

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SANTRALLERİNDE MAKSİMUM GÜÇ ELDESİ İÇİN
SENKRON VE ASENKRON GENERATÖR KULLANIMININ
KARŞILAŞTIRILMASI**

Makine Müh. Murat İlkay UÇMAZ

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yar. Doç. Dr. Zehra Yumurtacı (Yıldız Teknik Üniversitesi)

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTIMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT.....	xii
1 GİRİŞ	1
1.1 Dünyada ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisi Kullanımındaki Son Durum.....	1
1.2 Karşılaştırma	9
1.2.1 Üstünlükleri.....	9
1.2.2 Sakıncaları.....	9
1.3 Konu Hakkında Yapılan Çalışmalar	10
2 RÜZGAR TÜRBİNLERİ	12
2.1 Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	13
2.2 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri	15
3 RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN MODELLENMESİ	22
4 RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN ELEKTRİK MAKİNALARININ KARŞILAŞTIRILMASI	25
4.1 Doğru Akım Generatörleri.....	25
4.2 Senkron Generatörler	25
4.2.1 Alan Sargılı Senkron Generatör	26
4.2.2 Daimi Mıknatıslı Senkron Generatör	27
4.3 Asenkron Generatörler.....	28
4.3.1 Çift Belemeli Senkron Generatör.....	29
4.3.2 Sincap Kafesli Asenkron Generatör.....	30

5	ASENKRON GENERATÖRLERİN MODELLENMESİ	31
5.1	Asenkron Generatörlerin Çalışma İlkesi.....	31
5.2	Asenkron Generatörün Yapılışı	31
5.3	Asenkron Generatörün Modellenmesi	32
5.3.1	Sıncap Kafesli Asenkron Makinanın Matematiksel Modeli	33
6	ASENKRON GENERATÖR KULLANILARAK RÜZGAR TÜRBİNİNDEN MAKSİMUM ENERJİ ELDE EDİLMESİ	43
6.1	Sistemin Analizi.....	43
6.2	Sistemin Tasarımı	45
7	RÜZGAR ENERJİSİ KAYNAKLARI VE MALİYETLERİ	48
7.1	Rüzgar Atlas Çalışmasının Metodu	49
7.2	Rüzgar Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi	49
7.3	Rüzgar Atlas Çalışmasının Metodu	56
7.4	Rüzgar Enerjisi Maliyet Çalışması	59
7.4	Simulasyon Çalışması	59
7.4.1	Teknik Veriler	60
7.4.2	Santral Maliyetleri.....	61
7.4.2.1	V80 Santral Maliyetleri.....	61
7.4.2.2	V90 Opti Speed Santral Kurulum Maliyetleri	62
7.4.3	Birim Enerji Maliyetlerinin Hesaplanması	63
7.4.3.1	V80 Santral Birim Enerji Maliyetinin Hesaplanması	64
7.4.3.2	V90 Opti Speed Santral Birim Enerji Maliyetinin Hesaplanması	66
	SONUÇLAR	68
	KAYNAKLAR	70
	İNTERNET KAYNAKLARI	71
	ÖZGEÇMİŞ	73

SİMGE LİSTESİ

A	Hava ağırlığı kesiti
AF	Amortisman faktörü
B	Motor miline indirgenmiş toplam vizkos sürtünme katsayısı
C _k	Yıllık sermaye maliyeti
C _m	Yıllık O&M masrafı
C _p	Mekanik Güç katsayısı
C _s	Birim tesis bedeli
C _t	Döndürme momenti katsayısı
CO ₂	Karbondioksit
D	Türbin yarıçapı
D ₁	Engelin derinliği
Deg	Derece
e	Aylık eskalasyon oranı
E _e	Yıllık elektrik enerjisi üretimi
g	Toplam enerji birim üretim maliyeti
g _k	Birim enerji başına sermaye maliyeti
g _m	Birim enerji başına O&M maliyeti
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt saat
H	Engelin yüksekliği
H ₁	V ₁ hızının ölçüldüğü yükseklik
H ₂	V ₂ hızının hesaplanacağı yükseklik
Hz	Hertz
I _d	Fiziki santral direkt yatırım bedeli

I_k	İnşaat bitim tarihi itibariyle toplam maliyet
I_s	Stator akımı
i	Yıllık faiz oranı
i_1	Aylık faiz oranı
J	Motor miline indirgenmiş toplam eylemsizlik momenti
k	İnşaat süresince eskalasyon ve faiz etki katsayısı
km	Kilometre
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt saat
L_f	Şebeke yük faktörü
L_r	Rotor çevre endüktansı
L_s	Stator sargı endüktansı
m	Motor faz sayısı
MW	Megawatt
M_{rr}	Rotor çubukları arası karşıt endüktans
M_{ss}	Stator faz sargıları arası karşıt endüktans
M_t	Türbin döndürme momenti
N	Amortisman ömrü
N_r	Rotor çubuk sayısı
N_s	Stator sargı sayısı
n	Dönme hızı
n_r	Rotor döner alan dönme hızı
n_s	Döner alanın senkron hızı
M_m	Rotor ve statorarasındaki karşıt endüktansın maksimum değeri
p	Kutup çifti sayısı
P	Engelin geçirgenliği
P_e	Elektrik gücü
P_m	Mekanik gücü
P_{max}	Maksimum Güç

P_t	Türbinin Ürettiği Mekanik Güç
$R_ç$	Çubuk direnci
R_h	İki çubuk arasındaki halka parçası direnci
R_s	Stator faz sargı direnci
Rad	Radyan
R_1	Engelin ilk köşesinin RGI' ye olan uzaklığı
R_2	Engelin ikinci köşesinin RGI' ye olan uzaklığı
s	Saniye
T	İnşaat süresi
TWh	Terawatt saat
V	Hız
V_s	Stator voltajı
V_1	H_1 yüksekliğinde ölçülen rüzgâr hızı
V_2	H_2 yüksekliği için hesaplanacak rüzgâr hızı
ω	Mil Açısal Hızı
W	Watt
Z_o	Pürüzlülük Uzunluğu
α	Pürüzlülük Katsayısı
α_1	Engelin ilk köşesinin kuzey doğrultuyla yaptığı açı
α_2	Engelin ikinci köşesinin kuzey doğrultuyla yaptığı açı
ρ	Havanın özgül ağırlığı
π	Pi Sayısı
λ	Uç Hız Oranı
μ	Boşluğun manyetik geçirgenliği
ψ_r	Rotor akı vektörü
ψ_s	Stator akı vektörü
θ	Motor mili dönme açısı
Γ_r	Rotor dönüşüm matrisi
Γ_s	Stator dönüşüm matrisi

KISALTMA LİSTESİ

AA	Alternatif Akım
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ASSG	Alan Sargılı Senkron Generatör
ÇBSG	Çift Beslemeli Senkron Generatör
DA	Doğru Akım
DERT	Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri
DGM	Dalga Genişlik Modülasyonu
DMİ	Devlet Meteoroloji İdaresi
DMSG	Daimi Mıknatıslı Senkron Generatör
DSİ	Devlet Su İşleri İdaresi
RES	Rüzgar Enerjisi Santrali
RGİ	Rüzgar Giriş İndeksi
SKAG	Sincap Kafesli Asenkron Generatör
WASP	Rüzgâr Atlası Analiz ve Uygulama Programı
YERT	Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri
YKR	Yeni Kuruş
YTL	Yeni Türk Lirası
\$-cent	Bir Amerikan Sent

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	2006 ve 2011 yılları için yapılan toplam kurulu güç projeksiyon değerleri.....	6
Şekil 2.1	Düşey eksenli rüzgar türbini elemanları	13
Şekil 2.2	Düşey eksenli rüzgar türbini görünüşü	14
Şekil 2.3	Yatay eksenli rüzgar türbini iç yapısı	15
Şekil 2.4	Yatay eksenli rüzgar türbini elemanları	16
Şekil 2.5	Rüzgar türbininin aerodinamiği	18
Şekil 3.1	C_p ve C_t katsayılarının uç hız oranına bağlı değişimleri.....	23
Şekil 3.2	Döndürme momentinin mil hızına bağlı değişimi	24
Şekil 4.1	Değişken hızlı alan sargılı senkron generatör yapısı	26
Şekil 4.2	Yükseltici DA-DA kıyıcısı ile beslenen daimi mıknatıslı senkron generatör...	27
Şekil 4.3	Dalga genişlik modülasyonlu konverterden beslenen daimi mıknatıslı senkon generatör	27
Şekil 4.4	Çift beslemeli rotoru sargılı asenkron generatör.....	29
Şekil 4.5	Değişken hızlı sincap kafesli asenkron generatör.....	30
Şekil 5.1	3 fazlı kısa devre rotorlu asenkron makine kesiti	33
Şekil 5.2	Kısa devre rotorlu asenkron makinanın rotor yapısı.....	34
Şekil 5.3	Statoru 3 fazlı kısa devre rotorlu asenkron motor eşdeğer devresi	35
Şekil 6.1	Sabit frekanslı bir kaynaktan beslenen asenkron motor hız döndürme momenti karakteristiği	43
Şekil 6.2	Çalışma hızı senkron hızın üzerinde olan asenkron motor hız döndürme momenti karakteristiği	44
Şekil 6.3	Farklı iki rüzgar hızı için asenkron makinanın senkron üstü hızda çalışması.....	44
Şekil 6.4	Şebeke denetimli dönüştürücü kullanılan asenkron makina	45
Şekil 6.5	Mekanik gücün mil hızına bağlı değişimi.....	46
Şekil 6.6	Asenkron makina modellemesi.....	46
Şekil 7.1	Yükseklığe göre rüzgar hızının logaritmik değişimi	55
Şekil 7.2	Türkiye rüzgar atlası	56
Şekil 7.3	Santral sahasının 3 boyutlu topografik yapısı ve yıllık enerji miktarlarının arazi üzerinde dağılımı.....	58
Şekil 7.4	V80 model rüzgar türbini güç eğrisi	60
Şekil 7.5	V90 model rüzgar türbini güç eğrisi	61

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1	1995–2007 arası dünya pazarındaki büyüme oranları	2
Çizelge 1.2	2006 ve 2007 yıllarında itibarıyla dünyadaki kurulu gücün dağılımı.....	4
Çizelge 1.3	Dünyada kurulu elektrik gücü ve rüzgâr elektriğinin payı	5
Çizelge 1.4	Bazı ülkelerde uygulanan teşvikler	7
Çizelge 1.5	Hazine garantili rüzgâr enerji santralleri.....	8
Çizelge 2.1	Türbin rotor büyüklüğüne göre maksimum çıkış gücü hesabı.....	20
Çizelge 7.1	Ölçüm yüksekliğine ait frekans dağılım tablosu.....	53
Çizelge 7.2	Çevresel engellerin genel görünümü ve engel tanımlama formu	55
Çizelge 7.3	Örnek bir santral sahasının enerji üretim miktarları	59
Çizelge 7.4	Santrallerin birim enerji maliyetlerinin kıyaslaması.....	60
Çizelge 7.5	Karakurt rüzgâr enerjisi santrali toplam maliyeti	61

ÖNSÖZ

Bu tez, RES de asenkron generatör kullanımı ile maksimum güç elde eldesinin sağlanabilirliğini araştırmak amacı ile hazırlanmıştır. Günümüzde RES’de senkron generatörler kullanılmaktadır. Güncel veriler ile RES’de asenkron generatör kullanımı incelenmiş ve maksimum güç elde edilebilirliği MATLAB simülasyonları ile açıklanmıştır. Ayrıca aynı güçteki rüzgar türbini için, senkron ve asenkron generatör maliyetleri de hesaplanmıştır.

Bu çalışmanın hazırlanmasında yardımlarını esirgemedikleri için değerli Yar. Doç. Dr. Zehra YUMURTACI, Yar. Doç. Dr. Nur BEKİROğLU, Ar. Gör. Selin ÖZÇİRA ve Ar. Gör. Engin AYÇİÇEK’ e teşekkür ederim.

Temmuz 2008

Murat İlkey UÇMAZ
Makine Mühendisi

ENERJİ SANTRALLERİNDE MAKSİMUM GÜÇ ELDESİ İÇİN SENKRON VE ASENKRON GENERATÖR KULLANIMININ KARŞILAŞTIRILMASI

Murat İlkay UÇMAZ
Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi

Dünyamızda enerji ihtiyacı her yıl yaklaşık % 4–5 oranında artmaktadır. Buna karşılık bu ihtiyacı karşılayan fosil-yakıt rezervi ise, çok daha hızlı bir şekilde azalmaktadır. En iyimser tahminler bile, en geç 2030–2050 yılları arasında petrol rezervlerinin büyük ölçüde tükeneceğini ve ihtiyacı karşılayamayacağını göstermektedir. Kömür ve doğalgaz için de benzer bir durum söz konusudur. Bu nedenle insanoğlu fosil yakıt rezervlerinin bitmesini beklemeden temiz enerji kaynaklarına yönelmek zorundadır. Bu noktada temiz, çevreyi kirliletmeyen, yakıt parası olmayan bir enerji olan rüzgar enerjisi ilk olarak karşımıza çıkmaktadır. Rüzgâr sürekli bir enerji kaynağıdır. Dışa bağımlılığı yoktur. Sadece yerel imkânlarla enerji elde edilir. Hava kirliliği yaratacak emisyon ve atık ısı oluşturmazlar. Uzun dönem işletme masrafları diğer tüm enerji kaynaklarının içinde en az olanıdır. Rüzgâr enerjisi kullanımının en büyük dezavantajı rüzgârın hızının değişken olmasıdır ve ayrıca türbin maliyetleri yüksektir.

Dünyada ve ülkemizde RES'nin çoğunda senkron generatör kullanılmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada, asenkron generatörler ile maksimum güç eldesi planlanmaktadır. Çalışmada generatörleri tahrik etmek için rüzgâr türbini yerine doğru akım makinesi kullanılacaktır. Çeşitli hızlarda bu generatörlerden elde edilen maksimum güçler karşılaştırılarak, birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları belirlenecektir. Ülkemiz koşullarında yukarıda belirttiğimiz gibi asenkron generatör kullanımı, özellikle rüzgar santrallerinde uygulanabilir hale geldiğinde, santrallerin çıkış gücü artacağından, yıllık enerji üretimi artacak, birim elektrik enerji maliyeti ucuzlayacak ve santrallerin amorti süreleri kısalmaktadır. Bunun da ülkemiz için büyük bir enerji artışı sağlayacağı aşikardır. Aynı güçteki rüzgar türbini için, senkron ve asenkron generatör maliyetleri de hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar Enerji Santralleri, Elektriksel Dönüşüm Sistemleri, Generatörler(Senkron ve Asenkron), Ekonomik Analiz

COMPARISON OF SYNCHRONOUS AND ASYNCHRONOUS GENERATOR'S USE FOR MAXIMUM POWER DERIVATION AT POWER PLANTS

Murat İlkay UÇMAZ
Mechanical Engineering, M.S. Thesis

In the world energy need is increasing %4-5 per year but fossil fuel resources is decreasing faster. The most optimist estimations are showing that, lately of 2030-2050 all petroleum based resources will come to an end or not answer the necessities. Coal and natural gas will have a same situation with petroleum based resources. Because of that, human being must not wait for finishing of this resources and must bear to the renewable energy resources. At this point, we can see wind energy that a clean, not making air pollution and no need to fuel solution. There is no need an addiction to other countries and energy can be produced with local solutions. It does not cause an emission makes air pollution or waste heat energy. Long term management cost is lower than the other type of energy plants. Its more important disadvantage is change of the wind speed and turbine costs are higher

In the world and also in our country oftenly synchronous generators are used at wind energy plants. In this work, it has been planned to have maximum power with synchronous generators. In this work it has been used a DC machine in place of wind turbine to stimulate generators. The advantages and disadvantages of this generators will be determined with a comparison between power gain of this generators. As determined at below, if in our country asynchronous generator's use at wind plants becomes more applicable, plant output power will increase and consequently energy production per year will increase, unit electric cost will decrease and amortization time of plant will short than present time. And it is clearly known that, this will provide an energy decrease for our country.

Keywords Wind Energy Power Plants, Electiral Transformation Systems,
Generators(Synchronous and Asynchronous), Economic Analyze

1. GİRİŞ

Rüzgâr enerjisi, rüzgârı oluşturan hava akımının sahip olduğu hareket (kinetik) enerjisidir. Bu enerjinin bir bölümü yararlı olan mekanik veya elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Rüzgârın gücünden yararlanılmaya başlanması çok eski dönemlere dayanır. Rüzgâr gücünden ilk yararlanma şekli olarak yelkenli gemiler ve yel değirmenleri gösterilebilir. Daha sonra tahıl öğütme, su pompalama, ağaç kesme işleri için de rüzgâr gücünden yararlanılmıştır.

Günümüzde rüzgâr daha çok elektrik üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Fosil, nükleer ve diğer yöntemlerde atmosfere zararlı gazlar salınmakta, bu gazlar havayı ve suyu kirletmektedir. Rüzgârdan enerji elde edilmesi sırasında ise bu zararlı gazların hiçbiri atmosfere salınmaz, dolayısıyla rüzgâr enerjisi temiz bir enerjidir, yarattığı tek kirlilik gürültüdür. Pervanelerin dönerken çıkardığı sesler günümüzde büyük ölçüde azaltılmıştır.

1.1 Dünyada ve Türkiye' de Rüzgâr Enerjisi Kullanımındaki Son Durum

Binlerce yıldır insanlığın hizmetinde bulunan rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi ilk olarak 1891 yılında Danimarka'da gerçekleştirilmiştir. Bundan kısa bir süre sonra da Amerika Birleşik Devletleri'nde yel değirmenlerinin küçük güçteki rüzgâr türbinlerine dönüştüğü ve elektrik enerjisi ürettiği bilinmektedir. Fosil yakıtların ucuzluğu nedeniyle yeterli seviyede benimsenmeyen rüzgâr enerjisi, 1970'li yıllardaki petrol krizi nedeniyle yeniden hatırlanmış ve bundan sonra, rüzgâr türbinlerinin seri üretime geçilmesi ile bu alandaki yatırımlar gittikçe artan oranlarda gelişmiş ve rüzgâr enerjisi santralleri oluşturulmaya başlanmıştır. Önceleri kara parçaları üzerinde oluşturulan bu santraller kıyı açıklarına yani deniz üzerine de kurulmaya başlamıştır.

Rüzgâr gücü, dünyada kullanımı en çok artan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir. Günümüzde dünyadaki kullanım oranının düşük olmasına karşılık, 2020 yılında dünya elektrik talebinin %12'sinin rüzgâr enerjisinden karşılanması için çalışmalar yapılmaktadır.

Günümüzde rüzgâr enerjisinden üretilen toplam güç 92.791 MW civarındadır. Bu güçten en fazla yararlanan ülke % 23,97'lik payıyla Almanya'dır. Almanya toplamda 22.247 MW güç üretmektedir ve bu rüzgâr gücü Almanya'nın elektrik enerjisi ihtiyacının % 5,6'sını karşılamaktadır. Rüzgâr gücünden en çok yararlanan diğer ülkeler sırasıyla ABD,İspanya, Hindistan, Çin, Danimarka, İtalya, İngiltere, Portekiz ve Fransa'dır. Diğer tüm ülkeler toplamda 13.899 MW'lık güç üretimi ile % 14,97 paya sahiptirler.

Rüzgâr enerjisi sistemlerinin tasarımı, planlaması ve çalıştırılması için rüzgârın karakteristiklerinin tüm detaylarıyla bilinmesi gerekmektedir. Türbin yerleşimi ve rüzgâr enerji potansiyelinin belirlenebilmesi için uzun süreli güvenilir verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun en iyi örneklerinden biri, Avrupa Birliği ülkelerindeki rüzgâr enerjisi potansiyelini belirlemek için 200 den fazla yerde kurulan uygun meteoroloji istasyonlarının 10 yılı aşan verileri sonucu oluşturulan "Avrupa Rüzgâr Atlas" ıdır. Bu Atlas, Ege Denizi ve buna komşu Yunanistan kıyılarının yüksek rüzgâr enerjisi kapasitelerine sahip olduğunu göstermektedir. Ülkemizin özellikle Ege Denizi'ne kıyısı olan batı bölgelerinde yapılan rüzgâr ölçümleri de bu potansiyeli doğrulamaktadır.

2007 yılı sonu itibariyle, tüm dünyada kurulu bulunan rüzgar santrallerinin nominal gücü 92.791 MW dır. Sadece 2007 yılında ilave olan güç değeri 18.217 MW' dır ve bu durum bir önceki yıla göre %21'lik bir artışı belirtmektedir.. Rüzgâr enerjisi kurulu gücünün 1995–2007 yılları arasındaki büyüme payı, ortalama olarak, yıllık %29'dur. En büyük yıllık artışlar da 1999 ve 2001 yıllarında olmuştur. Çizelge 1.1 'de 1995–2007 döneme ait veriler daha detaylı bir şekilde verilmektedir.

Çizelge 1.1 1995–2007 arası dünya pazarındaki büyüme oranları [18]

Yıl	Kurulan MW	Artış %	Toplam MW	Artış %
1995	1 290	-	4 778	-
1996	1 292	-	6 070	27
1997	1 568	21	7 636	26
1998	2 597	66	10 153	33
1999	3 922	51	13 932	37
2000	4 495	15	18 449	32
2001	6 824	52	24 927	35
2002	6 201	-	31 128	25
2003	8 796	42	39 924	28
2004	8 512	-	48 436	21
2005	10 555	24	59 091	22
2006	15 122	43	74 574	26
2007	18 217	21	92 791	24

Türkiye'nin de içinde bulunduğu Avrupa kıtasını ele aldığımızda Almanya, 2007 yılında tesis ettiği 1 625 MW yeni kapasite ile toplamda 22 247 MW kurulu güce ulaşarak, tüm dünyadaki kurulu rüzgâr gücünün % 24' ine ulaşmış durumdadır. Dünya'da bu alanda yatırım yapan belli başlı ülkelerdeki durum Çizelge 1.2 'de verilmektedir.

Çizelge 1.2 2006 ve 2007 yıllarında dünyadaki kurulu gücün dağılımı [18]

Ülkeler Bazında Rüzgâr Türbini Yatırımları (Yıl Sonu Verileri)							
Sıra	Ülke	2006 (MW)	2007 (MW)	Sıra	Ülke	2006 (MW)	2007 (MW)
1	Almanya	20 622	22 247	22	Belçika	193	287
2	İspanya	11 615	15 145	23	Tayvan	188	198
3	Amerika Birleşik Devletleri	11 603	16 886	24	Güney Kore	173	189
4	Hindistan	6 270	6 694	25	Yeni Zelanda	171	206
5	Danimarka	3 136	3 525	26	Polonya	153	276
6	Çin	2 604	4 876	27	Fas	124	156
7	İtalya	2 123	2 726	28	<u>Türkiye</u>	<u>97</u>	<u>146</u>
8	İngiltere	1 963	2 389	29	Finlandiya	86	110
9	Portekiz	1 716	2 150	30	Ukrayna	86	89
10	Fransa	1 567	2 454	31	Kosta Rica	74	94
11	Hollanda	1 560	1 746	32	Macaristan	61	65
12	Kanada	1 459	2 356	33	Litvanya	55	60
13	Japonya	1 394	1 672	34	Meksika	88	90
14	Avusturya	965	982	35	Çek C.	50	116
15	Avustralya	817	882	36	İran	48	78
16	Yunanistan	746	871	37	Avrupa'nın Geri Kalanı	163	245
17	İrlanda	745	805	38	Amerika'nın Geri Kalanı	109	147
18	İsveç	572	788	39	Asya'nın Geri Kalmanı	38	45
19	Norveç	314	333	40	Afrika ve Orta Doğu Diğer	31	46
20	Brezilya	237	345	41	Okyanusya'nın Geri Kalanı	12	17
21	Mısır	230	259				
Dünya Toplamı		2006 Yılı	74.574 MW	2007 Yılı	92.791 MW		

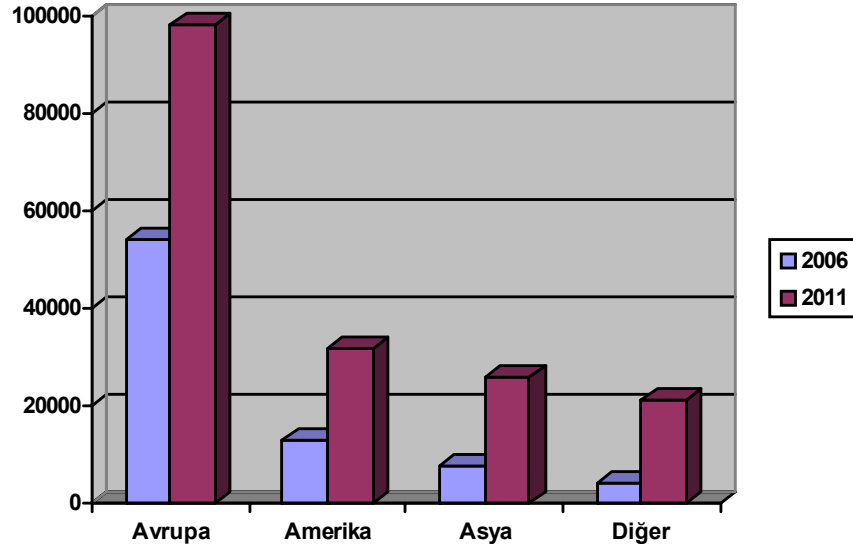
Şu anda rüzgârdan elde edilen elektrik Avrupa'nın ihtiyacının %2 'sini karşılamaktadır. Tüm dünya dikkate alındığında ise, bu oran ancak % 0,4 dür. Tüm dünyadaki elektrik üretim kapasitesi ile bunun içerisindeki rüzgâr enerjisi payı yıllara göre Çizelge 1.3 'de verilmiştir.

Çizelge 1.3 Dünyada kurulu elektrik gücü ve rüzgâr elektriğinin payı [18]

Yıl	Tüm Elektrik Kapasitesi GW	Toplam Elektrik Enerjisi TWh	Büyüme %	Rüzgâr Elektrik Kapasitesi GW	Rüzgâr Enerjisi TWh	Büyüme %
2001	3 540	15 577	2.8	24.93	50.27	24.8
2002	3 625	15 951	2.8	31.14	62.77	21.3
2003	3 712	16 333	2.8	38.48	76.18	11.4
2004	3 801	16 724	2.8	42.43	84.88	15.3
2005	3 892	17 125	2.8	49.95	97.83	12.4
2006	3 985	17 534	2.8	54.27	109.98	21.6
2007	4 076	17 625	2.8	59.03	118.11	13.6
Ortalama Büyüme			2.8	Ortalama Büyüme		17.2

Günümüzde, gelişen teknolojiye koşut olarak, gerek deniz üstüne gerekse kara üstüne inşa edilen santrallerde yüksek güç değerinde türbinler kullanılmaktadır. Almanya'da ortalama türbin boyutu 2 116 KW değerine ulaşmıştır. Bu değer Amerika Birleşik Devletleri'nde 1983 KW, Danimarka'da ise 850 KW dır.

2007 yılına yapılan projeksiyonlara göre dünyadaki tüm rüzgâr enerjisi kurulu gücünün 79 363 MW olacağı düşünülmekteydi fakat rüzgâr enerjisine artan ilgi ile bu rakam 92 791 MW kurulu güce ulaşmıştır. Burada en büyük katkının 54 067 MW ile Avrupa kıtasından geleceği varsayılmıştı ve düşünüldüğü gibi en büyük katkı Avrupa kıtasından gelmiştir. 2011 yılına yapılan daha ileri projeksiyonlar ise, toplam kurulu gücün 179 392 MW olacağını göstermektedir. Şekil 1.1 de, 2008 ve 2011 yılları arasında ulaşılacağı tahmin edilen toplam kurulu güç değerleri görülmektedir.



Şekil 1.1 2006 ve 2011 yılları için yapılan toplam kurulu güç projeksiyon değerleri [18]

Bu tahminler yapılırken analiz edilen dinamikler şunlardır:

- Ülkelerin rüzgâr enerjisi potansiyellerini belirlemeye yönelik çalışmaları,
- Ülkelerin şimdiye kadar gerçekleştirdikleri büyüme,
- Ülkelerin yenilenebilir enerji kaynakları için verdikleri destek ve ulusal enerji planlamaları.

Günümüze kadar, değişik ülkelerin rüzgâr enerjisini desteklemek için uyguladıkları çeşitli modeller vardır. Bunlar;

- Rüzgârdan elde edilen elektriğe sabit fiyat vermek,
- Rüzgâr elektriği üretenlere vergi indirimini sağlamak,
- Rüzgâr elektriği yatırımcılarına ithalat ve yatırım kolaylıkları sağlamak,
- Elektrik üreticilerine rüzgâr enerjisi kotası koymak şeklinde sıralanabilir.

Çizelge 1.4' de bu konuda ileri seviyede yatırım yapmış bazı ülkelerde uygulanan teşvikler sunulmaktadır.

Çizelge 1.4 Bazı ülkelerde uygulanan teşvikler [18]

Ülke	Ücret \$-cent/kWh	Teşvik
ABD	7.13	10 yıl süre ile üretim vergisinde 0.0175 \$/kWh 'lık bir indirim
Danimarka	9.6	Piyasa fiyatını sübvans ederek destek vermek
Fransa	16.4	Verimliliğe bağlı teşvikler
İngiltere	8.1	Yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik kullanımını zorunlu tutmak
İspanya	10.45	KWh üretim başına teşvik vermek
İsveç	7.73	Yatırımlara %15 hibe desteği vermek
Japonya	17.08	Yatırımlara %50'ye varan hibe desteği vermek
Yunanistan	12.18	Yatırım sübvansiyonu vermek

İlki 1992 yılında Rio de Janeiro 'da yapılan küresel boyuttaki sürdürülebilir kalkınma konferansları sonunda, küresel ısınmayı sınırlayıcı önlemler büyük önem kazanmıştır. 1997 yılında yapılan Kyoto Protokolü gereği 2008 yılından başlayarak 2012 yılına kadar, toplam emisyon değerlerinin, 1990 yılına göre %5.3 oranında azaltılması küresel hedef olarak belirlenmiştir. Ancak, bu hedefe ulaşılması olanaklı görülmemektedir. Örneğin, Avrupa Birliği'nin kendisine hedef olarak aldığı % 8'lik emisyon azalması gerçekleşmeyeceği gibi, söz konusu dönem için, %5.3'ün üzerinde bir artış gerçekleşmesi tahmin edilmektedir. Şu ana kadar tüm dünyada, 1990 yılına göre, % 9 oranında emisyon artışı gerçekleşirken, bu oran Amerika Birleşik Devletleri'nde %18'dir.

Bugün Avrupa'nın toplam enerji ihtiyacı %50 oranında ithal petrole bağlıdır. Önümüzdeki 20–30 yılda bu bağımlılığın %70 oranlarına çıkacağı düşünüldüğünde, yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgârın kullanımının, çevresel kaygıların yanında arza bağlı politik bağımlılık kaygılarını da beraberinde taşıdığı unutmamak gerekmektedir. Ayrıca, özellikle kapasite faktörü yüksek bölgelerden üretilen rüzgâr elektriğinin, teknolojiye yaşanan gelişmeler doğrultusunda, önümüzdeki yıllarda 5–5.8 \$-cent/kWh 'a ineceği de göz önüne alınması gereken bir husustur. Ülkemizde uygulamaları 1998 yılında başlayan rüzgâr santralleri küçük ölçeklidirler. Şu anda, toplam kurulu gücü 72 MW olan beş santral "Yap-İşlet-Devret" modeliyle üretim yapmaktadır. Bu santrallerden elde edilen yıllık elektrik enerjisi de yaklaşık 228 000 000 kWh'dır ve toplam üretimin neredeyse yarısına karşılık

gelmektedir. Ancak, Şu anda Őlkemizde yaklaşık 300 noktada rŐzgâr elektriği Őretmeye yönelik ŐlçŐmler yapılmaktadır. 3096 sayılı kanun kapsamında gerçekteŐtirilecek ve 3 Mart 2001 tarihinde yayınlanarak yŐrŐrlŐđe giren 4628 sayılı kanun çerçevesinde hazine garantisi verilebilecek 16 adet rŐzgâr enerjisi santrali fizibilite çalışmaları yapılmış olarak beklemektedir. Bu santrallerin yerleri Çizelge 1.5 ' te gŐsterilmektedir.Çizelge 1.5 incelendiğinde, İzmir ili çevresinin toplam 275 MW kurulu gŐç kapasitesi ile TŐrkiye genelindeki toplam 475 MW 'lık yeni rŐzgâr elektriği gŐcŐnŐn, % 54'ŐnŐ bŐnyesinde barındırdığı gŐrŐlmektedir. Bunu sırasıyla %18'lik pay ile Balıkesir, %12'lik pay ile Çanakkale, % 9'luk pay ile Manisa ve % 7 lik pay ile Hatay illeri takip etmektedir.

Çizelge 1.5 Hazine garantili rŐzgâr enerji santralleri [12]

Yer	Kurulu GŐç (MW)	Yıllık Őretim (kWh)x10 ⁶
Kocadağ I	50	135.5
Çanakkale	30	76.1
Mazı I	39	131.2
Mazı II	90	275.9
Mazı III	40	131.2
İntepe	30	77
Akhisar I	30	92.4
Kocadağ II	26	80.1
Bandırma	15	40.5
Datça	29	84
Çeşme	12	35.3
Akhisar II	12	37.6
Yalıkavak	8	21
GŐkçeada	5	15
Kapıdağ	35	105
Belen	34	120

Bundan sonra yapılacak çalışmalar 4628 sayılı Kanun'un ilgili yönetmeliklerine göre yapılacaktır. Bu yönetmelikler sırasıyla:

- Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu İhale Yönetmeliği,
- Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği ,
- Elektrik Piyasası Tarifeler Yönetmeliği,
- Elektrik Piyasası İthalat İhracat Yönetmeliği ,
- Elektrik Piyasası Serbest Tüketici Yönetmeliği 'dir.

1.2 Karşılaştırma

1.2.1 Üstünlükleri

- Atmosferi kirletici etkiye sahip gazların salınmaması,
- Temiz bir enerji kaynağı olması,
- Kaynağının tükenmemesi (güneş, dünya ve atmosfer olduğu sürece),
- Rüzgâr tesislerinin kurulumu ve işletilmesinin diğer tesislere göre daha kolay olması,
- Enerji üretim maliyetlerinin düşük olması,
- Güvenilirliğinin artması,
- Bölgesel olması ve dolayısıyla kişilerin kendi elektriğini üretebilmesi

1.2.2 Sakıncaları

- Rüzgârın sürekliliği olmadığı için enerji üretim değerinin sabit olmaması,
- Rüzgâr türbinlerinin büyük alan kaplaması,
- Gürültü kirliliği oluşturması,
- Fosil ve nükleer yakıtlardan elde edilen enerjiye oranla enerji üretiminin düşük olması,
- Yatırım maliyetlerinin yüksek olması,
- Kullanım ömrü dolan kompozit parçaların doğada geri dönüştürülmesinin mümkün olmaması,
- Diğer tip enerji üretim tesislerine göre daha fazla dinamik parça barındırması, dolayısıyla işletme risklerinin daha fazla olması.

1.3 Konu Hakkında Yapılan Çalışmalar

Bu konuda ciddi anlamda ilk çalışmalar 1982 yılında başlamaktadır. S.H. Javid , A. Murdoch and J. R. Winkelman tarafından yapılan bu çalışmada genel olarak rüzgar türbinini kontrol dizaynının önemi vurgulanmıştır. 1993 yılında P. G. Casielles, J. Sanz, J. Pascual tarafından yürütülen çalışmalarda ise, rüzgâr türbinlerinde asenkron generatörlerin kullanılmasının karakteristik, verim, uygunluk, düşük maliyet ve güç/ağırlık oranı olarak iyi bir alternatif olduğu sonucuna varılmıştır. 1997 yılında C. Cano, S. T. Tentzerakis, A. G. Kladas ve J. A. Tegopoulos tarafından yapılan çalışmada asenkron generator rotor parametrelerinin rüzgar türbini karakteristiklerine etkisi analiz edilmiştir ve katı demir ve bakır sargılı iki farklı tip rotorun kullanımı incelenmiştir. Çalışma sonucunda hata zaman karakteristiklerinin bakır sargılı rotor yapısında daha düşük olduğu ve bakır sargılı rotorların kullanımının daha sağlıklı olduğu sonucuna varılmıştır.

2000 yılında ise Andrés E. Feijóo ve Jose Cidris tarafından asenkron generatör kullanılan rüzgar tarlalarının modellenmesi konusunda çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar sonucunda modelleme için iki farklı metod kullanılabileceği vurgulanmıştır. Her iki metod için de önemli olan tek unsurun, frekans değişiminin stabilize edilmesi olduğu sonucuna varılmıştır.

2002 yılında ise Roberto Leidhold , Guillermo Garcia tarafından yapılan çalışmada uygun güç kontrol stratejileri üzerinde durulmuş ve simülasyon çalışması yapılmıştır. Çalışma sonucu uygun limitlerde kalındığı sürece simülasyon modellemesinde uygulanan algoritmanın optimum sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Ayrıca generatör büyüklüğünün de güç unsuruna etkisi vurgulanmıştır.

Bu çalışmanın hemen ardından 2002 Eylül ayında C. Cano, S. T. Tentzerakis, A.G. Kladas, J.A. Tegopoulos tarafından yürütülen çalışmada, rüzgar türbinlerinde kullanılan malzemesi birbirinden iki farklı rotorun asenkron makine içerisinde kullanımı ve farklılıkları konu edilmiştir. Çalışma sonucunda oluşan manyetik alan farklılıklarının asenkron makine çalışması ve verimi üzerine etkileri tartışılmıştır. Yine 2002 yılında José Cidrás, Andrés Elías Feijóo, Camilo Carrillo González tarafından ise sadece asenkron generatörlerin rüzgar çiftliklerinde kullanılması sonucunda yapılan senkronizasyonun teorik analizi ve açıklaması irdelenmiş ve çalışma sonucunda senkronizasyon işleminin yavaş bir hızda gelişim gösterdiği ve kompleks simülasyonlarla tanımlanabildiği görülmüştür. 2003 yılında Henry G. duPont tarafından yürütülen çalışmada, rüzgâr türbinlerinin neden daha cazip bir çözüm olduğunu incelemiştir. Kurulum ve şebekeye bağlanması açıklanmıştır. Çalışma sonucunda orta büyüklükteki rüzgâr santrallerinin güç üretiminde etkili bir kaynak olduğunu açıklamıştır.

2004 yılında Fuminao Kinjo Alan K. Wallace Annette von Jonanne ise, rüzgar santrallerinde uygun güç üretimi için, pasif güç limitlendirme tekniğinin gelişimini incelemiş ve çalışma sonucunda güç limitlendirme tekniği ile küçük hızlı türbinlerde verim artışı gözlenmiştir. Yine aynı yıl içerisinde Nicholas W. Miller, I, Einar V. Larsen, Jason M. MacDowell tarafından yürütülen çalışmada ise günümüzde kaynakların tüketilmesi sonucunda yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılan rüzgar santrallerinin önemi araştırılmış ve ayrıca rüzgar santrallerinin diğer yenilenebilir enerji santralleriyle kıyaslaması yapılmış olup performans ve verim farklılıkları kıyaslanmıştır.

G.M. Joselin Herberta, S. Iniyana, E. Sreevalsan ve S. Rajapandian tarafından 2005 yılı içerisinde yürütülen çalışmada ise rüzgar santrallerinin etki eden faktörler doğrultusunda ekonomikliğin değişimi araştırılmış ve aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelerek dünya fosil yakıt tüketiminin azatılması üzerinde durulmuştur. Çalışma sonucunda seçilen bölge, bölgenin yüksekliği, rüzgar hızı, rüzgar doğrultusu ve rüzgar potansiyelinin rüzgar santrali birim enerji maliyetine doğrudan etki ettiği ve matematik modellemeler ile birim enerji maliyetinin santral kurulumu öncesinde nasıl tespit edilebileceği incelenmiştir.

2006 yılında Nur Bekiroğlu, Zehra Yumurtacı ve Bedri Kekezoğlu tarafından yürütülen çalışmada ise, Türkiye’de Çeşme Kocadağ’da rüzgar hızları baz alınarak maksimum güç eldesi için, matlab de modelleme yapılmış ve en uygun rüzgar hızı belirlenmiştir.

2. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

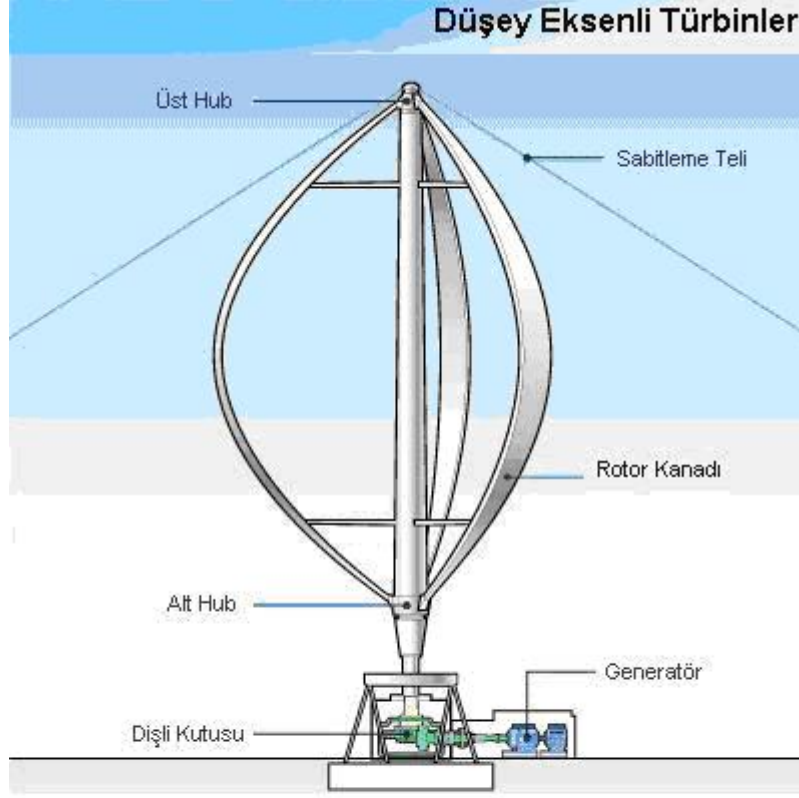
Rüzgâr türbinleri, rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bir rüzgâr türbini genel olarak kule, jeneratör, hız dönüştürücüleri (dişli kutusu), elektrik-elektronik elemanlar ve pervaneden oluşur. Rüzgârın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Rotor milinin devir hareketi hızlandırılarak gövdedeki jeneratöre aktarılır. Jeneratörden elde edilen elektrik enerjisi aküler vasıtasıyla depolanarak veya doğrudan alıcılara ulaştırılır.

Kullanımdaki rüzgâr türbinleri boyut ve tip olarak çeşitlilik gösterse de, genelde dönme eksenine göre sınıflandırılır. Rüzgâr türbinleri dönme eksenine göre “Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri” (YERT) ve "Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri” (DERT) olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar.

Enerjinin yeterli, zamanında, kaliteli, ekonomik, güvenilir ve temiz olarak sunumu günümüzde ülkelerin gelişmişlik düzeylerini belirleyen en önemli göstergelerden biridir. Sanayinin olduğu kadar halkın günlük yaşantısının da en önemli girdilerinden olan enerjiye talep sürekli olarak artarken enerji kaynakları da hızlı bir şekilde tükenmektedir. Sürdürülebilir bir dengenin sağlanabilmesi için enerji kaynak çeşitliliğinin sağlanması ve konvansiyonel enerji kaynaklarının yanında, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıma sunulması büyük önem kazanmıştır. Türkiye'nin ihtiyaç duyduğu enerji, gelişmiş bir ülke olma çabalarına koşut olarak günden güne artmaktadır. Sürdürülebilir kalkınmanın itici gücü olan enerji kaynaklarının çeşitlilik bakımından neredeyse tamamına sahip ülkemizde, yerli kaynaklarımız miktar bakımından yeterli değildir. Bu nedenle Türkiye enerji ithalatçısı bir ülke konumunda bulunmaktadır. 2000 yılında Türkiye'nin elektrik enerjisi talebi 128 500 GWh olarak gerçekleşirken bunun 3800 GWh'ı ithal edilerek karşılanmıştır. Ülkemizin elektrik enerjisi talebi yılda ortalama % 8 artış göstermektedir. 1999 yılında Türkiye'nin toplam kurulu elektrik gücü 26 117 MW iken, 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı'na göre, 2005 yılındaki kurulu güç 42 738 MW olmuştur. Aynı yıl için öngörülen elektrik tüketimi 195 100 GWh olmasına karşın, öngörülen üretim 193 900 GWh dır. Farkın elektrik enerjisi ithal edilerek karşılanması planlanmıştır. Bu tahminlere göre Türkiye'nin enerji ihtiyacının güvenli olarak karşılanması için, birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de sonsuz, tükenmeyen, temiz ve dışa bağımlı olmayan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmesi önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları olarak bilinen hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal, biokütle, dalga, gel-git enerjileri içerisinde en yaygın olan ve teknolojisi en hızlı gelişeni ise rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr enerjisinin bu kadar hızlı gelişmesinin nedeni, doğada serbest bir halde ve

bol olarak bulunması ile enerji kaynağı çeşitliliği yaratması yanında dışa bağımlı olmayan temiz bir enerji kaynağı olmasıdır.

2.1 Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri



Şekil 2.1 Düşey eksenli rüzgar türbini elemanları [18]

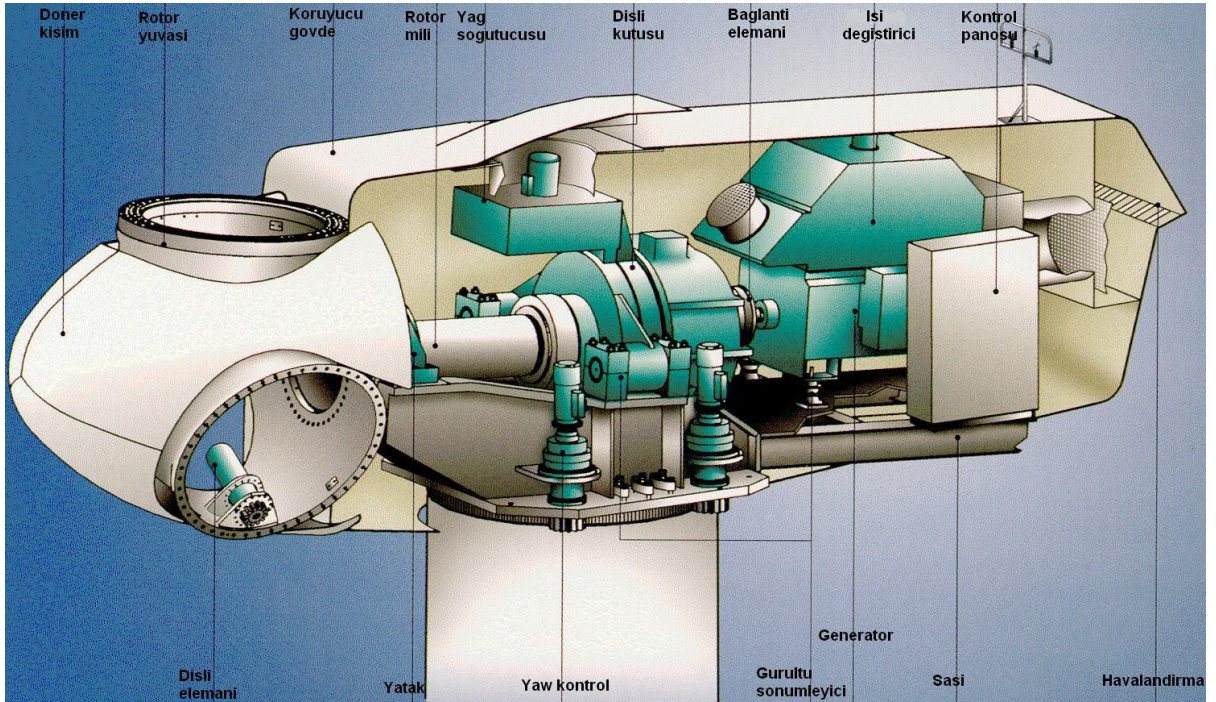
Şekil 2.1 de görüldüğü üzere düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde, mil düşey eksende yere dikey olacak şekilde monte edilmiştir. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri rüzgâr ile hizalı olduklarından, herhangi bir rüzgâr yönü değişikliğinde ayarlamaya ihtiyaç duyulmamaktadır fakat düşey eksenli bir rüzgâr türbini tamamıyla kendisi harekete geçemez, elektrik sisteminden bir desteğe ihtiyacı vardır. Destek için kule yerine çelik halatlar kullanılmaktadır ve bu sayede rotorun yerden yüksekliği daha düşüktür. Rotorun yerden yüksekliğinin düşük olması demek, düşük yüzey teması anlamına gelmektedir. Bu da yatay eksenli rüzgâr türbinlerinden daha düşük verimli olmalarına sebep olur. Yukarıdaki bilgilere bağlı olarak donanımın yer seviyesinde olduğu söylenebilir ve bu da kolay kurulum ve servis imkânı

sağlamaktadır. Fakat düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin çok yer kaplaması, özellikle tarımsal alanlarda olmak üzere çok büyük bir dezavantajdır. Şekil 2.2 de kurulu olan iki farklı tip düşey eksenli rüzgar türbini görülmektedir.



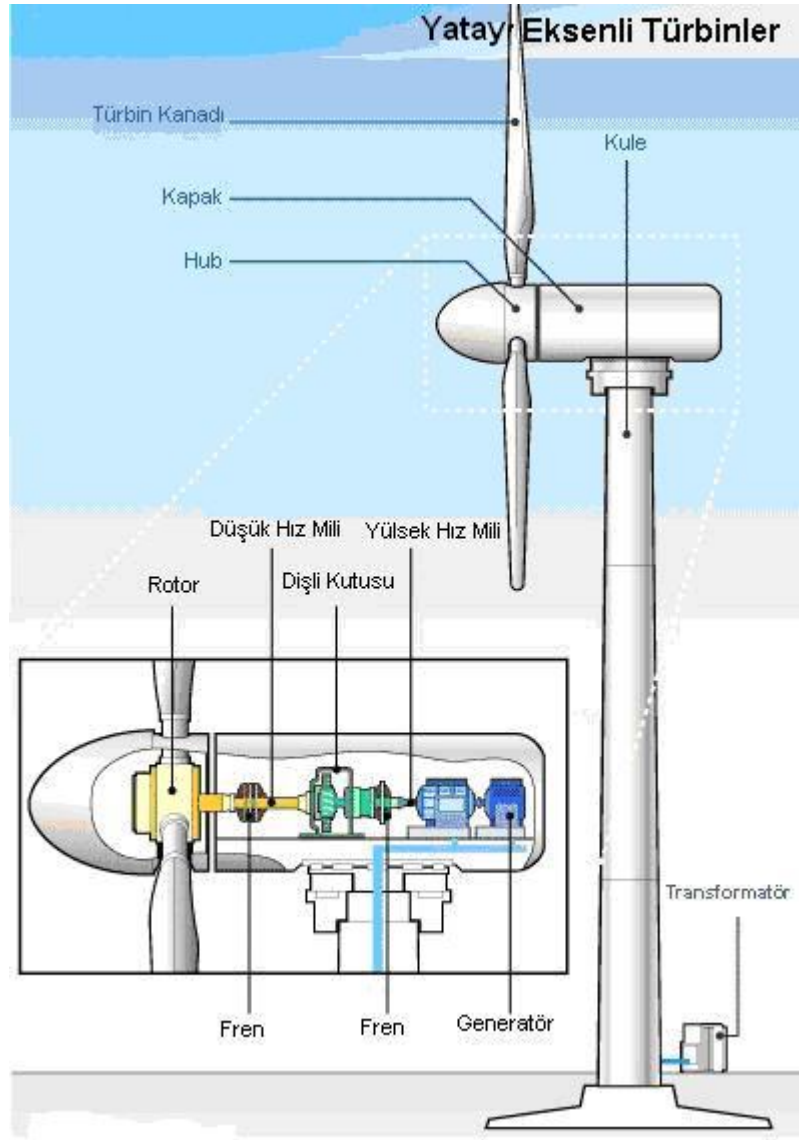
Şekil 2.2 Düşey eksenli rüzgar türbini görünüşü [18]

2.2 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri



Şekil 2.3 Yatay eksenli rüzgar türbini iç yapısı [18]

Düşey eksenli rüzgâr türbinleri düşük skalalı türbinler için ve tarımsal alanlarda suyu pompalamak için kullanılmaktadırlar. Asıl faydalı olan rüzgâr türbinleri, yatay eksenli rüzgâr türbinleridir. Adından da anlaşılacağı üzere, türbin mili yere paralel olacak şekilde yani yatay olarak monte edilmiştir. Şekil 2.3 te de görüldüğü üzere, yatay eksenli rüzgâr türbinleri rüzgâr estiği esnada sabit bir dönme mekanizması olan yaw ayar mekanizmasına sahiptir. Yaw sistemi tipik olarak, elektrik motorları ve düşük değışimlerde bile rotora girişı arttıran veya azaltan bir vites kutusu mekanizmasına sahiptir. Türbinin elektronik kontrol ünitesi, kanatların konumunu okur ve rüzgârdan mümkün olduğunca yararlanabilmek için rotorun pozisyonunu ayarlar. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde tüm donanımlar rüzgârdan en iyi şekilde faydalanılabilecek şekilde yer seviyesinden yüksekte bulunmaktadır ve düşey eksenli rüzgâr türbinlerine nazaran yerden yüksekte bulunduğu için daha az yer kaplamaktadırlar.(260 feet=80 metre) . Şekil 2.4 te bir yatay eksenli rüzgar türbinine ait elemanlar ve Şekil 2.5 te de yatay eksenli bir rüzgar türbini uygulaması görülmektedir.



Şekil 2.4 Yatay eksenli rüzgar türbini elemanları [18]

Büyük yatay eksenli rüzgâr türbini malzemeleri:

Rotor Kanatları-Rüzgâr enerjisini alır ve mile dönme enerjisi olarak aktarır.

Mil-Dönme enerjisini jeneratöre aktarır

Beşik-İçinde şunlar bulunmaktadır:

Vites kutusu-Rotor hub'ı ile jeneratör arasındaki milin hızını artırır

Jeneratör-Elektromanyetizma kullanarak milin dönme enerjisinden elektrik üretir

Elektronik Kontrol Ünitesi(gösterilmemiştir)-Sistemi görüntüler, arıza anında türbini kapatır ve yav mekanizmasını kontrol eder

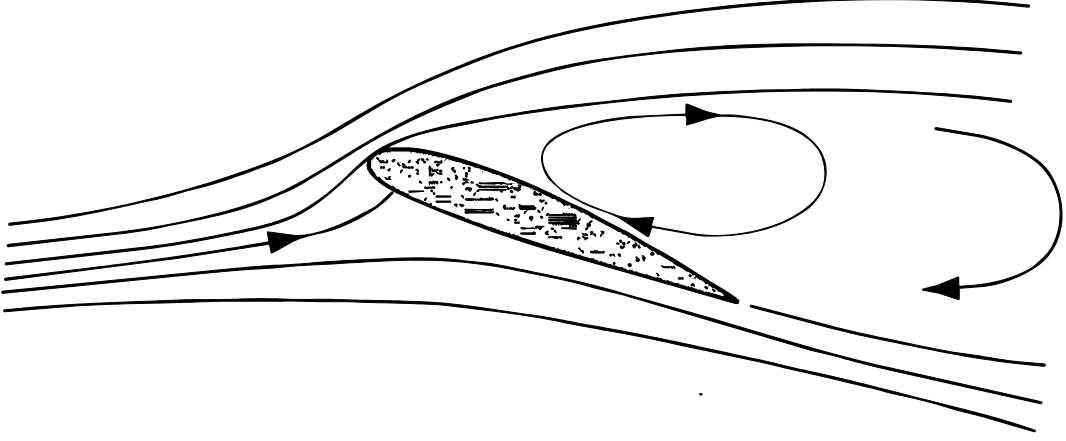
Yav Kontrolörü(gösterilmemiştir)-Rüzgâr doğrultusu ile aynı hizada olması için, rotoru hareket ettirir

Frenler-Gücün aşırı artması durumunda veya sistemde herhangi bir hata olması durumunda milin dönme hareketini durdurur

Kule-Rotor ve beşiğine destek sağlar ve kanatların rahat bir şekilde dönebilmesi için kanatların gerekli yükseklikte olmasını sağlar

Elektriksel Donanımlar-Elektriğin jeneratörden, aşağıya taşınmasını sağlar ve türbinin içerdiği birçok güvenlik donanımını kontrol eder.

Kanatları rüzgâr hareketine doğru iten eski tip kanat dizaynına sahip Hollanda tipi türbinlerin aksine modern tip türbinler, rüzgârdan daha çok verim elde edebilmek adına daha çok karmaşık aerodinamik yasalardan yararlanmaktadırlar. Rüzgâr türbinleri için kullanılması muhtemel olan iki aerodinamik yasadandır biri, rüzgâr akışına dikey etkide bulunan kaldırma, ikincisi ise rüzgâr akışına paralel olarak oluşan sürüklenmedir ve Şekil 2.6 da gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Rüzgâr türbininin aerodinamiği [18]

Türbin kanatları uçak kanatlarına benzer bir şekilde dizayn edilmiştir ve üzerinde kanatçıklar bulunmaktadır. Bir kanat profilinde, kanatın bir tarafı yuvarlatılmış biçimdedir, diğeri ise bağlantılı olarak düzdür. Kaldırma daha karmaşık bir fenomen olup, açıklanabilmesi için daha çok matematiksel ve fiziksel denklemlere ihtiyaç vardır. Fakat basitçe açıklamayı deneyecek olursak, rüzgâr kanadın yuvarlatılmış bölgesinin etrafında ve kanadın altına yakın iken, kanatın sonundaki düz kısma yani üstüne doğru ulaşabilmesi için daha hızlı geçiş oluşur. Hava akımının daha hızlı olduğu durumlarda kanat üzerindeki yuvarlatılmış bölgenin etrafında düşük basınç alanı oluşur. Düşük basınç alanı, kanadı yukarıya doğru iter ki bu etkiye kaldırma etkisi denir. Kanadın üst yüzeyinde, aynı uçaklarda olduğu gibi kanadı yavaşlatmak için rüzgâr hareketi daha yavaş olur ve kanat üzerinde bir yüksek basınç alanı oluşturarak kanadı aşağıya doğru iter. Uçak kanatlarını tasarım ederken kullanıldığı gibi, verimli bir kanat tasarımı yapabilmek için yüksek bir kaldırma-sürüklenme oranı gerekmektedir. Türbin kanatları yüksek kaldırma-sürüklenme oranına sahip olabilmek için belirli bir açıda döndürülmüştür.

Verimli bir türbin kanadı tasarlayabilmek için yalnızca aerodinamik kanunları kullanmak yeterli değildir ve diğer öne çıkan unsur ise boyuttur. Bir türbin kanadından maksimum derecede verim alıp, buna bağlı olarak maksimum elektrik üretilmesi için gerekli olan en önemli unsurlarda biride boyut kapasitesin büyüklüğüdür. Genel olarak konuşacak olursak, rotor çapının iki kat büyütülmesi demek, elde edilen enerjinin dört kat yükselmesine sebep olacaktır. Bazı durumlarda örneğin düşük rüzgâr hızının bulunduğu bölgelerde, daha düşük çaplı bir rotorun kullanılması ile daha büyük çaplı bir rotordan daha fazla enerji elde edilebilir. Çünkü daha küçük bir kurulum ile küçük olan bu jeneratörü döndürmek için daha düşük bir rüzgâr hızına ihtiyaç duyulur ve bu sayede türbinin tam kapasitede çalışabilmesine imkân doğar.

Kule Yüksekliği, üretim kapasitesine etki eden temel unsurlardan biridir. Daha büyük türbinler, daha yüksekte olması durumunda bu yüksekliklerde rüzgâr hızının daha fazla olması dolayısıyla daha çok enerji üreteceklerdir. Sürtünme daha az seviyede olacaktır ve fiziksel hesaplar göstermektedir ki yüksekliğin iki kat artırılması ile %12'lik bir verim artışı izlenebilecektir.

Rüzgâr tarafından tahrik edilen bir türbinin gücünü hesaplayabilmek için, türbin tarafındaki rüzgâr hızının ve türbin güç faktorünün bilinmesi gerekmektedir. Çoğu büyük türbinler, üretebildikleri maksimum gücü 15 metre/saniye yani 54 km/saat hızda üretmektedirler. Rüzgâr hızlarının yanında üretilecek gücü belirleyici bir unsurda rotor çapıdır. Rotor çapı, bir jeneratörden ne kadar güç elde edileceğini belirtmektedir. Unutmamak gerekir ki rotorun çapının büyümesi demek, aynı zamanda kulenin yüksekliğinin de büyümesi anlamına gelmektedir ve bu da sistemin daha yüksek hızlara müsaade edeceği anlamına gelmektedir.

15 metre/saniye'de, türbinler belirtilen güç kapasitesini üretirler ve 20 metre/saniye'de çoğu büyük türbinler kapanır. Bazı durumlarda rüzgâr hızı, yapıya zarar verebilecek limitlerin üzerine çıkabilmektedir. Bu yüzden bazı türbinlerde, belli bir zincire bağlı olan, ince bir şaft ayağı üzerinde bulunan ve metal bir top içeren basit bir titreşim sensörü kullanılarak türbini kapatır ve zarar görmesini engeller. Eğer türbin bir eşik değerinde titreşimle çalışmaya başlar ise, metal top şaft ayağının üzerine düşer, zinciri çeker ve türbinin kapanmasını sağlar.

Çizelge 2.1 Türbin rotor büyüklüğüne göre maksimum çıkış gücü hesabı [18]

Rotor Büyüklüğü ve Maksimum Çıkış Gücü	
Rotor Çapı (metre)	Çıkış Gücü (kW)
10	25
17	100
27	225
33	300
40	500
44	600
48	750
54	1000
64	1500
72	2000
80	2500

Türbin sistemlerinde en yaygın ve etkin olarak kullanılan güvenlik sistemi, rüzgârın eşik değerlere ulaştığı anda harekete geçen Frenleme Sistemi'dir. Bu düzenek genel olarak rüzgâr hızları çok yüksek bir değere çıktığında frenleyen, tekrar 72 km/saat hızın altına düştüğünde ise frenleri serbest bırakan bir güç kontrol sistemi ile kontrol edilmektedirler. Modern büyük türbin dizaynlarında birçok tip frenleme sistemi kullanılmaktadır:

Diş Kontrolü- Türbinin elektronik kontrolörü türbinin çıkış gücünü göstermektedir. Rüzgâr hızının 72 km/saat'in üzerine çıkması halinde, çıkış gücü çok yüksek olacaktır ve kontrol mekanizması bu durumda kanatlara açılmasını iletcek, bu da kanadın rüzgâr ile

olan hizasını bozacaktır. Bu da kanatların dönmesini yavaşlatacaktır. Dış kontrollü sistemler kanatların rotor üzerine ayarlanabilmesine olanak sağlaması açısından açılı olarak monte edilmesine gereksinim duymaktadırlar.

Pasif Hız Azalması Kontrolü– Kanatlar rotora karışık açılarda monte edilmişlerdir fakat rüzgârın çok hızlı gelmesi durumunda kırılmanın olmaması için kendi kendini döndürebilmesine olanak sağlayacak şekilde dizayn edilmişlerdir. Kanatlar açılıdır ve bu yüzden yüksek rüzgâr hızları kanatların üst kısmında türbülansa neden olmaktadır. Kanat açıları değişmesi sayesinde kanat üzerindeki kaldırma kuvveti azalmaya başlar.

Aktif Hız Azalması Kontrolü- Bu tip güç kontrol sistemi dâhilindeki kanatlar dış kontrol sisteminde olduğu gibi dişli yapıdadırlar. Bir aktif hız azalması sistemi, o süreç içerisindeki çıkış gücünü okur ve kanatların hareketi ile rüzgârla hizasının değişmesi yoluyla hız azalması oluşturur.

3. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN MODELLENMESİ

Bir rüzgar türbinin ürettiği mekanik güç ,

$$P_t = 0.5\pi D^2 u^3 C_p$$

ifadesi ile verilir.

Burada;

ρ : Havanın özgül ağırlığı kg/m^3

D : Türbin yarı çapı (m)

v : Rüzgar hızı (m/s)

C_p : Güç katsayısıdır.

C_p katsayısı da

$$\lambda = R \omega / v$$

ile tanımlanan uç hız oranına bağlı bir büyüklük olup, her rüzgar hızı için, belirli mil hızında bir maksimum değere sahiptir.

Burada,

ω : Mil açısal hızı (rad/s)'dir.

Bir generatörün, rüzgar türbini tarafından döndürülmesi, elektrikle hareketlendirmedeki kuvvet makinası ve iş makinasından oluşmuş temel bir sistem şeklinde düşünülebilir. Böyle bir sistemin çalışma noktası, kuvvet makinasının döndürme momenti - dönüş hızı karakteristiği ile iş makinasının döndürme momenti- dönüş hızı karakteristiğinin kesişme noktasıdır. Bu nedenle modellemenin ilk aşamasını rüzgar türbinin mil hızına bağlı olarak ürettiği döndürme momentinin belirlenmesi oluşturmaktadır. Rüzgar türbininin ürettiği mekanik güç ifadesinin, ω mil hızına bölünmesi ile döndürme momenti elde edilebilir. Bu işlem yapılırsa,

$$M_t = (0.5 \rho_p D^2 u^3 C_p(\lambda)) / \omega$$

$$M_t = (0.5 \rho_p D^2 u^2 C_t(\lambda))$$

elde edilir. Burada,

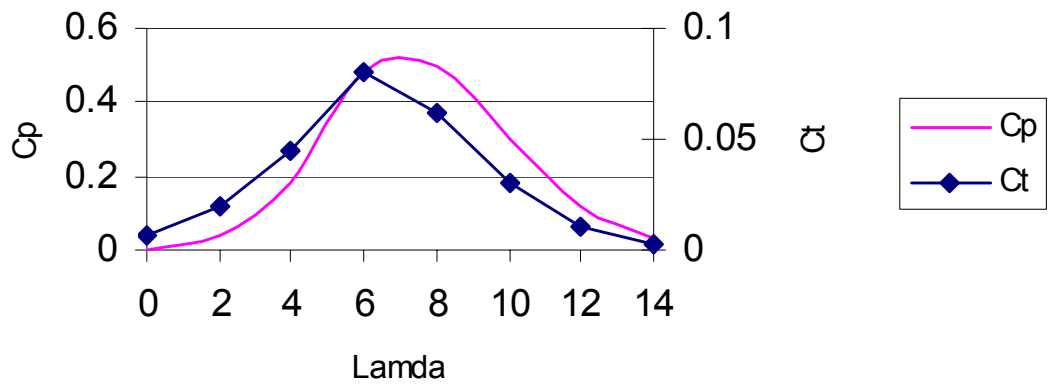
M_t : Türbinin döndürme momenti,

C_t : Döndürtme Moment katsayısıdır.

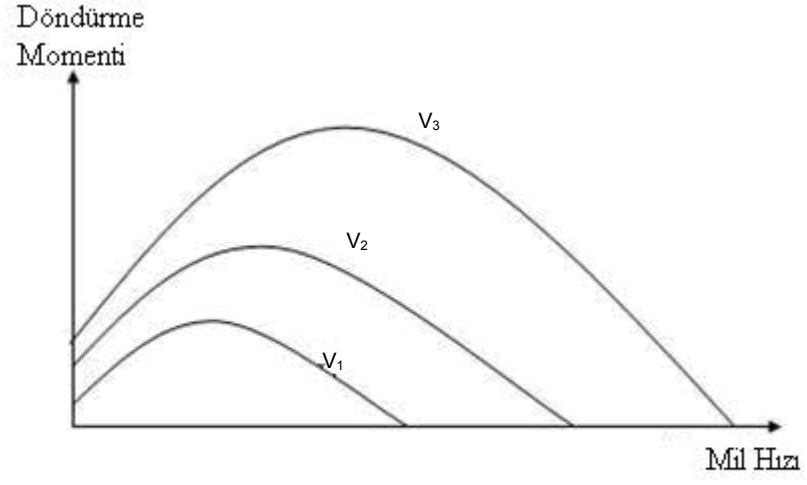
Güç katsayısı C_p ile moment katsayısı arasında,

$C_p(\lambda) = \lambda C_t(\lambda)$ bağıntısı geçerlidir.

Modelleme açısından en önemli büyüklük olan C_t katsayısının uç hız oranına göre değişimi, türbin üreticisi firmalar tarafından verilmiş grafiklerden, rüzgar tüneli testlerinden elde edilebilir ya da bir prototip için sonlu elemanlar analizi yardımıyla hesaplanabilir. Herhangi bir şekilde elde edilen $C_t=f(\lambda)$ değişimi yüksek dereceli polinomlarla matematiksel olarak ifade edilebileceği gibi, kullanılan yazılımın elvermesi durumunda bir giriş-çıkış tablosu ile de modellenebilir. Tipik olarak döndürme momenti ve güç katsayısının, uç hız oranına bağlı değişimi Şekil 3.1 de verilmiştir. Burada dikkat çeken nokta maksimum döndürme momentinin olduğu uç hız oranı ile maksimum gücün olduğu uç hız oranının farklı olmasıdır.



Şekil 3.1 C_p ve C_t katsayılarının uç hız oranına bağlı değişimleri (DURU 2005)



Şekil 3.2 Döndürme momentinin mil hızına bağlı değişimi (DURU 2005)

4. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN ELEKTRİK MAKİNALARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Rüzgar türbininin ürettiği mekanik enerjiyi minimum kayıpla elektrik enerjisine dönüştürmek için, farklı hız ve çıkış kombinasyonları kullanılmaktadır. Rüzgar türbinlerinde üç çeşit generatör kullanılmaktadır.

- 1) Doğru akım generatörü,
- 2) Senkron generatör,
- 3) Asenkron generatör.

Küçük güçlü sistemlerde eskiden çok kullanılan doğru akım generatörü, günümüzde yerini genellikle senkron veya asenkron generatörlere bırakmıştır. Bu generatörler, konverterler yardımıyla kolayca doğru akımı alternatif akıma dönüştürebilen güç elektroniği elemanları ile birlikte çalışmaktadırlar. Senkron ve asenkron generatörler daha çok orta ve büyük güçlü sistemlerde yaygın olarak kullanılırlar.

4.1 Doğru Akım Generatörleri

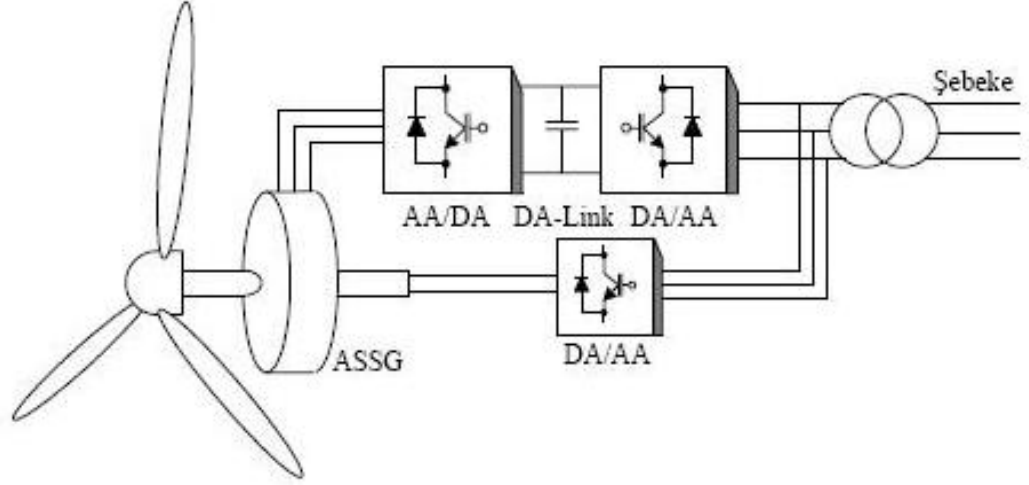
Doğru akım makinaları, düşük güvenilirlik ve bakım gerektirmesi gibi dezavantajlarına rağmen, hız kontrollerinin kolay olması nedeniyle endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Doğru akım generatörleri küçük kapasiteli rüzgar türbinlerinde, özellikle elektriğin şebekeden bağımsız olarak kullanıldığı yerlerde tercih edilmektedirler. Son yıllarda mekaniksel komütatörlü doğru akım makinaları, komütatörü elimine etmek için daimi

mıknatıslı olarak tasarlanmaya başlanmıştır. Bu tertibatta üretilen alternatif akım yarı iletken doğrultucular yardımıyla doğru akıma dönüştürülür. Fırçasız doğru akım makinaları olarak da isimlendirilen bu makinalar, daimi mıknatısların kapasitelerinin ve güçlerinin sınırlı olması nedeniyle, küçük güçlü rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadırlar.

4.2 Senkron Generatörler

Senkron generatör, harici bir yükü besleyen üç fazlı sargıların oluşturduğu bir stator ve manyetik alanı oluşturan bir rotordan meydana gelir. Rotorun oluşturduğu manyetik alan ya daimi mıknatıslardan ya da sargılardan akan doğru akımdan üretilir. Senkron generatörler sabit hızlı sistemler için daha uygundur. Bu nedenle sabit hıza bağlı olarak sabit frekansta çalışırlar. Rüzgar türbinlerinde, genellikle alan sargılı ve daimi mıknatıslı olmak üzere iki tip senkron generatör kullanılmaktadır.

4.2.1 Alan Sargılı Senkron Generatör



Şekil 4.1 Değişken hızlı alan sargılı senkron generatör yapısı (UYAR 2006)

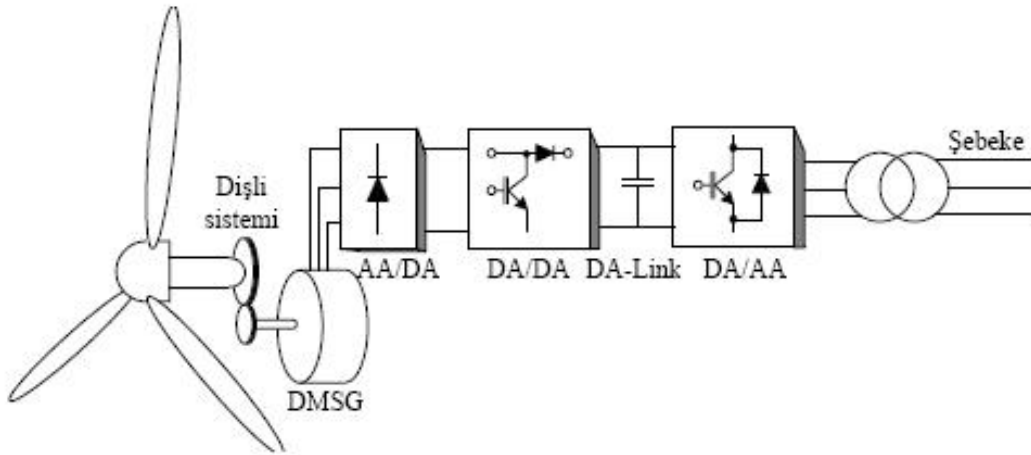
Alan sargılı senkron generatörlerde, stator sargısı, dalga genişlik modülasyonu tekniğine göre anahtarlama yapabilen, çift yönlü akım akışının olabildiği gerilim kaynaklı iki inverterden meydana gelmiş, dört bölgeli bir güç konverteri üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Stator tarafındaki konverter elektromanyetik torku, şebeke tarafındaki konverter ise bu sistemin oluşturduğu aktif ve reaktif gücü regüle eder. Alan sargılı senkron generatörlerin sağladığı avantajlar şunlardır:

Elektromanyetik tork üretiminde stator akımının tamamı kullanıldığı için bu makinanın verimi genellikle yüksektir.

Çıkık kutuplu alan sargılı senkron generatörün kullanılmasının en büyük faydası, makinanın güç faktörünün doğrudan kontrolüne müsaade edilmesidir. Bunun sonucu olarak, stator akımı bir çok işletim durumunda minimize edilebilir.

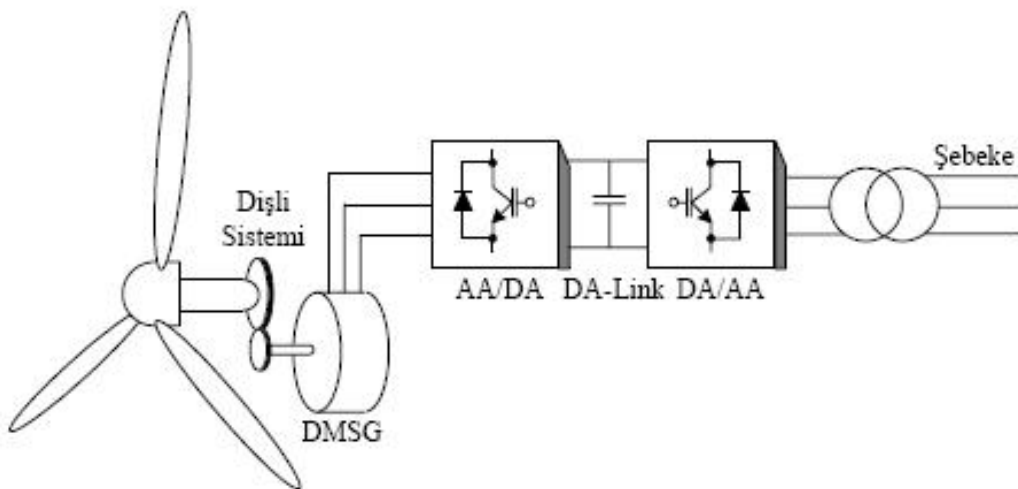
Bu generatörlerin kutup eğimi indüksiyon makinalarına göre daha küçük olabilir. Bu durum dişli kutusu elimine edilerek, düşük hızlı çok kutuplu makinalar elde edilmesinde önemli bir özellik olabilmektedir. Rotorda sargı devresinin bulunması daimi mıknatıslı senkron generatör ile kıyaslandığında bir dezavantajdır. Ayrıca üretilen aktif ve reaktif gücü regüle etmek için, nominal rüzgar gücünün 1.2 katı büyüklüğünde konverterler kullanılması gerekmektedir.

4.2.2 Daimi Mıknatıslı Senkron Generatör



Şekil 4.2 Yükseltici DA-DA kıyıcısı ile beslenen daimi mıknatıslı senkron generatör
(UYAR 2006)

Şekil 4.2 de üç fazlı doğrultucuyu takip eden, yükseltici DA-DA kıyıcısı ile bağlantısı sağlanmış, daimi mıknatıslı senkron generatöre ait rüzgar güç sistemi görülmektedir. Burada yükseltici DA-DA kıyıcısı ve elektromanyetik torku kontrol etmektedir. Şebeke tarafındaki konverter ise, girişin güç faktörünü kontrol ettiği gibi, aynı zamanda DA link gerilimini de regüle etmektedir. Genellikle bu konfigürasyon küçük güçlü rüzgar güç sistemleri için tercih edilmektedir.



Şekil 4.3 Dalga genişlik modülasyonlu konverterden beslenen
daimi mıknatıslı senkron generatör (UYAR 2006)

Şekil 4.3 'de farklı bir daimi mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar güç sistemi görülmektedir. Bu sistemde generatör ve DA linki arasına DGM tekniğini kullanan doğrultucu yerleştirilmiştir ve DGM inverter üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Bu sistemin Şekil 4.2 'deki sisteme göre avantajı; generatör ve güç elektroniği devresindeki kayıpları azaltmak için, optimal çalışma noktasına yakın bir çalışmaya müsaade edilen alan yönlendirmeli kontrolün kullanılmasıdır. Fakat, sıcaklık ve frekansla değişebilen generatör parametrelerinin performansı etkileyebileceği dikkate alınmalıdır

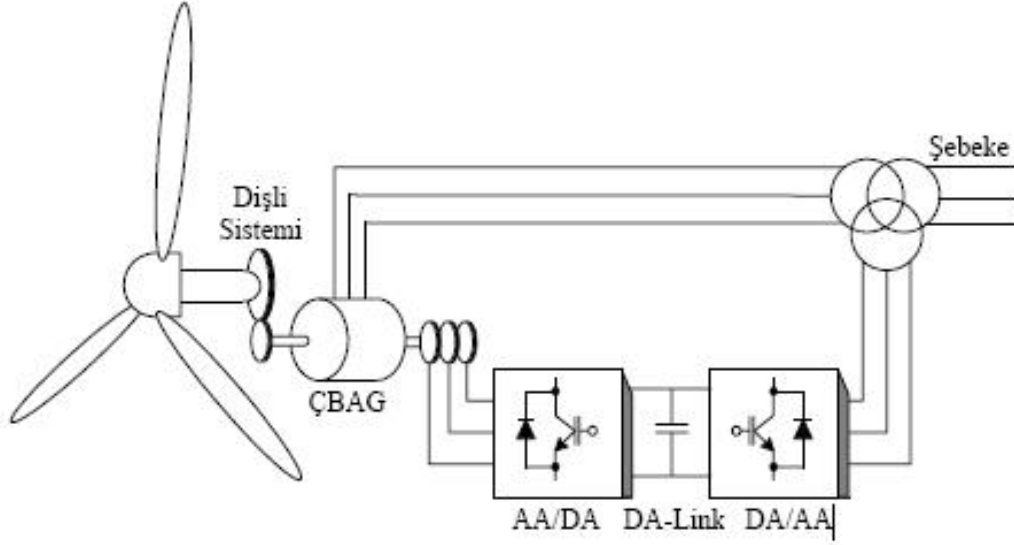
Daimi mıknatıslı senkron generatörün dezavantajları şunlardır:

- Makinanın fiyatını arttıran daimi mıknatısların maliyeti yüksektir.
- Akımın genliğini arttıran diyotlu doğrultucular kullanılmaktadır.
- Mıknatıs malzemesinin manyetikliği bozulabilmektedir.
- Makinanın güç faktörünün kontrol edilmesi mümkün değildir.

4.3 Asenkron Generatörler

Rüzgar türbinlerinde, alternatif akım üretmek için üç fazlı asenkron generatör veya indüksiyon generatörü olarak isimlendirilen generatörler kullanılmaktadır. Bu tip generatörler rüzgar türbin endüstrisi ve küçük hidroelektrik santraller dışında yaygın bir şekilde kullanılmamaktadırlar. Bu generatörlerin tercih edilmelerinin sebebi, emniyetli olmaları ve maliyetlerinin düşük olmasıdır. Rüzgar türbinlerinde, genellikle rotoru sargılı ve sincap kafesli olmak üzere iki tip asenkron generatör kullanılmaktadır.

4.3.1 Çift Beslemeli Asenkron Generatör



Şekil 4.4 Çift beslemeli rotorlu asenkron generatör (UYAR 2006)

Şekil 4.4' te çift beslemeli asenkron generatörün kullanıldığı bir rüzgar güç sistemi görülmektedir. Bu sistemde, stator sargısı şebekeye doğrudan bağlanmıştır. Rotor sargısı ise iki adet geri dönüşlü gerilim kaynaklı Dalga genişlik modülasyonu tekniğini kullanan inverterden oluşan, dört bölgeli güç konverteri üzerinden şebekeye bağlanmıştır.

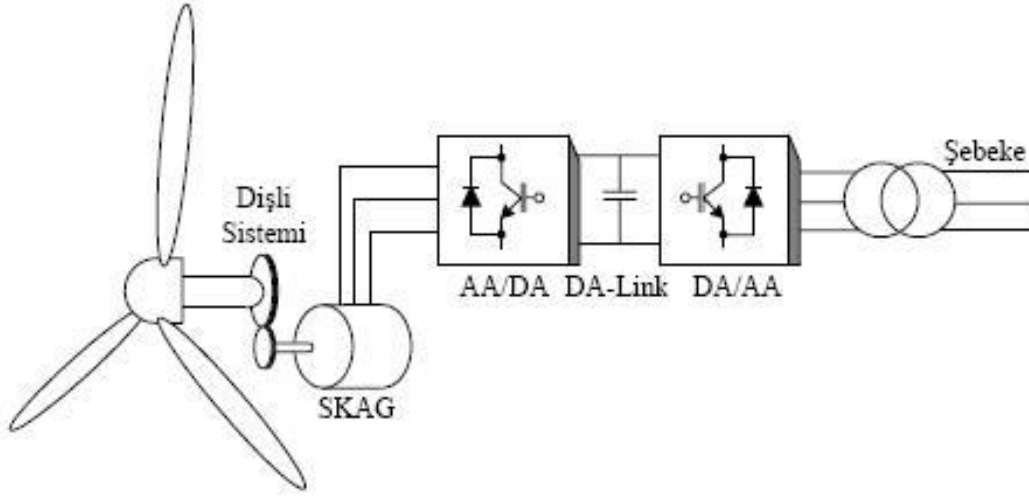
Genellikle, rotor tarafındaki konverter kontrol sistemi, elektromanyetik torku regüle eder ve makinanın manyetizasyonunu sürdürebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki konverter kontrol sistemi ise, DA linkini regüle eder. Senkron generatörlerle karşılaştırıldığında, çift beslemeli asenkron generatörün aşağıda belirtilen bazı avantajları:

- Sadece rotorun kayma gücünü kontrol etmeye yarayan konverter sistemine sahip olduğu için, toplam sistem gücünün yaklaşık %25 'i oranında bir inverter kullanılmaktadır. Bu da inverter maliyetini azaltır.
- Sistemde kullanılan filtreler toplam sistem gücünün 0.25 p.u.'lik kısmı için gerekli olduğundan, inverter filtrelerinin maliyeti azalmaktadır. Aynı zamanda inverter harmonikleri, toplam sistem harmoniklerinin daha küçük bir bölümünü temsil etmektedir.
- Ayrıca bu makina harici bozucu etkilere karşı dayanıklılık ve kararlılık göstermektedir.

Çift beslemeli asenkron generatör için en büyük dezavantaj, bünyesinde periyodik bakıma ihtiyaç duyan bilezik tertibatının bulunmasıdır.

4.3.2 Sincap Kafesli Asenkron Generatör

Rüzgar güc sistemlerinde kullanılan bir başka generatör ise, sincap kafesli asenkron generatördür.



Şekil 4.5 Değişken hızlı sincap kafesli asenkron generatör (UYAR 2006)

Bu sistemde stator sargısı, DA linkinin iki tarafına geri dönüşüm gerilimi kaynaklı iki DGM inverterden meydana gelen, dört bölgeli güç konverteri üzerinden şebekeye bağlanır. Stator tarafındaki konverterin kontrol sistemi, elektromanyetik torku regüle eder ve makinanın manyetik alan üretebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki konverter, sistemden şebekeye aktarılan aktif ve reaktif gücü ve aynı zamanda DA linkini regüle eder. Rüzgar güc sistemlerinde kullanılan sincap kafesli asenkron generatörün sağladığı avantajlar şunlardır:

- Sincap kafesli asenkron makinalar, fırçasız, güvenilir, ekonomik ve sağlam bir yapıya sahip olmaları nedeniyle uygulamada sıkça kullanılmaktadırlar.
- Doğrultucu, generatör için programlanabilir bir uyartım oluşturabilmektedir.
- İnverter, harmonik kompanzator olarak çalıştırılabilmektedir.

Generatör parametrelerinin sıcaklık ve frekansla değişerek sistemin kontrolünü karmaşılaştırması ve stator tarafındaki konverterin, makinanın ihtiyaç duyduğu manyetik alanı sağlamak için nominal güce göre %30-%50 oranında daha büyük ölçülerde yapılması, bu sistemin dezavantajları arasında yer alır.

5. ASENKRON GENERATÖRLERİN MODELLENMESİ

5.1 Asenkron Generatörün Çalışma İlkesi

İçinde endüktif akım verebilen bir alternatif gerilim şebekesine bağlı asenkron motorun rotunu, stator döner alanı yönünden ve döner alandan biraz daha küçük bir hızla dönerek statorundan aldığı elektrik enerjisinin, milinden mekanik enerji olarak verir. Rotor, dışarıdan bir mekanik sürücü ile döner alan yönünden ve hızında döndürülürse, makine rotoru sargılarında bir gerilim ve akım endüklenmez. Bu çalışma türü, ne motor ve ne de generatör çalışmasına karşı düşer. Şimdi rotoru, mekanik sürücü ile döner alanın hızı ile aynı yönde ve senkron hızından daha büyük hızla döndürelim. Döner alanın senkron hızı n_s , dönme hızı n ve rotor döner alanın dönme hızı n_r ise (kutup çifti sayısı $p=1$ için), aşağıdaki özellikler oluşur.

a) $n = n_s + n_r$ rotor dönme sayısı $n > n_s$

b) $s = \frac{n_s - n}{n_s} < 0$

c) Stator akımı I_s 'nin fazı 180° değişir ve

d) Generator şebekeye elektrik gücü verilir. $P_e = 3V_s I_s \cos \phi_s < 0$ elektrik gücü motor çalışmasına göre yön değiştirir.

e) Makine milinden mekanik güç alır ve elektrik uçlarında bağlı olduğu şebekeye elektrik enerjisi verir. $P_m > 0$ ve $P_e < 0$ olur.

5.2 Asenkron Generatörün Yapılışı

Asenkron generatör, yapılış bakımından asenkron motor ile aynıdır. Bilezikli, sincap kafesli bir, iki, üç ve çok fazlı yapılabilirler. Çalışma ilkesi bakımından asenkron generatör bir mekanik sürücü motor buhar türbini, gaz türbini ya da rüzgar türbini ile senkron hızın üstünde döndürülmesi ve mıknatıslanma akımını sağlayacak bir şebekeye bağlı olması kazımdır. Mıknatıslanma akımı endüktif bir akımdır. Bu akımı, asenkron generatörün bağlı olduğu şebekedeki senkron generatörler ya da senkron generatörler bulunmuyor ise kapasitelerden sağlanır. Sincap kafesli asenkron generatörlerin fırçası bulunmadığından arıza yapma olanağı yok denecek kadar azdır.

Asenkron generatörlerde, senkron seneratörün tersine üretilen gerilimin frekansı sabit değildir. Frekansı sabit olmayan bir alternatifakım güç kaynağı, ilk bakışta, pek kullanılışlı olmadığı yargısına varılabilir. Ancak güç elektroniği ve mikroelektronik devreleri ile bu kaynak sabit frekanslı alternatif akım güç kaynağına çevrilebilir.

5.3 Asenkron Generatörün Modellenmesi

Bir endüstriyel sistemi gerçekleştirilmeden önce, sistemin çeşitli çalışma koşulları altında davranışının incelenmesi ve uygun kontrol kurallarının belirlenmesi istenir. Bu amaçla gerçekleştirilecek sistemi en doğru şekilde temsil eden denklemlere gerek vardır. Sistem davranışını veren matematiksel ifadelerin elde edilmesi işleme modelleme adı verilir. Böylece istenen belli davranış kriterlerini sağlayabilecek kontrol sistemleri geliştirilebileceği gibi, sistemin çeşitli parametrelere duyarlılığını ve doğrudan ölçülemeyen değişkenlerin davranışlarını belirlemek mümkün olur. Bir elektromekanik dönüştürücü olan asenkron makinenin davranışını verecek matematik modelin elde edilmesinde de, elektrik ve mekanik yana ilişkin olarak Kirchhoff ve Newton kanunlarında ve elektromekanik dönüşüm için enerji korunumundan yararlanılmıştır. Bu şekilde elde edilen modelin mümkün olan tüm sistem davranışlarını içermesine çalışılmıştır. Fiziksel sistemlerin modellenmesi ancak bazı varsayımlar altında mümkündür. Bu varsayımlardan amaç elde edilecek modelin karmaşık hale gelmesini önlemek ve bu model baz alınarak sistem davranışını belirleyecek sistem ve kontrol algoritmalarının geliştirilmesi kolaylaştırmak. Model, sistem davranışını tam olarak yansıtmıyorsa yapılan varsayımların yeniden gözden geçirilmesi gerekir. Asenkron makinenin modelinin elde edilmesinden yapılan varsayımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- a) Stator sargıları stator çevresine düzgün yayılmış olup hava aralığındaki akı değişiminin sinüzoidal olarak değiştiği kabul edilecektir.
- b) Üç fazlı stator sargıları çerçeveye 120° lik elektrik açı ile düzgün biçimde yayıldığı varsayılacaktır.
- c) Doyma, dış ve oluk etkileri ihmal edilecektir.
- d) Histeresiz ve fuko kayıpları ihmal edilecektir.
- e) Magnetik kısımların geçirgenliği sonsuz sayılacaktır.
- f) Akım yığılması (deri olayı) ihmal edilecektir.
- g) Rotor çubuklarının çevreye simetrik yayıldığı varsayılacaktır.

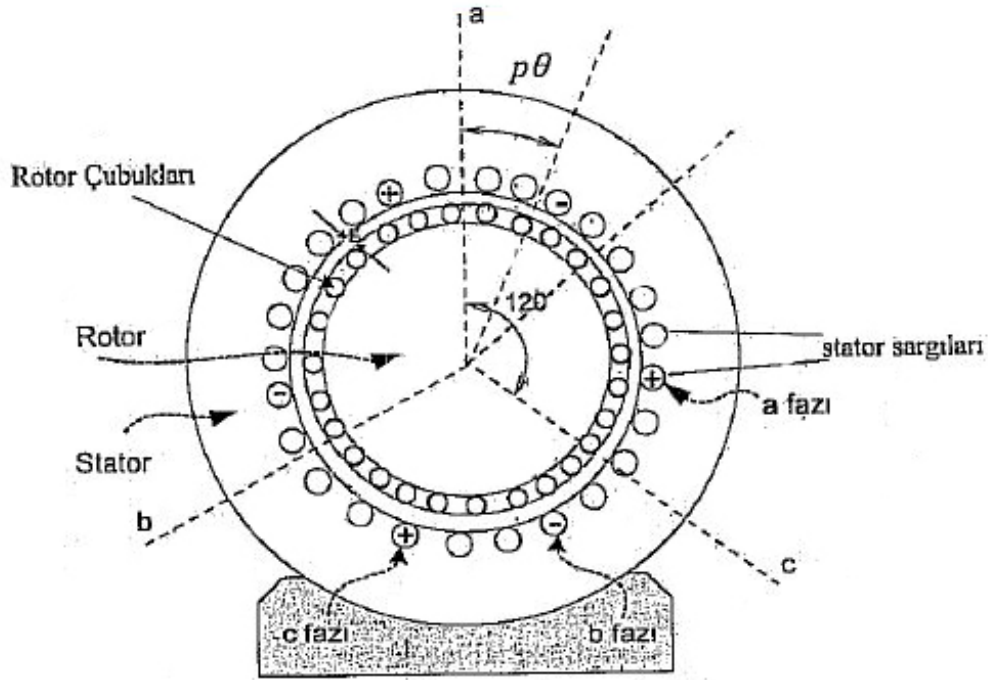
h) Direnç ve endüktansların sıcaklık ve frekansla değişimleri ihmal edilecektir.

i) Rotorun her çubuğu bir rotor faz sargısı olarak varsayılacaktır.

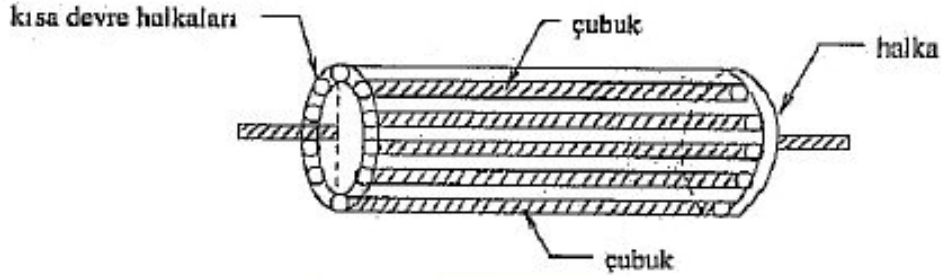
Daha önce açıklandığı gibi, asenkron makinalar ve bilezikli asenkron makinalar olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. Bu bölümde, her iki tip makinanın geçici ve sürekli rejim davranışını veren matematik modelleri elde edilecektir.

5.3.1 Sincap Kafesli Asenkron Makinanın Matematiksel Modeli

Endüstride yaygın olarak kullanılan sincap kafesli veya kısa devre rotorlu asenkron makine, çoğunlukla motor olarak kullanılıp statoru 3, rotoru m fazlı bir yapıya sahiptir. Bu makinalar da rotor ve stator arasındaki hava aralığı düzgün olup, motor kesiti Şekil 5.1 de, rotor sayısı ise Şekil 5.2 de verilmiştir.



Şekil 5.1 3 fazlı kısa devre rotorlu asenkron makine kesiti



Şekil 5.2 Kısa devre rotorlu asenkron makinanın rotor yapısı

Öncelikle Şekil 5.3'teki rotorun her çubuğu bir rotor faz sargısı olarak kabul edilen eşdeğer devreden hareketle makinanın toplu parametrelili modeli ele alınacaktır. Modelde yer alan stator ve rotor devresine ilişkin eşdeğer devre parametreleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

$$L_s = \frac{N_s^2 \mu_o A}{g} \quad : \text{stator sargı endüktansı [H]}$$

$$L_r = \frac{N_r^2 \mu_o A}{g} \quad : \text{rotor çevre endüktansı [H]}$$

$$M_m = \frac{N_s N_r \mu_o A}{g} \quad : \text{rotor ve stator arasındaki karşit endüktansın maksimum değeri [H]}$$

R_s : stator faz sargı direnci [Ω]

R_h : iki çubuk arasındaki halka parçası direnci [Ω]

$R_ç$: çubuk direnci [Ω]

M_{ss} : stator faz sargıları arası karşit endüktans [H]

M_{rr} : rotor çubukları arası karşit endüktans [H]

Burada ,

$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$, boşluğun magnetik geçirgenliği

g : hava ağırlığı [m]

A : hava ağırlığı kesidi [m^2]

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_h + R_\zeta) & -R_\zeta & 0\dots & 0\dots & -R_\zeta \\ -R_\zeta & 2(R_h + R_\zeta) & -R_\zeta & 0\dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -R_\zeta & 0 & 0\dots & R_\zeta & 2(R_h + R_\zeta) \end{bmatrix}_{(m^*m)} \quad (5.2)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_{rr} & \cdot & \cdot & M_{rr} \\ M_{rr} & L_r & \cdot & \cdot & M_{rr} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ M_{rr} & \cdot & \cdot & \cdot & L_r \end{bmatrix}_{(m^*m)} \quad (5.3)$$

Stator faz sargıları ile rotor çubukları arasındaki ortak endüktans matrisi $[M_{ss}(\Theta)]$ makinanın açısal konumuna bağlı olarak aşağıdaki gibi verilebilir.

($p > 1$ için) :

$$[M_{s,r}(\theta)] = M_m \begin{bmatrix} \text{Cosp}\theta & \text{Cos}\left(p\theta + \frac{2\pi}{m}\right) & \dots & \text{Cos}\left(p\theta + \frac{2(m-1)\pi}{m}\right) \\ \text{Cos}\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{Cos}\left(p\theta - \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi}{m}\right) & \dots & \text{Cos}\left(p\theta - \frac{2\pi}{3} + \frac{2(m-1)\pi}{m}\right) \\ \text{Cos}\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \text{Cos}\left(p\theta + \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi}{m}\right) & \dots & \text{Cos}\left(p\theta + \frac{2\pi}{3} + \frac{2(m-1)\pi}{m}\right) \end{bmatrix}_{3^*m} \quad (5.4)$$

Buna karşılık rotor çubukları ile stator faz sargıları arasındaki karşıt endüktans ise,

$$[M_{r,s}(\theta)] = [M_{s,r}(\theta)]^T \quad (5.5)$$

biçimindedir. Rotor ve stator endüktanslarının biraraya getirilmesi ile toplam endüktans matrisi,

$$[L_{s,r}(\theta)] = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{s,r}(\theta)] \\ [M_{r,s}(\theta)] & [L_r] \end{bmatrix} \quad (5.5-a)$$

Biçiminde düzenlenebilir. Burada $[L_s]$, 3×3 boyutunda, $[L_r]$ $m \times m$ boyutunda ve $[M_{s,r}]$ ise $3 \times m$ boyutunda matrislerdir.

Akım ve gerilim ifadeleri vektör olarak,

$$\begin{bmatrix} I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ \cdot \\ i_{rm} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Şeklinde dir. Burada a, b, c indisleri stator fazlarına, 1, 2, ...m indisleri ise rotor fazlarına ilişkindir. Buna göre stator ve rotor faz akıları vektör formunda aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} \psi_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{r1} \\ \psi_{r2} \\ \cdot \\ \psi_{rm} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$[\psi_s]$: Stator akı vektörü

$[\psi_r]$: Rotor akı vektörü

Stator ve rotor akı-akım bağlantıları ise;

$$[\psi_s] = [L_s][I_s] + [M_{s,r}(\theta)][I_r] \quad (5.8)$$

$$[\psi_r] = [L_r][I_r] + [M_{r,s}(\theta)][I_s] \quad (5.9)$$

şeklinde yazılabilir. Stator ve rotor eşdeğer devre denklemleri için yukarıdaki tanımlar

kullanılarak aşağıdaki denklemler matris biçiminde elde edilir.

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\psi_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_s][I_s] + [M_{s,r}(\theta)][I_r] \} \quad (5.10)$$

$$[0] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\psi_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} \{ [L_r][I_r] + [M_{r,s}(\theta)][I_s] \} \quad (5.11)$$

Diğer tüm elektrik makineleri gibi eletromekanik bir dönüştürücü olan asenkron makinenin elektriksel yana ilişkin denklemlerinin yanısıra, dönen mekanik denklemleri de verilmelidir. Hareket denklemi olarak adlandırılan bu denklem,

$$M_e = \frac{1}{2} [I_s]^T [I_r]^T + \frac{\partial}{\partial \theta} [L_{s,r}(\theta)] \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \quad (5.12)$$

şeklinde dir.

Yukarıdaki denklemlerde,

r ve s indisli sırası ile rotor ve stator devresi büyüklüklerini,

p : kutup çifti sayısını,

θ : motor mili dönme açısını,

J : motor miline indirgenmiş toplam eylemsizlik momentini,

B : motor miline indirgenmiş toplam viskoz sürtünme katsayısını temsil etmektedir.

Tüm bu varsayımlar altında, sincap kafesli (rotoru kısa devre) asenkron makina, 3 tanesi statora, m tanesi rotora ve 1'i de dönen mekanik kısma ilişkin olmak üzere $(3+m+1)$ adet denklemle modellenmektedir. Rotor faz sayısının $m > 3$ göz önüne alındığında modelin çok sayıda denklemden oluşacağı görülmektedir. Asenkron makinanın bu yapıdaki modelin lineer olmaması ve karşıt endüklem kat sayısının dönme açısı θ 'ya bağlı olması nedeniyle, analize, bilgisayar simülasyonlarına ve kontrol algoritmalarının geliştirilmesi uygun olmadığı açıktır. Bu nedenle daha basit yapıda bir model için çeşitli dönüşüm yöntemlerine gerek vardır.

Bu amaçla, önce simetrik bileşenler yöntemi kullanılarak makine modeli $(3+m+1)$ ' den $(6+1)$ denkleme indirgenecektir. Aşağıdaki gibi verilen dönüşüm matrisleri ortogonal Hermit yapıda olup "Gücün değişmezliği" ilkesine göre elde edilmişlerdir. Başka bir deyişle

$([\Gamma]^{-1} = [\Gamma]^{T*})$ dır. Bu dönüşüm matrisine simetrik bileşenler matrisi denir. Rotor ve stator faz sayıları birbirinden farklı olduğu için rotor büyüklüklerinin dönüşümünde $[\Gamma_R]$, stator büyüklüklerinin dönüşümünde ise $[\Gamma_S]$ dönüşüm matrisleri kullanılacaktır;

$$[\Gamma_S] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad [\Gamma_R] = \frac{1}{\sqrt{m}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & b & \dots & b^{m-1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & b^{m-1} & \dots & b^{(m-1)^2} \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Burada;

$$a = e^{\frac{j2\pi}{3}} \quad b = e^{\frac{j2\pi}{m}} \quad b^{-1} = b^{m-1} \quad b^{(m-1)^2} = b$$

$$M_e = \frac{1}{2} [I_s]^T [I_r]^T + \frac{\partial}{\partial \theta} [L_{s,r}(\theta)] \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt}$$

$$[V_s] = [R_s] [I_s] + \frac{d}{dt} [\psi_s] = [R_s] [I_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_s] [I_s] + [M_{s,r}(\theta)] [I_r] \}$$

eşitlikleri sözkonusudur.

Dönüşüm matrisleri akım ve gerilim vektörlerine uygulandığında dönüştürülmüş stator gerilim ve akım ifadeleri ile dönüştürülmüş rotor akım ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir;

$$[V_S]_{0,+,-} = [\Gamma_S][V_S] \quad [I_S]_{0,+,-} = [\Gamma_S][I_S] \quad [I_r]_{0,+,-} = [\Gamma_R][I_r] \quad (5.14)$$

Bu vektörler aşağıdaki gibi bileşenlerden oluşmuştur.

$$[V_S]_{0,+,-} = \begin{bmatrix} V_{s0} \\ V_{s+} \\ V_{s-} \end{bmatrix} \quad [I_S]_{0,+,-} = \begin{bmatrix} i_{s0} \\ i_{s+} \\ i_{s-} \end{bmatrix} \quad [I_r]_{0,+,-} = \begin{bmatrix} i_{r0} \\ i_{r1} \\ \vdots \\ i_{rm-1} \end{bmatrix}$$

Burada V_{s0} 'a stator gerilimi sıfır bileşeni V_{s+} 'ya simetrik bileşenlerin birincisi ya da doğru (pozitif) bileşen V_{s-} 'ye simetrik bileşenlerin ikincisi ya da ters (negatif) bileşen denir. i_{r0} , i_{r1} , i_{r2} , , i_{rm-1} ' e de rotor akımlarının sıfır birinci , ikinci ve m-1 'inci bileşenleridir.

Söz konusu tanım ve dönüşümler makinanın elektrik ve mekanik yanına ilişkin toplam $(3+m+1)$ adet denkleme uygulandığında aşağıdaki model elde edilir;

$$[V_S]_{0,+,-} = [\Gamma_S][R_s][\Gamma_S]^{-1}[I_S]_{0,+,-} + [\Gamma_S] \frac{d}{dt} \left\{ [L_s][\Gamma_S]^{-1}[I_S]_{0,+,-} + [M_{s,r}(\theta)][\Gamma_r]^{-1}[I_r]_{0,+,-} \right\} \quad (5.15)$$

$$[0] = [\Gamma_R][R_r][\Gamma_R]^{-1}[I_r]_{0,+,-} + [\Gamma_R] \frac{d}{dt} \left\{ [L_r][\Gamma_R]^{-1}[I_r]_{0,+,-} + [M_{r,s}(\theta)][\Gamma_S]^{-1}[I_S]_{0,+,-} \right\} \quad (5.16)$$

$$M_e = \frac{1}{2} [[I_S]_{0,+,-}^{*T} [\Gamma_S]^{-1*} : [I_r]_{0,+,-}^{*T} [\Gamma_R]^{-1*}] \frac{\partial}{\partial \theta} \{ [M_{s,r}(\theta)] \} \begin{bmatrix} [\Gamma_S]^{-1} & [I_S]_{0,+,-} \\ [\Gamma_R]^{-1} & [I_r]_{0,+,-} \end{bmatrix} = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \quad (5.17)$$

(5.15), (5.16) ve (5.17) denklemleri yeniden düzenlenirse

$$\begin{aligned}
[V_s]_{0,+,-} &= [\Gamma_s][R_s][\Gamma_s]^{-1}[I_s]_{0,+,-} + [\Gamma_s][L_s][\Gamma_s]^{-1} \frac{d[I_s]_{0,+,-}}{dt} + \\
&+ [\Gamma_s] \frac{\partial[M_{s,r}(\theta)]}{\partial\theta} [\Gamma_R]^{-1} \frac{d\theta}{dt} + [\Gamma_s][M_{s,r}(\theta)][\Gamma_R]^{-1} \frac{d[I_r]_{0,+,-}}{dt} \\
[0] &= [\Gamma_R][R_r][\Gamma_r]^{-1}[I_r]_{0,+,-} + [\Gamma_R][L_r][\Gamma_R]^{-1} \frac{d[I_r]_{0,+,-}}{dt} + \\
&+ [\Gamma_R] \frac{\partial[M_{r,s}(\theta)]}{\partial\theta} [\Gamma_S]^{-1} \frac{d\theta}{dt} + [\Gamma_R][M_{r,s}(\theta)][\Gamma_S]^{-1} \frac{d[I_s]_{0,+,-}}{dt}
\end{aligned}$$

$$[L_s]_{0,+,-} = [\Gamma_S][L_s][\Gamma_S]^{-1} = \begin{bmatrix} L_{s0} & 0 & 0 \\ 0 & L_{s+} & 0 \\ 0 & 0 & L_{s-} \end{bmatrix}$$

$$[L_r] = [\Gamma_R][L_r][\Gamma_R]^{-1} = \begin{bmatrix} L_{r0} & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & L_{r1} & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & L_{r2} & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & L_{r(m-1)} \end{bmatrix}$$

Burada;

$$L_{s0} = L_s + 2M_{ss}; L_{s+} = L_{s-} = L_s + M_{ss}$$

$$L_{r0} = L_r + mM_{rr}; L_{rk} = L_{r(m-k)} = L_r + M_{rr}; k = 1, 2, \dots, m-1$$

$$L_{r+} = L_{r-} = L_r + M_{rr}$$

olup, moment ifadesi

$$[L_{sr}]_{0,+,-} = [\Gamma_S][M_{s,r}(\theta)][\Gamma_R]^{-1} = \frac{\sqrt{3m}}{2} M_m \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & e^{jp\theta} & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & e^{-jp\theta} \end{bmatrix}$$

$$[L_{r,s}]_{0,+,-} = [L_{s,r}]_{0,+,-}^T = [\Gamma_R][M_{r,s}(\theta)][\Gamma_S] = \frac{\sqrt{3m}}{2} M_m \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-jp\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & e^{jp\theta} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial [L_{s,r}]_{0,+,-}}{\partial \theta} = [\Gamma_S] \frac{\partial [M_{s,r}(\theta)]}{\partial \theta} [\Gamma_R]^{-1} = jp \frac{\sqrt{3m}}{2} M_m \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & e^{jp\theta} & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & e^{-jp\theta} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial [M_{r,s}]_{0,+,-}}{\partial \theta} = \frac{\partial [M_{s,r}]_{0,+,-}^T}{\partial \theta} = [\Gamma_R] \frac{\partial [M_{r,s}(\theta)]}{\partial \theta} [\Gamma_S]^{-1} = jp \frac{\sqrt{3m}}{2} M_m \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-jp\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & e^{jp\theta} \end{bmatrix}$$

$$M_e = \frac{1}{2} \left[[I_s]_{0,+,-}^{*T} [\Gamma_S]^{-1*T} \frac{\partial [M_{s,r}(\theta)]}{\partial \theta} [\Gamma_R]^{-1} [I_r]_{0,+,-} + [I_r]_{0,+,-}^{*T} [\Gamma_R]^{-1*T} \frac{\partial [M_{r,s}(\theta)]}{\partial \theta} [\Gamma_S]^{-1} [I_s]_{0,+,-} \right]$$

$$= J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt}$$

Burada

$$[\Gamma_S]^{-1*T} \frac{\partial [M_{s,r}(\theta)]}{\partial \theta} [\Gamma_R]^{-1} = [\Gamma_S] \frac{\partial [M_{s,r}(\theta)]}{\partial \theta} [\Gamma_R]^{-1};$$

$$[\Gamma_R]^{-1*T} \frac{\partial [M_{r,s}(\theta)]}{\partial \theta} [\Gamma_S]^{-1} = [\Gamma_R] \frac{\partial [M_{r,s}(\theta)]}{\partial \theta} [\Gamma_S]^{-1}$$

olup, moment ifadesi

$$M_e = \begin{bmatrix} i_{s0}^* & i_{s1}^* & i_{s2}^* \end{bmatrix} j \frac{\sqrt{3m}}{2} M_m \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{jp\theta} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & e^{-jp\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r0} \\ i_{r1} \\ i_{r2} \\ \cdot \\ i_{rm-1} \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} i_{r0}^* & i_{r1}^* & i_{r2}^* & \dots & i_{rm-1}^* \end{bmatrix} jp \frac{\sqrt{3m}}{2} M_m \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-jp\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & e^{jp\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s0} \\ i_{s1} \\ i_{s2} \end{bmatrix}$$

$$M_e = \frac{\sqrt{3m}}{4} jp M_m \left[(i_{s1}^* i_{r1} + i_{rm-1}^* i_{s1}) e^{jp\theta} - (i_{s2}^* i_{rm-1} + i_{r-1}^* i_{s1}) e^{-jp\theta} \right] = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \quad (5.18)$$

Dengeli bir gerilim ve akım sistemi 0 bileşeni oluşmayıp moment $i_{s1} = i_{s+}$, $i_{s2} = i_{s-}$, $i_{r+} = i_{r1}$, $i_{r-} = i_{rm-1}$ bileşenleri oluşmaktadır. Rotor bileşenlerinden geriye kalan (m-3) terim lineer bağımsız bir denklem takımı oluşturur.

$$0 = R_r i_{rk} + L_{rk} \frac{di_{rk}}{dt}$$

$k = 2, 3, 4, \dots, m-2$ toplam m-3 bağımsız terimi vardır.

Moment oluşumuna katkısı olmayan bu terimler modelde gözönüne alınmadığı takdirde sistem 2' si stator, 2' si rotor ve 1' i de hareket denkleminde ilişkin olmak üzere toplam 5 denklemlerle modellenebilecektir. $i_{r1} = i_{r+}$ ve $i_{rm-1} = i_{r-}$ tanımları da yapılarak model aşağıdaki gibi verilebilir;

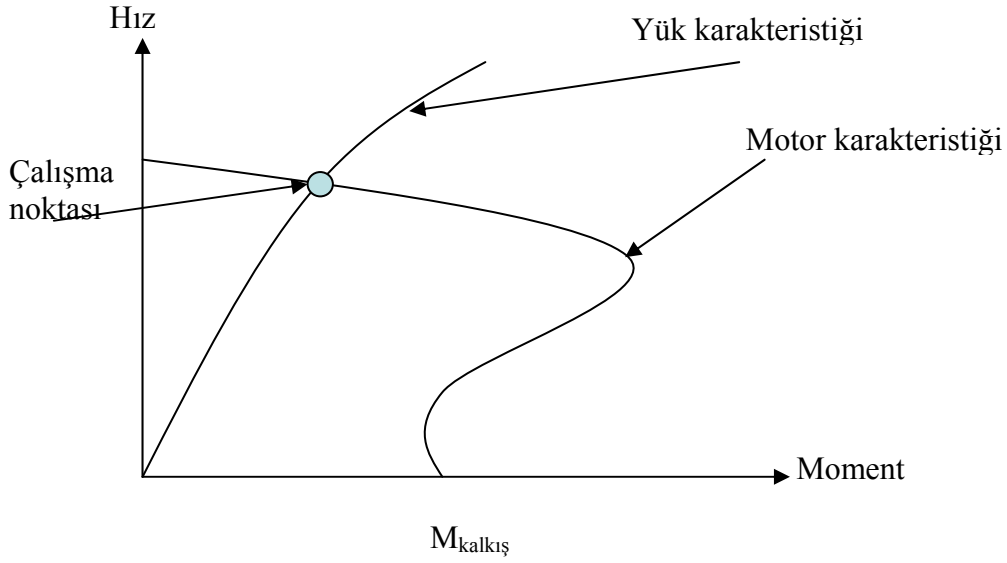
$$\begin{bmatrix} V_{s+} \\ V_{s-} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{rr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{s+} & 0 & \frac{\sqrt{3m}}{2} M_m e^{jp\theta} & 0 \\ 0 & L_{s-} & 0 & \frac{\sqrt{3m}}{2} M_m e^{-jp\theta} \\ \frac{\sqrt{3m}}{2} M_m e^{jp\theta} & 0 & L_{r+} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3m}}{2} M_m e^{-jp\theta} & 0 & L_{r-} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s+} \\ i_{s-} \\ i_{r+} \\ i_{r-} \end{bmatrix} + \frac{d\theta}{dt} M_m \begin{bmatrix} 0 & 0 & j \frac{\sqrt{3m}}{2} e^{jp\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j \frac{\sqrt{3m}}{2} e^{jp\theta} \\ j \frac{\sqrt{3m}}{2} e^{-jp\theta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j \frac{\sqrt{3m}}{2} e^{jp\theta} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s+} \\ i_{s-} \\ i_{r+} \\ i_{r-} \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

$$M_e = jp \frac{\sqrt{3m}}{4} M_m \left[(i_{s+} i_{r+} + i_{r-} i_{s-}) e^{jp\theta} - (i_{s-} i_{r-} + i_{r+} i_{s+}) e^{-jp\theta} \right] \quad (5.20)$$

6. ASENKRON GENERATÖR KULLANILARAK RÜZGÂR TÜRBİNİNDEN MAKSİMUM ENERJİ ELDE EDİLMESİ

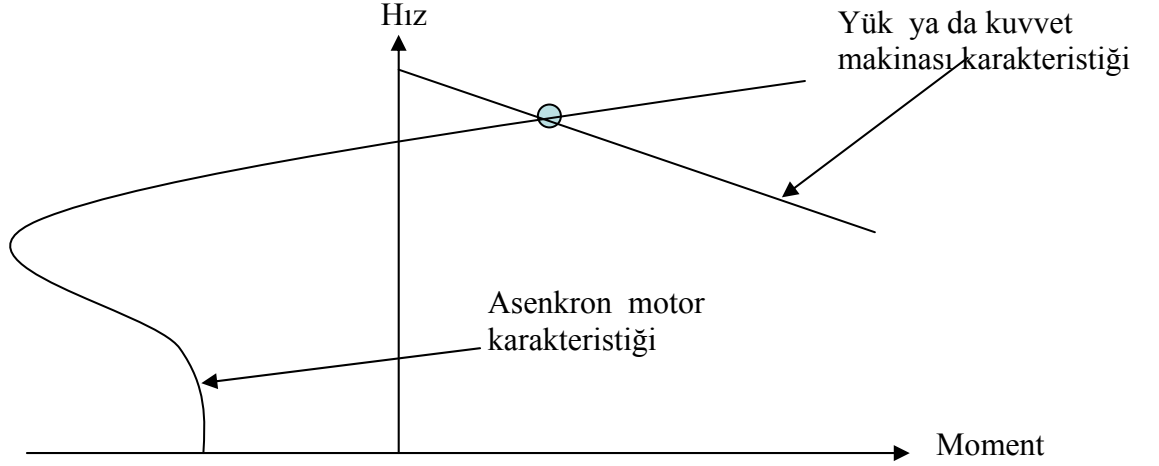
6.1 Sistemin Analizi

Sabit frekanslı bir kaynaktan beslenen asenkron motor, miline bağlı olan iş makinesinin hız – döndürme momenti karakteristiği ile kendi hız- döndürme momenti karakteristiğinin keşisme noktasının öngördüğü bir çalışma noktasında çalışır. Bu şekildeki bir çalışmada hız her zaman senkron hızın altındadır



Şekil 6.1 Sabit frekanslı bir kaynaktan beslenen asenkron motor hız döndürme momenti karakteristiği (DURU 2005)

Motorun, kendisini dönüş yönünde hızlandırma yeteneği olan yükler ya da kuvvet makinaları ile akuple çalışması durumunda, çalışma noktası senkron hızın üzerinde bir noktada oluşabilir.

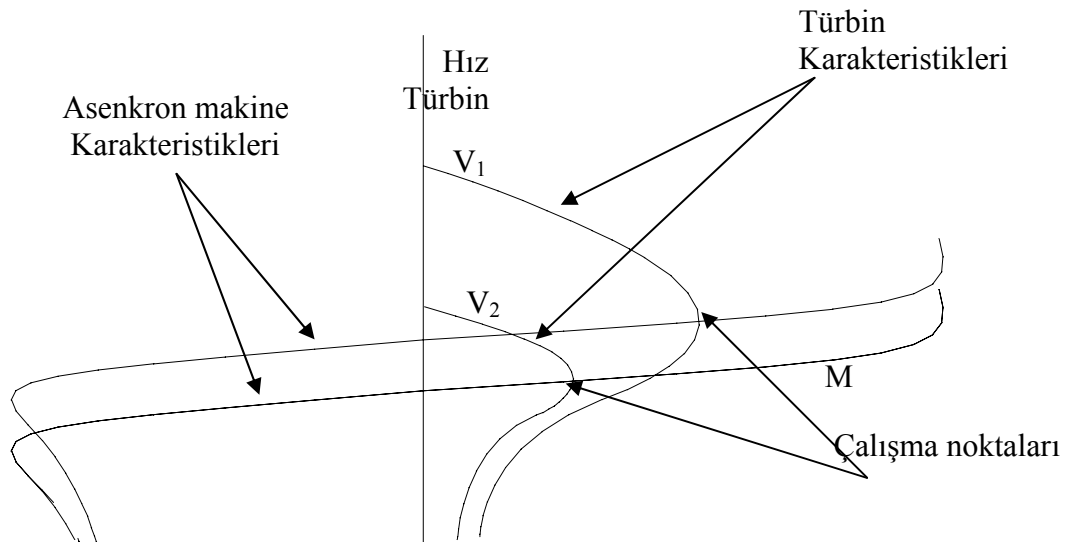


Şekil 6.2 Çalışma noktası senkron hızın üzerinde olan asenkron motor hız döndürme momenti karakteristiği (DURU 2005)

Bu şekilde çalışan asenkron makina, şebekeye paralel olarak çalışan ve yeterince uyartılmamış (kapasitif çalışan) bir senkron generatör gibi davranır.

Sabit frekansla beslemede, bu çalışma şekli sadece belirli bir hızın üzerinde meydana gelir. Örneğin $2p=4$ kutuplu bir makina, 50 Hz için sadece 1500 d/dk üzerinde döndürülürse generatör çalışma moduna geçebilir.

Değişken frekanslı bir sürücü kullanıldığında ise teorik olarak sıfırdan büyük her hız için asenkron makinanın bu şekilde çalışması mümkündür.



Şekil 6.3 Farklı iki rüzgar hızı için asenkron makinanın senkron üstü hızda çalışması (DURU 2005)

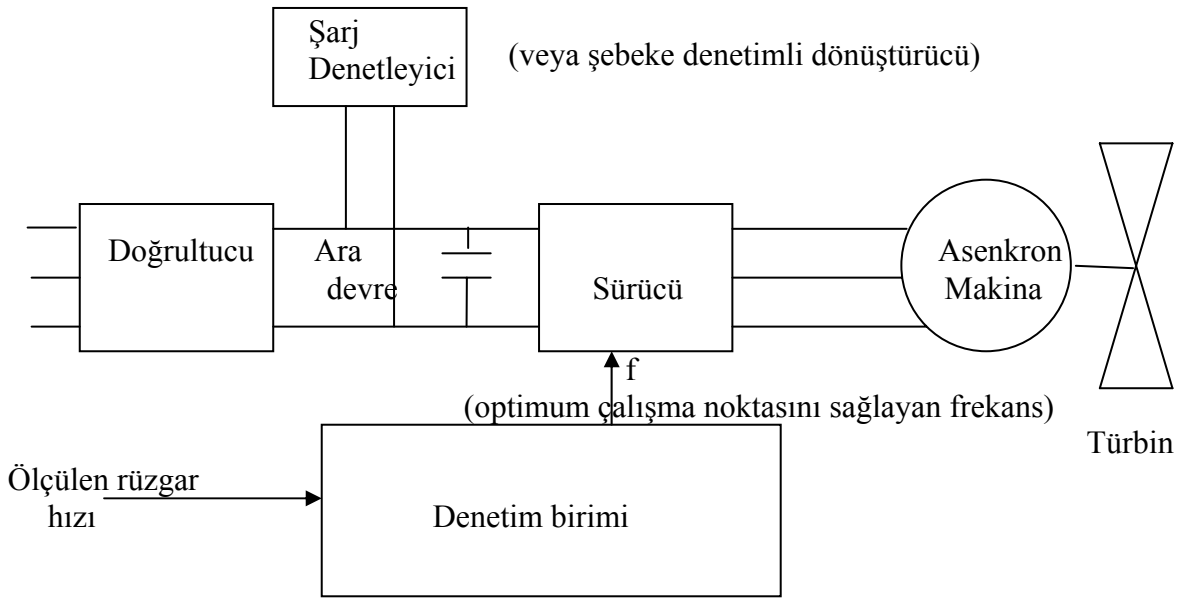
6.2 Sistemin Tasarımı

Sistemin tasarım aşamasında türbinin farklı rüzgar hızları için türbinin

maksimum güç ürettiği devir sayıları belirlenerek, bir "rüzgar hızı-optimum mil hızı-optimum frekans" tablosunun ya da yaklaşık bir giriş-çıkış fonksiyonunun

oluşturulması gereklidir. Bu tablo ya da fonksiyon yardımıyla ölçülen herhangi bir rüzgar hızı için asenkron motorun besleme frekansı belirlenerek sürücüye referans olarak verilmektedir. Bu şekilde asenkron makinanın tüm rüzgar hızlarında

maksimum enerji transfer edilmesi sağlanmaktadır. Sistemde kullanılan elemanların görevleri aşağıda belirtildiği gibidir:



Şekil 6.4 Şebeke denetimli dönüştürücü kullanılan asenkron makina (DURU 2005)

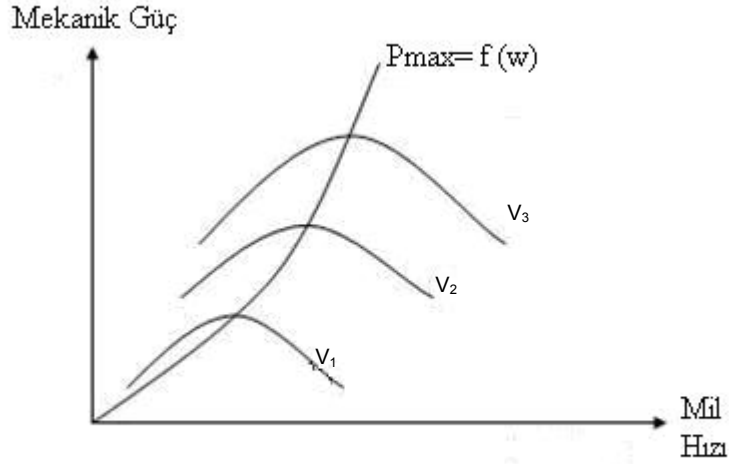
Doğrultucu : AC gerilimi DC gerilime çeviren güç kaynaklarıdır. Elektronikte kullanılan doğrultucuların yararlandığı AC gerilim, şehir şebekesinden alınan 220 Volt ' luk gerilimdir.

Sürücü : Sürücü her bir çevre birimi ile iletişim için kullanılan devre elemanıdır.

Şebeke Denetimli Dönüştürücü : Ölçülen bir elektriksel parametrenin değişim eğrisini düşük elektriksel sinyallerin değişimi olarak simüle eden, ya da diğer bir deyişle, ölçmüş oldukları elektriksel sinyalleri diğer ölçüm cihazlarının algılayabileceği düşük elektriksel sinyallere çeviren yardımcı ekipmanlardır. Böylece sinyalin iletildiği ölçüm cihazı primer taraftaki sinyalin gerçek değerini algılayabilir.

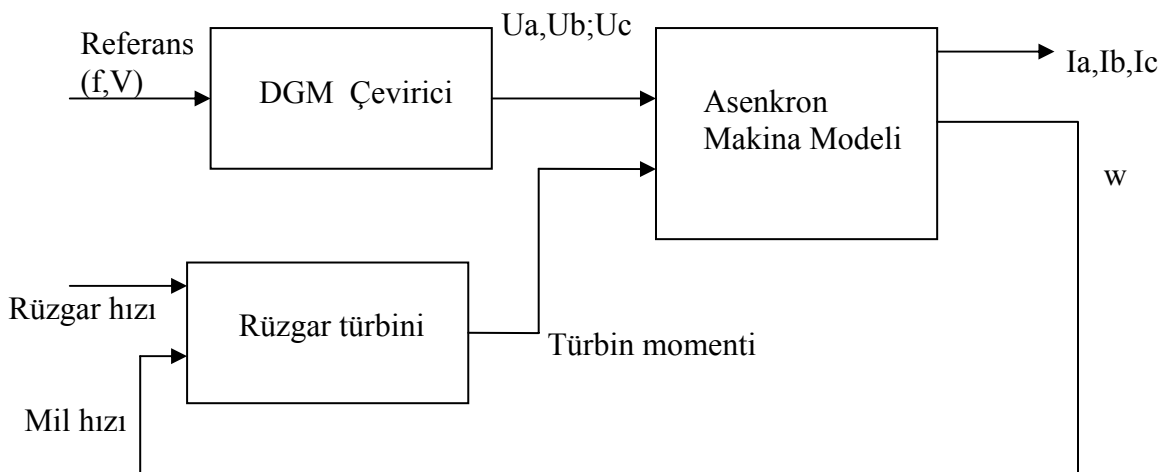
Sürücünün girişinde denetimsiz doğrultucu kullanıldığından, türbinden alınan enerjinin aktarılması ancak ara devre üzerinden mümkündür. Bu amaçla ara devreye bir DA-DA

dönüştürücü bağlanarak akü sarjı, veya şebeke denetimli bir dönüştürücü bağlanarak, şebekeye paralel çalışma sağlanabilir. Asenkron makinanın gereksinim duyduğu reaktif güç ara devre kondansatörleri tarafından sağlanmaktadır.



Şekil 6.5 Mekanik gücün mil hızına bağlı değişimi (DURU 2005)

Şekil 6.5' te mil hızına bağlı olarak mekanik gücün değişimi görülmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere mekanik güç hızın bir fonksiyonu olduğu için, mil hızı arttıkça mekanik güç sürekli artış göstermektedir.



Şekil 6.6 Asenkron makina modellemesi (DURU 2005)

Şekil 6.6 da gösterilen modelin çözümünde, herhangi bir rüzgar hızı için DGM çevirici referans frekansı ve gerilimi değiştirilerek, rüzgar hızından en yüksek gücün alınabileceği

çalışma noktaları belirlenmiştir. Bu işlem farklı rüzgar hızları için tekrarlanarak, oluşabilecek tüm rüzgar hızları için sistemin optimum çalışma noktaları elde edilmiştir.

Burada önemli olan bir konu da referans f değerleri ile V değerleri arasındaki ilişkidir. Bilindiği gibi, uygulamada kullanılan asenkron motor sürücülerinin V - f karakteristiklerinde iki temel yaklaşım söz konusudur. Bunlardan biri, moment gereksinimi hızdan bağımsız olan yükler için uygulanan ve V/f 'in yaklaşık sabit tutulduğu çalışma şekli olup, örneğin vinç tipi yükler için uygun olan karakteristik, diğeri de gereksinim duyduğu döndürme momenti hızın karesi ile artan yükler için uygulanan fan tipi karakteristiktir. Yapılan incelemede V/f oranının sabit tutulduğu durumda asenkron makinanın verimi ve güç faktörü düşük buna karşın akımın da yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, rüzgar türbinine daha iyi uyum sağlaması nedeniyle, önerilen sistemde V - f karakteristiğinin fan tipi yükler için uygulanan şekline benzer olarak kullanılmasının daha iyi sonuç vereceği belirlenmiştir.

Deneysel ve teorik çalışmalardan elde edilen sonuçlardan, önerilen sistemin farklı rüzgar hızları için oldukça pratik bir şekilde maksimum enerji transferini sağlayabildiği gösterilmiştir.

Mıknatıs uyarmalı senkron generatör ile tasarlanan sistemlerde, özellikle yüksek çalışma frekanslarında senkron reaktansın artması ve bunun sonucu görülen gerilim düşümleri nedeniyle çıkış gücünün belirli bir değerin üzerine çıkamaması problemi, önerilen sistemde söz konusu olmamaktadır. Ayrıca sistemin, özellikle düşük rüzgar hızlarında motor destekli olarak kolaylıkla devreye girmesi ve türbin tasarımının buna göre yapılabilmesi bir başka üstünlük olarak görülmektedir.

DGM çeviricinin rüzgar hızındaki ani değişimlere karşı denetim birimi tarafından üretilen ani referans değişikliklerini takip edebilmesi durumunda simülasyonlarda ve laboratuvar deneylerinde elde edilen sonuçların uygulamada da gözleneceği öngörülmektedir. Bu şekilde bir çalışma için vektör denetim yöntemi kullanan asenkron motor sürücülerinin daha iyi bir performans göstereceği belirlenmiştir.

Ayrıca sürücünün doğrudan rejeneratif çalışmayı desteklemesi halinde üretilen enerjinin şebekeye geri beslenmesi mümkün olacağından akü maliyeti ve bakım gereksinimi ortadan kalkacaktır.

7. RÜZGAR ENERJİSİ KAYNAKLARI VE MALİYETLERİ

Tipik büyük bir rüzgar türbini yaklaşık 1,8 MW elektrik üretebilmektedir ve bu da ideal şartlarda 5.2 milyon kWh'a denk gelmektedir. Bu da 600 evin ihtiyacının karşılanabilmesi demektir. Halen nükleer ve kömürlü güç santralleri rüzgâr türbinlerinde daha ucuza birim elektrik üretmektedir. Ama bu avantajlarına rağmen nükleer ve kömürlü güç santralleri yerine elektrik üretimi için rüzgar enerjisi santrallerinin kullanımındaki artışın başlıca sebebi, rüzgâr türbinlerinin temiz olması ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olmasıdır. Bunun yanında kömürlü santrallerde olduğu gibi CO₂ ve nitrojen oksit gibi çevreye yüksek miktarda zarar veren gazlar ortaya çıkmamaktadır ve rüzgârın esmesinin insanlara herhangi bir zararı yoktur. Ayrıca herkesin kendi evinde kurabileceği bir enerji kaynağı olduğu için, kesinlikle yabancı yatırım desteğine ihtiyaç duyulmamaktadır. Fakat bununla beraber dezavantajları da vardır. Diğer enerji santralleri gibi rüzgâr enerjisi santralleri de, rüzgâr hızının değişken olmasına bağlı olarak sürekli % 100 verimle çalışmamaktadır. Aynı zamanda rüzgâr santralleri çok gürültülüdür. Kuşlar ve yarasalar için ölümcül olabilmektedirler. Ayrıca çöl gibi yerlerde kullanılıyor ise, yere yakın olmasına bağlı olarak erozyona sebep olabilmektedir. Potansiyel dezavantajlarını bir yana bırakacak olursak, örneğin Amerika'da 2007 verileri itibariyle toplam gücü 16 000 MW'ın üzerinde olan bir rüzgâr türbini potansiyeli bulunmaktadır. Dünya genelinde 2007 yılının verilerine bakacak olursak da enerji santrallerinden elde edilen elektrik üretimi aşağıdaki gibi bir orana sahiptir:

- **Kömür:** 52%
- **Nükleer:** 20%
- **Doğal:** 16%
- **Hidroelektrik:** 7%
- **Diğer (Rüzgâr, Biokütle, Jeotermal ve Güneş Enerjisi):** 5%

Şu an itibariyle Amerika'da toplam elektrik üretimi her yıl 3,6 trilyon kWh düzeyindedir. Rüzgâr, bu potansiyelin yılda en az %1 artmasına sebep olacak bir potansiyele sahiptir. Amerikan Rüzgâr Enerjisi Birliği'nin verdiği verilere göre, Amerika'nın rüzgâr enerjisi potansiyeli yaklaşık olarak yılda 10,8 trilyon kWh düzeyindedir ki bu da 20 milyar varil benzinden elde edilecek güce denk gelmektedir. Burada belirtilen verileri elde edebilmek için, rüzgâr hızının küçük türbinler için en az 4 metre/saniye(14 km/saat), büyük türbinler içinse en az 6 metre/saniye(21 km/saat) olması gerekmektedir. Bu hızlar Amerika'da çoğu bölgede elde edilmesi çok zor olmayan rüzgâr hızlarıdır.

Rüzgâr türbinleri için yerleşim demek her şey demektir. Bilinmesi gereken en önemli unsurlar, bölgenin ne kadar rüzgâr aldığı, ne hızda olduğu, ne kadar süre ile ne kadar hızda rüzgâr estiği ve rüzgârdan en verimli hangi türbin dizaynında yararlanılacağına tespit edilmesidir. Rüzgâr hızının değişimi ile elektrik üretimindeki değişim birbirinden farklı olmaktadır. Örneğin rüzgâr hızı 21 km/saat iken 42 km/saat' e çıkar ise, bu durumda üretilen elektrik gücü 8 kat artacaktır fakat bunun teorik bir yaklaşım olduğunun bilinmesi gerekmektedir. Çünkü gerçek şartlar altında, bir türbinin rüzgârdan ne kadar elektrik üreteceği belirlidir ve buna "Betz" limiti adı verilmektedir. Bu limit % 59 civarındadır. Fakat limit ne olursa olsun bilinmesi gerekir ki, rüzgârdaki ufak bir değişim çıkış gücünde çok büyük değişimler oluşturmaktadır. Bölgelere ait rüzgâr potansiyellerini belirlemede kullanılan en temel unsur o ülkeye ait Rüzgâr haritalarının kullanılmasıdır.

Rüzgâr atlasının hazırlanmasında ilgili istasyonlar için rüzgâr ölçüm verileri, arazi pürüzlülük bilgileri, yakın çevresel engel bilgileri ve harita bilgileri gerekli olmaktadır. Bu amaçla ilk olarak 1/25000 ölçekli 193 pafta şeklinde diskette sayısallaştırılmış harita ve hard copy alımı yapılmış ve 96 istasyona ait meteorolojik rüzgâr datası DMİ'den temin edilmiştir.

7.1 Rüzgar Atlas Çalışmasının Metodu

1. DMİ İstasyonlarına ait yakın çevresel engel bilgilerinin tespit edilmesi
2. Arazi pürüzlülük bilgilerinin sayısal harita üzerine işlenmesi
3. Tespit edilen yakın çevresel engel bilgilerinin, arazi pürüzlülük bilgilerinin ve DMİ'nin rüzgâr ölçümlerinin WASP formatına dönüştürülerek bilgisayar ortamına aktarılması
4. SURFER bilgisayar programı ile ilgili haritaların oluşturulması
5. Çıktıların alınması ve yayınlanması şeklindedir.

7.2 Rüzgar Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi

Çeşitli ülkelerce hazırlanıp kullanıma sunulan ve bir alandaki rüzgâr ölçüm parametrelerini kullanarak rüzgâr enerjisi potansiyelinin belirlenmesine yardımcı olan bilgisayar programları mevcuttur. Bu bilgisayar programların başında Danimarka Ulusal Laboratuvarında geliştirilmiş olan ve Avrupa kıtasının rüzgâr atlasının hazırlanmasında kullanılan WASP (Rüzgâr Atlası Analiz ve Uygulama Programı) bilgisayar programı gelmektedir. WASP bilgisayar programı rüzgâr hız ve yön bilgileri ile rüzgâr gözlem istasyonu çevresindeki engellerden, arazi yüzey pürüzlülüğü ve arazinin Topografik özelliklerinden yola çıkarak bölgesel rüzgâr atlas istatistiklerinin ve enerji potansiyelinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. WASP yazılımı ile

bir bölgenin rüzgâr enerji potansiyelini belirleyebilmek için aşağıda sıralanan işlem basamakları takip edilir:

Rüzgâr Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi: Rüzgâr enerji gözlem istasyonlarından belli bir yükseklikten alınan en az bir yıllık rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü ölçüm kayıtlarının bilgisayar ortamında düzenlenmiş hali ve bu istasyonlara ait 1/25000 ölçekli harita üzerinde derece - dakika cinsinden belirlenmiş koordinatları WASP ortamına aktarılıp değerlendirilir ve ilk etapta ölçüm yüksekliğine ait frekans dağılım tablosu elde edilir. Bu tablo yardımıyla ölçüm yüksekliğindeki rüzgârın yönlere göre esme sıklığı, hâkim rüzgâr yönü, ortalama rüzgâr hızı, ortalama enerji yoğunluğu ve rüzgâr hız verilerine ait Weibull parametreleri gibi istatistiksel değerler belirlenmiş olur.

Çizelge 7.1 Ölçüm yüksekliğine ait frekans dağılım tablosu [12]

Sect	Freq	<1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	13	15	17	>17	A	k
0:	30.8	10	49	77	92	114	156	155	135	90	81	36	4	0	0	6.9	2.67
30:	10.7	27	90	151	165	186	155	84	76	40	21	5	0	0	0	5.1	2.24
60:	1.9	106	199	236	248	151	42	6	0	0	0	0	6	6	0	3.5	1.63
90:	1.6	70	205	249	190	124	59	81	15	0	0	0	0	7	0	3.6	1.50
120:	2.4	63	210	158	200	200	121	37	5	5	0	0	0	0	0	3.9	2.44
150:	4.6	49	128	120	113	115	128	110	108	45	48	18	15	3	3	5.9	1.89
180:	12.0	21	40	85	94	91	145	162	121	79	82	46	25	7	4	7.2	2.21
210:	6.3	34	50	81	112	155	175	153	88	78	58	14	2	0	0	6.2	2.57
240:	1.3	186	199	253	163	54	45	63	27	9	0	0	0	0	0	3.0	1.47
270:	1.6	139	263	270	206	43	43	21	7	0	0	7	0	0	0	2.9	1.60
300:	5.5	47	156	177	220	152	85	60	44	19	42	0	0	0	0	4.3	1.67
330:	21.4	14	49	106	168	189	178	113	77	53	39	13	2	1	0	5.7	2.25

Toplam		28	76	113	135	141	147	122	95	61	54	22	6	1	1	6.0	2.14

Ortalama Rüzgar Hızı: 5.19 m/s (2%) Ortalama Enerji Yoğunluğu: 160 W/m² (2%)

Frekans dağılım tablosundaki bilgiler kullanılarak frekans histogramı (rüzgâr hızları - esme sıklıkları) ve yön histogramı (rüzgâr esme yönü - esme sıklığı) da elde edilebilir. Frekans histogramı yardımıyla hangi rüzgâr hızı değerlerinin sık gözlemlendiği, yön histogramı yardımıyla ise hangi yönlerde rüzgâr hız değerlerinin yüksek olduğu tespit edilebilir. Rüzgâr türbinleri seçilirken frekans histogramından, araziye konumlandırılırken ise yön histogramından yararlanılmaktadır.

Rüzgar ölçüm verilerinin incelenmesi sonucu, ölçüm yapılan noktanın türbülans yoğunluğu da ayrıca belirlenmelidir. Türbülans yoğunluğu seviyesinin yüksek olması enerji üretim miktarını düşürür, rüzgâr türbini üzerine etkiyen kuvvetlerin şiddetini ve malzeme yorulmasının hızını artırır. Bu durum rüzgâr enerji santrallerinin ekonomik ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır. Türbülans yoğunluğunun belirlenmesi için öncelikle rüzgâr hız ölçüm serilerinin ortalama hızı ve standart sapması belirlenmelidir. Standart sapma önemli bir kavram olup rüzgâr hızlarındaki dalgalanmaları tanımlamak için kullanılır. Rüzgâr hız verilerinin standart sapması 0 ile 3 m/s, rüzgâr yön verilerinin standart sapması ise 3° ile 75° arasında olmalıdır. Herhangi bir alandaki standart sapmanın küçük olması demek o alandaki rüzgâr rejiminin son derece düzenli olması anlamına gelmektedir. Rüzgar hız verilerinin standart sapma miktarının bu verilere ait ortalama hız değerine oranı ise türbülans yoğunluğu olarak adlandırılmaktadır. Hesaplanan türbülans yoğunluğu 0.0 – 0.10 değerleri arasında ise düşük yoğunluklu, 0.10 – 0.25 değeri arasında ise orta yoğunluklu ve 0.25 değerinden büyükse yüksek yoğunluklu olarak sınıflandırılır. Türbülans yoğunluğunun yüksek olduğu alanlara rüzgâr enerji santrali kurmaktan kaçınılmalıdır.

Yakın Çevresel Engel Bilgileri; Rüzgâr gözlem istasyonları civarındaki yakın çevresel engeller, ölçülen rüzgâr hız ve yön değerlerini kayda değer ölçüde etkilemektedir. Binalar, ağaçlar gibi yakın çevresel engeller rüzgâr hız ve yön profilini oldukça değiştirmekte, engel etrafında türbülansa neden olmakta ve rüzgâr verilerinin sağlıklı olmasını engellemektedir. Bu nedenle rüzgâr gözlem istasyonlarının yeri, civarda fazla engel olmayacak şekilde seçilmelidir. Bir nesnenin ölçüm direğine olan uzaklığı, yüksekliğinin 10 katı kadar mesafe içinde ise bu nesne yakın çevresel engel olarak tanımlanır. Daha uzak mesafedeki nesnelere engel sınıfına girmez ve arazi pürüzlülüğü olarak değerlendirilir. WASP bilgisayar programı ile en fazla 50 adet engel tanımlanabilir ve prensip olarak sayıca 5'ten fazla engel içeren noktalara rüzgâr gözlem istasyonu kurulması önerilmemektedir.

Rüzgâr hızındaki azalma engelin geçirgenliğine bağlıdır. Geçirgenlik engelin açık alanının toplam alanına oranı şeklinde tanımlanmaktadır. Geçirgenlik ne kadar fazlaysa hız profiline değişimi ve gölgeleme etkisi de o nispette az olacaktır. Rüzgâr gözlem istasyonları civarındaki mevcut yakın çevresel engelleri tanımlayabilmek için ilgili parametreler belirlenerek WASP formatına uygun “Engel Tanımlama Formu” düzenlenmelidir. Aşağıda rüzgâr enerji gözlem istasyonu civarı yakın çevresel engellerin WASP ortamında genel görünümü ve engel tanımlama formu verilmiştir.

Çizelge 7.2 Çevresel engellerin genel görünümü ve engel tanımlama formu [12]

NO	α_1	R_1	α_2	R_2	H	D_1	P
1	35	76	43	78	8	6	0.0
2	96	400	120	400	10	200	0.4
3	120	150	136	150	10	230	0.8
4	203	98	225	104	15	13	0.0
5	230	100	264	175	10	25	0.4
6	286	161	289	158	7	20	0.2
7	290	156	297	148	7	9	0.2

Burada;

α_1 : Engelin ilk köşesinin kuzey doğrultuyla yaptığı açı (deg).

R_1 : Engelin ilk köşesinin RGI'ye olan uzaklığı (m).

α_2 : Engelin ikinci köşesinin kuzey doğrultuyla yaptığı açı (deg).

R_2 : Engelin ikinci köşesinin RGI'ye olan uzaklığı (m).

H : Engelin yüksekliği (m).

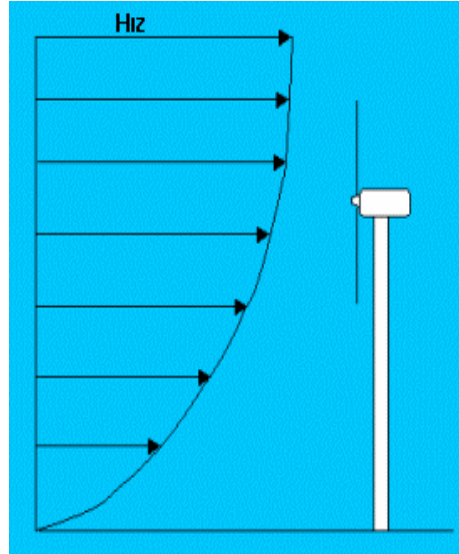
D_1 : Engelin derinliği (m).

P : Engelin tahmini geçirgenliğidir.

Engel tespiti yapılırken α_1 ve α_2 açılarının kuzey doğrultudan 0° başlayarak saat ibresi yönünü izlemesine dikkat edilmelidir. Rüzgâr türbinlerinden üretilebilecek enerji miktarını doğruya yakın bir şekilde hesap edebilmek için özellikle hâkim rüzgâr yönünde en az 1000 m mesafeye kadar olan engeller net olarak belirlenmelidir. WASP bilgisayar programı yardımıyla santral sahasının rüzgâr atlası elde edildiğinde, türbin hub yüksekliğinde engel

etkisinin % 40'ı aşmaması gerekmektedir. Aksi halde, seçilen bölgenin rüzgâr enerji santrali kurmak için uygun olmadığını düşünmemiz gerekecektir. Ayrıca arazi üzerine türbinler yerleştirilirken (micrositting) mevcut engellerden mümkün olduğunca uzak yerler tercih edilmelidir.

Arazi Yüzey Pürüzlülük Bilgileri; Arazi yüzey pürüzlülüğünün değişmesi yüzey sürtünme karakteristiklerini ve dolayısıyla hız profilini değiştirmektedir. Bir alanın yüzey pürüzlülüğü, bu alan üzerindeki pürüzlülük elemanlarının boyutları ve alan içindeki dağılımına bağlı olmaktadır. Karasal alanlar için bitki örtüleri, göller, yerleşim yerleri, doğal arazi yapıları tipik pürüzlülük elemanlarıdır. Bu pürüzlülük elemanları, rüzgâr enerjisi potansiyel belirleme çalışmalarında 4 değişik pürüzlülük sınıfıyla tanımlanır. Bir arazinin pürüzlülüğü Z_0 (m) pürüzlülük uzunluğu parametresi ile belirtilir. Z_0 pürüzlülük uzunluğu 0,0001 ile 1,0 arasında değişmekte olup yoğun yerleşim birimleri için 1,0 ve su yüzeyleri için 0,0001 olarak alınır. Diğer doğal arazi yapıları için alınması gereken Z_0 pürüzlülük uzunluğu değerleri WASP menüsünde bulunan tablodan belirlenir. WASP bilgisayar programı pürüzlülüğü modellemek için her bir sektöre ait pürüzlülük değişimini dikkate alır. Genelde 12 sektör kullanılır ve merkezi RGİ olmak üzere $345^\circ-15^\circ$ arası 0° (N), $15^\circ-45^\circ$ arası 30° (NNE) olacak şekilde düzenlenir. Pürüzlülük değerlerinin kullanılabilmesi için 1/25 000 ölçekli harita üzerinde WASP formatına uygun toplam 12 sektör için ayrı ayrı pürüzlülük uzunlukları belirlenmeli veya WASP 6,0 ve üstü versiyonlardaki bilgisayar programlarında sayısal harita üzerine arazi pürüzlülük bilgileri işlenebilmektedir. Bu çalışmanın sadece 1/25 000 ölçekli harita üzerinde yapılması uygun değildir. İlgili santral sahasına bizzat gidilip arazi yapısı yerinde incelenerek sözü edilen işlem yapılmalıdır. Rüzgâr hızı, yükseklik arttıkça arazi pürüzlülüğüne (α pürüzlülük katsayısı) bağlı olarak logaritmik şekilde artmaktadır ve bu değişim Şekil 5.1 de görülmektedir. Belirli bir yükseklikte (10 m, 30 m vb.) ölçülmüş rüzgâr hızları kullanılarak, istenilen herhangi bir yükseklikteki (hub yüksekliği vb) rüzgâr hızları aşağıdaki ifade ile hesaplanmaktadır.



Şekil 7.1 Yüksekliğe göre rüzgar hızının logaritmik değişimi [12]

$$(V_1/V_2) = (H_1/H_2)^\alpha$$

H_1 : V_1 hızının ölçüldüğü yükseklik

H_2 : V_2 hızının hesaplanacağı yükseklik

V_1 : H_1 yüksekliğinde ölçülen rüzgâr hızı

V_2 : H_2 yüksekliği için hesaplanacak rüzgâr hızı

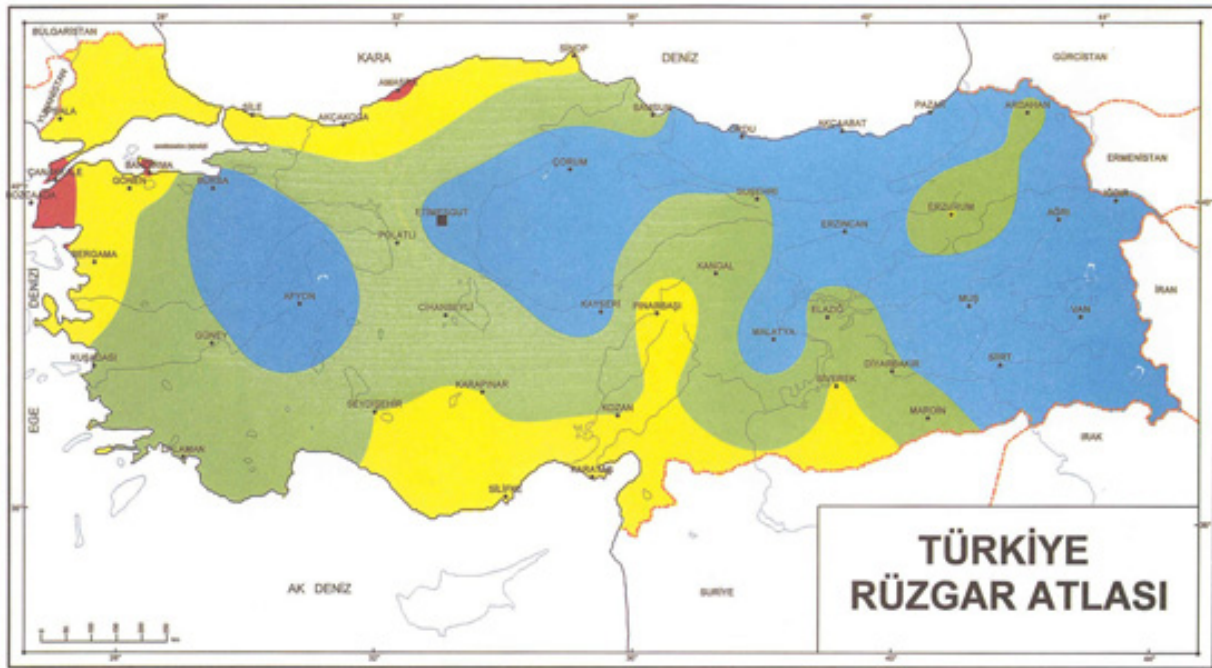
α : Pürüzlülük katsayısı (0.10 - 0.40) dır.

α Pürüzlülük katsayısı değeri ne kadar fazlaysa hız profilinin değişimi de o nispette fazla olacaktır. Hız profilindeki değişim ancak türbin hub yüksekliğinin artırılması ile azalmakta ve bu durum da maliyeti artırıcı unsur olmaktadır.

Topografya Bilgisi; Topografya rüzgârın yönü ve hızının dağılımında önemli bir rol oynar. Dağ silsileleri, tepeler ve kayalıklar rüzgâr hız ve yön profilini büyük ölçüde etkiler. Dağ silsilelerinin denize paralel, hakim rüzgar yönüne dik, orta eğimli (10° - 22°) ve özellikle çıplak olduğu sahalarda enerji üretimi için uygun sahalardır. Zirvede rüzgar hızı, eğim ve dağ grubunun büyüklüğüne bağlı olarak artar. Bu nedenle, tepelerin üst-ön kısmı tesis için uygundur. Fakat tepenin üst-arka kısmı türbülans nedeniyle göz önüne alınmamalıdır.

Rüzgâr enerji santrali kurulması düşünülen alanın WAsP bilgisayar programı ile modellenmesi için santral sahasını temsil eden en az 80 km^2 'lik (5 km yarıçapında) alanı gösterebilen paftaların 1/25 000 ölçekli sayısal haritaları hazırlanmalıdır. Sayısal haritanın çok

dikkatli hazırlanmış olması rüzgâr enerji potansiyelinin de doğruya yakın bir değer olarak elde edilmesini sağlar.



Beş farklı topografik durum için yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgar potansiyelleri ¹									
Kıyılı Alanlar ²		Açık Alanlar ³		Kıyılar ⁴		Açık Deniz ⁵		Tipe ve Bayır ⁶	
m ²	Var ²	m ²	Var ²	m ²	Var ²	m ²	Var ²	m ²	Var ²
> 60	> 250	> 7.5	> 300	> 8.5	> 300	> 8.0	> 300	> 11.5	> 1000
50-60	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	6.0-8.0	600-800	10.0-11.5	1000-1800
4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	300-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	250-400	7.0-8.5	400-700
< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

1. Rüzgar potansiyeli, rüzgarın gücünü temsil etmektedir. Rüzgar türbini halihazırda potansiyelin % 20 ile % 30 luk bölümünü kullanabilir. Potansiyel hesaplamaları; deniz seviyesinde 1 Atm lik standart basınç ve 15 °C sıcaklığa karşılık gelen 1.23 kg/m³ hava yoğunluğuna göre yapılmıştır.
2. Yerleşim alanları, ormanlar ve rüzgar kınıcıları yoğun olduğu tarım alanları (pürüzlülük sınıfı 3)
3. Az sayıda rüzgar kınıcısı olduğu açık alanlar (pürüzlülük sınıfı 1). İç bölgelerde en fazla teroht edilen alanlar genellikle bu sınıfta bulunmaktadır.
4. Düzgün kıyı alanları ve çok az sayıda rüzgar kınıcı içeren kara yüzeyleri (pürüzlülük sınıfı 1). Eğer hakim rüzgar yönü deniz tarafından ve sürekli ise, potansiyel daha fazla olabilir. Tam tersi durumda ise potansiyel daha az olabilir.
5. Kıyılardan en az 10 km uzaklıktaki açık denizler (pürüzlülük sınıfı 0).
6. Bölün sınıflarda % 50 ye varan bir hız artışı görülmektedir ve bu sonuç 400 m yüksekliğinde ve 4 km çapındaki sismik bir tepede yapılan hesaplamalarda elde edilmiştir. Rüzgar hızındaki artış, tepenin yüksekliğine, uzunluğuna ve yapısına bağlıdır.

Şekil 7.2 Türkiye rüzgâr atlası [11]

7.3 Rüzgar Enerji Türbinleri ve Enerji Üretim Miktarının Belirlenmesi

Yeni kurulacak olan rüzgâr enerji santralinden üretilecek enerjinin mevcut enerji nakil sistemine entegrasyonunun sağlanması gereklidir. Bu entegrasyonun yapılacağı hat kapasitesi, kısa devre gücü, gerilim oynamaları, harmoniler, reaktif güç gibi bir takım kriterler dikkate alınarak yatırımcı kurmayı düşündüğü rüzgar enerji santralının kurulu güç kapasitesini belirlemelidir. Kaç tane rüzgâr türbini kurulacak, bunların birim gücü ne olacak ve arazi üzerine nasıl konumlandırılacak gibi sorulara cevap bulunmalıdır. Piyasada çeşitli model ve büyüklükte rüzgar türbinleri bulunmaktadır. Yatırımcı amacını da göz önünde bulundurarak fiyat, teknik özellikler, bölgeye ait frekans dağılım tablosu, verim, garanti, hazırda bulunma ve türbin referansları gibi kriterleri dikkate alarak en uygun rüzgâr türbinini seçmelidir. Rüzgar türbini seçimini yaptıktan ve arazi üzerindeki konumlandırmayı frekans dağılım tablosu, ilgili renk dağılımları ve rüzgar türbinine ait teknik kriterleri göz önüne alarak planlandıktan sonra her bir rüzgar türbin yerine ait 1/25 000 ölçekli harita üzerinde UTM koordinatlarını tespit etmelidir. Bu aşamaya kadar elde edilen rüzgâr

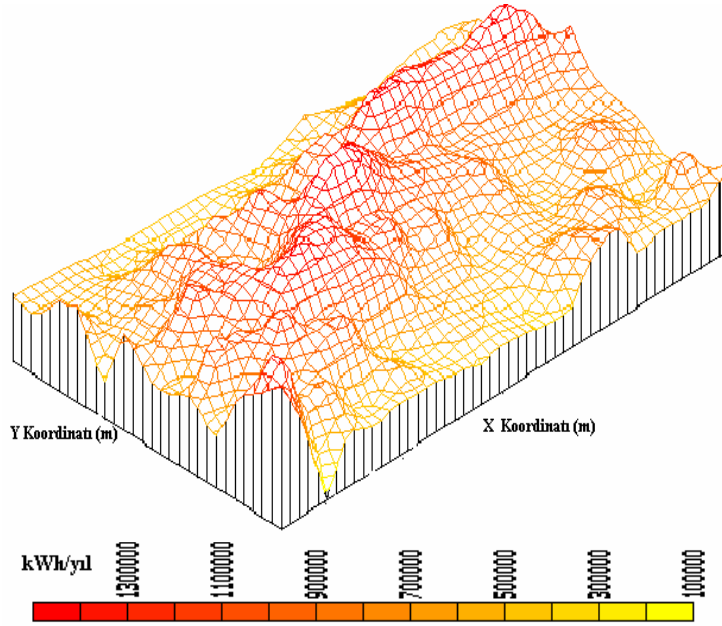
atlas istatistik bilgileri, rüzgâr türbinine ait karakteristik değerler ve rüzgâr türbinlerinin UTM koordinatlarına ilişkin veriler birlikte kullanılarak rüzgâr türbinlerinin tek tek veya bir arada üretebilecekleri yıllık enerji miktarları WASP bilgisayar programı ile hesap edilir.

Birden çok rüzgâr türbininin kullanıldığı bölgeler rüzgâr santrali veya rüzgâr çiftliği adı verilir. Genel olarak 700 kW ile 1,8 MW arasında kurulmaktadır. Özellikle tarımsal alanlara kurulmaktadır ve böylece gürültü gibi günlük yaşamı etkileyecek sakıncaları ortadan kalkmaktadır. Rüzgâr santralleri birkaç MW olabilmekle beraber yüzlerce MW kapasiteye de ulaşabilmektedirler. Şu anda dünyanın en geniş rüzgâr santrali Raheenleagh Rüzgâr Santralidir ve İrlanda'da yapılmakta olup kısa bir süre içerisinde tamamlanacaktır. 600 milyon \$'a inşa edilen ve 200 adet türbini olacak olan bu santral, tam kapasitede çalışması durumunda 520 MW güç elde edecektir.

Türbinlerin üretilmesi ve yerleştirilmesi ile ilgili yıllar ilerledikçe teknolojik ve tasarım değişiklikleri yaşanmıştır. 1980'lerin başında yaklaşık olarak 1 kWh başına rüzgâr gücünün bedeli 35 \$-cent civarındaydı. 2007 yılında 1 kWh başına bu bedel 4–6 \$-cent gibi küçük bir değere inmiştir ve rüzgâr potansiyeline göre bu daha da düşük olabilir.

Çizelge 7.3 Örnek bir santral sahasının enerji üretim miktarları [12]

SİTE NO	X Koordinatı (m)	Y Koordinatı (m)	RAKIM (m)	Rüzgar Hızı (m/s)	Enerji Yoğunluğu (W/m²)	Enerji Miktarı (kWh/yıl)
Site 1	... 115	... 308	392	6.41	299.76	1574620
Site 2	... 231	... 308	382	6.37	298.31	1557140
Site 3	... 372	... 313	360	6.10	268.43	1422740
Site 4	... 487	... 321	349	5.94	238.48	1324320
Site 5	... 628	... 333	357	6.13	235.69	1374520
Site 6	... 769	... 333	291	5.98	245.15	1349070
Site 7	... 872	... 397	363	7.48	576.42	2104900
Site 8	... 000	... 474	354	6.25	277.07	1488590
Site 9	... 077	... 577	352	5.97	233.72	1321370
Site10	...199	... 647	371	6.15	257.79	1425480



Şekil 7.3 Santral sahasının 3 boyutlu topografik yapısı ve yıllık enerji miktarlarının arazi üzerinde dağılımı [12]

Çizelge 7.4 Santrallerin birim enerji maliyetlerinin kıyaslaması [18]

Enerji Maliyeti Kıyaslaması	
Kaynak Tipi	Ortalama Maliyet (\$-cent/kWh)
Hidroelektrik	2.5-5.8
Nükleer	3-4
Kömür	4-6
Doğal Gaz	4-6
Rüzgar	4-11
Jeotermal	6-8
Biokütle	8-13
Hidrojen yakıt pili	11-16
Solar Enerji	16-35

Yukarıda da görüldüğü üzere birçok santralin birim enerji maliyetleri kıyaslanmıştır. Buradan da anlaşılacağı üzere hidroelektrik santraller en ucuz birim enerji maliyetine sahip olan santral olmakla birlikte solar enerji yani güneş enerjisi şu an itibariyle en pahalı birim enerji maliyetine

sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi, şu an itibariyle yakıt pilleri kullanılarak depolama yoluna gitmektedir fakat sistemde yapılan geliştirmelere rağmen hala pahalı bir çözümdür. Zamanla alternatif enerji kaynaklarına girecektir. Rüzgâr enerjisi şu an itibariyle yaklaşık 5 ile 13 YKR birim enerji maliyetine sahip olmakla beraber sistemin kullanım alanlarının yaygınlaşması ile daha ekonomik bir çözüme haline geleceği düşünölmektedir.

7.4 Rüzgar Enerjisi Maliyet Çalışması

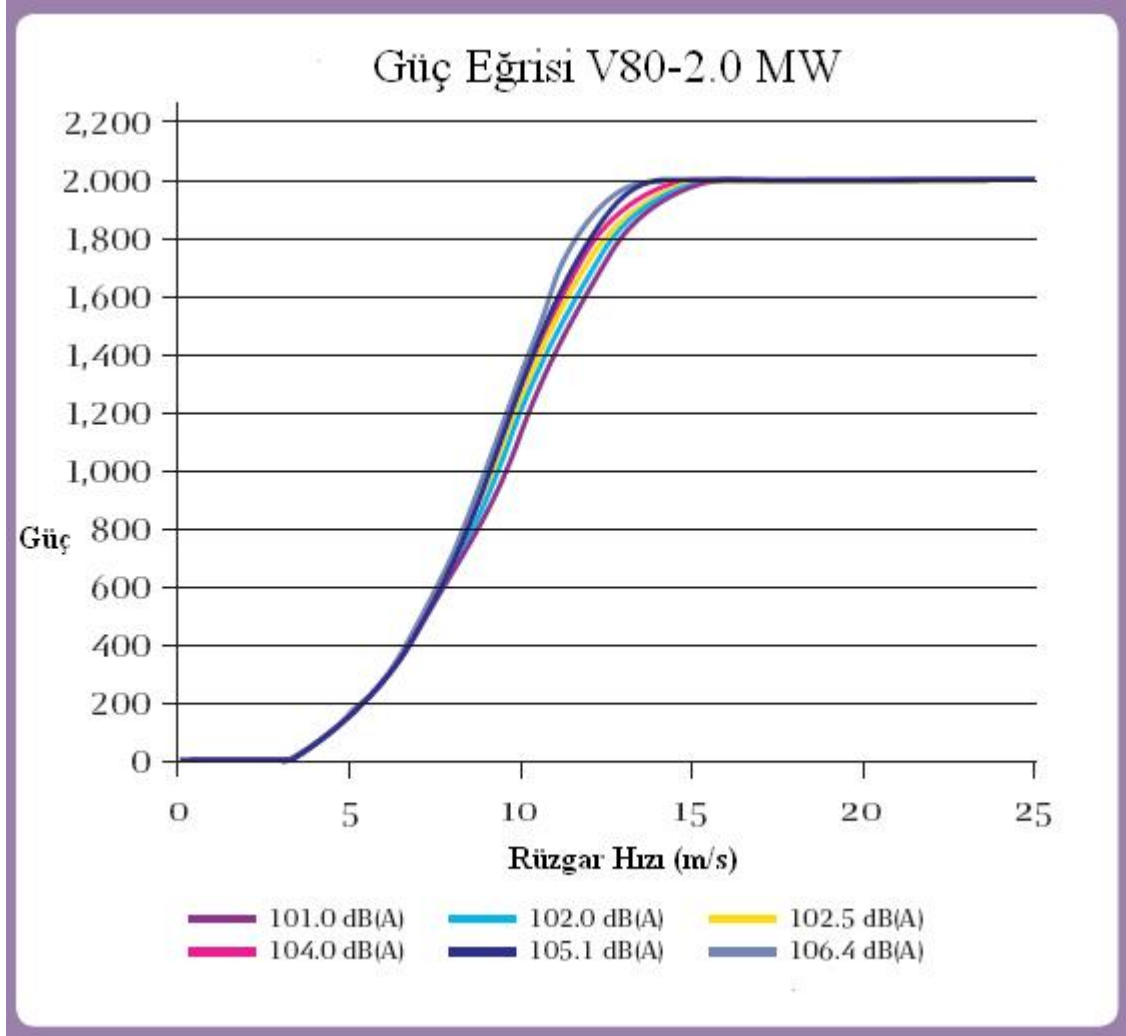
Önceki bölümlerde, rüzgar santralleri, rüzgar santrallerinin tipleri, rüzgar santrallerinin modellenmesi ve rüzgar santrallerinde senkron ve asenkron generatörler kullanılarak çıkış gününün elde edilmesi ve bu gücün elde edilmesinin toplam maliyetini inceledik. Rüzgar santrallerinde senkron ve asenkron generatör kullanılması ile elde edilen gücün birim maliyetini saptamak için, dünyanın en büyük rüzgar türbini üreticisi VESTAS firması tarafından Hatay’da kurulacak olan bir rüzgar santralinde hem senkron hem de asenkron generatör kullanılması ile oluşacak rüzgar türbini ve toplam rüzgar sahası maliyetleri ve bunlara bağlı olarak birim enerji maliyeti hesaplamaları yapılmıştır.

Burada kullanılan her iki türbinin de gücü eşit olup 2 MW olarak seçilmiştir.

Senkron generatör kullanılan rüzgar türbininin modeli VESTAS-V80, asenkron generatör kullanılan rüzgar türbininin modeli ise VESTAS-V90 Opti Speed’ tir.

Santral sahasında toplam 15’ er adet rüzgar kulesi kullanılmış olup, içlerindeki generatörlerin 11 adedi ABB, 4 adedi ise VESTAS markadır.

7.4.1 Teknik Veriler



Şekil 7.4 V80 model rüzgar türbini güç eğrisi [3]



Şekil 7.5 V90 model rüzgar türbini güç eğrisi [3]

7.4.2 Santral Maliyetleri

Rüzgar santralindeki maliyetler, kurulum maliyeti, işçilik ve bakım maliyetleri (O&M) olmak üzere ikiye ayrılmakta olup rüzgar türbini çeşidine göre ayrı olarak incelenecektir. Enerji iletim hattı yerel maliyetler her iki türbin tipi içinde aynıdır.

7.4.2.1 V80 Santral Maliyetleri

a) Kurulum Maliyeti

Kurulum maliyetleri kule kurulum maliyetleri ve saha ve iletim hattı kurulum maliyetleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kule kurulum maliyetleri 15 adet rüzgar türbinini, 5 kişilik bir ekip tarafından 8 ay süresince verilecek olan süpervizör hizmetlerini, kule altındaki kesici hücrelerini içermektedir. Saha ve iletim hattı kurulum maliyetleri 30 km enerji nakil hattı, kamulaştırma, santral sahası, 154 kV şalt sahası, orta gerilim hücreleri, yer altı kabloları ve 630/154 güç trafosu ve nakliye maliyetlerini içermektedir.

Kule kurulum maliyeti:	25.000.000 Euro
Enerji nakil hattı:	2.200.000 Euro
Kamulaştırma:	2.100.000 Euro
Santral sahası:	1.500.000 Euro
Şalt sahası:	300.000 Euro
Orta gerilim hücreleri:	480.000 Euro
Yer altı kabloları:	1.200.000 Euro
Güç trafosu:	800.000 Euro
Nakliye bedeli:	1.200.000 Euro

Toplam Kurulum Maliyeti: 34.780.000 Euro

b) İşletme ve Bakım(O&M) Maliyeti

İşletme maliyetleri işletme esnasındaki tüm işçilik, malzeme tedarik ve depolama, tamir, bakım ve sigorta masraflarını kapsamaktadır. Kurulan bu enerji santralinde işçilik malzeme tedarik ve depolama, tamir ve bakım masrafları tek kalem olarak ele alınmış olup, 15 ünite için ünite başına 48.000 Euro fiyat verilmiştir.

İşçilik:	720.000 Euro
Sigorta:	71.000 Euro

Toplam İşletme Maliyeti: 791.000 Euro

7.4.2.2 V90 Opti speed Santral Maliyetleri

a) Kurulum Maliyeti

Kurulum maliyetleri kule kurulum maliyetleri ve saha ve iletim hattı kurulum maliyetleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kule kurulum maliyetleri 15 adet rüzgar türbinini, 5 kişilik bir ekip tarafından 8 ay süresince verilecek olan süpervizör hizmetlerini, kule altındaki kesici hücrelerini içermektedir. Saha ve iletim hattı kurulum maliyetleri 30 km enerji nakil hattı, kamulaştırma, santral sahası, 154 kV şalt sahası, orta gerilim hücreleri, yer altı kabloları ve 630/154 güç trafosu ve nakliye maliyetlerini içermektedir.

Kule kurulum maliyeti:	28.500.000 Euro
Enerji nakil hattı:	2.200.000 Euro
Kamulaştırma:	2.100.000 Euro
Santral sahası:	1.500.000 Euro
Şalt sahası:	300.000 Euro
Orta gerilim hücreleri:	480.000 Euro
Yer altı kabloları:	1.200.000 Euro
Güç trafosu:	800.000 Euro
Nakliye bedeli:	1.200.000 Euro

Toplam Kurulum Maliyeti: 38.280.000 Euro

b) İşletme ve Bakım(O&M) Maliyeti

İşletme maliyetleri işletme esnasındaki tüm işçilik, malzeme tedarik ve depolama, tamir, bakım ve sigorta masraflarını kapsamaktadır. Kurulan bu enerji santralinde işçilik malzeme tedarik ve depolama, tamir ve bakım masrafları tek kalem olarak ele alınmış olup, 15 ünite için ünite başına 75.000 Euro fiyat verilmiştir.

İşçilik:	900.000 Euro
Sigorta:	71.000 Euro

Toplam İşletme Maliyeti: 971.000 Euro

7.4.3 Birim Enerji Maliyetlerinin Hesaplanması

Her iki santralin de birim enerji maliyetleri hesaplanırken birim tesis bedeli, inşaat süresi, amortisman ömrü, aylık eskalasyon oranı, aylık faiz oranı, yıllık faiz oranı ve şebeke yük faktörü bilinen değerler olup, bu değerler kullanılarak sırası ile yıllık elektrik enerjisi üretimi, inşaat süresince eskalasyon ve faiz etki katsayısı, inşaat bitim tarihi itibarıyla toplam maliyet, amortisman faktörü ve yıllık sermaye maliyeti hesaplanacaktır. Bu hesaplamalar sonucunda birim enerji başına sermaye maliyeti ile birim enerji başına O&M maliyeti bulunacak ve toplam birim enerji üretim maliyeti değerine ulaşılacaktır. Hesaplamalarda kullanılacak olan birim tesis bedeli, inşaat süresi ve amortisman ömrü, verilen önkonuşlandırma raporu ile bulunan değerler olup, aylık eskalasyon oranı, aylık faiz oranı ve yıllık faiz oranı bankadan alınan tekliflerdir.

7.4.3.1 V80 Santral Birim Enerji Maliyetinin Hesaplanması

Birim tesis bedeli,

$$C_s = \frac{34.780.000}{30.000} = 1159.33 \text{ Euro/kW}_e \text{ olarak bulunmaktadır.}$$

(7.1) denklemleri kullanılarak yıllık elektrik enerjisi üretimi,

$$E_e = 8760 * N_e * L_f \quad (7.1)$$

$$E_e = 8760 * 30000 * 0.38 = 99.86 * 10^6 \text{ kW}_e\text{h/Yıl}$$

İnşaat süresince eskalasyon ve faiz etki katsayısı (7.2) denkleminde,

$$k = \left[\frac{(1+i_1)^{T+1} - 1}{i_1} \right] \frac{(1+e)^T}{T+1} \quad (7.2)$$

$$k = \left[\frac{(1+0.004)^9 - 1}{0.004} \right] \frac{(1+0.0058)^8}{9} = 1.06$$

Fiziki santral kurulum maliyeti $I_d = 34.78 * 10^6$ olarak hesaplanmış idi ve buradan hareketle inşaatın bitim tarihi itibari ile toplam maliyet (7.3) denkleminde,

$$I_k = I_d * k \quad (7.3)$$

$$I_k = 34.78 * 10^6 * 1.06 = 36.87 * 10^6 \text{ Euro olarak bulunur.}$$

(7.4) denklemleri ile amortisman faktörü,

$$AF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (7.4)$$

$$AF = \frac{0.048(1.048)^{25}}{(1.048)^{25} - 1} = 0.069$$

Buradan hareketle de (7.5) denklemleri ile yıllık sermaye maliyeti,

$$C_k = AF * I_k \quad (7.5)$$

$$C_k = 0.069 * 36.87 * 10^6 = 2.544 * 10^6 \text{ Euro/Yıl olarak elde edilir.}$$

Elde edilen yıllık sermaye maliyeti kullanılarak birim enerji başına sermaye maliyeti (7.6) denkleminde,

$$g_k = \frac{C_k}{E_e} \quad (7.6)$$

$$g_k = \frac{2.544 * 10^6}{99.86 * 10^6} = 0.0254 \quad \text{Euro/kW}_e\text{h olarak bulunur.}$$

Yıllık işletme ve bakım(O&M) maliyeti $C_m = 791.000$ Euro olarak belirtilmiş olup buradan hareketle birim enerji başına O&M maliyeti (7.7) denkleminde,

$$g_m = \frac{C_m}{E_e} \quad (7.7)$$

$$g_m = \frac{0.791 * 10^6}{99.86 * 10^6} = 0.0079 \quad \text{Euro/kW}_e\text{h olarak bulunur.}$$

Sonuç olarak, senkron generatör içeren V80 rüzgar türbini için birim enerji başına toplam enerji üretim maliyeti,

$$g = g_k + g_m = 0.0254 + 0.0079 = 0.0333 \quad \text{Euro/kW}_e\text{h olarak elde edilir.}$$

7.4.3.2 V90 Opti Speed Santral Birim Enerji Maliyetinin Hesaplanması

Birim tesis bedeli,

$$C_s = \frac{38.280.000}{30.000} = 1276 \quad \text{Euro/kW}_e \text{ olarak bulunmaktadır.}$$

(7.1) denklemi kullanılarak yıllık elektrik enerjisi üretimi,

$$E_e = 8760 * N_e * L_f \quad (7.1)$$

$$E_e = 8760 * 30000 * 0.38 = 99.86 * 10^6 \quad \text{kW}_e\text{h/Yıl}$$

İnşaat süresince eskalasyon ve faiz etki katsayısı (7.2) denkleminde,

$$k = \left[\frac{(1+i_1)^{T+1} - 1}{i_1} \right] \frac{(1+e)^T}{T+1} \quad (7.2)$$

$$k = \left[\frac{(1+0.004)^9 - 1}{0.004} \right] \frac{(1+0.0058)^8}{9} = 1.06$$

Fiziki santral kurulum maliyeti $I_d = 38.28 * 10^6$ olarak hesaplanmış idi ve buradan hareketle inşaatın bitim tarihi itibari ile toplam maliyet (7.3) denkleminde,

$$I_k = I_d * k \quad (7.3)$$

$$I_k = 38.28 * 10^6 * 1.06 = 40.58 * 10^6 \quad \text{Euro olarak bulunur.}$$

(7.4) denklemi ile amortisman faktörü,

$$AF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (7.4)$$

$$AF = \frac{0.048(1.048)^{25}}{(1.048)^{25} - 1} = 0.069$$

Buradan hareketle de (7.5) denklemi ile yıllık sermaye maliyeti,

$$C_k = AF * I_k \quad (7.5)$$

$$C_k = 0.069 * 40.58 * 10^6 = 2.80 * 10^6 \quad \text{Euro/Yıl olarak elde edilir.}$$

Elde edilen yıllık sermaye maliyeti kullanılarak birim enerji başına sermaye maliyeti (7.6) denkleminde,

$$g_k = \frac{C_k}{E_e} \quad (7.6)$$

$$g_k = \frac{2.80 * 10^6}{99.86 * 10^6} = 0.0280 \quad \text{Euro/kW}_e\text{h olarak bulunur.}$$

Yıllık işletme ve bakım(O&M) maliyeti $C_m = 791.000$ Euro olarak belirtilmiş olup buradan hareketle birim enerji başına O&M maliyeti (7.7) denkleminde,

$$g_m = \frac{C_m}{E_e} \quad (7.7)$$

$$g_m = \frac{0.971 * 10^6}{99.86 * 10^6} = 0.0097 \quad \text{Euro/kW}_e\text{h olarak bulunur.}$$

Sonuç olarak, asenkron generatör içeren V90 rüzgar türbini için birim enerji başına toplam enerji üretim maliyeti,

$$g = g_k + g_m = 0.0280 + 0.0097 = 0.0377 \quad \text{Euro/kW}_e\text{h olarak elde edilir.}$$

SONUÇLAR

Dünya enerji ihtiyacının büyük bir oranını sağlayan fosil yakıtların yakın ve orta gelecekte tükenecek olması gerçeği, ülkeleri enerji kaynaklarını çeşitlendirmeye ve mevcut kaynaklarını da daha verimli kullanmaya zorlamaktadır. Dünya genelinde şu an itibariyle en az 50,000 adet değişik güçte rüzgâr türbini bulunmakta olup, toplam 50 milyar kilowatt-saat üretmektedirler(kWh). Global bir derecede, toplam rüzgâr türbinleri 8 adet büyük güçteki nükleer santralin ürettiğine eş değer elektrik üretmektedirler. Bu sadece büyük derecedeki türbinleri değil, aynı zamanda ev ve işyerlerine elektrik veren küçük güçteki türbinleri de içermektedir. Küçük, 10 kW kapasiteli bir türbin yılda 16,000 kWh üretilmektedir ve Amerika'yı ele alacak olursak, bir evin ihtiyacı yıllık 10,000 kWh civarındadır.

Ülkemizde ise yenilenebilir enerji kaynakları politikaları genelinde belirsizlikler yaşanmaktadır. Bu yaklaşım belirli ve takip edilen bir rüzgâr enerjisi politikasının da olmaması sonucunu doğurmaktadır. Hâlbuki enerjide uzun vadeli bir planlama yapılması zorunludur. Ancak, bu tür planlamalar yapılırken de temel verilerin doğru olarak saptanması gerekmektedir. Bu bağlamda, yerli ve yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle de elektrik enerjisi alanında rüzgâr enerjisi kaynakları, kullanımını özendirerek teşvik uygulamaları, dünyadaki örnekleri incelenerek ve toplumsal fayda ön planda tutularak, yasal düzenlemelere yansıtılmalıdır.

Rüzgâr enerjisi santralleri kurulmasının ilk aşaması olan uzun dönemli rüzgâr değerleri ölçümü, tüm projeyi etkilemesi açısından çok büyük bir öneme sahiptir. Standartlara uygun ölçüm cihazları ile uygun şartlarda veri toplama ve değerlendirme işlemlerinin yapılması kapasite tahminlerindeki hatayı en aza indirecektir. Bu nedenle, ölçümlerin uzman kişiler tarafından gerçekleştirilmekte ve rüzgar santralleri kurulur iken önkonuşlandırma raporları oluşturulmaktadır ve bu sayede rüzgâr santralinden maksimum verim elde edilmesi sağlanmaktadır.

Çalışmamızda görüldüğü üzere, rüzgar santralleri zaman içerisinde farklı teknolojiler ile hizmet etmeye başlamış olup, sadece senkron generatör kullanılan rüzgar türbinlerinin yerini asenkron generatör kullanımları da almaya başlamıştır. Senkron generatör ile kurulan bir rüzgar türbini ile asenkron generatör ile kurulan bir rüzgar santrali için maliyet çalışmamız sonucunda, senkron generatör ile kurulan bir rüzgar santralinin daha ekonomik olduğunu gördük. Buna sebep, asenkron generatör yapısının senkron generatöre göre farklı olması ve üretim maliyetinin de bu doğrultuda artıyor olmasıdır.

2 Mw gücündeki bir senkron generatör 1.670.000 Euro iken, bu miktar senkron generatör kullanılması durumunda 1.900.000 Euro olarak olmaktadır ve bir rüzgar santrali işletmesinin kurulum maliyetine direkt olarak etkimektedir. Bir diğer önemli fark ise senkron generatör ve

asen kron generatörün işletme ve bakım(O&M) maliyetlerinde görülen farklardır. Senkron bir generatör ile kurulan bir rüzgar türbininin yıllık işletme ve bakım(O&M) maliyeti 48.000 Euro iken, bu maliyet asenkron generatör olması durumunda 75.000 Euro'ya çıkmaktadır. Tek bir rüzgar santrali ünitesi için bu fark çok yüksek gibi gözükmesine de çalışmamızda ele aldığımız gibi 15 üniteden oluşan rüzgar santralinde 180.000 Euro gibi büyük bir fark ortaya çıkmıştır.

Hem kurulum hem de işletme ve bakım maliyetlerinde görülen bu farklılıklar sonucunda, senkron generatör içeren rüzgar türbinleri ile kurulan bir rüzgar santralinde birim enerji maliyeti 0.0333 Euro/kWh, asenkron generatör içeren rüzgar türbinleri ile kurulan bir rüzgar santralinde birim enerji maliyeti 0.0377 Euro/kWh olarak bulunmuştur. Başka bir deyişle senkron generatör içeren rüzgar türbinleri ile kurulan bir rüzgar santrali, asenkron generatör içeren rüzgar türbinleri ile kurulan bir rüzgar santralinden daha ekonomiktir.

KAYNAKLAR

H.Tarık DURU, Sabri CAMUR, Birol ARİFOĞLU, Ersoy BEŞER Standart Kafes Rotorlu Asenkron Makina ve Sürücü Kullanarak Rüzgar Türbininden Maksimum Enerji Elde Edilmesini Sağlayan Bir Sistemin Analizi, Tasarımı ve Modellenmesi Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü (DURU 2005)

Murat UYAR Muhsin Tunay GENÇOĞLU Selçuk YILDIRIM Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri İçin Generatör Sistemleri Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü (UYAR 2006)

İNTERNET KAYNAKLARI

"Aerodynamics of Wind Turbines: Drag." Danish Wind Industry Association.

<http://www.windpower.org/en/tour/wtrb/drag.htm> [1]

Airtricity <http://www.airtricity.com/america/> [2]

Aksa Enerji Sanayi A.Ş. <http://www.aksa.com.tr> [3]

"Anti-wind farm report dismissed." BBC News. Fe b. 26, 2005.

http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/4300723.stm [4]

Arvizu, DAN, Ph.D.(2006) "Renewable Electricity: Poised to Make a Difference." Power Engineering.

http://pepei.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=ARTCL&ARTICLE_ID=255997&VERSION_NUM=2&p=6 [5]

"Buying Wind Energy on the Retail Market." American Wind Energy Association.

<http://www.awea.org/pubs/factsheets/BuyingWindRetail.pdf> [6]

Danish Wind Industry Association <http://www.windpower.org/en/tour/wtrb/rotor.htm> [7]

"Distributed Power Generation." Solarbuzz.com.

<http://www.solarbuzz.com/DistributedGeneration.htm> [8]

"The Economics of Wind Energy." American Wind Energy Association.

<http://www.awea.org/pubs/factsheets/EconomicsOfWind-Feb2005.pdf> [9]

"Electricity Rate Comparison by State." Official Nebraska Government Web Site.

<http://www.neo.state.ne.us/statshtml/115.html> [10]

Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü: Rüzgâr Enerjisi Çalışmaları

http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/ruzgar_ruzgar_atlas.html [11]

Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü

<http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/RUZGAR%20POTANSİYELI%20BELIRLENMESI.doc> [12]

Estill, GLEN. "The 3 cent solution." Wind Blog. <http://www.biofuels.coop/windblog/?p=10>

Gangemi, JEFFREY. (2006), "Selling Power Back to the Grid." Business Week Online.

http://www.businessweek.com/smallbiz/content/jul2006/sb20060706_167332.htm [13]

- "The Most Frequently Asked Questions About Wind Energy." American Wind Energy Association.<http://www.awea.org/pubs/documents/FAQ2002%20-%20web.PDF> [14]
- "State-Level Renewable Energy Portfolio Standards (RPS)." American Wind Energy Association.http://www.awea.org/pubs/factsheets/0509-RPS_Progresses_in_States.pdf [15]
- "Wind Energy: An Untapped Resource." American Wind Energy Association.
http://www.awea.org/pubs/factsheets/Wind_Energy_An_Untapped_Resource.pdf [16]
- "Wind Energy and Wildlife: Frequently Asked Questions." American Wind Energy Association.http://www.awea.org/pubs/factsheets/050629_Wind_Wildlife_FAQ.pdf [17]
- "Wind Energy - How Does It Work?" American Wind Energy Association.
<http://science.howstuffworks.com/wind-power2.htm> [18]
- "Wind Energy Technologies." U.S. Department of Energy.
http://www.eere.energy.gov/RE/wind_technologies.html [19]
- "Wind Energy: The Fuel of the Future is Ready Today." American Wind Energy Association.
<http://www.awea.org/pubs/factsheets/wetoday.pdf> [20]
- "Wind Power Today." American Wind Energy Association.
<http://www.awea.org/pubs/factsheets/WindPowerTodayFinal.pdf> [21]
- "Wind PTC Extension Will Spur Development, Mostly for Well Advanced Projects."
CWEB.106/October.29.2004
<http://www.newsdata.com/enernet/conweb/conweb106.html#cw106-5> [22]

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	04.12.1983	
Doğum yeri	Ağrı	
Lise	1994-1995	Fahrettin Kerim Gökay Anadolu Lisesi
Lise	1995-2001	Büyükşehir Hüseyin Yıldız Anadolu Lisesi
Lisans	2001-2005	Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fak. Makina Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2005-Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Müh. Anabilim Dalı, Enerji Makinaları Programı
Çalıştığı kurumlar		
2006-Devam ediyor		AKSA Jeneratör Sanayi ve Ticaret A.Ş.