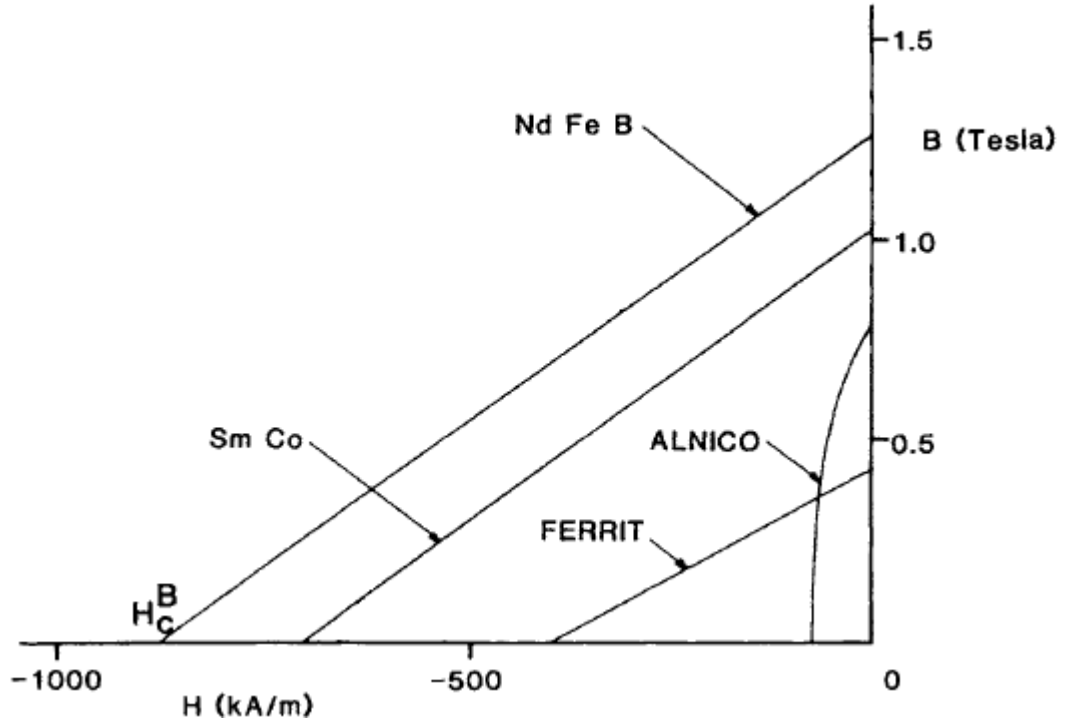
Şekil 4.4'te ise üç fazlı çift rotorlu enine-eksenel akıllı sabit mıknatıslı senkron generatör görülmektedir. Her faz yapı olarak aynıdır. Yalnız rotorlar, aralarında elektriksel olarak 120° faz farkı olacak şekilde mekanik olarak bağlıdır. Böylece üç fazlı gerilim elde edilmiş olur. Bu faz farkı, komşu mıknatısların orta noktaları arasındaki mesafenin-aynı zamanda bir kutup adımının-üç bölünmesi ile bulunur.



Şekil 4.4 : (a) Üç fazlı çift rotorlu EEAM görünümü, (b) Fazların arasındaki 120° 'lik faz farkı

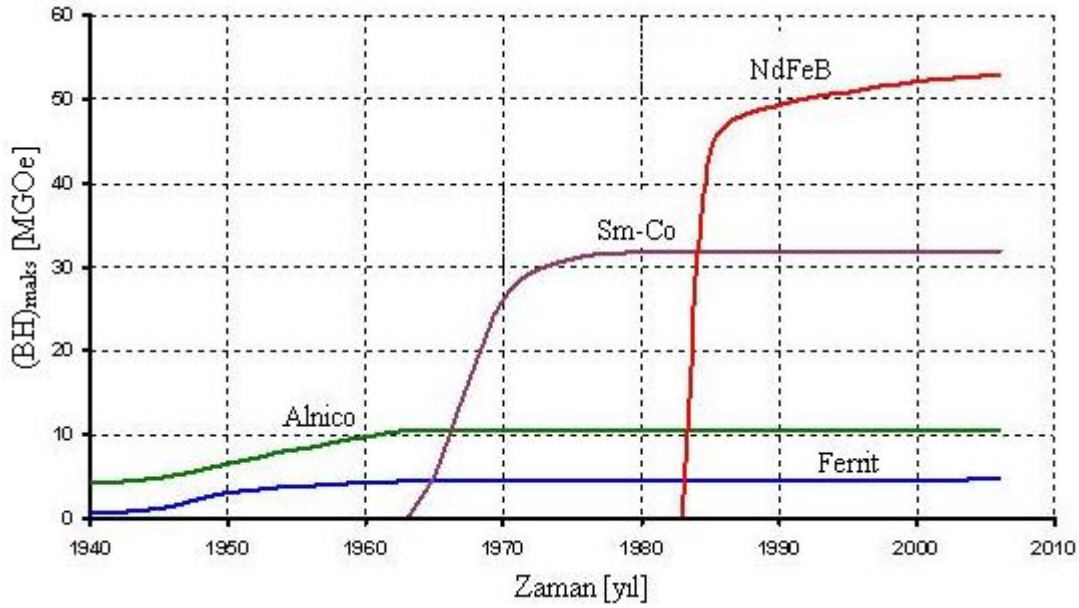
4.3 Çift Rotorlu Enine-Eksenel Makinede Kullanılan Malzemeler

Rotorlardaki kalıcı mıknatıslar, maliyeti düştüğü için son 10 yılda kullanımı yaygınlaşan yüksek enerjili NdFeB tipi mıknatıslardır. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi bu mıknatısların kalıcı manyetik akı yoğunlukları (B_r) ve zorlayıcı kuvvetleri rakiplerine (H_c) göre büyüktür. Böylece sağladıkları enerji miktarı günümüzde 400 kJ/m^3 'ü ($1 \text{ kJ/m}^3 = 125,66 \text{ kGOe}$) geçmiştir (Şekil 4.6).



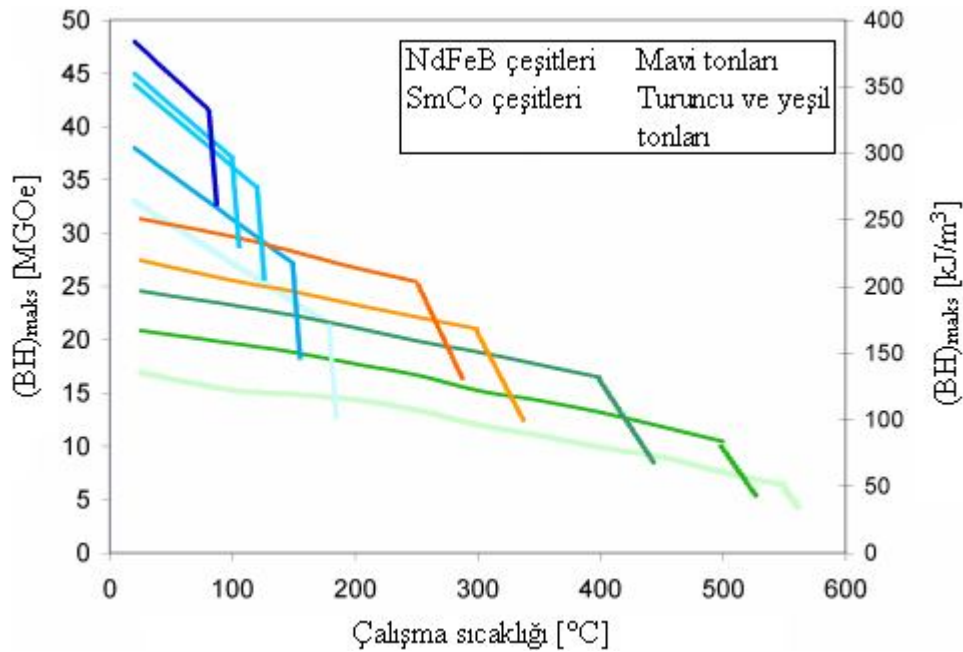
Şekil 4.5 : Çeşitli mıknatısların demanyetizasyon eğrileri [33]

NdFeB tipi kalıcı mıknatıslar, yüksek enerjili oldukları için aynı manyetik akıyı diğer tip mıknatıslara göre daha az hacimde oluşturabilirler. Bu özellikleri, makinenin toplam ağırlığının önemli oranda azalmasını sağlar. Çünkü aynı enerjiyi, örneğin birkaç kat daha fazla hacim kaplayan bir Alnico tipi mıknatıs ancak verebilir (Şekil 4.6). Çeşitli manyetik malzemelerin tarihsel gelişimlerine göre sağladıkları enerji miktarları Şekil 4.6'da verilmiştir.



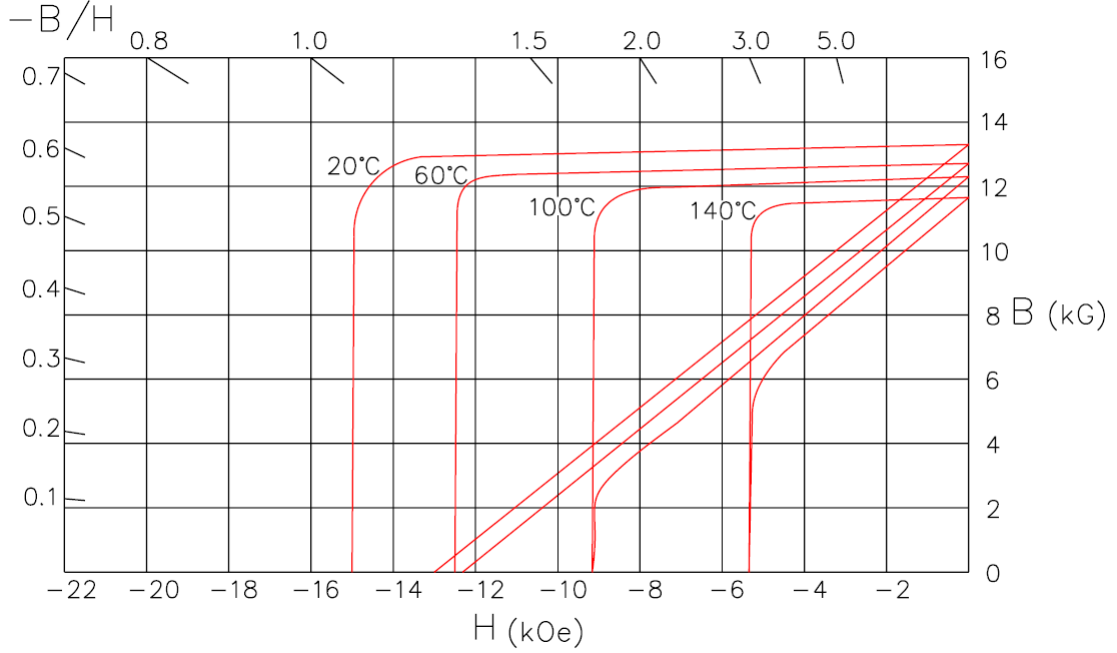
Şekil 4.6 : Kalıcı mıknatısların gelişimi ve maksimum enerji seviyeleri [34]

Kalıcı mıknatısların sağladıkları maksimum enerji seviyesi ortam sıcaklığı arttıkça düşer. Curie sıcaklığı adı verilen belli bir sıcaklık değerinden sonra, mıknatıslar manyetik özelliklerini kaybederler. Bu yüzden kalıcı mıknatıslı elektrik makinelerinin tasarımında bu etken göz önüne alınmalı ve mıknatıs boyutları çalışma sıcaklığındaki manyetik değerlere göre belirlenmelidir. NdFeB ve SmCo (Samaryum-Kobalt) tipi mıknatıslar için, çalışma sıcaklığı ve maksimum enerji arasındaki bu ilişki Şekil 4.7'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : Farklı mıknatıs tiplerinde maksimum BH enerji seviyesinin çalışma sıcaklığına bağlı değişimi [34]

Bu çalışmada N44 tipi NdFeB mıknatıslar kullanılmıştır. Mıknatısların maksimum çalışma sıcaklığı 120°C'dir [36]. Makinenin anma çalışma sıcaklığı 100°C seçilmiştir [22]. Bu yüzden mıknatıs tasarımında 100°C'deki mıknatıslanma eğrisinden yararlanılacaktır. Şekil 4.8'de N44 tipi mıknatısın farklı ortam sıcaklıklarındaki mıknatıslanma eğrileri verilmiştir.

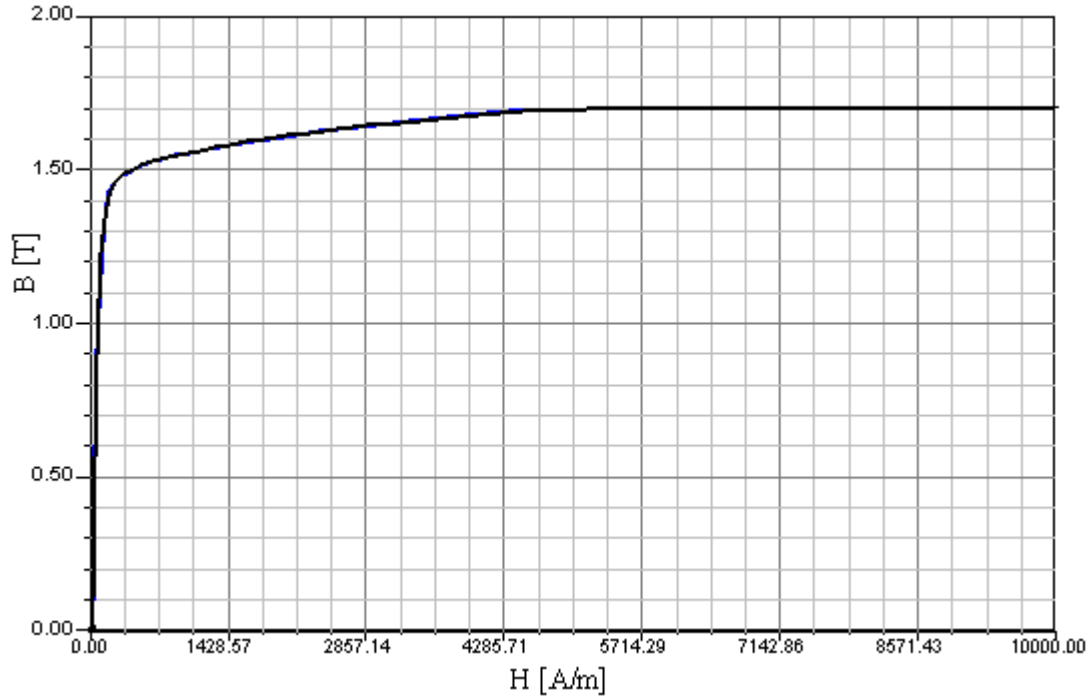


Şekil 4.8 : N44 tipi kalıcı mıknatısın mıknatıslanma eğrileri

Stator takımlarının çelik alaşımlı laminasyonlardan oluşması düşünülmektedir. Böylece statordaki akıların oluşturacağı Feko akımlarının sebep olduğu güç kayıpları en aza indirgenir. Spiral tip laminasyonlar kullanılarak, presleme ve yalıtma işlemleri sırasında hava kabarcıklarının oluşması engellenebilir [35]. Böylece parçaların mekanik olarak birbirine temasının ve dolayısıyla olası akustik gürültünün önüne geçilir. Manyetik direnç küçülmüş olacağından daha küçük mıknatıslanma akımı yeterli olur. Ayrıca spiral rulolar şeklinde sarılmış laminasyon katlarının boyuna ikiye bölünerek köşesiz “U” şeklinde stator dış takımlarının üretilebilir. Böylece makinenin yapısında, manyetik akının çevrimini tamamlarken kullanmadığı stator ve rotor gövdesi köşeleri söz konusu olmaz. Bu sayede makine kütlesi önemli ölçüde azaltılabilir. Öte yandan manyetik doymanın gerçekleştiği iç köşeler de olmayacağından kayıplar azalır. Kısaca tüm manyetik devre kesiti boyunca akı yoğunluğu aynı kalır; homojen bir dağılım elde edilir. İç ve dış rotor sıkıştırılmış manyetik malzeme tozundan yapılmalıdır. Çünkü manyetik akı, hem karşılıklı mıknatıslar üzerinden, hem de komşu mıknatıslar üzerinden devresini kapatmaktadır.

Böylece yumuşak manyetik malzemenin kullanılması üç boyutta birden Fuko kayıplarını azaltır [32].

Tasarımda, manyetik alan analiz programının kütüphanesinde bulunan 2-S tipi Amerikan çeliği kullanılmıştır. Kullanılan çelik alaşımın mıknatıslanma eğrisi Şekil 4.9’da verilmiştir. Alaşımın görelî manyetik geçirgenlik katsayısı $\mu_r = 9400$, elektriksel iletkenlik katsayısı $\sigma = 6,25 \text{ MS}$, demir doldurma faktörü $k_d = 0,98$ ve laminasyon kalınlığı $0,018 \text{ inç}$ ($0,4572 \text{ mm}$)’tir. Şekildeki BH-eğrisinde B Tesla (T), H ise Amper/metre (A/m) cinsindendir. Daha önce, rotor gövdeleri için yumuşak manyetik malzeme kullanılmasının avantajlı olduğu belirtilmesine rağmen, simülasyonlarda manyetik akının eksenel doğrultuyu tercih etmediği gözlemlenmiş ve bu nedenle rotor gövdeleri için de lamine çelik kullanılmasında sakınca görülmemiştir.



Şekil 4.9 : Stator ve rotor gövdesi için kullanılan çelik alaşımın BH-eğrisi

4.4 Endüklenen Gerilim Hesabı

Stator gövdesinde dolaşan sabit genlikli manyetik akı, rotorların hareketiyle zamana göre değişken bir nitelik kazandığı için stator dişlerinin ortasından geçen sargılarda gerilim endüklenir. Bilindiği gibi Faraday kanunu akı ile gerilim arasındaki ilişkiyi tarif etmektedir:

$$e = \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.1)$$

Bu ifade bir adet iletkende endüklenen gerilimin ifadesidir. Eğer N adet iletken birbirine seri bağlı ise, yani bir sargı oluşturuyorlarsa;

$$e = N \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (4.2)$$

olur. Buradaki gerilimin polaritesi, Lenz yasasına göre belirlenir.

Yeni çift rotorlu enine-eksenel akılı sabit mıknatıslı generatörün sargılarında endüklenen gerilimi hesaplamak için mıknatısların zamanla değişen konumları göz önüne alınmalıdır. Rotorlar hareket ettikçe karşılıklı mıknatıslar, stator gövdesinin tam hizasına gelirler ve bu konumdan tekrar ayrılırlar. Bir kutup adımı kadar mesafe aşıldıktan sonra bir öncekine göre ters kutuplanmış karşılıklı mıknatıslar tam hizalı konuma gelir ve böylece alternatif akı elde edilmiş olur.

Stator gövdesindeki akı, en büyük değerini (Φ_m) karşılıklı mıknatıslar, tam stator dışının hizasındaiken alır:

$$\Phi_m = B_g \cdot A_m \quad (4.3)$$

Kararlı çalışma durumunda rotorun dönüş hızı sabit olduğundan, stator dışındaki akı değişimi bir doğru denklemi ile tanımlanır. Buna göre konuma bağlı manyetik akı ifadesi yazılırsa,

$$\Phi(\theta) = \frac{B_g A_m}{a_m} \cdot \theta \quad (4.4)$$

elde edilir. Buradaki a_m mıknatısın bir kenarının uzunluğunu, aynı zamanda stator dışı kesitinin de bir kenarının uzunluğunu göstermektedir.

Tez çalışmasında anlatılan makineye has bir özellik olarak bir çift kutup aslında iki çift kutuptan ($2p_0$) oluşmaktadır. Çünkü stator dişleri sayısı, Şekil 3.1'deki klasik yapıdaki makineden iki kat fazladır. Çift rotoru olduğu için de, rotorların bir kutup adımı kadar dönüşü, iç rotora ve dış rotora bakan stator dişlerinin toplam iki kutup adımı görmelerini sağlar. Bu yüzden bir kutup adımı altında sargılarda endüklenen gerilimin ifadesi,

$$e = 2 \cdot \frac{d\Phi}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (4.5)$$

olur. Bu denklemdeki zamana bağlı konum ifadesi, açısal hızı verir:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m = 2\pi \cdot n_m \quad (4.6)$$

Rotorların dönüş hızı, düşük devirdeki rüzgâr türbinlerine uygun olarak 30 d/dak. seçilmiştir. Yani, $n_m = 0,5 \text{ d/sn.}$ olur. Modellenen makinenin çift kutup sayısı $p_0 = 60$ olarak düşünülmüştür.

Denklem 4.4 ve 4.6, (4.5)'te yerine koyulursa,

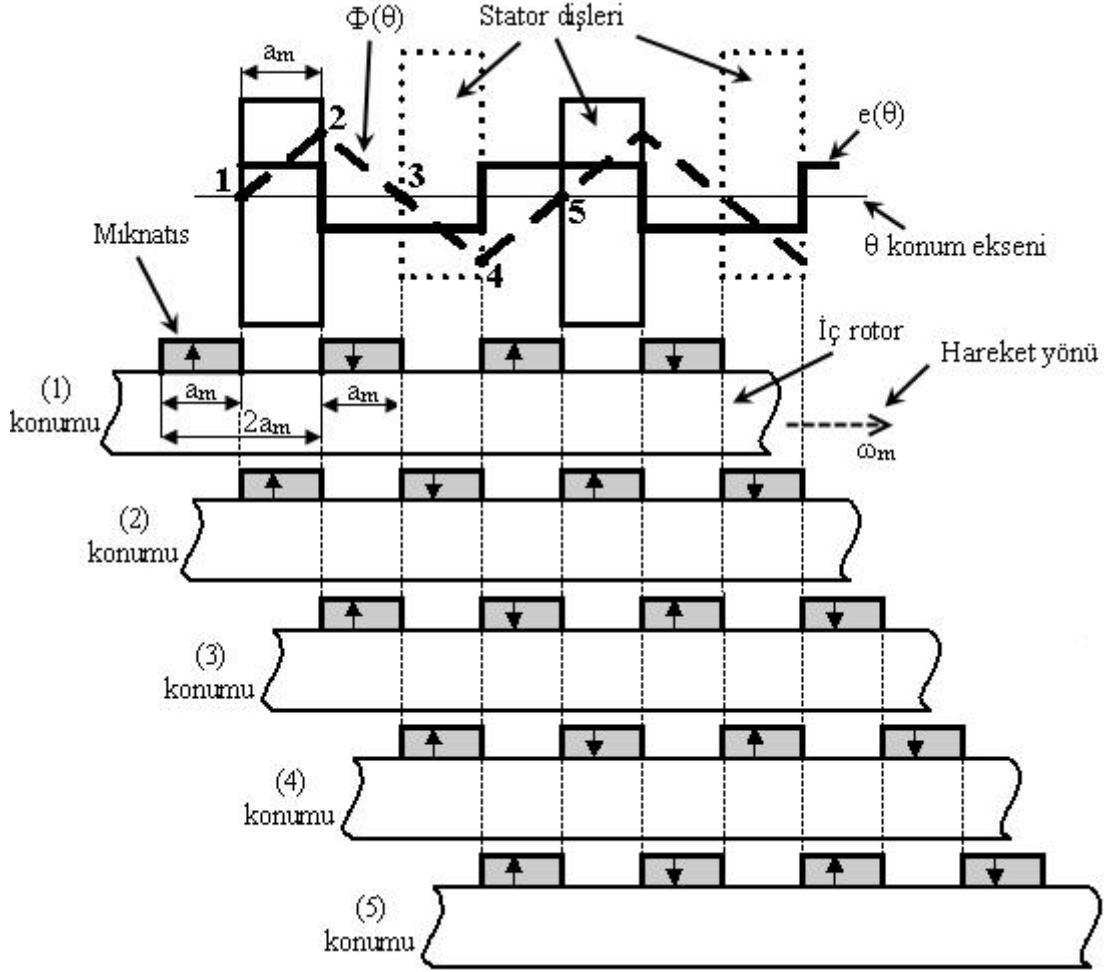
$$e = 2 \cdot \frac{B_g A_m}{a_m} \cdot 2\pi \cdot n_m \quad (4.7)$$

elde edilir. O halde; N sarım sayısı ve p_0 çift kutup sayısı olmak üzere tüm sargı boyunca makinede endüklenen kare dalga gerilimin genliği,

$$E_m = 2 \cdot N \cdot p_0 \cdot \frac{B_g A_m}{a_m} \cdot 2\pi \cdot n_m \quad (4.8)$$

denklemini ile hesaplanır.

Şekil 4.10'da da görüldüğü gibi, üçgen dalga şekline sahip manyetik akının türevi olan endüklenen gerilim, kare dalga şeklindedir. Akının statordaki dağılımını ve dolayısıyla endüklenen gerilimin dalga şeklini belirleyen etken, kalıcı mıknatısın, stator dişinin ve komşu mıknatısların birbirlerine göre genişliğidir. Bu çalışmada stator diş kalınlığı, mıknatıs genişliği ve mıknatıslar arasındaki mesafe eşit uzunlukta (a_m) seçildiğinden, akı ve gerilim dalga şekilleri sırasıyla üçgen ve kare dalgadır. Şekilde, iç rotorun statora göre hareketi a_m uzunluğundaki adımlarla gösterilmiş ve her konum numaralandırılmıştır.



Şekil 4.10 : Rotorun hareketi sonucu statordaki akının ve endüklenen gerilimin dalga şekilleri

Rotorun şekilde verildiği yönde hareket ettiği düşünülürse, (1) anında en soldaki mıknatıs henüz stator bacağına izdüşüm alanına girmediğinden stator dışındaki akı sıfırdır. Rotor hareket ettikçe mıknatıs stator dişinin altına girer ve bu sırada dışteki akı miktarı doğrusal olarak artar. Mıknatıs, (2) konumunda dişin tam altında iken, dışteki akı miktarı maksimumdur. Rotor, (3) konumuna doğru hareket ettikçe, dışteki akı miktarı azalır ve (3) konumunda tekrar sıfır olur. (4) konumunda mıknatıs, geniş hava aralığına denk gelir. Bu konum, ikinci stator takımının dış rotora daha yakın olduğu konumdur. Dolayısıyla, dış rotordaki ters yönde mıknatıslanmış olan mıknatısın etkisiyle akı negatif değer alır. (5) konumuna doğru hareket eden mıknatıs, akı miktarının tekrar pozitif yönde artmasını sağlar. Böylece bir periyot tamamlanır ve yeniden (1) konumuna döner. Şekil 4.10'da stator dişleri üzerinde gösterilen dalga şekilleri, iç rotor (2) konumundayken oluşan dalga şekilleridir.

Bu çalışmada kalıcı mıknatısların prizmatik yapısından dolayı gerilim dalga şekli sinüzoidal olmaktan uzaktır. Sinüzoidal bir gerilim dalgası elde etmek için mıknatıslara sinüzoidal bir şekil vermek gerekir. Ancak mıknatıslara bu şekli vermek üretim açısından çok zordur. Bu yüzden tez çalışmasında, piyasada çeşitli boyutlarda kolayca bulunabilen prizmatik mıknatıslar kullanılmıştır.

4.5 Gerilim Dalgasının Harmonik Hesabı

Gerilim dalga şekli saf sinüzoidal olmadığı için harmonik bileşenler içermektedir. Bu harmonik bileşenler bir Fourier serisi ile ifade edilebilir. Fourier, herhangi bir periyodik işaretin, değişik frekans ve genliklerde sonsuz sayıda sinüs ve kosinüs fonksiyonunun toplamı olarak seriye açılabilceğini göstermiştir. Bu toplam, E_F ile gösterilsin:

$$E_F(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} A \cdot \sin n\theta + \sum_{n=1}^{\infty} B \cdot \cos n\theta \quad (4.9)$$

Buradaki A ve B katsayıları,

$$A = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} E(\theta) \cdot \sin n\theta d\theta \quad (4.10a)$$

$$B = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} E(\theta) \cdot \cos n\theta d\theta \quad (4.10b)$$

ve E_m , gerilim dalga şeklinin maksimum değeri olmak üzere,

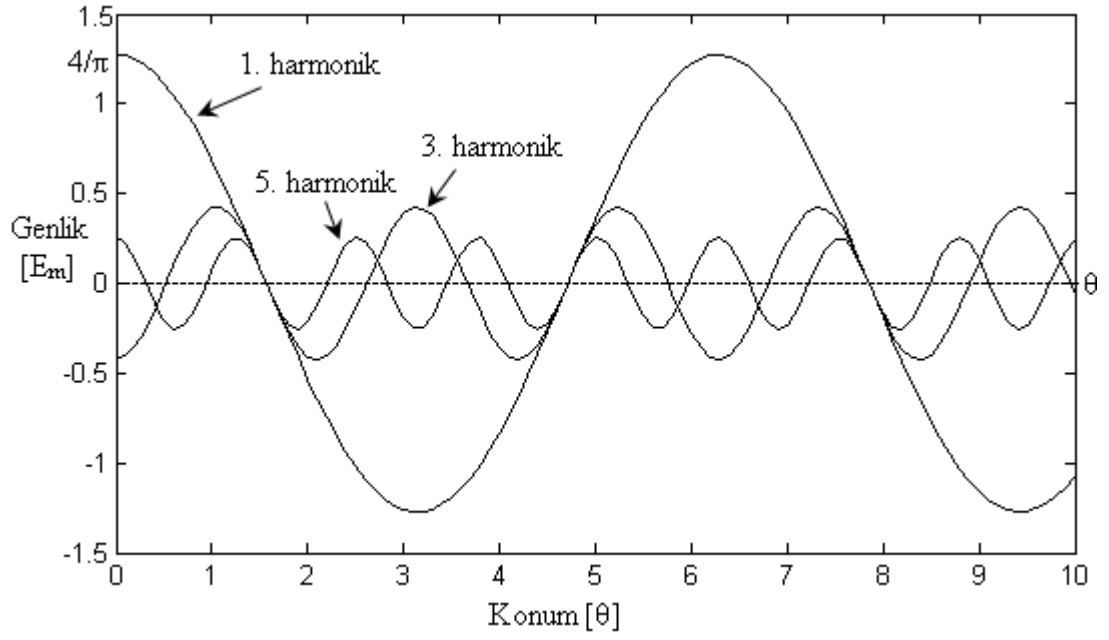
$$A = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} E_m \sin n\theta + \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} (-E_m) \sin n\theta + \frac{1}{\pi} \int_{\frac{3\pi}{2}}^{2\pi} E_m \sin n\theta = 0 \quad (4.11a)$$

$$B = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} E_m \cos n\theta + \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} (-E_m) \cos n\theta + \frac{1}{\pi} \int_{\frac{3\pi}{2}}^{2\pi} E_m \cos n\theta = \frac{4E_m}{\pi n} \sin \frac{n\pi}{2} \quad (4.11b)$$

olur. Bu katsayılar, (4.9)'da yerine yazılırsa, gerilimin toplam olarak ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} E_F(\theta) &= \sum_{n=1}^{\infty} B \cos n\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{4E_m}{\pi n} \sin \frac{n\pi}{2} \cos n\theta \right] \\ &= \frac{4E_m}{\pi} \left[\cos \theta - \frac{1}{3} \cos 3\theta + \frac{1}{5} \cos 5\theta - \frac{1}{7} \cos 7\theta + \dots \right] \end{aligned} \quad (4.12)$$

$E_F(\theta)$ fonksiyonunun ilk üç bileşeni Şekil 4.11'de görülmektedir.

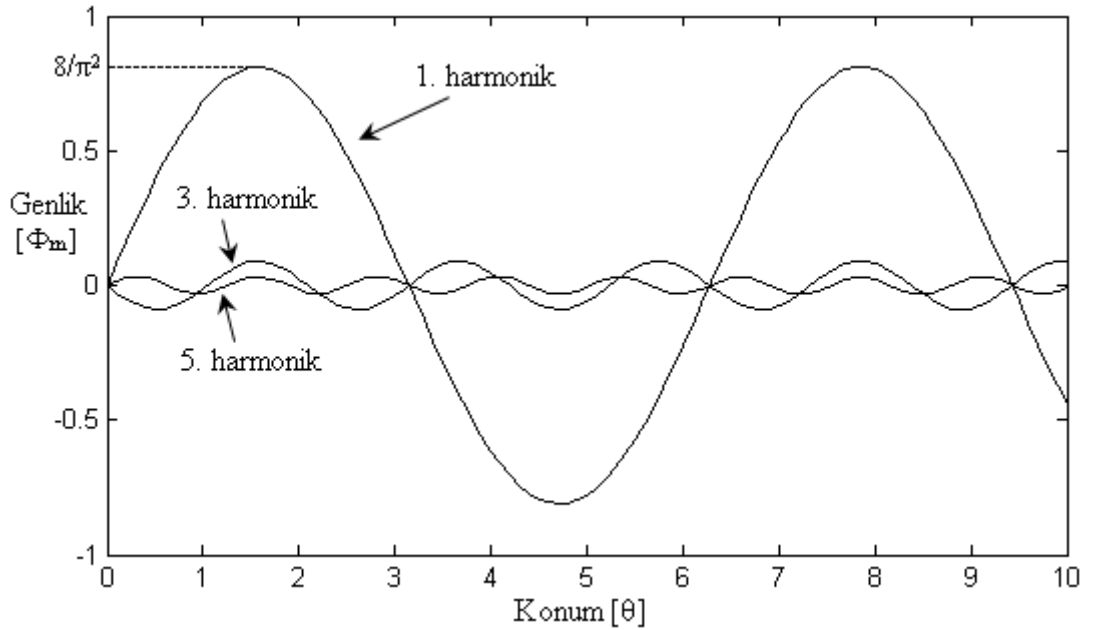


Şekil 4.11 : Endüklenen gerilim dalgasının ilk üç bileşeni

Benzer bir yaklaşımla üçgen dalga şeklindeki $\Phi(\theta)$ akısı da seriye açılabilir. Üçgen dalgada B katsayısı 0 olur ve akı fonksiyonunun toplam olarak ifadesi şöyle elde edilir:

$$\Phi(\theta) = \frac{8\Phi_m}{\pi^2} \left[\sin \theta - \frac{1}{9} \sin 3\theta + \frac{1}{25} \sin 5\theta - \frac{1}{49} \sin 7\theta + \dots \right] \quad (4.13)$$

Akı fonksiyonunun ilk üç bileşeni Şekil 4.12’de verilmiştir. Akı ile gerilim arasındaki 90° ’lik faz farkı, iki şekilden açıkça görülmektedir.



Şekil 4.12 : Stator dışındaki akı dalgasının ilk üç bileşeni

4.6 Eşdeğer Manyetik Devre Kullanılarak Mıknatısların ve Hava Aralıklarının Boyutlandırılması

Manyetik devre hesabı ve buna bağlı diğer hesaplamaların yapılacağı makinenin anma değerleri Çizelge 4.1'deki gibidir.

Çizelge 4.1 : Tasarım makinesinin anma büyüklükleri

$P_n [kW]$	$V_n [V]$	$I_n [A]$	$n_n [d./dak.]$	p_0
500	750	400	30	60

Bu çalışmadaki hesaplama ve analizlerde sonuca daha çabuk varma adına bazı kabuller yapılmıştır. Yapılan kabuller aşağıda sıralanmıştır:

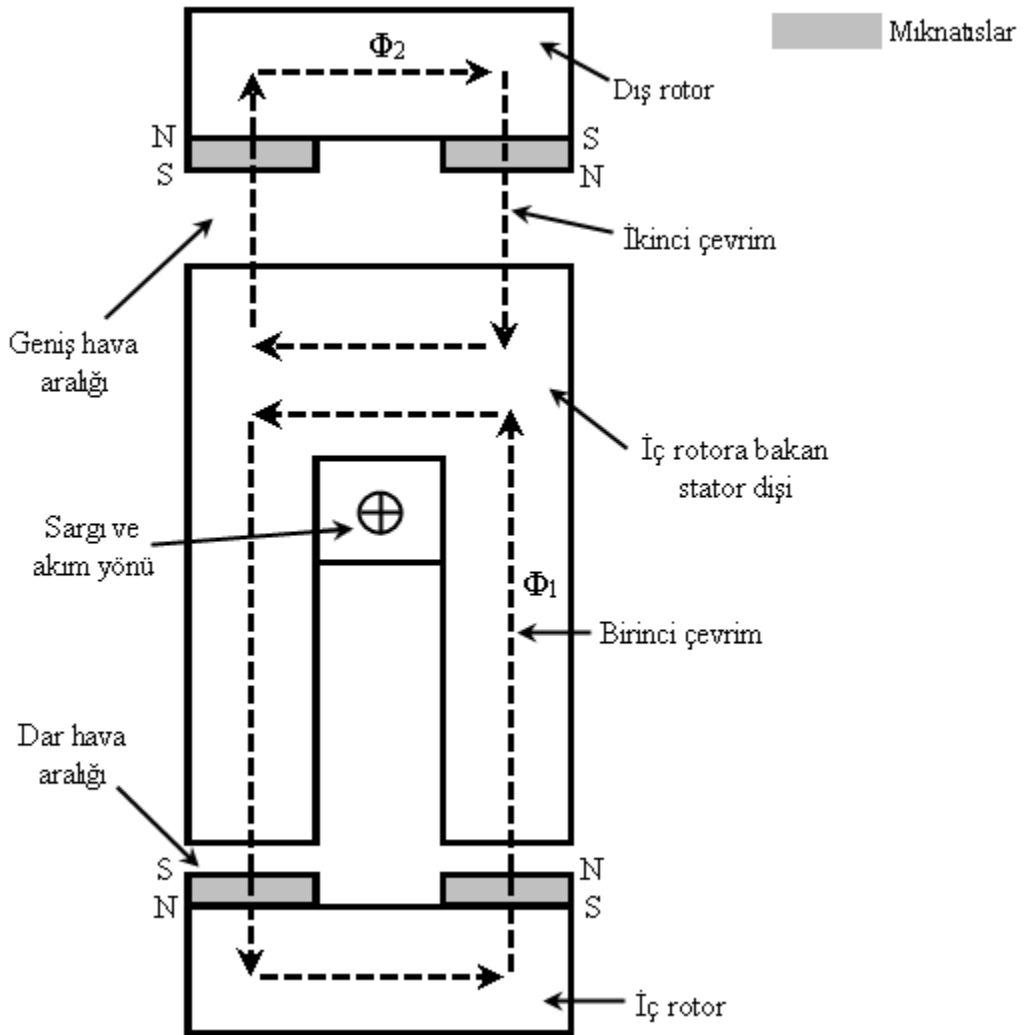
- Stator ve rotor gövdesinin manyetik geçirgenlik katsayısı sonsuz kabul edilmiştir. Böylece manyetik dirençleri ihmal edilmiştir.
- Stator ve rotor gövdeleri, çelik laminasyonlardan oluşmaktadır ve seçilen alaşım için doldurma faktörü $k_d = 0,98$ 'dir.
- Yapılan hesaplamalarda makinenin herhangi bir yerindeki kaçak akılar ihmal edilmiştir.
- Hesaplamalarda saçaklanma akıları ihmal edilmiştir.
- Kalıcı mıknatısların mıknatıslanma eğrilerinin doğrusal olduğu varsayılmıştır.
- İletkenlerde deri olayı etkisi ihmal edilmiştir. Akan akımın tüm iletken kesitini, eşit şekilde ve tamamen kullandığı kabul edilmiştir.
- Ayrıntılı sargı hesabına girilmemiş, manyetik analiz için gerekli olan amper-sarım değeri dikkate alınmıştır.
- Anma akımının bir iletken üzerinden geçtiği kabul edilmiş, paralel iletken hesabı yapılmamıştır.

Manyetik devrelerin analizi, klasik elektrik devrelerinin analiziyle benzerlik gösterir. Yukarıda sıralanmış olan kabul ve ihmallerle birlikte, bu benzerlikten yola çıkılarak yapılan hesaplamalar, büyük oranda kesinlik de içerir.

Elektrik makinelerinin tasarımında anma çalışma koşulları göz önüne alınır ve değerlerin seçimi anma çalışmasına göre yapılır. Böylece boşa çalışma durumu için fazladan bir değerlendirmeye gerek kalmamış olur. Çalışmanın bu bölümünde de bu yol izlenecek ve büyüklükler anma yükü koşullarına göre belirlenecektir. Önce mıknatısların yük eğrisi tanımlanacak ve daha sonra mıknatıs yükseklikleri ile sarım

sayısı arasındaki ilişkiden yararlanılarak birçok tasarım değişkeni belirlenmiş olacaktır.

Manyetik devrelerde amper-sarım kaynakları, içinden akım geçen sarımlar veya kalıcı mıknatıslar olabilir. Sarımların mmk'si (manyetomotif kuvvet) NI olarak belirtilir. Ancak sarımlardan farklı olarak, kalıcı mıknatısların mmk'si önceden bilinemez ve mıknatısın çalışma noktasındaki manyetik akı yoğunluğu ile manyetik alan şiddeti değerlerine bağlıdır. Bu değerler de manyetik devrenin bir fonksiyonudur. Ayrıca kalıcı mıknatısta bir relüktans (manyetik direnç) söz konusudur. Bu nedenle, kalıcı mıknatısın çalışma noktası ifadesinin çıkarılması gerekmektedir. Manyetik devrenin modeli Şekil 4.13'te verilmiştir. Örnek olarak bir stator dişi ve üzerindeki mıknatıslarla beraber iç ve dış rotor alınmıştır.



Şekil 4.13 : Bir stator ve iki rotordan oluşan manyetik devre ve akıların güzergâhı

İletkeni halkalayan ana akı Φ_I ile (birinci çevrim), iç rotordaki mıknatısların kullanıldığı kutup adımı boyunca kullanılmayan dış rotordaki mıknatısların ürettiği akı Φ_2 ile (ikinci çevrim) gösterilmiştir (Şekil 4.13).

Çıkarım için işlem sırası aşağıdaki gibidir:

Amper Yasası ile birinci çevrim denklemi yazılır:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = 2H_{my} \cdot h_m + H_{st} \cdot l_{st} + 2H_{gy} \cdot l_g + H_{ri} \cdot l_{ri} + N \cdot I = 0 \quad (4.14)$$

Burada, H_{my} makine anma yükünde çalışırken mıknatısların çalışma noktasındaki manyetik alan şiddetini; h_m mıknatısların yüksekliğini; H_{st} , H_g ve H_{ri} sırasıyla statordaki, dar hava aralığındaki ve iç rotordaki manyetik alan şiddetini belirtir. l_{st} ve l_{ri} sırasıyla akının statorda ve iç rotorda aldığı ortalama yolun uzunluğunu ve l_g dar hava aralığı mesafesini göstermektedir. NI ise sargıdan akan anma akımının oluşturduğu amper-sarım değeridir, birimi *Amper*'dir $[A]$. Tüm manyetik alan şiddeti değerleri A/m cinsinden, uzunluk ve yükseklikler de m cinsindendir. Statorun ve rotorun manyetik geçirgenlikleri çok yüksek olduğundan, manyetik alan şiddetleri ihmal edilebilecek mertebededir. Mıknatısların statora bakan yüzey alanı ve stator dişi bacaklarının kesit alanı A_m 'dir. Aynı zamanda iç ve dış rotor gövdesinin kesiti de A_m 'ye eşittir. Böylece mıknatısların ürettiği akı en verimli şekilde kullanılmış olur. Denklemlerdeki uzunluklar m cinsinden, alan ifadeleri m^2 cinsindendir.

H_{st} ve H_{ri} ihmal edildikten sonra (4.14) denklemi, şu hale gelir:

$$2H_{gy} \cdot l_g = -N \cdot I - 2H_{my} \cdot h_m \quad (4.15)$$

Bu denklemden H_{gy} çekilir ve yükte çalışmada dar hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu $B_{gy} = \mu_0 H_{gy}$ yazılırsa;

$$B_{gy} = -\mu_0 \cdot \frac{NI + 2H_{my} \cdot h_m}{2l_g} \quad (4.16)$$

olur. Buradaki $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$, havanın manyetik geçirgenlik katsayısıdır. Manyetik akı yoğunluklarının birimi *Tesla* (T)'dir. Mekanik güvenlik payından dolayı $l_g = 4 \text{ mm}$ alınmıştır [12]. Demir doldurma faktörü (k_d) göz önüne alınırsa ve kaçak akılar ihmal edildiği için manyetik devrede dolaşan akının değişmediği kabul edildiğinden stator bacaklarındaki akı, hava aralığındaki akıya eşittir:

$$B_{my} \cdot k_d \cdot A_m = B_{gy} \cdot A_g \quad (4.17)$$

olur. Burada, B_{my} makine anma yükünde iken mıknatısın çalışma noktasındaki manyetik akı yoğunluğunu, A_g de stator ile mıknatıs arasındaki hava aralığının alanını belirtir. A_g , A_m 'ye eşittir. (4.16) denklemindeki yükte çalışmada hava aralığındaki akı yoğunluğu B_{gy} , (4.17)'de yerine koyulursa;

$$B_{my} \cdot k_d = -\mu_0 \cdot \frac{NI + 2H_{my} \cdot h_m}{2l_g} \quad (4.18)$$

elde edilir. Mıknatıslanma eğrisinin doğrusal olduğu kabulüyle birlikte, (4.18) ifadesi aynı zamanda mıknatısın yük eğrisini veren doğrunun denklemidir [10]. Armatür amper-sarımının etkisinin daha iyi gözlemlenebilmesi için (4.18) şöyle yazılabilir:

$$B_{my} \cdot k_d = -\mu_0 \cdot \frac{h_m}{l_g} \cdot \left(\frac{NI}{2h_m} + H_{my} \right) \quad (4.19)$$

Bu çalışmada $B_{my} \cdot k_d$ değeri (demir çekirdekteki akı yoğunluğu) $0,9 \text{ Tesla}$ seçilmiştir. O halde $B_{my} = 0,92 \text{ T}$ olur. Denklemdaki H_{my} değerinin bulunması için mıknatısın çalışma noktası hesaplanmalıdır. Bunun için Şekil 4.14'te makinenin anma çalışma sıcaklığı olan 100°C 'de NdFeB N44 tipi mıknatısın mıknatıslanma eğrisi ve yük eğrisi verilmiştir. Daha önce verilmiş olan karakteristik manyetizasyon eğrileri doğrusal olmamasına rağmen doğrusal oldukları kabul edilecektir; çünkü hesaplamalarda doğrunun eğimini veren göreceli manyetik geçirgenlik katsayısı kullanılacaktır. Mıknatıslanma eğrisinin B eksenini kestiği nokta mıknatısın kalıcı manyetik akı değeri B_r 'yi; H eksenini kestiği nokta da manyetik alanının yok edilmesi için mıknatısın maruz bırakılması gereken manyetik alan şiddeti değeri H_c 'yi verir. Bir mıknatısın B_r 'si ve negatif anlamda H_c 'si ne kadar büyük ise o mıknatıs o kadar kalitelidir ve sağladığı enerji de o kadar yüksektir. Makine için seçilen N44 tipi NdFeB mıknatısta 100°C 'de $B_r = 1,22 \text{ T}$ ve $H_c = -909,5 \text{ kA/m}$ 'dir [36]. Bu değerler Şekil 4.14'teki mıknatıslanma eğrisinde işaretlenmiştir.

Mıknatısın yük eğrisi ile mıknatıslanma eğrisinin kesiştiği nokta ise mıknatısın verilen manyetik devrede çalıştığı B ve H değerlerini belirtir. Bu çalışma noktası değerleri denklemlerde $B_{my} [T]$ ve $H_{my} [A/m]$ olarak gösterilmiştir. Mıknatısın çalışma noktasını bulmak için mıknatıslanma eğrisi kullanılır ve istenen akı yoğunluğuna eşitlenir:

$$B_r + \mu_m \cdot H_{my} = B_{my} \quad (4.20)$$

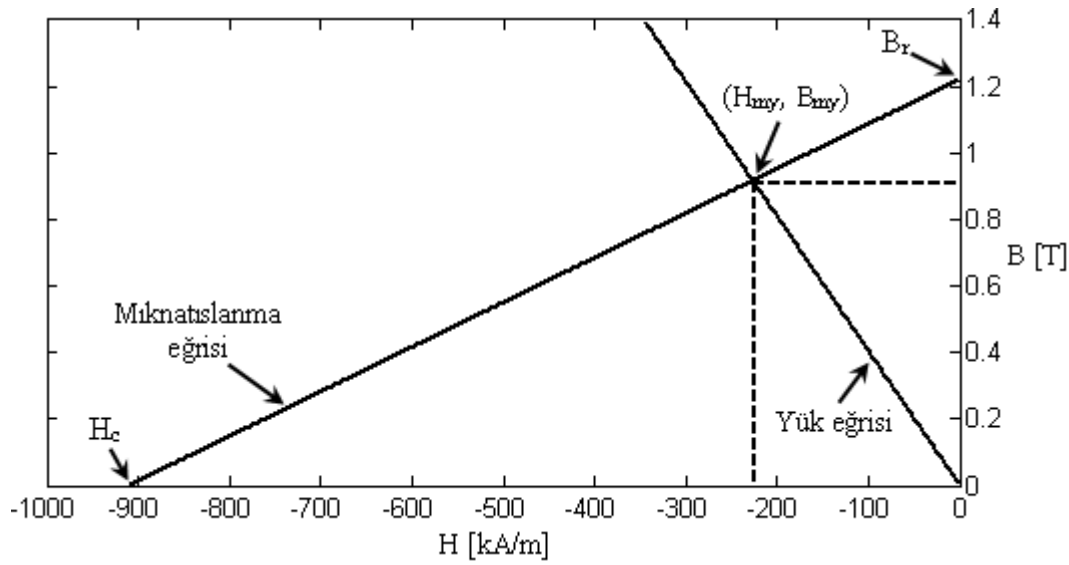
Buradaki μ_m , mıknatısın manyetik geçirgenliğidir ve şöyle tanımlanır:

$$\mu_m = \mu_r \cdot \mu_0 = \frac{B_r}{|H_c|} \quad (4.21)$$

(4.21) kullanılarak yapılan hesaplama sonucu bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı $\mu_r = 1,05$ olarak bulunur. Denklem 4.20'den H_{my} çekilirse;

$$H_{my} = \frac{B_{my} - B_r}{\mu_m} \quad (4.22)$$

olur. Tüm değerler bilindiğinden H_{my} hesaplanabilir ve makine tam yükte iken mıknatısın çalışma noktası belirlenebilir ($H_{my}; B_{my} = -227,4 \text{ kA/m}; 0,92 \text{ T}$) (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 : Seçilen mıknatısın mıknatıslanma eğrisi ve makine anma gücünde çalışırken mıknatısın yük eğrisi

Anma çalışmasında sargıdan akan akım sonucu oluşan armatür alanının yol açtığı endüvi reaksiyonu devreye girer ve ana akıyı engellemeye çalışır. Tasarım yapılırken armatür amper-sarım değerinin, mıknatısların ürettiği amper-sarım değerini aşmamasına dikkat edilmelidir. Aksi takdirde makine, istenen gücü sağlayamaz. Bu yüzden kaynaklar arasında aşağıdaki amper-sarım eşitsizliği sağlanmalıdır:

$$|H_{my}| \cdot h_m > N \cdot I \quad (4.23)$$

4.19 ve 4.23 numaralı denklemlerde bilinen değerler yerine koyulursa h_m ve N arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir eşitlik ve bir eşitsizlik elde edilir. Gerekli yerine yazma işlemlerinden sonra mıknatıs yüksekliği ve sarım sayısı hakkındaki tasarım sınırları belirlenmiş olur.

Bu çalışma için $N = 14$ sarım seçilmiştir. Buna göre tam yükte çalışmada, seçilen hava aralığı akı yoğunluğunu ($0,9$ Tesla) elde etmek için gereken mıknatıs yüksekliği değeri $h_m = 25$ mm olur.

Boşta çalışma durumunda dar hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunu bulmak için benzer işlemler uygulanır. Boşta çalışmada armatür sargısından akım akmadığı için Denklem 4.18 şu şekilde yazılır:

$$B_{m0} \cdot k_d = -\mu_0 \cdot \frac{h_m}{l_g} \cdot H_{m0} \quad (4.24)$$

Bu denklem mıknatıslanma eğrisine eşitlenirse çalışma noktasındaki manyetik alan şiddeti;

$$H_{m0} = -\frac{B_r}{\mu_m + \mu_0 \cdot \frac{h_m}{l_g}} \quad (4.25)$$

olarak bulunur. Bulunan bu ifade, yükte çalışma durumunu belirten kısaltmalar yerine boşta çalışmayı simgeleyen kısaltmalar kullanılarak (4.16)'de yerine koyulursa, dar hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu için;

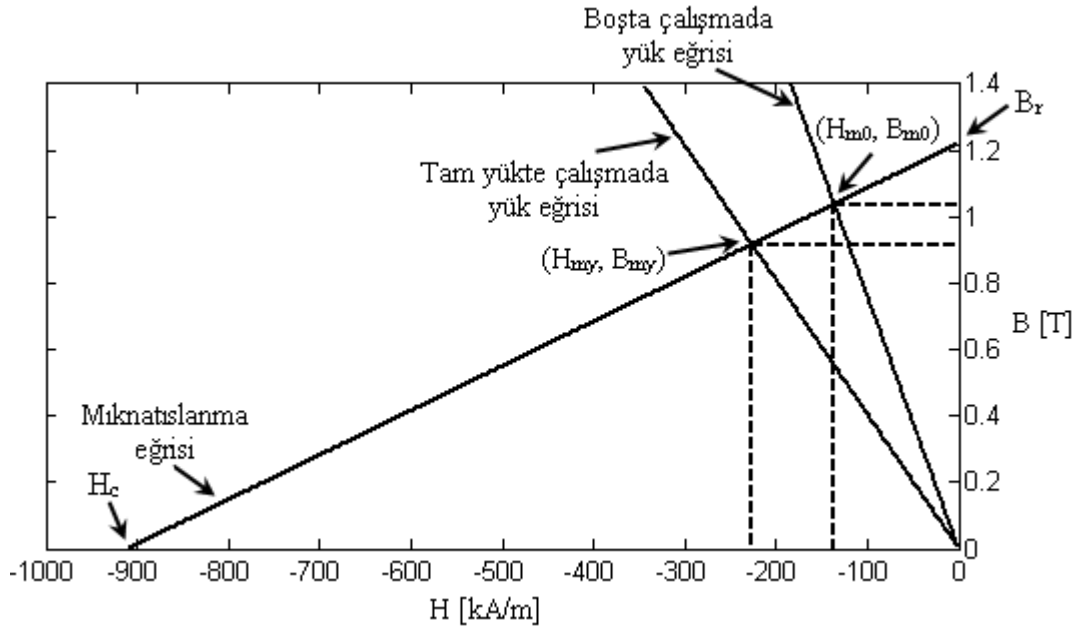
$$B_{g0} = \frac{h_m}{l_g} \cdot \frac{B_r}{\mu_r + \frac{h_m}{l_g}} \quad (4.26)$$

denklemini elde edilir. Değerler yerine koyulursa $B_{g0} = 1,04$ T bulunur. Hava aralığı ve stator bacaklarının kesit alanları birbirine eşit olduğundan;

$$B_{g0} = B_{m0} \quad (4.27)$$

ilişkisi geçerlidir.

(4.25) ve (4.26)'dan bulunan boşta çalışma durumu için mıknatısların çalışma noktası koordinatları hesaplanırsa $(H_{m0}; B_{m0}) = (-136,4$ kA/m; $1,04$ T) bulunur. Şekil 4.15'te makinenin boşta ve anma yükünde çalışmasının kalıcı mıknatısların çalışma noktasına olan etkisi gözlenmektedir. Makine yüküne bağlı olarak armatür akımı arttıkça yük eğrisi sola doğru kayar ve mıknatısların sağladığı akı yoğunluğu değeri düşer. Mıknatıs yeni bir çalışma noktası değerine oturmuş olur. Makinenin anma yükünü aşmadığı varsayılırsa, değişik yüklenme koşullarında mıknatısların yük eğrisi de iki eğri arasında bir konum alır.



Şekil 4.15 : Makine boşta ve tam yükte çalışırken, mıknatısların yük eğrisi

Armatür sargısının manyetik alanı, dış rotoru ve geniş hava aralığını kapsayan ikinci çevrimde yer almadığından bu çevrim için boşta çalışma durumundaki ifadeler kullanılır. Denklem 4.26'dan yararlanılarak geniş hava aralığı uzunluğu ve buradaki akı yoğunluğu belirlenecektir. Önceki terimlerle karışmaması amacıyla geniş hava aralığı uzunluğu için l_{g1} [m] ve buradaki manyetik akı yoğunluğu için B_{g1} [T] kısaltmaları kullanılsın. Değerler (4.26)'da yerine koyulursa; (H_{my}, B_{my})

$$B_{g1}(1,05 \cdot l_{g1} + 0,025) = 0,0305 \quad (4.28)$$

elde edilir.

Boşta çalışmada dar hava aralığındaki manyetik alan yoğunluğu $B_g = 1,04$ T olarak belirlenmişti. Birinci çevrimde, çevrim boyunca kesit alanı hiç değişmediğinden dolaşan manyetik akı değeri de değişmez. Fakat ikinci çevrimden gelen akı da dolaşıma katıldığı için, stator dişinin eksenel gövdesinin kesit alanı, bacaklarına göre daha büyük olmalıdır. Eksenel gövdedeki akı, birinci ve ikinci çevrimdeki akının toplamıdır: (H_{m0}, B_{m0})

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (4.29)$$

Akı yoğunluğu ve kesit alanları yerine yazılırsa, akı yoğunluğu değerinin tüm stator dişi boyunca değişmemesi için aşağıdaki eşitliğin sağlanması gerekir:

$$1 \cdot k_d \cdot A_{stre} = 1 \cdot k_d \cdot A_m + B_{g1} \cdot k_d \cdot A_m \quad (4.30)$$

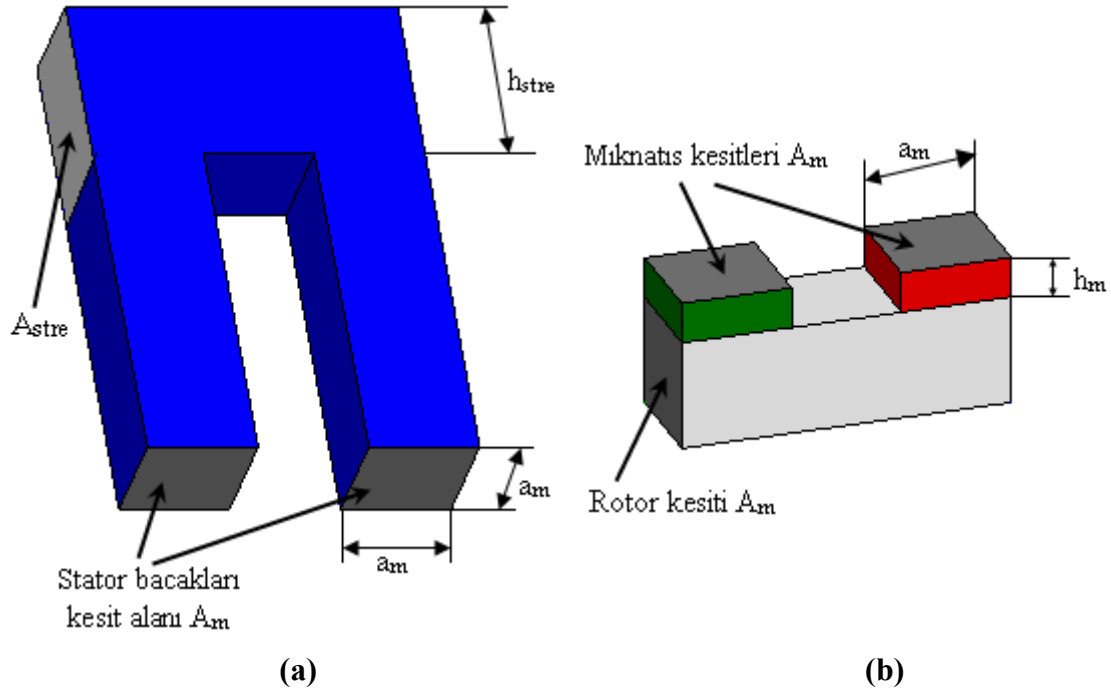
A_{stre} , statorun eksenel kısmının kesit alanını belirtir. A_m değerinin büyüklüğü statordan geçecek olan iletkenin boyutlandırılmasına ve iletkendeki amper-sarım seviyesine bağlıdır. Makine boyutlarının küçülmesi için geniş hava aralığı mesafesi azaltılırsa çevrimdeki manyetik alan yoğunluğu artacak ve bu kez doymanın engellenmesi için eksenel stator gövdesinin kesit alanı daha da artırılmak zorunda kalınacaktır. Sonuçta makine çapı yine büyüyecek ve ek olarak ağırlığı da artacaktır. Öte yandan, eksenel stator gövde kesitini azaltmak için hava aralığı mesafesini büyütme de makinenin boyutlarını artıracaktır. Bu sebeplerden dolayı B_{gl} ve l_{gl} değerleri arasında bir optimizasyon yapılmalıdır. Bunun için (4.30) denkleminde B_{gl} çekilir ve (4.28)'de yerine koyulur. İleriki bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılacağı üzere $A_m = 100 \cdot 10^{-4} m$ seçilirse, $l_{gl}[m]$ ve $A_{stre} [m^2]$ arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir denklem elde edilir:

$$A_{stre} = \frac{3,05}{10^4 \cdot (1,05 \cdot l_{gl} + 0,025)} + 0,01 \quad (4.31)$$

Denklemlerde kullanılan bazı büyüklükler Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Şekil 4.16a'da birinci stator takımına ait bir stator dişi verilmiş ve akının geçtiği kesit alanı $A_m [m^2]$ belirtilmiştir. Kesit alanının kenarları birbirine eşit ve $a_m [m]$ uzunluğundadır. Aynı zamanda statorun eksenel gövdesinin yüksekliği $h_{stre} [m]$ gösterilmiştir. Şekil 4.16b'de, iç rotorun bir bölümü verilmiş ve akının geçtiği kesit alanı A_m belirtilmiştir. Mıknatısların yüksekliği h_m olarak, kenarlarının uzunluğu a_m olarak adlandırılmıştır. Görüldüğü gibi, stator dişlerinin, rotorun ve mıknatısların kesit alanları birbirine eşittir. a_m mıknatısların, dolayısıyla stator bacağı ve rotor kesitlerinin bir kenarının uzunluğu olduğuna göre, statorun eksenel gövdesinin yüksekliği;

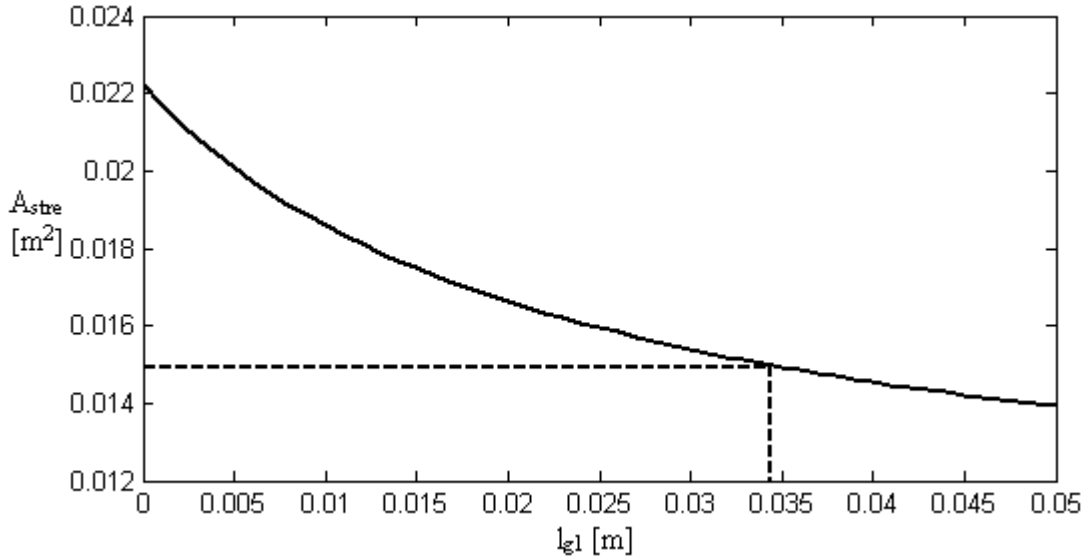
$$h_{stre} = A_{stre} / a_m \quad (4.32)$$

olarak bulunur.



Şekil 4.16 : (a) Stator dişine ait bazı büyüklükler, (b) İç rotor ve üzerindeki mıknatıslara ait bazı büyüklükler

Denklem 4.31'in ifade ettiği fonksiyon çizdirilerek Şekil 4.17'deki grafik elde edilmiştir. $B_{g1} = B_g/2$ olarak seçilmiş ve buna göre l_{g1} büyüklüğü 34 mm olarak belirlenmiştir (Denklem 4.28). O halde grafiğe göre $A_{stre} = 150 \text{ cm}^2 = 1,5A_m$ veya başka bir deyişle $h_{stre} = 1,5a_m = 15 \text{ cm}$ olur.



Şekil 4.17 : Statorun aksenal gövde kesit alanının geniş hava aralığı uzunluğuna göre değişimi

4.7 Sargı Kesiti Hesabına Bağlı Olarak Stator Dişinin ve Makinenin Diğer Boyutlarının Belirlenmesi

İletkenlerde endüklenmesi gereken gerilim değerinin bulunması ve makinede kullanılacak olan kalıcı mıknatısların boyutlarının hesabından sonraki aşama, sargının boyutlandırılmasıdır. Sargının boyutları, stator dişi boyutlarının bulunmasında önemli rol oynayacaktır.

4.7.1 Sargı kesiti

Denklem 4.12’de verilen $E_F(\theta)$ geriliminin genliği, sargıda endüklenen gerilimin temel bileşeninin maksimum değeridir. Makinenin anma gerilimi $V_n = 750 V$ olduğundan,

$$\frac{\sqrt{2}V_n}{\sqrt{3}} = \frac{4E_m}{\pi} \quad (4.33)$$

yazılabilir. Denklem 4.8’deki ifade, (4.33)’te yerine yazılırsa;

$$N \cdot p_0 \cdot a_m = \frac{\sqrt{2} \cdot V_n \cdot \pi}{4\sqrt{3} \cdot 2 \cdot B_{gy} \cdot 2\pi \cdot n_m} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_n}{16\sqrt{3} \cdot B_{gy} \cdot n_m} \quad (4.34)$$

elde edilir. İfadedeki $V_n [V]$, $B_{gy} [T]$ ve $n_m [d./sn.]$ değerleri bilinmektedir. Değerler yerine koyulursa;

$$N \cdot p_0 \cdot a_m = 85,05 \quad (4.35)$$

olur.

Bu çalışmada armatür akımı yoğunluğu $J = 4 A/mm^2$ seçilmiştir [38]. Anma akımı bilindiğinden, iletken kesiti $q [mm^2]$ hesaplanabilir:

$$q = \frac{I_n}{J} = \frac{400}{4} = 100 mm^2 \quad (4.36)$$

Gereken iletken kesitinin belli bir katsayıyla çarpılmasıyla bulunan değer, sargının yalıtımlarıyla beraber kapladığı alan olduğu kabul edilecektir. Bu katsayının 1,25 olduğu varsayılmıştır. Yani stator dişlerinin ortasından geçecek olan N adet sarımdan oluşan sargı için gereken toplam alan $A_s = 1,25 \cdot q \cdot N$ olacaktır.

Daha önce belirlenmiş olan N değeri, (4.35) ifadesinde yerine koyulursa;

$$p_0 \cdot a_m = \frac{85,05}{14} \approx 6 \quad (4.37)$$

sabiti elde edilir. Burada a_m uzunluğu m cinsindendir. Sargıların yerleştirilmesi için gereken kesit alanı,

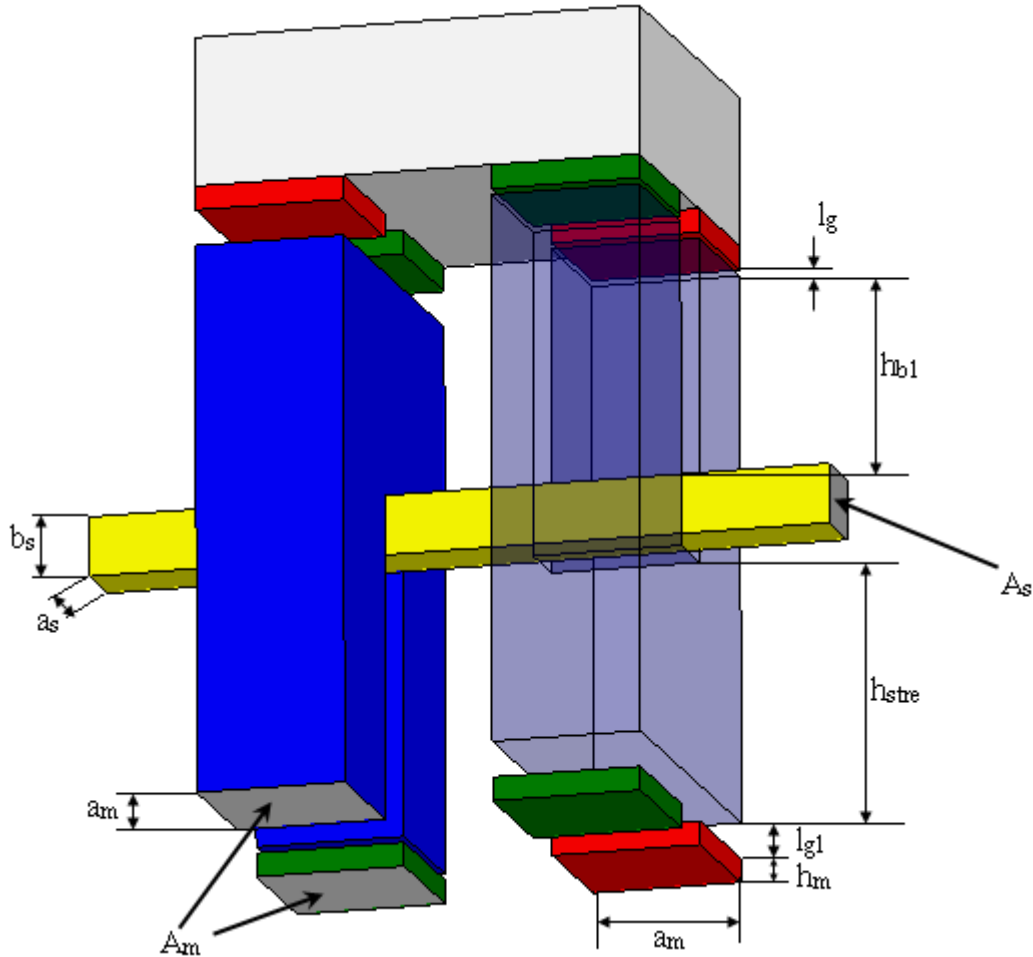
$$A_s = 1,25 \cdot q \cdot N = a_s \cdot b_s = 1750 \text{ mm}^2 \quad (4.38)$$

olur. Sargı kesitinin yaklaşık bir kare olduğu düşünülmüş ve kesitin kenar uzunlukları $a_s = 45 \text{ mm}$, $b_s = 40 \text{ mm}$ olarak seçilmiştir.

Ayrıca Şekil 4.18’de de görüldüğü üzere, sargının birbirine göre ters konumlandırılmış iki stator dişinin tam ortasından geçmesi için;

$$h_{b1} = 1,5 \cdot a_m + l_{g1} - l_g \quad (4.39)$$

eşitliği sağlanmalıdır.



Şekil 4.18 : Makine parçaları üzerinde büyüklüklerin gösterilmesi (ölçekli)

Şekil 4.18’de ikinci stator takımına ait dış rotora bakan stator dişi, uzunluk ölçülerinin kolayca ayırt edilebilmesi için saydam olarak çizilmiştir. Yine aynı sebepten iç ve dış rotor gösterilmemiştir.

4.7.2 Stator ve rotor gövdelerinin hacim hesabı

Denklem (4.40)'tan (4.49)'a kadar yapılan hesaplamalarda uzunlukların birimi mm , hacimlerin birimi mm^3 'tür. Şekil 4.18'in de yardımıyla aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

Bir stator dışındaki iki bacağın toplam hacmi:

$$V_{strb} = 2 \cdot [a_m^2 \cdot (b_s + l_s)] = 2 \cdot [a_m^2 \cdot (b_s + 1,5a_m + 28)] \quad (4.40)$$

Bir stator dişinin ekstenel gövdesinin hacmi:

$$V_{stre} = 1,5a_m^2 \cdot (2a_m + a_s) \quad (4.41)$$

İç rotorun hacmi:

$$V_i = (R_i^2 \pi - r_i^2 \pi) \cdot (2a_m + a_s) \quad (4.42)$$

ifadesiyle bulunabilir. Burada, R_i iç rotorun dış yarıçapıdır. Daha önce de açıklandığı gibi iç rotor üzerine mıknatıslar a_m uzunluğundaki aralıklarla yerleştirilmiştir. Bu aralıkların sayısı stator dişi sayısının iki katıdır. O halde R_i şöyle hesaplanır:

$$R_i = \frac{4p_0 \cdot a_m}{2\pi} \quad (4.43)$$

r_i iç rotorun iç yarıçapıdır. $R_i = r_i + a_m$ olduğundan, V_i için şu ifade bulunur:

$$V_i = \pi a_m^2 \cdot \left(\frac{4p_0}{\pi} - 1 \right) \cdot (2a_m + a_s) \quad (4.44)$$

(4.42)'ye benzer şekilde dış rotorun hacmi:

$$V_d = (R_d^2 \pi - r_d^2 \pi) \cdot (2a_m + a_s) \quad (4.45)$$

olarak hesaplanır. R_d dış rotorun dış yarıçapını (aynı zamanda makinenin dış yarıçapı), r_d ise dış rotorun iç yarıçapını belirtmektedir. $R_d = r_d + a_m$ olduğu bilinmektedir. Ayrıca r_d , iç rotorun dış yarıçapından itibaren stator dişi büyüklükleri eklenerek bulunabilir (Şekil 4.18):

$$r_d = R_i + h_m + l_g + h_{b1} + b_s + 1,5a_m + l_{g1} + h_m \quad (4.46)$$

denklemini de (4.45)'te yerine yazılırsa;

$$V_d = \pi a_m \left(\frac{4p_0 \cdot a_m}{\pi} + 7a_m + 2b_s + 228 \right) \cdot (2a_m + a_s) \quad (4.47)$$

elde edilir.

Makinedeki stator ve rotor çekirdeklerinin toplam hacmi ($V_{çek}$) ise şöyle hesaplanır:

$$V_{\text{çek}} = V_{st} + V_i + V_d = 2p_0 \cdot V_{strb} + 2p_0 \cdot V_{stre} + V_i + V_d \quad (4.48)$$

V_{st} stator çekirdeğinin toplam hacmi ve $2p_0$ katsayısı, bilindiği gibi makinedeki toplam stator dişi sayısıdır.

(4.40), (4.41), (4.44) ve (4.47) denklemlerinden görüldüğü gibi a_m büyüklüğünün makinenin toplam çekirdek hacmi içinde baskın bir rolü vardır. Bu yüzden hacmin ve dolayısıyla toplam kütlenin azaltılabilmesi için a_m olabildiğince küçük tutulmalıdır. (4.37)'yi kullanarak $p_0=60$ seçildiğinde $a_m=100 \text{ mm}$ olur. a_m değeri daha da küçültülebilir ancak kutup sayılarının çok fazla olması, yapının karmaşıklaşmasına yol açar.

Makinenin bir fazının kalınlığı şöyle bulunur:

$$l_f = 2a_m + a_s \quad (4.53)$$

Hesaplanan hacim değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir:

Çizelge 4.2 : Makinenin demir çekirdeklerinin hacmi

Stator çekirdeği (V_{st})	İç rotor çekirdeği (V_i)	Dış rotor çekirdeği (V_d)	Toplam ($V_{\text{çek}}$)
964,2 dm ³	580,3 dm ³	666,2 dm ³	2210,7 dm ³

4.8 Sargı Direncinin Hesaplanması

Armatür sargısının direnci, makinenin bakır kaybını hesaplayabilmek için gereklidir.

Sargı direnci şöyle hesaplanır:

$$R = N \cdot \rho \cdot \frac{l_{Cu}}{q_{Cu}} \quad (4.54)$$

Bu denklemde l_{Cu} sargının ortalama uzunluğudur:

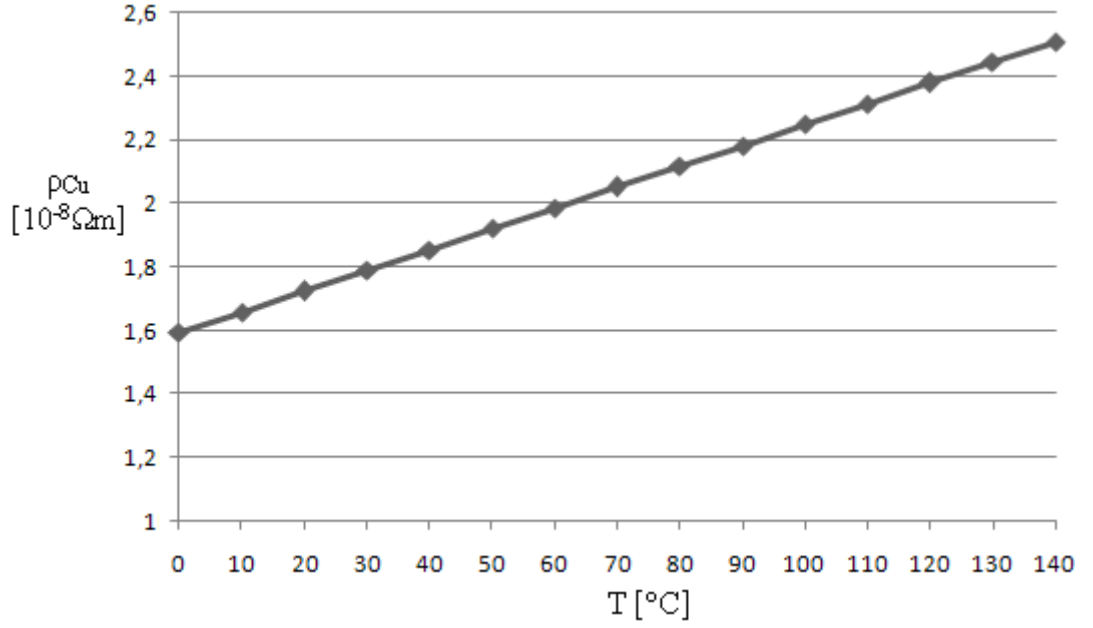
$$l_{Cu} = 2\pi \left(R_i + h_m + l_g + h_{b1} + \frac{b_s}{2} \right) \quad (4.55)$$

ρ , bakırın özdirenç katsayısıdır ve T [°C] sıcaklık olmak üzere şöyle hesaplanır:

$$\rho_T = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (T - 20)) \quad (4.56)$$

Burada α_{20} , bakır özdirencinin sıcaklık katsayısıdır ve $\alpha_{20} = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 'dir. Bakırın 20°C'deki özdirenci $\rho_{20} = 1,724 \cdot 10^{-8} \Omega m$ 'dir. Denklem 4.56 ile bakırın istenen sıcaklıktaki özdirenci hesaplanabilir.

Bakırın özdirencinin sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 4.19'da görülmektedir.



Şekil 4.19 : Sargı öz direncinin sıcaklığa bağlı değişimi

4.9 Makinedeki Aktif Malzemelerin Kütlesinin Hesaplanması

Makinenin toplam kütlesinin hesaplanması için daha önce çıkarılan hacim ifadelerinden (Denklem 4.40, 4.41, 4.44 ve 4.47) faydalanılacaktır.

4.9.1 Demir çekirdek kütlesi

Demir çekirdek, iki rotordan ve $2p_0$ sayısı kadar stator dişinden oluşur. Kullanılan demir çekirdeğin yoğunluğu $\rho_d = 7,8 \text{ kg/dm}^3$ 'tür. Buna göre stator kütlesi,

$$m_{st} = \rho_d \cdot 2p_0 \cdot (V_{stre} + V_{strb}) \quad (4.57)$$

ifadesiyle hesaplanır. Rotor kütlesi de benzer şekilde;

$$m_r = \rho_d \cdot (V_i + V_d) \quad (4.58)$$

olarak bulunur.

4.9.2 Kalıcı mıknatısların kütlesi

İç ve dış rotorun bir stator dişine bakan yüzeylerinde toplam 4 adet kalıcı mıknatıs vardır. Stator dişi sayısı $2p_0$ olduğundan toplam mıknatıs sayısı $8p_0$ 'dır. NdFeB Mıknatısların yoğunluğu $\rho_m = 7,5 \text{ kg/dm}^3$ 'tür. Bir mıknatısın hacmi;

$$V_m = a_m^2 \cdot h_m \quad (4.59)$$

denklemleriyle bulunabilir. Toplam mıknatıs kütlesi ise şu ifadeyle hesaplanır:

$$m_m = \rho_m \cdot 8p_0 \cdot V_m \quad (4.60)$$

4.9.3 Armatür sargısının kütlesi

Sargının kesit ifadesi (4.38)'da ve ortalama uzunluk ifadesi (4.55)'te verilmişti. Ancak burada daha önce yalıtımları hesaba katmak için kullanılan 1,25 katsayısına gerek yoktur, çünkü saf bakır kesiti (A_{sb}) kullanılacaktır:

$$A_{sb} = q \cdot N \quad (4.61)$$

Bakırın yoğunluğu $\rho_{Cu}=8,9 \text{ kg/dm}^3$ olduğundan sargının toplam kütlesi bulunabilir:

$$m_s = \rho_{Cu} \cdot A_{sb} \cdot l_{Cu} \quad (4.62)$$

Bu denklemde $A_{sb} \text{ dm}^2$, $l_{Cu} \text{ dm}$ cinsindendir.

Verilen kütle ifadelerinde değerler yerine koyulup kütleler ve toplam aktif malzeme kütlesi $m_T \text{ [kg]}$ hesaplanmıştır (Çizelge 4.2). Çizelge 4.3'te ise makinenin anma değerleri ve önemli boyutlarının ölçüleri verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Makinedeki aktif malzemelerin kütlesi

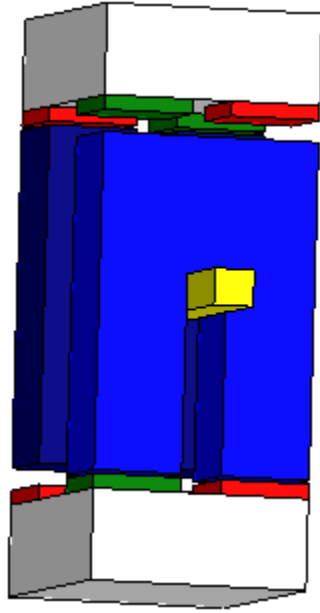
$m_{st} \text{ [kg]}$	$m_r \text{ [kg]}$	$m_m \text{ [kg]}$	$m_s \text{ [kg]}$	$m_T \text{ [kg]}$
7520,76	9722,70	576,00	315,49	18134,95

Çizelge 4.4 : Makinenin anma değerleri ve boyutları

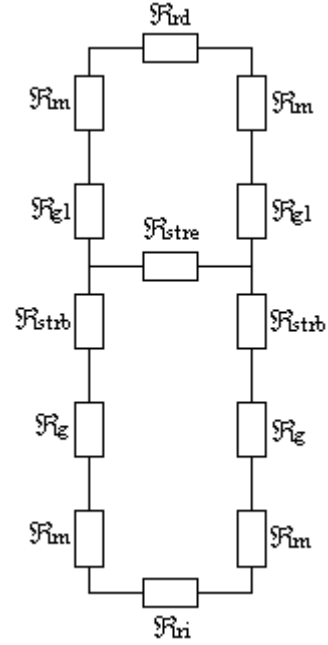
$P_n \text{ [kW]}$	$V_n \text{ [V]}$	$I_n \text{ [A]}$	$n_n \text{ [d./dak.]}$	p_0	$R_d \text{ [m]}$	$r_i \text{ [m]}$	$l_f \text{ [cm]}$	$m_T \text{ [kg]}$
500	750	400	30	60	4,348	3,720	24,5	18134,95

4.10 Relüktans ve Armatür Reaktansı Hesabı

Şekil 4.20 (a)'da, relüktans hesabının yapılacağı devre görülmektedir. Bulunan relüktans değerleri kullanılarak armatür reaktansı hesaplanacaktır. Şekil 4.20 (b)'de görülen relüktanslar aşağıdaki denklemlerle hesaplanır.



(a)



(b)

Şekil 4.20 : (a) Makinenin bir çift kutbunun görünümü (ölçekli), (b) Bir stator dişi için oluşturulan manyetik devre ve relüktanslar

Dış ve iç rotorun relüktansları birbirine eşittir:

$$\mathcal{R}_{rd} = \mathcal{R}_{ri} = \frac{l_r}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_m} = \frac{a_s + 2a_m}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot a_m^2} \quad (4.63)$$

Mıknatısların relüktansı;

$$\mathcal{R}_m = \frac{h_m}{\mu_m \cdot \mu_0 \cdot a_m^2} \quad (4.64)$$

Geniş hava aralığının relüktansı;

$$\mathcal{R}_{g1} = \frac{l_{g1}}{\mu_0 \cdot a_m^2} \quad (4.65)$$

Bir stator dişi bacağıının relüktansı;

$$\mathcal{R}_{strb} = \frac{l_{strb}}{\mu_m \cdot \mu_0 \cdot A_m} = \frac{b_s + h_{b1}}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot a_m^2} \quad (4.66)$$

Stator dişinin aksenal gövdesinin relüktansı;

$$\mathcal{R}_{stre} = \frac{l_{stre}}{\mu_m \cdot \mu_0 \cdot A_m} = \frac{a_s + 2a_m}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot 1,5a_m^2} \quad (4.67)$$

Dar hava aralığının relüktansı;

$$\mathcal{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 \cdot a_m^2} \quad (4.68)$$

ifadeleriyle hesaplanır. Hesaplanan değerler Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Manyetik devredeki relüktans değerleri

$\mathcal{R}_{rd} = \mathcal{R}_{ri} \text{ } [\Omega]$	$\mathcal{R}_m \text{ } [\Omega]$	$\mathcal{R}_{gl} \text{ } [\Omega]$	$\mathcal{R}_{strb} \text{ } [\Omega]$	$\mathcal{R}_{stre} \text{ } [\Omega]$	$\mathcal{R}_g \text{ } [\Omega]$
2,07 k	1,236 M	2,706 M	1,78 k	1,38 k	318,31 k

Armatür sargısının endüktansı şöyle tanımlanabilir:

$$L_a = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{stre} + 2\mathcal{R}_{strb} + 2\mathcal{R}_{gl} + 2\mathcal{R}_m + \mathcal{R}_{ri}} \quad (4.69)$$

Değerler yerine koyulacak olursa $L_a = 33,68 \text{ mH}$ bulunur. Armatür reaktansı ise $X_a = 2\pi f \cdot L_a = 6,35 \Omega$ olarak bulunur.

4.11 Makinedeki Kayıpların Hesabı

4.11.1 Bakır kayıpları

$$P_{Cu} = I_n^2 \cdot l_{Cu} \cdot N \cdot \rho_{Cu} \cdot \frac{1}{A_s} \quad (4.70)$$

Çalışma ortamı şartı için sıcaklık olarak 100°C seçilirse $\rho_{Cu} = 2,25 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ olur (Şekil 4.16). O halde bakır kayıpları $P_{Cu} = 911,5 \text{ W}$ olarak hesaplanır.

4.11.2 Demir kayıpları

Yaklaşık $0,5 \text{ mm}$ 'lik laminasyonlara sahip demir çekirdek için 50 Hz ve $1,5 \text{ T}$ 'de histerezis kayıpları $p_{hy}=2,04 \text{ W/kg}$ ve Eddy akımı kayıpları $p_{ed}=0,76 \text{ W/kg}$ olarak verilmiştir [38]. Farklı frekans ve akı yoğunluğu değerleri için histerezis kaybı;

$$P_{hys} = k_{hy} \cdot (m_{st} + m_r) \cdot p_{hy} \cdot \left(\frac{f}{50 \text{ Hz}}\right) \left(\frac{B_g}{1,5 \text{ T}}\right) \quad (4.71)$$

olarak verilir. Buradaki ampirik histerezis kayıp faktörü $k_{hy}=2$ 'dir. $f = p_0 \cdot n_m = 30 \text{ Hz}$ olduğu bilindiğinden değerler yerine koyulursa $P_{hys}=25327,2 \text{ W}$ olarak hesaplanır. Eddy akımı kayıpları ise;

$$P_{ed} = k_{ed} \cdot m_{st} \cdot p_{ed} \cdot \left(\frac{f}{50 \text{ Hz}}\right)^2 \cdot \left(\frac{B_g}{1,5 \text{ T}}\right)^2 \quad (4.72)$$

ifadesiyle hesaplanır. Denklemdaki ampirik Eddy akımı kayıp katsayısı $k_{ed}= 1,8$ 'dir. Değerler yerine koyulursa $P_{ed}=2365,3 \text{ W}$ olarak bulunur.

Toplam demir kayıpları $P_{Fe}=P_{hys}+P_{ed} = 27692,5 \text{ W}$ olarak hesaplanır.

4.12 Aktif Malzeme Maliyet Raporu

Makinenin aktif malzemeleri için maliyet raporu çıkarılmıştır. Verilen birim masraflarda 2006 yılı fiyatları baz alınmıştır. Verilen birim fiyatlarla daha önce hesaplanmış olan aktif malzeme kütleleri çarpılırsa toplam maliyet bulunmuş olur.

Çizelge 4.6 : Aktif malzemelerin toplam maliyetleri

Malzeme çeşidi	Birim fiyat [Avro/kg]	Toplam maliyet [Avro]
Demir çekirdek	3	51730
NdFeB mıknatıslar	500	288000
Bakır	6	1893
Toplam		341623

5. ÇİFT ROTORLU ENİNE-EKSENEL AKILI SABİT MİKNATISLI GENERATÖRÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ

5.1 Giriş

Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak yapısal analiz problemlerinin çözümüne uygulandı ve 1950lerde ısı iletimi ve akışkan problemleri çözümünde kullanıldı. 1970'teki Silvester ve Chari'nin "Doyumlu manyetik alan problemlerine sonlu eleman çözümü" adındaki makalesi uygulamalı elektromanyetizma alanında yeni bir çığır açmıştır. Silvester ve arkadaşları, metodun gelişimine büyük katkıda bulunarak metodun bugün elektrik mühendisliği problemlerine yaygın olarak uygulanmasını sağladılar [39].

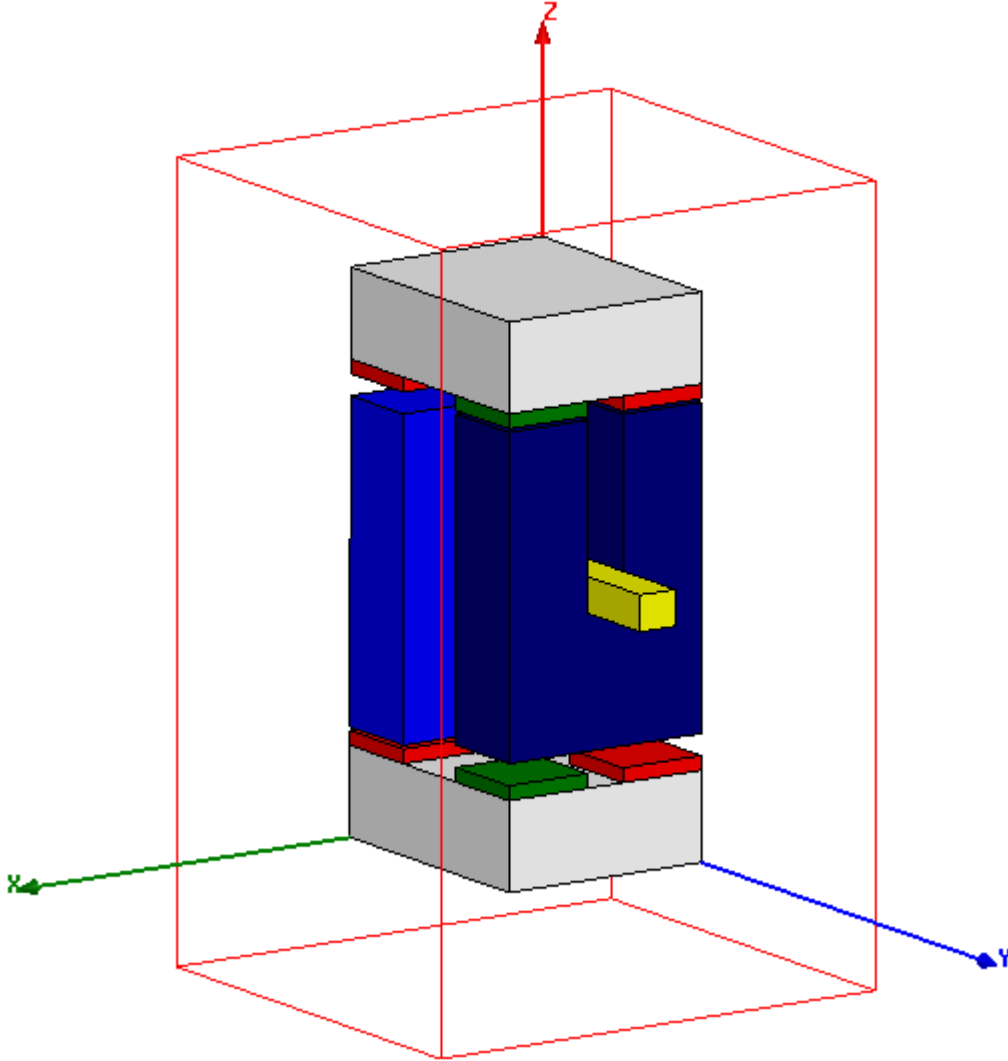
Sonlu elemanlar yönteminde problem geometrisi, sonlu ve çok sayıda küçük alt bölgelere bölünür. Bu bölgeler üçgen, dörtyüzlü gibi şekillerde olabilir. Bir yaklaşım fonksiyonu ile her eleman için potansiyel ve manyetik dağılım ifade edilir. Bu dağılımın bu küçük bölgenin her yerinde aynı kaldığı kabul edilir. İki köşeyi ve aynı sınırı paylaşan komşu bölgelerin dağılımı, "sınır koşulları" uyarınca aynı olacaktır.

Bu bölümde yeni çift rotorlu EEAM'nin sonlu elemanlar yöntemi analizi yapılmıştır. Makinenin belli kısımları, Ansoft Maxwell 3D programında çizilmiş ve analiz sonucu çıkan simülasyonlar verilmiştir.

5.2 Çift Rotorlu Enine-Eksenel Akı Müknenin Üç Boyutlu Analizi

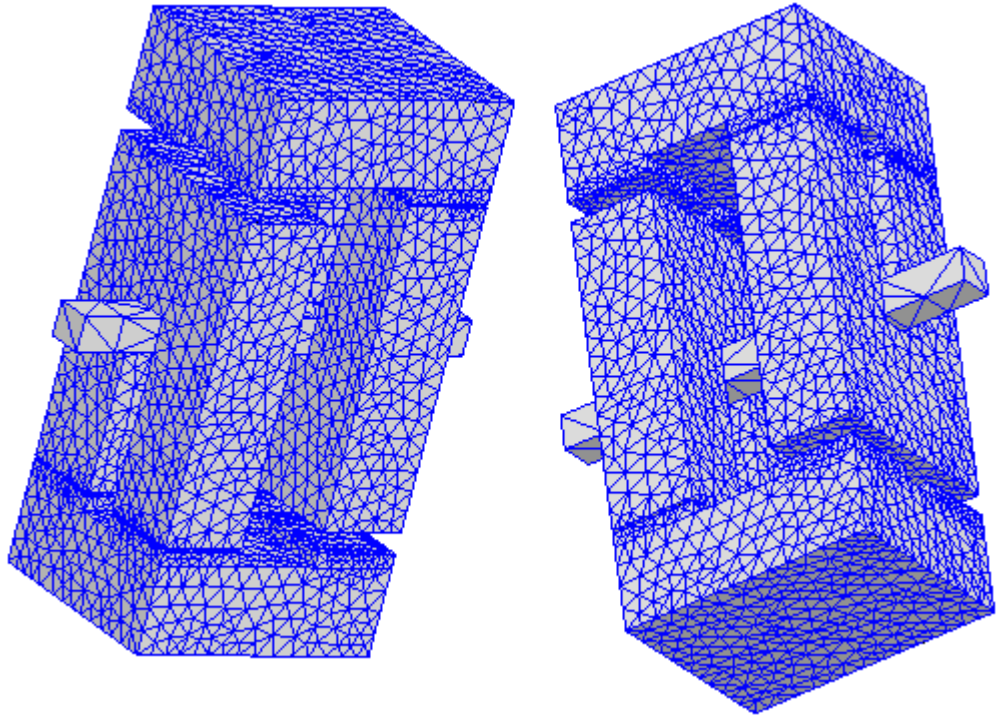
Analizin basit olması ve sonuçların kısa sürede elde edilmesi amacıyla, makinenin sadece ardışık iki statoru ve bunlara denk gelen mıknatıslar ve rotor parçaları kullanılmıştır. Şekil 5.1'de, ortam sınırlarıyla ve koordinat eksenleriyle birlikte analiz edilen makine parçası görülmektedir. Açık gri renkteki rotorlar ve mavi tonlarındaki statorlar için program kütüphanesinde hazır çelik alaşımı kullanılmıştır. Bu alaşımın doldurma faktörü $k_d = 0,98$ 'dir. Laminasyonlar y-ekseni doğrultusunda dizilmişlerdir. Kalıcı mıknatıslar için program kütüphanesinde, H_c ve B_r değerleri

girilerek NdFeB N50 tipi mıknatıs tanımlanmıştır. Simülasyonlarda, avantajlı olmasına rağmen, çizim kolaylığı açısından köşesiz “U” şeklinde stator dişleri kullanılmamıştır. Çizimde uzunluk birimi olarak *mm* alınmıştır. Analiz sonuçlarını gösteren çizimlerde analiz edilen makine parçasının ufak bir modeli yerleştirilmiştir, böylece sonuçların hangi kısımda yapıldığı hakkında okura yardımcı olmak amaçlanmıştır. Ayrıca analiz sonuçlarının verildiği düzlem de bu ufak model üzerinde koyu gri renk ile belli edilmiştir.



Şekil 5.1 : Simülasyonu yapılan makine parçası

Şekil 5.2’de üç boyutlu sonlu elemanlar programının analiz için oluşturduğu ağ yapısı görülmektedir. Hassas bir analiz için programda sonlu elemanların bir kenarının uzunluğu en fazla 30 mm olacak şekilde ayarlamalar yapılmış ve toplam 99085 adet eleman oluşturulmuştur. Boşta analizin yapılması 5 dakika, tam yük durumu için analiz ise 8 dakika 35 saniye sürmüştür.

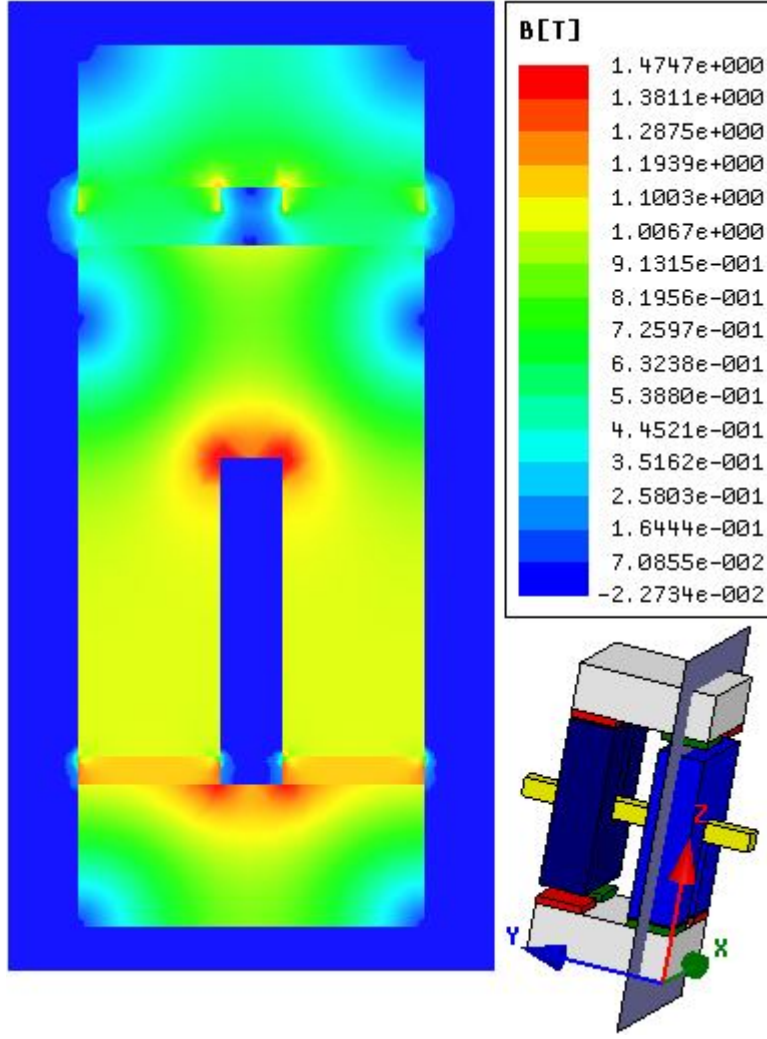


Şekil 5.2 : Makine parçasında oluşturulan sonlu elemanlar ağ yapısı

5.3 Çift Rotorlu Enine-Eksenel Akılı Makinenin Boşta Çalışmada Manyetik Akı Yoğunluğu Dağılımları

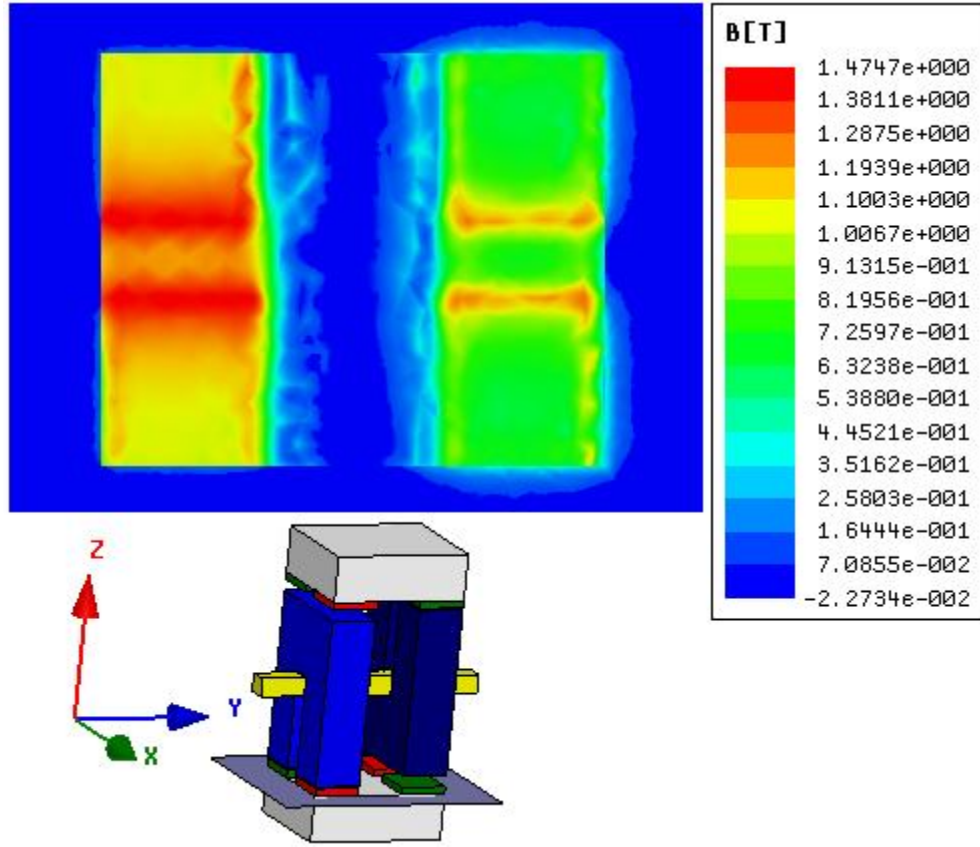
Boşta çalışmada, sargıdan akım akmayacağından makinede sadece mıknatısın oluşturduğu manyetik akı yoğunluğu gözlenir. Yapılan kabul ve hesaplamalara göre uygun sonuçlar çıkmıştır. Dar hava aralığındaki ve stator bacaklarındaki akı yoğunlukları yaklaşık $1,1 \text{ Tesla}$ 'dır ve birbirlerine yakın değerdedir (Şekil 5.3). Böylece, stator ve rotor gövdelerinin manyetik geçirgenliklerinin sonsuz kabul edilmesiyle, hesaplanan değer büyük bir sapmaya uğramadığı anlaşılmaktadır. Beklendiği gibi, akının yön değiştirdiği iç köşelerde akı yoğunluğu yüksektir. Ayrıca akı, yön değiştirirken dairesel bir yol izlediğinden akı yoğunluğunun çok düşük olduğu modelin dış köşeleri göze çarpmaktadır.

Şekil 5.3'te akı yoğunluğunun elde edildiği düzlem, iç rotora bakan birinci stator takımına ait statoru tam ortasından kesmektedir.



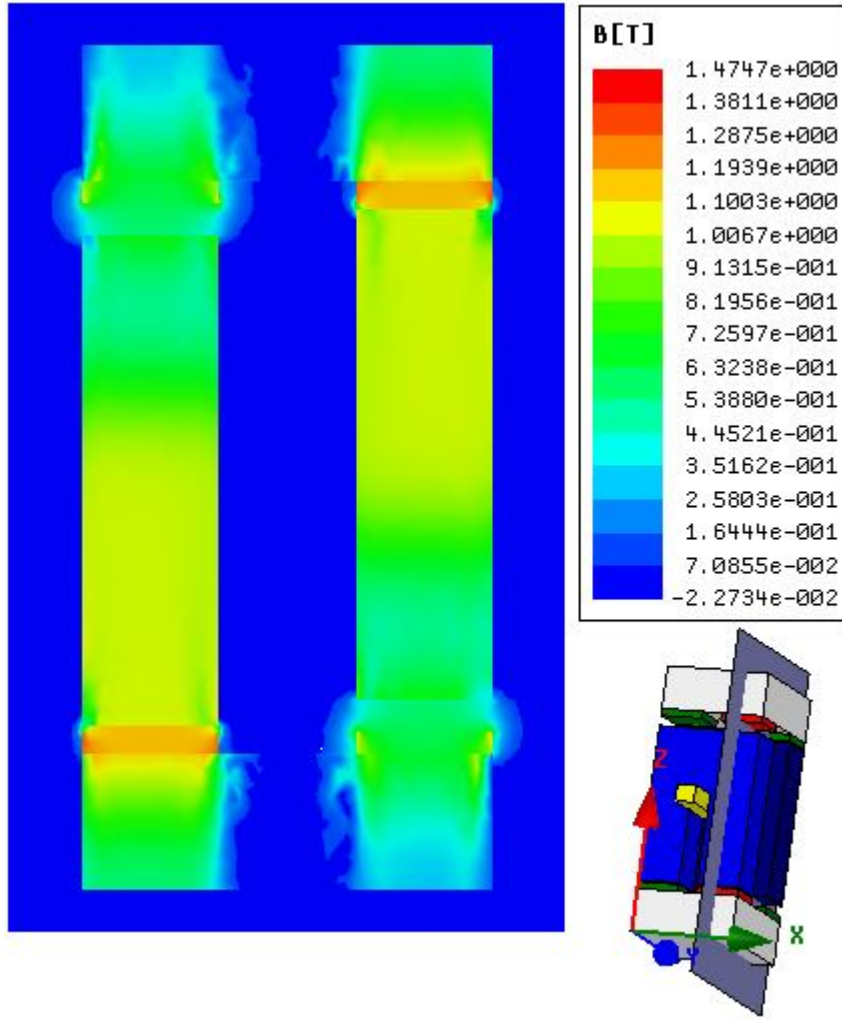
Şekil 5.3 : Boşta çalışmada verilen xz-düzleminde manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 5.4'te, iç rotordaki mıknatısların kendi aralarındaki etkileşimi daha iyi gözlemleyebilmek için, iç rotorla mıknatısların birleştiği düzlemin hemen altındaki düzlemde akı dağılımı çıkarılmıştır. Görüldüğü gibi, zıt yönde kutuplanmış komşu mıknatıslar arasındaki kaçak akı miktarı büyük seviyelerde değildir. Asıl manyetik akı dağılımı istendiği gibi, dar hava aralığına bakan karşılıklı mıknatıslar arasında çok daha yoğundur. Birinci çevrimdeki akı yoğunluğu için amaçlanan *1,1 Tesla* değeri gerçekleşmiştir.



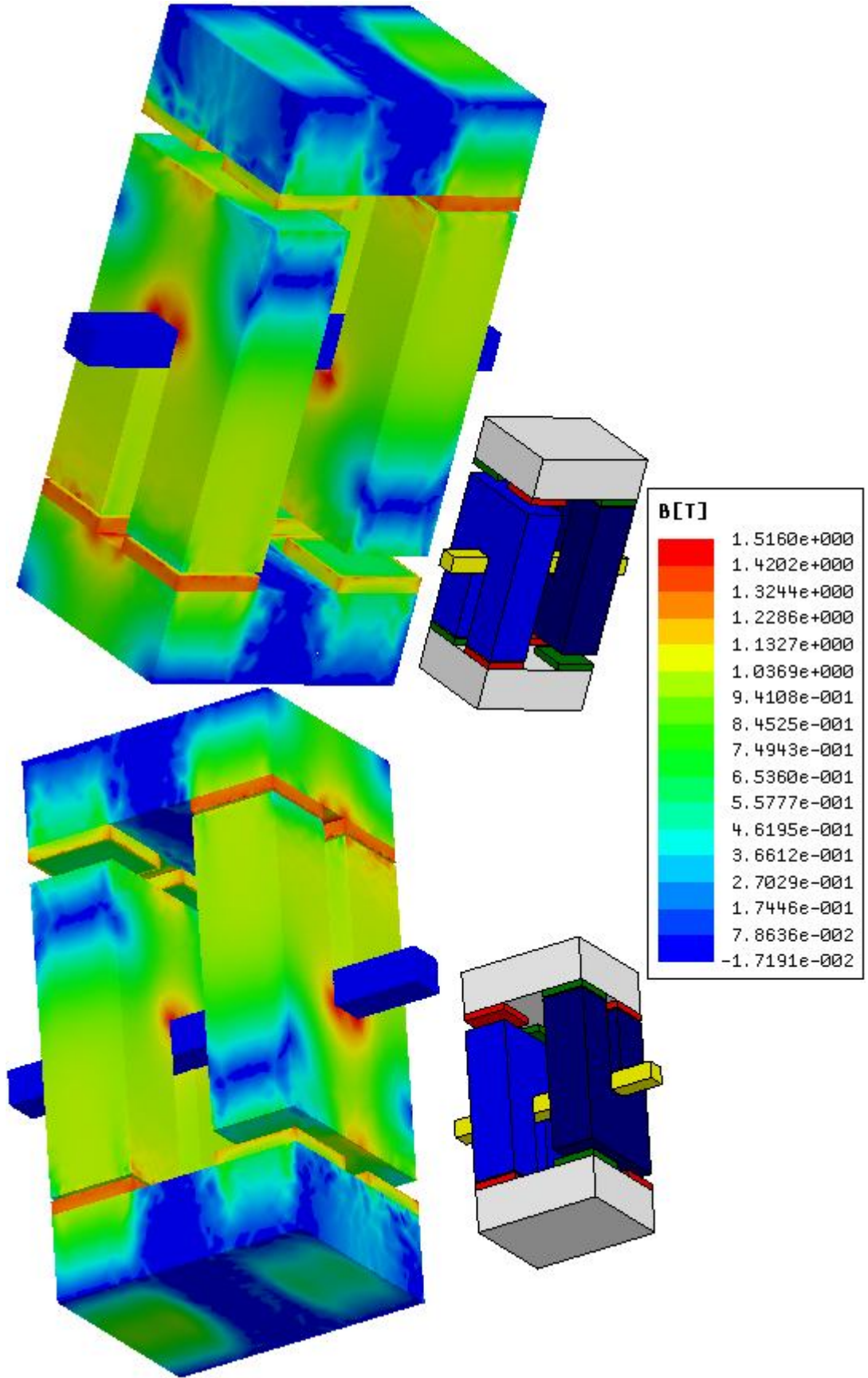
Şekil 5.4 : Boşta çalışmada verilen xy-düzleminde manyetik akı yoğunluğu dağılımı

İki komşu stator dişi arasındaki manyetik etkileşimi gözleyebilmek için Şekil 5.5'te yz-eksenleri üzerindeki bir düzlemde akı dağılımı çıkarılmıştır. Bu düzlem stator bacaklarını radyal yönde ikiye bölmektedir. Beklendiği gibi dar hava aralığına yakın yerlerde akı yoğunluğu yüksektir ve stator bacağı boyunca $1,1-1,2$ Tesla değerine ulaşılmıştır. Akı, statorun aksenal gövdesinde yön değiştirdiği için, akı yoğunluğu daha düşük çıkmıştır.



Şekil 5.5 : Boşta çalışmada verilen yz-düzleminde manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 5.6'da ise analizi yapılan makine parçasının yüzeylerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Ana akı yollarında akı yoğunluğunun yaklaşık 1,1 T olduğu görülmektedir. Aşırı doyma durumu gerçekleşmemiştir. Ayrıca manyetik akı, rotor gövdelerinin bazı kısımlarını kullanmamaktadır. İleriki çalışmalarda buna göre rotor gövdelerinde yeni tasarımlara gidilebilir.

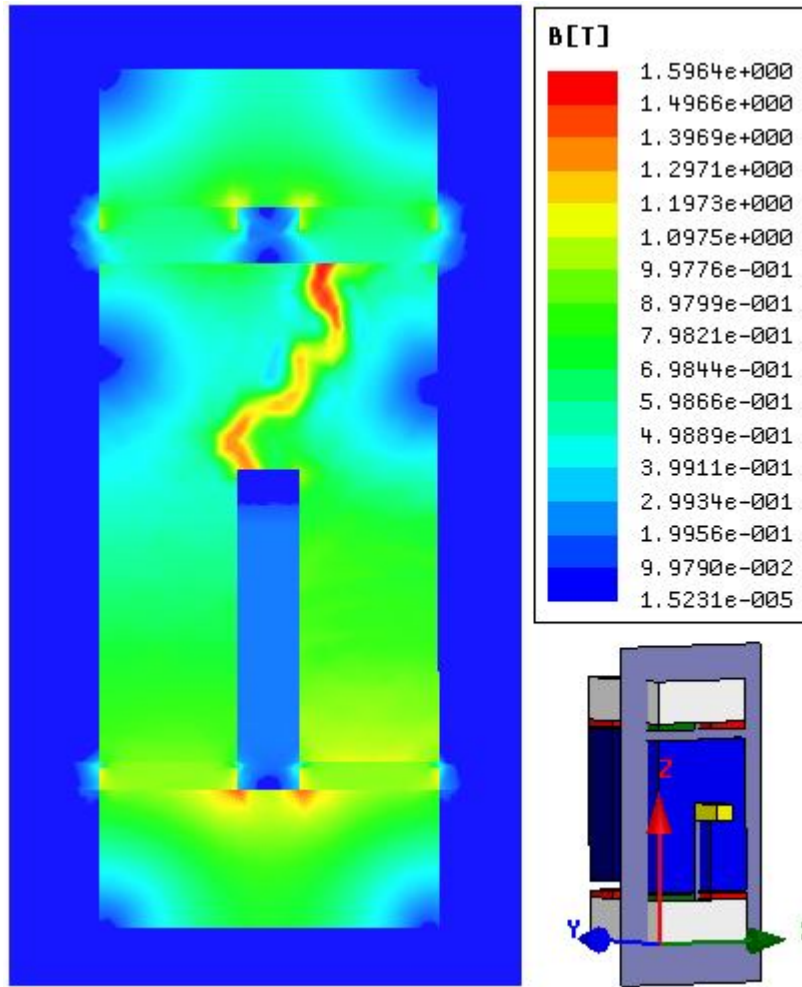


Şekil 5.6 : Boşta çalışmada farklı açılardan modelin yüzeylerindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı

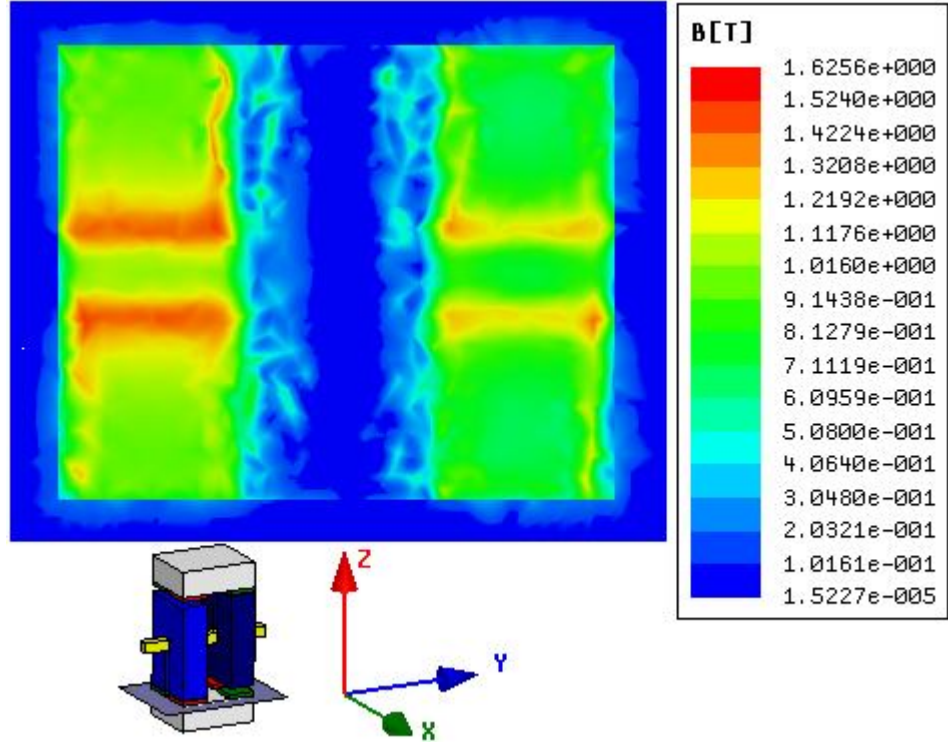
5.4 Çift Rotorlu Enine-Eksenel Akılı Makinenin Anma Yükünde Çalışırken Manyetik Akı Yoğunluğu Dağılımları

Makine anma yükünde çalışırken armatür sargısından anma akımı akar. Analizi yapılan modelde 14 sarım olduğundan stator gövdesinden toplam 5600 Amper geçmektedir. Bu akımın oluşturduğu manyetik alan, mıknatısların oluşturduğu ana akıyı azaltacak yöndedir. Bu etki sonucu demir çekirdekteki akı yoğunluğu değeri yaklaşık 0,9 Tesla'ya düşer ve makine anma gücünü bu akı değerinde verir.

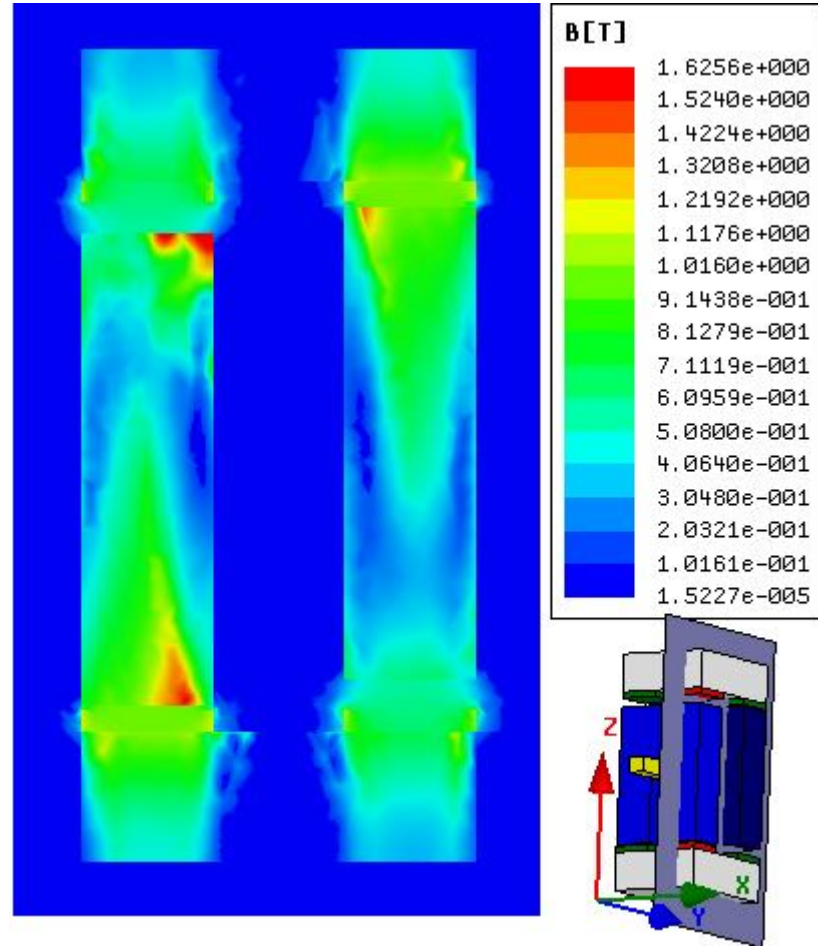
Boşta çalışma durumuna benzer olarak Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9'da sırasıyla xz, xy ve yz düzleminde yer alan kesitlerdeki akı dağılımları verilmiştir.



Şekil 5.7 : Tam yükte çalışmada verilen xz-düzleminde manyetik akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 5.8 : Tam yükte çalışmada verilen xy-düzleminde akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 5.9 : Tam yükte çalışmada verilen yz-düzleminde akı yoğunluğu dağılımı

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada doğrudan tahrikli rüzgâr türbinleri için yeni bir çift rotorlu enine-eksenel akılı makine analiz edilmiştir. Belli çıkış gücü, uç gerilimi, kutup ve devir sayıları seçilerek bu değerlerden hareketle makinenin elektriksel özellikleri ve boyutları belirlenmiştir. Yapılan çalışma kavramsal bir çalışmadır; makinenin mekanik olarak nasıl gerçekleştirileceği ve buna dair hesaplar incelenmemiştir.

Doğrudan tahrikli senkron makinelerin karakteristik bir özelliği birkaç metrelik çap uzunluğuna ulaşabilmeleridir. Bu dezavantaj üretim ve nakletme sorunlarını da beraberinde getirir. Çalışmada çeşitli optimizasyonlar üzerinde durulmuş, makine boyutlarının fazla büyümesinden kaçınılmaya çalışılmıştır. Ancak yine de çap uzunluğunun aşırı büyümesinin önüne geçilememiştir. Bunun sebebi, enine-eksenel akılı makine yapısının büyük güçlü doğrudan tahrik teknolojisi için uygun olmamasıdır. Öte yandan tez çalışmasında kullanılan referanslarda da görüldüğü gibi küçük güçlü uygulamalar için ulaşılan yüksek moment/kg oranı ümit vericidir.

Örnek tasarım olarak çıkış gücü 500 kW , uç gerilimi 750 V ve devir sayısı 30 d./dak. olan 120 kutuplu bir makine seçilmiştir. Verilen dış yarıçapta en fazla gerilim endüklemesi için özel olarak tasarlanan makinenin bu özelliğinin daha da ön plana çıkması için mıknatıslarca üretilen akı en etkili biçimde yönlendirilmeye çalışılmıştır. Makinenin en önemli tasarım parametresinin mıknatısların, stator bacakları ve rotorların kesitinin bir kenar uzunluğu olduğu gözlemlenmiştir. Bu parametre, kutup ve sarım sayısı değerleriyle yakından ilişkili olup makine boyutlarına doğrudan etki etmektedir. Bu yüzden olabildiğince küçük tutulmaya çalışılmıştır.

Boşta ve tam yükte çalışma durumunda makinenin simülasyonları yapılmıştır. Akı yoğunluğunun en büyük değerinin çalışmada göz önüne alınan sınırı ($1,5\text{--}1,6\text{ T}$) geçmediği görülmüştür.

6.1 Çalışmanın Uygulama Alanı

Bugün rüzgâr türbini generatörü olarak daha büyük oranda akıllı makineler kullanılmakla beraber eksenel akıllı makinelerden de faydalanılmaktadır. Ancak karmaşık yapısından dolayı enine-eksenel makineler, henüz kullanım alanı bulamamıştır. Daha basit yapılar elde etmek için çalışmalar sürmekte ve birçok yeni topoloji ortaya atılmaktadır. Bu çalışmada analiz edilen yeni çift rotorlu makinenin de yapılan çalışmalara katkı sağlayacağı umulmaktadır.

6.2 Düşünce ve Hedefler

Bu yeni çift rotorlu makinenin daha da geliştirilmesi için atılacak en önemli adımlardan biri, simülasyonlarda da görüldüğü gibi statorun eksenel gövdesinin ve rotorların köşeli yapılmaması olabilir. Stator dişleri için spiral laminasyonlardan faydalanma yoluna gidilip manyetik akının kullanmadığı bu bölgeler çıkarıldığında kütlede önemli oranda azalma sağlanacaktır. Tasarım aşamasında kalıcı mıknatısların manyetik özelliklerinin zamanla zayıflayacağı göz önüne alınmalıdır.

Her enine-eksenel akıllı sabit mıknatıslı makine topolojisinde olduğu gibi bu makinede de en önemli sorun üretim zorluğudur. Stator dişlerinin ağırlığına dayanabilmesi için armatür sargısını özel yapılarla desteklemek gerekir. Ayrıca endüklenen gerilimlerin genlik ve faz olarak tamamen eşit olması için rotorların d-eksenleri birbirleriyle örtüşmelidir. Stator dişlerinin arasındaki mesafe de sargı boyunca sabit olmalıdır. Bu endüklenen gerilim dalga şeklini doğrudan etkiler. Gelecekte birkaç önemli özelliği optimize etmek için makine boyutlarını daha da değiştirerek özellikle küçük ve orta güçte uygulamalar için değişik özellikte yapılar elde etmek mümkün olacaktır.

7. KAYNAKLAR

- [1] **World Wind Energy Association**, 2008: World Wind Energy Report, Retrieved July 11, 2009 from <http://www.wwindea.org/home/>
- [2] **European Wind Energy Association**, 2009: The Economics of Wind Energy Retrieved July 11, 2009 from <http://www.ewea.org/index.php?id=201>
- [3] **Akalın, A.**, Dünyada Rüzgâr Enerjisi Kaynak Potansiyeli, alındığı tarih 16.06.2009 <http://www.ruzgarenerjisibirligi.org.tr>
- [4] **Global Wind Energy Council**, 2008: Global Wind 2008 Report, Retrieved July 11, 2009 from <http://www.gwec.net/index.php?id=8>
- [5] **Url-1** <http://www.millienerji.com/DATA/Mayis07_RuzgarEnerjisiDunyaya-MeydanOkuyor.pdf>, alındığı tarih 10.06.2009.
- [6] **Url-2** <<http://www.metaefficient.com/news/new-record-worlds-largest-wind-turbine-7-megawatts.html>>, alındığı tarih 14.06.2009.
- [7] **European Commission**, 2007: European Strategic Energy Technology Plan, *Biopact*, June 12.
- [8] **Henneberger, G. and Bork, M.**, 2000: Development of a Transverse Flux Traction Motor in a Direct Drive System, *International Conference on Electrical Machines*, Helsinki, Finland, pp. 1457-1460.
- [9] **Polinder, H., De Haan, S. W. H., Dubois, M. R., Slootweg, J. G.**, 2004: Basic Operation Principles and Electrical Conversion Systems of Wind Turbines, *Proceedings of NORPIE '04*, Paper#069, Trondheim, Norway, June.
- [10] **Furlani, E. P.**, 2001: *Permanent Magnet and Electromechanical Devices*, Academic Press, San Diego, USA.
- [11] **Mitcham, A. J.**, 1997: Transverse Flux Motors for Electric Propulsion of Ships, *IEEE Colloquium on New Topologies for Permanent Magnet Machines*, pp.3/1-3/6, June.
- [12] **Slootweg, J. G. and De Vries, E.**, 2003: Inside wind turbines - Fixed vs. variable speed, *Renewable Energy World*, pp. 30-40.
- [13] **Uyar, M., Gencoğlu, M. T., Yıldırım, S.**, 2005: Değişken Rüzgâr Türbinleri İçin Generatör Sistemleri, *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Sh. 173-178.
- [14] **Zinger, D. S. and Muljardi, E.**, 1997: Annualized Wind Energy Improvement Using, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. **33**, no. 6, pp. 1444-1447, Nov./Dec..
- [15] **Weh, H. and Jiang, J.**, 1988: Berechnungsgrundlagen für Transversalflussmaschinen, *Archiv für Elektrotechnik*, vol. **71**, pp. 187-198.

- [16] **Weh, H., Hoffmann, H. and Landrath, J.,** 1988: New Permanent Magnet Excited Synchronous Machine with High Efficiency at Low Speeds, *International Conference on Electrical Machines*, Pisa, Italy, pp. 35-40, Sep. 12-14.
- [17] **Weh, H., Hoffmann, H., Landrath, J., Mosebach, H., Poschadel, J.,** 1988: Directly-Driven Permanent-Magnet Excited Synchronous Generator for Variable Speed Operation, *European Community Wind Energy Conference*, Herning, Denmark.
- [18] **Weh, H. ve May, H.,** 1986: Achievable Force Densities for Permanent Magnet Excited Machines in New Configurations, *Proceedings of the International Conference on Electrical Machines*, vol. **3**, pp. 1107-1111, Munich, Germany.
- [19] **Polinder, H., Van der Pijl, F. F. A., De Vilder, G., Tavner, P. J.,** 2006: Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for Wind Turbines, *IEEE Trans. Energy Conversion.*, vol. **21**, no. 3, pp. 725-732, Sep..
- [20] **Bao, G. Q., Wang, J. K., Zhang, D., Jiang, J. Z.,** 2006: An Investigation of Multiphase Transverse Flux Permanent Magnet Machine, *International Power Electronics and Motion Control Conference*, Beijing, China.
- [21] **Lindh, T., Salminen, P., Pyrhönen, J., Niemelä, M., Kinnunen, J., Haataja, J.,** 2007: Permanent Magnet Generator Designing Guidelines, *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Setúbal, Portugal.
- [22] **Strete, L. and Viorel, A.,** 2008: On the Designing Procedure of a Permanent Magnet Transverse Flux Generator (PMTFG) with Specific Topology, *11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Brasov, Romania, 22-24 May.
- [23] **Masmoudi, A., Njeh, A., Mansouri, A., Trabelsi, H., Elantably, A.,** 2004: Optimizing the Overlap Between the Stator Teeth of a Claw Pole Transverse-Flux Permanent-Magnet Machine, *IEEE Transactions On Magnetics*, vol. **40**, no. 3, pp. 1573-1578.
- [24] **Dubois, M. R., Dehlinger, N., Polinder, H., Massicotte, D.,** 2006: Clawpole Transverse-Flux Machine with Hybrid Stator, *International Conference on Electrical Machines*, Paper#412, Cretan, Greece.
- [25] **Svechkarenko, D.,** 2007. On analytical modeling and Design of a Novel Tranverse Flux Generator for Offshore Wind Turbines, *M. S. thesis*, Elec. Eng. Dep., KTH, Stockholm, Sweden.
- [26] **Boldea, I.,** 2006: *The Electric Generators Handbook Variable Speed Generators*, CRC Press, Florida, USA.
- [27] **Weh, H.,** 1995: Transverse Flux Machines in Drive and Generator Application, *Proceedings of IEEE Int. Symposium on Electric Power Engineering PowerTech*, pp. 75-80, Stockholm, Sweden, June.
- [28] **Weh, H.,** 1988: Permanentmagnetenerregte Synchronmaschinen hoher Kraftdichte nach dem Transversalflusskonzept, *etz Archiv*, vol. **10**, no. 5, pp. 143-149.

- [29] **Anpalahan, P.**, 2001: Design of Transverse Flux Machines Using Analytical Calculations&Finite Element Analysis, *M. S. Thesis*, Elec. Eng. Dep., KTH, Stockholm, Sweden.
- [30] **Dos Santos, J. P.**, Method and Apparatus for Generating Linear Electromagnetic Travelling Fields for Driving and Increasing the Adhesive Load of Railway Motored Vehicles, *United States Patent*, No: US4236455 dated 02.12.1980.
- [31] **Gieras, J. F.**, 2005: Performance Characteristics of a Transverse Flux Generator, *IEEE Int. Conference on Electric Machines and Drives*, pp. 1293-1299, May.
- [32] **Dubois, M. R., Polinder, H. and Ferreira, J. A.**, 2002: Transverse-Flux Permanent Magnet (TFPM) Machine with Toothed Rotor, *Power Electronics, Machines&Drives Conference*, pp. 309-314.
- [33] **Sastri, V. S. and Perumareddi, J. R.**, 2003: Modern Aspects of Rare Earths and Their Complexes, *Elsevier Science*, December.
- [34] **Url-3** <<http://www.magnets.bham.ac.uk/smco.htm>>, alındığı tarih 10.06.2009.
- [35] **Stensland, T. D.**, 1995: Effects of Voltage Harmonics on Single-Phase Transformers and Induction Machines Including Pre-processing for Power Flow, *M. S. Thesis*, Dep. of Elec. and Comp. Eng., Faculty of the Grad. School of the Uni. of Colorado.
- [36] **Url-4** <<http://www.mceproducts.com/materials/materialdetails.asp?id=1079-&MaterialTypeCode=1003>>, alındığı tarih 17.07.2009.
- [37] **Lampola, P.**, 2000: Directly Driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications, *PhD Thesis*, Lab. Electromechanics, Helsinki Uni. Of Tech., Finland.
- [38] **Widyan, M. S.**, 2006: Design, Optimization, Construction and Test of Rare-Earth Permanent-Magnet Electrical Machines with New Topology for Wind Energy Applications, *PhD. Thesis*, Fakultät von Elektrotechnik und Informatik, TU Berlin, Berlin, Germany.
- [39] **Gürdal, O.**, 2001: *Elektrik Makinalarının Tasarımı*, Atlas Yayınevi.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Enes Selman Ege

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 07.12.1984

Adres: Bahçeköy Yenimahalle Orman Sok. Önder Apt. No: 31 Daire: 7
Sarıyer/İstanbul

Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi