

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGÂR SANTRALİ İÇEREN ELEKTRİK
SİSTEMLERİNDE ETKİLENMELER VE KISA-DEVRE
İNCELEMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Kadir TEKİN**

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

KASIM 2006

**RÜZGÂR SANTRALİ İÇEREN ELEKTRİK
SİSTEMLERİNDE ETKİLENMELER VE KISA-DEVRE
İNCELEMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Kadir TEKİN
(504921320)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Eylül 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Kasım 2006**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Mustafa BAĞRIYANIK
Diğer Jüri Üyeleri Yrd.Doç.Dr. Deniz YILDIRIM (İ.T.Ü.)
Yrd.Doç.Dr. M. Hakan HOCAOĞLU (G.Y.T.E.)**

ÖNSÖZ

Öncelikle, yüksek lisans tezimi hazırlama döneminde, beni yönlendiren ve her konuda yardım ederek bu aşamaya gelmemde büyük katkıları olan, çok değerli hocalarım Doç.Dr. Mustafa BAĞRIYANIK'a ve Dr. Fatmagül BAĞRIYANIK'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca, yaşamım boyunca bana emek veren aileme, rüzgâr enerjisi konusunda çalışmamla ilgili bana fikir veren hocalarıma, beni destekleyen arkadaşlarıma ve bu çalışmam sırasında bana yardım eden Güray ACAR'a ayrıca teşekkür ederim.

İyi ki varsınız.

KASIM 2006

Müh. Kadir TEKİN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. RÜZGÂR ENERJİSİ	4
2.1 Rüzgârın Kaynağı ve Rüzgâr Enerjisi	4
2.2 Rüzgârdaki Enerji	5
2.3 Rüzgâr Ölçümleri ve Önemi	6
2.4 Rüzgâr Türbinleri	8
2.4.1 Rüzgâr Türbininin Yapısı ve Elektrik Üretme Tekniği	8
2.4.2 Yatay Eksenli Türbinler	10
2.4.3 Düşey Eksenli Türbinler	11
2.5 Rüzgâr Enerjisiyle Elektrik Üretmenin Avantajları-Dezavantajları ve Maliyet Açısından Değerlendirilmesi	11
2.6 Rüzgâr Gücünün Dünya'daki Durumu	13
2.7 Türkiye' de Rüzgâr Enerjisinden Yararlanma Potansiyeli	15
3. RÜZGÂR SANTRALLERİNDE ELEKTRİK SİSTEMLERİ	17
3.1 Rüzgâr Türbinlerinde Generatörler ve Güç Elektroniği Bileşenleri	17
3.1.1 Rüzgâr Türbini Teknolojilerine Genel Bakış	17
3.1.1.1 Sabit Hızlı Rüzgâr Türbinleri	17
3.1.1.2 Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri	18
3.1.2 Rüzgâr Türbini Teknolojisinde Kullanılan Generatörler	18
3.1.2.1 Tip A: Sabit Hız	20
3.1.2.2 Tip B: Sınırlı Değişken Hız	20
3.1.2.3 Tip C: Kısmi Ölçekli Frekans Çeviricili Değişken Hız	20
3.1.2.4 Tip D: Tam Ölçekli Frekans Çeviricili Değişken Hız	21
3.1.3 Generatör Sistemleri	21
3.1.3.1 Asenkron Generatör	22
3.1.3.1.1 Sincap Kafesli Asenkron Generatörü	22

3.1.3.1.2 Bilezikli Asenkron Generatörü	23
3.1.3.2 Senkron Generatör	25
3.1.3.2.1 Bilezikli Senkron Generatörü	26
3.1.3.2.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörü	27
3.1.4 Rüzgâr Santrallerinde Kullanılan Güç Elektroniği Bileşenleri	27
3.1.4.1 Yol Vericiler	28
3.1.4.2 Kondansatör Gurupları	28
3.1.4.3 Doğrultucu ve Eviriciler	28
3.1.4.4 Frekans çeviriciler	30
3.2 Rüzgâr Türbinlerinde Koruma	30
3.3 Rüzgâr Türbinlerinde Topraklama Sistemleri	31
4. ŞEBEKEYE BAĞLI RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN KULLANIMI SIRASINDA ELEKTRİK SİSTEMİNDEKİ ETKİLENMELER	34
4.1 Giriş	34
4.2 Rüzgâr Türbinlerinin Şebekeye Bağlanması	34
4.2.1 Genel Kısıtlamalar	35
4.2.2 Rüzgâr Türbinlerinin Dağıtım Şebekesine Bağlantısı	35
4.2.3 Rüzgâr Türbinlerinin İletim Şebekesine Bağlantısı	36
4.3 Rüzgâr Türbinlerinin Bölgesel ve Şebeke Genelindeki Bozucu Etkileri	37
4.3.1 Bölgesel Bozucu Etkileri	38
4.3.2 Şebekeye Olan Bozucu Etkileri	39
4.3.2.1 Sistem Dinamiği ve Kararlılığı Etkisi	39
4.3.2.2 Reaktif Güç Üretimi ve Gerilim Kontrolü Üzerindeki Etkileri	40
4.3.2.3 Frekans Kontrolü ve Yük Eğrisinin Takibi Konularına Etkileri	42
4.4 Büyük Rüzgâr Çiftlikleri Planlamasında Sürekli Hal Güç Sistemi Sorunları	43
4.5 Bölgesel Şebekelerde Gerilim Kararlılığı Limitleri ve Büyük Ölçekli Rüzgâr Gücü Entegrasyonu	44
4.6 Kısa-Devre Arızası Durumunda Rüzgâr Türbinlerinin Tepkisi	46
4.7 Rüzgâr Santrallerinin Şebekeyi Besleme Kapasitesi Limiti ve Önemi	48
5. ÖRNEK SİSTEM İNCELEMESİ	52
5.1 Örnek Sistem	52
5.2 Örnek Sistem Verileri	52
5.3 Benzetimlerin Ana Hatları	54
5.4 Farklı Çalışma Koşullarının Yarattığı Etkiler	55
5.4.1 Arızalar Açısından Etkiler	55
5.4.2 Rüzgâr Santralinin Çalışma Koşulları Açısından Etkiler	58
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64

KAYNAKLAR

67

ÖZGEÇMİŞ

70

KISALTMALAR

DFIG	: Double Fed Induction Generator (Çift Beslemeli Asenkron Generatör)
OECD	: Organisation for Economic Co-operation and Development (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü)
EÜAŞ	: Elektrik Üretim Anonim Şirketi
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
SCIG	: Squirrel Cage Induction Generator (Sincap Kafesli Asenkron Generatör)
WRIG	: Wound Rotor Induction Generator (Bilezikli asenkron Generator)
PMSG	: Permanent Magnet Synchronous Generator (Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör)
WRSG	: Wound Rotor Synchronous Generator (Bilezikli Senkron Generatör)
OSIG	: OptiSlip Induction Generator (OptiSlip Asenkron Generatörü)
GTO	: Gate Turn –Off (Kapıdan tıkanabilen tristör)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (Yalıtılmış kapılı iki kutuplu transistör)
PM	: Permanent Magnet (Sürekli Mıknatıs)
PWM	: Pulse-Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
SVC	: Static VAR Compensator (Statik VAR Kompanzatör)
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TEAŞ	: Türkiye Elektrik Üretim İletim Anonim Şirketi
N	: Network (Şebeke)
L	: Load (Yük)
W	: Wind (Rüzgâr)

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 5.1. Arıza yerinin NW hattı olması durumunda, arıza akımları	56
Tablo 5.2. LW hattının devrede olmaması ve arıza yerinin NW hattı olması durumunda, arıza akımları.....	56
Tablo 5.3. Arıza yerinin NL hattı olması durumunda, arıza akımları	57
Tablo 5.4. Arıza yerinin LW hattı olması durumunda, arıza akımları	57

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Dünya’da rüzgâr santralleri kurulu gücü değişimi	14
Şekil 3.1 : Tipik rüzgâr türbini konfigürasyonları	19
Şekil 3.2 : Rüzgâr santrali topraklama sistemi şeması	33
Şekil 4.1 : Bağlantı noktasında sistem sağlamlığını ve şebeke bağlantı performansını değerlendirmek için, rüzgâr santrali ve şebekenin Thevenin eşdeğer devre modeli.....	49
Şekil 5.1 : Örnek sistem şeması.....	53
Şekil 5.2 : Rüzgâr santralinin devreye girmesi durumunda W barası gerilimi değişimi.....	59
Şekil 5.3 : Rüzgâr santralinin devreye girmesi durumunda çekilen akımın değişimi.....	59
Şekil 5.4 : Rüzgâr santralinin devreye girmesi durumunda aktif gücün değişimi.....	60
Şekil 5.5 : Rüzgâr santralinin devreye girmesi durumunda kanat açısının değişimi.....	60
Şekil 5.6 : Rüzgâr hızının sabit olması durumu.....	60
Şekil 5.7 : Rüzgâr santralinin devreye girmesi durumunda rotor hızının değişimi.....	61
Şekil 5.8 : Rüzgâr hızının değişmesi durumu.....	61
Şekil 5.9 : Rüzgâr hızının değişmesi durumunda W barası gerilimi değişimi.....	62
Şekil 5.10 : Rüzgâr hızının değişmesi durumunda W barası aktif gücü değişimi.....	62
Şekil 5.11 : Rüzgâr hızının değişmesi durumunda kanat açısının değişimi....	63
Şekil 5.12 : Rüzgâr hızının değişmesi durumunda rotor hızının değişimi.....	63

SEMBOL LİSTESİ

m	: Havanın kütlesi (kg)
v	: Havanın hızı (m/sn)
d	: Havanın yoğunluğu (kg/m ³)
V	: Havanın hacmi (m ³)
A	: Rotor süpürme alanı (m ²)
P	: Rüzgâr gücü (W)
C_p	: Performans katsayısı
N_g	: Jeneratör verimliliği
N_b	: Türbin kullanılabilirliği
h	: Ortalama deniz düzeyinden yükseklik ile ölçüm yüksekliğinin toplamı
V	: Planlanan bağlantı noktasındaki şebeke gerilimi (kV)
Z_i	: Bağlantıdan önceki şebekenin kaynak empedansı (Ω)
Z_w	: Rüzgâr santralının kaynak empedansı (Ω)
Z₁	: Rüzgâr santralinden şebekeye olan bağlantı hattının empedansı (Ω)
Z_T	: İki sistemin toplam birleştirilmiş kaynak empedansı (Ω)
R	: Direnç (Ω)
X	: Reaktans (Ω)
Sk''	: Eşdeğer şebeke kısa devre gücü (MVA)
Z_f	: Arıza Empedansı (Ω)

RÜZGÂR SANTRALİ İÇEREN ELEKTRİK SİSTEMLERİNDE ETKİLENMELER VE KISA-DEVRE İNCELEMESİ

ÖZET

Dünya nüfusunun hızla artması ile birlikte insanların enerji tüketimi de hızla artmaktadır. Tüketimin büyük bir kısmının karşılandığı fosil enerji kaynaklarının hızla azalması ve atık gazlarından dolayı küresel ısınmanın başlıca sorumlusu olmaları, bilim adamlarını, doğaya zarar vermeyecek yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında hidrolik, güneş, biokütle, jeotermal ve rüzgâr enerjisi son yıllarda büyük önem kazanmaya başlamıştır. Bu enerji kaynakları içinde rüzgâr enerjisine dayalı elektrik enerjisi üretiminin gelişimi gerçekten çok etkileyicidir. Bu nedenle çalışmada öncelikle, rüzgârın enerjisi, rüzgâr ölçümlerinin önemi, rüzgâr türbinleri ve elektrik üretme teknikleri hakkında bilgi verilerek, rüzgâra dayalı elektrik üretiminin avantaj ve dezavantajları, rüzgâr enerjisinin Dünya’da ve Türkiye’deki durumu irdelenmiştir. Çalışmada rüzgâr santrallerinin elektrik sistemleri başlığı altında, genel hatları ile kullanılan generatörlerden, güç elektroniği bileşenlerinden, korumadan ve topraklama sistemlerinden bahsedilmiştir.

Elektrik sistemine bağlı çalışan rüzgâr santrallerinin elektrik sistemi üzerinde birçok etkileri vardır. Rüzgâr santrallerinin sisteme bağlanması nedeni ile bölgesel ve sistem üzerinde olan bozucu etkiler, büyük rüzgâr santrallerinin planlamasında yaşanabilecek sürekli hal sorunları, büyük ölçekli rüzgâr gücü katılımının etkileri, kısa-devre arızası durumunda rüzgâr türbinlerinin tepkisi ile rüzgâr santrallerinin şebekeyi besleme kapasitesi sınırı ve önemi konuları hakkında bilgiler verilmiştir.

Çalışmada birden fazla türbine sahip rüzgâr santrali içeren bir örnek sistem göz önüne alınarak, sistem üzerinde MATLAB bilgisayar yazılımı kullanılarak benzetimler gerçekleştirilmiştir. Benzetimlerde, sistemde farklı noktalarda oluşturulan çeşitli kısa-devre durumlarına ilişkin senaryolar göz önüne alınarak, kısa devre incelemeleri yapılmıştır. Ayrıca bu incelemelerde, bir rüzgâr santralinin bağlı bulunduğu şebekenin güçlü veya zayıf olması gibi durumlar da göz önüne alınarak, elde edilen veriler kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar tablolar ve şekiller halinde sunulmuştur.

THE EFFECTS OF WIND FARMS CONNECTED TO POWER SYSTEMS AND SHORT-CIRCUIT ANALYSIS.

SUMMARY

Due to the rapid increase of world population, the energy consumption of humanity has also increased. Since the rapid decline of fossil based energy sources in which the major consumption requirement is met and their effect on global warming due to the waste gases; scientists concentrated their research on alternative renewable and eco-friendly energy sources. Among the renewable energy sources; hydraulic, solar, bio-mass, geothermal and wind energy have gained much importance in the past years. Among all these alternative energy resources, it is quite fascinating that the development in electricity production based on wind power has dramatically increased. Therefore in this dissertation, primarily, the wind energy, the importance of wind speed measurement, wind turbines, wind based electricity generation techniques have been investigated, advantages and disadvantages of wind power generation, the current situation of wind energy generation in Turkey and in the World has been analyzed. This work includes, in general, wind power generators, protection and grounding systems of the wind farms under the topic of “the electrical systems of wind farms”.

There are numerous effects of the wind farms on the power system. In this thesis, some of these effects such as integrating problems of the wind farms to the network, disturbances on local power system due to the wind farms, the behavior of the wind farms during short-circuits and the limitations have been discussed.

In this work, an example three-bus test system was considered, and simulated in Matlab environment. The test system has a wind farm connected bus, a load bus and a network equivalent bus. In simulation, various short-circuit conditions were analyzed based on the short-circuit scenarios created at different fault locations of the network. In addition, the data were compared obtained from these investigations belonging to the network capacity in which this wind farm has been connected. The obtained results were processed and presented in tables and graphics.

1. GİRİŞ

Dünya'daki enerji ihtiyacının büyük bir kısmının karşılandığı fosil enerji kaynaklarının sınırlı ömürlerinin olması yanında, küresel ısınmaya sebep olmaları, bilim adamlarını doğaya zarar vermeyen yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Yatırım maliyetleri gün geçtikçe düşen ve yeni teknolojilerle kullanımları yaygınlaşan yenilenebilir enerji kaynakları, yakın gelecekte tükenmesi beklenen fosil yakıtların yerini alacak ve sera gazı emisyonlarının azalmasını sağlayıp, dünyayı yaşanabilir kılmaya devam edeceklerdir.

Gelişmiş ülkeler, fosil yakıtları artık terk edip, yenilenebilir kaynaklara yönelmeye başlamışlardır. 1970'li yıllardaki petrol krizi sonrası bilim adamları, yenilenebilir enerjinin insanlığın ihtiyaç duyduğu elektriği ve ısıyı üretmek için kullanılıp kullanılmayacağını araştırmak zorunda kaldılar ve önemli sonuçlar elde etmişlerdir.

ABD, 80'li yıllarda çok sayıda rüzgâr türbini kurup denemelerini yaptı ve standartlarını oluşturdu. AB ülkeleri, AB'nin ortak bütçesinden büyük rüzgâr santralleri geliştirmek için fon ayırmıştır. Bugün, Danimarka elektriğinin % 25'ini, Almanya % 7'sini rüzgârdan sağlıyor [1].

Endüstrinin bugüne dek sergilediği başarı, büyük ölçüde Almanya, İspanya ve Danimarka'nın başını çektiği bir kaç ülkenin çabalarıyla yaratılmıştır. Başka ülkelerin buna benzer bir çabayı göstermeleri halinde ise rüzgâr enerjisinin etkisinin çok daha büyük olacağı açıktır [2].

Ülkemizde de büyük bir rüzgâr potansiyelinin olduğu yapılan incelemelerde istatistiklerle belirlenmiştir. Türkiye'nin elektrik ihtiyacının önemli bir kısmını rüzgâr enerjisinden sağlamak mümkündür. Ancak, şu anda bu potansiyelin çok azı kullanılmaktadır ve mevcut rüzgâr santrali kurulu gücümüz 2006 yılı ortalarında yaklaşık olarak sadece 50 MW'tır.

İlerlemenin büyük bölümünün bugüne dek yalnızca üç ülke tarafından sağlanmış olduğu gerçeği, günümüz teknolojisinin bir buzdağının görünen ucu olduğunu ve büyük potansiyelin henüz el değmemiş durumda bırakıldığını gösteriyor. Endüstrinin gerçek potansiyelini sınırlayan engellere ve piyasadaki çarpıklıklara son verecek olumlu bir politik ve yasal çerçeve uygulanırsa, rüzgâr enerjisi, gelecekte de geçmişteki başarısını sürdürebilir.

Rüzgâr enerjisi, yirmi yıl gibi kısa süre öncesine ait ilk örneklerden bu yana, büyük yol katetmiştir. Teknolojik gelişmeler, bugünün hızlı kurulabilen, yüksek teknoloji ürünü, modüler türbinlerini yarattı. Bugün rüzgâr türbinleri, yirmi yıl önceki benzerlerinden kat ve kat güçlüdür.

Temiz enerji ve iklim koruma konusundaki diğer bazı çözümlerin aksine, rüzgâr enerjisi ne icat edilmek durumundadır, ne de büyüğü bir atılım beklemek zorundadır; küresel uygulama için bugünden hazırdır ve çağdaş rüzgâr çiftlikleri, geleneksel güç santrallerine eşdeğer miktarlarda enerjiyi sağlayabilecek kapasitededir [2].

Yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak elektrik üretmede, son yıllarda en yüksek büyüme oranına sahip olan rüzgâr enerjisi endüstrisinde, çok büyük potansiyel olmasının yanında, elektrik sisteminin bir parçası olarak, yani, rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlanması durumunda ortaya çıkacak olumsuz etkilerde henüz tam olarak giderilmiş değildir. Bu etkiler, konunun uzmanları tarafından incelenmekte ve araştırılmaktadır. Elektrik sistemlerinde rüzgâr santrallerinden kaynaklanan etkilenmeler çerçevesinde, literatürde zayıf bağlı rüzgâr çiftliklerinde gerilim kararlılığı [3], büyük rüzgâr çiftlikleri planlandığında sürekli hal güç sistemi sorunları [4], bölgesel şebekelerde gerilim kararlılığı limitleri ve büyük ölçekli rüzgâr gücü entegrasyonu [5], alt iletim şebekesine bağlı büyük rüzgâr çiftliği bağlantıları için, gerilim kararlılığı limitleri ve güç kaybı araştırması [6], güç sistemine bağlı rüzgâr santrallerinin etkilerini değerlendirme [7] ve bir dış kısadevre arızasından sonra şebekeye bağlı çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgâr türbinlerinin geçici-hal durumunun incelenmesi [8] üzerine çalışmalar vardır.

Bu tez çalışmasının içeriği ile ilgili kısa bilgilendirmeye geçecek olursak;

Bölüm 2’de, genel olarak rüzgârın kaynağı ve rüzgârdaki enerjiden, rüzgâr ölçümleri ve öneminden, rüzgâr türbinlerinden ve elektrik üretme tekniğinden, rüzgâr

enerjisiyle elektrik üretmenin avantaj ve dezavantajlarından, rüzgâr enerjisinin Dünya'daki ve Türkiye'deki durumundan bahsedilmiştir.

Bölüm 3'te, rüzgâr santrallerinin elektrik sistemleri genel olarak incelenmiştir. Rüzgâr türbinlerinde generatör sistemleri kısmında, asenkron ve senkron generatörlerden, güç elektroniği bileşenleri kısmında, kısaca yol vericiler, kondansatör gurupları, doğrultucu ve eviriciler ile frekans çeviricilerden, bölümün sonunda ise rüzgâr türbinlerinde korumadan ve topraklama sistemlerinden bahsedilmiştir.

Bölüm 4'te, şebekeye bağlı rüzgâr türbinlerinin kullanımı sırasında sistemdeki etkilenmeler çerçevesinde, rüzgâr türbinlerinin şebekeye bağlanması incelenmiştir. Bu açıdan rüzgâr türbinlerinin bölgesel ve şebeke genelindeki bozucu etkileri, büyük rüzgâr çiftlikleri planlamasında sürekli hal güç sistemi sorunları, bölgesel şebekelerde büyük ölçekli rüzgâr gücü üretim birimlerinin katılımı, rüzgâr santrallerinin şebekeyi besleme kapasitesi sınırı ve önemi ile kısa devre arızası durumunda rüzgâr türbinlerinin tepkisi konularına yer verilmiştir.

Bölüm 5'te, göz önüne alınan rüzgâr santrali içeren bir örnek sistem üzerinde, çeşitli yerlerde ve tiplerdeki kısa devreler için, rüzgâr santralının şebekeye bağlı olması ve şebekeyle bağlantısının kesilmiş olması durumları Matlab ortamında benzetimler yapılarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Arızalar açısından arıza yerinin ve arıza tipinin etkilerinin yanı sıra bir rüzgâr santralının bağlı bulunduğu şebekenin güçlü ve zayıf olması, rüzgâr santralının devreye girmesi ve rüzgâr hızının değişmesi gibi sistem işletimi sırasında yaşanabilecek çeşitli durumlar da göz önüne alınarak incelemeler yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. RÜZGÂR ENERJİSİ

2.1 Rüzgârın Kaynağı ve Rüzgâr enerjisi

Yer yüzünün ihtiyaç duyduğu enerjinin tamamı Güneş'ten gelir. Yeryüzüne gelen güneş enerjisinin, değişik bölgeleri, karaları ve denizleri değişik ölçülerde ısıtması nedeniyle oluşan sıcaklık ve basınç farkları rüzgârı meydana getirir. Yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru hareket eden hava, rüzgâr olarak isimlendirilmektedir. Yani rüzgâr enerjisi, hız enerjisine (kinetik enerjiye) dönüşmüş güneş enerjisidir. Güneş yer yüzeyine her saat 100.000.000.000 MWh'lık enerji yayar ve Güneş'ten gelen enerjinin yaklaşık % 1-2'si rüzgâr enerjisine dönüşür. Güneş enerjisinin dönüşmüş bir biçimini oluşturan rüzgâr enerjisinin teşkil ettiği atmosferik potansiyelin, brüt olarak 191.000.000 MW olduğu hesaplanmaktadır. Şüphesiz teknik olarak kullanılabilir kaynak bundan daha az olacaktır. Ancak yine de büyük bir potansiyelin var olduğu ortadadır [9,10].

Rüzgâr enerjisi de güneş enerjisi gibi, bir yakıt kullanımını gerektirmeyen, dolayısıyla atığı olmayan, temiz bir kaynaktır. Yine bir diğer avantajıda, rüzgâr enerjisinin, aynı hidroelektrik santrallerde olduğu gibi, termal bir dönüşüm evresini gerektirmeksizin, prensip olarak son derece basit bir mekanizmayla, taşıdığı mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilmesidir. Bolluğu ve temiz oluşu rüzgârı da güneş enerjisi gibi insanlığın ve doğanın çıkarları açısından çekici kılmaktadır.

İnsanoğlu çok eski çağlardan beri, sulama, öğütme vb. ihtiyaçlar için gerekli olan mekanik enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla rüzgârdan yararlanmıştır. 20. yüzyılın ilk çeyreğinden itibaren rüzgârdan elektrik elde edebilmek için yetersiz de olsa çeşitli çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Günümüzde rüzgârı elektriğe dönüştürebilmek için hayli gelişmiş rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır [10]. Henüz ticari olmamakla birlikte 5 MW'lık rüzgâr türbini Almanya tarafından üretilmiştir. Hızla gelişen teknoloji sayesinde türbin güçlerinin büyümesi ve uygulamasının artması ile rüzgâr enerjisi zamanla daha tercih edilir olacaktır. Yukarıda belirtildiği gibi, Dünya'daki

rüzgâr enerjisi potansiyelinin çok yüksek olmasına rağmen bugün dünyada kurulu rüzgâr gücü Ocak 2006 itibariyle 59.206 MW'tır [11]. Uzmanların bilimsel temellere dayalı öngörüsü, Dünya'daki rüzgâr enerjisi kurulu gücünün 2008'e kadar 95.000 MW ve 2013'e kadar 194.000 MW olacağıdır [12].

2.2 Rüzgârdaki Enerji

Havanın ağırlığı ve hızı olması nedeniyle kinetik enerjisi vardır. Rüzgâr gücünün ve enerjisinin belli bir yerde belirlenmesi hız enerjisinden yararlanılarak yapılmaktadır.

$$\text{Hız (kinetik) enerjisi} = \frac{1}{2} m.v^2 \quad (2.1)$$

Burada, m havanın kütlesi (kg), v havanın hızı (m/s)' dir.

d yoğunluğu (kg/m³), V hacmi (m³) göstermek üzere;

$$m=V.d \text{ dir.} \quad (2.2)$$

Rüzgâra dik (A) alanından (rotor süpürme alanı), (v) hızıyla, (t) süresinde geçen havanın hacmi;

$$V=v.A.t \text{ dir.} \quad (2.3)$$

Bu değer kütle eşitliğinde yerine konulup t=1 alınırsa (birim zaman için), hız enerjisi eşitliği, güç eşitliğine dönüşür:

$$P = \frac{1}{2} (d.A.v^3) \quad (W) \quad (2.4)$$

Rüzgârdaki doğal gücün tamamını kullanmak olanaklı değildir. Eğer rüzgârın önünde bir duvar olduğu ve rüzgârın bu duvara çarptığı düşünülürse, o zaman rüzgâr gücünün hepsi alınmış olur. Bir rüzgâr türbini ile bu güç alınmak istenirse, alınabilecek enerji en fazla, türbine gelen rüzgâr gücünün 0.59'u olur. Bu orana Betz sınırı denir.

Bu durumda rüzgâr türbininin üreteceği güç,

$$P = \frac{1}{2} (d.A.C_p.v^3.N_g.N_b) \quad (2.5)$$

olur.

Burada, C_p performans katsayısı 0.59, N_g generatör verimliliği, N_b türbin kullanılabilirliği yaklaşık 0.95' tir.

Hava yoğunluğu, ortalama deniz düzeyinde 1.225 kg/m^3 olup, yükseklikle azalmaktadır. Bu değişim aşağıdaki bağlantı ile verilmektedir.

$$d=1.226 e^{a.h} \quad (2.6)$$

$a= -3.744 \times 10^{-5}$ değerinde bir katsayı.

$h=$ Ortalama deniz düzeyinden yükseklik + ölçüm yüksekliği.

Förmülden de görüldüğü gibi, bir rüzgâr türbininin üretebileceği elektrik enerjisi miktarı rüzgâr hızına son derece bağımlıdır ki, rüzgâr iki kat artarken elde edilecek güç sekiz kat artmaktadır. Bu arada rüzgâr türbininin enerji üretmesini sağlayacak minimum rüzgâr hızı 3.5-5 m/s ve türbinin enerji üretimini durduracağı maksimum rüzgâr hızı da 25 m/s civarındadır [9].

2.3 Rüzgâr Ölçümleri ve Önemi

Rüzgâr ölçümleri çok önemlidir ve çok hassas yapılmalıdır. Çünkü, ölçümlerdeki çok ufak gibi görünen bir fark bile yatırımın ekonomikliğini etkileyebilmektedir ve planlanan yatırım için risk getirebilmektedir. Ölçümlerin en az 12 ay boyunca ve sürekli olarak yapılması gerektiği dikkate alınır, çok küçük veri kaybı dahi büyük problemlere yol açabilmektedir. En önemli parametre ise, yapılan ölçümlerin yapılacağı sensörlerin doğru bir şekilde seçilerek, ölçüm direğine yerleştirilmesidir. Bu gibi sebeplerden dolayı meydana gelebilecek hatalar, verilerin doğru bir şekilde değerlendirilememesine neden olmaktadır. Projenin finansman aşamasında, ölçümler bağımsız bir kuruluştan istendiğinde, uluslararası standartlara uygun ve doğru bir şekilde yapılmış rüzgâr ölçümleri sunulmalıdır [13].

Rüzgâr hızı ölçümleri genellikle kupalı tür anemometreler (rüzgâr ölçerler) ile yapılır. Kupalı anemometreler, dikey eksenli olup, 3 adet kupası vardır. Kupanın dakikadaki dönme sayısı elektronik olarak kaydedilir. Böylece rüzgâr hızları elde edilmiş olur [9].

Rüzgâr ölçümleri için ideal yaklaşım, kullanılan rüzgâr türbininin kanatlarının bağlantı noktası yüksekliğinde ölçüm yapılmasıdır. Buna karşı geliştirilen iki argüman vardır. Birincisi, kullanılacak rüzgâr türbini modeli başta bilinmediğinden kanatların bağlantı noktası yüksekliği de bilinmemektedir ve ikinci olarak da yüksek ölçüm direkleri hem pahalı, hem de kurulumu zordur. Bunun alternatifi, daha düşük en az 2 seviyede ölçüm yapmaktır ve genellikle 10 ve 30 m. yükseklikleri seçilmektedir.

İdeal bir alan olarak düşünülen düz ve engelsiz arazide 10 m ve 30 m yüksekliklerde iki anemometrenin kullanılması yeterlidir. Daha kompleks arazilerdeki anemometre daha yükseğe monte edilmelidir. Minimum yükseklik mesafesinin bırakılabilmesi için, ölçüm direği de daha yüksek olmalıdır. Böyle bir alanda 20, 30 veya 40 hatta 50 m. yüksekliğindeki ölçüm direkleri gerekebilir, hatta arazinin iyi temsil edilebilmesi için ikinci bir ölçüm direği de gerekebilir [13].

Belirlenen yükseklikteki ölçüm noktalarında, anemometrelerle elde edilen ölçüm dataları, en az bir yıl boyunca sürekli olarak kaydedilir ve elde edilen rüzgâr kayıtları, kalite kontrolü yapılarak istatistik çözümlenmelerde kullanılmak üzere değerlendirilir. Rüzgârın belli bir periyotta değişimi ve dağılımı, hem enerji üretimi değerlendirmelerinde, hem de rüzgâr endüstrisinde çok önemlidir. Türbin tasarımcıları, türbin iyileştirmesinde ve maliyetleri en aza indirmede rüzgâr dağılımı ve değişimi ile ilgili bilgilere gerek duyarlar. Ayrıca, yatırımcılarda elektrik enerjisi üretiminde elde edecekleri gerilimin belirlenmesinde bu bilgilere gerek duymaktadırlar. Eğer bir yıl boyunca rüzgâr ölçülürse, genel olarak çok şiddetli rüzgârların nadiren, ılımlı ve şiddetli rüzgârların daha çok ortaya çıktığı görülür. Bir bölge için rüzgâr dağılımı ya ölçülerek, ya da ölçümlere dayalı değişik nokta ve yüksekliklerde Weibull dağılımı ile belirlenir. Bu dağılım, şekil ve ölçek değişkenleriyle belirtilir.

Havanın özgül kütlesi az olduğundan, rüzgârdan sağlanacak enerji rüzgâr hızına bağlıdır. Rüzgâr hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı biçimde artar. Rüzgârın sağlayacağı enerji, gücüne ve esme saati sayısına (sıklığına) bağlıdır. Ortalama rüzgâr hızı, yıldan yıla değişebilir. Rüzgâr hızının değişkenliğinden dolayı, rüzgâr enerjisi potansiyelinden elde edilecek enerji, yıllık ortalama hız değerinden

hesaplanan enerjiden daha fazla olmaktadır. Bu yüzden belli bir bölgede rüzgâr türbinleri ile üretilebilecek elektrik enerjisi üretim miktarının hesabında, yıllık ortalama rüzgâr hızından çok, gözlemlenen dağılım veya Weibull dağılımı ile hesap edilmiş rüzgâr hızı sıklık dağılımı kullanılmaktadır. Çünkü türbin tarafından üretilen enerjinin miktarı rüzgâr hızı dağılımına bağlıdır [9].

2.4 Rüzgâr Türbinleri

2.4.1 Rüzgâr Türbininin Yapısı ve Elektrik Üretme Tekniği

Rüzgâr türbinleri sayesinde rüzgâr enerjisi elektrik enerjisine çevrilir. Rüzgâr türbinleri basit bir prensiple çalışırlar. Rüzgârdaki enerji, kanatların bağlı olduğu rotoru döndürerek, havadaki kinetik enerji mekanik enerjiye çevrilir. Rotor milinin devir hareketi dişli çark yardımıyla artırılarak, mekanik enerji generatöre aktarılır ve burada elektrik enerjisine çevrilir.

Elektrik üretimi sırasında türbindeki yönlendirici, rüzgârdaki enerjiyi verimli kullanabilmek amacıyla türbini rüzgâra göre yönlendirir, fren sistemi de, rüzgâr hızının limiti aşması durumunda, türbini yavaşlatır ve durdurur. Eğer şebeke beslemesi yapılacaksa, transformatör yardımıyla, gerilim şebeke gerilim düzeyine yükseltilir. Rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerjisinden daha çok yararlanabilmek amacıyla bir kulenin üstüne monte edilirler. Daha fazla rüzgâr ve daha az turbülans için yerden en az 30 m yükseğe monte edilirler. Rüzgâr türbinleri lokal olarak sadece bir ev veya bina için elektrik üretebileceği gibi, elektrik şebekesine bağlanarak sistemi de besleyebilir [14].

Bir rüzgâr türbini ana hatlarıyla aşağıda kısaca tanımlanmış kısımlardan meydana gelir.

Kanatlar: Rüzgârı yakalar ve onun gücünü rotora aktarır. Çoğu türbinler 2 veya 3 kanatlıdır. Rüzgârın kanatların üzerinde esişi, kanatları yukarıya doğru hareket ettirir ve döndürür.

Rotor: Kanatlar ve göbeğin ikisine beraber rotor denir.

Pitch: Kanat eğim mekanizmasıdır. Kanatlar döndürülür veya rüzgârın yönüne göre kanatların eğim açısı ayarlanır.

Fren: Acil durumlarda hidrolik, mekanik veya elektriksel olarak rotoru durdurmayı sağlar.

Düşük Hız Mili: Rüzgâr türbinini, kanatların bağlantı noktası yüksekliğinden dişli kutusuna bağlar. Rotor dakikada 30-60 defa düşük hız milini döndürür.

Dişli Kutusu: Dişliler, düşük hızlı mili, yüksek hızlı mile bağlarlar. Dönme hızını dakikada 30-60'tan 1200-1500'e çıkarırlar ve generatörlerin elektrik üretmeleri için gereken hız sağlanmış olur.

Generatör: Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir.

Kontrolör: Makineyi saatte 8 -16 mil rüzgâr hızında çalıştırır ve saatte 65 mil hızda da durdururlar. Türbinler saatte 65 milin üzerinde rüzgâr hızında çalıştırılmazlar, çünkü generatörler aşırı ısınabilirler.

Anemometre: Rüzgârın hızını ölçer ve rüzgâr hızı bilgilerini kontrolöre iletir.

Yön Belirteci: Rüzgârın yönünü göstermek için kullanılır ve kontrolöre rüzgârın hangi yönden geldiğini bildirir.

Türbin Kabini (Nacelle): Rüzgâr türbininin dişli kutusunu, generatörünü, hatta 1 MW'ın üzerinde transformatörde dahil ana parçaları içine alan kısımdır.

Yüksek Hız Mili: Yaklaşık 1500 devir/dakika ile döner ve elektrik generatörünü çalıştırır. Acil durumlar için mekanik disk freni ile birlikte dir. Aerodinamik frenler kusurlu olduğu zaman veya türbin hizmette olduğu zaman mekanik fren devreye girer.

Yön Saptırma (Yaw) Sürücüsü: Yön Saptırma motoru ile beraber rüzgârın yönüne göre türbin kabininin dönmesini sağlar.

Yön Saptırma Motoru: Rotorun rüzgârı en iyi şekilde kullanabilmesi için kontrolörden gelen bilgiye göre türbin kabinini döndürme hareketini başlatır

Kule: Rüzgâr türbininin dişli kutusunu, rotoru, generatör ve belli gücün üzerinde transformatör dahil ana parçalarını üzerinde taşır. Kuleler çelik borudan veya çelik

kafesten yapılırlar. Çünkü, rüzgâr hızı yükseklikle artar ve daha uzun kulelerle, daha fazla rüzgâr enerjisi, dolayısıyla daha fazla elektrik üretilir [15,16].

Genel olarak bakıldığında, yatay eksenli türbinler ve düşey eksenli türbinler olmak üzere iki tip rüzgâr türbini vardır.

2.4.2 Yatay Eksenli Türbinler

Ticari amaçlı türbinlerin hemen hemen tamamı bu guruba girmektedir. Türbin yatay konumdadır. Rotor, dişli çark, generatör ve diğer ekipmanlar bir kule üzerinde yatay safta bağlanmışlardır. 1 MW'dan büyük türbinlerde, transformatörde kulenin tepesinde türbin gövdesinde yer alır. Daha küçüklerde ise, transformatör şebeke bağlantı sistemleri ile birlikte yerde bulunur. Rotora iki veya üç kanat bağlıdır [14].

Üç kanatlı türbinler, değişikliği az daha kararlı üretim sağlar ve daha sessiz çalışırlar, ancak, fiyatı daha yüksektir. Eskiden rotorlar genellikle metalden imal edilirken, yenileri hafif kompozit malzemelerden üretilmektedir. Rotor genellikle kulenin önünde yer alır. Rotorun kulenin arkasında yer alması halinde, kulenin yarattığı türbülans, türbin verimini düşürmektedir. Rotorun türbin önünde rüzgâr doğrultusuna göre ayarlanabilmesi için, elektrikli yönlendirici bulunur ve bu türbin gövdesi ile kule arasında yer alır. Kule genellikle çelikten imal edilir.

Generatörün sabit hızlı olması halinde rotor hızının kontrolü gerekmektedir. Aksi halde aşırı rüzgâr hızlarında rotor kontrolsüz hızlanır ve kazaya sebep olur. Rotor kontrolü iki şekilde yapılmaktadır. Rotor kanatlarının uygun dizaynı ile rüzgâr hızı belirli bir değerin üstüne çıksa dahi (örneğin 25 m/s) türbin hızı sabit kalıyor (duruş kontrolü). Diğer metot ise kanatların rüzgâr doğrultusu ile açısının bir hidrolik sistemle değiştirilmesi (eğim kontrolü). Çok yüksek hızlarda kanatlar rüzgâra en az direnç gösterecek şekilde çevrilerek türbin hızı ayarlanabiliyor. Açısı değiştirilebilen rotor kanatlarının diğer faydası düşük rüzgâr hızlarında da yüksek verimin elde edilebilmesidir.

Teknolojide diğer bir gelişme değişken hızlı generatörlerdir. Böylece yüksek rüzgâr hızında da enerjiyi verimli üretmek mümkün olabiliyor. Ancak bu generatörler sabit hızlılara göre daha pahalıdır. Ayrıca elektriğin şebekeye bağlanabilmesi için çıkış frekansının elektronik olarak 50 Hz'e sabitlenmesi gerekmektedir. Türbin hızını generatörün dizayn hızına çıkarmak için rotor ile generatör arasında dişli çark

kullanılır. Ancak bu hem maliyet hem de bakım masraflarını arttırır. Son yıllarda dişli çarkına gerek olmadan rotor milinin doğrudan özel dizayn edilmiş bir generatöre bağlanması mümkün olmuştur. Generatör fiyatının biraz yüksek olmasına karşın, dişli çarkın ortadan kalkması ve bakım masraflarının azalması bunu fazlasıyla karşılamaktadır [14].

2.4.3 Düşey Eksenli Türbinler

Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde kanatlar bir düşey safta bağlanmıştır. Rüzgâr doğrultusundan etkilenmedikleri için yönlendiriciye ihtiyaçları yoktur. Bütün elektromekanik aksam yerde olduğu için yatırım ve bakım masraflarında daha azdır. Yatay eksenli türbinlere göre bu avantajlarının yanısıra, dezavantajları daha çoktur. Türbin kanatlarının dizaynı dolayısıyla verimleri düşüktür, kanatların yere yakınlığı sonucu daha düşük rüzgâr hızında çalışmak durumundadırlar ve bu enerji üretimini azaltır. Bu türbinler çalışmaya kendi kendine başlayamaz, bu yüzden çalışmadan önce şebekeden enerji çekmek zorunda kalırlar. Bu durum türbinlerin şebekeye rahatsızlık vermesine neden olur. Ayrıca bu türbinlerin, yere bağlanmaları için çelik halatlara gereksinim duyulur. Verimin düşüklüğü dolayısıyla düşey eksenli rüzgâr türbinleri fazla uygulama alanı bulamamıştır. Uygulama Kanada ve Kaliforniya'daki birkaç ünite ile sınırlı kalmıştır [14].

2.5 Rüzgâr Enerjisiyle Elektrik Üretiminin Avantajları-Dezavantajları ve Maliyet Açısından Değerlendirilmesi

Rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimi, her ne kadar dünyada enerji sektöründe en yüksek büyüme oranına sahip olsa da, rüzgâr enerjisinin pahalı olduğu, gürültü kirliliğine ve elektromanyetik iletişimde parazite yol açtığı ileri sürülür.

Rüzgâr türbinlerinin gürültüye yol açtıkları doğrudur. Ancak rüzgâr enerjisinden faydalanmak için tercih edilen arazilerin genel olarak yerleşim yerlerinden ve doğal yaşamın olduğu yerlerden uzakta olması bu sorunu hafifletmektedir. Ayrıca, yeni geliştirilen rüzgâr türbinlerinde, türbin kabininin iç kısmı ses yalıtım malzemeleri ile kaplandığından gürültü daha azaltılmıştır. Benzer şeyler, çok basit olarak iletişim parazitlenmesi için de söylenebilir. Uygun konumlandırma ve planlamayla bu sorunda ortadan kalkar [10]. Pahalı oldukları konusunda ise, son yıllarda rüzgâr

türbinlerinin kullanımı arttığı için imalat maliyetlerinin düştüğünü ve diğer enerji üretim kaynakları ile daha rekabet edebilir bir noktaya gelindiği söylenebilir.

Rüzgâr enerjisinin avantajlarından bahsedecek olursak, aşağıdakileri sıralayabiliriz:

- Herhangi bir radyoaktif ışınım tahribatı yaratmamaktadır,
- Enerji kaynağı ücretsiz olup taşınma maliyetleri yoktur,
- Herhangi bir atık üretmemektedir, atmosfere veya yakındaki nehir ve denizlere ısı emisyonları bulunmamaktadır,
- Rüzgâr türbinleri güvenlik açısından başarılı bir geçmişe sahiptir,
- Kullanım sırasında tasfiye edilmeleri diğerlerine göre çok kolaydır,
- Teknolojinin tesisi ve işletilmesi göreceli olarak basittir,
- Rüzgâr türbinleri modüler olup herhangi bir büyüklükte imal edilebilmekte ve tek olarak yada gruplar halinde kullanılabilir, kullanılmaktadır,
- Rüzgâr türbinlerinin işletmeye alınması, inşaatın başlamasından ticari üretime geçişine kadar üç ay gibi kısa bir sürede gerçekleştirilmektedir [17],
- İki rüzgâr türbini arası, yaklaşık olarak 150-300m. arasında değişebilir ve arazinin kalan yaklaşık %99'luk kısmı tarım, hayvancılık ve diğer amaçlar için kullanılabilir,
- Rüzgâr türbinleri karaya kurulduğu gibi, denizlere de kurulabilmektedir
- Rüzgâr ülkeler için yerli enerji kaynağıdır ve dünya enerji piyasalarından bağımsız olmaya ciddi katkıda bulunabilecek bir enerji türü olması cazip olmasını sağlar [9].

Rüzgâr enerjisi endüstrisinin hızla büyümesi, bu sektöre ilgiyi her geçen gün arttırmakta ve bu da birim maliyetin hızla azalmasına sebep olmaktadır. Bugün doğalgazla rekabet eder duruma gelmesi bunun açık bir göstergesidir.

Rüzgâr enerjisi, üretim maliyeti açısından hidrolik enerjiye karşı dezavantajlı durumda olmasına karşın, kömür ve doğal gaz ile rekabet edebilecek duruma gelmiştir. Bunun yanında, ülkemiz açısından değerlendirecek olursak, doğal gaz bilindiği gibi yurt dışından sağlanmaktadır. Ülkemizin enerji ihtiyacını karşılama konusunda dışa bağımlılık, çeşitli sakıncaları beraberinde getirmektedir. Ayrıca, uzun vadeli düşünüldüğünde, rüzgâr enerjisi alanında yapılacak yatırımlar ve araştırmalar, enerji kaynağı üzerinde bir ömür sınırı olmadığından her zaman için geçerliliklerini koruyacaklardır [18].

Fosil yakıtlı santrallerin anlaşmaları içinde, yakıtı dayalı eskalasyon her zaman vardır. Bu durum rüzgârda bulunmamaktadır ve uzun vadeli fiyatla rekabet

edebilecek düzeydedir. Rüzgâr santralının ekonomik zorluğu, sadece ilk yatırımın yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak, ilk senelerin zorluğu aşıldığında, yakıt maliyetinin olmamasından dolayı, gelecek yıllarda fark kapatılabilecektir [10].

Bu avantajlarının yanısıra, elbette rüzgâr enerjisi teknolojisindeki olumsuzluklar sadece yukarıda bahsedildiği kadar değildir. Bu konuyla ilgili özellikle 4. bölümde ayrıntılı bilgi verilmiştir.

2.6 Rüzgâr Gücünün Dünya'daki Durumu

Yapılan incelemeler ve değerlendirmeler, dünyanın rüzgâr kaynaklarının, çok büyük ve neredeyse tüm ülkelere yayılmış durumda olduğunu doğrulamaktadır. Teknik olarak yararlanılabilecek tüm rüzgâr kaynağının, 53.000 TWs/yıl olduğu tahmin edilmektedir. Bu ise dünyanın 2020 yılında gereksinim duyacağı elektriğin iki katından fazladır. Bu nedenle, elektrik üretimi için rüzgâr gücü kullanımında kaynağın yetersizliğinin kısıtlayıcı bir faktör olması söz konusu değildir.

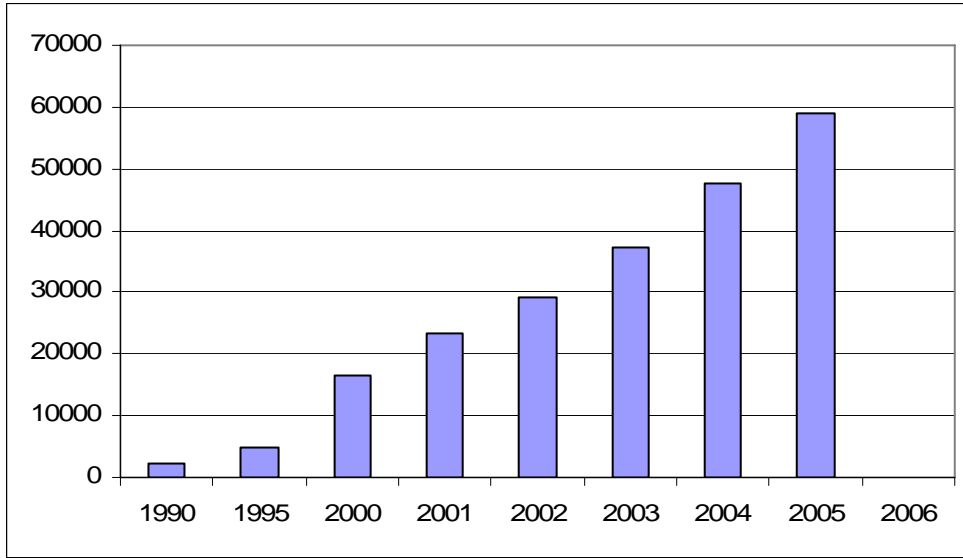
Belirli bir ülke için daha ayrıntılı değerlendirmeler yapıldığı zaman, bu değerlendirmeler, genel bir çalışmadakine göre çok daha yüksek bir potansiyel olduğunu ortaya çıkartma eğilimindedir. Örneğin, Almanya'da Ekonomi Bakanlığı, ülke potansiyelinin, 1993 yılında yapılmış OECD ülkeleri araştırmasındakine göre beş kat fazla olduğunu göstermiştir. Avrupa'da, özellikle yeni açık deniz rüzgâr piyasası hesaba katıldığında, 2020 yılına kadar, elektrik gereksiniminin en az % 20' sini karşılamaya olanak vardır.

Daha öncede bahsettiğimiz gibi, rüzgâr enerjisi endüstrisi elektrik sektöründe en hızlı büyüyen orana sahiptir ki kurulu güç her geçen sene hızlı bir oranda artmaya devam etmektedir [2]. 1990 yılından sonraki değişimleri rakamlarla verirsek; dünyadaki rüzgâr santralleri kurulu gücü 1990 yılında 2160 MW, 1995'te 4843 MW, 2000'de 16.461 MW, 2001'de 23.271 MW, 2002'de 29140 MW, 2003'te 37.220 MW, 2004'te 47.671 ve 2005'te 58.982 MW düzeyine ulaştığı istatistiklerde mevcuttur [11,19]. Yukarıdaki verileri grafik ortamına taşırsak, hemen hemen lineer bir artışın olduğunu görürüz (şekil 2.1).

Şu anda 50'yi aşkın ülke toplam küresel kapasiteye katkıda bulunurken, bu artışla birlikte rüzgâr endüstrisinin istihdam ettiği kişi sayısının yüz bin civarında olduğu hesaplanmaktadır.

Rüzgâr enerjisinin yaygınlaşmasının ardındaki itici güçlerden biride, gittikçe daha fazla oranda, küresel iklim değişikliğiyle mücadeleye yönelik acil gereksinimdir. Rüzgâr gücü, hem ana sera gazı olan karbondioksitin atmosfere salınışını önleyen bir enerji kaynağı sunmakta, hem de fosil yakıt yada nükleer enerjiyle ilişkili diğer kirleticilerin hiçbirini üretmemektedir. 1997 Kyoto Protokolü ile başlayarak, bölgesel ve ulusal düzeyde bir dizi sera gazı azaltma hedefi, yürürlüğe girmiştir. Bunlar ise rüzgâr dahil olmak üzere, yenilenebilir enerjilerin payının artmasına ilişkin hedeflere dönüştürülmüştür.

Kurulu Güç (MW)



Yıl

Şekil 2.1 : Dünya’da rüzgâr santralleri kurulu gücü değişimi

Avrupa’daki ve başka bölgelerdeki ülkeler, bu hedefleri tutturabilmek için, çeşitli piyasa destek mekanizmalarını benimsemişlerdir. Bu mekanizmalar, üretilen birim enerji başına bir prim ödenmesinden, enerji üreticilerinin enerji arzlarının gittikçe artan bir yüzdesini yenilenebilir kaynaklardan elde etmeye zorunlu olmasına dayanan daha karmaşık mekanizmalara uzanmaktadır.

Piyasa büyüdükçe, rüzgâr enerjisinde çarpıcı bir maliyet düşüşü yaşanmaktadır. Üretim maliyeti 15 yılda % 50'ye varan oranlarda azalmıştır. Rüzgâr enerjisiyle elektrik üretimi, en uygun koşullu sahalarda, yeni kömür santralleri ile rekabet edebilmekte, bazı yerlerde ise doğal gazla meydan okuyabilmektedir. Rüzgâr türbinlerinin kapasiteleri de artmıştır. En büyük ticari makineler, bugün 3,6 MW'a ulaşırken, 5 MW'a yakın prototiplerde yapılmaktadır.

Rüzgâr enerjisinin önemli başarı öykülerine, Avrupa'da Almanya, İspanya, Danimarka; Amerika kıtasında Amerika Birleşik Devletleri; gelişmekte olan ülkeler arasında ise Hindistan'da rastlanmaktadır. Ayrıca, Kuzey Avrupa'nın çeşitli bölgelerinde yapılması önerilen binlerce megavatlık rüzgâr çiftlikleriyle, açık denizde de yeni bir sektör yükselişe geçmek üzeredir [2].

2.7 Türkiye'de Rüzgâr Enerjisinden Yararlanma Potansiyeli

Rüzgâr yatırımcıları elektriği havadan yani hareket halindeki havanın kinetik enerjisinden üretmektedir. Rüzgâr enerjisi karşılığında döviz ödenmediği için yerli bir kaynak olarak tanımlanmaktadır. Rüzgâr güç santralleri doğru yere tesis edildiğinde kaynak temini sorununda yaşanmamaktadır. Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli çok yüksektir ve dünyanın en şanslı ülkelerinden biridir. Özellikle Ege kıyılarında rüzgâr potansiyeli çok yüksektir. OECD ve Avrupa ülkeleriyle kıyaslandığında, ülkemiz 83.000 MW teknik rüzgâr potansiyeli ile en elverişli ülke durumundadır. Türkiye'de en az 20.000 MW'lık rüzgâr santrali kurulacak yer potansiyeli bulunmaktadır. Farklı yerlerde olmak üzere, kurulu güçleri toplamda 5.000 MW'a yakın rüzgâr santralleri, altyapı değişikliği gerektirmeden ülkemiz enerji sistemine entegre edilebilecek durumdadır [10].

Türkiye'de şu anda, rüzgâr santrali kurulu gücü yaklaşık 50 MW'tır. Mayıs 2006'da Bandırma'da işletmeye açılan BARES 2 rüzgâr santrali, bunun 30 MW'ını sağlamaktadır. Diğerleri ise, şubat 1998'de Alaçatı-Çeşme'de kurulan 1.5 MW'lık rüzgâr santrali, kasım 1998'de Çeşme'de 7.2 MW'lık ARES rüzgâr santrali, haziran 2000'de Bozcada'da kurulan 10.2 MW'lık BORES rüzgâr santrali ki adanın tüm elektrik ihtiyacını karşılamanın yanında 30 kat fazlasıyla Çanakkale'yi besliyor ve 2003'te İstanbul'da kurulan 1.2 MW'lık Sunjüt santralidir [20].

BARES 2 Türkiye'deki mevcut rüzgâr santrali kurulu gücü 20MW'ı, %150 oranında arttırarak 50MW'a çıkarmıştır. Santralde üretilen yıllık ortalama 120.000.000 kWh elektrik ile 80.000 kişilik bir yerleşim merkezinin elektrik ihtiyacı karşılanabilecektir. Ayrıca bu santralin devreye girmesi ile son günlerin gündem konusu olan küresel ısınmanın temel sebeplerinden CO2 ve sera gazlarından yıllık ortalama 80.000 ton karbon emisyon azalımı sağlanacağı hesaplanmaktadır [21].

Türkiye'de gerçekleştirilen ilk rüzgâr güç santrali yatırımında yollar, trafolar, temeller; ikinci yatırımda ise demir kuleler ülkemizde yaptırılmış ve aynı zamanda ihracat yapan rüzgâr türbin kanatları üretim tesisi kurulmuştur. Sonuçta, rüzgâr türbinlerinin yerli imal edilebilme oranı yüzde 60'a erişmiştir. Kamu iradesinin temiz enerjiye olan güvenini tazeleyip deklare etmesi, Türkiye'de generatör dahil rüzgâr türbinlerinin tümüyle yerli olarak üretilmesini sağlayacaktır.

Rüzgâr enerjisinin maliyetinde en önemli etken yatırımın geri ödenmesi ve kullanılan kredinin faizi olmaktadır.

Yeterince önem verildiği takdirde, Türkiye için rüzgâr enerjisi, yakıtı yerli, talep olursa ekipmanı % 100 yerli olarak üretilebilecek ve büyük bir ihracat potansiyeli olan bir enerji kaynağı haline gelecektir .

Yakıtta yurtdışına bağımlı olmayan, ilk yatırımıyla birlikte tüm maliyeti kesinleşen, bakım onarım maliyetleri ilk yatırımın yüzde 2'sini geçmeyen ve ülkemizin pek çok yerinde bulunan rüzgâr potansiyeli ile doğalgazdan bile daha ucuza elektrik üreten rüzgâr güç santrallerinin ülkemizde yaygın kullanımının planlanması, ulusal çıkarlarımız için teşvik edilmesi ve hatta uygulama programları başlatılarak yerli üretim için altyapı ve araştırma desteği verilmesi gerekmektedir.

Tüm gelişmiş ülkelerde rüzgâr güç santralleri yılda yüzde 30'luk bir artışla kurulurken, birincil enerji kaynaklarını çeşitlendirmenin önemini kavramışlardır. Avrupa Birliği yenilenebilir enerji direktiflerine göre ülkeler, enerjilerinin önemli bir kısmını hidrolik dışındaki yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılamak zorundadır. Türkiye'ye katılım sürecinde Avrupa Birliği tarafından sağlanacak mali destekler, enerji alanında yenilenebilir enerji uygulamalarına önemli bir yer vermektedir [10].

3. RÜZGÂR SANTRALLERİNDE ELEKTRİK SİSTEMLERİ

3.1 Rüzgâr Türbinlerinde Generatörler ve Güç Elektroniği Bileşenleri

Günümüzde rüzgâr türbinlerinde, teknolojideki gelişmeye paralel olarak geliştirilmekte olan generatörler ve güç elektroniği ekipmanları kullanılır. Rüzgâr santrallerinin elektriksel sistemleri hakkında genel bilgi vermek amacıyla bu bölümde, rüzgâr türbinleri tasarımlarında kullanılan generatörlerden, güç elektroniği ekipmanlarından, rüzgâr türbinlerinde koruma ve topraklamadan kısaca aşağıda bahsedilmiştir.

3.1.1 Rüzgâr Türbini Teknolojilerine Genel Bakış

Rüzgâr türbinleri sabit ya da değişken hızlarda çalışabilirler. Bu nedenle çalışma hızları açısından rüzgâr türbinleri sınıflandırılabilirler.

3.1.1.1 Sabit Hızlı Rüzgâr Türbinleri

Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde karakteristik olarak asenkron generatörü (sincap kafesli veya bilezikli) bulunmaktadır. Bu asenkron generatörü direkt olarak elektrik şebekesine bağlı olup, reaktif güç tüketimini azaltmak için yol vericiler ve kondansatör grupları içerir. Sabit hızlı rüzgâr türbinleri tek bir rüzgâr hızında azami verimlilikte çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Güç üretimini artırabilmek için bazı sabit hızlı generatörlerde iki set sargı bulunur. Bunlardan biri düşük rüzgâr hızında (tipik olarak 8 kutuplu), diğeri ise orta ve yüksek rüzgâr hızlarında (tipik olarak 4-6 kutuplu) kullanılır.

Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin avantajı basit, sağlam, güvenilir ve kendini ispatlamış olmasıdır. Ayrıca elektrik aksamaları ucuzdur. Dezavantajları ise kontrol edilemeyen reaktif güç tüketimi, mekanik baskı ve sınırlı güç kalitesi kontrolüdür. Sabit hızda çalışma şeklinden dolayı rüzgâr hızındaki değişimler, sisteme mekanik dönme momentinde oynamalar ve dolayısıyla elektrik şebekesinde iniş çıkışlar olarak

yansır. Zayıf elektrik şebekelerinde bu iniş çıkışlar gerilimde büyük oynamalara ve dolayısıyla bu durum elektrik hatlarında önemli kayıplara sebep olur [22].

3.1.1.2 Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri

Değişken hızlı rüzgâr türbinleri geniş bir rüzgâr hız aralığında azami aerodinamik verimliliğe ulaşacak şekilde tasarlanmıştır. Bu türbinlerin değişken hızlarda çalışması sayesinde, devamlı olarak değişen rüzgâr hızına (hızın artması veya azalması durumları) göre pervane hızı ayarlanabilmektedir. Sabit hız sisteminin aksine, değişken hızlı türbinler, generatör dönme momentini, değişen rüzgâr hızına göre değişen generatör hızı sayesinde oldukça sabit tutar.

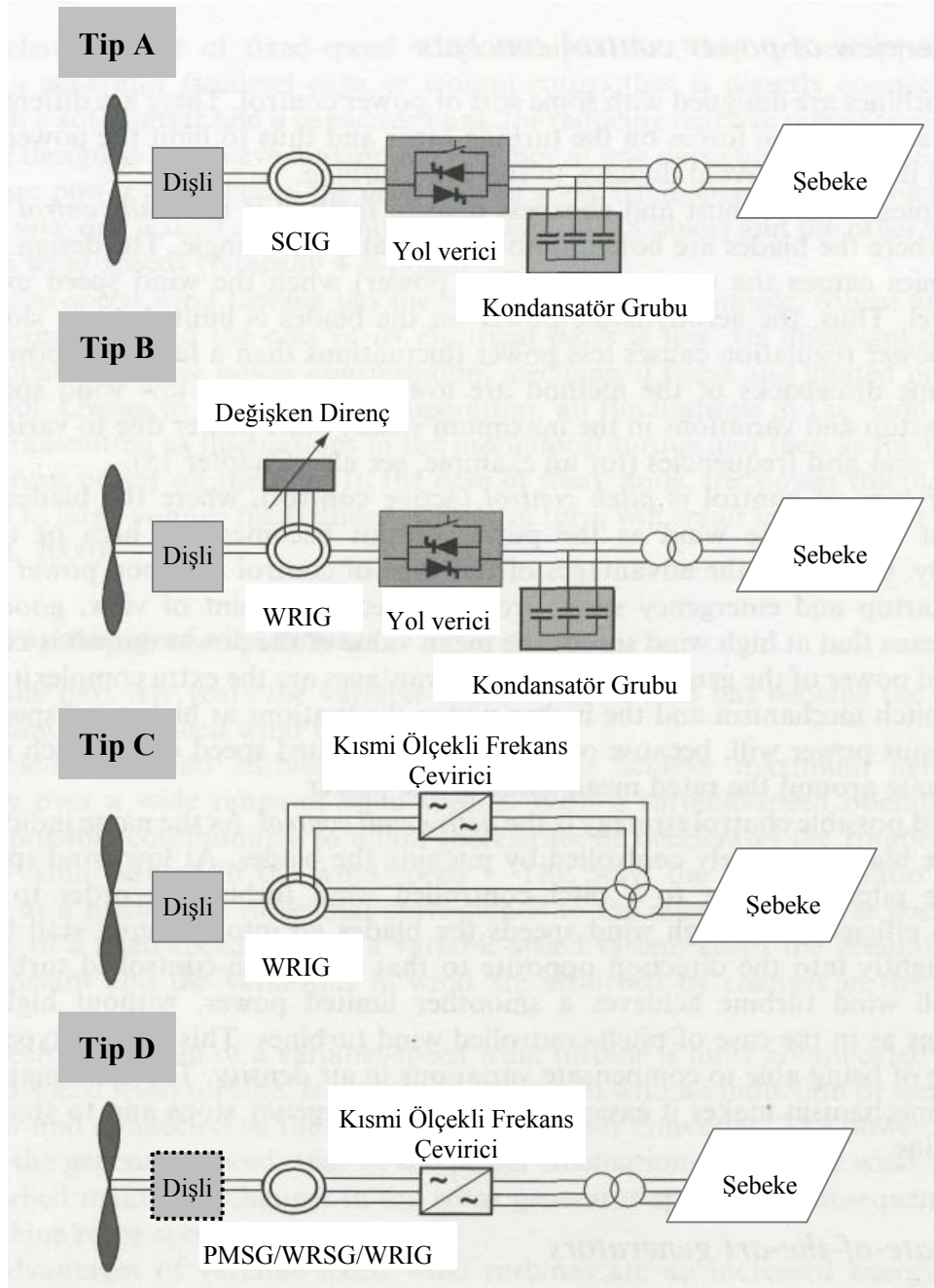
Sabit hızlı sisteme kıyasla değişken hızlı sistemin elektrik aksamaları daha karmaşıktır. Bu sistem genelde asenkron veya senkron generatör içerir ve şebekeye bir güç çeviricisiyle bağlanır. Güç çeviricisi generatör hızını kontrol eder. Diğer bir deyişle, güçteki iniş çıkışlara sebep olan rüzgâr hızındaki değişiklikler, generatör motoru hızındaki değişmelerle absorbe edilir ve sonuçta rüzgâr türbini pervane hızı da buna göre değişmiş olur.

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin avantajları; daha az enerji kaybı, gelişmiş güç kalitesi ve rüzgâr türbini üzerinde daha az mekanik baskı olarak sıralanabilir. Bu sistemin dezavantajları ise; güç elektroniği aksamlarındaki arızalar, daha fazla parça gerektirmesi ve güç elektroniği aksamlarından dolayı donanımların pahalı olmasıdır.

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin kullanımı sayesinde, generatör türleri ve generatör türüyle birleştirilebilecek güç çeviricileri için seçim alternatifleri artırılmış olur. Son birkaç yılda tesis edilen rüzgâr türbinlerinde çoğunlukla değişken hızlı rüzgâr türbinleri tercih edilmektedir [22].

3.1.2 Rüzgâr Türbini Teknolojisinde Kullanılan Generatörler

Aşağıda, en çok kullanılan rüzgâr türbini konfigürasyonları, hız kontrol kabiliyetleri ve kullandıkları güç kontrol tiplerine göre sınıflandırılmıştır. Hız kontrolü kriterine göre, şekil 3.1'de gösterildiği gibi dört temel rüzgâr türbini tipi vardır.



Şekil 3.1 : Tipik rüzgâr türbini konfigürasyonları.

SCIG; Sincap Kafesli Asenkron Generatör, WRIG; Bilezikli Asenkron Generatör, PMSG; Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör ve WRSG; Bilezikli Senkron Generatördür. Tip D’de kesik çizgilerle gösterilen dişli kutusu kullanılabilir yada kullanılmayabilir.

3.1.2.1 Tip A: Sabit Hız

Bu konfigürasyon, transformatör aracılığıyla şebekeye bağlanmış Sincap Kafesli Asenkron Generatörlü (SCIG) bir sabit hızlı rüzgâr türbinini belirtmektedir. SCIG, şebekeden her zaman reaktif güç aldığından, bu konfigürasyonda reaktif güç kompanzasyonu için, kondansatörler kullanılır. Bir yol verici yardımıyla daha düzgün bir şebeke bağlantısı sağlanabilir.

Sabit hızlı rüzgâr türbinindeki güç kontrol prensibinden bağımsız olarak, rüzgâr dalgalanmaları önce mekanik dalgalanmalara, sonrada elektrik gücü dalgalanmalarına dönüştürülür. Zayıf bir şebeke durumunda ise bağlantı noktasında gerilim dalgalanmalarına neden olabilirler. Bu gerilim dalgalanmalarından dolayı da sabit hızlı rüzgâr türbini (kondansatörler yoksa) şebekeden değişen oranlarda reaktif güç çeker. Bu gerilim dalgalanmalarını ve hat kayıplarını arttırabilir. Bu yüzden, bu sistemin en büyük dezavantajları hız kontrolünü desteklememesi, kuvvetli bir şebeke gerektirmesi ve mekanik yapısının yüksek mekanik baskıları kaldırmak durumunda olmasıdır.

3.1.2.2 Tip B: Sınırlı Değişken Hız

OptiSlip olarak bilinen konfigürasyon, değişken generatör rotor dirençli, sınırlı değişken hızlı rüzgâr türbinine karşılık gelmektedir. Generatör, şebekeye doğrudan bağlıdır. Reaktif güç kompanzasyonu kondansatör grupları ile sağlanmaktadır. Bir yol verici yardımıyla daha düzgün bir şebeke bağlantısı sağlanabilir. İlaveten değişken bir rotor direncine sahip olması bu konseptin önemli ve kendine has özelliğidir. Bu direnç de rotor milindeki çevirici tarafından manipüle edilir. Dolayısıyla toplam rotor direnci kontrol edilebilmektedir. Rotor direnci değiştirilebildiği için kayma da kontrol altında olacaktır. Bu yolla sistemde güç çıkışı da kontrol edilir. Dinamik hız kontrolünün aralığı, değişken rotor direncinin büyüklüğüne bağlıdır. Tipik olarak hız aralığı senkron hızın %0-10 üzerindedir [22].

3.1.2.3 Tip C: Kısmi Ölçekli Frekans Çeviricili Değişken Hız

Çift beslemeli asenkron generatörü (DFIG) konsepti olarak bilinen bu konfigürasyon, bilezikli asenkron generatörü (WRIG) ve rotor devresinde kısmi ölçekli frekans çeviricili (nominal generatör gücünün yaklaşık %30'una ayarlanmış) sınırlı değişken

hızlı rüzgâr türbinine karşılık gelmektedir. Kısmi ölçekli frekans çevirici, reaktif güç kompanzasyonu ve daha düzgün bir şebeke bağlantısı sağlar. Frekans çeviricinin büyüklüğüne bağlı olarak Tip B'ye oranla daha geniş bir dinamik hız kontrol aralığına sahiptir. Tipik olarak, hız menzili -%40'tan +%30'a kadar senkron hızları kapsar. Daha küçük olan frekans çevirici, bu konsepti ekonomik olarak daha çekici yapmaktadır. En büyük dezavantajları kayar halka kullanımı ve şebeke hatalarındaki korunmadır [22].

3.1.2.4 Tip D: Tam Ölçekli Frekans Çeviricili Değişken Hız

Bu tip, generatörü şebekeye tam ölçekli frekans çevirici aracılığıyla bağlı tam değişken hızlı rüzgâr türbinine karşılık gelmektedir. Reaktif güç kompanzasyonunu ve düzgün şebeke bağlantısını frekans çevirici sağlamaktadır. Generatör elektriksel olarak, bilezikli senkron generatörü ya da bilezikli asenkron generatörü veya sürekli bir mıknatısla (sürekli mıknatıslı senkron generatör) uyarılabilir.

Bazı tam değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin dişli kutusu yoktur. Bu durumda, doğrudan çalıştırılan, geniş çaplı, çok kutuplu bir generatör kullanılır [22].

3.1.3 Generatör Sistemleri

Temelde bir rüzgâr türbini, üç fazlı generatörlerin herhangi bir tipiyle çalışabilir. Bugün, generatörler değişken frekanslı alternatif akım da verseler, doğru akım da verseler, çevirici kullanımıyla şebeke uyumlu elektrik akımı ihtiyacı karşılanabilir. Rüzgâr türbinlerinde şu türler kullanılabilir:

1-Asenkron generatör:

- a) Sincap kafesli asenkron generatörü (SCIG)
- b) Bilezikli asenkron generatörü (WRIG)
 - OptiSlip asenkron generatörü (OSIG)
 - Çift beslemeli asenkron generatörü (DFIG)

2-Senkron generatör:

- a) Bilezikli senkron generatörü (WRSG)
- b) Sürekli mıknatıslı senkron generatörü (PMSG)

Aşağıda bu tip generatörlerin temel özellikleri incelenmiştir [22].

3.1.3.1 Asenkron Generatör

Rüzgâr türbinlerinde en yaygın kullanılan generatör, asenkron generatördür. Birkaç avantaja sahiptirler. Bunlar; sağlamlık, mekanik basitlik ve seri halde üretildiği için düşük fiyattır. Başlıca dezavantajı ise; statorun reaktif mıknatıslanma akımına ihtiyaç duymasındır. Asenkron generatör sürekli mıknatıslar içermez ve ayrıca uyarılmaz. Bu nedenle, uyarma akımını başka bir kaynaktan almalıdır ve reaktif güç tüketir. Reaktif güç, bir elektrik şebekesinden veya bir güç elektroniği sisteminden sağlanır. Generatörde manyetik alan sadece elektrik şebekesine bağlandığında oluşur.

AC uyarması sırasında yaratılan manyetik alan, akımın frekansı ve sargıdaki kutup sayısı tarafından belirlenen bir hızda senkron olarak döner. Böylece, eğer rotor hızı senkron hızı aşan bir hızda dönerse, rotor ve dönen stator arasında, bağıl hareket (kayma) vasıtası ile bir elektrik alanı indüklenir ve bu rotor sargılarında bir akıma sebep olur. Stator alanı ile rotor manyetik alanının etkileşimi, rotorun üstüne dönme momenti uygular.

Bir asenkron generatörün rotoru, sincap kafesli rotor (kısa devre rotor) veya bilezikli olarak dizayn edilebilir [22].

3.1.3.1.1 Sincap Kafesli Asenkron Genaratörü

Son zamanlara kadar, sincap kafesli asenkron generatörü (SCIG), mekanik basitliği, yüksek verimi ve az bakım gerektirmesi nedeniyle en yaygın seçim olmuştur.

Şekil 3.1’de gösterildiği gibi, Tip A için, SCIG, direkt olarak şebekeyle kuplajlıdır. SCIG’nin hızı, rüzgârın hızı değiştiğinde generatör kaymasından dolayı çok az yüzdelerde değişir. Bu yüzden bu tür generatörler sabit hızlı türbinlerde kullanılır (Tip A). Bir SCIG üzerindeki rüzgâr türbinleri reaktif güç harcadıkları için, tipik olarak yol verici mekanizması ve reaktif güç kompanzasyonu sistemiyle kurulurlar. SCIG’ler aşırı dönme momenti hızı karakteristiğine sahiptir ve bu yüzden rüzgâr gücündeki dalgalanmalar şebekeye direkt olarak iletilir. Bu geçişler rüzgâr türbininin şebeke bağlantısında özellikle önemlidir. Çünkü içeriye akan akım nominal akımın 7-8 katı büyüklüğündedir. Zayıf bir şebekede yüksek hızda içeriye akan akım, ciddi gerilim sorununa yol açabilir. Bu yüzden, içeriye akan akımın kesilmesi için, SCIG’nin şebekeye bağlanması, derece derece yapılmalıdır.

Kuvvetli bir AC şebekesine direk bağlantı ve normal bir çalışma sırasında, SCIG çok sağlam ve kararlıdır. Kayma, artan yüke göre artar ve değişir. Stator sargısına şebekeden sağlanan manyetik akımdan dolayı, tam yük güç faktörü, bağıl olarak düşüktür. Çok düşük güç faktörü, generatöre paralel bağlı kondansatörler yardımıyla kompanze edilir.

SCIG'ler de aktif güç, reaktif güç, terminal gerilimi ve rotor hızı arasında benzersiz bir ilişki vardır. Bunun anlamı yüksek hızlı rüzgârlarda rüzgâr türbini, ancak generatör daha fazla reaktif güç çektiğinde daha fazla aktif güç üretir. SCIG için, tüketilen reaktif güç miktarı kontrol edilemez, çünkü rüzgâr şartlarına göre değişir. Reaktif gücü destekleyecek elektrik bileşenleri olmadıkça, generatör için gerekli güç şebekeden elde edilir. Şebekeden alınan reaktif güç, bazı durumlarda ilave hat kayıplarına sebep olarak şebekeyi kararsız yapabilir. Kondansatör gurupları veya modern güç elektroniği çeviricileri reaktif güç tüketimini azaltabilir. Bu noktada başlıca dezavantaj, anahtarlama geçici rejimlerin oluşmasıdır.

Bir hata durumunda, reaktif güç kompanzasyonu olmayan SCIG, şebekede gerilim kararsızlığı oluşturur. Rüzgâr türbin rotoru hızlanabilir ve kayma artar. Örneğin, bir hata meydana geldiğinde, elektrik ve mekanik dönme momenti arasında dengesizlik oluşması gibi. Böylece, hata düzeltildiğinde, SCIG'ler şebekeden daha büyük miktarlarda reaktif güç çekerek gerilimin daha fazla düşmesine neden olurlar. SCIG'ler sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde (Tip A) ve tam değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde (Tip D) kullanılabilir [22].

3.1.3.1.2 Bilezikli Asenkron Generatörü

Bilezikli asenkron generatörü (WRIG) kullanıldığında, rotorun elektriksel karakteristikleri dışarıdan kontrol edilebilir. Sargılı rotorun sargıları, dışarıdan kayar bilezikler ve fırçalarla veya güç elektroniği düzeneği ile bağlanır. Güç elektroniği düzeneği kullanılarak, güç rotor devresine aktarılabilir veya etki edebilir ve generatör, rotor ya da stator devresiyle mıknatıslanabilir. Böylece rotor devresinde harcanan enerjiyi geri kazanmak ve statorun çıkışına vermek mümkün olur. WRIG'in dezavantajı, SCIG'den daha pahalı ve daha az sağlam olmasıdır.

Rüzgâr türbini endüstrisinin en yaygın kullandığı WRIG konfigürasyonları;

- OptiSlip Asenkron Generatörü (OSIG), Tip B’de kullanılır.
- Çift Beslemeli Asenkron Generatörü (DFIG), Tip C’de kullanılır.

OptiSlip Asenkron Generatörü:

Optislip asenkron generatörü, çok güçlü rüzgâr esnasında, rüzgâr türbinindeki yükü azaltmak için üretildi. OptiSlip özelliği generatörün dar aralıkta değişken kaymaya sahip olmasına ve optimum kaymayı seçmesine, güç çıkışında ve sürücü dönme momentinde daha küçük dalgalanmalara müsaade eder.

OSIG’ler çeşitli rotor dirençlerinin, rotor sargılarına dışarıdan bağlanmasıyla oluşan WRIG’lerdir (şekil 3.1). Rotor shaftının üzerine monte edilmiş bir çeviricinin yardımıyla, toplam rotor direncinin modifiye edilmesiyle generatörün kayması değiştirilir. Çevirici optik olarak kontrol edilir, yani kayar bilezikler gerekli değildir. Generatörün statoru şebekeye direkt bağlıdır.

Bu generatör konseptinin avantajları; basit devre topolojisi, kayar bilezikler gerektirmemesi ve SCIG ile karşılaştırıldığında daha iyi çalışma hızı aralığıdır. İlave olarak söylenebilecek, bu konseptin, mekanik yüklerin ve kuvvetli rüzgârın sebep olduğu güç dalgalanmalarını azaltabilmesidir. Bununla birlikte, yinede reaktif güç kompanzasyon sistemine ihtiyaç vardır. Değişken rotor direncine bağlı olarak, hız aralığının % 0-10 ile sınırlandırılmış olması, aktif ve reaktif güç kontrolünün zayıf şekilde sağlanması dezavantajlarıdır.

Çift Beslemeli Asenkron Generatörü :

Çift beslemeli asenkron generatör (DFIG) konsepti, büyüyen pazarla birlikte çekici bir seçenektir. DFIG, stator sargıları sabit frekanslı üç fazlı şebekeye direkt olarak bağlanmış WRIG’den oluşur ve rotor sargıları çift yönlü arka arkaya bağlı bir IGBT gerilim kaynağı çeviricisine monte edilmiştir.

Çift yönlü besleme terimi, statordaki gerilimin şebekeden uygulanması ve güç çeviricisi tarafından indüklenen rotordaki gerilimden dolayı kullanılmaktadır. Bu sistem, geniş fakat sınırlı bir aralıkta, değişken hızda çalışmaya izin verir. Çevirici, mekanik ve elektriksel frekans arasındaki farkı, değişken frekanslı rotor akımı ile kompanze eder. Böylece, hem normal çalışmada, hem de hata durumunda, generatörün davranışı, güç kontrolörü ve çevirici tarafından denetlenir.

Güç çeviricisi, iki çeviriciden oluşur. Bunlar birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilen, rotor yanı çevirici ve şebeke yanı çeviricidir. Asıl amaç, şebeke yanı çeviricisi DC-link gerilimini kontrol ederken ve bir güç faktöründe (reaktif güç sıfır iken) bir çevirici çalışması sağlarken, rotor yanı çeviricisinin, rotor akım bileşenlerinin kontrolü yardımıyla, aktif ve reaktif gücü kontrol etmesidir.

Sürücünün çalışma koşuluna bağlı olarak, güç rotora içten veya dıştan verilir ve senkronun üzerinde, çevirici aracılığıyla rotordan şebekeye akar, oysa senkronun altında ters yönde akmaktadır. Her iki durumda da, yani senkron altında ve senkron üstünde, stator şebekeye enerji verir.

DFIG'nin bazı avantajları vardır. Reaktif gücü kontrol etme ve rotor uyarma akımını bağımsız şekilde kontrol ederek aktif ve reaktif güç kontrolünü ayırma kabiliyetine sahiptir. DFIG'nin güç şebekesinden mıknatıslanmasına gerek yoktur, çünkü, rotor devresinden de güç alabilir. Ayrıca şebeke tarafındaki çevirici yardımıyla, statora iletilebilecek reaktif güç üretebilmektedir. Ancak, şebeke tarafındaki çevirici, bir güç faktöründe çalışmaktadır ve türbinle şebeke arasındaki reaktif güç değişiminde etkin değildir. Zayıf bir şebeke durumunda gerilim dalgalanabilir, böyle hallerde, gerilim kontrolü amacıyla, DFIG'den, şebekeye reaktif güç üretmesi ya da şebekeden reaktif güç çekmesi istenebilir.

Çeviricinin büyüklüğü, toplam generatör gücüyle alakalı değildir, fakat seçilmiş hız aralığı ile alakalıdır. Bu yüzden çeviricinin masrafı, senkron hız çevresindeki hız aralığı arttıkça artmaktadır. Çift beslemeli asenkron generatörünün bir dezavantajı kaçınılmaz kayar bilezik ihtiyacıdır [22].

3.1.3.2 Senkron Generatör

Senkron generatör, aynı büyüklükte bir asenkron generatöründen çok daha pahalı ve mekanik olarak da daha karmaşıktır. Ancak, asenkron generatörü ile kıyaslandığında açık bir avantajı vardır ki, reaktif mıknatıslama akımına ihtiyaç duymazlar.

Senkron generatördeki manyetik alan, sürekli mıknatıslar ya da konvansiyonel alan sargıları kullanılarak oluşturulabilir. Eğer senkron generatörün yeterli sayıda kutbu varsa (çok kutuplu bir WRSG ya da çok kutuplu bir PMSG), direkt sürümlü uygulamalar için, herhangi bir dişli kutusuna ihtiyaç duymadan kullanılabilir.

Senkron generatörler, en çok tam güç kontrolüne uygundur ve şebekeye de bir güç elektroniği çeviricisiyle bağlıdır.

Çeviricinin iki temel amacı vardır;

- Çok kuvvetli bir rüzgâr enerjisinin sebep olduğu güç dalgalanmalarına karşı koymak ve şebeke tarafından gelen geçici olaylar için, bir enerji tamponu görevi görmek
- Mıknatıslanmayı kontrol etmek ve şebeke frekansıyla senkron kalarak, problemlerin önüne geçmek.

Böyle bir generatör kullanımı, rüzgâr türbinlerinin değişken bir hızda çalışmasına olanak verir.

Rüzgâr türbini endüstrisinde iki klasik senkron generatör tipi sık kullanılmıştır:

- 1- Bilezikli senkron generatör (WRSG)
- 2- Sürekli mıknatıslı senkron generatör (PMSG) [22].

3.1.3.2.1 Bilezikli Senkron Generatörü

Bilezikli senkron generatörü (WRSG), elektrik güç endüstrisinde çok kullanılır. Hem sürekli durum performansı, hem de hatalı durum performansı açısından, yıllar içinde birçok araştırma raporlarında iyi yorumlar almıştır.

WRSG'nin stator sargıları, doğrudan şebekeye bağlıdır ve böylece dönüş hızı kesinlikle şebeke frekansına bağlıdır. Rotor sargısı, kayar bilezikler ve fırçalar kullanılarak, doğru akımla ya da döner doğrultuculu bir fırçasız uyarma ile uyarılır. Asenkron generatörünün aksine, senkron generatörlerde fazladan reaktif güç kompanzasyon sistemine ihtiyaç yoktur. İçinden doğru akım geçen rotor sargısı, uyarma alanı oluşturur ve senkron hızda dönmeye başlar. Senkron generatörün hızı, döner alanın frekansıyla ve rotorun kutup çiftleri sayısı ile belirlenir.

Dişli kutusuna ihtiyaç duymama avantajına sahiptir. Ama dişlisiz böyle bir tasarıma ödenecek bedel, büyük ve ağır bir generatör ile, sistemin tüm gücünü idare etmek zorunda olan tam ölçekli güç çeviricisidir [22].

3.1.3.2.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörü

Birçok araştırma, kendinden uyarmalı olması, yüksek güç faktöründe ve yüksek verimde çalışabilmeye olanak vermesinden dolayı, rüzgâr türbinlerinde sürekli mıknatıslı senkron generatör (PMSG) kullanımını tavsiye etmiştir.

Sürekli mıknatıslı (PM) makinede, verim asenkron makinesinden yüksektir. Çünkü, uyarma, herhangi bir enerji kaynağı kullanmadan sağlanır. Ancak, sürekli mıknatısların yapımında kullanılan malzemeler pahalıdır ve üretim sırasında zorluk çıkarırlar. Buna ilave olarak, PM uyarma kullanımı, üretimin frekansını ve gerilimini, iletimin frekansı ve gerilimine ayarlamak için tam ölçekli bir güç çeviricisi gerektirir. Bu da ilave bir masraftır. Bununla birlikte, faydasıda, sürekli koşullara uyacak şekilde, herhangi bir hızda güç üretebilmesidir. PMSG'nin statoru sargılıdır ve rotorunda sürekli mıknatıslı kutup sistemi vardır ve kutupları çıkıntılı yada silindirik olabilir. Çıkıntılı kutuplar, düşük hızlı makinelerde daha yaygın kullanılmaktadır ve bir rüzgâr türbini uygulaması için en kullanışlı versiyon olabilir. Tipik düşük hızlı senkron makineler, çıkıntılı kutuplu ve çok kutuplu tiplerdir.

PMSG'nin senkron niteliği, çalıştırma sırasında, senkronizasyon ve gerilim regülasyonu sırasında problemlere sebep olabilir. Kolayca sabit bir gerilim sağlamaz. Bir dış kısa devre durumunda ve rüzgâr hızının düzensiz olması durumunda, senkron çalışma performans oldukça etkilenir. PMSG'lerin bir başka dezavantajıda, manyetik malzemelerin sıcaklığa karşı hassas olmalarıdır. Örneğin; bir hata anında ortaya çıkabilecek yüksek sıcaklıklarda, mıknatıs manyetik özelliğini yitirebilir. Bu yüzden, PMSG'nin sıcaklığı daima kontrol edilmeli ve bir soğutma sistemi gereklidir [22].

3.1.4 Rüzgâr Santrallerinde Kullanılan Güç Elektronik Bileşenleri

Güç elektroniği hızla gelişen bir teknolojidir. Bileşenleri, yüksek oranlı akımları ve gerilimleri kontrol edebilirler. Böylece, güç kayıpları azalmakta ve cihazlar daha güvenilir hale gelmektedir. Cihazlar, büyük ölçekli güç amplifikasyonu ile çok kolay kontrol edilir. Güç elektroniği sistemlerinin fiyat/güç oranı hala düşmektedir ve rüzgâr türbinlerinin performansını artırma konusunda, güç çeviricileri gittikçe daha çekici hale gelmeye başlamışlardır. Bu bölümde, avantaj ve dezavantajlarıyla, rüzgâr türbinlerinde kullanılan güç elektroniği bileşenlerinden kısaca bahsedilmiştir [22].

3.1.4.1 Yol Vericiler

Yol vericiler, sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin şebekeye bağlanması sırasında kullanılan basit ve ucuz elektriksel bileşenlerdir (Şekil 3.1’de Tip A, Tip B). Yol vericinin fonksiyonu, yığılma akımını düşürerek şebeke üzerinde oluşacak problemleri azaltmaktır. Yol verici olmadan, yığılma akımı nominal akımın 7-8 katına kadar çıkabilir ve bu durum şebekede büyük gerilim sıkıntılarına sebep olabilir.

Yol vericide, komütasyon aracı olarak, her fazda iki tristör bulunmaktadır. Her faz için antiparalel bağlanırlar. Şebeke periyodu boyunca, generatörün şebekeye düzgün bağlanması, tristörlerin ateşleme açısının (α) belirlenmesiyle olur. Ateşleme açısıyla, yol vericinin ortaya çıkan amplifikasyonu arasındaki ilişki lineer değildir ve ilaveten, bağlanan elemanın güç faktörünün bir fonksiyonudur. Yığılma akımından sonra, tristörler, tüm sistemin kaybını azaltmak için by-pass edilir [22].

3.1.4.2 Kondansatör Gurupları

Kondansatör gurupları, sabit hızlı veya limitli değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılır (Şekil 3.1’de Tip A, Tip B). Asenkron generatörüne reaktif güç sağlayan bir elektriksel bileşendir. Böylece, generatörün şebekeden çektiği reaktif güç minimize edilir.

Rüzgâr türbinlerinin generatörleri, belirli sayıda kondansatörün sürekli bağlandığı ve ayrıldığı yerde, tam yüklü dinamik kompanzasyona sahip olabilirler. Bu, daha önceden belirlenmiş bir zaman periyodu içinde, generatörün ihtiyaç duyduğu reaktif gücün ortalama miktarına bağlıdır.

Kondansatör guruplarının yeri, genellikle kulenin dibi ya da rüzgâr türbini kabinidir. Kondansatör gurupları, aşırı yüklenme ve şebekedeki aşırı gerilimlerden dolayı zarar görebilirler. Bundan dolayı da sistemin bakım masrafları artabilir [22].

3.1.4.3 Doğrultucu ve Eviriciler

Geleneksel bir frekans çevirici, ayarlanabilir hız sürücüsü ismini de alabilir ve doğrultucu, kondansatör ve eviriciden oluşur.

Bir doğrultucunun görevi, alternatif akımı doğru akıma dönüştürmektir. Kondansatör, enerji depolayıcı görevini yerine getirirken, evirici, kontrol edilebilir frekans ve gerilimle doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için kullanılır.

Diyotlar sadece doğrultma modunda kullanılabilirken, elektronik anahtarlar hem doğrultma hem de evirme modunda kullanılabilir.

Basitliğinden, düşük fiyatından ve kayıp azlığından dolayı en yaygın doğrultucu çözümü, diyot doğrultucusudur. Doğası gereği lineer değildir ve bu nedenle harmonik akımlar üretir. Bir başka dezavantajı da, sadece tek yönlü bir güç akışına izin vermesidir ve generatör gerilimini ya da akımını kontrol edemez. Bundan dolayı, sadece gerilimi kontrol edebilen bir generatörle ve akımı kontrol edebilen bir eviriciyle (örneğin; IGBT, yani, yalıtılmış kapılı iki kutuplu transistörler) birlikte kullanılabilir.

Tristör bazlı (şebeke komütasyonlu) evirici çözümü, ucuz bir eviricidir. Bunun yanında kayıpları azdır ve adından da anlaşılacağı gibi, eviricinin çalışabilmesi için şebekeye bağlanması gerekmektedir. Ancak, maalesef reaktif güç harcamakta ve büyük harmonikler üretmektedirler. Güç kalitesi açısından artan ihtiyaç, tristör eviricilerini, GTO (kapıdan tıkanabilen tristör) ve IGBT'ler gibi kendinden komütasyonlu eviricilerden daha az ilgi çeker hale getirmiştir. Bir GTO eviricinin avantajı, IGBT'den daha fazla güçle başa çıkabilmesidir, ama bu özellik, IGBT'lerin hızlı gelişiminden dolayı gelecekte önemini yitirecektir.

Evirici, generatör ve doğrultucudan hemen hemen bağımsız seçilebilirken, generatör ve doğrultucu bir kombinasyon olarak seçilmek zorundadır. Bir diod doğrultucu veya tristör doğrultucu sadece senkron bir generatörle birlikte kullanılabilir. Çünkü, reaktif bir mıknatıslanma akımına ihtiyacı yoktur. Buna karşılık, GTO ve IGBT doğrultucuların, değişken hızlı asenkron generatörleriyle kullanılmaları gerekir, çünkü, reaktif gücü kontrol edebilirler. Ancak, IGBT'ler çok çekici bir seçim olsa da yüksek fiyat ve büyük kayıp dezavantajları vardır. Örneğin; diod doğrultuculu senkron generatörün toplam fiyatı, ona denk IGBT eviricili ya da doğrultuculu bir asenkron generatöründen çok daha düşüktür [22].

3.1.4.4 Frekans Çeviriciler

Son yıllarda, değişik çevirici topolojilerinin rüzgâr türbinlerinde kullanılması incelenmiştir. Bir frekans çeviricisine, bir evirici ve bir doğrultucunun bağlanması farklı yöntemleri vardır. Bunlar; arka arkaya çeviriciler, çok düzeyli çeviriciler, tandem çeviriciler, matris çeviriciler ve rezonant çeviricilerdir

Bugün rüzgâr türbinlerinde en çok kullanılan üç fazlı frekans çevirici arka arkaya bağlı frekans çeviricidir. İki konvansiyonel darbe genişlik modülasyonlu (PWM) gerilim kaynaklı çeviricilerden oluşan çift yönlü bir güç çeviricidir [22].

3.2 Rüzgâr Türbinlerinde Koruma

Yüksek gerilim güç sistemlerinin her bölümü, anormal durumları saptayan rölelerle ve arızalı devreleri izole ederek açan devre kesiciler tarafından korunur. Daha düşük gerilimli bazı devreler sigortalar tarafından korunur, ancak, bunlar daha ucuz olmasına rağmen, rölelerin ve devre kesicilerin sağladığı oranda emniyet sağlayamazlar.

Bir dağıtım şebekesinde, korunma sisteminin amacı temel olarak, devrelerde izolasyon hatalarından dolayı oluşan aşırı akımları saptamaktır. İzolasyon hatalarına, havanın delinmesi veya katı maddeden yapılmış izolasyonun delinmesi örnek verilebilir ki, fazlar arası veya fazlarla toprak arasında aşırı akımlar geçmesine sebep olurlar. Bu durumlarda meydana gelen tehlikeleri sınırlamak için, aşırı akımların en fazla bir saniye sürmesine izin verilir.

Bu tehlikeler;

-Yüksek akımların toprak empedansına akışından dolayı, aşırı gerilimlerin sebep olduğu hayati tehlike,

-Yüksek akımların elektromanyetik etkilerinin ve zarar verecek derecede ısınmanın tesise (santrale) zarar verme riski,

-Güç sisteminin kararlılığının riske sokulması olarak sıralanabilir.

Rüzgâr türbinleri ve rüzgâr santrallerinin elektriksel koruma prensipleri, diğer elektrik santrallerine uygulanan korunma prensipleri ile aynıdır, ancak, iki büyük fark vardır.

Birincisi; rüzgâr santralleri genellikle güç sisteminin çevresine kurulduğundan, izolasyon hatalarından oluşan hata akımları oldukça küçüktür. Bu özellik tehlikeyi azalttığından dolayı, her ne kadar arzu edilen bir durum olsa da, düşük kaçak akımların hızlı ve güvenilir şekilde saptanmasında ciddi zorluklar çıkarırlar. Özellikle, yüksek gerilim kesicilerinin bazı tasarımları, doğru çalışabilmeleri için, ark içindeki enerjiye bağımlıdır. Bu yüzden ark enerjisi düşükse, küçük hata akımları kesilmeyebilir.

İkincisi; sabit hızlı rüzgâr türbinleri asenkron makineleri kullanırlar ve değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin şebekeye bağlanması gerilim kaynaklı çeviricilerle yapılmaktadır. Ne asenkron generatörler, ne de gerilim kaynaklı çeviriciler, hata akımları için güvenilir kaynaklar değildirler. Bu yüzden, rüzgâr türbini generatörlerinden beslenen anormal durumları ortaya çıkarmak için, gerilim veya frekans algılamalı rölelere ihtiyaç vardır.

Rüzgâr santralının korunması, şebekeye geri besleme yapabilecek makine sürücülerıyla donatılmış büyük endüstriyel yüklerin (tesislerin) korunmasına benzer çok özelliklere sahiptir.

Dağıtım şebekesi, güvenilir bir hata akımı sağlayarak izolasyon hatalarının saptanmasını sağlamakla beraber, dönen makinelerden oluşan hata akımının katkı olasılığı, göz ardı edilmemelidir. Buna ilaveten, rüzgâr santralının güç sisteminden ayrıldığı zamanlarda, rüzgâr santralinde, normalden daha uzun bir süre için, anormal frekans veya gerilim üretilmesi tehlikesi de vardır [23].

3.3 Rüzgâr Türbinlerinde Topraklama Sistemleri

Bütün elektrik santrallerinde, aşağıdaki sebeplerden dolayı topraklama yapılması gerekmektedir. Bunlar;

-Çalışanların ve çevredeki hayvanların elektriğe çarpılma tehlikesinin en aza indirgenmesi,

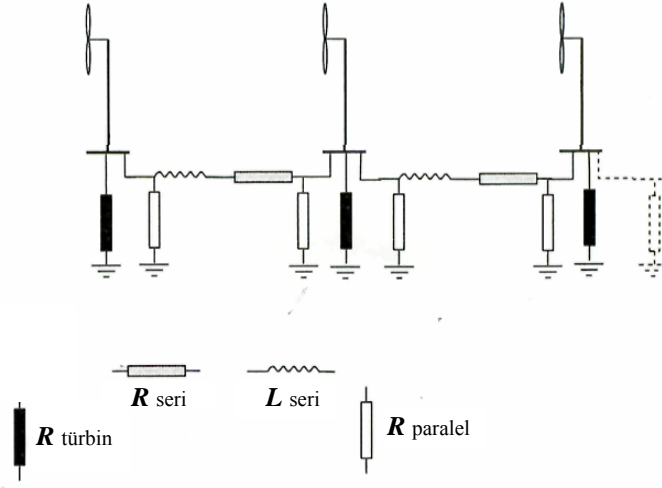
- Kaçak akımların toprağa geçmesi için düşük empedanslı bir hat tesis ederek, çalışma için etkin bir koruma elde edilmesi;
- Gerilimin makul sınırlar içinde kalmasının sağlanması ve yıldırıma karşı korumanın artırılması;
- Yüksek elektrik potansiyeli farklarının oluşmasını önleyerek çalışanların ve ekipmanların korunması olarak sıralanabilir.

Rüzgâr türbini tesislerinde topraklama için özel gereklilikler vardır. Bu tesisler çoğunlukla kilometrelerce uzanan bir alana dağılmış olup, modern türbin kulelerinin yüksekliğinden dolayı, yıldırım çarpmalarına daha sık maruz kalırlar. Ayrıca, genellikle direnci yüksek zeminde tepelerin üzerinde kurulmuşlardır. Bu yüzden normal topraklama işlemlerini bu tesislerde uygulamak pek kolay değildir ve özel uygulamalar gerekmektedir.

Rüzgâr santralının bütün ekipmanlarının kesintisiz bir topraklama sistemine bağlanması gerekir. Bu topraklama sistemine, ara istasyonlar, transformatörler, kuleler, rüzgâr türbin generatörleri ve elektronik ekipmanlar da dahil edilmelidir. Bu uygulama, genelde çıplak bir iletkenin, güç toplama kablosu boyunca eklenmesi sonucunda, rüzgâr santrali tesisindeki tüm ekipmanların hem birbirine bağlanmış olmasını sağlar, hem de uzun yatay bir elektrot görevi yaparak topraklama sisteminin direncini azaltır.

Bir rüzgâr santralinde topraklama sistemi, hem 50/60 Hz elektrik şebekesi akım frekansları için, hem de tipik olarak 10 μ s'den daha az yükselme süresi olan yıldırım düşmelerine karşı etkin şekilde çalışabilmelidir. Normal olarak hem elektrik şebekesi akım frekansları için, hem de yıldırım düşmelerine karşı aynı fiziksel topraklama sistemi kullanılmakla beraber, topraklama sisteminin yıldırım akımının yüksek frekanslı bileşenlerine karşı tepkisi, 50 Hz şebeke akımına olan tepkisinden çok daha farklıdır.

Rüzgâr santrali topraklama sistemi aşağıda şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Rüzgâr santrali topraklama sistemi şeması

Her bir rüzgâr türbin kulesinin temelinin 1 metre derinliğine halka şeklinde bir iletken konulup, buna dikey metal çubuklar yere çakılır. Genelde, rüzgâr türbin kulesinin çelik kafesinin temeli de, bu yerel topraklama şebekesine bağlanır. Bu yerel topraklamanın amacı, yıldırım düşmeleri ve şebekede oluşan kaçak akımların etkilerine karşı, rüzgâr santralinde topraklama sistemine, her bir birimin eş potansiyelde bağlanmasını sağlamaktır.

Türbinlerin topraklaması, şekil 3.2’de $R_{\text{türbin}}$ olarak gösterilmiştir. Türbinlerin topraklama şebekesi, sadece 15 metre çaplı bir halka ve dikey çubuklardan oluştuğundan bu sistemin sadece empedans amaçlı olduğu söylenebilir. Fakat türbinleri birbirine bağlayan uzun elektrotlar, daha karmaşık bir davranış biçimi sergilerler. Bunlar şekil 3.2’de π eşdeğer devreleri olarak gösterilmişlerdir. Böylece, seri empedanslar R_{seri} ve L_{seri} ’nin kombinasyonları iken, topraklama direnci R_{paralel} olarak verilmiştir. R_{seri} , basit olarak topraklama telinin direnci ve L_{seri} ise, topraklama devresinin self-endüktansıdır. Büyük rüzgâr santrali tesislerinde, uzun topraklama şebekesinin bu seri empedansı, göz ardı edilemez. Buradan hemen anlaşılacağı gibi, bir rüzgâr türbinine düşen yıldırımın yüksek frekanslı bileşenleri için, seri endüktans topraklama şebekesini, etkin bir şekilde bir birim türbinin topraklanmasına indirger. 50 Hz hata akımlı seri empedans bile, seri empedansın ihmal edilebileceği coğrafi alan olarak, küçük topraklama sistemlerinden beklenebilecek değerden çok daha yüksek bir topraklama direncine yol açabilir. Bu açıklamalarda, her ne kadar çok yüksek frekanslarda önemli olsada, şönt kapasitans ihmal edilmiştir [23].

4. ŞEBEKEYE BAĞLI RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN KULLANIMI SIRASINDA ELEKTRİK SİSTEMİNDEKİ ETKİLENMELER

4.1 Giriş

1990'ların başlangıcından beri birçok ülke, güç sistemlerindeki dağıtılmış üretimlere ilişkin önemli gelişmeler konusunda deneyim kazanmışlardır. Dağıtılmış üretimlerin şebeke bağlantıları, özellikle dağıtım şebekeleri üzerinde yeni problemler meydana getirmiştir ve bu durum kısıtlamalara sebep olmuştur. Bu kısıtlamalar, sistem operatörlerine, elektrik kurumlarına, hükümetlere ya da düzenleyici kurullara, dağıtılmış üretim birimlerinin şebeke bağlantısı için, teknik gereksinimleri belirlemede yol göstermiştir.

Geçen on yılda, rüzgâr enerjisinin, dağıtım ve iletim şebekeleri üzerinde kullanımının yaygınlaşması, mevcut teknolojilere ilişkin problemleri arttırmıştır. Bu gelişmeler, rüzgâr çiftliklerinin şebekeye bağlanması durumunda, bazı kuralların tanımlanması için yol gösterici olmuştur.

Başlangıçta, rüzgâr santralleri için şebeke gereksinimleri, klasik üretim birimleri için olandan daha yumuşaktı. Ancak, rüzgâr gücünün hızla artan gelişimi ile elektrik şebekeleri üzerindeki etkileri giderek daha çok önemli olmuştur ve bu durum gittikçe daha sert gereksinimlerin tanımlanmasına yol açmıştır. Bu nedenle, çözümler için şu andaki gereksinimler, giderek çok daha kompleks, karmaşık ve güvenilir, aynı zamanda çok daha pahalı görünmektedir [24].

4.2 Rüzgâr Türbinlerinin Şebekeye Bağlanması

Bir rüzgâr çiftliği, şebekeye bağlandığında karşılaşılan problemler ve kısıtlamalar şebekenin kendisi ile ilişkili olabilir ve bu yüzden her çeşit dağıtılmış üretim santrallerine bağlı olabilirler. [24].

4.2.1 Genel Kısıtlamalar

Rüzgâr enerjisi kesintili bir enerji kaynağıdır. Bu durumda, rüzgâr enerjisini hiçbir sınırlamaya tabi tutmadan elektrik enerjisine çevirerek şebekeye veren bir rüzgâr türbininin de, kesintili bir elektrik enerjisi üretmesi kaçınılmazdır.

Kesintili yük çeken tesislerin, elektrik şebekesindeki olumsuz etkileri bilinmekte olan bir gerçektir. Bu nedenle, kesintili üretim yapan bir rüzgâr türbininin, şebekeye yaptığı olumsuz etkileri sınırlamak için, diğer ülkelerde olduğu gibi, ülkemizde de bazı sınırlamalar vardır.

Rüzgâr türbinlerinin şebekeye yaptığı olumsuz etki, şebekeye bağlantı noktasındaki kısa devre gücüne bağlıdır [25]. Ülkemizde, TEİAŞ tarafından uygulanmakta olan, bağlantı noktasındaki minimum kısa devre gücünün (MVA), en çok yüzde beşi kadar kurulu güçte rüzgâr santralının bağlantısına izin verilmesi koşulu vardır ve bu elektriğin arz kalitesi şartı olarak vurgulanmıştır [26].

Ancak, rüzgâr türbinleri son 5-10 yılda büyük bir gelişme göstermiştir. Bugün, kullanılan modern rüzgâr türbinlerinde, rüzgâr enerjisi elektrik enerjisine çevirilerek şebekeye verilmeden önce, çeşitli kademelerden geçmektedir.

Türbinlerin çalışmaya başlarken çektikleri akım sınırlandırılarak, şebekeye etkisi azaltılmaktadır. Rüzgâr hızına göre, üretimi sabit tutmak amacıyla, kanat açıları sürekli değiştirilmektedir. Bir kısım rüzgâr türbinleri ise, ani gelen rüzgâr darbeleri ile, üretim yapmadan dönüş hızını arttırmakta, bu şekilde rüzgâr darbesinin elektrik darbesi olarak şebekeye aktarılmasını nispeten engellemektedir

Diğer yandan, bugün geliştirilen çoğu rüzgâr türbinlerinde, türbinlerin gerilim seviyesini, şebekenin mevcut geriliminden daha yüksek veya daha düşük tutmak suretiyle, şebekenin gerilim regülasyonuna katkıda bulunmak da mümkün olmaktadır [25].

4.2.2 Rüzgâr Türbinlerinin Dağıtım Şebekesine Bağlantısı

Dağıtım gerilimi seviyesinde şebekeye bağlanması planlanan bir rüzgâr santrali, diğer enerji santralleri veya otoprodüktör santrallerde olduğu gibi, ancak bağımsız bir enerji nakil hattı ile bir dağıtım merkezine veya trafo merkezine bağlanabilir.

Sistem emniyeti ve can güvenliği açısından, dağıtım hatlarına saplama girmelerine müsaade edilmemektedir

Ülkemiz açısından bakarsak, elektrik dağıtım şebekemiz, genelde 34,5 kV ve daha düşük gerilim seviyesindedir. Rüzgârın bol olduğu kıyı bölgelerimizde, trafo merkezlerinin güçlerinin 25-50 MW olduğu, bu bölgedeki iletim sistemimizin genelde radyal olduğu ve minimum sistem empedansı göz önüne alınırsa, kısa devre güçleri 200-300 MVA ile sınırlı kalmaktadır. Bu durumda dağıtım şebekelerine bağlanacak rüzgâr santrallerinin gücü, azami 15 MW civarında olmaktadır.

Rüzgâr türbinleri, çoğu gelişmiş ülkede kesiciler ve herbir türbin için bir trafo ile şebekeye bağlanmakta ve başında eleman bulunmadan işletilmektedir. Personelsiz işletildikleri için, türbini her türlü şebeke olayına ve türbin arızasına karşı koruyan bilgisayarlı bir kontrol sistemi içermektedir. Çok nadir olarak meydana gelen arızalarda, türbin kontrol sistemi tarafından sinyal yollanmakta ve uzaktan müdahaleyle veya teknisyen yollanarak arıza giderilmektedir [25].

4.2.3 Rüzgâr Türbinlerinin İletim Şebekesine Bağlantısı

İletim şebekesine bağlanacak bir rüzgâr santrali, ya en yakın trafo merkezine çekilecek bir iletim hattı ile, ya da en yakın iletim hattına girdi çıktı yaparak şebekeye bağlanabilir.

Ülkemizde, iletim şebekemizin gerilim seviyesi 154 veya 380 kV' dur. Bu gerilimdeki trafo merkezlerimizin minimum kısa devre güçleri, 300-400 MVA'dan başlamakta, 10.000 MVA'ya hatta daha yukarılara çıkabilmektedir. Bu nedenle büyük güçte rüzgâr santrali tesis etmek isteyenler, ancak iletim şebekesine bağlanabilecektir.

Dağıtım sistemine bağlanacak bir rüzgâr çitliğindeki elektrik bağlantılarının gerilim seviyesi, tercihen bağlanacakları trafo merkezinin gerilim seviyesi olarak seçilmektedir. Bu durumda santral çıkışına ilave bir yükseltici (veya düşürücü) transformatör tesis maliyeti olmayacaktır.

İletim şebekesine bağlanacak rüzgâr santrallerinde ise, gerilim seviyesi olarak en ekonomik dağıtım gerilim seviyesi seçilebilir. Bu durumda, santral çıkışında

kullanılacak yükseltici transformatörün ülkemizde kullanılan standartlardan farklı olması durumunda, yedekleme sorunu ortaya çıkabilir.

Rüzgâr santrallerinin iletim şebekesine bağlanmasının diğer bir şekli ise, kısa devre gücünün oldukça yüksek olduğu bir 380 kV merkeze bağlanmalarıdır. Ülkemizdeki 380 kV merkezlerin minimum kısa devre güçleri, genelde 5000 MVA'nın üzerinde olduğundan böyle bir merkeze çok sayıda rüzgâr santrali, şebekeyi rahatsız etmeden bağlanabilir.

Burada önemli olan, çok sayıda transformatör maliyetinden tasarruf etmek için, gerektiğinde sadece rüzgâr santrallerinin bağlanacağı bir kirli bara tesis ederek, en ekonomik çözümün bulunmasıdır [25].

4.3 Rüzgâr Türbinlerinin Bölgesel ve Şebeke Genelindeki Bozucu Etkileri

Değişken üretim yapma karakteristikleri nedeniyle, rüzgâr santralleri konvansiyonel santrallerden çok farklıdır. Rüzgâr santrallerinin toplam kurulu gücü arttıkça, sistem üzerindeki bozucu etkileri ve bunların sebep olacağı tehlike de artmaktadır [26].

Rüzgâr gücü dönüştürme sisteminin nispeten küçük bir miktarının şebekeye bağlanması, genellikle büyük problemlere sebep olmazlar. Enerji sağlanırken kalite ve güvenilirlik için bakım yapılır. Bununla birlikte rüzgâr gücü dönüştürme sisteminin önemli bir miktarı, bir konvansiyonel sisteme bağlandığı zaman, şebekede önemli çalışma problemleri meydana gelebilir.

Mevcut bir güç sistemine rüzgâr gücü bağlanmasının etkisini değerlendirme, bozulmaları (gerilim ve frekans değişimleri) hesaplamayı gerektirir. Şiddetli rüzgârlar, kısa devreler, rüzgâr santralının veya onun bir parçasının bağlantısının aniden kesilmesi ve diğer bazı anormal çalışma koşulları altındaki rüzgâr gücü dönüştürme sistemleri buna sebep olabilir [7].

Bu bozulmalar, güç sistemindeki güç kalitesi incelemeleri ve kararlılık incelemelerinden tespit edilebilirler.

Rüzgâr santrallerinin arz güvenliği ve kalite kriterlerine bozucu etkileri inceleneceği zaman, rüzgâr santrallerinin bölgesel etkileri ve şebeke etkileri ayrı ayrı değerlendirilmelidir.

Bölgesel etkiler, her bir santralin bağlı olduğu transformatör merkezinde, diğer rüzgâr santrallerinden bağımsız olarak görülmektedir. Rüzgâr santrallerinin şebekeye olan toplu bozucu etkileri sonucunda ise, bütün sistem rahatsız olmaktadır [26].

4.3.1 Bölgesel Bozucu Etkileri

Bölgesel etkiler, iletim hatlarında ve trafolarında akışlarda, trafo merkezlerinde gerilimlerde değişiklikler, koruma sistemleri, kısa devre arıza akımları ve şalt tesislerinde değişiklikler ile harmonikler, titreme ve gerilim dalgalanmaları gibi arz kalitesinde değişiklikler olarak özetlenebilir.

İlk iki konu, yeni bir rüzgâr santrali bağlantı başvurusu yapılması durumunda incelenmektedir. Bu çalışmalar, sadece rüzgâr santrallerine mahsus olmayıp, genel olarak tüm santral bağlantı başvurularında standart olarak yapılmaktadır. Ancak, rüzgâr santrallerinin arz güvenliği ve kalitesine yerel etkileri, türbin tipine göre (sabit hızlı veya değişken hızlı) farklılık göstermektedir.

Arz kalitesiyle ilgili olan üçüncü konu, kendi içinde harmonikler, fliker ve gerilim dalgalanmaları olarak ayrılabilir.

Harmonikler, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılan elektronik güç çeviricilerinden kaynaklanmaktadır [26]. Güç elektroniği çeviricileri genellikle harmonik oluştururlar. Bununla birlikte, harmonik akımlar, önemli ölçüde onun özelliklerine bağlı bir güç elektroniği çevircisi tarafından yayılırlar. Örneğin, kuvvetlendirilmiş anahtarlı eviricilerin kullanılması ile, evirici terminallerinde elektriksel niceliklerin dalga boylarına ilişkin daha iyi kontrol genellikle sağlanır. Bununla beraber, harmonik akımların seviyesi limit değerleri aşmamalıdır [24].

Titreme, sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin, mekanik dalgalanmaları elektriksel çıktıya aynen yansıtmasının sonucunda oluşmaktadır [26]. Gerilim dalgalanmaları, rüzgâr türbini anahtarlama operasyonlarına bağlantılıdır. Rüzgâr hızı değişimleri ya da kule gölge etkisi, özellikle zayıf şebekelerde (düşük kısa devre güç seviyelerinde) titreme problemlerine yol açabilir.

Gerilim dalgalanmaları ile ilgili olarak, rüzgâr gücü santrallerinin değişik türlerde gerilim dalgalanmaları üretebildiklerini söyleyebiliriz. Bunlar, rüzgâr hızındaki değişimlerden dolayı, güç değişimlerinin sonucu oluşan, yavaş gerilim dalgalanmaları ve yol verme sırasında ya da generatörler arası değişim sırasında ve benzeri durumlarda oluşabilen gerilim değişimleridir [24].

4.3.2 Şebekeye Olan Bozucu Etkileri

Rüzgâr türbinlerinin veya rüzgâr santrallerinin, şebeke bozucu etkilerinin farklı sebepleri vardır ve çoğu türbine özel nedenlerdir. Ortalama güç üretimi, türbülans şiddeti ve rüzgâr makaslamayla ilişkilidir ve bunlar meteorolojik ve coğrafi koşullarla belirlenir. Diğer bütün nedenlerin, rüzgâr türbininin teknik performansı ile ilişkili olduğu söylenebilir. Performans, sadece generatörler, transformatörler v.s. gibi elektriksel bileşenlerin karakteristikleriyle belirlenmez. Rotor ve sürücünün mekanik ve aerodinamik hareketleri de önemlidir. Türbin tipinin, rüzgâr türbinleri ve rüzgâr santrallerinin güç kalitesi karakteristikleri üzerinde büyük bir önemi vardır [22].

Şebekeye olan bozucu etkileri arasında;

- Sistem dinamiği ve kararlılığı,
- Reaktif güç kontrolü ve gerilim,
- Frekans kontrolü ve konvansiyonel santrallerde sık sık yük alma/yük atma problemleri olduğu bilinmektedir [26].

4.3.2.1 Sistem Dinamiği ve Kararlılığı Etkisi

Rüzgâr santrallerinin sistem dinamiği ve kararlılığı üzerindeki bozucu etkileri, bu santrallerin türbinlerindeki generatör sistemlerinin, konvansiyonel santrallerdeki senkron generatörlerden farklı olmalarından kaynaklanmaktadır. Bu generatörlerin bağlantı noktasındaki gerilim ve frekansa bağlı tepkileri, diğer senkron generatörlerden farklılık göstermektedir. Değişken hızlı türbinlerin elektronik güç çeviricileri, gerilim düşümüne bağlı aşırı akımlara çok duyarlı olduğundan, küçük bir gerilim düşümünde bile, bir bölgedeki rüzgâr santralleri topluca açabilmektedir. Bu durumda, şebekede çok önemli sorunlara yol açabilecek sistem kararlılığının korunması konusunda problemler meydana gelmektedir [26].

Bir taraftan, rüzgâr santralının çalışması, şebeke dinamik davranışını ve çalışmasını veya ona bağlı olabilecek özel cihazların çalışmasını etkilememeli veya zarar vermemelidir. Bu, rüzgâr çiftliğinin çalışma koşulları ve çeşitli konfigürasyonlar için kontrol edilmek zorundadır. Bunlara, çalışmaya başlama, çalışmayı kesme ve rüzgâr hızı değişimleri gibi örnekler verilebilir.

Diğer taraftan, rüzgâr çiftliğinin devre dışı olarak bağlantısının kesilmesi, ani gerilim düşmeleri ve arızalar gibi şebeke üzerinde yaşanan şiddetli bozukluklar durumu kötüleştirebilir. Bu, ada şebekelerde veya yüksek rüzgâr gücü bağlantılı iletim şebekelerindeki üç fazlı hatalarda özellikle doğrudur. Eğer rüzgâr çiftliği devre dışı kalırsa, bu önemli üretim kaybına yol açabilir. Bu durum, enerji dağıtım istasyonlarındaki aşırı yükü kaldırmak için, belirli bölgelerde kısa süreli elektrik kesintilerine, hatta daha kötü durumda sistemin çökmesine sebep olabilir. Bundan dolayı, bağlantı noktasındaki gerilim seviyesine bağlı olarak, şebeke operatörleri, rüzgâr çiftliklerinin hata taşıma yeteneğine sahip olmasına ihtiyaç duyabilirler. Böylece belirlenmiş olan ani gerilim düşmelerine karşı koyabilirler [24].

4.3.2.2 Reaktif Güç Üretimi ve Gerilim Kontrolü Üzerindeki Etkileri

Güç sistemleri içinde, hatlar, transformatörler ve yükler gibi farklı tip bileşenler genellikle reaktif güç tüketirler. Reaktif güç tüketimini kompanze etmek ve şebekede güç iletimini sağlamak için, üretim santralleri veya kondansatör grupları gibi diğer tip cihazlar tarafından reaktif güç sağlanmalıdır. Rüzgâr çiftlikleride diğer üretim araçları gibi bu kompanzasyona katılmak zorunda kalabilir [24].

Reaktif güç üretimi ve gerilim kontrolü üzerindeki etkileri, rüzgâr türbinlerinin reaktif güç çıkışı kapasitesine bağlı olarak değişebilir (bütün rüzgâr türbinleri, değişken reaktif güç çıkışı kapasitesine sahip değildir), rüzgâr santrallerinin tesis edileceği yere göre değişebilir ve son olarak şebekeye uyumluluğuna bağlı olarak değişebilir (rüzgâr türbinlerinin çıkış gerilimleri, göreceli olarak daha düşük olup, şebekenin genellikle zayıf olduğu uzak noktalarda kurulmaktadır.). Bu nedenle, gerilim kontrolüne katkıda bulunmazlar. Bölgede konvansiyonel senkron generatörlerin yerine büyük kurulu güçte rüzgâr santrali tesis edilmesi teklif edilmesi durumunda, bölgedeki gerilim kontrolü yönetiminin dikkatle incelenmesi gerekmektedir [26]. Şebeke çalışması, genellikle üretim birimleri tarafından yapılan

bir Şebeke gerilim kontrolü gerektirir. Rüzgâr türbinleri , oldukça sınırlı reaktif güç tüketimine ve üretim yeteneğine sahip olmalarına rağmen, gerilim kontrolüne katılmak zorunda kalabilirler [24]. Esasen, bütün rüzgâr santrallerinin aktif gerilim kontrolüne katılım kapasitesine sahip olmalarının sağlanması gerekmektedir.

Sincap kafesli indüksiyon generatörleri için rotor hızı, aktif güç, reaktif güç ve gerilim arasında sabit ilişki bulunur. Bu sebeple bu tip türbinler gerilim kontrolünü reaktif güç çıkışıyla yapma imkanına sahip değildir. Gerilim çıkışının kontrolü için, kontrol edilebilir reaktif güç üretebilecek ilave teçhizatın tesisi gerekmektedir. Değişken karakteristikli (aniden dalgalanan) rüzgâr ile üretim yapan sabit hızlı türbinler Şebekede titremeye (türbinin ürettiği dalgalı güç çıkışına bağlı olarak Şebeke geriliminde oluşan gerilim dalgalanmaları) neden olmaktadır.

Değişken hızlı türbinler, reaktif güç çıkışlarını ayarlayarak gerilim kontrolü yapabilmektedir. Ancak söz konusu gerilim kontrolü yeteneği çevirici ve kontrol sistemlerinin kapasiteleriyle sınırlıdır.

Genel olarak rüzgâr türbinlerinin, özellikle Şebekenin zayıf olduğu uç noktalarında gerilim sorununa neden olacağı dikkate alınmalıdır

Enterkonnekte sisteme rüzgâr santrallerinin bağlantısında bozucu etkiler kadar önemli diğer bir unsur da, bağlantı noktalarında iletim kapasitesinin yetersiz kalabilmesidir. Rüzgâr potansiyeli, yerleşim merkezlerinden uzak bölgelerde olup, bu bölgeler Şebekenin zayıf olduğu noktalardır. İletim Sistemi, bu bölgelere başka noktalardan bölgenin tüketimi kadar güç ve enerji taşıyabilecek şekilde tasarlanmıştır. Özellikle iletim sistemine büyük güçte rüzgâr santrali bağlantısı durumunda, üretilecek elektrik enerjisini her durumda sistemin güçlü tüketim noktalarına taşımak için yeni iletim tesisleri gerekecektir. Bunun için ya bağlantı noktası ile sistemin güçlü tüketim noktaları arasındaki iletim sisteminin yeni hatların tesisi ile güçlendirilmesi ya da bağlantının doğrudan uzun hatlarla güçlü noktalara yapılması gerekmektedir. Dolayısıyla, büyük kapasitelerin sisteme bağlantısı için, oldukça büyük iletim tesisi yatırımlarına ihtiyaç duyulmaktadır [26].

4.3.2.3 Frekans Kontrolü ve Yük Eğrisinin Takibi Konularına Etkileri

Şebeke çalışması frekans kontrolünüde gerektirir ve bu üretim birimleri tarafından yapılır. Rüzgâr türbinleri, büyük ölçüde rüzgâr enerjisinin değişken doğasından dolayı, frekans kontrolüne ilişkin oldukça sınırlı kontrol yeteneğine sahiptirler. Ayrıca, ürettikleri aktif gücün yüksek değişkenliğinden dolayı, rüzgâr enerjisinin yüksek seviyede bağlantısı, frekans kontrol yeteneğinde bir artışı gerektirir. Bu, frekans kontrolü için şebekedeki diğer üretim birimlerinin aktif güç değişimlerinde bir artışa ve çalışma programını tanımlamada zorluklara yol açar [24].

Rüzgâr santrallerinin kontrolsüz ve dalgalı karakteristikli rüzgâr enerjisine dayalı üretim yapıları nedeniyle, üretim programının yapılamaması , tahmin edilebilen ve tahmin edilemeyen (örneğin; kısa devre arızası, rüzgârın fazla hızlı esmesi nedeniyle santralin devreden çıkması) üretim dalgalanmalarının dengelenmesi ve yük eğrisinin izlenmesi için, yeterli yedek konvansiyonel santral bulundurulması gerekmektedir.

Bunun yanında, rüzgâr santrallerinin frekans üzerindeki bozucu etkilerini kompanze etmek, üretim dengesizliklerini gidermek ve yük eğrisini takip etmek için ayrılan konvansiyonel santrallerden oluşan yedek generatörlerin, artan rüzgâr santralı kurulu gücü nedeniyle, teknik yeteneklerinin artırılması gerekmektedir. Sistem frekansının ilgili yönetmeliklerdeki kriterlere uygun sınırlar içinde tutulabilmesi için yedek konvansiyonel santrallerin çok daha hızlı ve daha yüksek kapasitede (tepki süresi kısa ve ulaştığı üretim miktarı yüksek) devreye alınmalarının sağlanması gerekir.

Değişken karakteristikli rüzgâr enerjisi ile üretim yapan rüzgâr santrallerinin primer frekans kontrolüne katkıda bulunması mümkün görülmemektedir. Ancak, frekanstan bağımsız işletme prensibiyle çalıştırılmadıkları sürece frekans kontrolüne katkıda bulunamazlar. Teknik olarak, bazı rüzgâr türbinleri (kanat kontrollü) nominal çıkış gücünün altında işletilmesi durumunda, frekans kontrolüne katkı yapabilmektedir.

Rüzgâr türbinlerinin sebep olduğu güç dalgalanmaları, ancak konvansiyonel santrallerle dengelenebilmektedir. Şebeke arızası veya aşırı rüzgâr hızı nedeniyle santralin durması gibi nedenlerle, rüzgâr santralı üretimindeki beklenmeyen ani kayıplar için, yeterli yedek kapasite ayrılması gerekmektedir. Artan rüzgâr santralı kurulu gücünün sebep olacağı frekans dalgalanmalarının, ilgili yönetmeliklerdeki

sınırlar içinde tutulabilmesi için, yedekte tutulan konvansiyonel santrallerin artan sistem gereksinimlerine cevap vermesi gerecektir.

Yeni şebekeye bağlantı şartlarından biri de, frekans yükselmesi durumunda rüzgâr santrallerinin güç çıkışının azaltılması veya sınırlandırılmasıdır[26].

4.4 Büyük Rüzgâr Çiftlikleri Planlamasında Sürekli Hal Güç Sistemi Sorunları

Araştırmalar göstermiştir ki, maksimum rüzgâr çiftliği kapasitesi, tek tek rüzgâr türbinlerinin elektriksel konfigürasyonuna çok bağlıdır. Asenkron generatörler kullanıldığı zaman, reaktif güç kompanzasyonu, izin verilen kapasiteyi artırır. Değişken hızlı generatörler, en iyi elektriksel karakteristiklere sahiptirler ve asenkron generatörler ile kıyaslandığında, rüzgâr çiftliğinin maksimum kapasitesinin artmasını sağlarlar.

İç rüzgâr çiftliği şebekesindeki kayıplar ve dış şebekedeki kayıplar, rüzgâr çiftliğinin boyutunun yanında, elektriksel konfigürasyondan etkilenir. Asenkron generatörlü bir konfigürasyon düşünüldüğünde, reaktif kompanzasyon, iç ve dış şebekede artan kayıplar vermez.

Şebekeye maksimum kapasitede bağlanmak kayıpları arttıracaktır.

Bir rüzgâr çiftliği planlarken, ana mesele, en uygun oranı (tesis edilecek güç açısından) ve tesisatın tasarımını belirlemektir. Sürekli hal gerilim kısıtlamaları, ısıl kısıtlamalar ve şebeke tıkanması gibi bir kaç önemli sebep, rüzgâr çiftliğinin mümkün olan maksimum kapasitesini sınırlar [4].

Genellikle, rüzgâr çiftliğinin bağlantı noktasında ve rüzgâr çiftliğinin bağlandığı besleyicide (ana kabloda) gerilim yükselir. Gerilimin belirlenmiş olan limit değerleri aşmaması sağlanmalıdır. Ayrıca, bir rüzgâr çiftliğinin şebekeye bağlantısı, şebeke üzerindeki gerilim profilini, sadece bağlantının gerilim seviyesinde değil aynı zamanda düşük gerilim seviyelerinde de etkiler.

Şebeke bileşenlerindeki aşırı akımlar, rüzgâr çiftliklerinin bağlantı noktası yakınında meydana gelebilirler. Bazı çok büyük rüzgâr çiftliği örneklerinde veya rüzgâr enerjisinin yüksek bir bağlantı seviyesi için, iletim şebekesinde ve hatta bazen komşu

Ülkelerin iletim sistemi ile uluslararası bağlantılarda tıkanıklık problemleri de meydana gelebilir [24].

Bununla birlikte, Şebekedeki sınırlamalar rüzgâr iftliğinin tasarımına bağlıdır ki, teknoloji seğimi ve reaktif gc kontrolü bu noktada önemlidir.

Gc sisteminde, maksimum rüzgâr iftliği kapasitesinde sürekli hal sınırlamaları, farklı rüzgâr türbinlerinde elektriksel konfigürasyonun seğimine bağlı olarak değişir.

Asenkron generatörlü rüzgâr türbinleri için, reaktif gc kompanzasyonu izin verilebilir maksimum tesis kapasitesini arttırır. Bununla birlikte, kapasitif kompanzasyonun yüksek derecesi, kademe deęiŐtiricili transformatör kullanıldığı zaman problemlere yol açabilir (kademe deęiŐtirildięinde, gerilim değişimlerinin artmasından dolayı). Bu, planlanan rüzgâr iftliğinin kapasitesi için sınırlama faktörü olabilir.

Değişken hızlı generatörler kullanıldığı yerlerde, reaktif gc kesin olarak kontrol edilebilir en iyi elektriksel karakteristikleri verirler ve en yüksek izin verilebilir rüzgâr iftliği kapasitesini sağlarlar. Rüzgâr santralinde, tek olarak değişken hızlı generatörlere reaktif gc kontrolü uygulayarak, izin verilebilir rüzgâr santrali kapasitesi ayrıca arttırılabilir.

Reaktif kompanzasyon stratejisi, rüzgâr santralinin içindeki ve dışındaki Şebekedeki kayıplarında etkileyecektir. Asenkron generatörler kullanıldığında ve reaktif kompanzasyon olmadığı zaman, tüm kayıplar önemli ölçüde artacaktır.

Dış Şebekenin artan kullanımı, daha yüksek kayıplara yol açar. Rüzgâr santralinin, reaktif gc karakteristiğinin geliştirilmiŐ kontrol metodları, izin verilebilir rüzgâr iftliği kapasitesini arttırır. Fakat azaltılmıŐ reaktif gc transferinden dolayı, dış kayıplar azalır [4].

4.5 Bölgesel Şebekelerde Gerilim Kararlılığı Limitleri ve Büyük lekli Rüzgâr Gücü Entegrasyonu

Dünya’da toplam rüzgâr gücü kapasitesi, her geçen gün hızla artıyor ve artacaktır. Bu tip üretim birimleri müŐterilere ve kamu hizmeti gören Őirketlere yeni fırsatlar ve

problemlerde getirecektir. Onların, elektrik şebekesi üzerindeki gerilim kararlılığına etkisini değerlendirmek, önemli ve gereklidir. Özellikle zayıf bağlı sistemler için.

Rüzgâr santrallerinin artışı, gün geçtikçe daha fazla dikkate değer olmaktadır ve problemlerde daha detaylı araştırmayı gerektirmektedir. Ana güç iletim sisteminden epeyce uzaktaki alanlarda, büyük ölçekli rüzgâr gücü santralleri geliştirilip planlanacağı zaman, gerilim kontrolü değerlendirmesi ve reaktif güç kompanzasyonu artarak önem kazanır [3].

Bölgesel şebekenin gerilim kararlılığı, rüzgâr santralının çalışması ve maksimum derecelendirilmesinde ana sınırlayıcı olabilir. Zayıf şebekelere rüzgâr gücü entegrasyonuna ilişkin teknik problemler, genel olarak şebekenin ısı kapasitesine ve/veya rüzgâr gücünün gerilim kalitesi ve kararlılığına ters etkisi ile ilişkilendirilebilir.

Bununla birlikte, bazı durumlarda yeni iletim hatlarının geliştirilmesine ve mevcut hatların kapasitelerinin artırılmasına ilişkin lokal sıkıntılar, onu dikkate değer yapabilir. Mevcut hatlar, en kötü durumda, belli bir seviyede sistemin normal teknik sıkıntılarıyla çalışmayı gerektirebilir.

Araştırmalar göstermiştir ki, geleneksel gerilim kararlılığı limitlerinin ötesinde elektrik güç sistemini çalıştırmak teknik olarak mümkün olabilir. Bu limitleri yükseltmek için, ekstra reaktif güç kompanzasyonu, yani bir SVC (Statik VAR Kompanzator) uygulamasına gidilebilir. Ancak, bu çözüm fiyat açısından pahalıdır. Ana hedef, gerçek bölgesel sistemin ısı kapasitesinin tamamını kullanmaktır. Örneğin; onun ısı limitine mümkün olduğunca yakın sistem çalışması gibi. Ayrıca, kabul edilebilir güç kalitesi, daimi müşteriler tarafından bağlantı noktasında korunmak zorundadır. Bu amaçları gerçekleştirmek için, SVC uygulaması önemlidir.

Rüzgâr türbini generatör tasarımlarındaki yeni gelişmelere, şebeke ve generatör arasındaki güç elektroniği çeviricileri dahildir [5].

Bugün rüzgâr çiftlikleri, hem boyut hemde sayı olarak gelişiyor. Reaktif güç için yüksek istek, büyük rüzgâr çiftlikleri için önemli bir özellik olarak bilinir. Eğer şebeke, rüzgâr çiftliği reaktif güç ihtiyacını karşılayamazsa, rüzgâr çiftliği gücünün sisteme entegrasyonu sınırlanacaktır. Rüzgâr çiftliğinin çalışmasına bağlı reaktif güç

eksikliği, şebeke genel kayıplarının artmasına ve gerilim kararlılığına ters yönde etki yapabilir.

Rüzgâr çiftliğinin şebekeye bağlantı noktasının özel önemi vardır. Rüzgâr çiftliğinin büyük yüke daha yakın ve daha yüksek gerilim seviyesinde şebekeye bağlanması, kayıpları azaltır, reaktif kompanzasyon gerekliliğini azaltır ve rüzgâr çiftliğinin sistem gerilim kararlılığına ters etkisini azaltır [6].

4.6 Kısa-Devre Arızası Durumunda Rüzgâr Türbinlerinin Tepkisi

Rüzgâr gücünün şebekeye bağlantı seviyesinin sürekli artması, mevcut şebekenin çalışmasında bazı etkilenmelere sebep olur, özelliklede güç kalitesi açısından. Yeni gereksinimlere göre, dış şebekedeki bir kısa devre hatasının temizlenmesinden sonra, şebekeye bağlı rüzgâr türbini, gerilim düşmesi ve yığılma akımı nedeniyle bağlantı kesilmeden, minimize edilmiş güç kaybı ile onun normal çalışmasına geri dönmelidir.

Rüzgâr gücü bağlantı düzeyi yüksek olduğu zaman, rüzgâr gücünün büyük miktarının bağlantısının kesilmesi, önemli üretim kaybına sebep olarak, güç sistemi kararlılığını tehdit edebilir [8].

Şebekede meydana gelen herhangi kısa devre arızası sonrasında, gerilim düşümü oluşur ve sistemde ilerleyerek rüzgâr santrallerine kadar ulaşır. Rüzgâr santraline ulaşan gerilim düşümünün karakteristiği, arızanın yerine, tipine, bölgedeki senkron generatörlerinin sayısına ve kurulu gücüne ve bunların gerilim kontrolüne katkıda bulunmak için üretecekleri reaktif güç çıkışı miktarına dayalı olarak farklılıklar göstermektedir.

Rüzgâr santral kurulu gücünün fazla, senkron santral kurulu gücünün de az olduğu bölgelerde, gerilim düşümü son derece önemli sorunlara sebep olmaktadır.

Alışıldığı üzere, gerilim düşüşü olduğunda, rüzgâr santralleri saniyeler içinde sistemden ayrılmaktadır. Elektronik güç çeviricilerinin arıza akımlarından korunması amacıyla, bağlantı noktasındaki gerilim şebeke geriliminin %10-20 altına düştüğünde, generatör salınımlarının yol açacağı gerilim dalgalanmalarının ve generatörler tarafından şebekeden aşırı reaktif güç çekişinin önlenmesi için, rüzgâr santralleri sistemden ayrılmaktadır [26].

Asenkron generatörlü sabit hızlı rüzgâr türbinlerine ilişkin olarak, bir dış hatanın temizlenmesinden sonra, normal çalışmaya geri döndürmeye, dinamik reaktif kompanzasyon, rüzgâr türbinlerinin röle ayarlamaları ve rüzgâr türbinlerinin kontrol kabiliyetleri yardım edebilir[8].

Sincap kafesli makineli bir rüzgâr türbinine gerilim düşüşü ulaştığında, aktif mekanik güç sabit kalmakta, üretilen aktif güç azalmakta, generatör hızlanmakta, akım ve reaktif güç tüketimi önemli ölçüde artmaktadır. Asenkron generatörün tüketimini kompanze etmek amacıyla kurulmuş olan kapasitörler tarafından üretilen reaktif güç hızla azalmakta ve iletim/dağıtım hatlarında reaktif güç kayıpları artmaktadır. Makine, atalet sabitinin küçük olması durumunda, çok çabuk hızlanmaktadır. Arıza temizlendikten sonra, makinenin hızlanmış olmasına bağlı olarak, aktif güç çıkışı arıza öncesindeki değerinden daha fazla olma eğilimindedir. Ancak, bu durumda daha yüksek akımlar gerekecek, hat ve trafolarıda daha fazla gerilim düşüşü olacak ve asenkron generatörü arıza öncesi gerilimi sağlayamayacaktır. Sonuç olarak, aşırı akım koruma sistemi nedeniyle, makine açmaya gidecektir.

Sincap kafesli asenkron makinelerin, ilk 100 msn. için kısa devre arıza akımına katkısı, senkron generatörlere oldukça benzemektedir. Ancak, bu tip rüzgâr türbinlerinin, arıza temizlendikten sonra, aşırı reaktif güç tüketerek gerilim kararsızlığına neden olması, senkron makinelerden farklı bir davranıştır. Arıza süresi uzuyorsa ve rüzgâr santrali şebekenin zayıf olduğu bir bölgede bulunuyorsa, gerilim kararsızlığı riski ve rotor hızı kararsızlığı artar. Normalde gerilim veya rotor hızı kararsızlığı olmadan önce, aşırı akım koruma sistemi devreye girmektedir [26].

Çift beslemeli asenkron generatörlü değişken hızlı rüzgâr türbinleri, dünyada tesis edilen değişken hızlı rüzgâr türbinlerinden en popüleridir ve sabit hızlı rüzgâr türbinleri ile mukayese edildiğinde, kısa devre hataları boyunca sistem kararlılığına ilişkin davranışları daha iyidir. Bunun sebeplerinden biri, onun aktif ve reaktif güç çıkış kontrol kabiliyeti olabilir. Dış şebekedeki bir kısadevre arızasının temizlenmesinden sonra, bu gibi türbinlerin normal çalışmasına geri dönmesini incelemek oldukça ilginçtir ki, bir dış kısa devrenin temizlenmesinden sonra, rüzgâr türbininin normal çalışmasına geri dönmesinin, kontrol planlarıyla nasıl etkili bir şekilde sağlanacağı görülür [8].

Çift beslemeli asenkron generatörlü türbinler de kısa devre arıza akımına katkıda bulunurlar. Günümüzde, aşırı akıma çok duyarlı olan elektronik güç çeviricilerinin koruma sistemleri, arıza durumunda şebekeden hızla ayrılmayı sağlamaktadır. Bir çözüm olarak, bazı durumlarda rotor tarafındaki çeviriciyi, aşırı rotor akımlarından korumak için, arıza sırasında rotor by-pass edilir. Rotor akımının sınırlandırılması ve makinenin hız-dönme momenti karakteristiğinin etkilenmesi amacıyla, rotor tercihen direnç üzerinden by-pass edilebilir. Makine hızlanabilir ve şebekeden önemli miktarda reaktif güç çekebilir. Ancak, gerilim düzelmedikçe, makine çok hızlı olarak sistemden ayrılacaktır.

Elektronik çeviricinin kapasitesine bağlı olarak, senkron generatörler kısa devre arıza akımına katkıda bulunmaktadır. Eski çeviricilerin çoğu, ucuz olmaları için, en büyük nominal akım değerine dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Bu çeviriciler, (ve kontrol sistemleri) arıza akımını nominal akım değeriyle sınırlandırmaktadır. Mevcut durumda, senkron generatörler arıza olduğunda hızla şebekeden ayrılmaktadır.

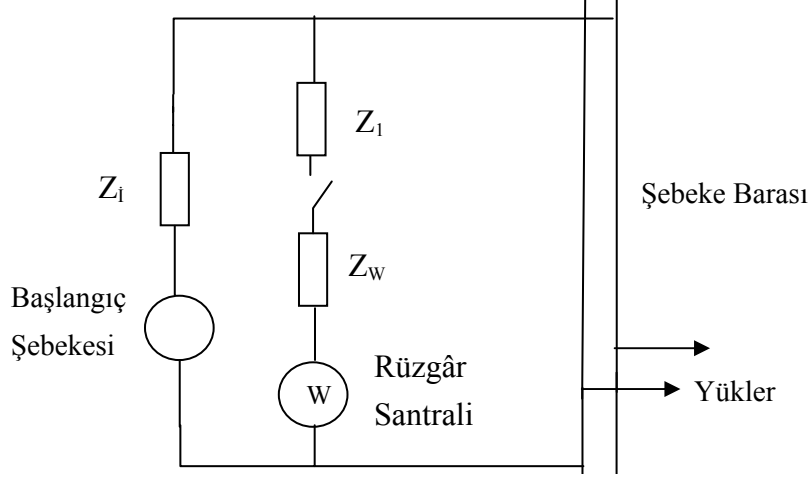
Rüzgâr santrallerinin kurulduğu bölgede, arıza sonrası bütün rüzgâr santrallerinin gerilim düşümü nedeniyle aniden devre dışı olması, bölgede önemli bir üretim açığına sebep olmaktadır. Bu, sistem emniyeti, arz güvenliği ve kalitesi açısından büyük olumsuzluklara neden olabileceğinden, istenen bir durum değildir [26].

Sonuç olarak şunlar söylenebilir ki, rüzgâr güç santrali, şebekedeki hata akımlarına katkıda bulunabilir. Rüzgâr çiftliğinin entegrasyonunu takiben, maksimum kısa devre gücü veya akımları, şebeke ekipmanlarının farklı bileşenleri için maksimum kabul edilebilir değerleri aşmamalıdır [24]. Arz Güvenliği ve Kalite Yönetmeliği'nde de yer alan, rüzgâr santrallerinin, arıza sonrasında belirli süre ve büyüklükte gerilim düşüşü olmasına rağmen, sisteme bağlantılarını sürdürme ve şebekenin toparlanmasına katkıda bulunma yeteneğinin olması gerekmektedir [26].

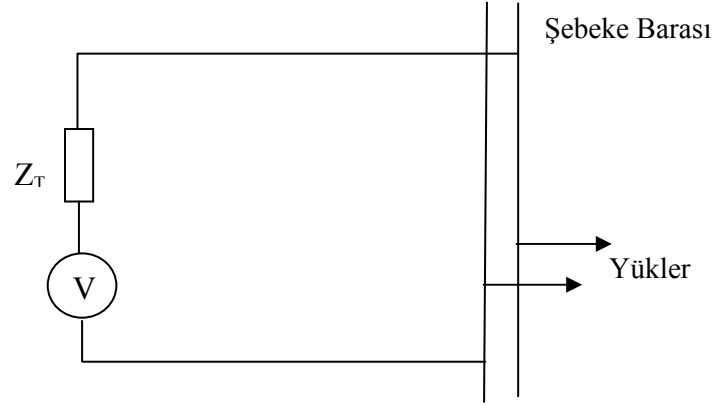
4.7 Rüzgâr Santrallerinin Şebekeyi Besleme Kapasitesi Limiti ve Önemi

Şebeke bağlantısı konusu, mevcut rüzgâr kaynaklarının tamamının işletilmesini sınırlayan çok önemli bir faktördür. Yüksek rüzgâr gücü potansiyeline sahip bölgeler, genelde zayıf elektrik şebekesine sahiptir. Hindistan, Çin ve Meksika gibi gelişmekte olan bir çok ülkede, mühendisler güç kalitesi açısından mevcut şebeke ile bağlantının uygun olduğu yerlerde problemlerle karşı karşıya kalırlar. Bu gibi

kararlarda temel düşünce, bağlantı yaptıktan önce ve sonraki kaynak empedansdır. Bu konuyla ilgili başka bir bakış açısında, planlanan bağlantı noktasındaki, sistem sertliği veya hata seviyesi olarak bilinen mevcut kısa devre gücüdür (MVA).



(a) Rüzgâr santrali bağlanmadan önce



(b) Rüzgâr santrali bağlandıktan sonra

Şekil 4.1 : Bağlantı noktasında sistem sağlamlığını ve şebeke bağlantı performansını değerlendirmek için, rüzgâr santrali ve şebekenin Thevenin eşdeğer devre modeli.

Bağlantı yaptıktan sonra, sistem sertliğini değerlendirmenin bir başka yolu, yukarıda şekil 4.1’de gösterildiği gibi rüzgâr santrali ve şebekenin thevenin eşdeğer devresinin ayrı ayrı kullanılmasıdır.

V =Planlanan bağlantı noktasındaki şebeke gerilimi

Z_i =Bağlantıdan önceki şebekenin kaynak empedansı

Z_w =Rüzgâr santralinin kaynak empedansı

Z_1 =Rüzgâr santrali ile şebeke arasındaki bağlantı hattının empedansı

Z_T =İki sistemin birleştirilmiş toplam kaynak empedansı ise,

Şebekeye bağlanması planlanan rüzgâr kapasitesi ile sisteme bağlantıdan sonra, birleştirilmiş eşdeğer thevenin şebekesi şekil 4.1 (b) gibi olacaktır.

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_w + Z_1} \quad (4.1)$$

Bağlantı noktasındaki birleştirilmiş kısa devre gücü MVA ;

$$MVA_{SC} = \frac{\text{Nominal MVA Kapasitesi}}{Z_{T\text{birim}}} \quad (4.2)$$

Daha yüksek kısa devre gücü (MVA) daha sert şebeke demektir. Rüzgâr gücü kapasitesine ilişkin belirli olan minimum şebeke sertliği, meydana gelen şebekenin güç kalitesinin korunmasını gerektirir. Bu düşünce, sisteme eklenecek toplam rüzgâr gücü kapasitesini sınırlar.

Sadece Z_T 'nin büyüklüğü önemli değil, Z_T 'nin bileşenleri R direnci ve X reaktansı da ayrı öneme sahiptirler. Temel devre teorisi ifade eder ki, herhangi bir elektrik şebekesinde aktif ve reaktif güç ayrı bir şekilde dengede tutulmalıdır. Bu yüzden rüzgâr generatörü empedansının aktif ve reaktif bileşenleri şebekeye etki edecektir.

Asenkron motoru gibi bir rüzgâr generatörüne yol verme, şebekeden içeriye akan bir akıma sebep olabilir ve bu bir kaç saniye için ani gerilim düşmesi ile sonuçlanabilir. Bu düşüş, şebeke hattının tolerans sınırının dışında olabilir. Çoğu ülkede, bu geçici gerilim düşmesi, % 2-5 ile sınırlanır. Gelişmekte olan ülkelerde, daha yüksek değer hakimdir. Bir çok makineli rüzgâr santralleri için, makineler bu etkiyi minimize etmek için düzenli çalıştırılabilir.

Bununla birlikte, çok zayıf bir sistem için, bu konu şebekeye bağlanabilecek makinelerin sayısı ile sınırlanabilir. Gerilim titreme şiddeti, makinelerin sayısının karekökü kadar artar. Bir makineye yol vermenin sebep olduğu titreme, şebeke bağlantı noktasındaki hata seviyesi ile ters bir şekilde değişir ve bu yüzden daha zayıf şebekelerde bir sorun olabilir.

Kamu hizmeti gören elektrik şebekelerinde, planlanan bağlantı noktasındaki şebekenin kısa devre gücünün (MVA) küçük yüzdesinin daha azına, toplam yenilenebilir güç oranlarını sınırlayarak ve güç kalitesi korunarak ihtiyaç karşılanabilir. Bu limit gelişmiş ülkelerde genellikle % 2-3, gelişmekte olan ülkelerde ise % 5'tir ve epeyce kısıtlayıcı olur. Çünkü, güçlü rüzgâr alanı genellikle şebekenin zayıf olduğu kırsal alanlarda mevcuttur [27].

5. ÖRNEK SİSTEM İNCELEMESİ

5.1 Örnek Sistem

Günümüzde, rüzgâr enerjisine dayalı elektrik enerjisi üretim tesisi içeren elektrik enerji sistemlerinde, karşılıklı etkilenmeler açısından incelemeler bir çok araştırmacı tarafından gerçekleştirilmektedir. Rüzgâr santralının şebekeye bağlantı noktasının neresi olacağı, elektrik enerji sisteminde meydana gelecek çeşitli arızalar durumunda sistem üzerinde yaşanacak gelişmeler üzerine incelemeler önemlidir.

Bu tez çalışmasında, üç baralı bir halka şebeke üzerinde, çeşitli yerlerde ve tiplerdeki kısa devreler, rüzgâr santralının şebekeye bağlı olması ve şebekeyle bağlantısının kesilmiş olduğu durumları için incelenmiştir. Ayrıca rüzgâr santralının devreye girmesi ve rüzgâr hızının değişmesi durumları da incelenerek, bu durumlarda ortaya çıkan etkiler değerlendirilmiştir. Bunun için ele alınan üç baralı örnek test sistemi, bir adet eşdeğer şebeke bara modeli ve bir adet rüzgâra dayalı elektrik üretim tesisi (rüzgâr santrali) modellerinden oluşmaktadır. Her barada birer adet yük olan örnek elektrik dağıtım sistemine ilişkin veriler sistem şeması üzerinde şekil 5.1’de gösterilmiştir.

İncelemeler için farklı arıza noktaları göz önüne alınmıştır. Bu arıza noktaları şunlardır.

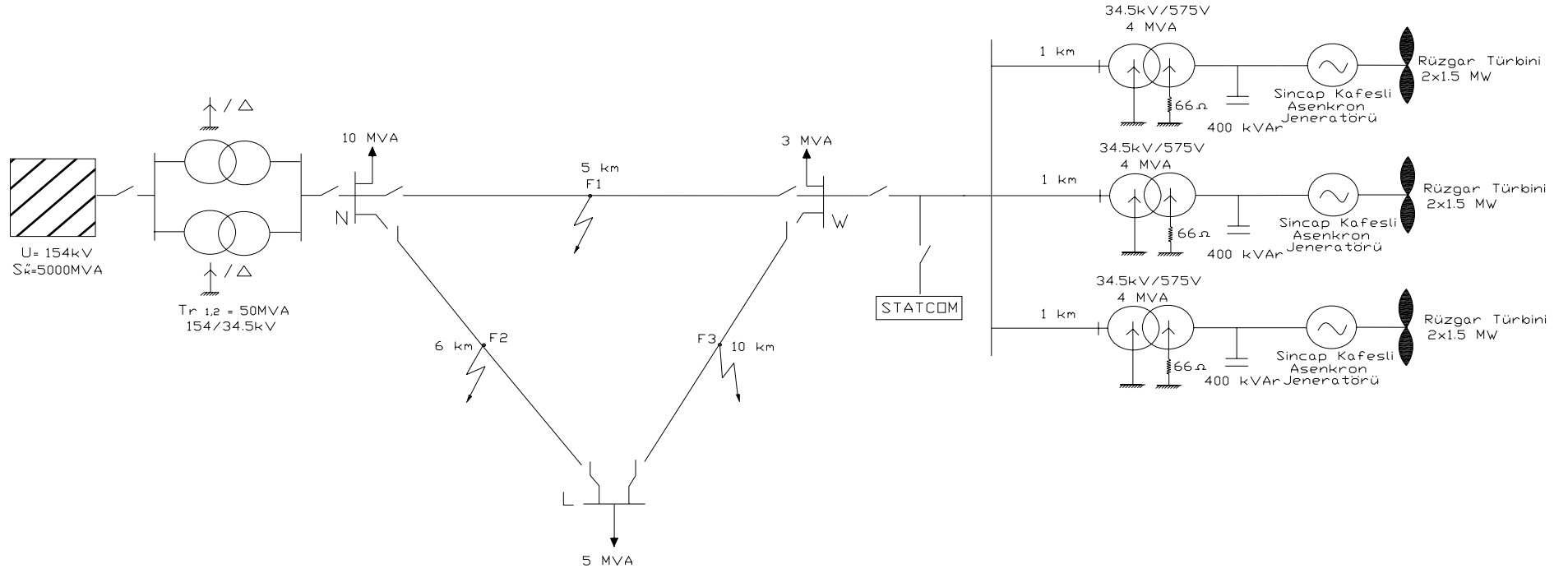
F1: NW hattı üzerinde arıza olması durumu,

F2: NL hattı üzerinde arıza olması durumu,

F3: WL hattı üzerinde arıza olması durumu.

5.2 Örnek Sistem Verileri

Örnek sistem üzerindeki benzetimler, Matlab [28] ortamında yapılmıştır. 34.5 kV gerilim seviyesinde çalıştığı kabul edilen örnek test sistemine ilişkin hat bilgileri sıfır, doğru ve ters bileşen olarak birim km başına direnç, endüktans ve kapasite değerleri olarak alınmıştır. İncelemelerde hatların pigeon tipi iletken yapıldığı kabul edilmiştir.



Şekil 5.1 : Örnek sistem şeması

Benzetim incelemelerinde, 6 tane 1.5 MW'lık rüzgâr türbini içeren bir rüzgâr çiftliği 34.5 kV'luk dağıtım sistemi hatları üzerinden 154 kV'luk şebekeye bağlıdır. Modelde yer alan rüzgâr türbinlerinde, çalışmanın 3 numaralı bölümünde açıklaması verilen sincap kafesli asenkron generatörlerin kullanıldığı varsayılmıştır. Generatörler, kanat eğimi değişebilir bir rüzgâr türbini ile tahrik edilmektedir [28].

Asenkron generatörler tarafından çekilen reaktif güç, alçak gerilim barasında her bir rüzgâr türbini çifti için 400 kVAr kondansatör grupları ile kısmen sağlanmaktadır. Ayrıca rüzgar çiftliğinin ana bağlantı barası olan 34.5 kV'luk W barasında, gerilim ayarına destek amacıyla 3 MVar'lık bir Statcom da göz önüne alınmıştır. Şekil 5.1'de gösterilen örnek test sisteminde yük olarak pasif eleman kullanılmıştır. N, L ve W baralarında sırasıyla 10 MVA, 5 MVA ve 3 MVA gücünde, güç faktörü 0.8 olan yükler seçilmiştir. Rüzgâr santralının büyük güçlü ve küçük güçlü şebekeye bağlanması durumundaki etkilenmeleri görmek amacıyla iki farklı eşdeğer şebeke kısa devre gücü göz önüne alınarak kısadevre incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Göz önüne alınan eşdeğer şebeke kısa devre güçleri; güçlü şebekeye karşılık olarak $S_k''=5000$ MVA ve zayıf şebekeye karşılık olarak $S_k''=500$ MVA'dır. Şebekeye bağlı rüzgâr çiftliği, toplam 9 MVA gücünde olup elektrik dağıtım sistemine paralel bağlanmıştır.

5.3 Benzetimlerin Ana Hatları

Kullanılan örnek test sisteminde benzetimler, Matlab 7.0.1 [28] bilgisayar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örnek sistemdeki rüzgâr santrali için, simulink power system toolbox içinde yer alan rüzgâr santrali modeli kullanılmıştır. Benzetimde, fazör domen incelemesi gerçekleştirilmiştir. Hat üzerinde yaratılan, farklı yerlerde ve farklı tiplerdeki kısa devre arızaları için yapılan incelemeler, rüzgâr santralının şebekeye bağlı olması ve şebekeye bağlantısının kesilmiş olduğu durumları için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kısa devre akımları sonuçları tablolarda karşılaştırılmıştır. Böylece farklı arıza yerlerinin ve arıza tiplerinin etkileri gözlenmiştir. Model üzerinde F1, F2 ve F3 olmak üzere, üç farklı hata yerinde yapılan incelemelerde, hata yeri hatların ortaları kabul edilmiştir. Örnek sistem üzerinde rüzgâr santralının devreye girmesinin ve rüzgâr hızındaki değişimin etkisini görmek amacıyla da inceleme yapılmıştır.

5.4 Farklı Çalışma Koşullarının Yarattığı Etkiler

5.4.1 Arızalar Açısından Etkiler

İncelenen sistem üzerinde arıza yerinin etkisini görmek amacıyla göz önüne alınan farklı arıza yerleri için benzetimler yapılmıştır. Hat üzerinde meydana gelen arızaların geçiş empedansları (arıza dirençleri), etkilenmeler açısından oldukça büyük önem taşıyabilmektedir. Arıza empedansının düşük olması, şebeke gerilim ve akım değerlerinde önemli düşüş ve yükselişlere neden olmaktadır. Buna karşılık, çok yüksek arıza empedansları ise, tam tersi arızanın şebeke gerilim ve akımına olan etkisini zayıflatmaktadır. Bu tez çalışmasında, arıza empedansı $Z_f=0,001 \Omega$ olarak alınmış ve benzetimler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar tablolarda sunulmuştur.

Ayrıca LW hattının devrede olması yada olmaması durumu için de incelemeler yapılmıştır. LW hattının devrede olmaması durumu, rüzgâr santralının doğrudan indirici merkeze bağlı olduğu duruma karşılık olmaktadır. LW hattının devrede olması ise rüzgâr santralının dağıtım sistemine bağlı olması durumuna karşılık olacaktır.

İncelemelerde, hatlarda meydana gelebilecek tüm arıza çeşitlerinde, sonuçları gözlemlemek için, benzetimi gerçekleştirilen model sistem üzerinde farklı arıza tipleri için de hesaplamalar yapılmıştır. Bu amaçla model sistemde üç faz toprak (3FT), üç faz (3F), iki faz toprak (2FT), iki faz (2F) ve bir faz toprak (1FT) arızaları gerçekleştirilerek karşılaştırmalı sonuçlar tablolarda gösterilmiştir.

F1 arıza durumu için LW hattının olması durumunda sonuçlar Tablo 5.1’de, LW hattının olmaması durumunda sonuçlar ise Tablo 5.2’de verilmiştir.

F2 arıza durumu için LW hattının olması durumunda sonuçlar Tablo 5.3’de, F3 arıza durumu için LW hattının olması durumunda sonuçlar Tablo 5.4’de verilmiştir.

Tablo 5.1: Arıza yerinin NW hattı olması durumunda, arıza akımları .

Arıza Tipi	Arıza Akımı [A]			
	Rüzgâr Santralının Şebekeye Bağlı Olması Durumunda		Rüzgâr Santralının Şebekeye Bağlantısının Kesilmesi Durumunda	
	$S_k''=5000 \text{ MVA}$ $Z_f=0,001 \Omega$	$S_k''=500 \text{ MVA}$ $Z_f=0,001 \Omega$	$S_k''=5000 \text{ MVA}$ $Z_f=0,001 \Omega$	$S_k''=500 \text{ MVA}$ $Z_f=0,001 \Omega$
3FT	5388	3917	5100	3641
3F	5388	3917	5100	3641
2FT	4939	3657	4590	3321
2F	4740	3467	4417	3154
1FT	1072	998	930.2	881.8

Tablo 5.2: LW hattının devrede olmaması ve arıza yerinin NW hattı olması durumunda, arıza akımları.

Arıza Tipi	Arıza Akımı [A]			
	Rüzgâr Santralının Şebekeye Bağlı Olması Durumunda		Rüzgâr Santralının Şebekeye Bağlantısının Kesilmesi Durumunda	
	$S_k''=5000 \text{ MVA}$ $Z_f=0,001 \Omega$	$S_k''=500 \text{ MVA}$ $Z_f=0,001 \Omega$	$S_k''=5000 \text{ MVA}$ $Z_f=0,001 \Omega$	$S_k''=500 \text{ MVA}$ $Z_f=0,001 \Omega$
3FT	5078	3763	4711	3432
3F	5078	3763	4711	3432
2FT	4672	3521	4250	3138
2F	4476	3334	4079	2972
1FT	1056	982.7	920.3	872.4

Tablo 5.3: Arıza yerinin NL hattı olması durumunda, arıza akımları.

Arıza Tipi	Arıza Akımı [A]			
	Rüzgâr Santralının Şebekeye Bağlı Olması Durumunda		Rüzgâr Santralının Şebekeyle Bağlantısının Kesilmesi Durumunda	
	$S_k''=5000 \text{ MVA}$ $Z_f=0,001 \Omega$	$S_k''=500 \text{ MVA}$ $Z_f=0,001 \Omega$	$S_k''=5000 \text{ MVA}$ $Z_f=0,001 \Omega$	$S_k''=500 \text{ MVA}$ $Z_f=0,001 \Omega$
3FT	4724	3524	4636	3400
3F	4724	3524	4636	3400
2FT	4248	3196	4184	3109
2F	4053	3010	4015	2945
1FT	1058	984.4	918.5	870.8

Tablo 5.4: Arıza yerinin LW hattı olması durumunda, arıza akımları.

Arıza Tipi	Arıza Akımı [A]			
	Rüzgâr Santralının Şebekeye Bağlı Olması Durumunda		Rüzgâr Santralının Şebekeyle Bağlantısının Kesilmesi Durumunda	
	$S_k''=5000 \text{ MVA}$ $Z_f=0,001 \Omega$	$S_k''=500 \text{ MVA}$ $Z_f=0,001 \Omega$	$S_k''=5000 \text{ MVA}$ $Z_f=0,001 \Omega$	$S_k''=500 \text{ MVA}$ $Z_f=0,001 \Omega$
3FT	2878	2394	2756	2254
3F	2879	2394	2756	2254
2FT	2631	2214	2546	2107
2F	2453	2032	2387	1952
1FT	949	886.6	840.4	798.3

F1, F2 ve F3 arızaları durumunda, farklı arıza tiplerine göre elde edilen ve yukarıdaki tablolarda gösterilmiş sonuçlara göre değerlendirme yapıldığında; rüzgâr santralının şebekeyle bağlantısının kesilmiş olduğu durum için elde edilen kısa devre akım değerlerinin, rüzgâr santralının şebekeye bağlı olması durumu için elde edilen kısa devre akım değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Rüzgâr santralının devrede olduğu durumda akım değerlerinin daha yüksek olmasının nedeni, doğal olarak arıza noktasının beslenmesinde rüzgâr santralının de katkıda bulunmasından kaynaklanmaktadır. Rüzgar santrali devre dışı iken, arızanın NW hattında olması durumunda (LW hattı varken), arıza akımındaki düşüş yüzdeleri, 3FT, 3F, 2FT ve 2F arıza tipleri için diğer arıza yerlerindeki daha fazladır. Ancak, kısa devre akım değerindeki bu düşüş yüzdesi 1FT arızası için, 3 ayrı arıza yeri içinde birbirine yakın değişim yüzdesi göstermiştir. 1FT arızası için bu değişim yüzdelerini rakamsal olarak verirsek, örneğin; 5000 MVA şebeke kısa-devre gücü için, rüzgâr santralının devre dışı olması durumunda, F1 arızasında, % 13.23, F2 arızasında % 13.19 ve F3 arızasında % 11.45 oranında yaklaşık bir düşüş gözlenmiştir. NW hattında, 3FT, 3F, 2FT ve 2F arıza tiplerinde arıza akım değerlerinin düşüş yüzdelerinin fazla olması, F1 arıza noktasının rüzgâr santraline diğer arıza yerlerinden daha yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

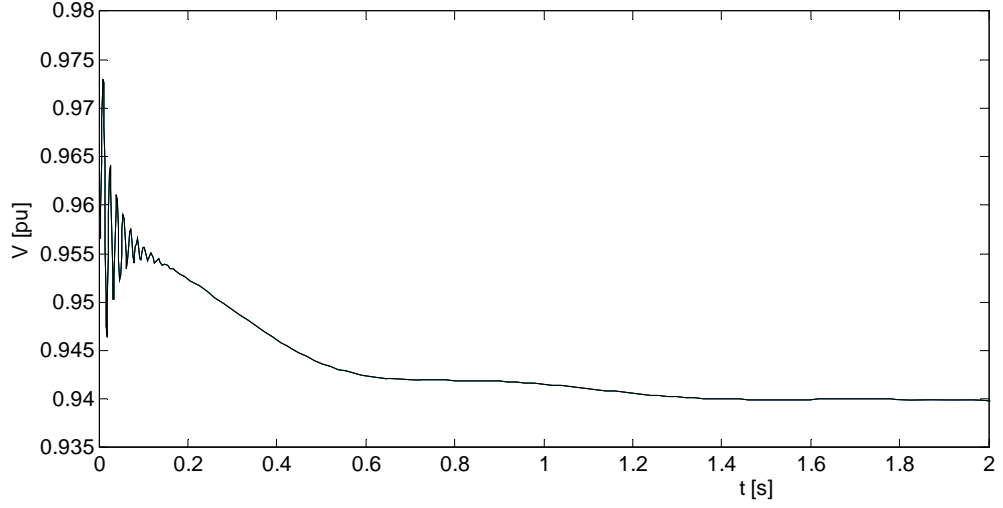
Şebeke kısa-devre güçleri 5000 MVA ve 500 MVA için akım değişim yüzdelerine baktığımızda, rüzgar santrali devre dışı iken, 3FT, 3F, 2FT ve 2F arıza tiplerindeki akım düşme oranının, şebeke kısa devre 500 MVA iken küçük oranda dahi olsa biraz daha düşük olduğu gözlenmiştir.

5.4.2 Rüzgâr Santralının Çalışma Koşulları Açısından Etkiler

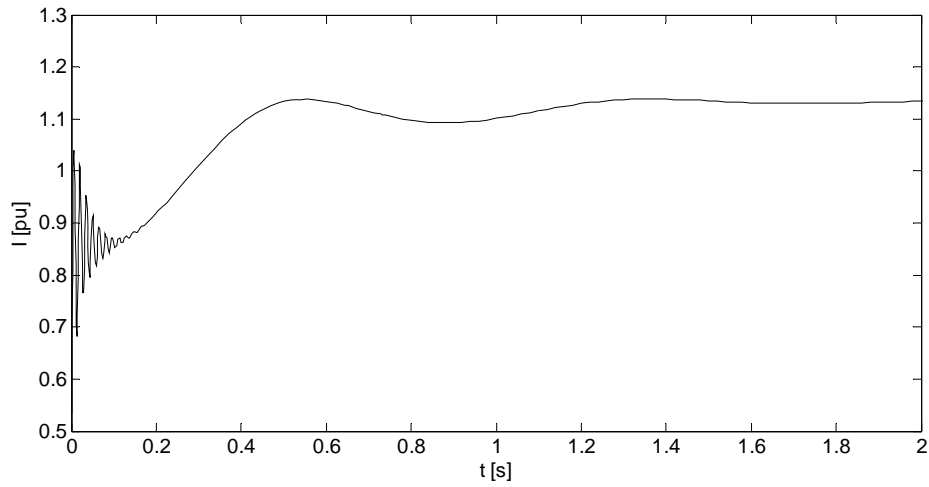
Rüzgâr santrali içeren dağıtım sisteminde, rüzgâr santralının devreye girmesi ve rüzgâr santralının üretimi üzerinde etkisi olan rüzgâr hızı değişiminin etkileri incelenmiştir.

İlk çalışma anında rüzgâr santralının davranışı, Şekiller 5.2-5.5.7'de verilmiştir. Bu şekillerden görüleceği üzere, santralin aktif güç değerinin belirli bir değere oturması sürecinde, kanat eğim açısı küçük miktarda değişim göstermektedir (Şekil 5.5). Bu incelemeler Şekil 5.6'da gösterildiği gibi rüzgâr hızının 9 m/s sabit olması durumu için gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr santralının devreye girme sürecinde bara gerilimi, kullanılan rüzgâr santrali modeli nedeniyle küçük miktarda çok kısa süre salınarak

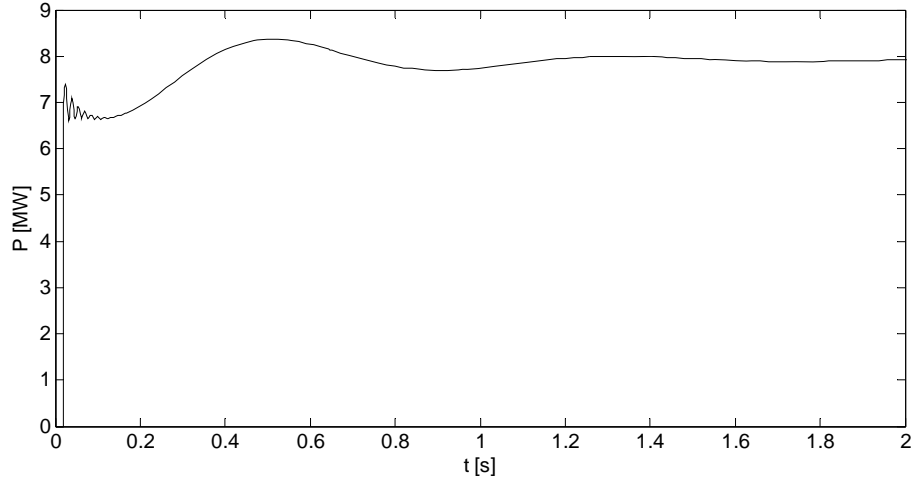
0.94 pu değerine oturmaktadır, aktif gücün sürekli değeri ise yaklaşık 8 MW olmaktadır.



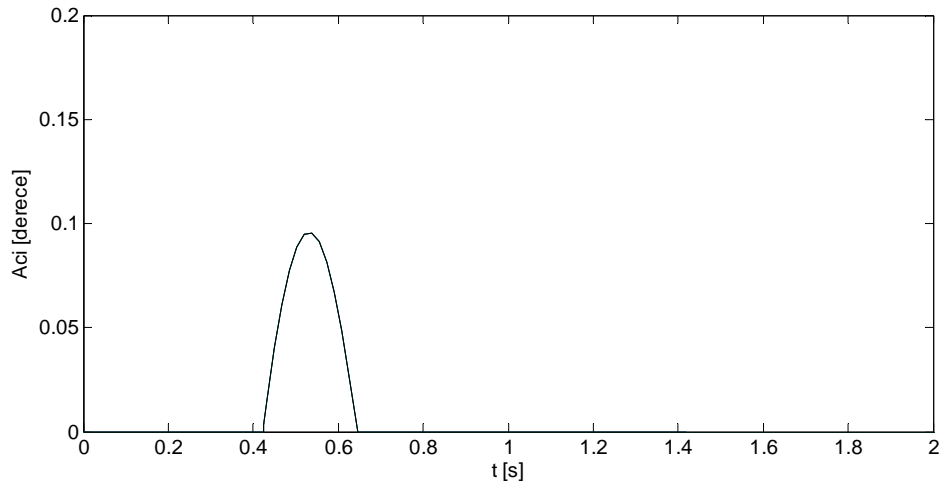
Şekil 5.2 : Rüzgâr santralının devreye girmesi durumunda W barası gerilimi değişimi



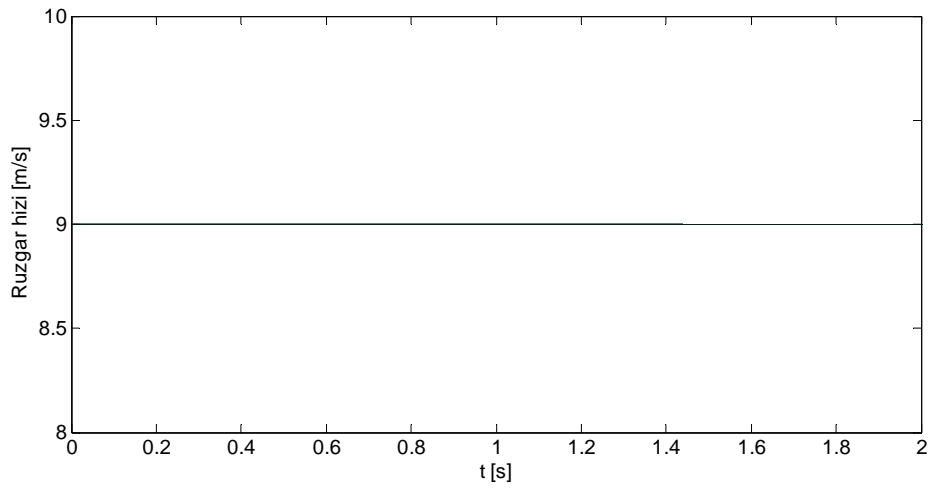
Şekil 5.3 : Rüzgâr santralının devreye girmesi durumunda çekilen akımın değişimi



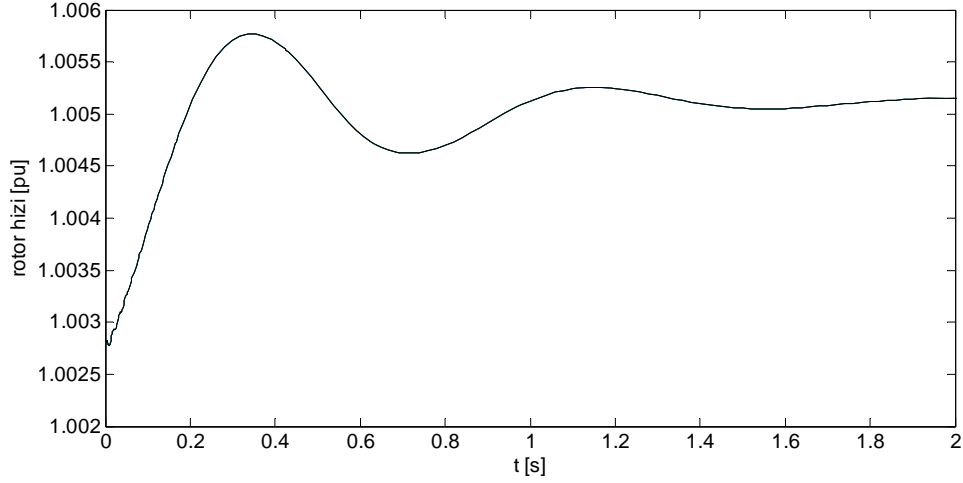
Şekil 5.4 : Rüzgâr santralının devreye girmesi durumunda aktif gücün değışimi



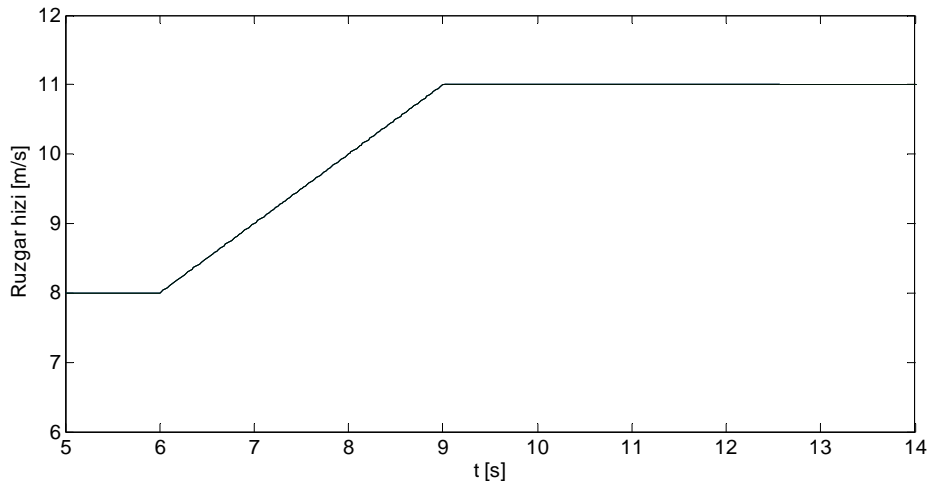
Şekil 5.5 : Rüzgâr santralının devreye girmesi durumunda kanat açısının değışimi



Şekil 5.6 : Rüzgâr hızının sabit olması durumu

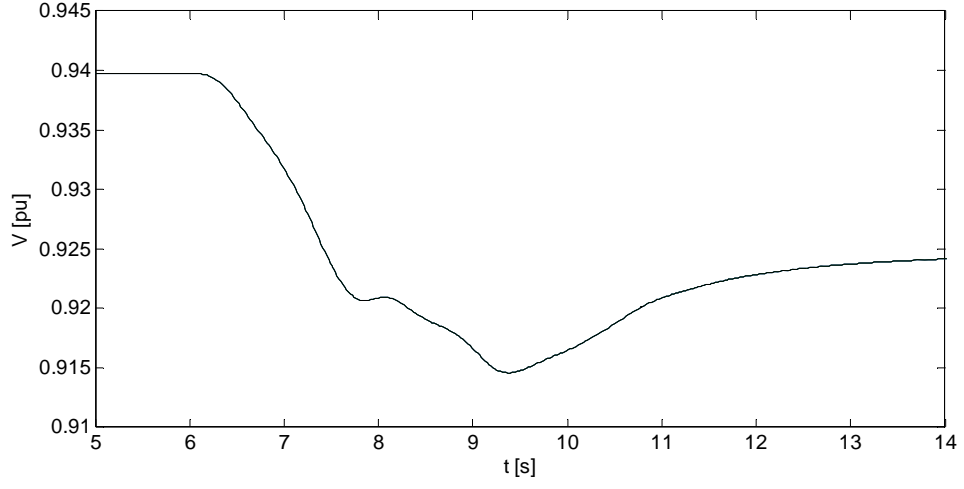


Şekil 5.7 : Rüzgâr santralinin devreye girmesi durumunda rotor hızının değişimi

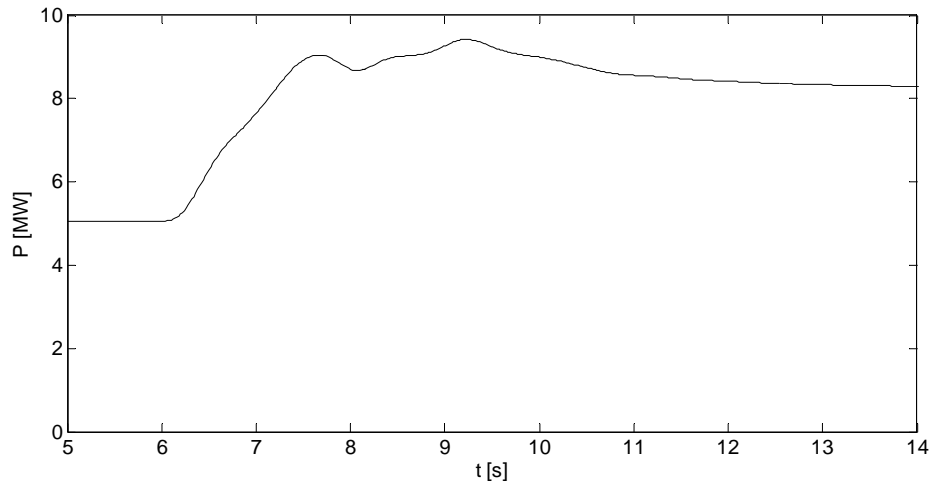


Şekil 5.8 : Rüzgâr hızının değişmesi durumu

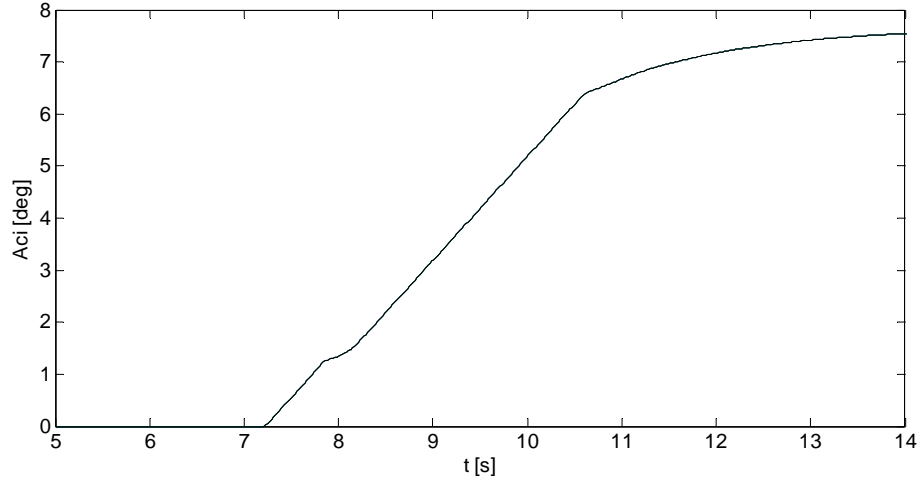
Rüzgâr hızındaki değişimin yarattığı etkileri görmek amacıyla rüzgâr hızının 6. saniyede artmaya başlayarak 8 m/s den 9. saniyede 11 m/s hıza ulaşması durumu göz önüne alınmıştır (Şekil 5.8). Bu durumda, bara geriliminde bir değişim yaşandığı (Şekil 5.9) ve rüzgâr santralinin aktif gücünün arttığı izlenmiştir (Şekil 5.10). Kanat eğim açısı ve rotor hızının değişimi ise şekiller 5.11 ve 5.12'de verilmiştir. Rüzgâr hızındaki değişim nedeni ile santralin ürettiği aktif güç değeri yaklaşık 5 MW değerinden rüzgâr hızındaki artma sonucu 8 MW'ın üzerine çıkmaktadır. Aktif güçteki artışla uyumlu olarak bara geriliminde küçük bir düşüş gözlenmiştir. Rüzgâr hızındaki değişim sürecinde, kanat açıları rüzgâr hızı değişimi nedeni ile değişmektedir, bu durumda kanat açılarındaki değişim yukarıda verilen rüzgâr santralinin devreye girme anındaki değişime göre oldukça yüksektir.



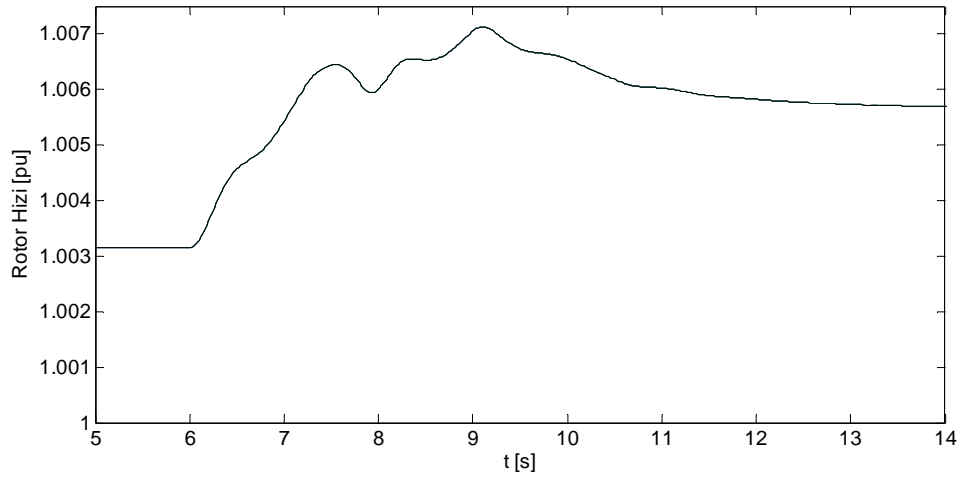
Şekil 5.9 : Rüzgâr hızının değişmesi durumunda W barası gerilimi değişimi



Şekil 5.10 : Rüzgâr hızının değişmesi durumunda W barası aktif gücü değişimi



Şekil 5.11 : Rüzgâr hızının değişmesi durumunda kanat açısının değişimi



Şekil 5.12 : Rüzgâr hızının değişmesi durumunda Rotor hızının değişimi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Dünya nüfusunun sürekli artması, insanların ihtiyaçlarının da artması anlamına gelmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte en önemli ihtiyaçlardan biri haline gelen elektrik enerjisi ihtiyacı da, sürekli olarak artmaktadır ve daha fazla enerji tüketilmektedir. Basit bir yaklaşımla, daha fazla elektrik enerjisi tüketebilmek için, daha fazla üretmek gerekir ve daha fazla üretebilmek içinde, enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır.

Elektrik enerjisi ihtiyacının büyük bir kısmının karşılandığı fosil enerji kaynaklarının ömürlerinin sınırlı olması ve dolayısıyla hızla tükenmesinin yanısıra, sera gazı emisyonunu arttırarak, küresel ısınmanın başlıca sorumlusu olarak görülmeleri, insanoğlunu yenilenebilir alternatif temiz enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Son yıllarda uygulamaları hızla artan hidrolik, güneş, rüzgâr, jeotermal ve biokütle gibi alternatif enerji kaynakları arasında, rüzgâr enerjisinin büyüme hızı çok etkileyicidir.

Rüzgâr enerjisinin Dünya genelinde büyük bir potansiyele sahip olmasının yanında, şebekeye bağlı rüzgâr santrallerinin kullanımı sırasında elektrik sistemindeki etkilenmeler ciddi olumsuzlukları da beraberinde getirmektedir.

Rüzgâr santralleri konvansiyonel santrallerden farklı olarak değişken üretim yaparlar. Şebekeye bağlı rüzgâr santrallerinin toplam kurulu gücü arttıkça sistem üzerindeki bozucu etkiler ve bunların sebep olacağı tehlikelerde artar. Bu yüzden, rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlanma oranlarına bazı kısıtlamalar getirilmiştir. Bu orana göre, gelişmekte olan ülkelerde, bağlantı noktasının minimum kısa devre gücünün en çok % 5'i kadar, gelişmiş ülkelerde ise % 2-3'ü kadar kurulu güçte rüzgâr santrali bağlantısına izin verilmesi koşulu vardır. Ülkemizde de bu oran %5'tir ve bu elektriğin arz kalitesi koşulu olarak vurgulanmıştır.

Şebekeye olan bozucu etkiler arasında, sistem dinamiği ve kararlılığı, reaktif güç kontrolü, gerilim kontrolü ve frekans kontrolü problemleri olduğu bilinmektedir.

Gerilim dalgalanmaları, titreme etkisi, harmonikler güç kalitesinin bozulmasına sebep olan etkiler yaparlar. Şebeke kapasitesi sınırlamaları çerçevesinde, sürekli hal ısıl sınırlamaları ve şebeke tıkanması, kısa devre güçleri ve akımları olumsuzluklar olarak karşımıza çıkar.

Rüzgâr çiftliğinin şebeke ile bağlantısının kesilmesi, ani gerilim düşmeleri ve arızalar gibi şebeke üzerinde yaşanan şiddetli bozukluklar durumu kötüleştirebilir. Ada şebekelerde veya yüksek rüzgâr gücü nüfuzlu iletim şebekelerinde yaşanan 3 fazlı hatalarda, bu özellikle doğrudur. Eğer rüzgâr çiftliği devre dışı kalırsa, bu önemli üretim kaybına yol açabilir ve bu durum enerji dağıtım istasyonlarındaki aşırı yükü kaldırmak için belirli bölgelerde kısa süreli elektrik kesintilerine, hatta daha kötü durumda sistemin çökmesine sebep olabilir.

Bu çalışmada, rüzgâr santrali içeren elektrik sistemlerinde etkilenmelerin ve meydana gelebilecek kısa-devreler açısından sistem durumunun incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda göz önüne alınan, rüzgâr santrali içeren üç baralı bir örnek şebeke üzerinde gerçekleştirilen kısa devre benzetimleri ile rüzgâr santralinin şebekeye bağlı olması ve şebekeyle bağlantısının kesilmiş olduğu durumları için, çeşitli yerlerde ve tiplerdeki kısa devreler incelenmiştir. Benzetimlerde rüzgâr santralinin bağlı bulunduğu şebekenin güçlü ve zayıf olması gibi durumlar da göz önüne alınarak, elde edilen veriler kıyaslanmıştır.

Farklı arıza noktaları ve farklı arıza tiplerine göre elde edilen veriler kıyaslandığında, rüzgâr santralinin şebekeyle bağlantısı olmadığı zaman elde edilen kısa devre akım değerlerinin, rüzgâr santrali şebekeyle bağlı iken elde edilen kısa devre akım değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Şebekeye bağlı rüzgâr santralinin, arıza noktasının beslenmesine yaptığı katkı nedeni ile olan bu durum, beklentilerle uyumludur ve rüzgar santrallerinin paralel bağlanacağı dağıtım sistemlerinde uygun sistem yapısı ve önlemler açısından arıza incelemelerinin önemli olabileceğini göstermektedir.

Çalışma koşulu açısından yaptığımız incelemede, rüzgâr santralinin devreye girmesi sürecinde bara gerilimi küçük miktarda çok kısa süre salınarak belli bir değere oturmaktadır. Dolayısıyla akım değeride türbin çalışmaya başladığında küçük değerli

salınımlardan sonra kararlı bir hal alması durumu aktif güç değişiminde de görülmektedir. Aktif gücün belirli bir değere oturmasına, kanat açısındaki küçük miktardaki ayarlamaların da etkisi vardır.

Rüzgâr türbininin sabit hızda normal çalışması sırasında rüzgâr hızındaki değişimin etkisini incelediğimizde, rüzgâr hızının sabit bir değere, belli bir değere kadar artarak değişmesi sırasında, rüzgâr santralının bağlı olduğu baradaki gerilimin ve aktif gücün küçük bir değişim sonrası belirli bir değere oturduğu elde edilen eğrilerde görülmüştür. Bu durum aktif gücün ve gerilimin, rüzgar hızındaki değişimle bağlantılı olduğunu göstermektedir.

Gelecekte, rüzgâr santrali içeren dağıtım sistemlerindeki incelemeler, gelişmekte olan yeni rüzgâr türbin modelleri ile ilerletilebilir. Ayrıca, farklı tipte yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı, birden fazla enerji üretim birimi içeren elektrik dağıtım sistemi üzerindeki etkilenmeler açısından incelemeler geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Tanay Sıdkı Uyar**, Enerji, Aylık Haber ve Araştırma Dergisi, Şubat 2006, Sayı:6, Sa.24-26
- [2] www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WF12/RzgarGc12.pdf (Nisan 2006)
- [3] **Zhou, F., Joos,G., Abbey, C.**, 2005. Voltage stability in weak connection wind farms, *Power Engineering Society General Meeting*, IEEE, **2**, 1483-1488.
- [4] **Wilk, J., Gjerde, J.O., Gjengedal, T., Gustafsson, M.**, 2002. Steady state power system issues when planning large wind farms, *Power Engineering Society Winter Meeting*, IEEE, **1**,199-204.
- [5] **Palsson, M.P., Toftevaag, T., Uhlen, K., Tande, J.O.G.**, 2002. Large-scale wind power integration and voltage stability limits in regional networks, *Power Engineering Society Summer Meeting*, IEEE, **2**, 762-769.
- [6] **Ha, L.T., Saha, T.K.**, 2004. Investigation of power loss and voltage stability limits for large wind farm connections to a subtransmission network, *Power Engineering Society General Meeting*, IEEE, **2**, 2251-2256.
- [7] **Amora, M.A.B., Bezerra, U.H.**, 2001. Assessment of the effects of wind farms connected in a power system, *Power Tech Proceedings*, IEEE, **4**, (532+538+512+432).
- [8] **Sun, T., Chen, Z., Blaabjerg, F.**, 2004. Transient analysis of grid-connected wind turbines with DFIG after an external short-circuit fault, *Nordic Wind Power Conference*, Göteborg, Sweden,1-2 March.

- [9] **Selçuk Karadeli**, Kasım 2001, Rüzgâr Enerjisi, Temiz enerji Vakfı, EİE Genel Müdürlüğü, Ankara.
- [10] **Deniz Moralı, Tanay Sıdkı Uyar**, Ocak 2005, Alternatif enerji kaynakları ve teknolojiler, Türkiye ve rüzgâr enerjisinden yararlanma potansiyeli, *Bilim ve Gelecek*, **11**, 16-21, 30-32 .
- [11] www.ressiad.org.tr (Mart 2006)
- [12] www.canwea.ca (Nisan 2006)
- [13] www.ruzgarenerjisibirligi.org.tr (Nisan 2006)
- [14] **Mahir Aydın**, 2003, Rüzgâr Enerjisi, *Mühendis Türk*, Nisan, 15-17.
- [15] www.sunflower.net/how_wind_works.htm#drawing (Nisan 2006)
- [16] www.meteor.gov.tr/2005/arastirma/yenienerji/ruzgarturbin.pdf (Nisan 2006)
- [17] **Tanay Sıdkı Uyar**, 1998 Enerji Üretiminde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımı, *Elektrik Mühendisliği*, Ocak , **403**, 27-31.
- [18] <http://web.gyte.edu.tr/enerji/ruzgarenerji> (Haziran 2006)
- [19] http://en.wikipedia.org/wiki/wind_power (Eylül 2006)
- [20] http://www.rec.org.tr/files/iklim/iklim-projeler/iklim-projeler_2/2728PDFs/1/E_Demirer_II.pdf (Temmuz 2006)
- [21] www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=48150&tipi=5&sube=15 (Ağustos 2006)
- [22] **Ackermann, T.**, 2005. Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- [23] **Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E.**, 2001. Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.

- [24] **Bousseau, P., Fesquet, F., Belhomme, R., Nguéfeu, S., Thai, T.,C.,** 2005. Solution for the Grid Integration of Wind Farms- a Survey, Wiley Interscience, Volume 9, 13-25, John Wiley & Sons, Ltd
- [25] **Arsan, F.,** 2001. Şebeke Bağlantı Yöntemleri, *Rüzgâr Enerjisi Sempozyumu*, Alaçatı, İzmir, 5-7 Nisan, s.141-147
- [26] **TEİAŞ,** 2005. Yenilenebilir Kaynaklardan Değişken Üretim Yapan Santrallerin Elektrik Üretim-İletim Sistemine Teknik ve Ekonomik Etkileri ve AB Uygulamaları, Mart, Ankara.
- [27] **Patel, M.R.,** 2006. Wind and Solar Power Systems Design, Analysis and Operation, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- [28] **MATLAB 7.0.1,** 2004, Release 14, Simulink, SimPowerSystems toolbox, The MathWorks Inc., Natick MA, USA.

ÖZGEÇMİŞ

Kadir TEKİN, Rize'nin Ardeşen ilçesinde doğmuştur. Orta ve lise dönemini Ardeşen'de 1986 yılında tamamlamıştır.

1987 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünü 1992 yılında tamamlamış ve aynı yıl kazandığı İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans programına başlamıştır. Yüksek lisans derslerini tamamladıktan sonra, tez aşamasında belli dönemlerde ara vermek durumunda kaldığı eğitime, 2005 yılında tekrar kayıt yaptırarak, insanlık ve doğa için temiz bir enerji kaynağı olan rüzgâr enerjisi üzerine çalışarak devam etme kararı vermiştir.

Ağırlıklı olarak aydınlatma sektöründe olmak üzere, çeşitli sektörlerde çalışan Kadir TEKİN, halen Elektrik Mühendisleri Odası'nda görev yapmaktadır ve yüksek lisans tez çalışmasını tamamladıktan sonra, iş hayatını rüzgâr enerjisinden elektrik üretme alanında çalışarak devam ettirme düşüncesindedir.