

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN DOĞRUDAN SÜRÜŞLÜ SÜREKLİ
MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Orhan KÜTÜK**

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Y. Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN DOĞRUDAN SÜRÜŞLÜ SÜREKLİ
MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRÜ TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Orhan KÜTÜK
(504071026)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 16 Haziran 2011

**Tez Danışmanı : Y. Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Feriha Erfan KUYUMCU (KÜ)
Y. Doç. Dr. Deniz YILDIRIM (İTÜ)**

HAZİRAN 2011

ÖNSÖZ

Fosil kaynakların tükeneyeceği gerçeği doğrultusunda tüm dünyada alternatif enerji kaynağı arayışı çalışmaları hızlanmıştır. Enerji sektöründe de bu eğilime paralel olarak alternatif çözümler üzerinde çalışılmaktadır. Günümüzde artan enerji ihtiyacını karşılamaya yönelik yenilenebilir enerji kaynakları arayışları sonucu geliştirilen çözümlerin büyük bir kısmında rüzgâr santralleri yer almaktadır. Rüzgârın bedava ve yenilenebilir olması rüzgâr santrallerini daha da cazip hale getirmektedir. Rüzgârı daha verimli ve etkili kullanabilmek için sürekli yeni çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan en önemlisi elbette elektrik enerjisinin elde edildiği generatörlerdir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda en umut vadeden çözümlerden biri dişli sisteme gerek duymayan doğrudan sürüslü sabit mıknatıslı senkron generatörlerdir. Ülkemizde rüzgâr santrali tasarımı ve üretimi konusunda yerli üretici çok fazla etkilideğildir. Ancak teknolojiye trendi yakalayabilmek için gelişen bu yeni teknolojiye ilgi gösterilmeli ve rüzgâr generatörü konusunda ülkemizde çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bu doğrultuda yapılan bu tez çalışmasında bana yardımlarını esirgemeyen ve beni değerli görüşleri ile yönlendiren hocama teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca bu çalışma için tüm altyapı imkanlarını sağlayan ve bu teknolojinin gelişmesi için büyük çaba harcayan TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü yönetimine de yardımlarından ötürü teşekkür ederim.

Bu tezin ortaya çıkmasında değerli yardımını esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca beni yetiştiren ve her ihtiyacım olduğunda yanımda gördüğüm aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Nisan 2011

Orhan Kütük

Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç.....	1
1.2 Rüzgâr Türbinleri.....	2
1.3 Rüzgâr Türbini Alt Bileşenleri.....	5
2. RÜZGÂR ENERJİSİ MEVCUT DURUMU	9
2.1 Dünya’da Rüzgâr Enerjisi Pazarı	9
2.2 Rüzgâr Enerjisi Türkiye İç Pazarı	10
2.3 Dünyada Büyük Rüzgâr Türbinleri Üretimi.....	11
2.4 Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli.....	14
2.5 Türkiye’de Mevcut Rüzgâr Türbini Üretim Altyapısı	15
3. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖRLER.....	17
3.1 Asenkron Generatörler	17
3.1.1 Kafesli asenkron generatörler (KAG).....	19
3.1.2 Rotoru sargılı asenkron generatörler (RSAG)	21
3.1.2.1 Çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG)	21
3.1.2.2 OptiSlip® generatör (OSG)	22
3.2 Senkron Generatörler	23
3.2.1 Alan sargılı senkron generatörler (ASSG)	23
3.2.2 Sürekli mıknatıslı senkron generatörler (SMSG).....	24
4. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN SÜREKLİ MIKNATISLI DOĞRUDAN SÜRÜŞLÜ SENKRON GENERATÖR TASARIMI.....	27
4.1 Kavramsal Tasarım	27
4.1.1 Rüzgârdan enerjinin elde edilmesi.....	27
4.1.2 Temel tasarım parametrelerinin belirlenmesi	31
4.1.3 Analitik tasarım ve analiz	37
4.2 Manyetik Tasarım ve Analiz.....	47
4.3 Isıl Analiz.....	65
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR	79
EKLER.....	85

KISALTMALAR

ASSG	: Alan Sargılı Senkron Generatör
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
ÇBAG	: Çift Beslemeli Asenkron Generatör
DERT	: Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
DMİ	: Devlet Meteoroloji İşleri
EİEİ	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EWEA	: European Wind Energy Association (Avrupa Rüzgâr Enerji Derneği)
KAG	: Kafesli Asenkron Generatör
OSG	: OptiSlip Generatör
REPA	: Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası
RES	: Rüzgâr Enerjisi Santrali
RSAG	: Rotoru Sargılı Asenkron Generatör
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SMSG	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör
TUREB	: Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği
YERT	: Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Mevcut rüzgâr gücü kapasitesinin uluslararası dağılımı [9].....	4
Çizelge 2.1 : Ana Türbin Üreticileri ve Tedarikçileri	13
Çizelge 4.1 : Farklı faz sayısındaki generatörlerin karşılaştırılması [47]	32
Çizelge 4.2 : 3 faz generatörler için oluk/kutup kombinasyonları [47]	33
Çizelge 4.3 : TRV, K, σ katsayıları tablosu [47]	35
Çizelge 4.4 : Değişik uygulamalar için akım yoğunlukları [47].....	36
Çizelge 4.5 : Sargı izolasyon sınıfları.....	73
Çizelge 4.6 : Generatör çalışma çevrimi.....	73
Çizelge 2.1 : Ana Türbin Üreticileri ve Tedarikçileri	13
Çizelge A.1 : RMXprt tasarım şablonu (design sheet)	86

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Darius tipi rüzgâr türbini [2]	2
Şekil 1.2 : YERT tipi modern rüzgâr türbini parçaları [3]	3
Şekil 1.3 : Rüzgâr türbini boyutları ve güç kapasiteleri karşılaştırması [4].....	4
Şekil 1.4 : Ülkelerin elektrik üretiminde rüzgâr enerjisi oranları [7]	5
Şekil 2.1 : Şekil1: Dünya türbin üreticileri ve pazar payları [54]	10
Şekil 3.1 : Kendinden uyarımlı asenkron generatör [30]	19
Şekil 3.2 : Rüzgâr türbinine bağlı KAG'ün şebekeye bağlantısı	20
Şekil 3.3 : ÇBAG'lerin rüzgâr türbinine ve şebekeye bağlantısı	22
Şekil 3.4 : Değişken hızlı alan sargılı senkron generatör.....	24
Şekil 4.1 : C_p - β Eğrisi [3]	29
Şekil 4.2 : Rüzgârdan elde edilebilecek güç eğrileri[55]	30
Şekil 4.3 : RMxprt modeli	38
Şekil 4.4 : M-19 #24 (%3 Si) B-H karakteristiği.....	39
Şekil 4.5 : Faz sargılarının yerleşimi	42
Şekil 4.6 : Anma hızında endüklenen gerilimler	45
Şekil 4.7 : Anma yükte faz akımları	46
Şekil 4.8 : Hava aralığı akı yoğunluğu	46
Şekil 4.9 : Generatör Maxwellmodeli.....	49
Şekil 4.10 : Ağ oluşturma (mesh generation)	50
Şekil 4.11 : Generatörün Maxwell Devre Editörü Modeli	51
Şekil 4.12 : Boşta çalışmadaki akı yolları (flux plots).....	53
Şekil 4.13 : Anma yükte çalışmadaki akı yolları	53
Şekil 4.14 : Boşta çalışmadaki akı yoğunluğu (sadece mıknatısların etkisi)	54
Şekil 4.15 : Anma yükte çalışmadaki akı yoğunluğu (iki faz iletimde)	54
Şekil 4.16 : Kısadevre durumundaki manyetik akı yoğunluğu.....	56
Şekil 4.17 : Kısa devre durumundaki faz akımları	56
Şekil 4.18 : Kısadevre durumunda endüklenen faz gerilimleri	57
Şekil 4.19 : Boşta çalışmadaki akı vektörleri	58
Şekil 4.20 : Anma yükte çalışmadaki akı vektörleri	58
Şekil 4.21 : Anma akımındaki faz gerilimleri (faz-nötr).....	59
Şekil 4.22 : Faz akımları.....	59
Şekil 4.23 : Generatör mil momenti	59
Şekil 4.24 : Generatör açık devre gerilimleri	60
Şekil 4.25 : Generatör demir kaybı	60
Şekil 4.26 : Generatörün 3 boyutlu maxwell modeli	61
Şekil 4.27 : Boşta çalışmadaki akı yoğunluğu (3D analiz)	62
Şekil 4.28 : Anma yükte çalışmadaki akı yoğunluğu (3D analiz).....	62

Şekil 4.29 : Boşta çalışmadaki akı vektörleri (3D analiz)	63
Şekil 4.30 : Anma yükte çalışmadaki akı vektörleri (3D analiz).....	63
Şekil 4.31 : Makine mil momenti (3D analiz)	64
Şekil 4.32 : Faz akımları (3D analiz)	64
Şekil 4.33 : Generatör faz gerilimleri	64
Şekil 4.34 : Generatörün radyal kesiti.....	69
Şekil 4.35 : Generatörün boylamsal (eksenel) kesiti.....	70
Şekil 4.36 : Generatörün Motor-CAD ısı devre şeması	71
Şekil 4.37 : Generatörün sıcaklığının zamana göre değişimi.....	72
Şekil 4.38 : Generatörün kararlı çalışma sıcaklığı (anma çalışma durumunda)	72
Şekil 4.39 : Çizelge 4.4 çevrimi sonuçları	74

RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN DOĞRUDAN SÜRÜŞLÜ SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRÜ TASARIMI

ÖZET

Fosil yakıt kaynaklarının tükeniyor olması ve buna bağlı petrol fiyatlarının artışı enerji alanında mevcut teknolojilerin verimliliğinin artırılması çalışmalarının hız kazanmasına ve alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin artmasına neden olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında enerji geri dönüşü, maliyet ve uygulama ölçütü ile değerlendirildiğinde rüzgâr enerjisinin diğer kaynaklardan avantajlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle yenilenebilir kaynaklar arasında rüzgâr, hidrolik enerjiden sonra ikinci sıraya oturmuştur. Ülkemiz rüzgâr rejimine uygun olmayan türbinlerin ithal edilmesi, hem rüzgâr türbinlerinin verim problemlerini ortaya çıkarmakta, hem de rüzgâr teknolojisinde dışa bağımlılığa neden olmaktadır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi önümüzdeki 10 yılda Türkiye'nin kurulu rüzgâr kapasitesinin 20 GW olacağını öngörmektedir. 20 yıllık dönemde bu rakamın 40 GW olması beklenmektedir. Şu anda büyük ölçekli endüstriyel rüzgâr türbinlerinin tamamı ithal edilmektedir. MW başına 1.5 milyon USD piyasa değerinden 20 yıl içinde rüzgâr türbinleri için yurt dışına akacak kaynak 60 milyar USD olarak gözükmektedir.

Bu tez çalışmasında günümüzde rüzgâr enerjisi santrallerinde yaygınlığı ve kullanılabilirliği giderek artan sabit mıknatıslı senkron generatör tasarımına odaklanılmıştır. Çalışmada öncelikle rüzgâr enerjisinin Türkiye'deki ve dünyadaki durumu hakkında bilgi verilmiş, ardından rüzgâr santrallerinde kullanılan generatör tiplerinden ve özelliklerinden bahsedilmiştir. Kullanılan bu generatörler arasında giderek yaygınlaşan ve dişli sisteme gerek duymayan doğrudan sürüşlü sürekli mıknatıslı senkron generatör tasarımı yapılmıştır. Tasarım sırasında öncelikle rüzgârdan enerjinin elde edilmesinden bahsedilmiştir. Buna bağlı olarak generatör temel parametreleri belirlenmiştir. Ardından elektrik makinesi tasarımı yazılımları desteği ile makine modeli kurularak çeşitli çalışma koşullarında analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi ile tasarımın manyetik çözümlemesi yapılmıştır. Makinenin çalışma şartlarındaki ısı analizi yapılarak generatörün son şekli elde edilmiştir. Mekanik tasarım ve analizler sonucunda tasarımın son halini alarak üretilmeye hazır hale gelmiştir.

DESIGN OF DIRECT DRIVE PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR FOR WIND POWER PLANT

SUMMARY

Increasing oil prices depending on diminishing fossil fuel reserves brings about an effort to find means of improving energy efficiency and a tendency to seek for alternative renewable energy sources in energy sector. Compared to other renewable energy systems, wind energy is more advantageous based on rate of return, cost and ease of application. Therefore, wind energy ranks second among renewable energy resources. Import of turbines that are not designed or optimized for Turkey's wind regime results both lost efficiency and causes technological dependence on foreign sources. General Directorate of Electrical Power Resources Survey and Development Administration plans for 20 GW installed wind energy capacity for the next 10 years. Within the 20 years period this capacity is expected to rise to 40 GW. Currently, all industrial scale large wind turbines are imported. Considering the market price of 1.5 million USD per 1 MW capacity, it is expected that 60 billion USD resources will flow abroad within the next 20 years.

Thesis is focused on permanent magnet synchronous generators which commonly used at wind power plant. The study primarily gives information about the status of wind energy in Turkey and around the world. Then, types and characteristics of generators used in wind power plants are described. A gearless direct drive permanent magnet synchronous generator, which is gaining popularity among other types, is designed. Primarily, energy acquisitions of wind are discussed during the design. Accordingly, the generator basic parameters are determined. Then, the machine model was established and analyzed by the support of electric machine design software with different operating conditions. Magnetic analyses were made by finite element analysis software. Thermal analysis was done on the machine operating conditions and final form of generator was obtained. Generator is ready to be produced as a result of mechanical design and analysis.

1. GİRİŞ

1.1 Amaç

Enerji ihtiyacının karşılanmasındaki sorunların çözümüne katkı olması bakımından bütün dünya rüzgâr ve benzeri alternatif enerji kaynaklarından mümkün olduğunca fazla faydalanmak ve mevcut enerji kaynaklarını verimli kullanmak üzere bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Bu dönüşümü ülkemizde sağlamak üzere teşvik mekanizmaları formüle edilmektedir. Ancak tüm bu çabalar ülkemizde rüzgâr türbinleri tasarım ve üretim teknolojisi geliştirilmediği takdirde eksik kalacak, milyarlarca dolar kaynak türbin aksamı alımı için yurt dışına akması yönünde bir teşvike dönüşecektir. Bu sebeple tez çalışmasında yapılacaklar, rüzgâr türbinlerinin temel elemanlarından olan generatörlerin yerli imkanlarla geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Ülkemiz enerji teknolojileri açısından yeterli altyapıya sahip bulunmamakta ve büyük oranda yurtdışına bağımlı olmaktadır. Sanayi ve teknolojinin gelişimiyle enerji açısından ithalata bağımlılığımızda da daha belirgin bir artış gözlemlenmektedir. 2010-2020 döneminde ortaya çıkacak enerji ihtiyacının sırasıyla % 3.5 ve % 9.7 daha fazla olacağı tahmin edilmektedir. Enerji ihtiyacındaki bu artışın yanı sıra, özellikle tüketilen enerjinin hangi kaynaklardan karşılandığı da önem taşımaktadır. Bu durum, enerji arzı güvenliği açısından ülkemizde yeni açılımları ve yaklaşımları zorunlu hale getirmektedir. Enerjide kaynak çeşitlendirilmesi konusunun Türkiye'nin önemli gündemlerinden birisini oluşturacağı düşünülmektedir. Ülkemiz ise enerji verimliliğini arttırmak için rüzgâr enerjisinde %25 potansiyeliyle, yenilenebilir kaynaklarda Avrupa'da öncü olabilecek bir konuma sahiptir. Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) önümüzdeki 10 yıl içinde Türkiye'de 20 GW rüzgâr enerjisi üretimi için planlama yapmaktadır. Bu hedefe ulaşırken 2 MW'ın üstünde elektrik üretebilen rüzgâr türbin sistemlerinin ülkemizde geliştirilip üretilmesi teknolojik hedef olarak belirlenmiştir. Son yıllarda arka arkaya gelen mevzuat düzenlemeleri ülkemizde yıllardır beklenen destekleyici ortamı yaratmıştır.

Yapılan çalışmanın temel amacı dünyada hızla yaygınlaşan rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatörlerin tasarımsal çalışmasının yapılmasıdır. Yapılacak çalışmada rüzgâr santrallerinde kullanılan ve dişli sisteme ihtiyaç duymayan doğrudan sürürlü (direct drive) sürekli mıknatıslı (permanent magnet) senkron generatörün tasarımı ve tasarlanan generatörün çeşitli benzetim programları aracılığı ile simülasyonu yapılacaktır.

1.2 Rüzgâr Türbinleri

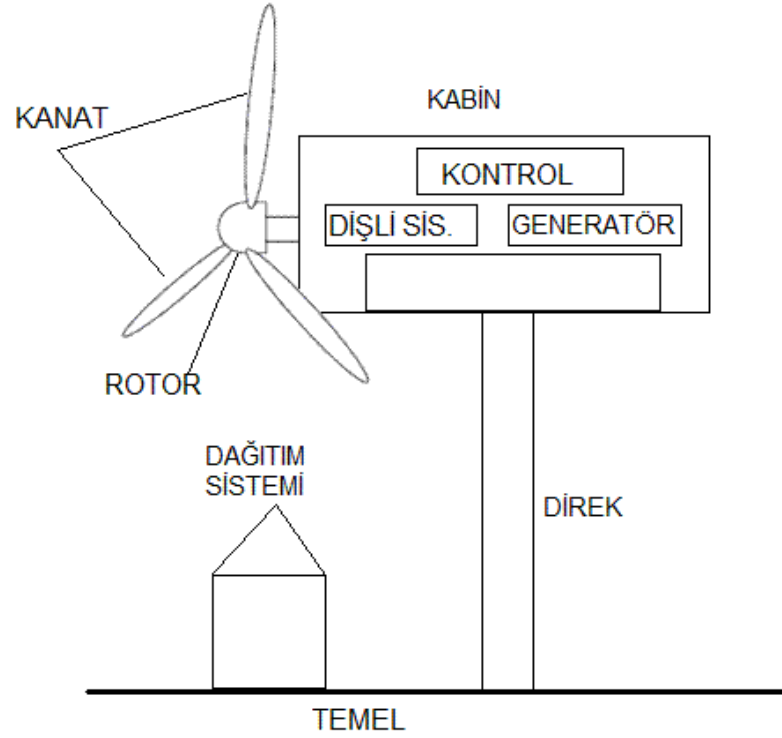
Rüzgâr türbini rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemdir. Rüzgâr türbinleri boyut ve tip olarak çok çeşitlilik göstermekle birlikte genellikle dönme eksenine göre iki sınıfa ayrılırlar. Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri (DERT) ve Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri (YERT). Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde rotor, rüzgârın geliş yönüne dik duran düşey bir mil üzerinde dönmektedir. Generatör ve dişli kutusu yere yerleştirildiğinden yerden müdahale edilmesi kolaydır. En bilinen örnekleri Darius ve Savonius tipi rüzgâr türbinleridir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde ise dönme eksenini rüzgâr yönüne paraleldir. Generatör, dişli kutusu ve pervane tipi rotor bir kulenin üzerinde bulunur. Bugün elektrik üretiminde kullanılan ticari rüzgâr türbinlerinin çoğu yatay eksenli rüzgâr türbinleridir. Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin de bazı avantajları vardır fakat yatay eksenliler kadar verimli değildir[1].



Şekil 1.1 : Darius tipi rüzgâr türbini [2]

Modern rüzgâr türbinleri rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine çevirmek için kullanılan birçok parçadan oluşmaktadır. Bu parçalar Şekil 1.2’de görülmektedir. Rotor rüzgâr türbininin ana parçasıdır. Genellikle rotor kafasına bağlanmış olan iki ya da üç kanat bulunmaktadır. Rotor ve rotor kafası kabine (nase) bağlıdır. Kabin mil, dişli kutusu,

mekanik fren gibi rotor dışındaki döner parçalardan oluşan aktarma organları, generatör ve kontrol ünitesini içerisinde barındıran bölümdür. Kule ve temel ise kule üzerindeki sistemi taşımakla görevlidir.

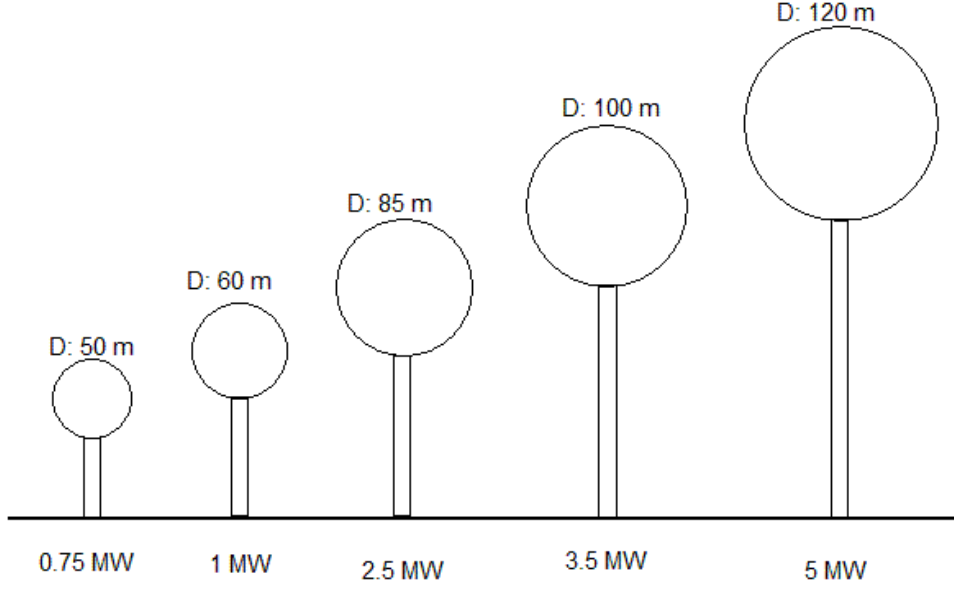


Şekil 1.2 : YERT tipi modern rüzgâr türbini parçaları [3]

Rüzgâr türbinlerinin güç üretimi aerodinamik kontrol (stall kontrol) veya değişken kanat hatve açısı ile (pitch kontrol) kontrol edilirler. Kontrol ünitesi ve generatör tipi bu güç kontrolüne göre belirlenir.

Rüzgâr türbini elektrik üretim kapasiteleri farklılık göstermektedir. Yalnız birkaç wattlık elektrik üretebilen küçük rüzgâr türbinlerinin yanı sıra 5 MW'lık büyük rüzgâr türbinleri de bulunmaktadır. Şekil 1.3'de rüzgâr türbini güç kapasiteleri ile boyutlarının karşılaştırılması görülmektedir.

Günümüzde neredeyse 100,000 MW elektrik enerjisi rüzgâr enerjisinden elde edilmektedir [5]. Bu üretimin ülkelere göre dağılımı Çizelge 1.1'de görülmektedir. Bu tablo göstermektedir ki, diğer ülkelerle yarışabilmesi için Türkiye'nin daha fazla rüzgâr türbini çiftliği kurması gerekmektedir.



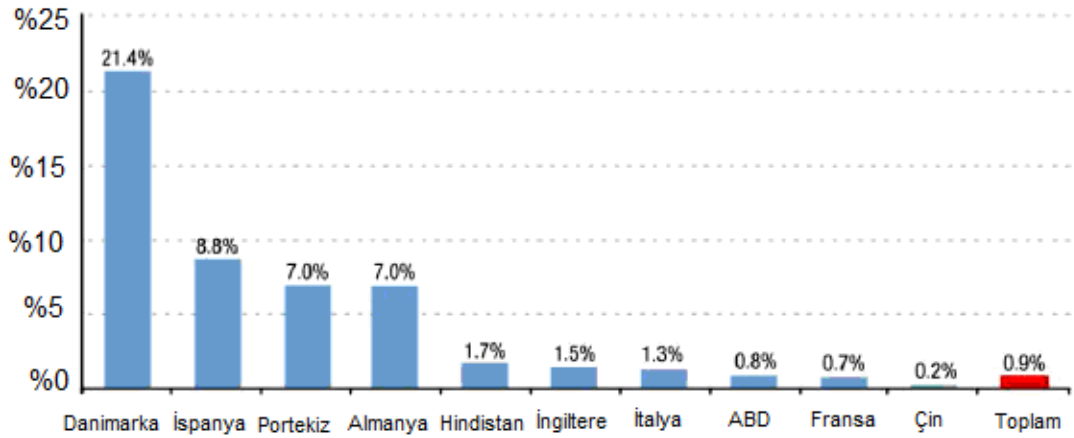
Şekil 1.3 : Rüzgâr türbini boyutları ve güç kapasiteleri karşılaştırması [4]

Çizelge 1.1 : Mevcut rüzgâr gücü kapasitesinin uluslararası dağılımı [9]

	Ülke	2005	2006	2007	2008	2009
1	ABD	9149	11603	16819	25.17	35159
2	Almanya	18428	20622	22247	23903	25777
3	Çin	1266	2599	5912	44531	25104
4	İspanya	10028	23316	15145	16.74	19149
5	Hindistan	15797	46539	31229	9587	10925
6	İtalya	1718	2123	2726	3537	31138
7	Fransa	779	1589	2477	3426	15067
8	İngiltere	1353	1963	2389	3288	40363
9	Portekiz	1022	1716	41306	2862	3535
10	Danimarka	3132	41699	3129	3164	3465
...	...	...	...	...	...	...
19	Türkiye	20	65	207	433	801

Dünyada birçok ülke enerji kaynaklarını fosil yakıtlardan rüzgâr enerjisine çevirmektedir. Şekil 1.4’de görüldüğü üzere istatistiklere göre Danimarka’da tüm elektrik enerjisi ihtiyacının %20’si rüzgâr enerjisinden elde edilmektedir. Amerika 2030 yılı itibariyle elektrik ihtiyacının %20’sini rüzgâr enerjisinden karşılamayı

hedeflemektedir [6]. Tüm bu istatistiksel bilgilere ve planlara göre rüzgâr enerjisi gelecekte artarak kullanılmaya devam edecektir.



Şekil 1.4 : Ülkelerin elektrik üretiminde rüzgâr enerjisi oranları [7]

Dünyada rüzgâr enerjisi teknolojisi üzerine çalışan birçok üniversite ve araştırma merkezi bulunmaktadır. Türkiye’de EİEİ ve TUREB (Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği) rüzgâr enerjisi organizasyonlarındandır. Günümüzde Türkiye’de kullanılmakta olan rüzgâr türbinleri ve rüzgâr enerjisi teknolojisi yurt dışından temin edilmektedir [8].

1.3 Rüzgâr Türbini Alt Bileşenleri

Kabin (taşıyıcı iskelet) denilen yapı, motorlar ve generatör ile birlikte rüzgâr türbinlerinin tüm elemanlarını içinde barındıran taşıyıcı elemandır. Bu yapının ana görevi rüzgâr dahil tüm yükleri alıp etkin bir şekilde kuleye aktarmaktır. Bu sebeple türbinin öngörülmuş çalışma ömrü boyunca kabinin her türlü çalışma koşulları altında bu yüklere dayanıklı olması son derece önemlidir.

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan kompozit malzemeler uzun saatler boyunca ağır servis koşullarında çalışmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin kompozit yapısal elemanların emniyeti ve güvenilirliği, yani yapısal bütünlüğü, bu parçalardaki hasarların veya bozulmaların felaketle sonuçlanacak kritik boyutlara ulaşmadan anında tespit ve tamir edilmesine bağlıdır. Söz konusu parçaların sağlık gözetiminde kullanılan güncel sistem ve teknolojiler çoğunlukla ya yük gözetim sistemlerine (gerinim ölçerler gibi) ya da radyografi, ultrasonik veya diğer uygun tahribatsız bölgesel tarama yöntemleri ile gerçekleştirilen programlı bakımlara dayanmaktadır. Türbinlerin programlı bakımları bu yapıların hem fiziksel büyüklüğünden hem de

genellikle erişilmesi zor bölgelere kurulmalarından dolayı (denizlerdeki rüzgâr türbini çiftlikleri gibi) oldukça zaman alıcı, maliyetli ve zordur. Bundan dolayı, yapısal sağlık denetimini rüzgâr türbinlerinin kompozit yapısal elemanlarının bir parçası haline getiren tahribatsız değerlendirme teknolojisinin (yaygın olarak yapısal sağlık gözetimi olarak bilinir) var olması elemanların güvenilirliğinin korunmasında zamanın ve maliyetin azaltılması açısından önemlidir. Yapısal sağlık gözetimi genellikle ileri kompozit elemanlarda mevcut olmayan uzun vadeli güvenilir yapısal verilerin toplanması için de gereklidir. Bu noktada aşılması gereken en büyük zorluklardan biri, kompozit üretim sürecini kontrol etmek ve üretilmiş kompozit elemanlardaki hasar ve yorulma durumlarını gözlemlemek için kullanılabilecek uygun yapısal sağlık gözetim teknikleri ve sensörler bulmaktır [10]. Çünkü kompozit parçaların güvenilirliği ve güvenliği için, hem imalat sürecinin hem de servis süresince kompozit parçaların sağlığının gözlenmesi de önemlidir.

Fiber Bragg Izgara (Fiber Bragg Grating, FBG) sensörleri hafif ve küçük boyutlu olmalarından ve elektromanyetik girişimlerden etkilenmemelerinden dolayı son on yıl içerisinde dikkatleri üzerlerine çekmişlerdir [11]. FBG'ler genellikle tek modlu fiber optik bir kablo üzerine belirli aralıklarla yayılmış ayrık (discrete) nokta sensörleridir ve bir sorgulayıcı (interrogator) ile eş zamanlı olarak sorgulanabilirler. Sensör bölgelerinde (ızgaralı bölge) yalın bir fiber optik çekirdeğinin (core) kırılma indisi periodik olarak fiberin boyu doğrultusunda (axial direction) değişmektedir. Izgara bölümü, gelen ışığın belirli bir dalga boyunu geniş dalga boylu ışın kaynağı yönünde yansıtmasından ve de diğer dalga boylarını geçirmesinden dolayı bir optik filtre olarak davranmaktadır. Literatürde FBG sensörler sıcaklık, basınç, şekil/pozisyon, yer değiştirme, kimyasal konsantrasyon, nem, ivme, yük, sürtünme, akış, ve gerilme gibi oldukça geniş yelpazeye sahip değişkenleri başarılı ve güvenilir bir şekilde ölçebilmek için yoğun bir şekilde araştırılmaktadır [14, 15].

Rüzgâr türbini uluslararası standartları ve sertifikasyon kurallarına göre iki adet fren sistemi bulunması gerekli olup, en az bir tanesinin düşük-hız milinde olması zorunludur [16, 17]. Düşük-hız milinin çok yüksek moment değerlerine maruz olması nedeniyle, genellikle aerodinamik frenlemenin düşük-hız milinde, mekanik ve/veya elektromagnetik frenleme sisteminin ise yüksek hız (düşük moment) milinde olması uygundur. Aerodinamik fren sistemleri, kanatları rüzgâr akış yönüne ters döndürülmesiyle kanat dönüş hızının yavaşlatılmasına dayanır. Tipik olarak “pitch”

kanat kontrolü hidrolik-yay sistemi veya elektrik sistemle yapılmaktadır [18, 19]. Mekanik fren sistemlerinde türbinin durdurulması esnasında mile uygulanan yükün miktarı, dişli kutusu tasarımında gözönüne alınması gereken ve maliyetini etkileyen önemli faktörlerdendir [20, 21]. Fren diski yüksek hız miline bağlı olup, disk-balata sistemine sahiptir. Güvenli devre dışı kalma (fail-safe) prensibi ile çalışır. Disk ve balata yüzeylerinde yüksek temas basıncı nedeniyle sıcaklıkların 700°C'ye kadar çıktığı bilinmektedir [22]. Otomobil fren sisteminde bu sıcaklık en yüksek 300°C ulaşmaktadır. Dolayısıyla yüksek sıcaklıkta aşınma performansı yüksek fren malzeme seçimi önem kazanmaktadır. Mekanik fren sistemlerinin devre girmesi zaman almakta, bu durum türbin rotor hızının anlık artmasına neden olmakta ve oluşan yüksek titreşimler nedeniyle rotor yataklarında darbeler oluşabilmektedir [23]. Frenleme sisteminin daha kısa sürede devreye girmesinin sağlanması elektromanyetik fren sistemleri ile gerçekleştirilebilir [24].

Bir rüzgâr türbini için en uygun yük taşıyan yapı, üst üste montajlanmış silindirik ve konik plaka yapılardan oluşan kaynaklanmış çelik kuledir [25]. Montaj ve birleştirme bölgelerinde çift taraflı flanş ve kule ile flanşlar arasında tam penetrasyonlu sırt kaynağı yapılmalıdır. Ayrıca, kulenin yüksekliği boyunca belirli aralıklarla iç taraflardan mukavimleştirici halkalar konulmalıdır [26]. Tasarım için göz önünde bulundurulacak yükler arasında yer sarsıntıları ve deprem yükleri de göz önünde bulundurulmalıdır [27].

Kompozit malzemeler, özellikle rüzgâr kulelerinin toplam ağırlığını büyük ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Böylece, hem nakliye hem de kurulum maliyetleri çok büyük ölçüde azalmaktadır. Bu durum az sayıda rüzgâr enerjisi sistemine gereksinim duyan uzak veya kırsal bölgelerde rüzgârdan faydalanabilme imkânı sunmaktadır. Kompozit malzemelerin rüzgâr kulelerinde kullanımı ile nakliye maliyetleri azalmaktadır.

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan önemli elemanlardan bir diğeri güç eviricisidir. Evirici paketi aktif ve reaktif güç kontrol sistemleri ile birbirine kaskad bağlı doğrultucu-evirici grubundan oluşmaktadır. Günümüzde kullanılan güç elektroniği elemanları olarak artan güç sınırları nedeniyle IGBT'ler ("Insulated-Gate Bipolar Transistor": kapısı yalıtımlı bipolar transistör) tercih edilmektedir.

Günümüz modern yüksek güçlü rüzgâr türbinlerinde çoğunlukla senkron ve asenkron generatörler kullanılmaktadır. Bu generatörlere göre kullanılacak güç elektroniği devrelerinin temel kısımları aynı olmakla birlikte yine generatör tipine göre dikkat edilmesi gereken hususlar farklıdır. Bu güç elektroniği devreleri üzerinden yapılacak olan kontrol algoritmalarına gelince bu her generatör için farklıdır ve yeniden tasarlanmalıdır.

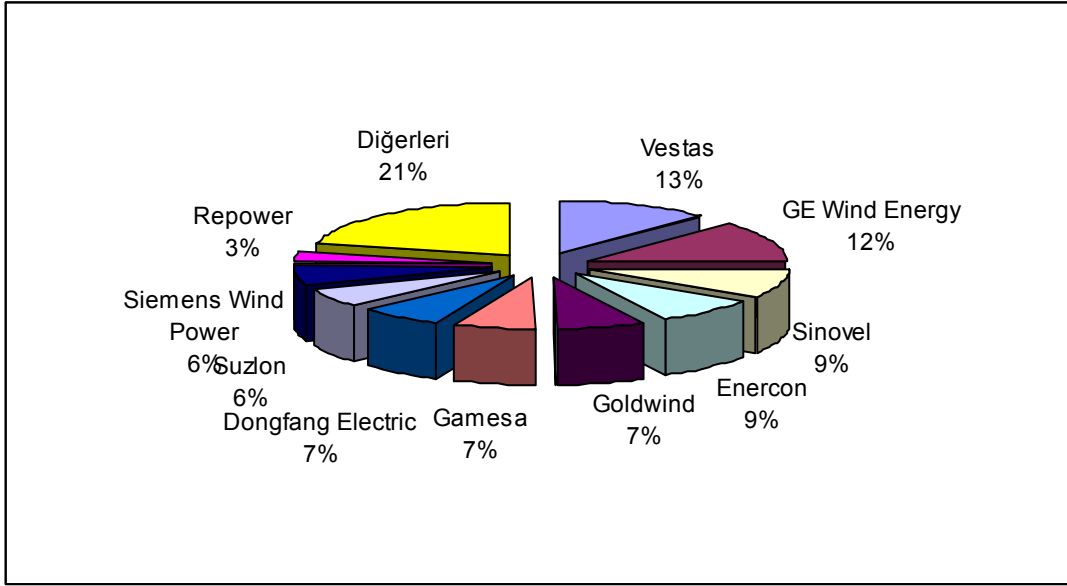
2. RÜZGÂR ENERJİSİ MEVCUT DURUMU

Fosil esaslı yakıt kaynaklarının sınırlı olması ve çevreye verdiği zararlar alternatif enerji kaynaklarını gündeme getirmiş, rüzgâr, jeotermal, güneş ve modern biyokütle enerjisi teknolojileri enerji üretiminde dünya pazarlarında artan oranda yer almaya başlamıştır. Hidrolik enerji dışında yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılmasının beklenen düzeylerde olmamasının sebebi, teknolojik gelişmelerinin yeniliği ve geleneksel kaynaklarla ekonomik açıdan rekabet edebilme güçlükleridir. Enerji Geri Dönüşü (EROI- Energy Return On Investment) ölçütü ile değerlendirildiğinde rüzgârın diğer yenilenebilir kaynaklardan avantajlı olduğu görülmektedir. Bir santralin teknik ömrü boyunca ürettiği enerji miktarının, yapımı ve işletmesi için gerekli birincil enerji kaynağı miktarına bölünmesi ile elde edilen bu oran, rüzgâr santrallerinde 18, hidroelektrik santrallerde 10, kömür santrallerinde 7, nükleer santrallerde 5 olarak belirlenmiştir. Yine diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında, maliyet ve uygulama avantajları nedeniyle rüzgâr enerjisinin kullanımı öne çıkmaktadır. Bu sebeple 1990 yılında 2,160 MW olan dünya rüzgâr kurulu gücü kapasitesi 2008 yılı sonunda 121,188 MW'a ulaşmış, yenilenebilir kaynakları arasında rüzgâr, hidrolik enerjiden sonra ikinci sıraya yerleşmiştir.

2.1 Dünya'da Rüzgâr Enerjisi Pazarı

Rüzgâr enerjisi sektörü 2006 yılında ulaştığı 18 Milyar Euro toplam yeni kurulum değeri ile dünya enerji piyasasının önemli bir oyuncusu olmuştur. En yüksek toplam kurulum potansiyeline sahip ülkeler sırası ile Almanya (20,621 MW), İspanya (11,615 MW), ABD (11,603 MW), Hindistan (6,270 MW) ve Danimarka (3,136MW)'dır. Fransa ve Çin gibi yeni oyuncuların rüzgâr enerjisi pazarına ilgileri hızla artmaktadır. Dünya genelinde 13 ülke 1000 MW ve üzeri kurulum kapasitesine ulaşmıştır [6]. Dünya kurulu rüzgâr gücünü sağlayan türbin üreticileri ve pazar payları aşağıdaki şekilde verilmektedir. Yatırım maliyetlerinin yüksek olması, türbin teknolojilerinin henüz yaygınlaşmaması ve lisans hakları sebebiyle büyük kapasiteli

(1 MW ve üstü) türbin pazarında sınırlı sayıda üretici bulunmaktadır. Rüzgâr türbin pazarının en büyük oyuncuları Vestas, GE, Gamesa ve Enercon firmalarıdır.



Şekil 2.1 : Şekil1: Dünya türbin üreticileri ve pazar payları [54]

Bugün lider konumda olan rüzgâr türbin üreticilerinin çoğu 1970’li yılların sonlarında başlayan rüzgâr enerji teknolojisi araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucunda ortaya çıkmıştır. Ayrıca rüzgâr enerjisi uygulamalarını teşvik eden kararlı ve destekleyici hükümet politikalarının da hem rüzgâr enerjisi için bir pazar yaratılmasında hem de dünya pazarına rüzgâr türbini sağlayan yerli üreticilerin meydana çıkmasında kritik öneme sahip olduğu görülmüştür..

2.2 Rüzgâr Enerjisi Türkiye İç Pazarı

Türkiye’de rüzgâr enerjisi kaynakları teorik olarak şu andaki elektrik tüketiminin tamamını karşılayabilecek yeterliliktedir. Avrupa ülkelerinde rüzgâr enerjisi potansiyeline göre Türkiye’nin teknik potansiyeli 83,000 MW olarak bildirilmiştir. Bu, Türkiye’nin bir an önce kullanması gereken önemli bir rüzgâr enerjisi potansiyeli olduğunu göstermektedir.

Türkiye, AB ülkeleri içerisinde İrlanda ve İngiltere’den sonra üçüncü büyük rüzgâr potansiyeline sahip olan ülkedir. Karasal (on-shore) rüzgâr açısından zengin sayılabilecek bir konumda olan Türkiye’de Balıkesir, Çanakkale, İzmir, Manisa, Hatay illeri rüzgâr potansiyeli açısından başı çekmektedir. Özellikle Marmara, Ege

ve Doğu Akdeniz kıyı bölgeleri rüzgâr enerjisi açısından zengin potansiyele sahiptir. EPDK tarafından lisans verilen projeler bu bölgelerde yoğunlaşmaktadır.

Türkiye’de ilk rüzgâr santrali 1998 yılında Demirer Holding tarafından Çeşme’de yapılmıştır. Yap-İşlet-Devret statüsündeki bu santral 1.5 MW’lık kurulu gücü ve %35’lik kapasite faktörü ile yılda 4.5 milyon kWh elektrik üretmektedir. Bu santrali takiben aynı yıllarda Alaçatı’da ARES rüzgâr enerjisi santrali kurulmuştur. 12 adet 600 kW’lık toplam 7.2 MW kurulu güçteki türbinlerle yılda yaklaşık 22 milyon kWh elektrik üretilmektedir. 2000 yılı itibarı ile Yap-İşlet-Devret modeliyle Çanakkale Bozcaada’da 17 adet 600 kW’lık toplam 10.2 MW kurulu gücü ile yılda yaklaşık 35.5 milyon kWh elektrik üretimi yapan rüzgâr enerjisi santrali devreye alınmıştır. Yine bu dönemlerde otoprodüktör statüsündeki Hadımköy’de Sunjüt Otoprodüktör santrali devreye girmiştir. 2006 yılında ise Balıkesir’de 30 MW’lık BARES santrali devreye alınmıştır.

Türkiye’de 2008 yılı sonu itibarıyla 433.35 MW rüzgâr santrali şebekeye bağlı olarak enerji üretmekte, toplam kurulu gücü 402 MW olan rüzgâr santrali de inşa halindedir. Bunların yanı sıra EPDK tarafından lisanslanmış olan toplam 667 MW’lık rüzgâr santrali projesinin de türbin tedarik sözleşmeleri imzalanmıştır [8]. Ayrıca 71,028 MW’lık lisans başvurusu da EPDK tarafından inceleme ve değerlendirme altına alınmıştır.

Türkiye’de mevcut en yaygın türbin gücü 800 kW’tır. İkinci olarak en çok kullanılan türbin gücü 2.5 MW’tır. Rüzgâr türbini teknolojisinde geline teknolojik durumun da etkisiyle, talebin 2.5 MW ve üzeri kapasitelere yoğunlaşacağı beklenmektedir.

Rüzgâr enerjisine talep özellikle 1990 yıllardan sonra hızlı bir artış göstermiştir. Aynı senelerde Türkiye henüz daha rüzgâr enerjisi ile tanışmamış nadir ülkelerden biri durumunda iken 2007 yılında ise adeta bir rüzgâra hücum yaşanmıştır. Çok sayıda yabancı şirket kendi ülkelerinde karbon vergisinden yararlanabilmek için yerli ortaklıklar kurmuştur.

2.3 Dünyada Büyük Rüzgâr Türbinleri Üretimi

Rüzgâr enerjisi pazarında 2007 yılında küresel kurulu güç %25.9 artış göstermiştir. En büyük artış %43.5 ile Avrupa’da yaşanmıştır. Sisteme 8,328 MW kurulu güç

ilave edilmiştir. Yenilenebilir enerji sektöründe talep, üretim kapasitesinden daha yüksektir. Bu durum rüzgâr türbin talepleri karşısında teslimatların 2-3 seneyi bulmasına sebep olmaktadır.

Avrupa ülkelerinin rüzgâr enerjisi konusunda ilgilendikleri bir başka konu ise deniz üstünde kurulan rüzgâr türbinleridir. Bol, sürekli ve yeterli şiddette esen rüzgârlar kıyı ötesi (off-shore) türbin işletimlerini cazip hale getirmiştir. İngiltere’de 90 MW ve 10 MW, İsveç’te 110 MW gücünde kıyı ötesi rüzgâr tarlaları şebekeye bağlanmıştır. Böylece kıyı ötesi üretim kapasitesi 1,122 MW olmuştur. İspanya rüzgâr enerji pazarında 3,515 MW kapasite ile Avrupa’da ikinci durumundadır.

Artan doğal gaz ve petrol fiyatları, rüzgâr enerjisini teşvik bu teknolojinin olağan dışı bir gelişme göstermesi ile sonuçlanmıştır. İtalya’da uygulanan yeşil sertifika, diğer AB ülkelerine paralel olarak, 2007 yılında bu ülkeye 633.3 MW yeni kapasite kazandırmıştır. Böylece toplam rüzgâr kurulu gücü 27726.1 MW’ta yükselmiştir. Avrupadaki rüzgâr türbinlerinin ortalama gücü yaklaşık 2 MW civarındadır. 2020 yılına kadar 2,000 MW kıyı ötesi olmak üzere 12,000 MW rüzgâr türbini kurmayı planlamaktadırlar. Gerçekleştiği takdirde tüketimin %15’i yenilenebilir enerjilerden karşılanıyor olacaktır. Buna rağmen bu AB ortalama hedefinin altında bir orandır. Genel gidişe uygun olarak İspanya’da da türbin güçleri 2007’de 1.56MW’a yükseltilmiştir.

2011 senesinde Almanya toplam enerjisinin %27’sini yenilenebilir kaynaklardan sağlamayı planlamaktadır. Geçte olsa İngiltere de rüzgâr enerjisi kervanına katılmıştır. 2020 yılına kadar 7000 adet rüzgâr türbini devreye alma kararı almıştır. Planlanan 8 GW kurulu kıyı ötesi güce ilaveten 25 GW güç kurma lisansı vermiştir.

İngiltere’de 2007’de üretilen türbinlerin ortalama gücü 2 MW’dır. Esasında güç, bölgenin meteorolojik şartlarına, ortalama rüzgâr hızına bağlı olarak planlanır. Fakat daha yüksek ortamda daha sürekli ve fazla rüzgâr enerjisi oluşu ve aynı lisans alanından daha fazla enerji üretmeyi mümkün kılması gibi nedenlerle türbin boyutları sürekli artmaktadır.

Rüzgâr türbinlerinin cirosu 2006 yılına kadar, yeterli inceleme yapılmadığından bilinmemekteydi. Ancak EWEA (“European Wind Energy Association” Avrupa Rüzgâr Enerji Derneği) 2006’da yaptığı ayrıntılı çalışma ile toplam cironun yaklaşık 9 Milyar Euro olduğunu hesaplamıştır. Dolayısıyla Avrupa’da üretilen türbinlerin

ortalama fiyatı 1.2 Milyon Euro'dur. Aynı parametreler 2007 yılına uzatılacak olursa cironun 10 Milyar Euro olduğu bulunur. Çinliler Avrupalı şirketlerden (Repowers, Fuhrlander, Venseys, Dewind) lisans satın alarak kendi türbinlerini kendileri üretme yoluna gitmişlerdir. Sermayesi devlete ait küçük büyük Çin şirketleri (Sinvel, Goldwind, Mingyang) 1.5 MW gücünde türbin üreterek işletmeye almıştır. Çin sadece kendi gereksinimi için değil, talebe uygun 3-5 MW gücünde türbinler üreterek dünya pazarlarına sunmayı tasarlamaktadır.

Rüzgâr türbini piyasasına Çinli aktörlerin girişi, Avrupalı türbin sanayicilerini daha ileri teknoloji gerektiren kıyı ötesi türbin üretimine yöneltmiştir. Kıyıda kimi zaman 50 km uzaklıkta kurulması tasarlanan tesislerin, rüzgâr hızı yüksek olduğundan türbin güçlerinin yüksek olması istenen bir durumdur.

Çizelge 2.1'de ana rüzgâr türbin üreticileri ve bu üreticilerin tedarikçileri verilmiştir. Tablodan da görüleceği gibi kuleler, nakliye ve maliyet sorunlarından ötürü projelerin yer aldığı yerli piyasada imal edilmektedir.

Çizelge 2.1 : Ana Türbin Üreticileri ve Tedarikçileri

Türbin Üreticisi	Rotor kanatları	Dişli Kutuları	Generatörler	Kuleler	Kontrol Üniteleri
Vestas	Vestas, LM	Bosch, Rexroth, Hansen, Winenergy, Moventas	Weier, Elin, ABB, LeroySomer	Vestas, NEG, DMI	Cotas (Vestas), NEG (Dancontrol)
GE Energy	LM, Tecsis	Winenergy, Bosch, Rexroth, Eickof, GE	Loher, GE	DMI, Omnical	GE
Gamesa	Gamesa, LM	Echesa (Gamesa), Winenergy, Hansen	Indaar (Gamesa), Cantarey	Gamesa	Ingelectric (Gamesa)
Enercon	Enercon	Doğrudan sürücülü	Enercon	KWG, SAM	Enercon
Siemens Wind	Siemens, LM	Winenergy	ABB	Roug, SAM	Siemens, KK Electronic
Suzlon	Suzlon	Hansen, Winenergy	Suzlon	Suzlon	Suzlon, Mita Teknik
REpower	LM	Winenergy, Renk Eickhoff	N/A	N/A	Mita Teknik, Re Guard
Nordex	Nordex	Winenergy, Eickhoff, Maag	Loher	Nordex, Omnical	Nordex. Mita Teknik

Vestas 2009 yılı itibariyle, pazar payı %12.5 olan küresel rekabet gücüne sahip en büyük türbin üreticisidir. Danimarka, İsveç, Norveç, Almanya, Hindistan, İspanya,

İtalya, İskoçya, İngiltere ve ABD gibi ülkelerde üretim birimleri vardır. 2007 yılında 13000 türbin üretmeyi başarmıştır. Gelişmesi önündeki en büyük engel, yeterli sayıda ve kalitede parça üretiminde karşılaştıkları zorluklardır.

Vestas teknolojisi yüksek mukavemetli kompozit (prepreg) ve kabin sistemindeki geliştirilen teknoloji ile türbinin hafifliği üzerine kurulmuştur. Vestas'ın Hatay'da 30 MW, Manisa'da 10.8 MW, Silivri'de 850 kW ve Çeşme'de 7.2 MW'lık türbinlerinin kurulu olduğu rüzgâr enerji santralleri bulunmakta.

2.4 Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli

Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli bakımından küresel ölçekte ilk sıralarda yer alan bir ülkedir. Yerleşim alanları dışında 10 m yükseklikteki rüzgâr hızı yıllık ortalaması, Ege ve diğer kıyı bölgelerinde 4.5- 5.5 m/s, iç kesimlerde ise 3.4- 4.6 m/s arasındadır. 10 m yükseklikte yıllık ortalama rüzgâr hızı 4-5 m/s olan bölgelerde, 50-60 m yükseklikteki güç yoğunluğu ise 500 W/m² değerini aşar.

Rüzgâr enerjisinin kullanılması ülkemiz açısından önemli olduğundan, değişik yörelerimizdeki rüzgâr enerjisi potansiyellerinin belirlenmesi için çeşitli kurum ve kuruluşlar tarafından çalışmalar yapılmıştır ve halen de yapılmaktadır. Devlet Meteoroloji İşleri (DMİ) Genel Müdürlüğü, uzun süreden beri klimatolojik rüzgâr verileri toplamaktadır. EİEİ ise, rüzgâr enerjisi alanında Ar-Ge projeleri sürdürmek amacıyla, 1983 yılında bir çalışma başlatmıştır. İlk adım olarak DMİ Genel Müdürlüğü'ne ait istasyonların 1970-1980 yılları arasındaki aylık rüzgâr hızı ve yönüne ait 10 yıllık veriler analiz edilmiş ve ülke genelindeki doğal rüzgâr dağılımı “Türkiye Rüzgâr Enerjisi Doğal Potansiyeli” adı altında yayımlanmıştır [28]. REPA (Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası), küresel atmosferik sirkülasyon modeli, orta-ölçekli sayısal hava analiz modeli ve mikro ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılarak üretilen rüzgâr kaynak bilgilerinin verildiği rüzgâr enerjisi potansiyel atlasıdır. Bu atlas yardımıyla Türkiye genelinde çeşitli yüksekliklerdeki rüzgâr hızı, rüzgâr güç yoğunlukları gibi değerler elde edilebilir.

REPA ile denizlerimizde, kıyılarımızda ve yüksek rakımlı bölgelerimizde daha önce ölçülemeyen yüksek yoğunluklu potansiyeller görünür hale gelmiştir. Rüzgâr santrali kurulabilecek alanların belirlenebilmesi için rüzgâr kaynak bilgileri

ile topografya, akarsular, göller, yerleşim bölgeleri gibi tematik haritalar Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile entegre edilmiştir [29].

2.5 Türkiye’de Mevcut Rüzgâr Türbini Üretim Altyapısı

600-900 kW’lık Enercon türbinlerinin kanatları Enercon-Demirer ortak girişimi olarak İzmir’de kurulan Enercon Aero Rüzgâr Endüstrisi A.Ş bünyesindeki rüzgâr türbin kanat fabrikası tarafından üretilmektedir. Söz konusu fabrikada, Enercon 2 MW’lık türbin kanatları üretimine başlamıştır. Enercon ve GE rüzgâr türbinlerinin kuleleri Bursa’nın Gemlik ilçesinde kurulmuş Çimtaş Boru İmalatları ve Ticaret Ltd. Şti fabrikasında üretilmektedir. Enercon Servis Ltd. Şti Enercon türbinlerine montaj ve bakım hizmetleri vermek üzere 1999 yılında kurulmuş olup Bores-Bozcaada, Sunjüt-Hadımköy, Mare -Çeşme, Anemon- İntepe Doğal A.Ş.-Burgaz ve Sayalar, Lodos A.Ş-Kemberburgaz ve Dares-Datça santrallerinin kuruluşunda aktif rol almıştır. Alize A.Ş de Çeşme ve yukarıda adı geçen santrallere planlı bakım, arıza giderme ve teknik gözetim hizmetleri vermektedir.

Bunlardan başka rüzgâr ölçümü ve değerlendirilmesi, proje geliştirilmesi, danışmanlık, lisans ve gerekli izinlerin alınması, kamulaştırma, kredi temini, montaj, nakliye, inşaat, ara malzemelerin temini gibi işler için bazı yerli veya ortak girişim şirketleri kurulmuştur. Ancak türbin, generatör, göbek (hub), dişli kutusu gibi teknoloji ve bilgi birikimi gerektiren bileşenleri hala yurt dışından sağlanmakta olup bunlar toplam maliyetlerin önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

Ayrıca rüzgâr ölçüm sistemlerinin kalibrasyonu, verilerinin akreditasyonu ve proje uygunluğu kontrolü (due diligence) konusunda akredite olmuş Türk şirketi veya üniversitesi bulunmamaktadır.

1 Kasım 2007 tarihinde yapılan başvuruların yoğunluğu bazı üreticileri küçük ve büyük ölçekli rüzgâr türbinleri başta olmak üzere, kule ve kanatların yerli üretimi konusunda cesaretlendirmiştir. Bunlar arasında Model Enerji Türkiye’de megawatt sınıfında (1.65 MW) rüzgâr türbinlerini üretmek üzere kurulmuş ilk yerli şirkettir. Model Enerji American Superconductor (AMSC) firmasının bir yan kuruluşu olan Windtec’in rüzgâr enerjisi konusundaki “know-how” ve deneyimlerinden yararlanmaktadır.

Yine Alkeg Enerji İzmir’de yer alan fabrikasında kanat ve elik kule imalatı yapmaktadır. Şirket rüzgâr çiftliğı yatırımlarında, tesisin türbin dışında kalan kanat, kule, inşaat altyapısı, elektrik altyapısı, türbin montajları ve bakımları için yatırımcılara komple çözüm paketi sunmaktadır. Japon Fuji Heavy Industries firmasına kanat üretimi yapmaktadır.

Yapı ve Kredi Bankası, Garanti Bankası, Türkiye Sinai Kalkınma Bankası (Dünya Bankası (IBRD) ve Fransız Geliőim Ajansı (AFD) ile birlikte), vb. yerli ve yabancı kredi kuruluşları rüzgâr enerjisi projelerine kredi sağılamaya başlamıştır.

Hem dünyada hem de Türkiye’de rüzgâr enerjisi tesisleri için talep türbin üreticilerinin kapasitesini aşacak şekilde hızla büyümektedir. Türkiye’de kurulan mevcut santrallerin hepsi ithal sistemler olup MW başına yaklaşık 1 milyon Euro para yurt dışına akmaktadır. Türkiye’de lisanslı parça ve türbin üretimi başlamıő olsa da bunlar dünyada ve Avrupa’da terk edilmeye başlayan küçük kapasiteli sistemlerdir (Avrupa’da mevcut türbin sipariőleri 2.5 MW ve üzeri yönünde iken őuanda Avrupalı üreticiler tarafından Türkiye’deki ortaklarına verilen türbin üretim lisansı 1.65 MW kapasite türbin üretim tesisi kurulması içindir).

3. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖRLER

Rüzgâr enerjisi tesislerinde kullanılan generatörler, alternatif akım veya doğru akım generatörleri olabilir. Burada elde edilen elektrik akımı, yetersiz kalitede alternatif akım veya doğru akım bile olsa, çeşitli güç elektroniği düzenekleriyle şebekeye uygun hale getirilebilir. Doğru akım generatörleri, büyük güçlü rüzgâr enerjisi tesislerinde tercih edilmemektedir. Bunun nedeni, sık bakım gereksinimi ve alternatif akım generatörlerine göre daha pahalı olmasıdır. Doğru akım generatörleri, günümüzde sadece küçük güçlü rüzgâr enerji tesislerinde akülere enerji depolamak için kullanılır [30]. Doğrudan şebekeye bağlı büyük sistemlerde genel olarak asenkron veya senkron generatörler kullanılmaktadır.

3.1 Asenkron Generatörler

Son yıllarda asenkron generatörler enerji üretim sektöründe özellikle rüzgâr türbinlerinde sıkça kullanılmaktadır. Asenkron makinenin generatör çalışmasında makinenin güç kaynağı rotordan uygulanan mekanik güçtür. Asenkron generatörün statorunda fiziksel olarak yayılmış üç faz sargı bulunmaktadır. Bu sargılar üzerindeki akım akışından dolayı hava aralığında dönen bir manyetik alan oluşur ve rotor sargıları üzerinde gerilim endükleyerek rotor sarımlarından akım akmasını sağlar. Rotor akımı ile hava aralığı akısı arasındaki etkileşim moment oluşturur. Rotor sargıları üzerinde gerilim endükleyebilmek için stator döner alanı ile rotor döner alan hızları arasında fark olması gereklidir. Stator ile rotor döner alan hızları arasındaki bu farka kayma denir. Kayma aşağıdaki eşitlikle ifade edilir **(3.1)**.

$$s = \frac{(n_s - n)}{n_s}$$
$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (3.1)$$

Burada “s” kayma, “ n_s ” makinenin senkron hızı, “f” frekans, “p” kutup çifti ve “n” ise rotorun dönme hızıdır [31].

Eğer rotor bir rüzgâr türbinine bağlanıp ve senkron hızdan daha yüksek bir hızda döndürülürse, rotorda endüklenen akım ve momentin yönü motor çalışma durumuna göre ters yönde olur. Bu durumda makine generatör olarak çalışır. Türbinin mekanik gücünü elektrik gücüne çevirir ve stator uçlarına bağlı yükü besler. Eğer makine şebekeye paralel olarak çalışıyor ise şebekeye güç verecektir. Yani makinenin generatör olarak çalışabilmesi için senkron hızdan daha yüksek bir hızda döndürülmesi gerekir. Asenkron makinelerde stator ile rotor arasında elektriksel bir bağlantı olmayıp, tamamen elektromanyetik endüksiyon prensibine göre çalışır [30].

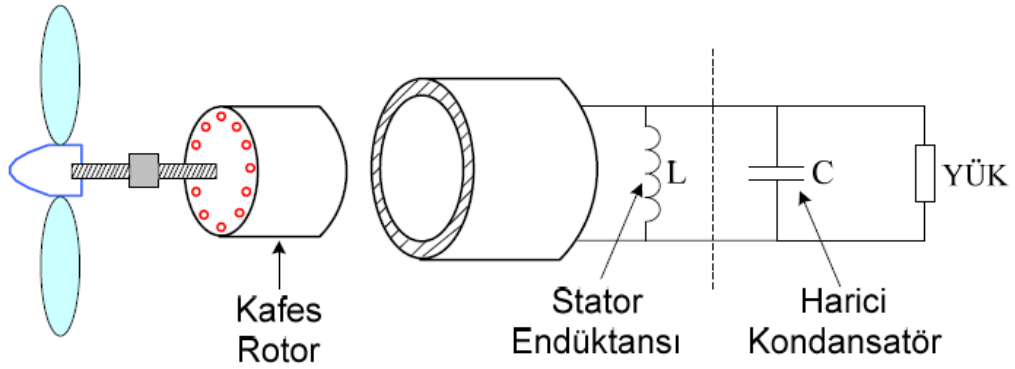
Asenkron makinenin motor çalışmasında devir sayısı senkron hızın altında olduğu için, kayma 0-1 arasında pozitif bir değer alır. Ancak rotor hızı senkron hızın üzerine çıkarsa, kayma negatif değer alır ve makine generatör çalışır. Makine senkron hızın üstüne kendiliğinden çıkamaz, ancak başka bir makine yardımıyla çıkartılır. Bu işlemle, asenkron motordan, asenkron generatör çalışmaya geçilmiş olur ve asenkron makineye verilen mekanik enerji, elektrik enerjisine çevrilir.

Makine mıknatıslanması için gerek duyduğu reaktif gücü mutlaka bir kaynaktan edinmek zorundadır. O kaynak, asenkron generatörün paralel bağlı olduğu bir şebeke olabilir. Bu durumda asenkron generatör mıknatıslanmak için, gereken reaktif gücü şebekeden çeker, şebekeye aktif güç verir. Asenkron makinelerin mıknatıslanma akımları, transformatörlere ve senkron makinelere göre daha yüksektir, bu durum asenkron generatörün güç faktörünün düşmesine ve çıkış geriliminin azalmasına neden olur [31].

Şebekeye bağlı çalışmada gerekli olan reaktif güç şebekeden çekilmektedir. Eğer asenkron generatör şebekeye paralel bağlanmadan, tek başına bir yük grubunu beslemek durumunda kalırsa, çalışma koşulları tamamen değişir. Şebeke olmadığı için, mıknatıslanma akımını çekecek kaynak yoktur, ancak mutlaka temin edilmelidir. Bu nedenle, asenkron makineye endüktif güç verebilecek kaynak bulmak gerekir. Bu kaynak ise bir kondansatör grubudur. Bu grup makinenin hemen yanına yerleştirilir ve asenkron makineye gereken reaktif mıknatıslanma akımını verir [31].

Buradaki temel mantık stator uyarma sargısının sahip olduğu endüktans ile ilave edilen harici kondansatör arasında rezonans durumu oluşturmaya dayanır. Buradaki

osilasyon frekansı harici kondansatör boyutuna bağlıdır. Buradaki kondansatör tek yönlü olarak rüzgâr türbin hızını kontrol imkânı verir [30].



Şekil 3.1 : Kendinden uyardımlı asenkron generatör [30]

Asenkron generatörler aşağıdaki gibi sıralanabilirler.

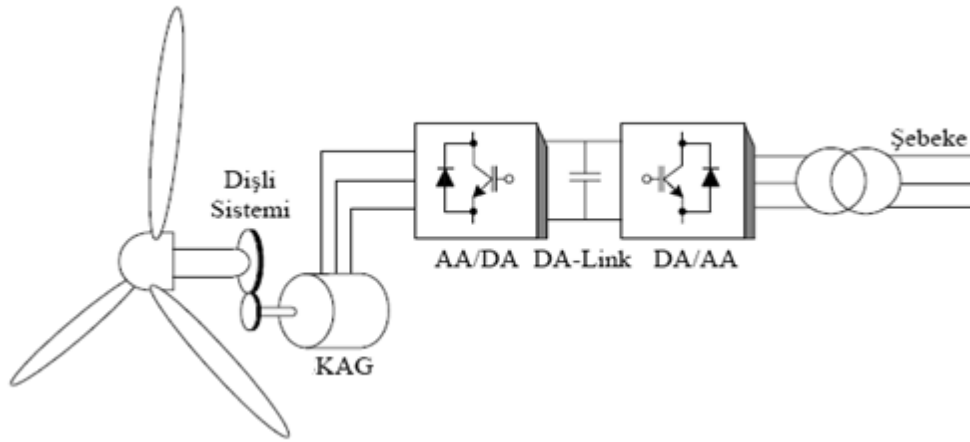
- Kafesli Asenkron Generatör (KAG)
- Rotoru Sargılı Asenkron Generatör (RSAG)
 - Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG)
 - OptiSlip® Generatör (OSG)

3.1.1 Kafesli asenkron generatörler (KAG)

Kafesli asenkron generatörlerin rotorlarında sarım bulunmaz, bunun yerine rotor oluklarına boydan boya yerleştirilmiş ve uçları kısa devre edilmiş alüminyum yada bakır çubuklar bulunur. Rotor iletkenleri kafes benzeri bir yapı oluşturduğundan bu makinelere kafesli denilmiştir.

Kafesli asenkron makine bir AA (Alternatif Akım) sisteme doğrudan bağlanıp sabit hızda işletilebileceği gibi güç elektroniği üniteleri ile birlikte değişken hızlarda da işletilebilir. Manyetik gürültüleri azaltmak ve iyi kalkış momenti elde etmek için rotor olukları mile paralel olarak değil meyilli olarak açılarak (skew) pres alüminyum döküm rotor sargısı elde edilir [32]. Kafesli asenkron makineler, fırçasız, güvenilir, ekonomik ve sağlam bir yapıya sahip olmaları nedeniyle uygulamada sıkça kullanılmaktadırlar. Kayma, dolayısıyla rotor hızı, üretilen gücün miktarıyla değişir. Rotor hızındaki değişimler %1-2 civarındadır. Bu yüzden, bu tip, rüzgâr hızının sabit olduğu zamanlarda avantajlıdır. Rüzgâr hızı değişken olduğu durumlarda şebekeye uygun gerilim elde edebilmek için generatör güç elektroniği devreleriyle şebekeye

bağlanmaktadır. Aşağıdaki şekilde kafesli asenkron generatörün şebeke bağlantısı görülmektedir.



Şekil 3.2 : Rüzgâr türbinine bağlı KAG'ün şebekeye bağlantısı

Bu sistemde stator sargısı, DA (Doğru Akım) barasının iki tarafına sırt sırta (back-to-back) bağlı gerilim kaynaklı iki DGM (Darbe Genişlik Modülasyonu) eviriciden meydana gelen, dört bölgeli güç dönüştürücüsü üzerinden şebekeye bağlanır. Stator tarafındaki evirici kontrol sistemi, elektromanyetik momenti ayarlar ve makinenin manyetik alan üretebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki evirici, sistemden şebekeye aktarılan aktif ve reaktif gücü ve aynı zamanda DA barasını sabit tutar [33]. Rüzgâr güç sistemlerinde kullanılan KAG'nin sağladığı avantajlar; fırçasız, güvenilir, ekonomik ve sağlam bir yapıya sahip olmaları nedeniyle uygulamada sıkça kullanılmaktadırlar. Doğrultucu, generatör için programlanabilir bir uyarım oluşturabilmektedir. Evirici, harmonik azaltıcı olarak çalıştırılabilmektedir.

Dezavantajları; generatör parametrelerinin sıcaklık ve frekansla değişerek sistemin kontrolünü karmaşıktırmasıdır. Moment-hız eğrisi doğrusaldır. Böylece rüzgâr gücündeki dalgalanmalar doğrudan şebekeye iletilir. Bu geçişler özellikle rüzgâr türbininin şebeke bağlantısı sırasında kritiktir. Bu noktalarda anma akımından 7-8 kat daha hızlı akım geçişi olur ki bu sistemin dezavantajları arasında yer alır [34]. Ayrıca kafesli asenkron generatör reaktif güç tüketir. Birçok durumda, özellikle büyük türbinlerde ve zayıf şebekelerde bu istenmeyen bir durumdur. Bu yüzden kafesli asenkron generatörün reaktif güç tüketimi hemen her zaman kısmen ya da tamamen güç faktörünü bire yaklaştırmak için kullanılan kondansatörlerle kompanze edilir.

3.1.2 Rotoru sargılı asenkron generatörler (RSAG)

Rotoru sargılı asenkron generatörler bilezikli asenkron generatör olarak adlandırılmaktadır. Rotoru sargılı asenkron generatörler yapı olarak kafesli asenkron generatörlerle benzerdir. Stator yapıları aynıdır. Ancak bilezikli asenkron generatörün rotorunda iletken çubuklar yerine bakır sarımlar bulunur. Bu sarımların uçları bilezik fırça düzenekleri ile makinenin dışına alınır. Böylelikle generatörün rotor sargı direncine müdahale edilebilir, rotorun elektriksel özellikleri dışarıdan kontrol edilebilir ve böylece rotor gerilimi değiştirilebilir. Rotor sargı uçları rotorla beraber dönen bileziklere bağlıdır. Bilezikler üzerinde sabit duran fırçalar yardımı ile, rotor sargıları üç fazlı bir yol verici direncine ya da dış kaynağa bağlanabilir. Böylece yol alma akımı sınırlandırıldığı gibi hız ayarı da yapılabilir [35, 36].

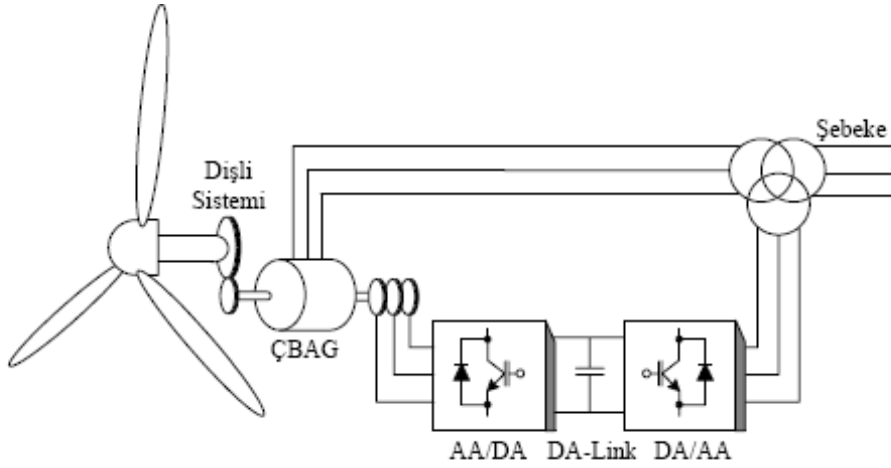
Asenkron makinenin “ T ” eşdeğer devre kullanılarak elde edilen moment bağıntısı aşağıdaki gibidir.

$$M = \frac{pm_1}{2\pi f} \frac{R_2'}{s} \frac{(E_{20}')^2}{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (x_{2\sigma}')^2} \quad (3.2)$$

Burada momentin kayma “ s ” ve şebeke frekansı “ f ” ile ters orantılı, fakat faz sayısı “ m_1 ”, kutup çifti sayısı “ p ”, rotor direnci “ R_2' ” ve endüklenen gerilimin “ E_{20}' ” karesi ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Böylece rotor direnci değiştirilerek moment ve hız değerleri değiştirilebilir.

3.1.2.1 Çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG)

Rotoru sargılı asenkron generatörlerin rotor sargı uçlarına direnç yerine bir konvertör bağlanması ile elde edilen rüzgâr generatörlerine ÇBAG (Doubly Fed Asynchronous Generator) denilmektedir. Bu tip generatörlere çift beslemeli (doubly fed) diye söylenmesinin nedeni, stator gerilimini şebekeden alırken rotora uyarım gerilimi güç çeviricisi ile yapıldığı içindir. Çift beslemeli asenkron generatör stator sargıları direkt olarak sabit frekanslı üç fazlı şebekeye bağlı bir rotoru sargılı asenkron generatör ile rotor sargılarına monte edilmiş iki yönlü IGBT eviriciden meydana gelmiştir [32].



Şekil 3.3 : ÇBAG’lerin rüzgâr türbinine ve şebekeye bağlantısı

ÇBAG’de rotor tarafı eviricisi ve şebeke tarafı eviricisi olmak üzere iki çevirici bulunur. Genellikle, rotor tarafındaki evirici kontrol sistemi, elektromanyetik momenti kontrol eder ve generatörün manyetizasyonunun sürdürebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki evirici ise, DA barasını kontrol eder. Eğer generatör senkron hızın altında çalışırsa, şebekeden rotora bilezikler aracılığıyla elektriksel güç verilir. Böylelikle generatörün senkron hızı geçmesi sağlanır. Zaten bir asenkron makinenin generatör olarak çalışabilmesi için rotor hızının senkron hızın üstüne çıkması gerekmektedir. Senkron hıza $\pm \%30$ yakın aralıklı olacak şekilde, rotor hız ayarı sağlanır. Eğer senkron hızın üstünde ise bu sefer şebekeye elektrik enerjisi verir.

ÇBAG’ün avantajları; sürekli değişen rüzgâr hızı uygulamalarına imkan sağlar. Rüzgârdan alınan enerji daha fazladır. Eviriciler sayesinde ayrıca reaktif güç kontrolüne ihtiyacı yoktur. Sadece rotorun kayma gücünü kontrol etmeye yarayan çevirici sistemine sahip olduğu için, toplam sistem gücünün yaklaşık $\%25$ ’i oranında bir evirici kullanılmaktadır. Bu da evirici maliyetini azaltır. “Off-shore” olarak isimlendirilen açık deniz rüzgâr santrali uygulamaları gibi büyük güç sistemleri için uygundur.

ÇBAG’nin en büyük dezavantajı ise bilezik tertibatının düzenli bakıma olan ihtiyacıdır. Ayrıca diğer sistemlerden biraz daha pahalıdır [37, 34].

3.1.2.2 OptiSlip® generatör (OSG)

OSG, rüzgârın ani ve sert esmesi sırasında rüzgâr türbinindeki yükleri çok hızlı güç elektroniği elemanları kullanarak minimuma indirmek için Danimarka’lı şirket

Vestas® tarafından geliştirilmiştir. Optislip® generatör rotoru sargılı asenkron generatör ile mile yerleştirilmiş ayarlanabilir harici rotor dirençlerinden oluşur. Herhangi bir bileziğe ihtiyacı yoktur. Generatörün kayması, rotor miline bağlı bir çevirici aracılığıyla toplam rotor direncinin düzenlenmesi ile değiştirilir. Bu değişim rüzgâr hızına ve yüke bağlı olarak elektronik devre ile %1 ile %10 arasında değişmektedir. Böylelikle ani rüzgâr artışlarında mekanik yükler ve güç dalgalanmalarının azaltılması hedeflenmiştir. Dezavantajı ise reaktif güç kontrolünün yetersiz olmasıdır [32, 39, 40].

3.2 Senkron Generatörler

Senkron generatörler isminden de anlaşılacağı gibi rotor hızı ile hava aralığı manyetik alanının aynı hızda döndüğü makinelerdir. Stator yapısı asenkron generatörlerle benzer üç fazlı sargıdır. Asenkron makinelerden farklı olarak uyarma, hava aralığı döner alanından bağımsız olarak oluşturulur. Rotorda, uyarma alanının oluşturulduğu kutuplar yer almaktadır. Uyarma manyetik alanı uyarma sargıları ile yapılabileceği gibi sürekli mıknatıs kullanılarakta yapılmaktadır. Senkron generatörler uyarma şekillerine göre iki sınıfta incelenebilirler.

- Alan sargılı senkron generatörler (ASSG)
- Sürekli mıknatıslı senkron generatörler (SMSG)

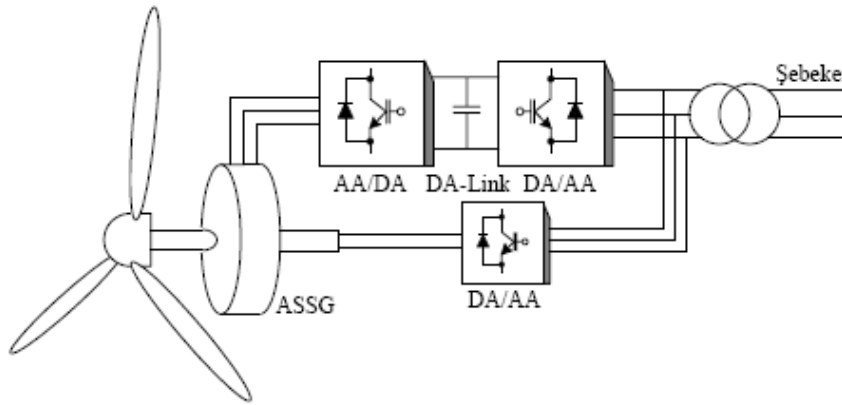
Değişken hız - sabit frekans uygulamalarında çıkışında kullanılan güç elektroniği dönüştürücüsünün generatör anma gücünde olması sistem maliyetini artırır. Bu nedenle dişli kutulu değişken hız - sabit frekans uygulamalarında çift beslemeli asenkron generatörler daha çok tercih edilir [41, 42].

3.2.1 Alan sargılı senkron generatörler (ASSG)

Bu tür generatörlerin rotorlarında manyetik alanı sağlaması için uyarma sargıları bulunur. Böylece manyetik alan, kutup sargısının bulunduğu, makinenin hareketli parçası olan rotorda üretilir. Kutup sargısı doğru akımla beslenerek hava aralığında zamana göre değişmeyen, genliği sabit olan "doğru manyetik alan" meydana getirir. Bu manyetik alan, rotorun döndürülmesi ile statora yerleştirilmiş sargının düzlemlerinden değişik açılarda geçer ve gerilim endükler. Bu sargıda alternatif gerilim endüklenir. Gerilimin alternatif olmasının nedeni, sargı düzlemlerinden

geçen manyetik akının düzleme dik olan normal eksenini ile yaptığı açının değişmesidir [43].

ASSG şebekeye bağlantısında, stator sargısı DGM ile anahtarlama yapabilen çift yönlü çalışan sırt sırta bağlı iki eviriciden meydana gelmiş, dört bölgeli bir güç çeviricisi kullanılır. Uyarma sargısı ise kontrol edilebilir bir AA/DA çeviricisi ile şebekeye bağlanır. Şekil 3.4’de şebeke bağlantısı görülmektedir. Stator tarafındaki evirici elektromanyetik momenti, şebeke tarafındaki evirici ise bu sistemin oluşturduğu aktif ve reaktif gücü kontrol eder [44].



Şekil 3.4 : Değişken hızlı alan sargılı senkron generatör

ASSG’nin sağladığı avantajlar; makinenin güç faktörü doğrudan kontrol edilebilirdir. Bunun sonucu olarak, stator akımı bir çok işletim durumunda minimize edilebilir. Bu generatörlerin kutbu asenkron makinelerle göre daha küçük olabilir. Bu durumda dişli kutusu kaldırılarak, düşük hızlı çok kutuplu makineler elde edilebilir.

Rotorda sargı devresinin bulunması sürekli mıknatıslı senkron generatör (SMSG) ile kıyaslandığında bir dezavantajdır. Ayrıca üretilen aktif ve reaktif gücü kontrol etmek için, anma rüzgâr gücünün 1.2 katı büyüklüğünde çevirici kullanılması gerekmektedir.

3.2.2 Sürekli mıknatıslı senkron generatörler (SMSG)

Statoru uyarma sargıları yerine sürekli mıknatısların kullanıldığı generatörlerdir. Statoru sargılıdır ve rotoruna daimi mıknatıslar yerleştirilmiştir. SMSG’ler herhangi bir enerji kaynağına gerek duymadan kendinden uyarımlı olması nedeniyle rüzgâr türbini uygulamalarında önerilmektedir. En büyük artısı herhangi bir hızda güç üretebilmesidir. Bakım maliyeti düşüktür. Küçük ve hafif uygulamalar için

uygundur. Bu generatörlerde kutuplar sürekli mıknatıslarla yapıldığı için çok kutuplu yapılmaya uygundur. Düşük hızlarda da çalışabilmektedir. Böylelikle herhangi bir dişli kutusuna gerek kalmadan doğrudan rüzgâr türbinine bağlanabilmektedirler, ancak dişli sistemi ile birlikte kullanılan modelleri de mevcuttur. Çok yaygın kullanılan tipleri radyal akılı, eksenel (axial) akılı ve çapraz akılı olanlardır [45].

SMSG'lerin avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibi sayılabilir.

SMSG'lerin avantajları;

- DA uyartım sargıları, bilezik ve fırça sistemleri gerekmez.
- Günümüzde sürekli mıknatıs teknolojisindeki gelişmeler sonucunda ASSG'den daha kolay ve daha ucuz çok kutuplu senkron generatör üretilmektedir.
- Etkin malzeme kullanımı aynı güçteki ASSG'ye göre daha az olduğundan daha hafiftir.

SMSG'lerin dezavantajları;

- Uyartım alanı ve dolayısıyla güç katsayısı denetlenemediğinden sabit hızlı, generatörün şebekeye doğrudan bağlandığı türbinler için uygun değildir. Melez uyartımlı sistemler ile bu sorun giderilmeye çalışılmaktadır.
- Çevirici anma gücü yüksektir, sistemde ek fren düzenekleri gerekebilir.

SMSG'ler akı yönelimine göre iki çeşittir. Bunlardan birincisi klasik anlamda bilinen akının yarı çapsal (radyal) olduğu generatörlerdir. Bu generatörlerde stator ve rotor iç içe yerleştirilmiştir. Radyal akılı generatörlerde magnetik akı dönüş yönüne dik olarak yönlendirildiğinden sonlandırma sargıları ortadan kalkar ve bakırdan daha iyi yararlanılır. Uygulanabilir kuvvet yoğunluğu böylelikle 250 kN/m^2 düzeyine ulaşabilir. Bu değer sürekli mıknatıs yüksekliği artırılarak daha da artırılabilir [46].

Bir diğer tür ise eksenel akılı makinelerdir. Eksenel akılı generatörler çapsal değil eksenel yönde akı üretirler ve hava aralığı da eksenel yöndedir. Yani rotor ile stator iç içe değil yan yanadır. Hava aralığındaki manyetik akı yönü mil eksenine paraleldir. Yanyana birden fazla rotor yada stator yerleştirilebildiğinden dolayı geleneksel radyal akılı makineye göre verilen bir makine çapı için daha fazla magnetik akı üretirler. Eksenel akılı makinelerin bir olumsuz yanı stator ve rotor arasında eksenel yöndeki çekim kuvvetidir. Radyal akılı makinelerde hava aralığı

evresi boyunca çekim kuvvetleri birbirini yok eder. Buna karşın eksenel akılı makinelerde büyük bir çekim kuvveti oluşur. Bu ekim kuvveti de makine yapısında mekanik zorlamalara yol açar.

SMSG'ler rotorlarının içerde ve dışarıda olduğu duruma göre de iki sınıfa ayrılmaktadır. Statorun dışarıda rotorun ise statorun içine yerleştirildiği generatörlere iç rotorlu SMSG denilmektedir. İç rotorlu makinelerin en önemli ayırt edici özelliği moment/atalet oranının yüksek olmamasıdır. Makinenin üreteceği moment rotor uzunluğuyla doğrusal olarak artmaktadır. Rotor apı ile ise karesel olarak artmaktadır. Genelde bu makinelerin özgül gücü ve güç yoğunluğu mıknatıssız olanlara göre daha büyüktür. Dış rotorlu generatörler isminden de anlaşılacağı gibi rotorları dışarıda, statorları ise rotorun i kısmındadır. Rotor bir kase gibi statoru kaplamaktadır ve mıknatıslar rotorun iç kısmına tutturulur. Bunun en önemli avantajı yüksek hızlarda mıknatısların yerinden fırlamasını engeller. Ayrıca rotor yüksek eylemsizliğe sahip olduğu için moment dalgalanmalarını da azaltır.

4. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ İÇİN SÜREKLİ MIKNATISLI DOĞRUDAN SÜRÜŞLÜ SENKRON GENERATÖR TASARIMI

Bu bölümde rüzgâr türbinlerinde kullanılmak üzere küçük güçlü (15 kW) doğrudan sürüşlü sürekli mıknatıslı generatör tasarımı anlatılacaktır.

4.1 Kavramsal Tasarım

Öncelikle generatörün temel boyutlarının belirlenmesi gerekmektedir. Generatörü tahrik edecek sistem rüzgâr türbinidir. Rüzgâr türbini ise gücünü rüzgâr hızından almaktadır. Bu nedenle öncelikle rüzgârdan elde edilecek enerjinin hesaplanması gereklidir.

4.1.1 Rüzgârdan enerjinin elde edilmesi

Havanın ağırlığı ve hızı olması sebebiyle kinetik enerjisi vardır. Bu enerji;

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.1)$$

kinetik enerji eşitliği ile hesaplanır. Ancak burada rüzgârın hız düşey bileşeni yatay bileşenine nispetle küçük olduğundan ihmal edilmiştir. Burada;

“ m ” kütle, “ v ” yatay rüzgâr şiddeti olup, kütle;

$$m = \rho H \quad (4.2)$$

olmaktadır. “ ρ ” havanın özgül kütle ve “ H ” ise hacmini göstermektedir.

Rüzgârın esme yönüne dik alan “ A ” ile, rüzgâr yönündeki uzunlukta “ L ” ile gösterilirse, hacim;

$$H = AL \quad (4.3)$$

olur. Yolun hız ve zaman çarpımına eşit olduğu bilindiğine göre, “ L ” mesafesini rüzgâr şiddetine ve zamana bağlı olarak şu şekilde yazılabilir;

$$L = vt \quad (4.4)$$

Hesaplanan “ L ” (4.3) denkleminde yerine konur ve kütle denklemi yeniden yazılırsa,

$$m = \rho Avt \quad (4.5)$$

elde edilir. Böylece yeni enerji denklemi;

$$E = \frac{1}{2} \rho Av^3 t \quad (4.6)$$

olur. Enerjinin zamana oranı güç değerini verdiği için rüzgârdan elde edilecek güç;

$$P = \frac{1}{2} \rho Av^3 \quad (4.7)$$

şeklinde ifade edilebilir. Yukardaki eşitlikte “ ρ ” deniz seviyesindeki standart atmosfer şartlarında kabul edilen yoğunluk olup sayısal değeri 1.25 kg/m^3 , “ v ” ise belirlenen yükseklikte ölçülen yatay rüzgâr hızıdır.

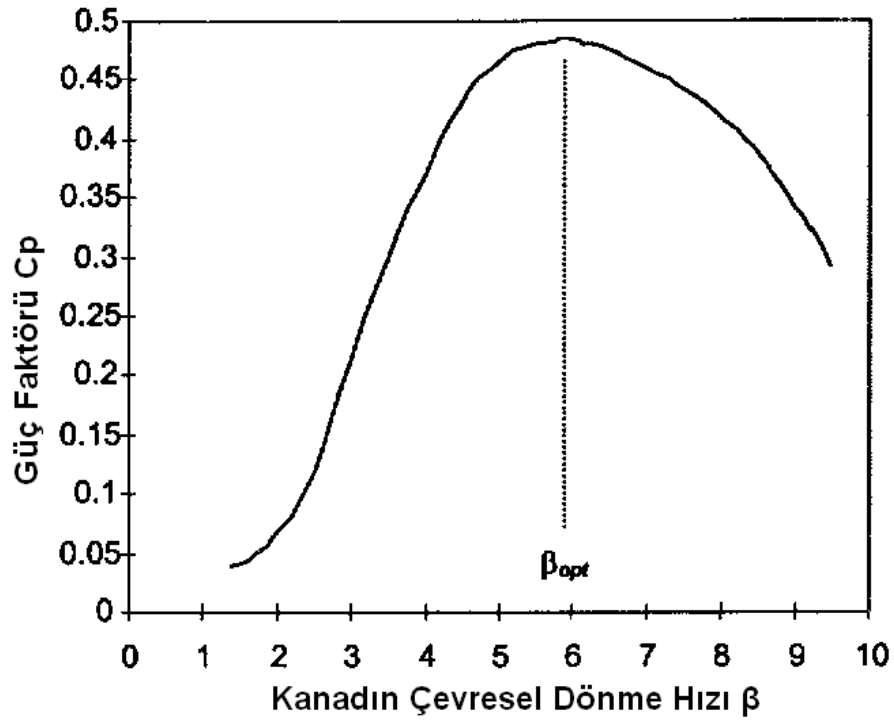
Rüzgârın sahip olduğu bu güç türbin kanatlarından geçişi sırasında türbinde bir güç “ P_t ” oluşturur. Kanatlarda oluşan bu gücün toplam rüzgâr gücüne “ P_w ” oranına güç faktörü denir ve “ C_p ” ile gösterilir.

$$C_p = \frac{P_t}{P_w} = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho Av^3} \quad (4.8)$$

Rüzgârın geçtiği alanın r yarıçapında bir daire olduğu düşünülürse;

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \rho \pi r^2 v^3 \quad (4.9)$$

Rüzgâr türbinindeki verim Betz Teoremine göre en fazla $16/27$ yada 0.593 dır [38]. Güç faktörünün “ C_p ” kanadın uç hızına oranı “ β ”nın bir fonksiyonu olarak değişerek $\beta = \beta_{opt}$ maksimum değerine, $\beta = 0$ ve $\beta = \beta_{opt}$ değerlerine giderek bir parabol oluşturur (şekil 4.1).



Şekil 4.1 : C_p - β Eğrisi [3]

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi “ C_p ”nin maksimum olduğu bir “ β_{opt} ” değeri vardır. Kanat ucu hızına “ u ” denirse, kanat ucu hızının rüzgâr hızına bağlı fonksiyonu;

$$\beta = \frac{u}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot n}{60 \cdot v} \quad (4.10)$$

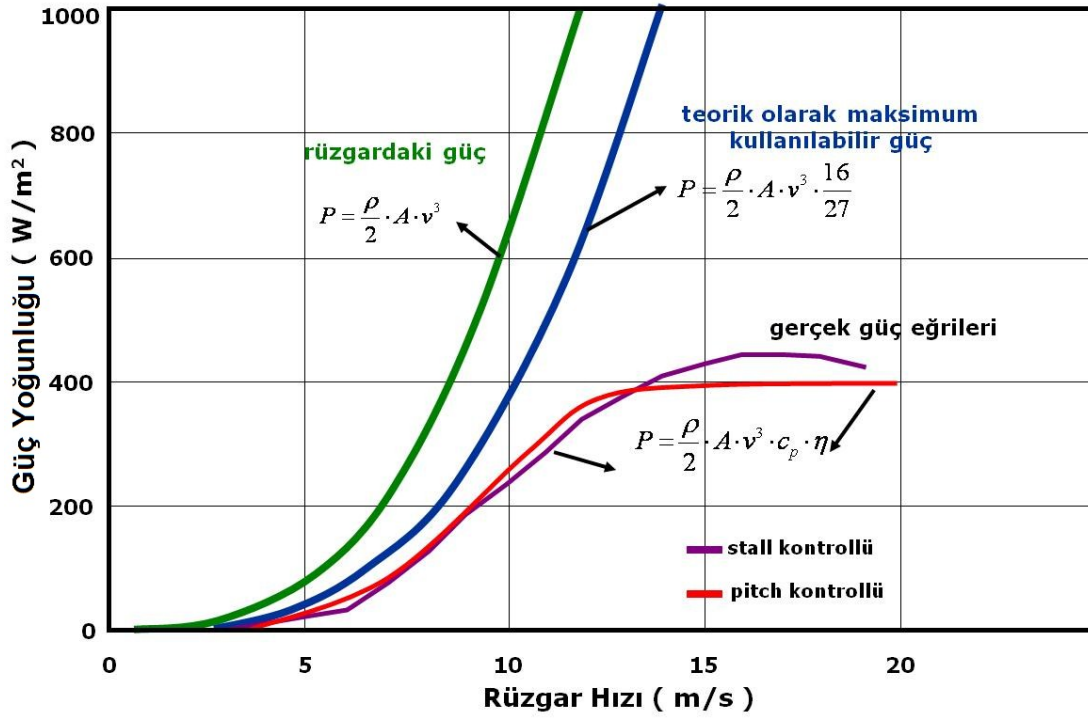
Türbinin rüzgârdan maksimum gücü aldığı anda motor milindeki açısal hız değişimi;

$$\omega = \frac{\beta_{opt} u}{r} \quad (4.11)$$

olur. Türbinin kanadının çevresel dönme hızı “ β_{opt} ” değerinde tutulursa türbinden elde edilecek gücün açısal hıza bağlı değişimi;

$$P_t = \left(\frac{1}{2} \rho \pi C_{p-\max} r^5 \right) \omega^3 \quad (4.12)$$

olur. Buradan rüzgâr hızına bağlı olarak elde edilebilecek güç oranları aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4.2 : Rüzgârdan elde edilebilecek güç eğrileri[55]

Üretilcek generatörün anma gücünün 15 kW olması düşünülmüştür. Tasarlanan bu generatör 3.5 m/s rüzgâr hızında enerji üretmeye başlayacak, anma gücüne 10 m/s rüzgâr hızında ulaşacaktır. Rüzgârın hızı 10 m/s değerini aştığında ise kanatlardaki pitch açısı kontrolü devreye girerek kanat açısını değiştirecek ve generatör gücünün belirlenen değerde kalmasını sağlayacaktır. Bu sebeple generatör tasarımı 10 m/s rüzgâr hızına göre yapılacaktır. 10 m/s rüzgâr hızı için yaklaşık 230 W/m²güç yoğunluğu elde edilmektedir. Buradan kanat uzunluğu hesaplanırsa;

$$15000 = 230 \cdot \pi \cdot r^2$$

$$r = \sqrt{\frac{15000}{230 \cdot \pi}} \cong 4.56m \quad (4.13)$$

olarak bulunur. Pervane yarıçapı $r=4.5$ m kabul edilmiştir. Denklem (4.10) yardımıyla $\beta=7$ için devir sayısı (n) hesaplanırsa;

$$7 = \frac{2 \cdot \pi \cdot 4.5 \cdot n}{60 \cdot 10}$$

$$n \cong 150 \text{ min}^{-1} \quad (4.14)$$

elde edilir. Bu değer motor üretimi için gerekli bir parametre olacaktır. $\beta=7$ için “ C_p ” faydalanma katsayısı yaklaşık 0.42’dir (Şekil 4.1). 10 m/s rüzgâr hızında, 4.5 kanat uzunluğunda 0.42 faydalanma katsayısı ile rüzgârdan elde edilebilecek güç;

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \rho \pi r^2 v^3 = 0.5 \cdot 0.42 \cdot 1.25 \cdot 3.14 \cdot 4.5^2 \cdot 10^3 = 16690W \quad (4.15)$$

olarak bulunur. Öngörülen 15 kW değerini sağlayabilmektedir.

4.1.2 Temel tasarım parametrelerinin belirlenmesi

Generatör tasarımında öncelikli olarak tasarlanan makinenin rotor yapısı (iç rotorlu – dış rotorlu) ve akı geçiş doğrultusu (radyal – eksenel) gibi temel yapının belirlenmesi gereklidir. Daha sonra uygun sarım şekli, oluk sayısı, kutup sayısı gibi konfigürasyonlar belirlenmelidir. Aşağıda belirtilen makine tasarım prosedürü adım adım uygulanarak temel parametreler elde edilmelidir [47].

- Uygulama gereksinimlerinin belirlenmesi
- İç rotorlu, dış rotorlu, eksenel akılı konfigürasyon
- Mıknatıs seçimi
- Kutup sayısının belirlenmesi
- Oluk ve faz sayısının belirlenmesi
- Kabaca boyutların belirlenmesi
- Hava aralığının ve manyetik yüklenmenin belirlenmesi
- Rotor tasarımı ve kutup akı yoğunluğu belirlenmesi
- Stator boyutlarının belirlenmesi
- İletken ve sarım sayılarının belirlenmesi
- İletken kesitlerinin ve faz direnci ile endüktansının hesaplanması
- Performans hesabı
- Akım yoğunluğu, akı yoğunlukları, oluk doluluk oranı değerlerinin kontrol edilmesi
- Sıcaklık artışı ve demagnetizasyon kontrol edilmesi

- İstenilen değerler sağlanana kadar iteratif olarak gerekli değişikliklerin yapılması

Tasarlanan generatör rüzgâr hızına bağlı olarak çeşitli yüklenme koşullarında çalışacaktır. Nominal gücü 15 kW olarak belirlenmiştir ancak rüzgâr hızı değişken olduğundan bu değer altındaki değerlerde de çalışacaktır. Nominal devri 150 min^{-1} olacaktır. Şebekeye bağlanacağı düşünüldüğünde endükleyeceği maksimum gerilim şebeke geriliminde olacaktır. Bu durumda endüklenen gerilimin faz-arası etkin değeri 380 V olacaktır. Rüzgârın hızlı değişiminden etkilenmenin azaltılması amacı ile eylemsizliğinin yüksek tutulması düşünülmektedir. Dişli sistem olmadan doğrudan sürüslü sistem düşünüldüğü için yüksek moment değerine sahip olması gereklidir. Soğutma sistemi olarak rüzgârdan faydalanılacaktır, ayrıca bir soğutma ekipmanı düşünülmemektedir. Generatör maksimum akımının nominal değerinin 1.5 katı olacaktır.

Doğrudan sürüslü rüzgâr uygulamalarında yüksek moment ve düşük hız ihtiyacı vardır. Bu sebeple yüksek manyetik akı yoğunluğuna sahip nadir toprak elementi mıknatıslar kullanılacak (NdFeB gibi), çok kutuplu, iç rotorlu bir tasarım öngörülmüştür. Ayrıca generatörün üretim, montaj ve kanat bağlantıları kolaylığı sebebiyle iç rotorlu konfigürasyon tercih edilmiştir. Bu konfigürasyon ısının oluştuğu sargılar dışarda kaldığından soğutma içinde uygundur.

Günümüzde generatörler genel olarak üç fazlı olarak üretilmektedir. Bunun dışında özel amaçlar için üretilen farklı faz sayılarında generatörler de bulunmaktadır ancak uygulama alanları çok geniş değildir.

Çizelge 4.1 : Farklı faz sayısındaki generatörlerin karşılaştırılması [47]

Faz Sayısı	İletken Yararlanımı %	Doğrultucu Yarıiletken Sayısı	Moment Dalgalanması %
1	50	2	100
2	50	4 veya 8	30
3	67	6 veya 3	15
4	75	8	10
6	83	12	7
12	92	24	3

Faz sayısı arttıkça iletken faydalanımı ve moment dalgalanması azalmaktadır. Buna karşın kullanılacak yarıiletken sayısı artmaktadır. Ayrıca kontrollü bir doğrultucu

kullanılacak olursa yarı iletken anahtar sayısına bağlı olarak kontrol zorluğunda artmaktadır. Üç fazlı generatörler yaygın kullanıldığından bu uygulamada üç fazlı bir generatör tasarlanacaktır.

Generatörlerde kutup sayısı seçimi mıknatıs malzemesi, rotor konfigürasyonu (iç rotor, dış rotor vs), rotor ve mıknatıs mekanik yapısı, devir sayısı, eylemsizlik gibi bir çok parametreye bağlıdır. Belirli bir frekans için kutup sayısı ile devir sayısı ters orantılıdır. Yani kutup sayısı arttıkça aynı frekansta gerilim enükleymek için devir sayısının azalması gerekir. Çünkü rotorun bir devir dönmesinde akı kutup sayısı kadar yön değiştirmektedir. Bu değer endüklenen gerilimin frekansına eşittir. Bir diğer etken ise generatörde kullanılacak olan doğrultucunun frekans kısıtıdır. Çünkü yarı iletken elemanların hızları sınırlıdır, endüklenen gerilimin frekansı çok artarsa doğrultucu kontrolünde sorunlar yaşanabilir. Bir diğer sınır ise demir kayıplarının frekansla artmasıdır. Yüksek moment gerektiren düşük hızlı uygulamalarda ise yüksek kutuplu generatörler tercih edilmektedir.

Çizelge 4.2 : 3 faz generatörler için oluk/kutup kombinasyonları [47]

Oluk	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Kutup	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
			6	8	10	6	8	8	6	8	8	6	8	8	6	8
			8	10		8	14	10	8	10	10	8	10	10	8	10
			12	18		12	16	16	10	20	14	10	14	14	10	14
						14		20	12	22	20	12	16	16	12	16
						16			18	26	22	14	26	26	14	20
									20		26	16	28	28	16	32
									22		28	22	32	32	20	34
									24			24	34	34	28	38
												26			30	40
												28			32	
												30			34	
												32			38	
															40	

Kutup seçimine etki eden bir diğer etken ise stator ve rotor boyunduruğu akısıdır. Kutup iki katına çıkarsa boyunduruktan geçen akı yarıya düşer. Bu sebeple belirli bir manyetik ve elektriksel yüklenme için kutup sayısını artırmak toplam generatör çapını azaltacaktır. Bunun dışında kutup sayısı artırıldığında kutup başına stator amper-sarımı ters orantılı olarak azalmaktadır, buna bağlı olarak birime indirgenmiş (p.u.) endüktans ve senkron reaktansa azalır. Kutup ve oluk seçimindeki bir diğer

etken ise oluşan “cogging” momentidir. Eğer oluk/kutup oranı çift olursa bütün kutup kenarları ile oluk kenarları çakışır ve “cogging” momenti artar. Bir diğer önemli parametre ise sargı adımıdır. Sargı adımı genel olarak oluk/kutup oranıdır. Sargı adımı büyüdükçe sargı direnci ve kaçaklar artar. Sargı adımı çok küçük olursa sargının fiziksel yapısından dolayı sargıları oluklara yerleştirmek zor olabilir. Bütün bu parametreler göz önüne alınarak oluk ve kutup sayıları belirlenmelidir. Yaygın olarak kullanılan oluk/kutup oranı değeri 3’tür. Tasarlanacak generatörde de bu oran öngörülmüştür ve kutup sayısı 16, oluk sayısı 48, sargı adımı 3 olarak belirlenmiştir.

Belirli bir makine haciminden elde edilecek moment miktarı sınırlıdır. Elde edilecek momentin motor boyutlarına bağlı eşitliği aşağıdaki gibidir. Bu eşitlik bütün elektrik makineleri için geçerlidir.

$$T = KD_r^2 L_{stk} \quad (4.16)$$

Burada “ K ” moment katsayısı, “ D_r ” rotor çapı ve “ L_{stk} ” rotor sac paket uzunluğudur. Bunların dışında “ K ” ile orantılı “birim rotor hacmi momenti (Torque Per Unit Rotor Volume TRV)” ve “hava aralığı kesme gerilimi (airgap shear stress σ)” adında iki katsayı daha kullanılmaktadır [47].

$$\begin{aligned} TRV &= \frac{T}{\frac{\pi}{4} D_r^2 L_{stk}} \\ TRV &= \frac{4K}{\pi} \\ TRV &= 2\sigma \end{aligned} \quad (4.17)$$

Buradan;

$$K = \frac{\pi}{2} \sigma = \frac{\pi}{4} TRV \quad (4.18)$$

Tasarlanan generatörün gücü 15 kW ve hızı 150 min^{-1} olarak belirlenmiştir. Bu değerler için generatörün anma momentini hesaplanırsa;

$$T = \frac{15000 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 150} = 955 \text{ Nm} \quad (4.19)$$

olur. $TRV=42 \text{ kNm/m}^3$ (Çizelge 4.3) olarak alıp (4.16) eşitliği kullanılarak $D_r^2 \cdot L_{stk}$ değeri elde edilir.

$$D_r^2 L_{stk} = \frac{955 Nm}{\frac{\pi}{4} 42000 \frac{Nm}{m^3}} = 0,0289 \quad (4.20)$$

Elde edilen bu değerden belirli bir L_{stk}/D oranına bağlı rotor çapı ve uzunluğu elde edilmelidir. 1 civarında bir değer yaygın olmakla birlikte, aynı zamanda aynı laminasyon kullanılarak değişik amaçlarda farklı paket boyu uzunlukları ile boy/çap oranları 3:1 veya daha fazla aralıkta değişmektedir. Çok büyük boy/çap oranı yetersiz yanal rijitlik nedeniyle tercih edilmemektedir. Yüksek moment-atalet istendiği uygulamalarda ise bu oran 1'den daha küçük değerler alabilmektedir. Tasarlanan generatör doğrudan sürürlü olduğu için yüksek momentli olması gereklidir bu nedenle 1'den daha düşük bir boy/çap oranı tercih etmek uygun olacaktır.

Çizelge 4.3 : TRV, K, σ katsayıları tablosu [47]

	$\sigma \text{ kN/m}^2$	$TRV \text{ kNm/m}^3$
Küçük güçlü tamamı kapalı motorlar (Ferit) (Small totally-enclosed motors (Ferrite))	3.5 – 7	7-14
Tamamı kapalı motorlar (sinterlenmiş nadir toprak elementi yada NdFeB) (Totally-enclosed motors (Sintered Rare Earth or NdFeB))	7–21	14 - 42
Tamamı kapalı motorlar (bağlı NdFeB) (Totally-enclosed motors (Bonded NdFeB))	10.5 typ.	21 typ.
Endüstriyel motorlar (Integral-hp industrial motors)	3.5 –14	7-30
Yüksek performanslı servo motorlar (High-performance servomotors)	3.5–21	15 - 50
Havacılık makineleri (Aerospace machines)	14 - 35	30 - 75
Çok büyük sıvı soğutmalı makineler (Large liquid-cooled machines)	69 - 103	100 - 250

Rotor çapı $D_r=360 \text{ mm}$ olarak kabul edilirse bu durumda yaklaşık paket uzunluğu $L_{stk}=220 \text{ mm}$ olur. Boy/çap oranı yaklaşık 0.61 olmaktadır ve tasarım için uygundur. Rotor çapı ve paket uzunluğu ile yaklaşık rotor boyutları belirlenmiş oldu.

Bir sonraki adımda hava aralığı çevresindeki elektriksel yüklenmenin belirlenmesi gerekir.

$$A = \frac{\text{Toplam Amper} - \text{sarım}}{\text{Hava aralığı çevresi}} = \frac{2mN_{ph} I}{\pi D_r} \text{ A/m} \quad (4.21)$$

Burada “ I ” faz akımının ortalama değeri, “ m ” faz sayısı ve “ N_{ph} ” her bir fazın sayım sarısıdır.

Mıknatısların demagnetizasyona karşı maksimum direnç sağlaması için küçük hava aralığı gereklidir. Çok küçük makinelerde hava aralığı 0.15-0.25 mm civarındadır. Orta boyutlularda 0.4-0.5 mm ve büyük boyutlu makinelerde 0.7-1 mm civarında olmaktadır. Hava aralığı büyüdükçe rotordan stator dişlerine geçen akı azalacaktır. Çünkü havanın manyetik direnci demirden çok daha büyüktür. Akının azalması endüklenen gerilimin düşmesine sebep olacaktır. Hava aralığının çok küçük olması durumunda rotor ve mıknatıslar üzerine etki eden kuvvetler sebebiyle mekanik problemler ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle optimum bir hava aralığı belirlemek gerekir. Tasarlanacak generatör çapı büyük olduğundan fiziksel montaj zorlukları göz önünde bulundurularak hava aralığı 1 mm olarak seçilmiştir.

Makine tasarımında bir diğer önemli parametre ise iletkenlerdeki akım yoğunluğudur. Elektriksel yüklenme doğrudan akım yoğunluğunu etkileyen bir faktördür. Akım yoğunluğu aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir;

$$J = \frac{A}{\text{Brüt oluk dolgu faktörü} \times \text{oluk genişliği/pitch oranı} \times \text{oluk derinliği}} \quad (4.22)$$

Değişik uygulamalar için akım yoğunluğu değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Değişik uygulamalar için akım yoğunlukları [47]

Durum	A/mm ²
Tamamı kapalı (Totally enclosed)	1.5-5
Hava ya da fan soğutmalı (Air-over Fan-cooled)	5-10
Sıvı soğutmalı (Liquid cooled)	10-30

Tasarlanan generatörde soğutma rüzgâr ile sağlanacaktır (hava soğutmalı), bunun haricinde fazladan bir zorlanmış soğutma düşünülmemektedir. Bu nedenle akım yoğunluğunun 5 A/mm² civarlarında kalması öngörülmektedir. Bu değer tasarım için önemli bir kısıtlamadır.

Buradan sonra yapılacak işlemler karmaşık ve uzun süren hesaplamalar gerektirdiğinden bu hesaplamalar motor tasarımı konusunda geliştirilmiş bilgisayar yazılımları ile yapılacaktır. Yaklaşık rotor boyutları, oluk ve kutup sayılarının belirlenmesinden sonra RMXprt yazılımı yardımıyla makinenin analitik tasarım ve analizi yapılacaktır. Bu program yardımıyla kullanıcılar rotor tipi, malzeme seçimi, sarım şekli gibi durumları tanımlayabilmekte, program tanımlanan girdiler doğrultusunda makine performansını hesaplamaktadır. Ardından kullanıcı makine boyutları, sarım sayısı, kablo kesiti, kontrol parametreleri gibi değerleri ayarlayarak makine analizini hızlı ve kolayca yapabilmektedir. Bu tür tasarım programlarının temel amacı tasarımcının yerini almak yerine, tasarımcıyı tekrarlayan uzun hesaplamalardan kurtararak aynı sürede daha fazla veri elde edilmesini sağlamaktır. Çünkü makine tasarımında her bir tasarım için 500'den fazla parametre hesaplanmaktadır [47]. Tasarım programları sayesinde bu parametrelerin hesaplanması çok daha az zaman almaktadır.

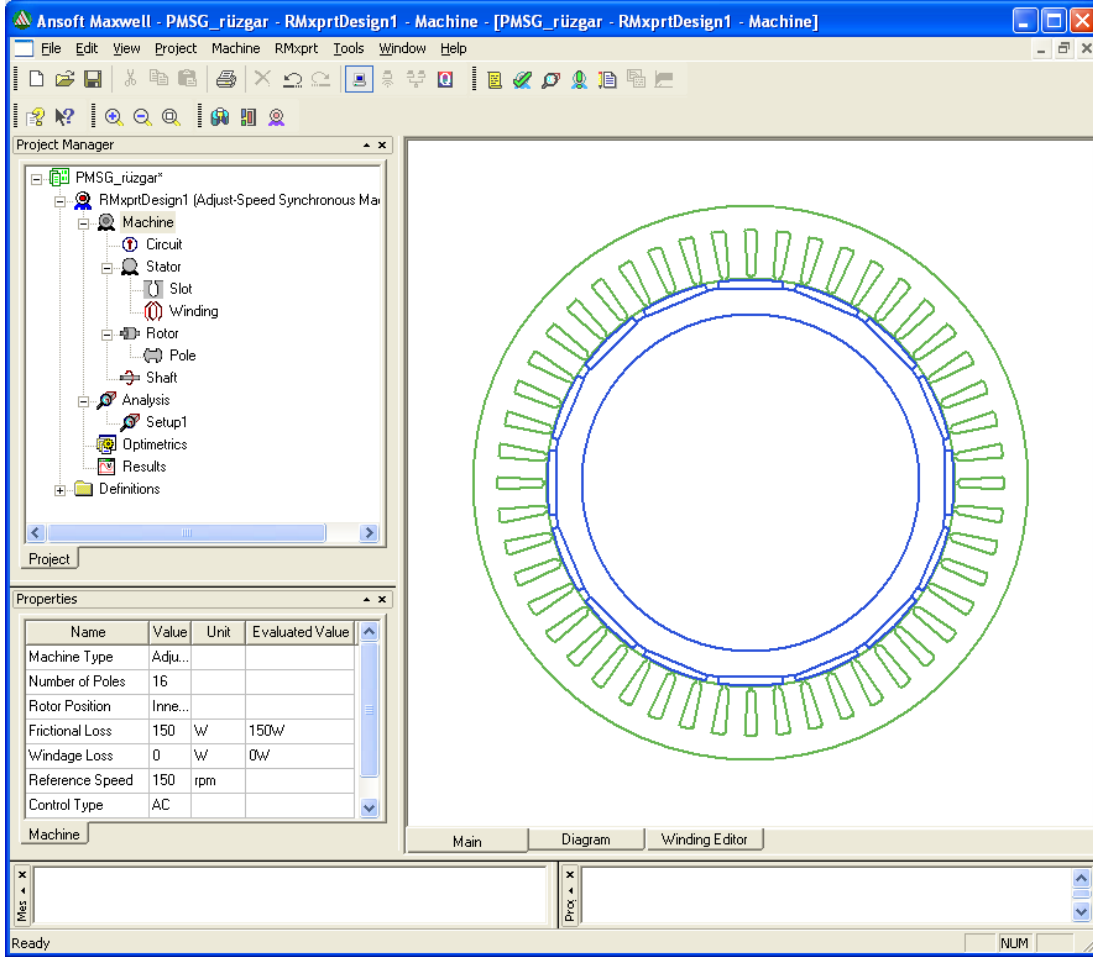
4.1.3 Analitik tasarım ve analiz

Tasarlanacak generatörün gücü, devir sayısı ve yaklaşık rotor boyutları belirlenmişti. Buradan yola çıkarak diğer parametrelerin belirlenmesi ve analizinin yapılabilmesi için ANSOFT RMXprt yazılımında motor modelinin oluşturulması gereklidir.

İlk olarak makine boyutlarının belirlenmesi gerekmektedir. Rotor dış çapı, uzunluğu ve hava aralığı yaklaşık belirlenmiştir. Ayrıca kutup sayısı 16 ve oluk sayısı 48 olarak öngörülmüştür. Bu değerler temel alınarak stator ve rotor laminasyon boyutlarının belirlenmesi gereklidir. Ancak öncesinde mıknatıs, stator ve rotor malzemelerinin belirlenmesi gereklidir.

Günümüzde motor ve generatör uygulamalarında genel olarak yüksek enerji yoğunluğuna sahip nadir toprak elementi mıknatıslar kullanılmaktadır. Yapılacak olan generatör tasarımında aynı şekilde yüksek enerji yoğunluğuna sahip Neodim-demir-boron (NdFeB) mıknatıs kullanılacaktır. Kullanılacak olan mıknatısın kalıcı mıknatıslığı (Br) 1.23 T civarındadır. Mıknatıs kalınlığı seçimindeki önemli

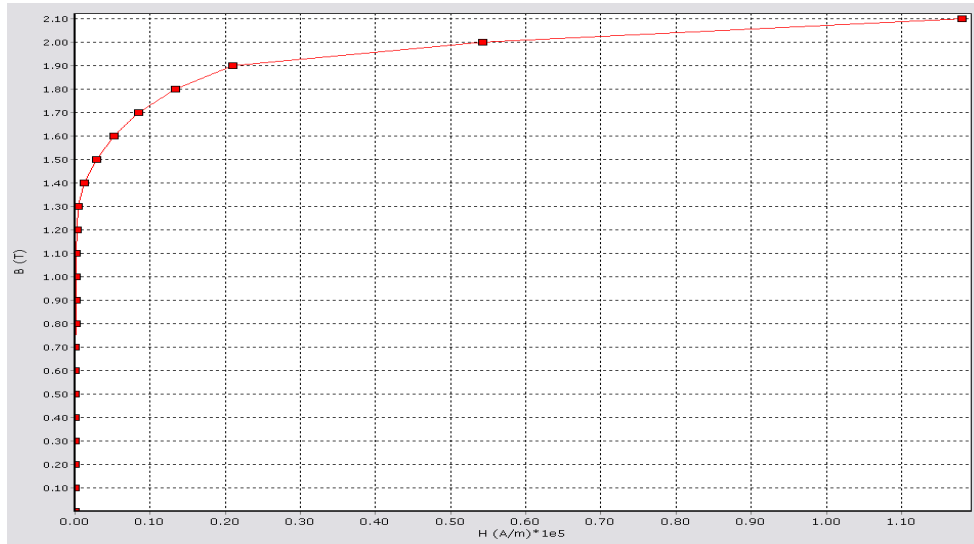
faktörlerden birisi mıknatısın demagnetizasyon olmayacak kadar kalın seçilmesidir. Kalınlık arttıkça maliyet artmaktadır. Bu nedenle optimum bir boyut belirlemek gereklidir. Yüksek enerjili mıknatısların kullanıldığı uygulamalarda, mıknatıs boyutu kabaca bir başlangıç değeri olarak hava aralığı değerinin 10 katı olarak seçilebilir [47]. Bu sebeple mıknatıs boyutu olarak 10 mm değeri uygun olacaktır. Daha sonra yapılacak iterasyonlarla mıknatıs kalınlığı son halini alacaktır.



Şekil 4.3 : RMxprt modeli

Generatör performansını etkileyen parametrelerden bir diğeri stator ve rotor saclarında kullanılacak malzemenin özellikleridir. Çünkü elektrik makinelerinde oluşan kayıpların bir kısmı stator ve rotor sacında meydana gelmektedir. Bunlar histerezis ve fuko akımı kayıplarıdır. Günümüzde elektrik makinesi tasarımında kullanılan çeşitli sac malzemeleri vardır. Fuko kayıplarını azaltmak için stator ince sac laminasyonların paketlenmesi ile oluşturulur. Her bir laminasyon diğeri ile izole edilmiştir. Böylelikle oluşacak girdap akımlarının karşılaşacağı manyetik direnç artırılır. Genel olarak yüksek performans istenen elektrik makinelerinde (yüksek

hızlarda yüksek verim elde etme) düşük kayıplı ince sac malzemeler tercih edilir. Bir diğer yöntem ise sac malzemesine belirli oranda silisyum eklemektir (%3-%5). Böylece malzemenin manyetik direnci artar böylelikle fuko kayıpları azalır. Yapılacak çalışmada generatör devri çok yüksek olmadığından 0.5 mm sac laminasyonlar uygun olacaktır. Sac malzemesi olarak da M-19 #24 (%3 Si) seçilmiştir. Şekil 4.4’de seçilen ürünün B-H karakteristiği görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi 1.6 T değerinden sonra malzeme doğrusallıktan çıkmaktadır. Yani uygulanan alan şiddetine cevap verememekte ve doymaya girmektedir. Böylece makinede oluşacak histerezis kayıpları artacak ve makine verimsiz çalışarak ısınacaktır. Bu sebeple tam yükte çalışma durumunda manyetik akı yoğunluğunun 1.7 T değerini aşmamasına dikkat edilmelidir.



Şekil 4.4 : M-19 #24 (%3 Si) B-H karakteristiği

Malzeme seçiminin ardından stator dişi ve rotor kutup açısının belirlenmesi gereklidir. Rotor kutup yayının elektriksel 150° (18°.75’ mekanik) olması ön görülmektedir. Bu başlangıç değeridir. Daha sonra yapılacak iterasyonlarla son halini alacaktır. Stator diş kalınlıklarını hesaplayabilmek için boşta çalışmada mıknatısların oluşturacağı akı miktarının belirlenmelidir. Bunun için öncelikle geçirgenlik katsayısının (PC) hesaplanması gereklidir.

$$PC = \frac{1}{f_{LKG}} \times \frac{L_M}{g} \times \frac{A_g}{A_M} = \frac{1}{0.9} \times \frac{10}{1} \times 1 = 11.1 \quad (4.23)$$

Burada “ f_{LKG} ” kaçak katsayısı (genel olarak 0.8-0.9 arası değer alır), “ g ” hava aralığı, “ L_M ” mıknatıs kalınlığı, “ A_g ” kutup hava aralığı alanı, “ A_M ” mıknatıs alanıdır (Yüzey mıknatıslı makinalarda A_g ve A_M yaklaşık olarak birbirine eşittir.). Boşta çalışmada mıknatıslardaki manyetik akı yoğunluğu “ B_M ” bulunmalıdır. Kullanılacak mıknatısın kalıcı mıknatıslığı (Br) 1.23 T ve göreceli manyetik geçirgenliği (μ_{rec}) 1.1 dir.

$$B_M = \frac{PC}{PC + \mu_{rec}} \cdot B_r = \frac{11.1}{11.1 + 1.1} \cdot 1.23 = 1.11T \quad (4.24)$$

olur. Mıknatıstan çıkan akı vektörleri hava aralığından dışlara geçecektir. Daha sonra stator boyunduruğundan dolaşp diğer kutbu geçerek başlangıç noktasına dönecektir. Manyetik akı manyetik akı yoğunluğu ile akının geçtiği alanın çarpımına eşittir. Kutuplarda oluşan akı miktarı hesaplanırsa buradan dış kalınlıkları hesaplanabilir. Her bir kutbun karşısına üç dış gelmektedir. Mıknatıslarda oluşan akı miktarı;

$$\phi_M = B_M \cdot A_M = B_{dış} \cdot A_{dış} \quad (4.25)$$

Paket uzunluğu 220 mm olarak belirlenmiştir, rotor ve stator için aynıdır. Dışlerdeki manyetik akı yoğunluğunun 1.5 T değerini geçmemesi istenmektedir. Buradan dış genişliği hesaplanırsa;

$$2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{18.75}{360} \cdot L_{stk} \cdot 1.11 = 3 \cdot d_{dış} \cdot L_{stk} \cdot 1.5 \quad (4.26)$$

$$d_{dış} = 14.5mm$$

Dış genişliği minimum 14.5 mm olmalıdır. Yine başlangıç parametresi olarak bu değer 15 mm olarak alınacaktır. Üç dışten geçen manyetik akı stator boyunduruğundan geçerek diğer kutba geçecektir. Burada üç dışten gelen akı boyundurukta ikiye ayrılmaktadır. Buradan stator boyunduruğunun genişliğinin dış genişliğinin 1.5 katı olması gerektiği görülmektedir. Stator boyunduruğu $15 \cdot 1.5 = 22.5$ mm olarak seçilmiştir. Rotor boyunduruğunda yine stator boyunduruğu kadar olması yeterlidir. Stator dış çapının belirlenmesi için oluk boyutlarının belirlenmesi gereklidir.

Stator boyutlarının belirlenmesindeki bir diğer parametre ise oluk açıklığı değeridir. Oluk açıklığının iletkenlerin girebileceği büyüklükte olması gereklidir. Çok küçük

oluk açıklığında ise bir dişten diğesine kaçak akı olaşabilmektedir. Bu nedenle oluk açıklığı değerinin hava aralığından büyük olması gereklidir. Oluk aralığının çok büyük olması durumunda ise “cogging” momenti artmaktadır. Bütün bu sınırlar doğrultusunda optimum bir oluk açıklığı belirlenmesi gereklidir. Oluk açıklığı 3 mm olarak öngörölmüştür. Daha sonra yapılacak olan iterasyonlarla son değerini alacaktır.

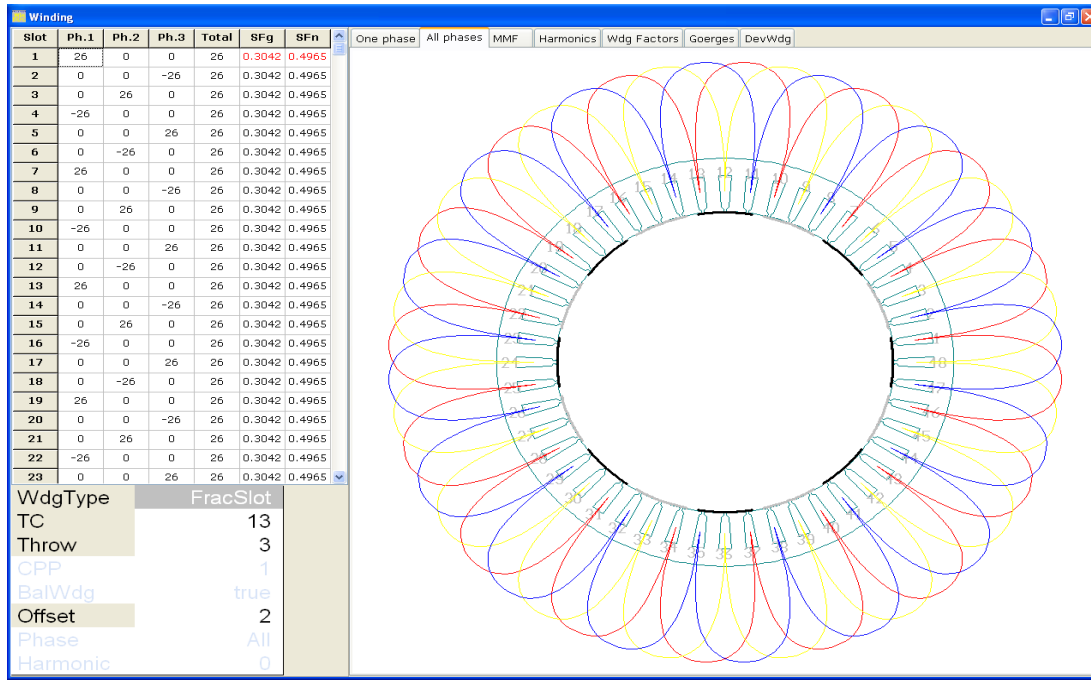
Sürekli mıknatıslı generatör stator tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli parametrelerden biriside diř ucu radyal kalınlığıdır. Eđer bu değer çok küçük sečilirse mıknatıs köşelerinin diř uçlarına geldiği noktalarda doymalar meydana gelir. Burada oluşan doymalarda “cogging” ve “detent” adı verilen moment dalgalanmalarına neden olur. Aynı durumun oluk açıklığı büyütöldüğünde olduğundan bahsedilmişti. Bu sebeple diř genişliğinin oluk açıklığı ile aynı sečilmesi uygun olacaktır. Diř ucu kalınlığı da 3 mm olarak belirlenmiştir.

Böylece stator ve rotor boyutları yaklaşık olarak belirlenmiştir. Bu değerler analitik tasarım programına girilerek stator ve rotor modelleri oluşturulmuştur (şekil 4.3).

Stator ve rotor boyutlarının belirlenmesinden sonra sarım şekli ve iletken sayılarının belirlenmesi gereklidir. Tasarlanan generatörün kutup sayısı 16, oluk sayısı 48, sargı adımı 3 olarak belirlenmişti. Generatör bir çevirici vasıtasıyla şebekeye bağlanacaktır. Rüzgâr hızı değişken olduğundan generatörün devir sayısı buna bağlı olarak ürettiği gerilimin genliği değişecektir. Anma çalışma durumunda yani 150 min^{-1} devirde şebeke gerilimini üretmelidir. Rüzgârın hızının daha az olduğu zamanlarda ise üretilen gerilim düşecektir. Bu sebeple çeviricinin yükseltici (boost) özelliğe sahip olması gereklidir. Generatörün anma çalışma durumunda şebeke gerilimine eşit gerilim üreteceği düşünölrse endöklenecek faz-nötr gerilimi 220 V olacaktır

Generatör boşta çalışma durumunda yukarda belirtilen gerilimleri endökleleyebilmesi için gerekli sarım sayısının hesaplanması gereklidir. Öncelikle sarım şeklinin belirlenmesi gereklidir. Her bir kutup karşısına üç faz gelecek şekilde sarım yapılacaktır (şekil 4.5). Sargı adımı ise üç oluk şeklinde olacaktır.

Rotorun dönüşü sırasında sarımların yerleştirildiği dişlerdeki akının yönü ve genliği sürekli değişecektir böylece stator sarımları üzerinde gerilim endöklenmesini sağlayacaktır.



Şekil 4.5 : Faz sargılarının yerleşimi

Generatörün boşa çalışma durumu için belirlenen devir sayısında, istenen gerilimi üretebilmesi için gerekli sarım sayısı hesaplanmalıdır. Faraday yasasına göre bir iletkenin elde edilecek gerilim;

$$e = \frac{d\phi}{dt} \quad (4.27)$$

dir. “N” tane iletkenin geçecek gerilim ise bu değer “N” katıdır. Akı bir periyodun T/4 zamanda maksimum değerine ulaşır. Endüklenen gerilim ortalama değerinin 1.11 katıdır. Periyot yerinde frekans konulursa, bir iletken için endüklenen gerilim;

$$E = 4.44 \cdot \phi_{\max} \cdot f \quad (4.28)$$

Kutuplardan geçen akı stator dişlerinden geçerken stator dişleri üzerindeki sarımlarda gerilim endükleyecektir. Her bir faz bir kutup karşısına gelmektedir. Başka deyişle kutuptan geçen bütün akı bir faz üzerinde gerilim endüklemektedir. 16 kutuplu bir generatör olduğundan A fazı için birbirine seri bağlı 16 sarım vardır. Diğer fazlar içinde bu durum aynıdır. Bir kutbun bir faz sarımı üzerinde endükleyeceği gerilim hesaplanmalıdır. Formülde akı yerine akı yoğunluğu ve geçtiği alan yazılırsa bir kutbun bir faz sargısı üzerinde üreteceği gerilim;

$$E = 4.44 \cdot B_{M \max} \cdot A_M \cdot f$$

$$E = 4.44 \cdot 1.11 \cdot (\pi \cdot 0.36 \cdot \frac{18.75}{360} \cdot 0.22) \cdot (\frac{150 \cdot 8}{60}) = 1.277V \quad (4.29)$$

Buradan gerekli olan minimum sarım sayısı hesaplanırsa;

$$N = \frac{220}{1.277 \cdot 16} = 10.77 \approx 11 \quad (4.30)$$

Gerekli minimum sarım sayısı 11 olacaktır. Generatöre bağlanacak çevirici alternatif gerilimi önce doğru gerilime çevirecek ardından tekrar alternatif gerilime çevirecektir. Bu sebeple oluşturulacak DA bara geriliminin şebeke geriliminden yüksek olması gereklidir. Böylece sarım sayısı 12 olarak alınacaktır. Bu değer de yine başlangıç değeridir.

Sarım sayısının belirlenmesinden sonra kullanılacak iletken kesitinin belirlenmesi gereklidir. Isıl açıdan iletkenlerdeki akım yoğunluklarının 5 A/mm² değerini aşmaması istenir. Bu sebeple iletken kesitini bulabilmek için generatörden çekilecek akımın hesaplanması gereklidir. Generatörün çıkış gücü 15 kW olacağından, fazlarından çekilecek ortalama akım;

$$I = \frac{15000}{220 \cdot 3} = 22.73A \quad (4.31)$$

Faz akımı 23 A olarak olduğunda istenen akım yoğunluğunu sağlamak için gerekli minimum iletken alanı;

$$S = \frac{23}{5} = 4.6mm^2 \quad (4.32)$$

İletken çapı ise;

$$D = \sqrt{\pi \cdot 4 \cdot 4.6} = 7.603mm \quad (4.33)$$

Bu çapta bir iletkenin oluklara girmesi mümkün değildir. Ayrıca fiziksel problemlerden dolayı sarılmasında mümkün değildir. Bunun yerine aynı iletken alanını sağlayacak daha küçük çaplarda standart paralel iletkenler kullanılacaktır. Oluk doluluk oranını artırmak içinde çoklu iletken demeti kullanmak uygun

olacaktır. İletken seçiminde standart üretilen iletkenlerden AWG 21 seçilmiştir. Bu iletkenin çapı 0.724 mm dir. Bu iletken kullanıldığında gerekli minimum iletken sayısı;

$$z = \frac{4.6}{\pi \cdot \left(\frac{0.724}{2}\right)^2} = 11.17 \approx 12 \quad (4.34)$$

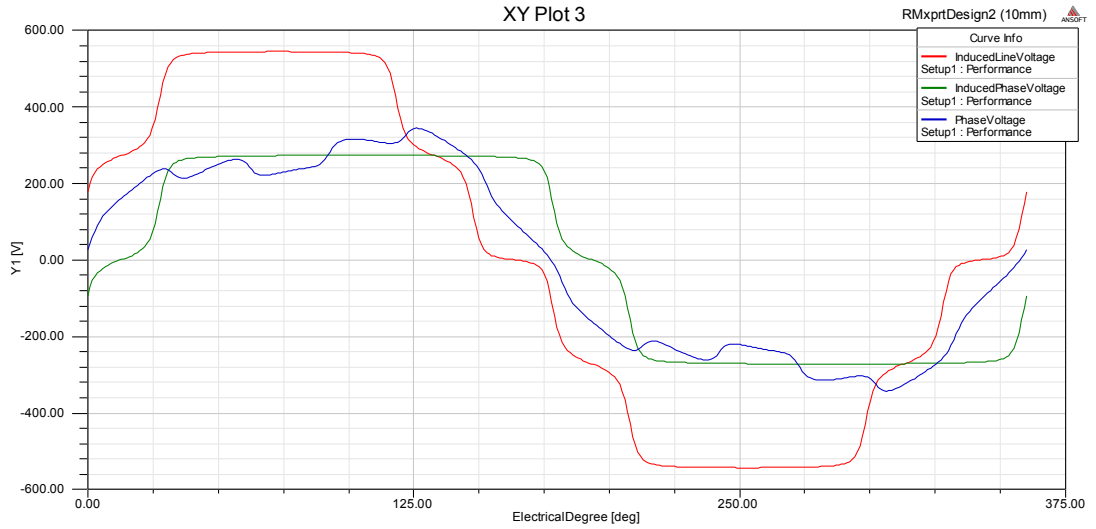
12 adet AWG 21 paralel iletken kullanılacaktır. İletkenler rotor üzerinde bulunan olukların içerisine yerleştirilecektir. Olukların çevresi izolasyon malzemesi ile kapatılacaktır böylelikle elektriksel izolasyon sağlanacaktır. İletkenlerin fiziksel yapısı gereği oluk içlerini %100 doldurması mümkün değildir. Muhakkak aralarda boşluklar kalacaktır. Oluğa yerleştirilen toplam iletken alanının oluk alanına oranına oluk doluluk faktörü denilmektedir. Fiziksel olarak iletkenlerin yerleştirilebilmesi için bu oran 0.7'den yüksek tutulmamalıdır. İmalat sorunları sebebiyle bu oran daha düşüktür. Yapılacak çalışmada oluk doluluk oranının 0.5 civarında tutulması planlanmaktadır. Buradan oluk alanı hesaplanırsa;

$$A_{oluk} = \frac{12 \cdot 12 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0.724}{2}\right)^2}{0.5} = 118.57 mm^2 \quad (4.35)$$

Generatör parametrelerinin belirlenmesinin ardından RMXprt yazılımı ile generatörün performans analizi yapılacaktır. Elde edilecek sonuçlar doğrultusunda gerekli parametreler değiştirilerek tekrar performans analizi yapılacaktır. Parametreler birbirine bağlı olduğundan birkaç iterasyon sonucunda parametrelerin optimum değerleri elde edilecektir. Sadece analitik performans analizi makine tasarımı için yeterli değildir. Çünkü buradaki değerler çeşitli ampirik formüllerle hesaplanmaktadır. Özellikle generatörün manyetik hesabının doğru olarak yapılabilmesi için sonlu elemanlar analizi ile ayrıntılı manyetik analiz yapılmalıdır. Bu kısımda sadece analitik hesaplarla parametreler oluşturulacaktır. Manyetik analiz ve ısı analiz sonucunda generatör parametreleri son değerini alacak ve üretilebilir hale gelecektir.

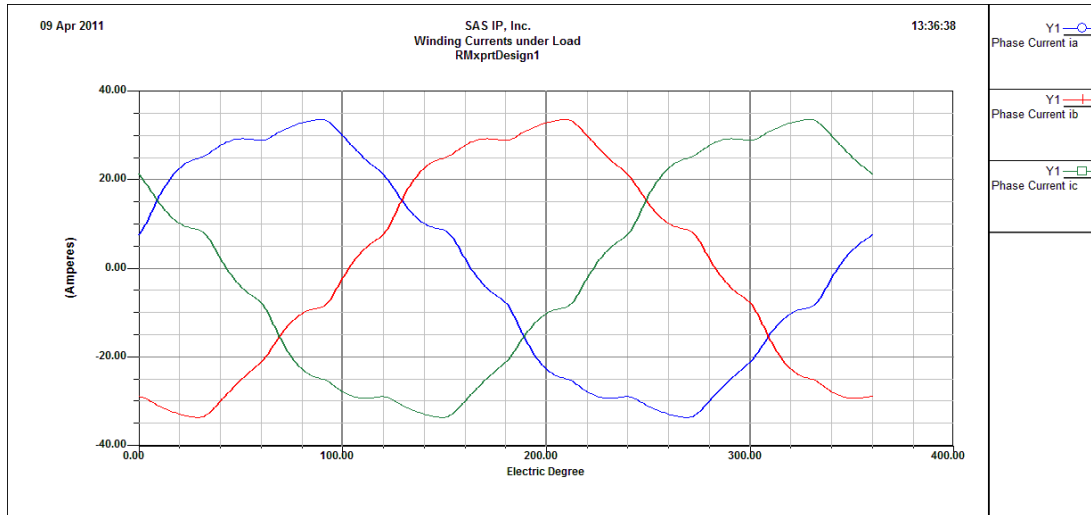
RMXprt yazılımına gerekli bütün parametreler girilerek performans analizi yapılmıştır. Performans sonucunda endüklenen faz-faz gerilimi 375 V olmuştur.

İstenilen şebeke gerilimin altında bir değerdir. Daha fazla gerilim endüklenmesi için sarım sayısının artırılması gereklidir. Sarım sayısı 12'den 13'e çıkarılarak yeniden analiz yapılmıştır. Endüklenen gerilim 405 V olarak hesaplanmıştır ve istenilen değeri sağlamaktadır. Bir diğer önemli parametre akım yoğunluğu değeri idi. Analiz sonucunda akım yoğunluğu değeri 4.65 A/mm^2 olarak elde edilmiştir. Boşta çalışmada dişlerdeki ve boyunduruklardaki akı yoğunluklarının 1.5 T civarında kalması istenmekteydi. Analiz sonucunda dişlerdeki akı yoğunluğu 1.525 T, stator boyunduruğu 1.37 T ve rotor boyunduruğu 1.47 T olarak hesaplanmıştır. Şimdilik bu değerler uygundur. Akı yoğunluklarının ayrıntılı olarak incelenmesi manyetik analiz kısmında yapılacaktır. Oluk doluluk oranı 0.45 olmuştur. Generatör verimi %92.3 olarak hesaplanmıştır. Generatörün giriş gücü 16.24 kW ve mil momenti 1035 Nm olmuştur. Faz akımları ise ortalama 23 A dir. Şekil 4.6'da endüklenen faz gerilimleri görülmektedir. Şekil 4.7'de ise anma çalışma durumundaki faz akımları görülmektedir ($V_{ff(\text{boşta})}$: kırmızı, $V_{fn(\text{boşta})}$: yeşil, $V_{fn(\text{anma yükte})}$: mavi).



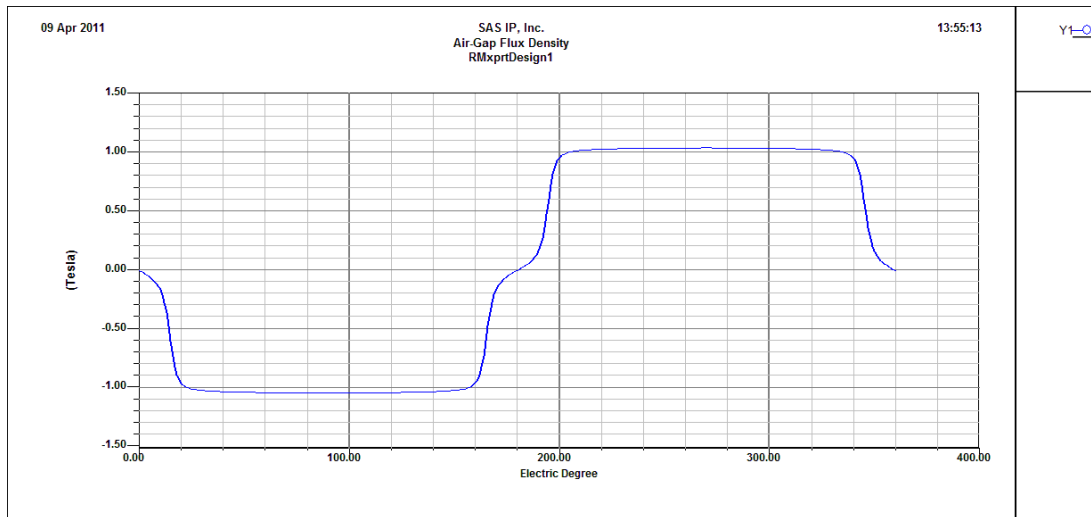
Şekil 4.6 : Anma hızında endüklenen gerilimler

Generatörün çalışma sıcaklığı 75°C olarak öngörülmüştür. Bu değer bir başlangıç parametresidir. Isıl analiz sırasında generatörün sıcaklık analizi ayrıntılı olarak yapılacaktır. Elde edilen değerler yukarıda hesaplanan değerlere yakındır. Generatörün endüklediği gerilim trapezoidal formundadır, şebeke gerilimi trapezoidal olduğundan akım dalga şekli sinüs formundan farklı olmuştur. Generatörü şebekeye bağlayacak olan çevirici generatörden uygun formda akım çekerek akım dalga şeklinin daha düzgün olmasını sağlayabilir.



Şekil 4.7 : Anma yükte faz akımları

Generatörün 20°C’deki faz direnci 0.52 Ω olarak hesaplanmıştır. Çalışma sıcaklığındaki faz direnci ise 0.63 Ω dur. Faz endüktansı ise 14.1 mH civarındadır. Ayrıca generatörün kısa devre akımı yaklaşık olarak 109 A olarak hesaplanmıştır. Bu değer mıknatısın demagnetizasyon analizinde kullanılacaktır. Hava aralığındaki akı yoğunluğu 1 T civarında olmaktadır. Hava aralığı akı yoğunluğunun rotor pozisyonuna göre değişimi şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.8 : Hava aralığı akı yoğunluğu

Analitik analiz sonucunda generatörün istenilen değerleri sağladığı görülmüştür ancak manyetik devrenin ayrıntılı olarak hesaplanması için Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ile manyetik alan hesabının yapılması gereklidir. Çünkü analitik analizde manyetik alan yoğunlukları ampirik formüllerle hesaplanmaktadır. Ancak manyetik alan dağılımı ayrıntılı olarak incelenerek gerekli düzeltmelerin yapılması gereklidir.

4.2 Manyetik Tasarım ve Analiz

Generatörün manyetik olarak tam tasarımının yapılabilmesi ve akı yollarının hesaplanabilmesi için “Sonlu Elemanlar Analizi (SEA)” (Finite Element Analysis) kullanılacaktır. Bu yöntemle hesap yapmak çok uzun ve karmaşıktır ancak bilgisayar programları ile kolayca yapılabilir. Manyetik alanın modellenmesinde “ANSOFT Maxwell” yazılımından faydalanılacaktır.

SEA, analitik tekniklerle çözümün çok karmaşık olduğu problemlerin doğrusal olmayan malzeme özellikleri kullanılarak çözülmesi gereken karmaşık elektromanyetik alan problemlerinin çözülmesinde kullanılan sayısal bir yöntemdir. Yöntem temelde makine kesit alanını (veya 3-D analizi durumunda hacmi) sonlu elemanlar denilen daha küçük alanlara ayrıştırılmasını içerir. Makine boyunca, manyetik potansiyelin (vektör veya skaler) uzamsal değişimi, Maxwell denklemlerinden türetilen doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklem ile tanımlanmaktadır. Bu denklemlerin doğrusal formu, çözülen problemin türüne bağlı olarak, Laplace denklemi, Poisson denklemi, ya da Helmholtz denklemleridir [47].

Yöntem ilk olarak 1940’ lı yıllarda önerilmiş fakat 1950’ li yıllarda uçak tasarımında kullanılmaya başlanmıştır [48]. 1970’ den sonraki yıllarda sonlu elemanlar yöntemi AA ve DA genratörlere, transformatörlere, solenoid ve aktüatörlere uygulanmıştır [49]. SEA hem karmaşık fiziksel şekilleri kolay modellemesinden hem de doğrusal olmayan malzemelerin tanımlanmasına izin verdiğinden elektrik makinelerinin analizinde en çok tercih edilen sayısal yöntemdir [50].

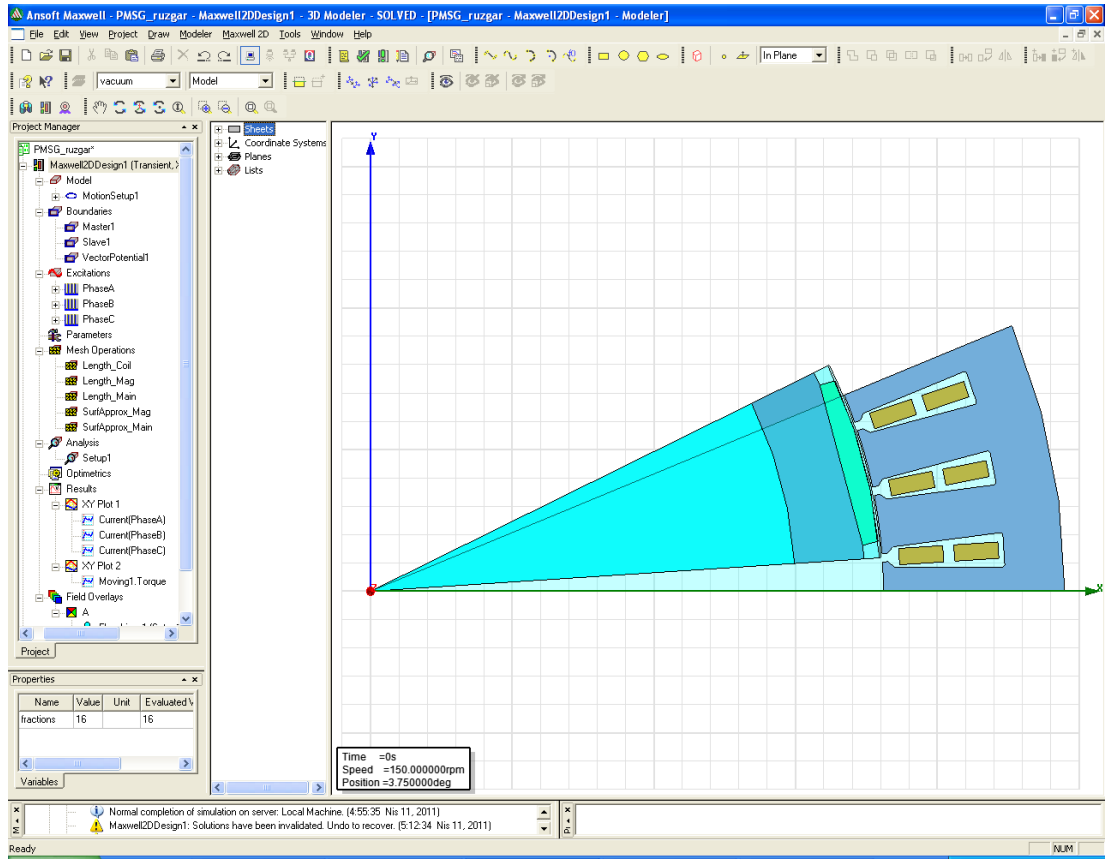
Mıknatıslardaki manyetomotor kuvvet (MMF “magnetomotive force”) manyetik akı oluşmasını sağlar. Manyetik akı her zaman kapalı bir devre çizmektedir. Yani akı başladığı noktaya geri döner. Generatör kutuplarında mıknatısların oluşturduğu manyetik akı hava aralığına oradan da stator dişlerine geçer. Daha sonra stator boyunduruğundan geçerek diğer rotor kutbuna ulaşır. Rotor boyunduruğunda geçer ve başlangıç noktasına gelir. Akı geçtiği bu yollar üzerinde manyetik dirençlerle karşılaşır. İdeal durumda oluşan manyetik akının tamamının hava aralığından statora geçmesi istenir ancak pratikte bu mümkün olmaz. Akı geçişleri sırasında oluşan kayıplara kaçak akı denir. Kaçak akıların mümkün olduğu kadar az olması istenen bir diğer durumdur. Bu kaçak akıların tam olarak hesaplanması ancak SEA ile mümkün olmaktadır.

Elektrik makinelerinde kullanılan malzemelerin akı taşıma kapasiteleri sınırsız değildir. Eğer stator sacı üzerindeki akı yoğunlukları 1.6-1.7 T değerlerini aşarsa manyetik iletkenlik hızla azalır. 2.1 T akım yoğunluğu değerlerinde sacın manyetik iletkenliği ile havanın manyetik iletkenliği yaklaşık aynı olur. Elektrik makinesi tasarımında bu değerler (1.6-1.7 T) göz önünde bulundurularak manyetik akı yoğunluğunun bu değerlerin altında tutulması gereklidir. Yoksa mıknatısların oluşturduğu manyetomotor kuvvet (MMF) sac malzeme üzerinde boşa harcanmış olacaktır. Sac manyetik akı yoğunluğunu limitlemenin bir diğer sebebi ise demir kayıplarıdır. Çünkü yüksek akı yoğunluklarında demir kayıpları hızla artmaktadır.

Makine boyutları elde edildikten sonra artık bu makinenin SEA programında modellenmesi gerekecektir. SEA programları genel olarak üç aşamada çözüm yapmaktadır.

- Ön hazırlık (Pre-Processing)
- Alan Çözümü (Field Solution)
- Analizlerin değerlendirilmesi (Post-Processing)

Ön hazırlık aşamasında geometrinin oluşturulması, ağ oluşturma (mesh generation), malzeme tanımı ve problem tanımının yapılması gereklidir. Geometrinin oluşturulmasında çeşitli CAD programları kullanılabildiği gibi SEA yapan programların CAD çizim arayüzünde kullanılabilir. Bu çalışmada makine geometrisi Maxwell yazılımının kendi çizim arayüzü ile oluşturulmuştur. Tasarlanan generatör 16 kutuplu ve 48 olukludur. Bir kutup karşısına 3 oluk gelmektedir. Fazlar dengeli olduğu düşünülürse akı yoğunlukları her kutup bölgesinde kendisini tekrarlayacaktır bu nedenle bilgisayarın yapacağı işlem yükünü ve hatayı azaltmak için makine 16 dilime bölünebilir. Aşağıdaki şekil 4.9’da generatör geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 4.9 : Generatör Maxwell modeli

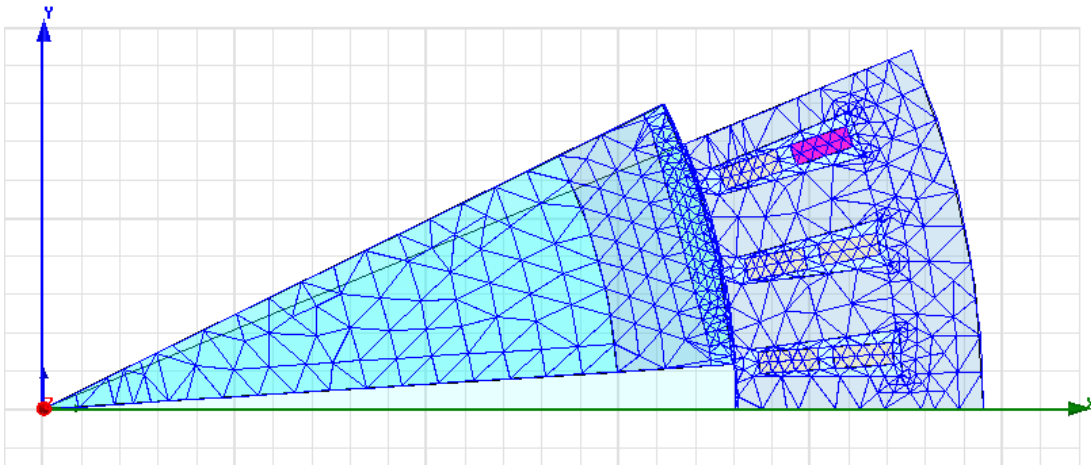
Ağ oluşturma (mesh generation), makinenin kesitinin üçgen parçalara (iki boyutlu çözümde) ya da motor hacminin bloklara (üç boyutlu çözümlerde) ayrılması işlemini içerir. Modern ağ oluşturma çeşitli etkileşimli grafik teknikleri (AutoCAD gibi geleneksel CAD çizim yazılımları yada dahili çizim özelliğine sahip SEA yazılımı kullanılarak) uygulanarak gerçekleştirilir. Bir diğer alternatif ise yüksek programlama dilleriyle yazılmış özel ağ oluşturma kodu kullanımıdır.

Ağ oluşturma yine Maxwell yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Burada önemli olan husus kritik bölgelerde (özellikle hava aralığı) daha sık ağ oluşturmaktır. Maksimum eleman uzunlukları girilerek ağ oluşturma işlemi yapılmıştır. Şekil 4.10'da geometrinin ağ örülmüş hali görülmektedir.

Makinenin dönüşü için döner rotor modeli oluşturulmalıdır. Hava aralığının da kayan bir yüzey oluşturabilmek için hava aralığının en az iki parçaya bölünmesi gereklidir. Maxwell yazılımında döner hareketin tanımlanabilmesi için band tanımlamak gereklidir. Bu bandın içinde kalan parçaların hareket ettiği ve dışında kalan kısımların ise durağan olduğu kabul edilir. Bu band hava aralığının tam ortasından geçmektedir. Böylelikle döner rotor modeli tanımlanmış olur. Bandın

oluşturulmasından sonra rotor dönme hareketinin tanımlanması gereklidir. Rotor “z” ekseninde döner hareket yapacaktır. Rotor dönüş hızı ise 150 min^{-1} olarak programa girilmiştir. Böylelikle program zamana bağlı olarak belirtilen koşullarda rotoru hareket ettirecektir.

Maxwell yazılımı döner alan içerisindeki rotoru, belirlenen hızda döndürerek istenilen zamanlarda, rotorun o anki pozisyonu için manyetik akı yoğunluklarını ve buna bağlı olarak endülenen gerilim ve moment değerlerini hesaplamaktadır. Böylece generatörün dinamik analizini yapmakta, hesaplanan generatör parametrelerinin rotor konumuna ya da zamana göre değişimlerinin elde edilmesini sağlamaktadır.



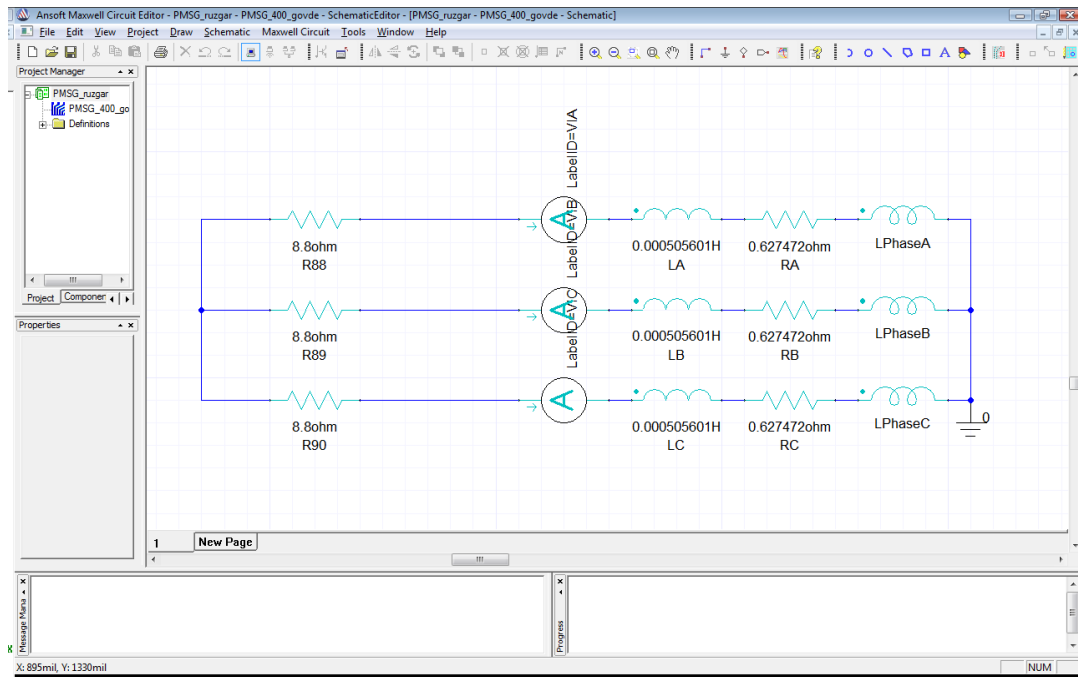
Şekil 4.10 : Ağ oluşturma (mesh generation)

Ağ oluşturma işleminden sonra malzemelerin atanması gereklidir. Malzeme tanımı generatör yapımında kullanılan sac ve mıknatıs malzemelerin doğrusal olmayan B-H özelliklerini içerir. Kullanılacak malzemenin B-H eğrisi ve diğer özellikleri programa girilebilir yada veri tabanındaki malzemeler seçilebilir. Analitik tasarım kısmında stator ve rotor malzemesi M-19 #24, mıknatıslar ise NeFeB olarak seçilmişti, manyetik analizde de yine aynı malzemeler yazılımın veri tabanına eklenerek kullanılmıştır. Sargılar içinse programın veri tabanında bulunan standart bakır kullanılmıştır.

Problem tanımlama, doğru sınır koşullarının uygulanması, uygun sargı elemanlarındaki doğru akım yoğunlukları ve mıknatısların mıknatıslanma yönü tanımını içerir. Yukarıdaki şekilde olduğu gibi makine kesitinin bir kısmı alınıyorsa periyodik sınır koşulları kullanılmalıdır. Diğer bütün dilimlerdeki akı

yoğunluklarının aynı olduğu kabul edilir. Böylelikle işlem yükü ve hatalar azaltılmış olunur.

Sınır koşulların girilmesinden sonra akımların (uyarma) tanımlanması gereklidir. Akımların tanımlanabilmesi içinse akımın geçeceği fazların ve faz içerisindeki iletkenlerin oluşturulması gereklidir. Oluklar içerisindeki iletkenler gruplanarak fazlar oluşturulmuştur. Daha sonra iletkenler üzerindeki akımların yönleri ve sarım sayıları tanımlanmıştır. Maxwell programında akım değerleri doğrudan sayısal olarak girilebildiği gibi dışardan da akım değerleri alabilmektedir. Maxwell programının altında çalışan bir devre editörü programı sayesinde basit devre yapıları oluşturularak akım değerleri elde edilebilmektedir. Bu alt programa Maxwell'de oluşturulan fazlar import edilmelidir. Böylelikle rotor konumuna ve zamana bağlı olarak Maxwell'de hesaplanan faz endüktansları ve endüklenen gerilimler doğrudan elektriksel devrede kullanılabilir. Daha sonra alt programda oluşturulan devre yapısına göre akım değerleri hesaplanır. Elektrik devresinde elde edilen akım değerleri ise tekrar Maxwell programına gönderilir ve bu değerler makine modeli için faz akımları olur. Böylece generatörün dinamik analiz yapılır.



Şekil 4.11 : Generatörün Maxwell Devre Editörü Modeli

Generatörün manyetik analizi için devre editöründe faz çıkışlarına dirençler bağlanarak fazlardan gerekli akımların çekilmesi sağlanacaktır. Bunun için önce Maxwell'den generatör fazları devre editörüne import edildi. Daha sonra generatör

faz dirençleri ve sargı sonu kaçak endüktansları girilerek generatörün elektriksel modeli oluşturuldu. Generatörün faz direnci ve sargı sonu kaçak endüktansı RMXprt programı tarafından hesaplanmıştır bu değerler aynen kullanılmıştır. Faz çıkışlarına ise fazlardan gerekli akımı çekebilmek için dirençler bağlandı. Generatörün endüklediği ortalama faz arası gerilim 405 V ve fazlardan çekilecek akım 23 A olarak hesaplanmıştır. Buradan fazlara bağlanması gereken direnç;

$$R = \frac{405}{23} \cdot \frac{1}{2} = 8.8\Omega \quad (4.36)$$

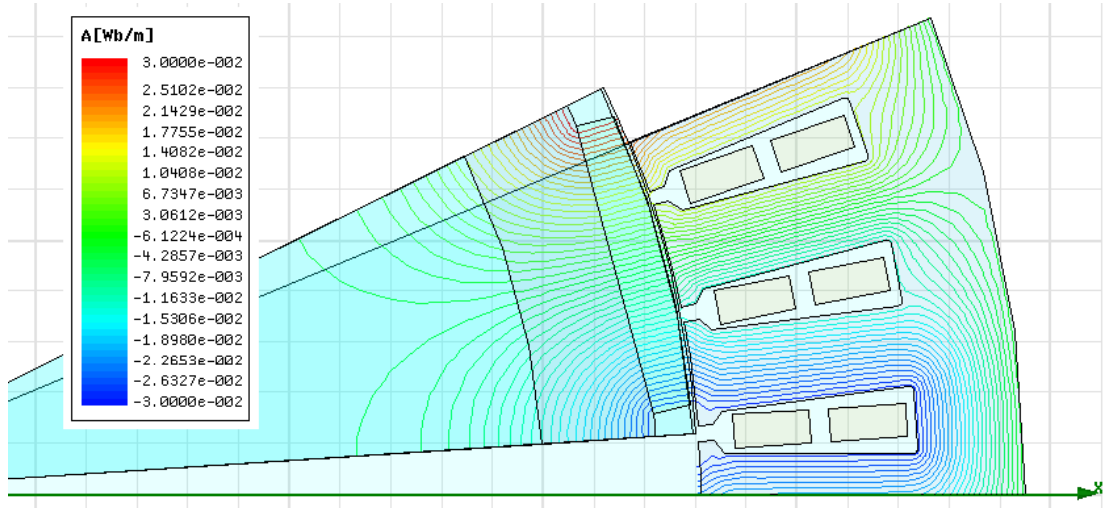
Maxwell devre editöründe oluşturulan devre şeması şekil 4.11’de görülmektedir. Faz akımlarını görebilmek içinse fazlara ampermetreler konulmuştur.

Bir sonraki aşamada ise kuvvet, moment gibi hesaplanması istenilen değerlerin tanımlanması gereklidir. Yapılan çalışmada generatörün rotorundaki moment değerinin hesaplanması istenmektedir. Ayrıca analizin ne kadar süre için yapılacağı ve adım zamanı değerleride programa girilmelidir. Program her bir adımda manyetik alan yoğunluğu, manyetik akı yolları gibi değerleride hesaplamaktadır. Eğer bu parametrelerin zamana bağlı değişimi de gözlenmek isteniyorsa hangi zaman adımlarında bu değerlerin hesaplanacağını programa girilmesi gereklidir. Bütün bu tanımlamalar doğru şekilde yapıldıktan sonra alan çözümü (field solution) yapılabilir.

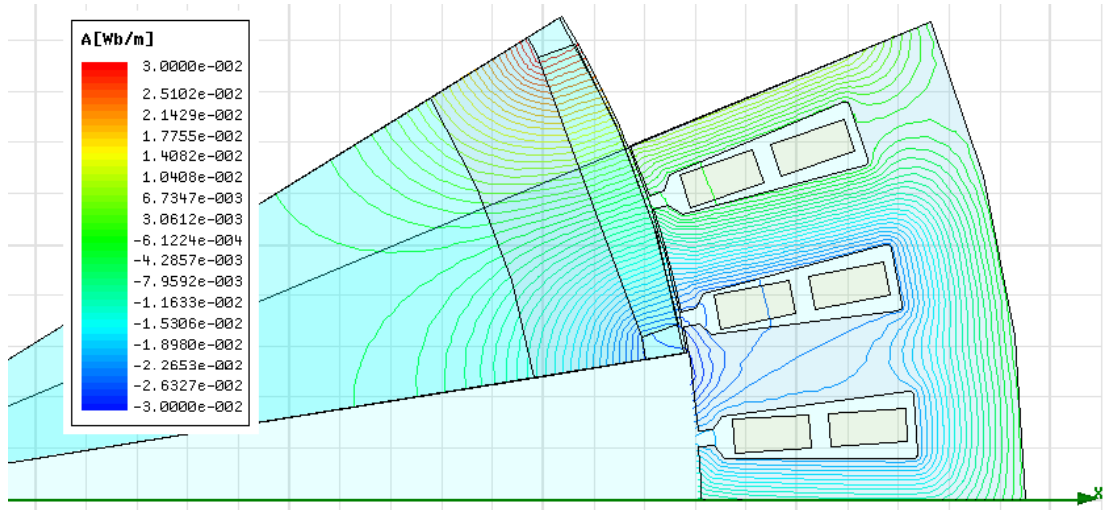
Ayrık kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde uzun yıllar boyunca geliştirilen özel matematiksel algoritmalar kullanır [51]. Bu algoritmalar genellikle, alanda depolanan potansiyel enerji ile ilgili matematiksel bir fonksiyon olan işlevsel enerjinin en aza indirgenmesine dayanmaktadır. Ayrıklaştırma, bilinmeyen düğüm potansiyelleri içeren çok sayıda eş zamanlı doğrusal olmayan cebirsel denklemleri kısmi diferansiyel denklemlere dönüştürür. Burada yineleme esastır ve Newton-Raphson ve Conjugate-Gradient işlemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğrusal elemanlarda, düğüm noktaları arasındaki potansiyelin doğrusal değiştiği ve her eleman için akı yoğunluğunun sabit olduğu farz edilir. Aynı zamanda akım yoğunluğunun da bir sargı ile ilişkili her eleman içinde sabit olduğu varsayılır [47].

Alan çözümü manyetik vektör veya skaler potansiyel ile ilişkilidir ancak tasarım mühendisliğinde akı yoğunluğu, kuvvet ve moment gibi niceliklere de ihtiyaç vardır. Bu niceliklerin potansiyel çözümden elde edilmesine analizlerin değerlendirilmesi

(post-processing) denir. Gerekli bilginin elde edilmesi için iyi etkileşimli bir grafik imkânı önemlidir, böylelikle istenilen parametreler çok sayıdaki potansiyel düğüm noktasından etkin olarak ve hızlıca elde edilebilir. SEA aşağıdaki çıktıları oluşturmak için kullanılabilir:

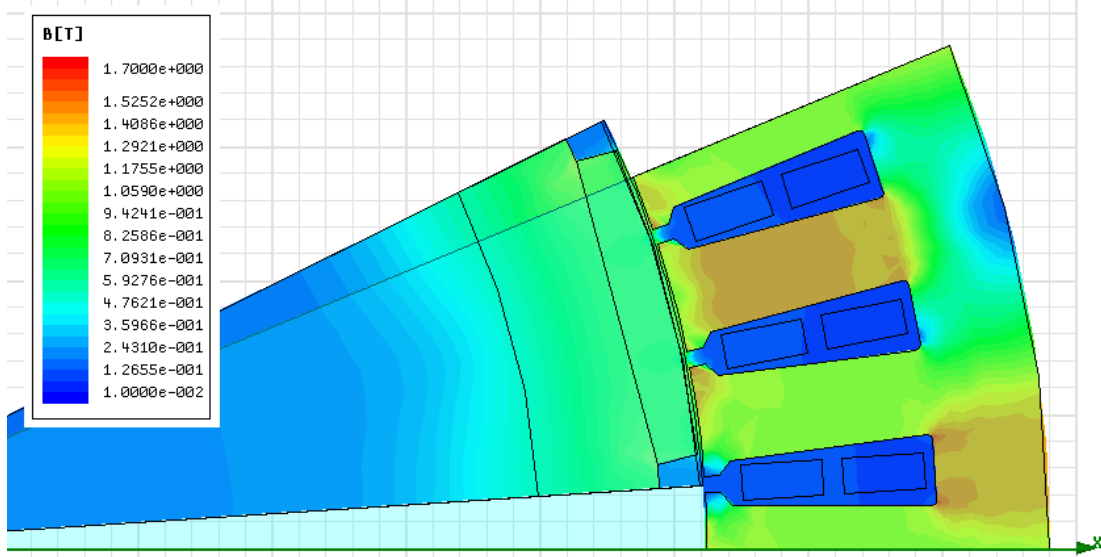


Şekil 4.12 : Boşta çalışmadaki akı yolları (flux plots)

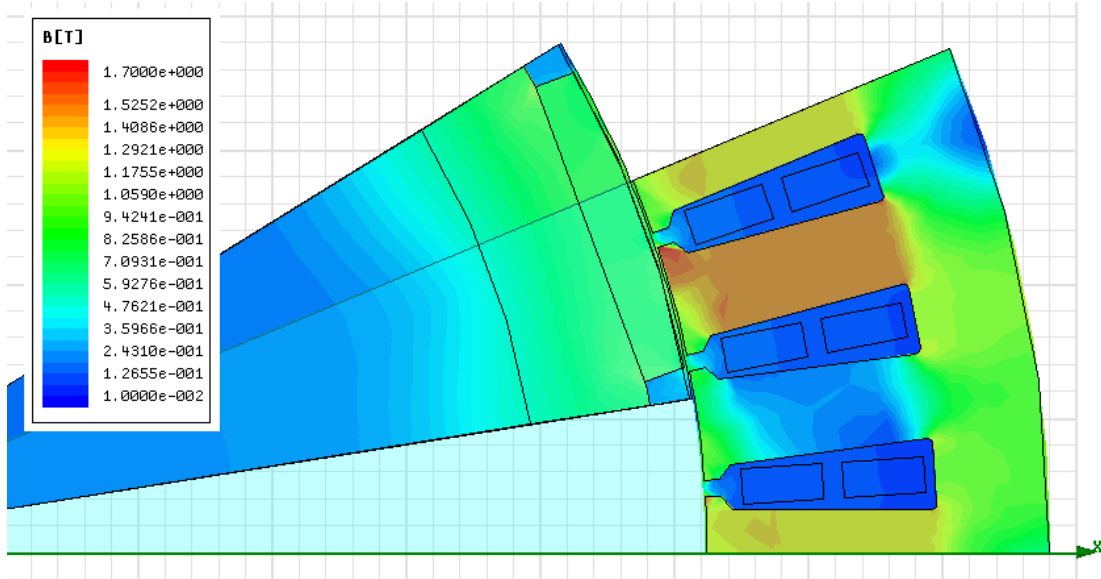


Şekil 4.13 : Anma yükte çalışmadaki akı yolları

Akı yolları (flux plot), özellikle akının bir resmini oluşturmak için yararlıdır. Ayrıca yine kaçak akı tahmini ve kaçak permeance (manyetik iletkenlik) hesaplamak için de kullanılabilir. Şekil 4.12 ve 4.13’de analizi yapılan makinenin yüksüz ve anma yükünde generatör kesitindeki akı yolları görülmektedir. İlgili iki nokta arasındaki akı, noktalar arasındaki vektör potansiyel farkı ile eksenel uzunluğun çarpımı ile hesaplanır. Bu hesaplama, halkalanma akısını (flux linkage) dolayısıyla sargıların endüktansını elde etmek için genişletilebilir.



Şekil 4.14 : Boşta çalışmadaki akı yoğunluğu (sadece mıknatısların etkisi)



Şekil 4.15 : Anma yükte çalışmadaki akı yoğunluğu (iki faz iletimde)

Akı yoğunluğu eşyükselti eğrisi. Makine üzerindeki akı yoğunluklarının görülmesi amacı ile renkli bölgelerde yüksek yerel doyma alanları belirtmek için kullanılır. Herhangi bir noktada Akı yoğunluğu değerleri makine kesiti üzerinde kolaylıkla görülebilir. Şekil 4.14 ve 4.15’de makinenin boşta çalışma ve anma yükte çalışma durumları için manyetik akı yoğunlukları görülmektedir.

Analitik analiz sonucunda boşta çalışmada manyetik akı yoğunluğunun 1.5 T civarlarında olacağı hesaplanmıştı. Yapılan SEA sonucunda boşta çalışma durumu için manyetik akı yoğunluklarının öngörülen değere yakın olduğu görülmektedir.

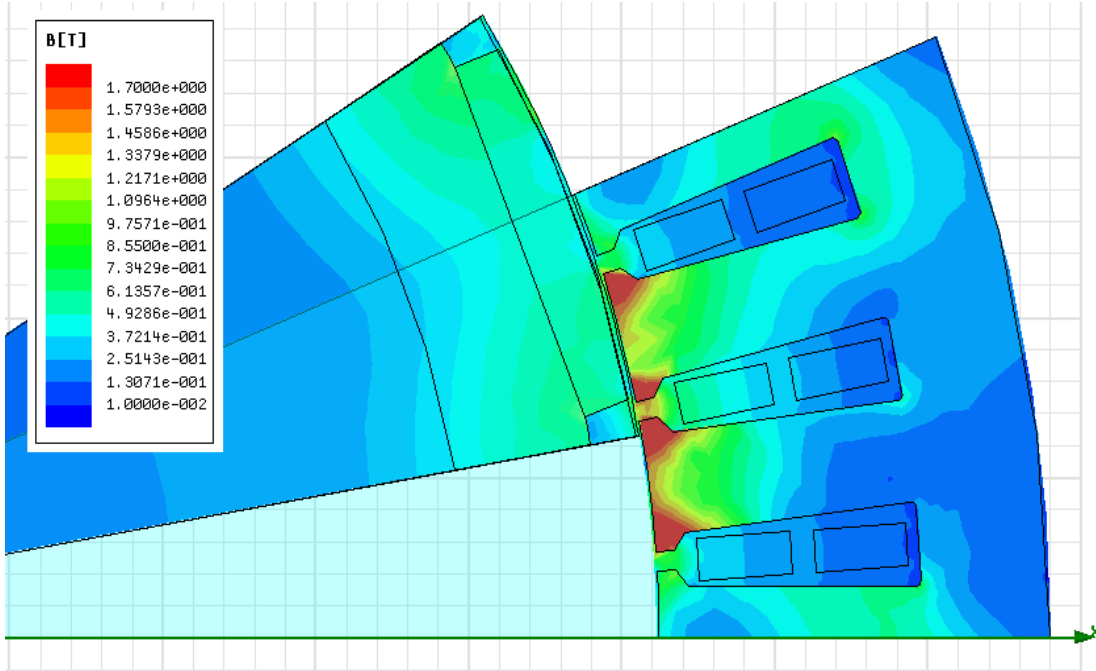
Anma yükte çalışmada ise maksimum akı yoğunluğunun 1.6-1.7 T değerlerinin altında olması istenmekteydi. Analiz sonucunda genel olarak akı yoğunlukları 1.6 T değerlerini aşmamaktadır. Ancak dişlerin uç kısımlarındaki akı yoğunlukları 1.7 T değerlerine ulaşmaktadır. Bunun sebebi kutup geçişleri sırasında akının stator dişlerinde yoğunlaşmasıdır (Rotorun dönüşü sırasında akı kutuplardan geçerken stator dişlerinin uç noktalarında akı yoğunluğu artmaya başlar, kutup dişe yaklaştıkça bu yoğunluk azalır). Bu beklenen bir durumdur. Anma çalışma durumunda stator dişlerinde (diş uç noktaları hariç) ve boyunduruğu ile rotor boyunduruğundaki manyetik akı yoğunluğunun 1.6 T değerlerini geçmediği simülasyon sonuçlarında görülmüştür.

Mıknatısın akı yoğunluğu ise 1 T civarlarındadır. Mıknatıs akı yoğunluğu demagnetizasyon analizi için önemli bir parametredir. Generatörün anma çalışmasında mıknatıslarda demagnetizasyon olmadığı görülmüştür. Ayrıntılı demagnetizasyon için statordan geçecek maksimum akımın bilinmesi gereklidir. Statordan maksimum akımın geçtiği durum ise stator fazlarının kısa devre olduğu durumdur. İstenilen mıknatısların demagnetizasyon olmadan çalışmaya devam etmesidir. Bu sebeple fazların kısa devre olması durumunda mıknatıs akı yoğunluklarının incelenmesi gereklidir.

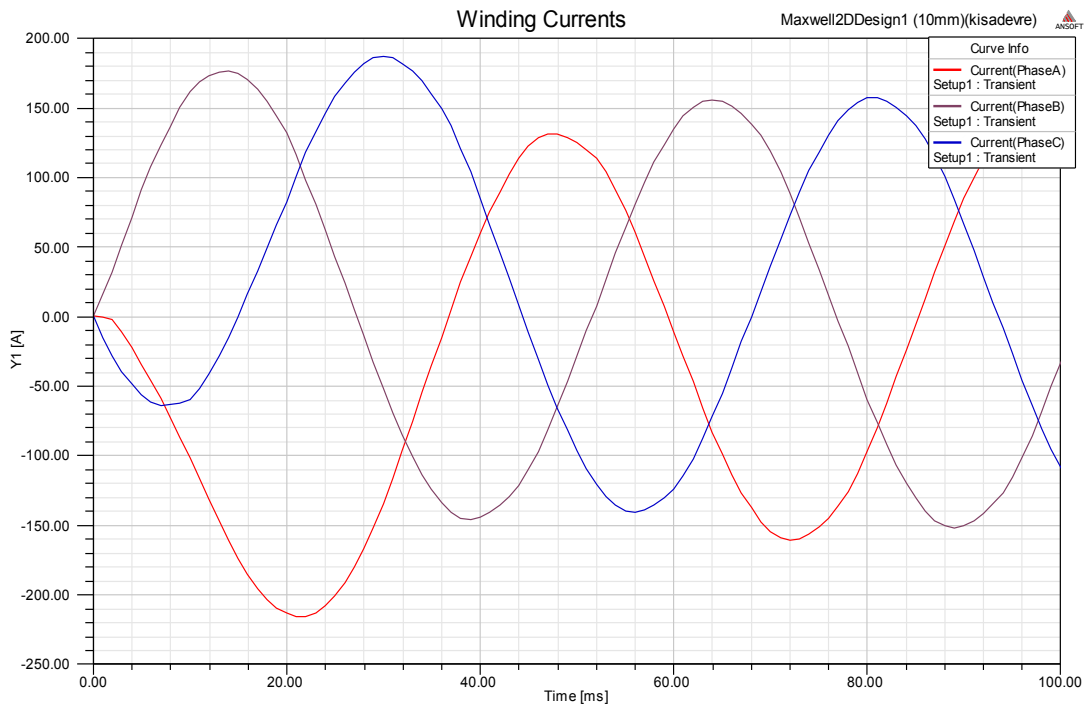
Mıknatısların demagnetizasyon akı yoğunluğu sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Çünkü sıcaklık arttıkça mıknatısın B-H eğrisi negatif yönde azalır. Böylelikle demagnetizasyon olması için gerekli alan şiddetide azalır ve daha kolay demagnetize olur. Tasarlanan generatörde mıknatıs sıcaklıklarının 100°C geçmeyeceği öngörülmektedir. Mıknatısların bu sıcaklıklarda demagnetize olmamaları için faz kısa devresi durumunda mıknatıslar üzerindeki manyetik alan yoğunluğunun 0.3 T değerlerinin altına inmemesi gereklidir. Eğer mıknatıslar üzerine mıknatısları demagnetize edecek kadar büyük alan şiddeti uygulanıyorsa mıknatıs kalınlığını artırarak mıknatısların alan şiddetine dayanımı artırılabilir. Yapılacak demagnetizasyon analizinde eğer mıknatıs akı yoğunlukları istenilen değerin altında kalırsa mıknatıs kalınlığı artırılarak yeniden analiz yapılacaktır. İstenilen değerler sağlanana kadar iterasyona devam edilecektir.

Kısa devre analizi yapabilmek için devre editöründe oluşturulan generatör elektriksel modelinin çıkışına bağlanılan 8.8 Ω dirençler 8.8 m Ω olarak değiştirilmiştir. Stator çıkışındaki dirençler çok küçük olduğundan generatör fazlarından kısa devre akımı

akacaktır. Şekil 4.16 ve 4.17’de kısıadevre durumundaki akı yoğunluğu dağılımı ve faz akımları görülmektedir.



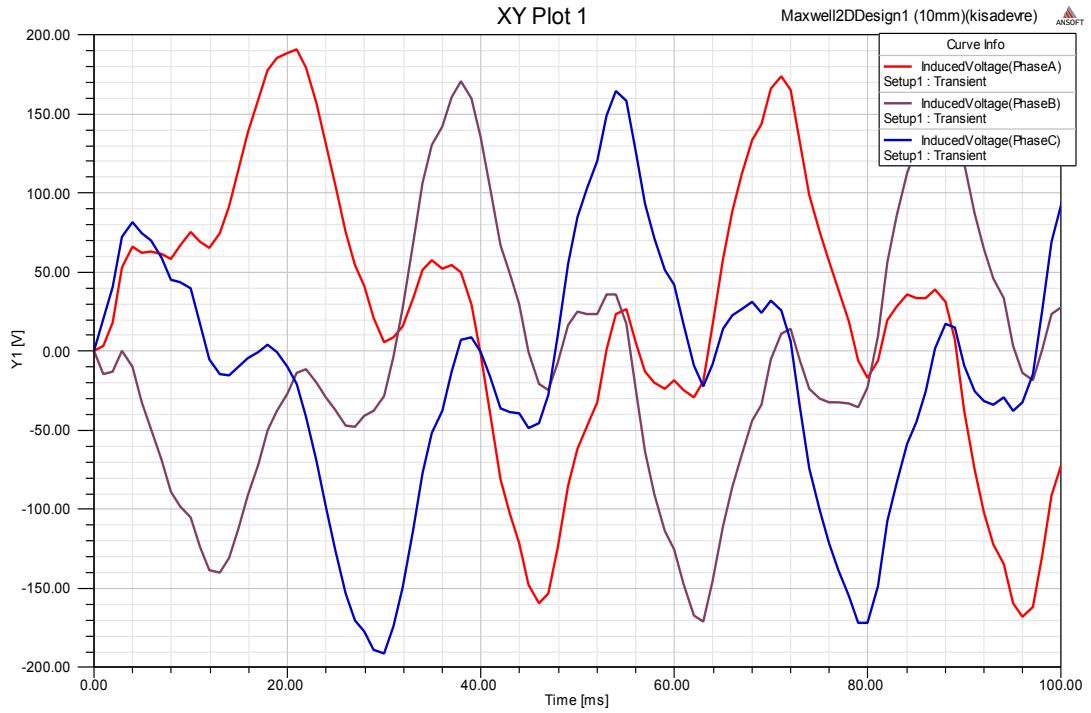
Şekil 4.16 : Kısıadevre durumundaki manyetik akı yoğunluğu



Şekil 4.17 : Kısa devre durumundaki faz akımları

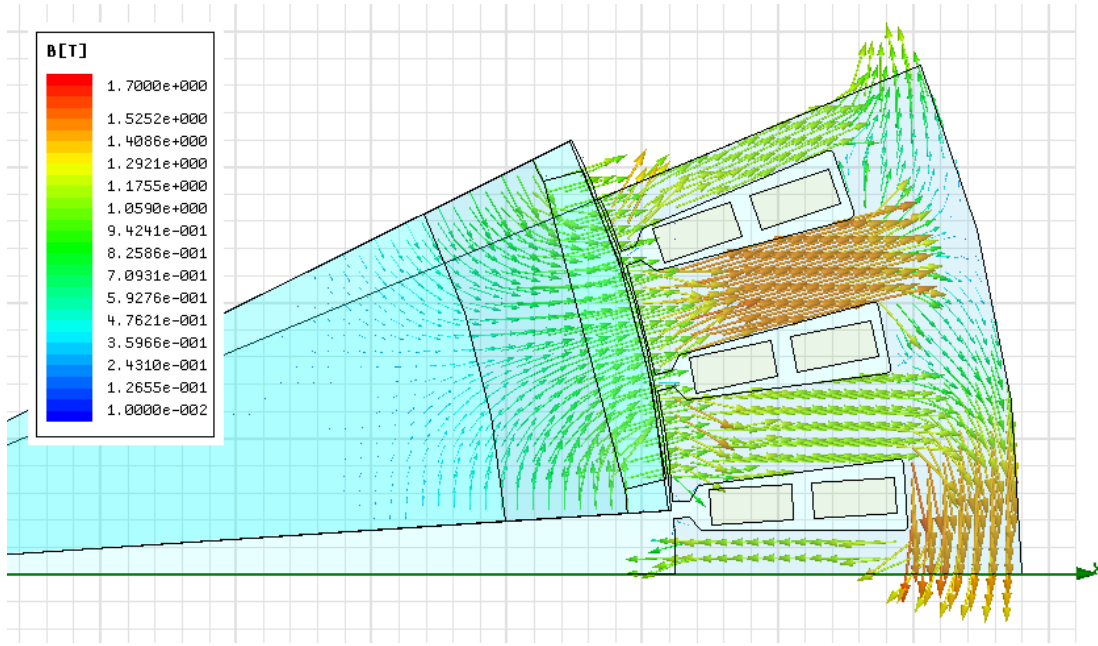
Kısa devre durumunda mıknatıslardaki manyetik akı yoğunluğunun 0.5-0.6 T civarlarında kaldığı görülmüştür. Mıknatısların demagnetizasyon akı yoğunluklarının üzerinde bir değerdir. Buradan generatörün kısa devre durumunda mıknatısların

demagnetize olmayacağı görülmektedir. Mıknatıslardaki manyetik akı yoğunlukları demagnetizasyon değerinin üzerindedir. Eğer mıknatıs temini, fiziksel yerleşim sorunu gibi mıknatıs boyutunun önem kazandığı bir durum söz konusu olsaydı mıknatıs kalınlığı biraz daha küçültülebilirdi. Ancak yapılan çalışmada böyle bir kısıtlama olmadığından mıknatıs kalınlığının 10 mm kalmasına karar verilmiştir. Ortalama kısa devre akımı 109 A civarındadır. Kısa devre durumunda stator'dan geçen manyetik akı azaldığı için endüklenen gerilimde düşmektedir. Kısa devre durumunda fazlarda endüklenen gerilimler şekil 4.18'deki gibidir.

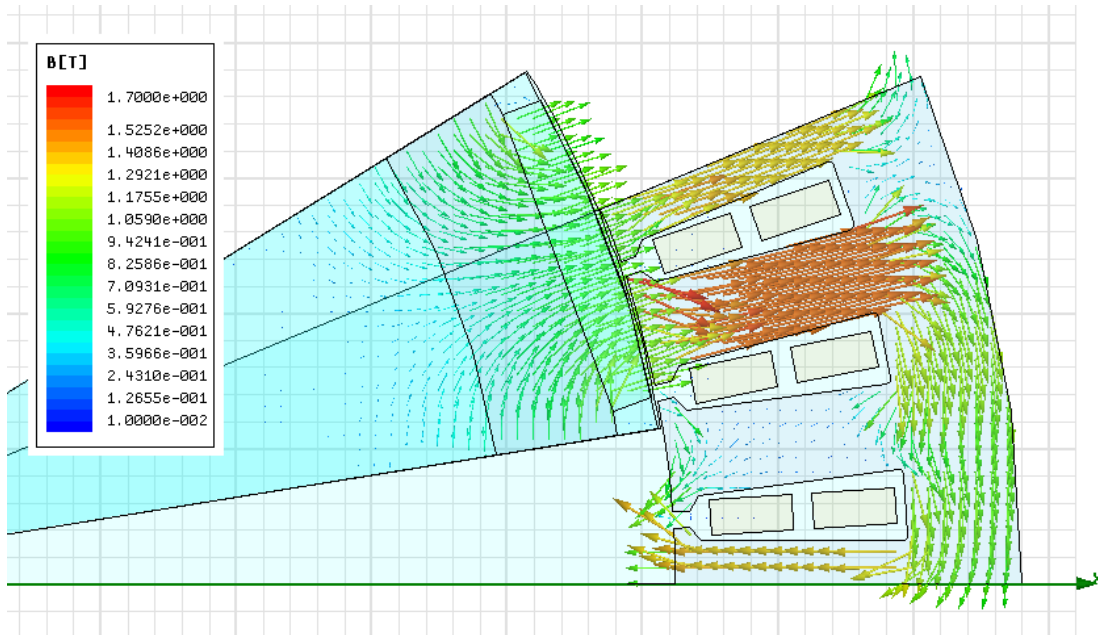


Şekil 4.18 : Kısadevre durumunda endüklenen faz gerilimleri

Manyetik akının doğru yönde ve doğru büyüklükte olup olmadığını anlayabilmek için akı vektörlerinin incelenmesi gereklidir. Maxwell yazılımı manyetik akı vektörlerini hesaplamakta ve görsel olarak verebilmektedir. Böylelikle generatör üzerindeki akının izlediği yol ve nerelerde ne büyüklüklere ulaştığı ayrıntılı olarak görülebilmektedir. Şekil 4.19 ve 4.20'de ise makinenin boşa ve anma yükte çalışma durumlarındaki akı vektörlerinin büyüklüğü ve doğrultusu gösterilmiştir.



Şekil 4.19 : Boşta çalışmadaki akı vektörleri

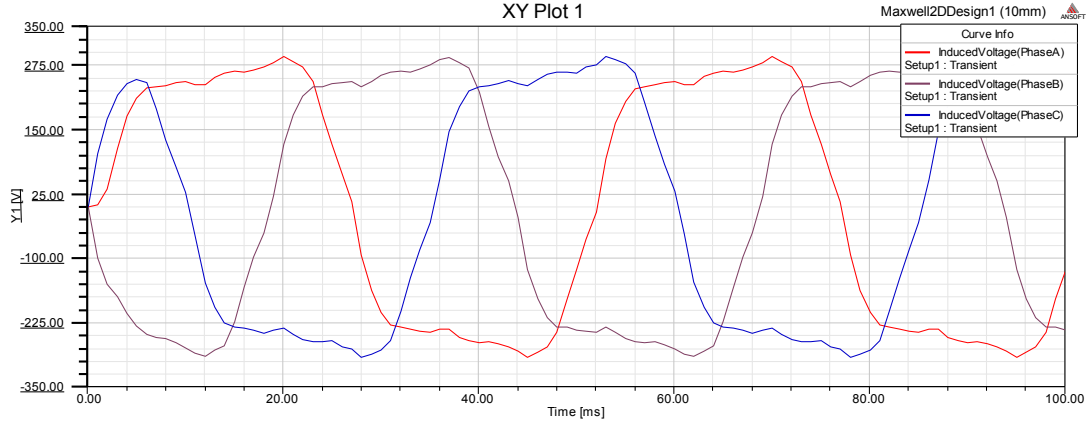


Şekil 4.20 : Anma yükte çalışmadaki akı vektörleri

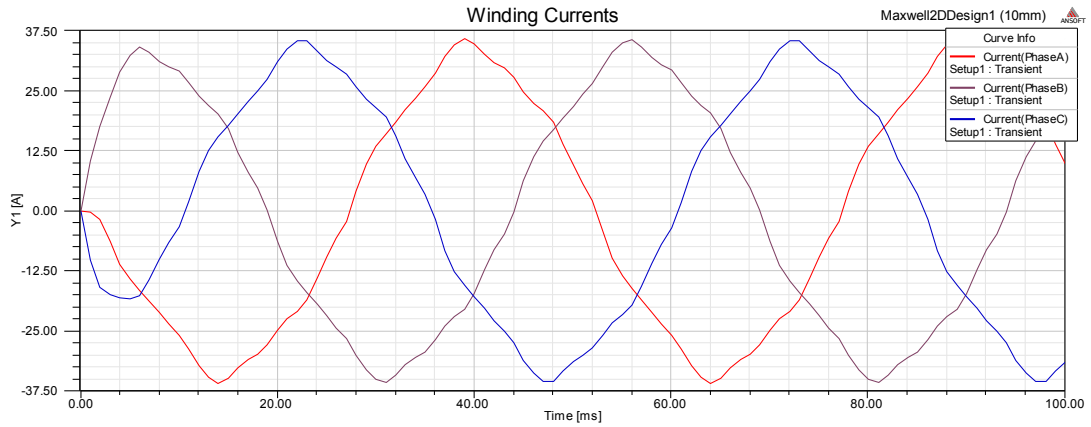
Akı vektörlerinin dağılımları ve izlediği yollarda anormal bir durum yoktur, akı yoğunlukları istenilen değerlerdedir. Manyetik olarak generatörde kritik görülen bir nokta oluşmamıştır. Akı yolları ve manyetik akı yoğunlukları istenilen değerlerdedir.

SEA'nin bir diğer önemli çıktısı ise endüklenen gerilim ve mil momentinin hesaplanmasıdır. Generatörün kutup sayısı fazla olduğundan hava aralığındaki kaçak akılar artacaktır. Bu sebeple endüklenen gerilim ve mil momenti değerlerinin analitik yöntemlerle hesaplanan değerleri ile gerçek değerleri arasında fark olabilmektedir.

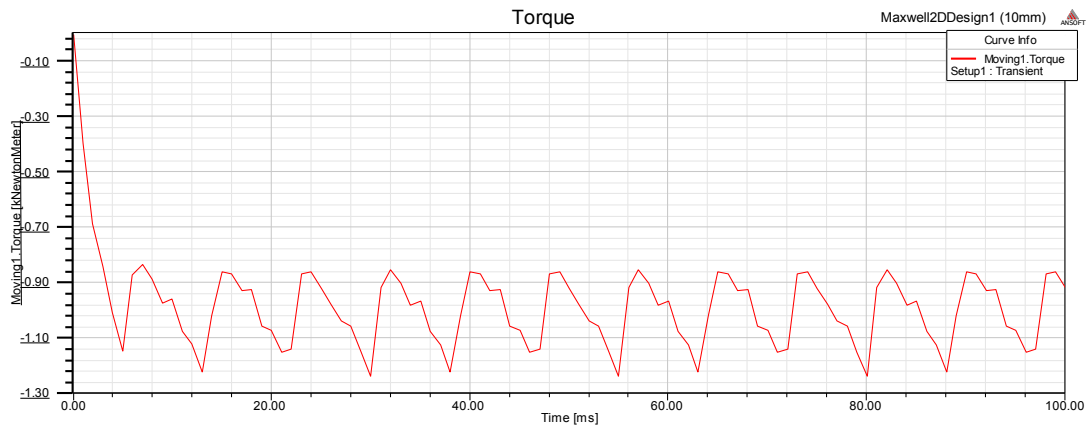
Yani çok kutuplu makinelerde analitik hesaplar hatalı sonuçlar verebilmektedir. Bu sebeple endüklenen gerilim ve mil momenti değerlerinin SEA ile hesaplanması gerçeğe daha yakın değerler verecektir. Yapılan SEA sonucunda elde edilen faz gerilimleri, faz akımları ve generatör milindeki moment değerleri sırasıyla şekil 4.21, 4.22 ve 4.23’de görülmektedir.



Şekil 4.21 : Anma akımındaki faz gerilimleri (faz-nötr)

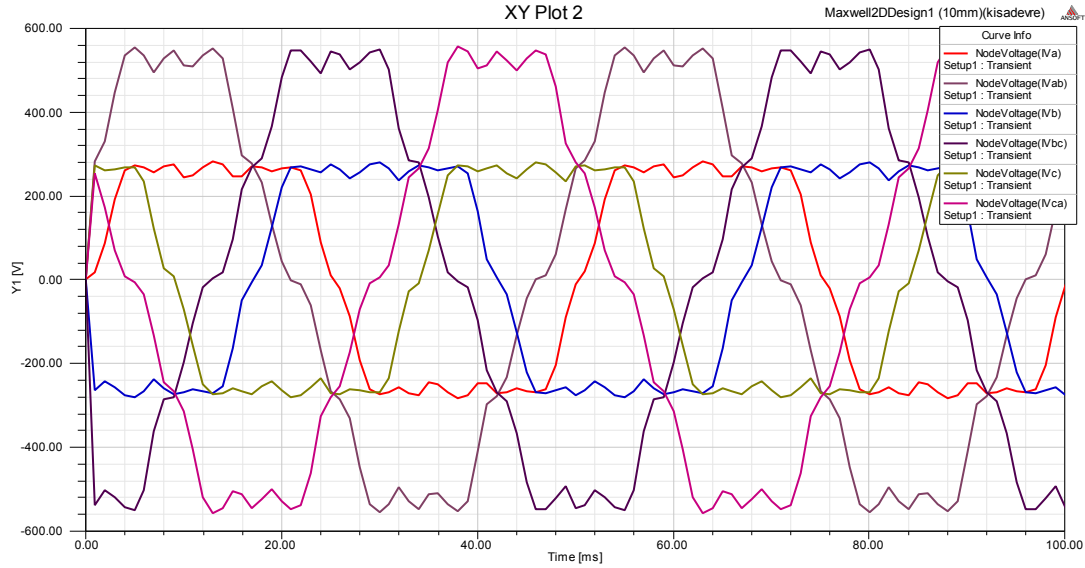


Şekil 4.22 : Faz akımları



Şekil 4.23 : Generatör mil momenti

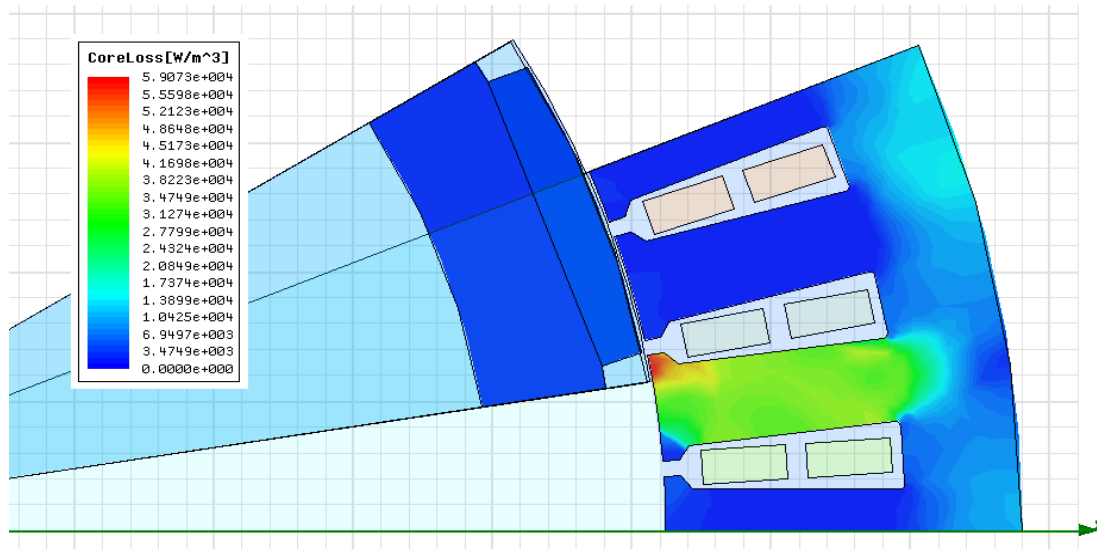
Anma akımındaki faz gerilimleri ortalama 250 V civarındadır. Faz akımları 23 A ve mil momenti ise 1040 Nm civarındadır. Generatörün endüklenen açık devre faz-faz ve faz-nötr gerilimleri de şekil 4.24’de verilmiştir.



Şekil 4.24 : Generatör açık devre gerilimleri

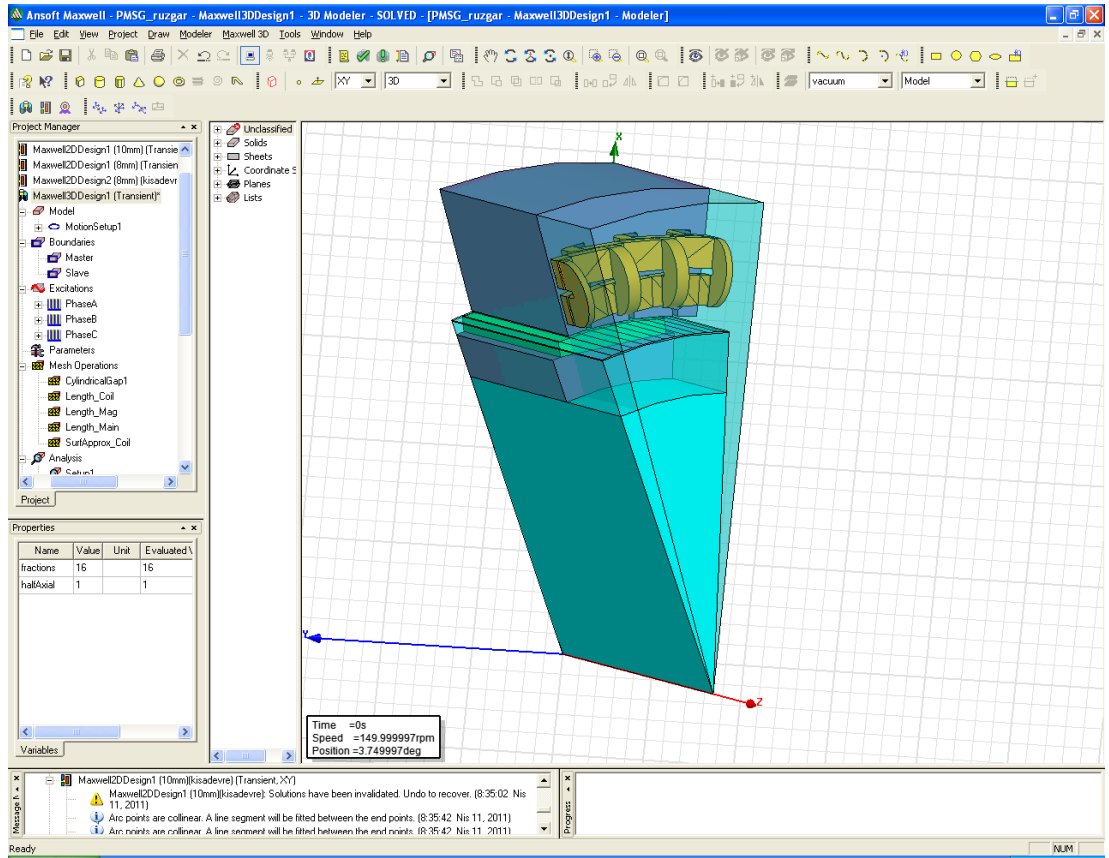
Endüklenen gerilimler, akım ve moment değerleri tasarım aşamasında hesaplanan değerlere yakındır. Analiz sonucunda generatörün istenilen gerilimi üretebildiği görülmüştür.

Generatör anma çalışması sırasında saclarında oluşan demir kayıplarının dağılımı şekil 4.25’deki gibidir. Burada sadece oluşan anlık kayıp gücü değerler W/m^3 olarak gösterilmiştir.



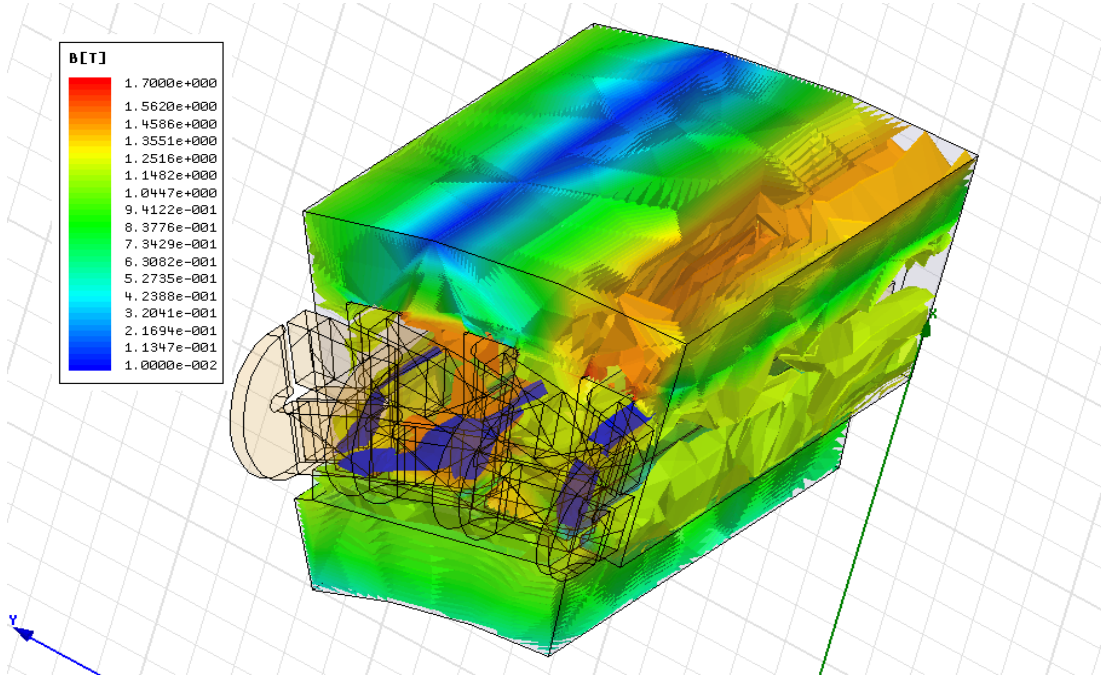
Şekil 4.25 : Generatör demir kaybı

İki boyutlu sonlu elemanlar analizi, üç boyutlu analize göre daha pratiktir ve işlem yükü daha azdır. Böylece daha hızlı bir çözüm sunar. Ancak ayrıntılı bir analiz için makine geometrisini üç boyutlu çözdürmek daha doğru sonuçlar vermektedir. Üç boyutlu analizde eksenel yöndeki akı vektörleride hesaba dahil edilecektir. Tasarımda makinenin üç boyutlu manyetik analizde yapılacaktır. Üç boyutlu analiz için yine ANSOFT Maxwell yazılımı kullanılacaktır. Üç boyutlu analizde iki boyutlu analizden farklı olarak genaratör geometrisi modele üç boyutlu olarak girilecektir. Malzeme özellikleri akım değerleri ve sınır koşulları gibi motor geometrisinden bağımsız parametreler yine aynı kalacaktır ancak ağ yapısının (mesh) üç boyutlu olarak yeniden oluşturulması gerekecektir. Faz akımlarının hangi iletken boyunca ve ne yönde akacağını doğru bir şekilde modele girilmesi gereklidir. Şekil 4.26'da makinenin üç boyutlu Maxwell modeli görülmektedir (iki boyutlu model de olduğu gibi makine geometrisi 16 dilime bölünmüştür).

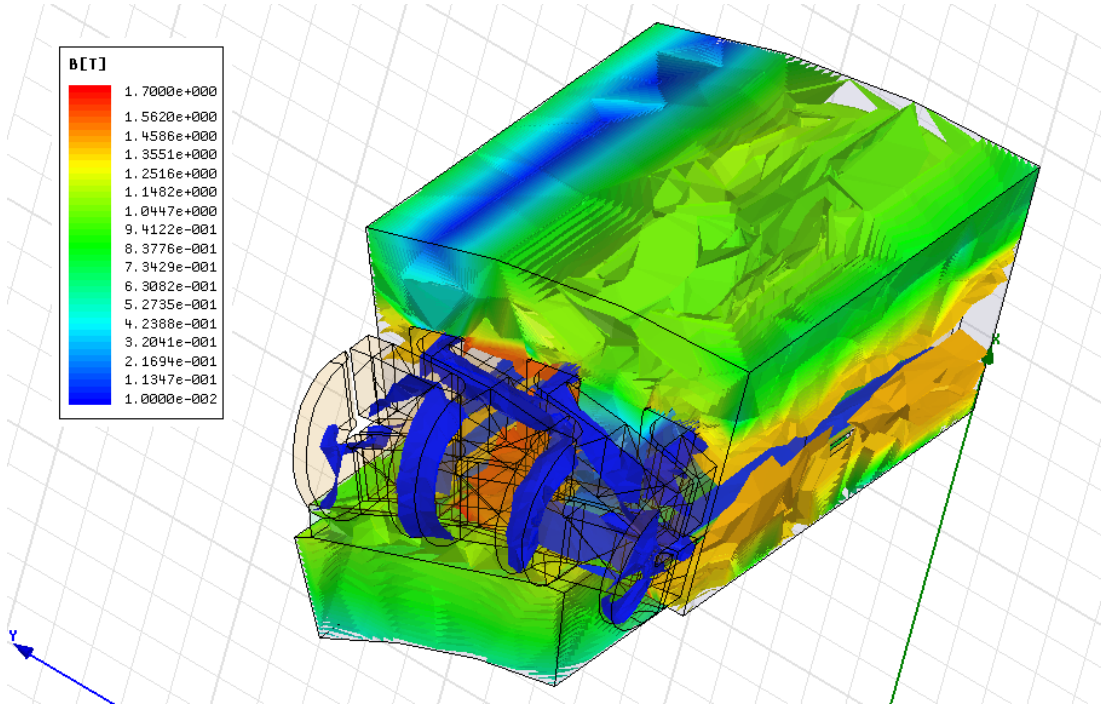


Şekil 4.26 : Generatörün 3 boyutlu maxwell modeli

İki boyutlu analizde elde edilen bütün sonuçlar üç boyutlu analiz sonucunda da elde edilmiştir. Şekil 4.27 ve 4.28'de üç boyutlu manyetik analiz sonuçları görülmektedir.

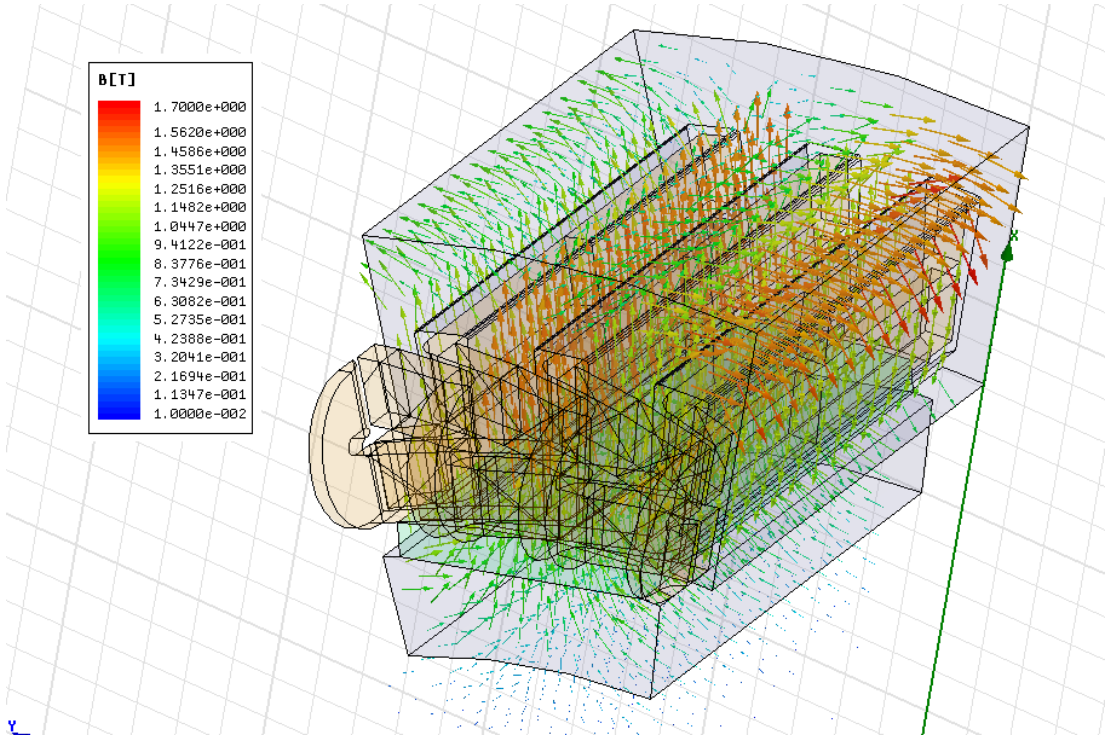


Şekil 4.27 : Boşta çalışmadaki akı yoğunluğu (3D analiz)

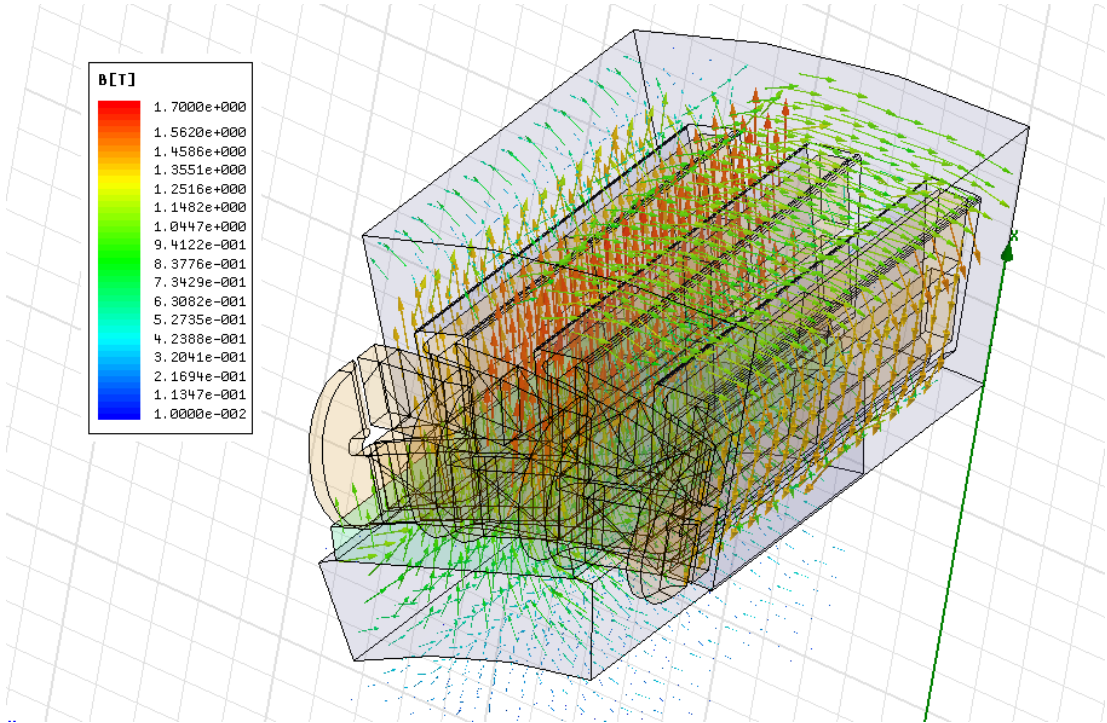


Şekil 4.28 : Anma yükte çalışmadaki akı yoğunluğu (3D analiz)

Üç boyutlu SEA sonucunda akı yoğunluklarının yine istenilen değerlerde kaldığı görülmüştür. Şekil 4.29 ve 4.30'da manyetik alan vektörlerinin büyüklüğü ve doğrultusu görülmektedir.

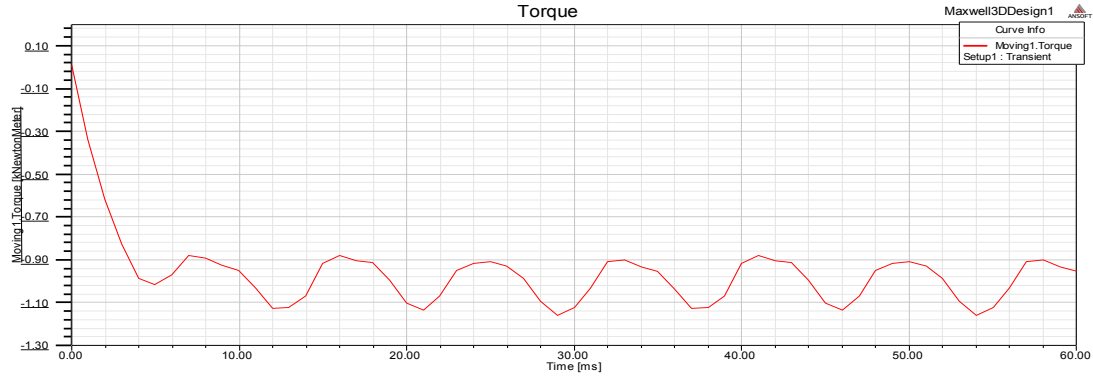


Şekil 4.29 : Boşta çalışmadaki akı vektörleri (3D analiz)

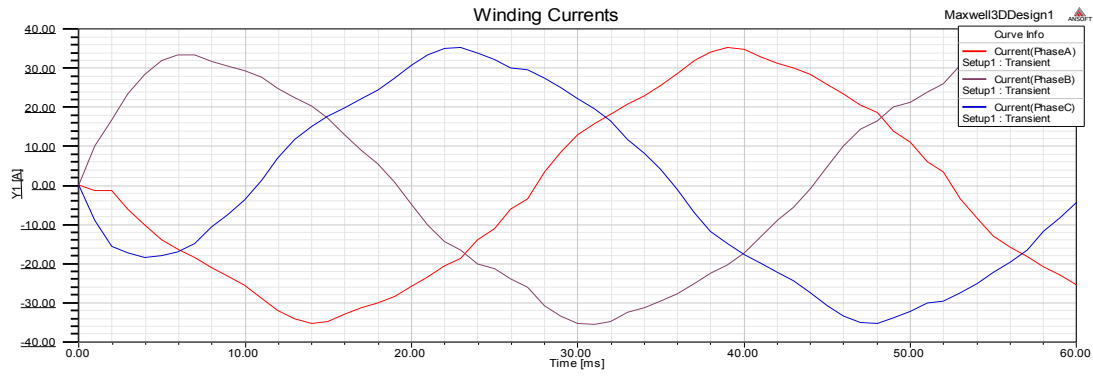


Şekil 4.30 : Anma yükte çalışmadaki akı vektörleri (3D analiz)

Üç boyutlu analiz sonucundaki makine mil momenti, faz akımları ve faz gerilimleri sırası ile şekil 4.31, 4.32 ve 4.33’de görülmektedir.



Şekil 4.31 : Makine mil momenti (3D analiz)



Şekil 4.32 : Faz akımları (3D analiz)



Şekil 4.33 : Generatör faz gerilimleri

İki boyutlu analiz ile üç boyutlu analiz sonuçları birbirine yakındır. Analiz sonucunda akı vektörlerinin izlediği yollar düzgündür. Manyetik akının generatör hacmindeki dağılımında da bir anormallik yoktur. Üç boyutlu analizde gözlemlenen akı yoğunluğu ile iki boyutlu analizde elde edilen değerler birbirleri ile örtüşmektedir. Mil momenti, faz akımları ve endüklenen faz gerilimleri de yine iki boyutlu analiz sonucuyla yaklaşık aynıdır.

SEA ile yapılan manyetik alan hesapları sonucunda makinenin anma çalışmada istenilen akım değerlerini sağladığı görülmüştür. Anma çalışma durumunda generatörde doyma olmamış ve akı yoğunlukları kabul edilebilir değerlerde kalmıştır. Manyetik açıdan generatör isterleri sağlamaktadır.

4.3 Isıl Analiz

Elektrik makinesi tasarımında ısı analiz, manyetik analiz kadar önemlidir. Elektrik makinalarındaki ısı taşınımı ve akışkan dinamiği, elektromanyetik davranışa göre doğrusallıktan daha uzak (nonlinear), daha karmaşık ve çok daha zordur. Genel olarak basitleştirilmiş eşdeğer devreler kullanılarak çözüm yapılmaktadır. Isıl analizin iki önemli yönü vardır. Bunlar ısı aktarımı ve generatör içerisindeki ısı dağılımıdır.

Generatör çalışırken, ısı kayıplar meydana gelir. Bunlar genel olarak demir kaybı, bakır kaybı, sürtünme kaybı gibi isimlendirilirler. Bakır kaybı, malzemenin akıma karşı olan direncinden oluşan bir kayıptır, akımın karesi ve bakır direnci ile doğrusal olarak artar. Sıcaklık arttıkça bakır iç direnci, dolayısıyla da kayıplar artar. Mesela akım aynı tutulduğunda, 50°C'lik bir artış bakır kaybını %20, 135°C'lik artış ise %53 artırır. Ayrıca akımın frekansı arttıkça akım iletkenin dış kısımlarından akmaya çalışır, buna deri etkisi denir. Akımın aktığı alan azaldığından iletkenin direnci artar ve kayıplara neden olur. İletkenler demetler halinde sarılarak bu kaybın etkisi azaltılır. Bununla beraber, manyetik akının sac üzerinde oluşturduğu kayıplarda vardır. Bu kayıplara demir kaybı da denmektedir.

Manyetik malzemeye bir alan şiddeti uygulandığında manyetik alan yoğunluğu oluşur, alan şiddeti kaldırıldığında alan yoğunluğu sıfır değerine ulaşmaz ve malzeme üzerinde artık mıknatısiyet kalır. Alanın sürekli yön değiştirmesi durumunda sürekli bir kayıp meydana gelir. Bu kayba histerezis kaybı denilir ve manyetik akının frekansı ve genliği ile orantılıdır. Ayrıca manyetik akının oluşturduğu girdaplardan kaynaklı fuko kayıpları vardır. Stator ve rotor ince sac paketlerden oluşturularak bu kayıpların etkisi azaltılabildiği gibi ayrıca sac içerisine manyetik direnci artırmak amaçlı katılan silisyumda fuko kayıplarının azalması sağlanır. Kayıplar generatör üzerinde ısı olarak açığa çıkar.

Bu kayıpların dışında makinenin mekanik aksamlarındaki sürtünmelerden kaynaklı mekanik kayıplarda vardır.

Sıcaklık artışı generatör üzerindeki çeşitli malzemelere zarar vermektedir. Generatörün daha verimli ve sağlıklı bir şekilde çalışmasına devam edebilmesi için ısı olarak açığa çıkan bu kayıp enerjinin makineden uzaklaştırılması gereklidir. Böylelikle elektrik makinesinin ısınması engellenir. Bu işleme makinenin soğutulması denilmektedir. Birçok elektrik makinesinde ısı, bağlantı noktalarından ısının iletimi, havanın taşınımı ve radyasyon (ışınım) şeklinde uzaklaştırılır.

Generatör içinde sıcaklık dağılımı aslında bir difüzyon sorunudur. Hacimsel etkiler ve iletken demetleri arasındaki yada iletkenle oluk izolasyonu arasındaki termal dirençler gibi ölçülemeyen parametrelerden dolayı ısı analizi tam olarak yapmak çok zordur. Isıl hesaplamalar için çeşitli ampirik formüller geliştirilmiştir.

İletimle yapılan ısı aktarımında aktarılan enerji, ısının aktığı alan, ısıl iletkenlik ve sıcaklık farkı ile doğru, ısının ilerlediği alanla ters orantılıdır. Taşıma ile aktarılan enerji miktarını veren ifade;

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \approx k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{t} \quad (4.37)$$

Burada “ ΔT ” iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı, “ t ” ısının ilerlediği kalınlık, “ k ” termal iletkenlik (W/°C-m), “ A ” ısının geçtiği alandır. Termal iletkenlik malzemenin özelliğidir ve genellikle sıcaklıkla değişir. Bir çok metalin ısıl iletkenliği yüksektir ancak elektriksel izolasyon malzemeleri ile çoğu akışkan düşük ısıl iletkenliğe sahiptir.

Taşıma ile ısı aktarımı Newton Yasası’na dayanır ve aşağıdaki ampirik formülle ifade edilir.

$$\frac{Q}{A} = h \cdot \Delta T \quad (4.38)$$

Burada “ h ” ısı taşınım katsayısıdır (W/m²/°C). Bu değer viskozite, ısıl iletkenlik, özgül ısı, soğutucunun diğer özelliklerine ve aynı zamanda soğutucunun viskozitesine bağlıdır. Eğer akışkanın debisi fan, pompa ile desteklenmiyorsa doğal taşınım denir. Eğer akışkan dışardan destekleniyorsa buna zorlanmış taşınım denir.

Isı enerjisi ışıma ile uzaklaştırılması ise radyasyondur. Radyasyon “*Stefan – Boltzmann*” eşitliğiyle tanımlanır.

$$\frac{Q}{A} = e \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (4.39)$$

Burada “ σ ” “*Stefan-Boltzmann*” sabitidir ve değeri siyah yüzeyler için 5.67×10^{-8} W/m²/K⁴ dir. Siyah yüzeylerin kusursuz bir ışınmı vardır. Gerçek yüzeylerde ise radyasyon mükemmel değildir bu sebeple siyah yüzeylere göre bağıl bir yayılım (ısı salım) değeri vardır ve “ e ” olarak tanımlanır. Siyah laklı (vernikli) yüzeyler 0.98 yayılım değerlerine ulaşabilirler ancak pratikte 0.9 değeri alınır.

Generatörün soğutulması zorlanmış taşınım olarak düşünülmüştür. Soğutma sisteminde zorlanmış taşınım etkin ısı iletim şeklidir. Generatörde oluşan ısı rüzgâr ile uzaklaştırılacaktır. Generatör 10 m/s rüzgâr hızında anma gücüne ulaşacaktır. Rüzgâr kanatlardan geçerken hızının bir kısmını kaybedecektir. Generatör, pervanelerin gerisinde olacağından generatöre gelecek rüzgâr hızı daha düşük olacaktır. Generatörün ısı analizinin yapılabilmesi için generatör üzerinden geçecek rüzgâr hızının hesaplanması gereklidir.

Rüzgârdan faydalanma katsayısı en fazla % 59.3 (16/27)’dir (Betz limiti). Bu limit rüzgâr türbininden geçen havanın momentumuna bakılarak türetilmiştir. Türbine gelen havanın bir kısmı başka yönler sapar. Bu durum rotor kanatlarından geçen rüzgâr hızının, rüzgârın serbest akış hızına göre daha yavaş olmasına neden olur. Rüzgârın hızının türbinden geçerkenki azalma oranına indiksiyon faktörü denir ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\alpha = \frac{u_1 - u_2}{u_1} \quad (4.40)$$

Burada “ α ” indiksiyon faktörü, “ u_1 ” türbinden uzak bir noktadaki rüzgâr hızı, “ u_2 ” rotorlardaki rüzgâr hızıdır. Rüzgârın türbinden geçerken hız kaybettiği belirtmişti. Momentumun korunumu gereği türbin kanatlarında rüzgâr akışına karşı bir direnç oluşur. Böylece rüzgârın kanatlardan geçişi sırasında basınç düşer, türbinin önünde yüksek basınç ve arkasında alçak basınç oluşur. Bu basınç farkı kanatlarda itme kuvveti oluşturur. Türbin üzerindeki bu basınç düşümü için Bernolli denklemleri kullanılır. Betz bu denklemleri kullanarak türbinden geçen ve türbindeki hızları

rüzgâr hızına ve indüksiyon faktörüne bağlı olarak elde etmiştir. Bu bağıntılar aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} u_2 &= u_1(1-\alpha) \\ u_4 &= u_1(1-2\alpha) \end{aligned} \quad (4.41)$$

Burada “ u_4 ” türbinden ayrılan rüzgâr hızıdır. Generatörün soğutulması için bu rüzgârdan faydalanılacaktır ve ısı tasarımı için önemli bir parametredir. Faydalanma katsayısının indüksiyon faktörüne bağlı fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$C_p = 4\alpha(1-\alpha)^2 \quad (4.42)$$

Literatürde β değeri 7 için rüzgârdan faydalanma katsayısı 0.45 alınması uygundur. $C_p=0.42$ için türbinin arkasındaki rüzgâr hızının hesaplanması gereklidir. Denklem (4.42)’de “ C_p ” yerine 0.42 yazılıp kökleri bulunursa, kökler sırasıyla “0.159” “0.546” ve “1.295” olur. 10 m/s rüzgâr hızı için bu değerler denklem (4.41)’de yerine konulursa; “ u_4 ” rüzgâr hızları sırasıyla “6.82” “-0.92” ve “-15.9” olur. Buradan 10 m/s rüzgâr hızı için türbin gerisindeki rüzgâr hızının 6.82 m/s olacağı görülür. Hesaplamalarda bu değerin 6.5 m/s alınması uygun olacaktır. Generatörde oluşan ısı generatör gövdesine yapılacak kanatçıklar yardımıyla rüzgâra aktarılacak makineden uzaklaştırılacaktır.

Bir katı cidar üzerinde, farklı sıcaklıkta bir akışkanın bulunması durumunda, yüzey üzerindeki herhangi bir noktada, cidar ile akışkan arasındaki ısı geçişi, Newton’un soğuma kanuna göre:

$$q'' = h.(T_o - T_\alpha) \quad (4.43)$$

hesaplanır.

q'' : Isı akışı (cidardan akışkana birim alandan geçen ısı miktarı W/m²)

h : ısı taşınım katsayısı W/m².K

T_o : Cidar sıcaklığı °C

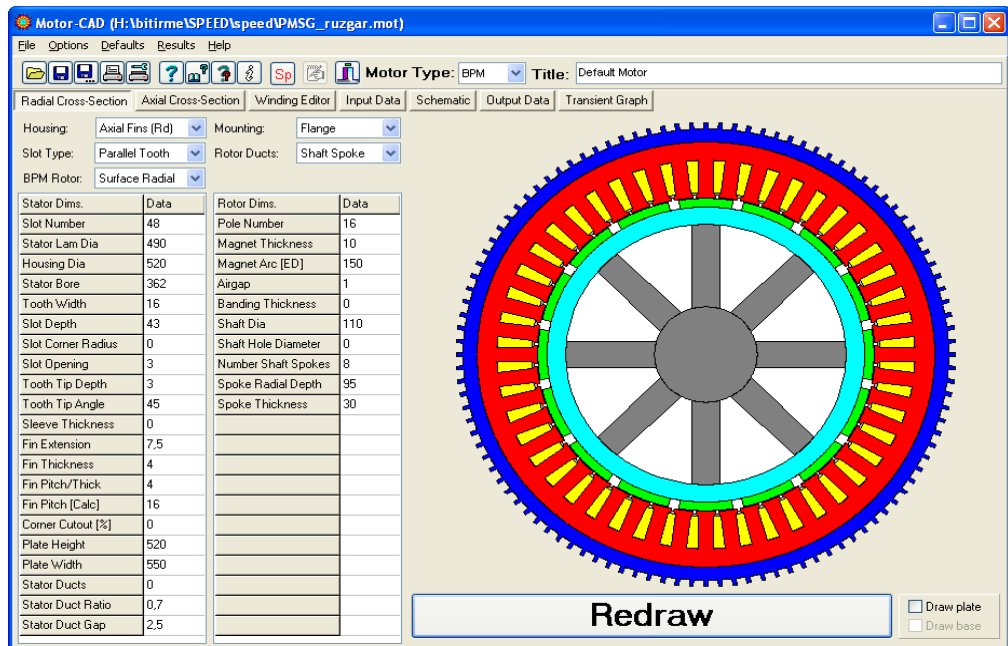
T_α : akışkanın sıcaklığı °C

$\bar{h}$, ortalama ısı taşınım katsayısı, akışkan cinsine, akış şekline ve geometriye bağlı bir büyüklüktür. Akışkanın generatörden aldığı ısı miktarı (ısı çekebilme yeteneği), akışkanın ısı taşınım katsayısına, ortalama akış sıcaklığına, cidar sıcaklığına ve yüzey alanına bağlıdır. Bu parametreler arasında büyüklük olarak alınan ısı miktarını belirleyen en önemli faktör ısı taşınım katsayısıdır.

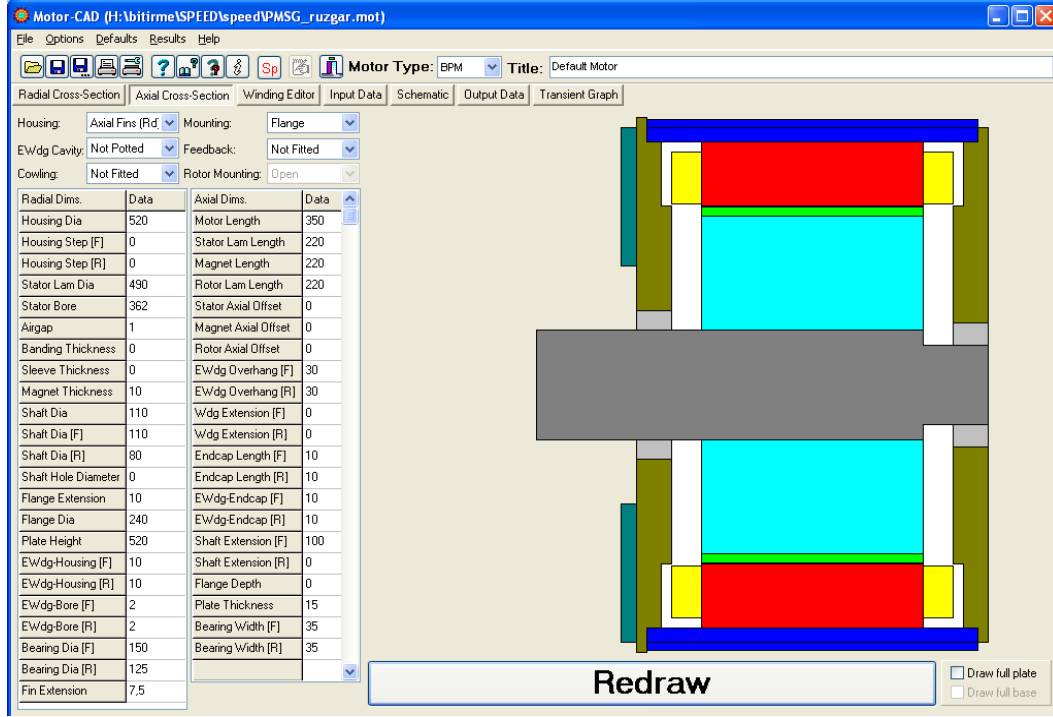
$$q_{TOP} = \bar{h} \cdot A_{YÜZEY} \cdot (T_{cidar} - T_{akışkan}) \quad (4.44)$$

Akışkanın fiziksel özellikleri, ısı taşınımında etkili olan akış özellikleri dinamik viskozitesi, yoğunluğu sıcaklıkla değişir.

Generatörün ısı analizi, dünyada elektrik makinesi ısı analizinde kabul görmüş ve sıkça kullanılan Motor-CAD yazılımı ile yapılacaktır. Bu yazılım SEA yazılımlarından farklı olarak deneyle hesaplanmış, literatürde bulunan korelasyonları da içerisinde bulundurur. Aynı zamanda yükleme durumunda farklılıklar yaratılarak, zamana ve yüke bağlı gerçek şartları daha iyi modelleyip dinamik ısı analiz yaptırılır. Generatörün ısı kayıpları RMXprt yazılımı ile hesaplanır. Hesaplanan datalar, ısı analiz programı olan Motor-CAD yazılımına girilerek çözüm yaptırılır. Aşağıdaki şekilde generatörün Motor-CAD yazılımındaki radyal ve eksenel kesiti görülmektedir.



Şekil 4.34 : Generatörün radyal kesiti



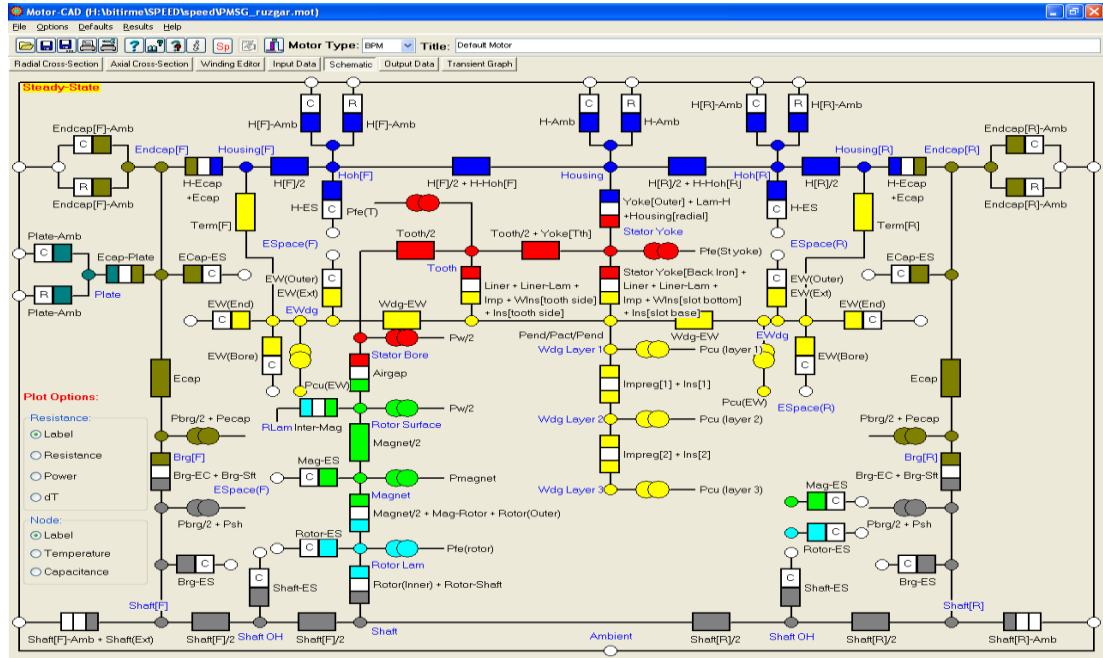
Şekil 4.35 : Generatörün boylamsal (eksenel) kesiti

Motor-CAD yazılımına makine geometrisini (boyutlar, sarım şekli, akım değerleri vs.) ve kayıplarının girilerek makine ısıl modelinin oluşturması gereklidir. Oluşan modelde soğutma şeklinin ve parametrelerinin modele girilmesi gereklidir. Etkin soğutma, gövde dışında zorlanmış taşınım ile rüzgâr tarafından gerçekleştirilir, rüzgârın hızına bağlı olarak generatörden çekilen güç değişeceği için (rüzgâr hızı azaldıkça generatörden çekilecek güç azalacaktır, verimin değişmediği kabul edilirse generatörde oluşan kayıplarda azalacaktır. Böylelikle daha düşük rüzgâr hızı soğutma içinde gerekli değeri sağlayacaktır) yeterli olacaktır. Isının havaya daha iyi aktarılması ve generatör içerisinde oluşacak sıcaklık değerlerinin düşürülmesi için dış gövde alanı artırılması amaçlı generatör çevresine 7.5 mm uzunluğunda ve 4 mm genişliğinde kanatçıklar konulacaktır. Yapılacak kılıf ve kanatçıklarla generatörün toplam çapı 520 mm ve toplam uzunluğu 350 mm olacaktır.

Motor-CAD yazılımı ısıнын makine içerisindeki ısı kaynaklarından (ısı kayıplarının gerçekleştiği yerler) dış ortama geçişini, iletim, doğal taşınım, zorlanmış taşınım ve radyasyon olarak ayrı ayrı hesaplamaktadır. Taşınım ve radyasyonla ısıнын aktarımında, kullanılan malzemenin ısı salım oranı, ısı taşıma katsayısı, yüzey alanı, akışkan hızı gibi parametreler program tarafından, boyut bilgilerini ve malzeme özelliklerini kullanarak hesaplamaktadır. Bir sonraki adımda yazılım aynı elektrik devresi gibi sistemin şemasını oluşturmaktadır.

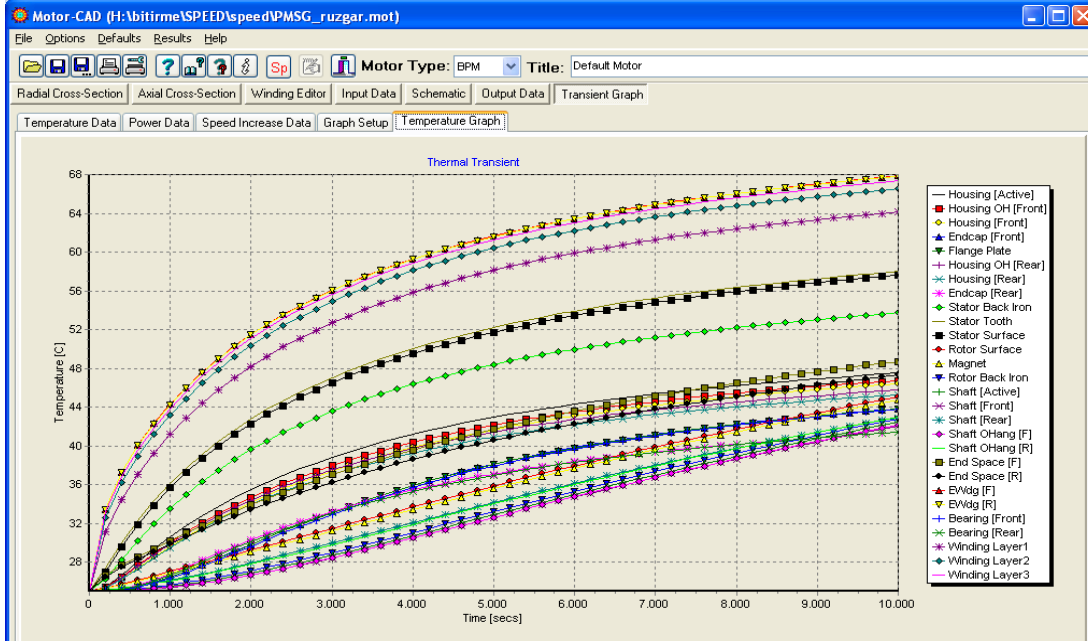
Yazılım kayıpların olduğu (ısının olduğu) yerleri (sargılar, stator sacı vs) ısı kaynağı olarak kabul edip, dış ortamı ise sabit bir sıcaklık olarak kabul etmekte ve ısının iç ortamdan dış yüzeye akışını hesaplamaktadır. Bu hesaplama işlemini yaparken ısının geçtiği yerleri ise direnç gibi kabul ederek devre çözümü yapar. Böylece belirlenen noktalardaki sıcaklıklar hesaplanır. Şekil 4.36’da generatör modelinin ısı devre şeması görülmektedir.

Program her bir düğüm noktası için devre çözümü yaparak, sargı içi, sargı sonu, stator, rotor, mıknatıs, vs bütün noktalar için sıcaklık değerini ayrı ayrı hesaplamaktadır. Elde edilen sıcaklık sonuçları RMxprt yazılımına girilerek tekrardan çözüm yapılması gereklidir. Çünkü sıcaklıkla sargı dirençleri, mıknatısın kalıcı mıknatısı gibi parametreler değişmektedir. Bu nedenle yeni sıcaklık değeri için tekrardan çözüm yapılması ve kayıpların yeni sıcaklık değerine göre yeniden hesaplanması gereklidir. RMxprt yazılımına girilen yeni sıcaklık değeri ile sargı dirençlerini, demir ve bakır kayıplarını, mıknatısın sıcaklıkla değişim değerlerini tekrardan hesaplanarak yeniden Motor-CAD yazılımına girilmektedir. Böylece iterasyon yapılarak sonuca ulaşılmaktadır. Analitik çözüm yaptığından SEA’lere göre sonuca çok daha hızlı ulaşılmaktadır.

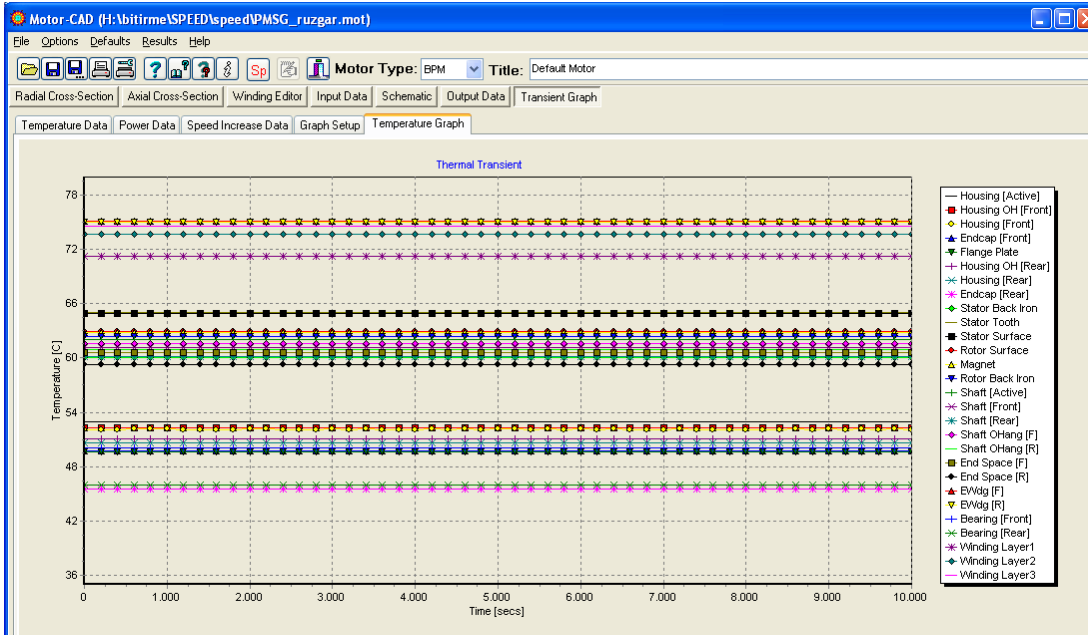


Şekil 4.36 : Generatörün Motor-CAD ısı devre şeması

Yapılan iterasyon sonucunda anma çalışma durumunda sıcaklığın değişimi (geçici rejim) Şekil 4.37’deki gibi olmaktadır.



Şekil 4.37 : Generatörün sıcaklığının zamana göre değişimi



Şekil 4.38 : Generatörün kararlı çalışma sıcaklığı (anma çalışma durumunda)

Analizde dış ortam sıcaklığının 25 °C olduğu varsayılmıştır. Sıcaklık artışı belirli bir zaman sonunda kararlı bir noktaya gelecek ve o nokta civarında olacaktır. Çünkü dış ortamla iç ortam arasındaki sıcaklık farkı arttıkça iletilen ısı enerjisi artacaktır. Belirli bir sıcaklık farkında ise denge oluşacaktır. Rüzgârın 10 m/s hızda estiği ve makinenin anma gücünde yüklenmesi durumunda kararlı noktaya ulaşıldığı durumdaki sıcaklıklar ise şekil 4.38’de gösterilmiştir.

Yapılan hesaplama sonucunda sargı sıcaklığının 74 °C civarına ulaştığı görülmüştür. Mıknatıs sıcaklığı ise 63 °C olmaktadır. Generatörün dış yüzey sıcaklığı ise 53 °C olmuştur. Mıknatısların sıcaklıkları curie sıcaklığına (mıknatısın mıknatisiyetini kaybettiği noktadaki sıcaklık) gelmediğinden dolayı herhangi bir sorun oluşmayacaktır. Günümüzde kullanılan NdFeB mıknatısların curie sıcaklıkları 300°C civarındadır. Ancak 130 – 150°C sıcaklıklarda kısmi manyetik alan kaybı olmaktadır. Bu sebeple mıknatıs sıcaklıklarının bu değerlerin altında tutulması gereklidir. Sargı sıcaklıkları da yine çok yüksek değerlere ulaşmamıştır. Çizelge 4.5’de sargı izolasyon sınıfları ve çalışma sıcaklıkları verilmiştir. Generatör sargıları için B, F yada H sınıfı bobin kullanılabilir. F sınıfı izolasyon tasarım için uygun olacaktır.

Çizelge 4.5 : Sargı izolasyon sınıfları

İZOLASYON SINIFI	Maksimum Sargı Sıcaklığı (°C)	Maksimum Isınma (°C)	Isınma toleransı (°C)
A	105	60	5
E	120	75	5
B	130	80	10
F	155	105	10
H	180	125	15

Generatörün hız ve yük değişimleri içinde analiz yapılmalıdır. Yani düşük rüzgâr hızlarında generatörden anma akımı çekilmek istendiği durumdaki sıcaklık değişimlerinin bilinmesi gereklidir. Generatör kararlı sıcaklığına oturduktan sonra aşağıdaki parametreler de generatör analiz edilmiştir.

Çizelge 4.6 : Generatör çalışma çevrimi

Periyot	Zaman	Akım	İlk hız	Son hız
Birim	Saniye	p.u.	min ⁻¹	min ⁻¹
1	120	1	150	150
2	180	1	50	50
3	120	1	150	150
4	180	2	150	150
5	600	1	150	150

Bu çalışma durumunda elde edilen sonuçlar şekil 4.32’de görüldüğü gibidir. Rüzgâr hızına bağlı olarak generatör devri düştüğünde (50 min⁻¹) 3 dakika boyunca fazlardan anma akımı çekilmesi durumunda dış yüzey sıcaklığı artmakta ve 53 °C’den 56°C’ye

yükselmektedir. Bu sırada fazlardan çekilen akım değişmediği için sargı sıcaklıkları da değişmemiştir.

Generatörün anma devrinde çalışması durumunda (150 min^{-1}) 3 dakika süreyle faz akımları 2 katına çıkarıldığında sargı sıcaklığı 100°C 'ye çıkmaktadır. Bu durumda generatörün dış yüzey sıcaklığı 58°C 'ye ulaşmaktadır.



Şekil 4.39 : Çizelge 4.4 çevrimi sonuçları

Generatörün anma çalışma durumunda sıcaklık değerlerinin kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Generatörün belirtilen çalışma sıcaklığındaki verimi %92,3 olarak bulunmuştur. Generatörün ısı analizlerinin sonrasında generatörün geometrisi elde edilmiştir. Generatör tasarım sonucunda elde edilen tasarım parametreleri ekte verilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Enerji ihtiyacının karşılanmasıdaki sorunların çözümüne katkı olması bakımından bütün dünya rüzgâr ve benzeri alternatif enerji kaynaklarından mümkün olduğunca fazla faydalanmak ve mevcut enerji kaynaklarını verimli kullanmak üzere bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Bu dönüşümü ülkemizde sağlamak üzere teşvik mekanizmaları formüle edilmektedir. Ancak tüm bu çabalar ülkemizde rüzgâr türbinleri tasarım ve üretim teknolojisi geliştirilmediği takdirde eksik kalacak, milyarlarca dolar kaynağımızın türbin aksamı alımı için yurt dışına akması yönünde bir teşvike dönüşecektir. Bu sebeple tez çalışmasında yapılacaklar, rüzgâr türbinlerinin temel elemanlarından olan generatörlerin yerli imkanlarla geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Yapılan çalışmanın temel amacı dünyada hızla yaygınlaşan rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatörlerin tasarımsal çalışmasının yapılmasıdır. Bu çalışmada küçük boyutlu rüzgâr türbinlerinde kullanılan, dişli kutusuna gerek duymayan 15 kW doğrudan sürürlü sabit mıknatıslı senkron generatörün tasarım çalışması yapılmıştır. Küçük güçlü uygulamalarda doğrudan sürürlü sistemler basit yapısı, dişli sisteme ihtiyaç duymaması, doğrudan kanatlara bağlanabilmesi gibi sebeplerle daha avantajlıdır. Kullanılan eleman sayısı azaldığı için karmaşıklığı, buna bağlı olarak bakım maliyetleri de azalmaktadır. Bu generatörlerde uyarma mıknatıslarla yapıldığı için makine boyutları, buna bağlı olarak da ağırlığı azalmaktadır. Bu da bir diğer sağladığı artıdır. Bu nedenlerle küçük güçlü uygulamalarda doğrudan sürürlü sabit mıknatıslı senkron generatörlerin diğer generatör tiplere göre daha avantajlı olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tasarım için öncelikle literatürdeki benzer uygulamalar araştırılarak generatörün anma çalışmasındaki rüzgâr hızı belirlendi. Daha sonra rüzgâr hızına bağlı olarak kullanılacak kanat boyu ve generatörün anma devri hesaplanmıştır. Böylece generatör için temel etiket değerleri bulunmuştur. Elde edilen temel parametreler sonrasında çeşitli ampirik bağıntılar yardımıyla yaklaşık generatör boyutları elde edilmiştir. Elde edilen değerler yardımıyla, elektrik makinesi tasarımında bütün

dünya tarafından kabul görmüş tasarım yazılımları ile makine geometrisi oluşturulmuş, sarım şekli, malzeme seçimi vb gibi makine yapısı ve parametreleri belirlenmiştir. İstenilen çalışma koşullarında analizi yapılmıştır. Beklenen değerler elde edilene kadar çeşitli yaklaşımlar ve deneme-yanılma yöntemiyle analizler tekrarlanmıştır. Yapılan iterasyonlar sonucunda generatör temel yapısı elde edilmiştir.

Elektrik makinesi tasarımında en önemli husus manyetik akının istenilen şekilde ve değerlerde olduğunun kontrol edilmesidir. Generatörlerde kullanılan sac malzemeler doğrusal olmayan manyetik davranışlı olduğundan manyetik alan analizinde SEA makine tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan tez çalışmasında SEA yazılımı ile tasarlanan generatörün belirlenen çalışma koşulları için iki boyutlu ve üç boyutlu manyetik alan analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda manyetik alanın yüksek olduğu yerlerde gerekli düzeltmeler iteratif olarak yapılarak makine geometrisi yeniden güncellenmiştir.

Elektrik makinelerinin tasarımında bir diğer önemli parametre ise ısınmadır. Makinenin sağlıklı çalışabilmesi için kayıplardan dolayı oluşan ısının makineden uzaklaştırılması gereklidir. Bu sebeple çok dikkatli ve doğru bir ısı analiz yapılmalıdır. Yapılacak yanlış bir tasarım makinenin fazla ısınmasına buna bağlı olarak makine veriminin düşmesine, izolasyonların zarar görmesine ve çalışmaz hale gelmesine neden olur. Yapılan çalışmada makinenin soğutulmasının doğrudan rüzgârla yapılması ön görülmüş ve makine tasarımında yaygın olarak kullanılan ısı analiz yazılımı ile benzetimi yapılmıştır. Yapılan çalışma sonrasında generatör dış kılıfına soğumayı sağlayacak şekilde kanatçıklar yerleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda generatörün soğutulması için ek bir sisteme gerek kalmadan doğrudan rüzgârla soğutulması yapılan çalışmanın bir diğer önemli çıktısıdır.

Generatör doğrudan sürürlü tasarlandığından milinde yüksek momentler oluşacaktır. Ayrıca kanatların doğrudan mile bağlanması ve rüzgârın kanatlarda oluşturacağı itme kuvvetide doğrudan generatör miline ve rulmanlarına aktarılacaktır. Bu sebeple milde iyi bir gerilme (stress) analizi yapılmalıdır.

Yapılan bütün tasarım ve analizler sonucunda generatör son halini almıştır. üç boyutlu CAD çizim programları yardımıyla generatör üç boyutlu modeli oluşturularak teknik çizimlerinin hazırlanması üretim açısından kolaylık

sağlayacaktır. Gerekli mekanik parçalar tasarlanıp çizilerek, generatörün üretilmeye hazır üç boyutlu katı modeli elde edilmelidir.

Generatör uyarması sabit mıknatıslarla sağlandığında herhangi bir ek uyartım sistemine ihtiyaç duymadan kullanılabilir. Bu sebeple elektriğin olmadığı yerlerde bağımsız olarak elektrik üretiminde kullanılabilir. Özellikle elektrik şebekesinden uzak çiftlik, orman, dağ rüzgâr olan yerlerde enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılabilir.

Yapılan bu çalışma sonrasında elde edilen tasarım üretilerek test edilebilir. Ayrıca kullanılacağı bölgeden elde edilecek rüzgâr verisine göre optimize edilerek daha verimli çalışması sağlanabilir. Şebekeye doğrudan bağlanarak ya da uyarması mıknatıslarla sağlandığı için kolayca şebekeden bağımsız olarak çalıştırılabilir. Yapılacak testler sonrasında gerekli görülmesi halinde iyileştirme ve düzeltmeler yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Eriksson, S., Bernhoff, H., Leijon, M.**, 2006 “Evaluation of Different Turbine Concepts for WindPower”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24 May 2006.
- [2] **Risoe, K.**, 2002. “Guidelines or Design of Wind Turbines”, Det Norske Veritas (DNV) and Wind Energy Department, Riso National Laboratory
- [3] **Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L.** 2006. “WindEnergy, Theory, Design and Applications”, Contract NAS2-11665, Muadyne Report 83-2-3, John Wiley and Sons,
- [4] **Case van Dam**, 2004. “Air foils for Structures – Passive and Active Load Control for Wind Turbine Blades”, Sandia National Laboratories, 2004 Wind Turbine Blade Workshop
- [5] **Wind Power Monthly, Windicator**, 2008. <http://www.windpower-monthly.com/WPM:WINDICATOR>, alındığı tarih Ağustos 2008.
- [6] **DOE (US Department of Energy) News**, <http://www.doe.gov/news/6253.htm>, alındığı tarih Ağustos 14, 2008.
- [7] **Clean Energy Presentation File**
<http://www.utahcleanenergy.org/documents/Flowers-11-30-2007-UT-Update-PUC.ppt>, alındığı tarih Ağustos 2008.
- [8] **TUREB**, “Rüzgâr Enerjisi Sektör Raporu”,
<http://www.ruzgarenerjisibirli.org.tr/guncel/Rapor02.06.pdf>, alındığı tarih Ekim 2010.
- [9] **"Global installed wind power capacity 2008/2009 (MW)"** (PDF). Press release. http://www.gwec.net/fileadmin/documents/PressReleases/PR_2010/Annex%20stats%20PR%202009.pdf. Retrieved 2010-08-29.
- [10] **Ciang1, C.C., Lee, J.R., Bang, H.J.**, 2008. Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods, Meas. Sci. Technol. 19 (2008) 122001 (20pp).
- [11] **Rao., Y.J.**, 1999. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors. Optics and Lasers in Engineering 297-324.

- [12] **Measures, R.M.**, 2001. Structural Monitoring with Fiber Optic Technology. Academic Press,
- [13] **Kuang, K.S.C., Kenny, R., Whelan, M.P., Cantwell, W.J., Chalker, P.R.**, 2001, Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials. Composite science and Technology 61(2001) 1379-1387.
- [14] **Spirin, V.V., Shlyagin, M.G., Miridonov, F.J.** 2000. Fiber Bragg grating sensor for petroleum hydrocarbon leak detection. Optics and Lasers in Engineering 32 (2000) 497-503
- [15] **Measures, R.M., Glossop, N.D.W., Lymer, J., Le Blance, M.W., Dubois, S.**, 1989. Structurally integrated fiber optic damage assessment system for composite materials. App Optics 1989;28: 2626–33.
- [16] **‘Regulations for the certification of wind energy conversion systems’** 1994.Germanischer Lloyd, Vorsetzeii 32, 20459, Hamburg, March 1994.
- [17] **‘Safety of wind türbine generator systems’** 1995. IEC 1400-1,
- [18] **‘Mechanical emergency brake for wind turbines and method for operating the same’**, US Patent Pub No: US 2007/0189900A1
- [19] **‘Drive mechanism for adjusting the rotor blades of wind power installations’**, US Patent No:6428274
- [20] **Burton T.,Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E.**,2001.Handbook of windenergy, England: Wiley;
- [21] **Corbet, D.C., Brown, C.**, 1993. ‘The selection and cost of brakes for stall regulated wind turbines’. Garrad Hassan and Partners, report on ETSU Contract WN6065, ETSU, Harwell Laboratory, Didcot, Oxon, UK,
- [22] **Stiesdal, H.**, 2000. Bonus Energy A/S, The wind turbines components and operation. Technical Brochure, Denmark,
- [23] **Gasch, R., Twele, J.**, 2004. Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation, Solarpraxis, Germany,
- [24] **Rajambala, K., Umamaheswaria, B., Chellamuthu, C.**, 2005 ‘Electrical braking of large wind turbines’, Renewable Energy 30 (2005) 2235–2245.
- [25] **Uys, P.E., Farkasb, J., Jarmaib, K., Tondera, F.**, 2007. “Optimisation of a steel towerfor a wind türbine structure”, Engineering Structures, Vol. 29, Issue 7, pp. 1337-1342,

- [26] **Lavassas, I., Nikolaidis, G., Zervas, P., Efthimiou, E., Doudoumis I.N., Baniotopoulos, C.C.,** 2003. “Analysis and design of the prototype of a steel 1-MW wind türbine tower”, Engineering Structures, Vol. 25, Issue 8, pp. 1097-1106,
- [27] **Bazeos, N., Hatzigeorgiou, G.D., Hondros, I.D., Karamaneas, H., Karabalis, D.L., Beskos, D.E.,** 2002. “Static, seismic and stability analyses of a prototype wind türbine steel tower”, Engineering Structures, Vol. 24, Issue 8, pp. 1015-1025,
- [28] **Çalışkan, M.,** 2009 “Rüzgâr Enerji Dönüşüm Sisteminde Sorunlar”, 2. Rüzgâr Enerjisi Sempozyumu, Samsun,
- [29] **Url-1** <<http://repa.eie.gov.tr/>> alındığı tarih 2010.
- [30] **Apaydın, M., Üstün, A.K., Kurban, M., Filik, Ü.B.,** “Rüzgâr Enerjisinde Kullanılan Asenkron Generatörler”
- [31] **Mergen, A.F., Zorlu, S.,** 2005. “ Elektrik Makineleri II Asenkron Makineler”, Birsen Yayınevi
- [32] **Ackermann, T.,** 2005. “Wind Power in Power Systems”, John Wiley & Sons, Ltd.
- [33] **Polinder, H., Haan S.W.H., Dubois, M.R., Sootweg, J.G.,** 2004, “Basic Operation Principles and Electrical Conversion of Wind Turbines,” NORPIE 2004, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, June 2004, Trondheim, Norway.
- [34] **Hansen, L.H., Madsen, P.H., Blaabjerg, F., Christensen, H.C., Lindhard, U., Eskildsen, K.,** 2001. “Generators and Power Electronics Technology for Wind Turbines”, Industrial Electronics Society, IECON '01. The 27th Annual Conference of the IEEE 29 Nov.-2 Dec. 2001, Vol. 3, pp.2000 – 2005.
- [35] **Patel, M.R.,** 1999, “Wind and Solar Power Systems” CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington
- [36] **Nicolás, C.V, Lafoz, M., Iglesias, J.,** 2002, “Guidelines For the Design and Control of Electrical Generator Systems for New Grid Connected Wind Turbine Generator.” IECON 2002
- [37] **Muller, S. Deicke, M. De Doncker, R.W.,** 2002, “Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines,” IEEE Industry Applications Magazine, 8, 3, pp. 26-33.

- [38] **Golding, E., W.**, 1955, “The Generation of Electricity by Wind Power”, E&F., N., Spon Limited: London
- [39] **Dursun E., Binark A.K.**, 2008, “Generator Types in Wind Turbines ”, 7.Natioanal Clean Energy Symposium Istanbul 17-21 December 2008.
- [40] **Khadraoui M.R., Elleuch M.**, 2008, “Comparison between OptiSlip and Fixed Speed Wind Energy Conversion Systems”, 5 th International Multi Conference on Systems, Signal and Devices , Amman, Jordan
- [41] **Fukami, T., Takeshi, K., Toshio, M.**, 1997, “ Analysis of the self –excited three phase synchronous generator utilizing the second space harmonic for excitation”, Electrical Engineering in Japan, Vol. 121, No.1
- [42] **Vlatko, C., Mitsuri, M., Hideo, Y.**, 1999, “Computer simulation of a three phase brushless self-excited synchronous generator” , IEEE Transactions on magnetics, Vol.35, No.3 , May 1999
- [43] **Mergen, A.F., Zorlu, S.**, 2005, “ Elektrik Makineleri III Senkron Makineler”, Birsen Yayınevi
- [44] **Marques, J., Pinheiro, H., Gründling, A., Pinheiro, J.R., Hey, H.L.**, 2003, “A Survey on Variable-Speed Wind Turbine System,” 2003, CE. 7^o Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência - COBEP'03, Fortaleza, Brazil, 1, s. 732- 738,
- [45] **Dubois, M. R., Polinder, H., Fereira, J. A.**, 2000, “Comparison of Generator Topologies for Direct-drive Wind Turbines”, in IEEE NordicWorkshop on Power and Industrial Electronics, IEEE, New York, pp. 22–26.
- [46] **Maxime R. Dubois**, 2000, “ Review of Electromechanical Conversion in Wind Turbines”, Report EPP00.R03, April 2000 , TU Delft, Electrical Power Processing Group
- [47] **Hendershot, J.R., Miller, T.J.E.**, 1994, Design of brushless permanent magnet motors, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford
- [48] **Kalenderli, Ö.**, Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, ITU Elektrik-Elektronik Fakültesi, 140s
- [49] **Brauer, J., R.**, 1981, Finite element analysis of single phase and polyphase induction motors, The MacNeal Schwendler Corporation, Conference Record of IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Philadelphia, PA, October1981

- [50] **Williamson, S., Lim, L., H., Robinson, J., M.,** 1990, Finite element models for cage induction motor analysis, IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 26, No.6, 1007-1017
- [51] **Lowther, D., A., Silvester, P.,** 1986, Computer-aided design in magnetics, Springer-Verlag
- [52] **TS-498,** 1997.Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [53] **Gediktaş, M., Temiz, V., Palabıyık, İ.,M., Parlar, Z.,** 1999, “Makine Elemanları Problemleri”, ÇağlayanKitapevi, İstanbul
- [54] **Url-2** <http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_wind_turbine_manufacturers> alındığı tarih Kasım 2010
- [55] **Vardar, A.,** Rüzgâr Enerji ve Teknolojisi 1

EKLER

EK A: Tasarım dosyaları

EK A

Çizelge A.1 : RMxprrt tasarım şablonu (design sheet)

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR DESIGN

File: Setup1.res

GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	15
Rated Power Factor:	0.75
Power Factor Type:	Inductive
Rated Voltage (V):	400
Number of Poles:	16
Frequency (Hz):	20
Frictional Loss (W):	150
Windage Loss (W):	0
Rotor Position:	Inner
Operating Temperature (C):	75
Type of Circuit:	Y3
Operation Type:	Infinite Bus
Domain:	Time

STATOR DATA

Number of Stator Slots:	48
Outer Diameter of Stator (mm):	490
Inner Diameter of Stator (mm):	362
Type of Stator Slot:	3
Dimension of Stator Slot	
hs0 (mm):	3
hs1 (mm):	2
hs2 (mm):	37
bs0 (mm):	3
bs1 (mm):	8.34702
bs2 (mm):	13.1972
rs (mm):	1
Top Tooth Width (mm):	16
Bottom Tooth Width (mm):	16
Skew Width (Number of Slots):	0
Length of Stator Core (mm):	220
Stacking Factor of Stator Core:	0.95
Type of Steel:	M19_24G
Slot Insulation Thickness (mm):	0.3
Layer Insulation Thickness (mm):	0.3
End Length Adjustment (mm):	0
Number of Parallel Branches:	1
Number of Conductors per Slot:	26
Type of Coils:	21
Average Coil Pitch:	3
Number of Wires per Conductor:	12
Wire Diameter (mm):	0.724
Wire Wrap Thickness (mm):	0
Slot Area (mm^2):	431.684
Net Slot Area (mm^2):	376.727
Limited Slot Fill Factor (%):	70
Stator Slot Fill Factor (%):	43.4115
Coil Half-Turn Length (mm):	343.391

ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	1
Inner Diameter (mm):	300
Length of Rotor (mm):	220
Stacking Factor of Iron Core:	0.95
Type of Steel:	M19_24G
Polar Arc Radius (mm):	180
Mechanical Pole Embrace:	0.833
Electrical Pole Embrace:	0.83863
Max. Thickness of Magnet (mm):	10
Width of Magnet (mm):	58.6191
Type of Magnet:	NdFe35
Type of Rotor:	3
Magnetic Shaft:	Yes

PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	1.23
Coercive Force (kA/m):	890
Maximum Energy Density (kJ/m^3):	273.675
Relative Recoil Permeability:	1.09981
Demagnetized Flux Density (Tesla):	0.74345

Recoil Residual Flux Density (Tesla):	1.23
Recoil Coercive Force (kA/m):	890

MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Density (kg/m ³):	8900
Permanent Magnet Density (kg/m ³):	7400
Armature Core Steel Density (kg/m ³):	7650
Rotor Core Steel Density (kg/m ³):	7650
Armature Copper Weight (kg):	18.8427
Permanent Magnet Weight (kg):	14.0497
Armature Core Steel Weight (kg):	103.816
Rotor Core Steel Weight (kg):	33.9507
Total Net Weight (kg):	170.659
Armature Core Steel Consumption (kg):	236.51
Rotor Core Steel Consumption (kg):	152.089

STEADY STATE PARAMETERS

Stator Winding Factor:	1
D-Axis Reactive Reactance X _{ad} (ohm):	0.79432
Q-Axis Reactive Reactance X _{aq} (ohm):	0.903588
D-Axis Reactance X ₁ +X _{ad} (ohm):	2.11264
Q-Axis Reactance X ₁ +X _{aq} (ohm):	2.22191
Armature Leakage Reactance X _l (ohm):	1.31832
Zero-Sequence Reactance X ₀ (ohm):	1.31832
Armature Phase Resistance R ₁ (ohm):	0.627472
Armature Phase Resistance at 20C (ohm):	0.516146

NO-LOAD MAGNETIC DATA

Stator-Teeth Flux Density (Tesla):	1.63099
Stator-Yoke Flux Density (Tesla):	1.53877
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla):	1.64136
Air-Gap Flux Density (Tesla):	1.03692
Magnet Flux Density (Tesla):	1.06401
Stator-Teeth By-Pass Factor:	0.00364282
Stator-Yoke By-Pass Factor:	0.000169596
Rotor-Yoke By-Pass Factor:	0.000297111
Stator-Teeth Ampere Turns (A.T):	244.2
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T):	34.4678
Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T):	40.7398
Air-Gap Ampere Turns (A.T):	882.235
Magnet Ampere Turns (A.T):	-1201.04
Leakage-Flux Factor:	1
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Stator Yoke:	0.203897
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Rotor Yoke:	0.190745
Fundamental Induced RMS Line Voltage (V):	408.309
THD of Induced Voltage (%):	10.425
Cogging Torque (N.m):	97.9971

FULL-LOAD DATA

RMS Line Current (A):	22.95
RMS Phase Current (A):	22.95
RMS Phase Voltage (V):	238.363
Armature Thermal Load (A ² /mm ³):	11.6997
Specific Electric Loading (A/mm):	2.51849
Armature Current Density (A/mm ²):	4.64553
Frictional and Windage Loss (W):	150
Iron-Core Loss (W):	117.491
Armature Copper Loss (W):	991.477
Total Loss (W):	1258.97
Output Power (W):	15005.8
Input Power (W):	16264.8
Efficiency (%):	92.2596
Apparent Power (VA):	16411.3
Power Factor:	0.91436
Synchronous Speed (rpm):	150
Rated Torque (N.m):	1035.45
Power Angle (degree):	12.5502
Maximum Output Power (W):	50835.3

Short Circuit Current (A): 108.849

WINDING ARRANGEMENT

The 3-phase, 2-layer winding can be arranged in 6 slots as below:

AZBXC Y

Angle per slot (elec. degrees):	60
Phase-A axis (elec. degrees):	90
First slot center (elec. degrees):	0

TRANSIENT FEA INPUT DATA

For Armature Winding:	
Number of Turns:	208
Parallel Branches:	1
Terminal Resistance (ohm):	0.627472
End Leakage Inductance (H):	0.000505601
2D Equivalent Value:	
Equivalent Model Depth (mm):	220
Equivalent Stator Stacking Factor:	0.95
Equivalent Rotor Stacking Factor:	0.95
Equivalent Br (Tesla):	1.23
Equivalent Hc (kA/m):	890
Estimated Rotor Inertia (kg m ²):	2.82961

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Orhan KÜTÜK

Doğum Yeri ve Tarihi: Ortaköy – 26.11.1983

Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik – Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği

Yayın Listesi:

- Erkan Elcik, Mehmet Ali Çimen, **Orhan Kütük**, Yalçın Solak, “Elektrikli Araçlar için Elektrikli Tahrik Sistemleri”, TOK’09, İstanbul