

**RÜZGAR SANTRALLERİ VE ENERJİ
SİSTEMLERİNE BAĞLANTILARININ
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elk. Müh. Utku POLAT
Enstitü No: 504961348**

101052

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Temmuz 2000
Tezin Savunulduğu Tarih : 22 Ağustos 2000**

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Canbolat UÇAK

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Zekai ŞEN

Yrd.Doç.Dr. Deniz YILDIRIM

EYLÜL 2000

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÖZET.....	vii
SUMMARY.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Dünya’da Rüzgar Enerjisi.....	3
1.2 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi.....	7
2. RÜZGAR ENERJİSİ.....	17
2.1 Küresel Rüzgarlar.....	17
2.1.1 Geostrophic Rüzgarlar.....	17
2.1.2 Yüzey Rüzgarları.....	18
2.2 Yerel Rüzgarlar.....	18
2.3 Rüzgar Gücü.....	19
2.4 Rüzgar Enerjisini Etkileyen Faktörler.....	20
2.4.1 Yeryüzünün Engebeliliği.....	20
2.4.2 Rüzgar Engelleri.....	21
2.4.3 Park Etkisi.....	23
2.4.4 Tünel Etkisi.....	23
2.4.5 Tepe Etkisi.....	23
2.5 Weibull Dağılımı.....	24
2.6 Rüzgardan Elde Edilebilecek Elektrik Gücünün Hesabı.....	24
2.7 Rüzgar Türbinleri.....	28
2.7.1 Yatay Eksenli Türbinler.....	28
2.7.2 Düşey Eksenli Türbinler.....	28
2.7.3 Eğik Eksenli Türbinler.....	28
2.8 Rüzgar Enerjisinin Ekonomisi.....	28
2.8.1 Basit Hesap.....	30
2.8.2 Sermaye Bütçeleme Hesabı(Detaylı Hesap).....	30
3. ŞEBEKE BAĞLANTISI.....	33
3.1 Şebeke Bağlantısı.....	34
3.1.1 Frekans Çevirici Sistemleri.....	34
3.1.2 Frekans Çeviricilerinin Tasarımı.....	38
3.1.3 Ara Devreli Frekans Çeviricileri.....	40
3.1.3.1 Generatör ve Doğrultucu Arasındaki Hat.....	41
3.1.3.2 Doğrultucular.....	42
3.1.3.3 Tristörlü Eviriciler.....	43
3.1.3.4 Darbe Genişlik Modülasyonlu Eviriciler.....	45
3.2 Şebekenin Korunması.....	46
3.2.1 Kısa Devre Gücü.....	46
3.2.2 Kısa Devre Gücünün Artması.....	47

3.2.3 Şebekedeki Yüksek Gerilim Hataları.....	49
3.3 Şebeke Etkileri.....	49
3.3.1 Rüzgar Enerjisi Santrallerinin Çıkış Davranışı.....	49
3.3.2 Şebeke Gerilim Davranışı.....	50
3.3.2.1 Gerilim Seviyesi.....	50
3.3.2.2 Gerilim Simetrisizliği.....	50
3.3.2.3 Gerilimdeki Değişimler ve Gerilim Dalgalanmaları	53
3.3.2.4 Titreşim Etkisi.....	56
3.3.3 Harmonikler.....	56
3.4 Normal Çalışma Sırasında Şebekedeki Rezonans Etkisi.....	59
3.5 Şebeke Etkisine ve Rezonansına Karşı Düzeltici Önlemler.....	60
3.5.1 Filtreler.....	61
3.5.2 Filtre Tasarımı.....	62
3.5.3 Kompanzasyon Ünitesinin ve Seri Rezonans Filtresinin Görevi.....	64
4. SONUÇ.....	66
KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİŞ.....	70

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1 Tesis edilen rüzgar türbini kapasitesi.....	5
Tablo 1.2 Avrupa Birliği'nin yenilenebilir enerji kaynakları kapasitesi.....	6
Tablo 1.3 Avrupa Birliği'nin yenilenebilir enerji kaynakları yıllık büyümesi....	7
Tablo 1.4 Türkiye rüzgar enerjisi potansiyelinin bölgesel dağılımı.....	9
Tablo 1.5 Rüzgar potansiyelince zengin bölgeler.....	10
Tablo 1.6 Türkiye rüzgar santrali projelerinde son durum.....	11
Tablo 1.7 Batı Anadolu Bölgesi'ndeki sekiz yörenin rüzgar gücü yoğunluğu....	14
Tablo 2.1 Hakim rüzgar yönleri.....	18
Tablo 2.2 Engebelilik sınıfı.....	21
Tablo 2.3 Weibull dağılımını temel alan ve yılda üretilen enerji.....	31



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 1897 yılında Askov Folk Koleji'nde kurulan 2 adet rüzgar türbini.....	2
Şekil 1.2 Gedser'de kurulan 200 kW'lık rüzgar generatörü.....	3
Şekil 1.3 California Palm Springs'teki rüzgar tarlası.....	4
Şekil 1.4 Yenilenebilir enerji programı 1995-1998 yılları arasında desteklediği proje yatırımları.....	7
Şekil 1.5 Temmuz 1997 – Haziran 1998 tarihleri arasında alınan verilere göre çıkarılmış Akhisar Bölgesi rüzgar gülü şablonu.....	14
Şekil 1.6 Akhisar Bölgesi aylık üretilen enerji miktarları.....	15
Şekil 1.7 Türkiye'de çeşitli bölgeler için hesaplanan rüzgar enerjisi değerleri (W/m^2).....	16
Şekil 2.1 Fransa'nın Brest bölgesinin rüzgar gülü.....	19
Şekil 2.2 Fransa'nın Caen bölgesinin rüzgar gülü.....	19
Şekil 2.3 Antakya ilimizin rüzgar gülü.....	20
Şekil 2.4 Bir engelin çevresindeki rüzgar akışı.....	22
Şekil 2.5 Rüzgar hızının engelden dolayı değişimi.....	22
Şekil 2.6 Bir rüzgar türbini tarlasının yerleşim şekli.....	23
Şekil 2.7 Weibull dağılımı.....	24
Şekil 2.8 Bozcaada için Rayleigh dağılımı.....	25
Şekil 2.9 Havanın rotor çevresindeki akışı.....	26
Şekil 2.10 c_p 'nin $v3/v1$ 'in fonksiyonu olarak çizilmiş eğrisi.....	27
Şekil 2.11 Rüzgar türbininin yapısı.....	29
Şekil 2.12 Düşey eksenli rüzgar türbini.....	29
Şekil 2.13 Santrallerin elektrik enerjisi maliyetleri.....	32
Şekil 3.1 Frekans çeviricisi kullanılarak yapılan elektrik enerjisi çevrimi.....	35
Şekil 3.2 Doğrudan frekans çeviricisinin şematik bağlantı diyagramı.....	36
Şekil 3.3 Doğrudan frekans çeviricisinde bir faz üzerindeki gerilim şekli.....	36
Şekil 3.4 (a) I frekans çeviricisi (b) U frekans çeviricisi.....	37
Şekil 3.5 Sinusoidal gerilim üreten senkron generatör için frekans çevirici.....	38
Şekil 3.6 Trapezoidal gerilim üreten generatörler için frekans çevirici.....	38
Şekil 3.7 Şebeke bağlantılı rüzgar enerjisi santralleri için frekans çeviricileri.....	39
Şekil 3.8 Ara devreli frekans çeviricisi ile çalışan şebeke bağlantılı rüzgar enerjisi çevirici.....	41
Şekil 3.9 Hat elemanlarının eşdeğer devresi.....	42
Şekil 3.10 Kontrolsüz doğrultucu ile doğru gerilim kısıyıcısının kombinasyonu....	43
Şekil 3.11 Eviricinin bağlantısı ve akım şekli.....	44
Şekil 3.12 Darbe genişlik modülasyonlu evirici.....	45
Şekil 3.13 Akımın tolerans bandıyla regülasyonu ve transistörler için kontrol sinyalleri.....	46
Şekil 3.14 Rüzgar enerjisi santralının şebeke bağlantısı.....	47
Şekil 3.15 Basitleştirilmiş kısa devre eşdeğer devresi.....	48

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.16 (a) rüzgar yönü (b) rüzgar hızı (c) sabit hızdaki toplam çıkış gücü (d) değişken hızdaki toplam çıkış gücü.....	51
Şekil 3.17 Farklı rüzgar hızlarındaki çıkış dalgalanmaları.....	52
Şekil 3.18 Farklı rüzgar hızlarında sütunlara göre çıkış toplamaları alınarak hesaplanmış çıkış düzgünlüğü.....	54
Şekil 3.19 Farklı rüzgar hızlarında satırlara göre çıkış toplamaları alınarak hesaplanmış çıkış düzgünlüğü.....	55
Şekil 3.20 Gerilim değişiminin güç faktörü ile ilgisi.....	57
Şekil 3.21 Generatör ve motor çalışma için eşdeğer devreler ve fazör diyagramları.....	57
Şekil 3.22 Asenkron generatörlü ve direk şebeke bağlantılı rüzgar türbinleri için gerilim spektrumu.....	59
Şekil 3.23 Çevirici üzerinden şebekeye bağlanan rüzgar türbinleri için gerilim spektrumu.....	60
Şekil 3.24 (a) Kompanzasyon kapasitörü (b) Seri rezonans filtre (c) Geniş band geçiren filtre.....	61
Şekil 3.25 Frekans spekturumu ve gerilim yolu.....	63
Şekil 3.26 Farklı ateşleme açılarına sahip iki rüzgar santrali.....	65

RÜZGAR SANTRALLERİ VE ENERJİ SİSTEMLERİNE BAĞLANTILARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Rüzgar enerjisinin kullanımı son yıllarda çok hızlı bir artış göstermiştir. Bir çok ülke rüzgar enerjisinin kullanımı teşvik etmek için programlar başlatmıştır. Türkiye’de de, yapılan kanuni değişikliklerden sonra, rüzgar enerjisi ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Birçok özel kuruluş Türkiye’nin çeşitli bölgelerinde fizibilite çalışmaları yapmaya başlamıştır.

Rüzgar enerjisi santrallerinin diğer enerji santrallerine göre avantajları hammadde ihtiyacının olmaması, diğer enerji santrallerine oranla daha hızlı kurulması, temiz bir enerji kaynağı olması ve enerjide dışa bağımlılığı azaltmasıdır. Ancak bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Gürültü, arazi kullanımı ve rüzgarın sürekliliğin olmaması rüzgar enerjisi santrallerin dezavantajları arasında sayılabilir.

Rüzgar enerjisi santralleri kurulurken, rüzgar enerjisini etkileyen faktörler göz önünde tutulmalıdır. Bu faktörler

- Yeryüzünün engebeliliği,
- Rüzgar engelleri,
- Park etkisi,
- Tünel etkisi,
- Tepe etkisi

olarak sıralanabilir. Yeryüzünün engebeliliği, rüzgar engelleri ve park etkisi rüzgar enerjisini olumsuz yönde etkilerken tünel ve tepe etkisi rüzgar enerjisini olumlu yönde etkiler.

Rüzgar enerjisi santralleri, şebekeye bağlantısında frekans çeviricilerine ihtiyaç duyarlar. Frekans çeviricileri, generatörün değişken frekans ve gerilimini şebeke frekans ve gerilimine ayarlamak için kullanılmaktadır.

Rüzgar enerjisi santrallerinin şebekeye bağlantısı

- kısa devre gücünde değişimlere,
- gerilim dalgalanmalarına,
- gerilim simetrisizliğine,
- harmoniklere

neden olur. Ayrıca şebeke bağlantısında rüzgar enerjisi santrallerinin yerleşimi göz önünde tutulmalıdır. Çünkü, rüzgar enerjisi santralının çıkış davranışları hakim rüzgar yönüne, rüzgar hızına ve türbinlerin yerleşimine bağlıdır. Bu nedenle rüzgar enerjisi santralının kurulması düşünülen bölgede en az bir yıl boyunca ölçümler alınmalıdır. Hakim rüzgar yönü ve ortalama hız verilerine göre türbin yerleşimi yapılmalıdır.

Türkiye’de özellikle Marmara ve Ege bölgesinde rüzgar enerjisi ile ilgili ölçümler yapılmaktadır. Bu ölçümler hem Devlet Meteoroloji İşleri hem de özel kuruluşlar tarafından yapılmaktadır. Bu ölçümlere göre rüzgar enerjisi santrallerinin kurulacağı en iyi bölgeler Alaçatı, Gökçeada, Datça, Bozcaada ve İntepe’dir. Bu bölgelerden sadece Alaçatı’ya 7,2 MW’lık bir santral kurulmuştur. Türkiye diğer bir alternatif enerji kaynağı olan güneş enerjisi bakımından da zengindir. Fakat , güneş enerjisinin veriminin düşük olması ve çok geniş alanlara ihtiyaç duyması nedeniyle ekonomik değildir. Bu bakımdan rüzgar enerjisi günümüz koşullarında Türkiye için ideal alternatif enerji kaynaklarından biridir.

INVESTIGATION OF WIND ENERGY PLANTS AND GRID CONNECTION

SUMMARY

The usage of wind energy has increased in last few years. Many countries have set programs to encourage the usage of wind energy. The work on wind energy has speed up after making law amendments in Turkey. Consequently, many private companies have started doing feasibility studies.

The main advantages of wind energy plants over other type power plants are; there is no need for raw materials, setting up of wind energy plants take shorter than other type of power plants, it does not cause environmental pollution and lastly, reduces the dependency on international energy sources. Although wind energy usage has above advantages, it has some disadvantages too. Requiring large amount of land to be set up, causing noise pollution when working and depending on continuous wind are some of these disadvantages.

The factors, which effect wind energy, must be taken into consideration when setting up wind energy stations. These factors are:

- Roughness of the terrain
- Wind obstacles
- Park effect
- Hill effect
- Tunnel effect

While roughness of the terrain, wind obstacles and park effect have a negative effect on the wind energy, hill effect and tunnel effect have a positive effect on it.

Wind energy plants require frequency converter on connecting grid. Frequency converters are used to regulate generator's variable frequency and voltage to grid's variable frequency and voltage.

The connection of wind energy plants to grid lead to:

- Changes in short-circuit power
- Voltage fluctuation
- Voltage asymmetry
- Harmonics

When connecting to grid the position of wind energy plants must be taken into consideration because the output behaviour of the wind energy plants is depended on the prevailing wind direction, speed of the wind and the way turbines are positioned. Therefore, measurement must be taken at least for a year in the proposed area for setting up wind energy station. Turbines must be placed according to outcome of prevailing wind direction and average wind speed.

There are some measurement taking processes has been going on in some parts of Turkey, especially in Marmara and Ege regions. These measurements are taken both by State Meteorology Department and by private organisations. According to these measurements the best regions that, wind energy plants can be set up on, are Alaçatı, Gökçeada, Datça, Bozcaada and İntepe. A wind energy plants was set up on only one of these regions, in Alaçatı, which has power of 7,2 MW. Turkey has very good potential for an alternative energy source, solar power, but because of requiring very large amount of land and low output percentage of power, using solar power is not economical. Therefore, in the current circumstances, wind energy is one of the ideal alternative energy resources for Turkey.

GİRİŞ

Günümüzde tüm dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında bir artış vardır. Özellikle rüzgar enerjisinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Ülkemizde de rüzgar enerjisi potansiyeli yüksektir. Bu enerji kaynağı değerlendirilip kullanılmalıdır. Yapılan bu çalışma bir literatür çalışması olup konuyla ilgilenenler bir kaynak olacak niteliktedir.

Rüzgar enerjisi ilk defa M.Ö. 5000'li yıllarda Nil Nehri'nde kayıkları hareket ettirmek için kullanılmıştır. Aynı tarihlerde Çin'de de su pompalamak için kullanıldığı bilinmektedir.

640 yılında Türkler tarafından çeşitli tiplerde rüzgar değirmenleri yapılmıştır. Anadolu'da bulunan bir çok rüzgar değirmeni kalıntısı –özellikle batı sahilinde bulunanlar- rüzgar enerjisinin bölgedeki ekonomik gelişmedeki önemini göstermektedir. 1940'lı yıllarda rüzgar değirmenleri tarlalara su pompalamak için kullanılmıştır. Ayrıca Anadolu'da kurulan ilk radyo istasyonuna elektrik, rüzgar enerjisiyle sağlanmıştır. {[1],[2]}

Haçlı seferleri sırasında rüzgar değirmenleri Avrupa'ya geçmiştir. 1105 yılında Fransa'da yaygınlaşan rüzgar değirmenleri, 38 yıl aradan sonra İngiltere'de de görülmüştür. 18. yüzyılda Hollanda'da çatısı dönen rüzgar değirmenleri kullanılmıştır. 1772-1789 yıllarında kanatlı türbinler üzerinde özel tasarımlar gerçekleştirilmiş, ancak buharlı makinelerin keşfi ile gerçekleşen sanayi devrimi rüzgar türbinlerinin önemini azaltmıştır. [1]

Poul la Cour (1846-1908) günümüz modern rüzgar generatörlerinin öncüsü olmuştur. İlk rüzgar generatörünü 1891 yılında kurmuştur. Askov Folk Koleji'nde rüzgar generatörleri ile ilgili çeşitli dersler vermiştir. 1897 yılında bu okulda iki adet test rüzgar türbini kurmuştur (Şekil 1.1). Ayrıca, rüzgardan elektriğin elde edilmesiyle ilgili ilk kitabı yazmıştır.

1918 yılında Danimarka'nın 120 bölgesine güçleri 20 ile 35 kW arası değişen rüzgar türbinleri kurulmuştur. Kurulan türbinlerin toplam gücü 3 MW'ı buluyordu ve bu türbinler Danimarka'nın elektrik tüketiminin %3'ünü karşılamaktaydı.



Şekil 1.1 1897 yılında Askov Folk Koleji'nde kurulan 2 adet rüzgar türbini[3]

1951 yılında o güne kadar kullanılan DC generatörler yerlerini AC generatörlere bıraktı. Rüzgar enerjisinden elektrik üretiminde AC generatör kullanımıyla ilgili ilk çalışmalar, Poul la Cour'un öğrencilerinden Johannes Juul tarafından yapılmıştır. 1956-1957 yıllarında 200 kW'lık rüzgar türbini Johannes Juul tarafından elektrik şirketi olan SEAS için Gedser kıyılarına kurulmuştur (Şekil 1.2). Bu üç kanatlı, asenkron generatörlü rüzgar türbini günümüz modern rüzgar türbinlerinin dizaynı için öncü olmuştur.

Gedser kıyılarına kurulan bu türbin 11 yıl bakım yapılmadan çalıştıktan sonra 1975 yılında NASA'nın A.B.D. rüzgar enerjisi programını belirlemek için yapacağı çalışma nedeniyle revizyondan geçirildi. Birkaç yıl ölçümler alındıktan sonra parçalara ayrıldı. Şimdi Danimarka Elektrik Müzesi'nde bulunmaktadır.

Bu gelişmelere rağmen ilgi görmeyen rüzgar enerjisi, 1973 yılındaki petrol krizinden sonra alternatif enerjiye olan talep nedeniyle önem kazanmıştır. Christian Riisager, Gedser rüzgar türbini dizayn biçiminden farklı olan 22 kW'lık bir rüzgar türbini yapmıştır. Christian Riisager'ın yaptığı rüzgar türbininin ulaştığı başarı günümüz rüzgar türbini üreticileri için ilham kaynağı olmuştur.



Şekil 1.2 Gedser’de kurulan 200 kW’lık rüzgar generatörü[3]

Bugün rüzgar santralleri, enterkonnekte şebeke ile bağlantılı ve birden fazla türbin içeren rüzgar çiftlikleri biçimindedir. Günümüzün geliştirilmiş rüzgar türbinleri yatay eksenli, iki ya da üç kanatlı türbinler olup tek makine güçleri çoğunlukla 250 kW’ın üzerindedir. Kule yükseklikleri 30 ile 70 m. arasında değişmekte, rotor çapları 30-60 m. arasında olabilmektedir. Günümüz rüzgar tarlaları için en büyük örnek 55 kW’lık 1000’den fazla generatörün kullanıldığı California Palm Springs’teki rüzgar parkıdır (Şekil 1.3).

1.1 Dünya’da Rüzgar Enerjisi

Dünyadaki yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi 1973 yılındaki enerji krizinden sonra ortaya çıkmıştır. Dünya fosil yakıt rezervlerinin bir süre sonra tükeneceği gerçeği ile karşı karşıya kalınmış ve alternatif enerji kaynakları aranmaya başlanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre, günümüzdeki tüketim hızı sürdürüldüğünde, dünya fosil yakıtlarından, petrol rezervleri 2040 yılında, doğal gaz 2060 yılında, kömür ise 2150 yılında büyük bir olasılıkla tükenecektir. Bunun yanı sıra fosil yakıtların oluşturduğu çevresel etkiler, asit yağmuru, sera etkisi, hava kirliliği ve ısırl kirlilik ise dünyanın geleceği açısından tehlike oluşturmaktadır. Bir yandan yıldan yıla hızla artan enerji ihtiyacı, diğer yandan fosil yakıtların yarattığı çevre kirliliği gibi sorunların çözümü, dünya enerji rezervlerinin %75’ini oluşturan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek ile olacaktır[8].



Şekil 1.3 California Palm Springs'teki rüzgar tarlası[3]

Dünya çapında tesis edilen rüzgar türbin kapasitesi Tablo 1.1'de verilmiştir. A.B.D. ve Almanya'da ekonomik bulunmadığı için elektrik şirketlerince yeni nükleer santral siparişi yapılmamaktadır. Nükleer ve fosil yakıtlara dayalı santral kurmama konusunda karar veren ülkeler, enerjinin etkin kullanımı ve yenilenebilir enerjinin enerji sistemlerine entegrasyonu amacıyla uygulama programları oluşturmaktadır.

Avrupa Birliği'ne üye olan ülkeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının faydalarını göz önünde bulundurarak, son on yıl içinde enterkonnekte şebekeye bağlı yenilenebilir enerji kaynaklarının önünü açmak için çalışmalar yaptılar. Bu kararın uygulanmasıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının Avrupa Birliği enerji güvenirliliğindeki artışta stratejik rolü olduğu görüldü. Ayrıca yerel ve bölgesel ekonomiye yarar sağladığı görüldü.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişimi, çeşitli politikaların ve çalışmaların sonucunda başarılmıştır. Avrupa Birliği'ne üye ülkeler arasında bu politika ve çalışmalarda farklılıklar olsa da genelde uygulanan politika ve çalışmalar aşağıda belirtilmiştir:

- Yenilenebilir enerji kaynaklarının teknolojik gelişimi için yapılan araştırmalara, geliştirmelere ve denemelere hükümet yatırımları,
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının yayılmasını kolaylaştırmak için hükümet teşviği

Tablo 1.1 Tesis edilen rüzgar türbini kapasitesi[4]

Ülke	Mevcut kapasite 1999 yılı (MW)
A.B.D.	2706
Almanya	4443
Danimarka	1761
Hindistan	1062
Hollanda	411
İngiltere	353
İspanya	1225
İsviçre	215
Çin	261
İtalya	283
Yunanistan	82
Kanada	125
Fransa	22
Japonya	28
İran	11
Türkiye	9

İkinci madde kredilerde ve vergilerde indirimi, arazi sağlanması ve tüketicinin eğitilmesini kapsamaktadır.

Avrupa Birliği yenilenebilir enerji kaynaklarında en fazla rüzgar enerjisinin ve biokütle enerjisinin kullanımında artış olmuştur. Rüzgar enerjisi Almanya’da,

biokütle enerjisi ise İsveç ve İtalya’da en fazla kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarıdır.

Avrupa birliğinde yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılması ve geliştirilmesi için ayrılan fonlar ülkeden ülkeye farklılıklar göstermektedir. Örneğin, güneş enerjisinde Belçika, Almanya, İtalya ve Hollanda; Danimarka ve İtalya ise rüzgar enerjisinde başı çekmektedir. Tablo 1.2’de Avrupa Birliği’nin yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasitesi ve Tablo 1.3’de ise yıllık büyümesi verilmiştir.

Tablo 1.2 Avrupa Birliği’nin yenilenebilir enerji kaynakları kapasitesi[6]

Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kapasitesi (GW)				
Yıllar	Biokütle	Jeotermal	Güneş	Rüzgar
1990	3.84	0.51	0.00	0.41
1991	3.90	0.58	0.01	0.56
1992	4.00	0.48	0.01	0.73
1993	4.06	0.48	0.02	0.92
1994	4.90	0.49	0.46	1.59
1995	5.74	0.49	0.56	2.36
1996	5.8	0.51	0.65	3.42
1998	7.25	0.75	0.84	6.20

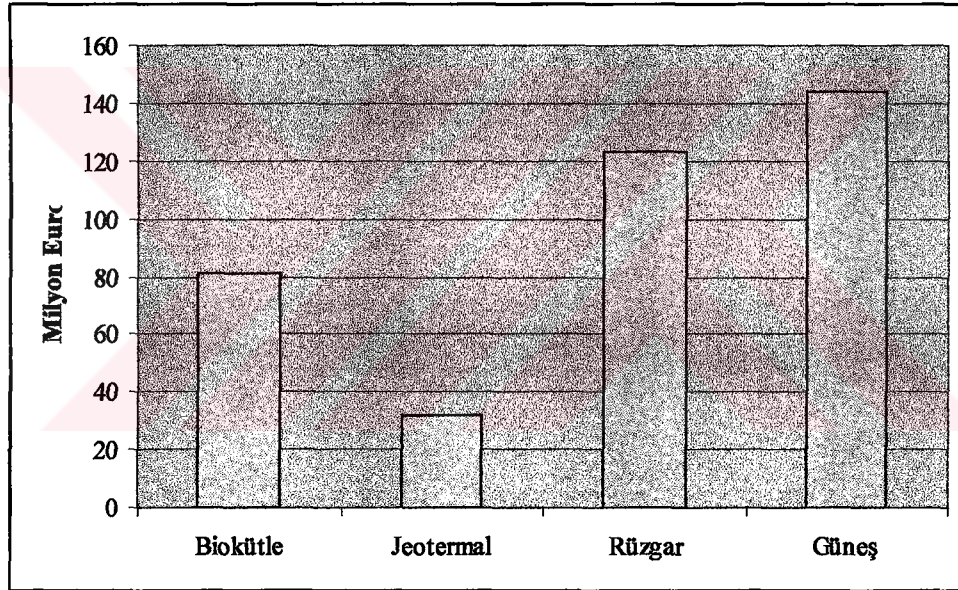
Yenilenebilir enerji programı Avrupa Komisyonunun ana hedeflerinden biridir. Bu programın araştırma ve geliştirme kısmı olan JOULE’ün 1998 Aralık ayı itibari ile sonuçları şöyledir:

- Rüzgar enerjisi ile ilgili 381 teklifin 123 adedi kabul edilmiştir. Bu tekliflerin tutarı 75,4 milyon Euro’dur.
- 1995-1998 yılları arasında 79 adet rüzgar projesine 43.3 milyon Euro’luk destek sağlanmıştır.

Bu programın uygulama kısmı olan THERMIE’nin ise 1995-1998 yılları arasında 44 rüzgar enerjisi projesi için 32.1 milyon Euro’luk destek sağlamıştır. Şekil 1.4’te yenilenebilir enerji programının 1995-1998 yılları arasında desteklediği proje yatırımları verilmiştir.

Tablo 1.3 Avrupa Birliği'nin yenilenebilir enerji kaynakları yıllık büyümesi[6]

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Yıllık Büyümesi				
Yıllar	Biokütle	Jeotermal	Güneş	Rüzgar
1990-1991	%2	%14		%37
1991-1992	%3	-%17	%0	%30
1992-1993	%1	%0	%100	%26
1993-1994	%21	%2	%2200	%73
1994-1995	%17	%0	%22	%48
1995-1996	%1	%4	%16	%45
1996-1998	%25	%47	%29	%81



Şekil 1.4 Yenilenebilir enerji programı 1995-1998 yılları arasında desteklediği proje yatırımları[7]

1.2 Türkiye'de Rüzgar Enerjisi

Gelişmekte olan ülkeler statüsündeki Türkiye'nin hızlı nüfus artışı ve sanayileşmesine paralel olarak enerjiye olan gereksinimi de artmaktadır. Dünyada olduğu gibi ülkemizde de en büyük pay fosil yakıtlarına aittir. Doğal gaz ve enerji tüketimimizin yarıya yakınını karşılayan petrol kaynakları Türkiye'de yeterli düzeyde değildir.

Türkiye’de 1970’li yıllarda yaşanan elektrik sıkıntısının başlıca sebebi, dünyada yaşanan petrol krizidir. Akaryakıt temininin zorlaşması nedeni ile ana üretim santrallerinden Ambarlı başta olmak üzere akaryakıt ile çalışan santraller kısıntılı çalışmak zorunda kalmıştır. 2000 yılında yaşanan elektrik sıkıntısının sebebi ise doğal gaz hatlarındaki basıncın düşmesidir. Bu iki kriz de dışa bağımlılığın sonucudur. 1970’li yıllardaki krizin bir başka sebebi de enerjiye talepteki artış ile kurulu santral gücünün paralel gitmemesidir. Örneğin, 1960 ile 1980 yılları arasında enerji talebi dokuz kat artarken santral kurulu gücümüz ancak dört kat artmıştır.

Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları bakımından oldukça iyi durumdadır. 1961 yılında yapılan bir araştırmaya göre dokuz ile yayılmış olarak 718 tane su çıkarma amaçlı ve 41 tane de elektrik üreten rüzgar türbini tespit edilmiştir[17]. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının gerek ilk yatırım maliyeti gerekse üretim maliyeti açısından fosil yakıtlarla rekabet etmesi mümkün değildir. Fakat, teknolojinin gelişmesiyle rekabet edebilecek duruma gelmeye başlamıştır. Öte yandan Türkiye’nin enerji geleceği sadece enerji üretim maliyetleri veya yatırım maliyetleri ile belirlemek de yeterli değildir. Bunların yanında çevre faktörü ve enerjide dışa bağımlılık gözden uzak tutulmamalıdır.

Türkiye’nin toplam rüzgar enerjisi potansiyeli 40.000 ile 80.000 MW düzeyindedir. Devlet Meteoroloji İşleri istasyonlarının 1970-1980 dönemi rüzgar verilerinin değerlendirilme sonuçlarına göre, Türkiye’nin yıllık ortalama rüzgar hızının on metre yükseklikte 2,54 m/s ve rüzgar gücü yoğunluğunun 24 W/m² olduğu belirlenmiştir. Türkiye’nin rüzgar enerjisi potansiyeli bölgelere göre değerlendirildiğinde, Marmara ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinin rüzgar gücü yoğunluğu bakımından diğer bölgelere göre daha zengin olduğu görülmektedir (Tablo 1.4)

Türkiye’de Marmara, Ege ve Akdeniz kıyıları, dünyada rüzgar gücü potansiyeli açısından ilk %30’luk alana girmektedir[8]. Elektrik İşleri Etüt İdaresi’nde yapılan çalışmalara göre, ülke genelinde süreklilik ve yoğunluk açısından ümit veren yöreler Tablo 1.5’de verilmiştir.

Altıncı Beş Yıllık Kalkınma Planı’nda yenilenebilir enerji kaynaklarına yer verilmemiştir. Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı hazırlık çalışmalarının yapıldığı 1993 yılında, 1990 yılına kadar olan teknolojik gelişim göz önüne alınarak, yalnızca yeni teknolojileri izleyebilmek amacıyla, güneş pilleri ile elektrik üretiminin 1995’te

2,5 GWh'ten başlayarak 2010 yılında 61,1 GWh gibi sembolik bir düzeye çıkarılması, ayrıca 2010 yıllarında güneş termik santralleri kurulması üzerinde durulması istenmişti. Bu istek Genel Enerji İhtisas Komisyonu Raporu'na geçirilmişti. Aynı raporda, yine yalnızca teknolojiyi izlemek amacıyla 50 MW'ı aşmayan bir deneysel kurulu güçle rüzgardan elektrik üretimi üzerinde durulmuş, 1995'te 3,7 GWh ile üretime başlanarak 2010 yılında 183,3 GWh düzeyine çıkarılması planlanmıştı. Bu hedefler Türkiye'nin beklenen elektrik talebinin yüz binde altısı ile on binde sekizi arasında kalmaktadır. Planlanan adımlar atılamadı, ama 3-5 yılın hızlı teknolojik gelişimi planlanan hedeflerin çok yetersiz düzeylerde kalmasına neden oldu[10].

Tablo 1.4 Türkiye rüzgar enerjisi potansiyelinin bölgesel dağılımı[1]

Bölge Adı	Ortalama Rüzgar Gücü Yoğunluğu (W/m ²)	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)
Akdeniz	21,36	2,45
İç Anadolu	20,14	2,46
Ege	23,47	2,65
Karadeniz	21,31	2,38
Doğu Anadolu	13,19	2,12
Güneydoğu Anadolu	29,33	2,69
Marmara	51,91	3,29

Ülkemizde 1984 yılında kurulmuş olan 55 kW kapasiteli bir rüzgar türbini Çeşme'de turistik bir tesisin elektrik enerjisi ihtiyacının %5'ini karşılamaktadır. Ticari amaçlı ilk rüzgar santrali olan Alaçatı'nın Germiye Köyü'nde kurulmuş otoprodüktör statüsündeki 1,75 MW kurulu gücündeki santral, yılda yaklaşık 5.000.000 kWh enerji üreterek çevre bölgede yaşayan beş bin kişinin elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. Ayrıca, 7,2 MW kapasiteli Alaçatı Rüzgar Santrali 1998 yılında üretime başlamıştır. Bunların yanı sıra, Bodrum Belediyesi ve Çanakkale-İntepe Belediyesi kendi elektrik ihtiyaçlarını rüzgar enerjisinden karşılamak için girişimlere başlamışlardır. Bodrum Yarımadası'nın 1998 yılı tüm elektrik ihtiyacını 100 adet rüzgar türbini ile karşılamak mümkündür. Çeşitli firmalar da rüzgar hızının fazla olduğu yerlerde, enterkonnekte sisteme bağlı rüzgar enerjisi projelerinin ön

fizibilite çalışmalarına devam etmektedir. Tablo 1.6’da Türkiye’deki rüzgar santrali projelerindeki son durumlar verilmiştir.

Tablo 1.5 Rüzgar potansiyelince zengin bölgeler[1]

İstasyon Adı	Rüzgar Gücü Yoğunluğu (W/m ²)	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)
Bandırma	152,6	5,1
Antakya	108,9	4,5
Kumköy	82	4,1
Mardin	81,4	4,1
Sinop	77,9	4,1
Gökçeada	74,5	4
Çorlu	72,3	4
Çanakkale	71,2	3,9

Yapılan fizibilite çalışmaları, Türkiye’nin -özellikle Marmara ve Ege Bölgelerinin- rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri için uygun olduğunu göstermiştir. Elektrik sarfiyatının en yüksek olduğu bölgelerin Marmara ve Ege olduğu göz önüne alınırsa buralara kurulacak olan rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri ile elektriğin iletimi sırasında ortaya çıkacak kayıpların da azalacağı açıktır. Ayrıca, yapılan son kanuni düzenlemelerle özel şirketlerin kuracağı rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinin ulusal şebekeye vereceği elektrik enerjisini satması veya verdiği elektrik enerjisi kadarını kullanması gündeme gelmiştir.

Türkiye diğer bir alternatif enerji kaynağı olan güneş enerjisi bakımından da zengindir. Fakat, güneş enerjisinin veriminin düşük olması ve çok geniş alanlara ihtiyaç duyması nedeniyle ekonomik değildir. Bu bakımdan rüzgar enerjisi günümüz koşullarında Türkiye için ideal alternatif enerji kaynaklarından biridir.

EİEİ de rüzgar enerjisi ile ilgili projeler yürütmektedir. Bu projeler

- EİE-AREB-TŞ
- IRESMED(Integration of Renewable Energies in Southern Mediterranean Regions-Güney Akdeniz Bölgesinde Yenilenebilir Enerjilerin Entegrasyonu)

Tablo 1.6 Türkiye rüzgar santrali projelerinde son durum[11]

İşletmede Olan Rüzgar Santrali		
Projenin Adı	Bölge	Güç (MW)
Çeşme Alaçatı Rüzgar Santrali	İzmir Çeşme Alaçatı	7,2
Sözleşme Taslağında Anlaşma Sağlanan DPT Görüşü Beklenen Projeler		
Projenin Adı	Bölge	Güç (MW)
Kocadağ Rüzgar Santrali	İzmir Çeşme Kocadağ	50,4
Çanakkale Rüzgar Santrali	Çanakkale	30
Bozcaada Rüzgar Santrali	Çanakkale	10,2
Sözleşme Görüşmeleri Aşamasında Olan Rüzgar Projeleri		
Projenin Adı	Bölge	Güç (MW)
Mazıdağı Rüzgar Santrali	İzmir Çeşme Alaçatı	39
Fizibilite Raporu Değerlendirilen Rüzgar Projeleri		
Projenin Adı	Bölge	Güç (MW)
Datça Rüzgar Santrali	Muğla Datça	28,8
Datça Rüzgar Santrali	Muğla Datça	12,5
Yalıkavak Rüzgar Santrali	Muğla Datça	7,92
İntepe Rüzgar Santrali	Çanakkale İntepe	30
İntepe Rüzgar Santrali	Çanakkale İntepe	13,2
Akhisar Rüzgar Santrali	Manisa Akhisar	12
Akhisar Rüzgar Santrali	Manisa Akhisar	30
Bandırma Rüzgar Santrali	Balıkesir Bandırma	15
Beyoba Rüzgar Santrali	Manisa Akhisar	7,92
Çeşme Rüzgar Santrali	İzmir Çeşme	12
Karaburun Rüzgar Santrali	İzmir Karaburun	22,5
Revize Fizibilite Raporu Beklenen Rüzgar Projeleri		
Projenin Adı	Bölge	Güç (MW)
Gökçeada Rüzgar Santrali	Çanakkale Gökçeada	1,62

EİE-AREB-TŞ projesi ile Türkiye’de rüzgarın enerji kaynağı olarak kullanılmasına öncülük edilmesi, Türkiye’nin batı bölgesinde belirlenecek bir yerde rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi, fizibilitesinin hazırlanması ve sistem tasarımı için mühendislik metodolojisi oluşturulması amaçlanmaktadır.

Proje altı ana başlıkta yürütülmektedir:

1. Proje hazırlık çalışmaları
2. Rüzgar kaynak değerlendirmesi
3. Rüzgar tarla tasarımı
4. Ekonomik analiz
5. Çevre etki değerlendirme çalışması
6. Sonuçların değerlendirmesi ve yayımı

Proje uygulama alanı olarak Gökçeada seçilmiştir. Proje alanında ölçümler için 30 metrelik ölçüm direği monte edilerek veri toplanmaya başlanmıştır. EİE’nin Gökçeada’daki mevcut gözlem istasyonunda 1994 yılından beri yürütülen veri toplama işlemi de yeni istasyona paralel olarak sürdürülecektir.

IRESMED projesi ise Güney Akdeniz ülkelerinde güneş ve rüzgar enerjisinin büyük ölçekli kırsal elektrifikasyon ve şebeke bağlantılı elektrik üretimine entegrasyon çalışmalarını amaçlar. Ana konu yenilenebilir enerjilerin fosil yakıtlı seçenekleri ile karşılıklı rekabetidir. Proje kapsamında en düşük maliyetli olanakları seçmek için ayrıntılı fayda/maliyet analizleri yapılacak, sosyal ve çevresel konularla ilgili dış yararlar da göz önüne alınacaktır.

IRESMED projesi iki ana grupta yürütülecektir:

1. Kırsal elektrifikasyon için fotovoltaikler
2. Elektrik üretimine rüzgar gücünün entegrasyonu

IRESMED, Akdenizin her iki tarafındaki elektrik şirketleri, ulusal araştırma merkezleri ve diğer destek organizasyonlarının güçlü bir konsorsiyomunu içerir. Bu projeye EİE Genel Müdürlüğü Türkiye adına “Elektrik Üretimine Rüzgar Gücünün Entegrasyonu” konusunda katılmaktadır. Bu konu kapsamında;

- Rüzgar gücü için site karakterizasyonu ve rüzgar kaynağının analizi,
- Şebeke bağlantı konularında teknolojik hususlar,

Ekonomik hususlar ve çevresel faydaları içeren maliyet/fayda analizleri,

- Pazar geliştirme konuları ve kurumsal beklentiler,
- Finansal planların analizi ve özel sektör katılımı

çalışmaları gerçekleştirilecektir[18].

Rüzgar enerjisinin zamansal ve bölgesel değişimi topografik özelliklere bağlıdır. Bu nedenle, Türkiye genelinde sınırlı sayıdaki istasyonlardan elde edilen ölçümlere dayanarak, bu kaynağın potansiyeli hakkında bir rakam vermek anlamlı değildir. Meteoroloji istasyonları tarafından toplanan rüzgar ölçümleri, sadece istasyonun kurulu bulunduğu sınırlı bölgenin özelliklerini yansıtır. İstasyonun bulunduğu bölgenin hemen yakınında, çok farklı nitelikte rüzgar rejimine rastlamak mümkündür. Geniş bir alanı temsil edeceği varsayımıyla, bu ölçümlerin kullanılması rüzgar enerjisinin doğasına ters düşer. Bu nedenle, gerek Devlet Meteoroloji İşleri kayıtlarından gerekse yapılan etütlerden yararlanılarak aşağıdaki yerlere gözlem istasyonları kurulmuştur.

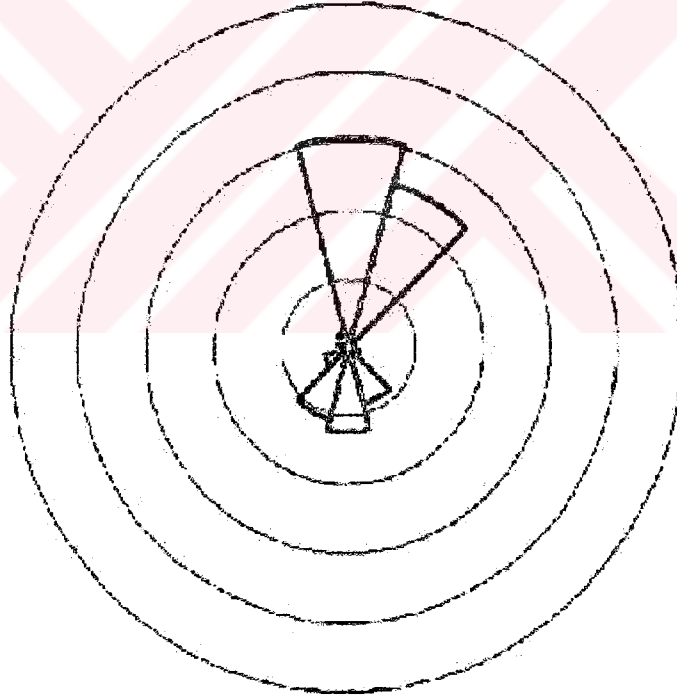
- 1- Bandırma – Balıkesir
- 2- Karabiga – Çanakkale
- 3- Nurdağ – Gaziantep
- 4- Gökçeada – Çanakkale
- 5- Şenköy – Hatay

Devlet Meteoroloji İşleri tarafından rüzgar hızı ölçümleri alınan sekiz istasyondaki verilere göre Batı Anadolu bölgesinin kıyı kesimleri rüzgar enerjisi için uygun yerlerdir. Tablo 1.7’de bu sekiz bölgenin ortalama rüzgar hızları ve metrekaareye düşen ortalama güçleri verilmiştir.

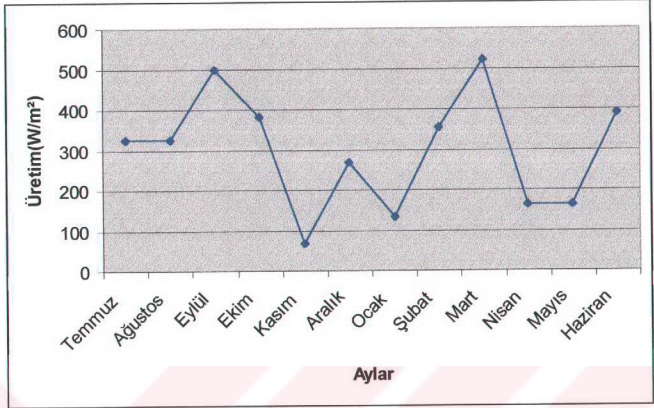
“Rüzgar Enerjisi Teknolojisi ve Türkiye’ye Uygulanması: Akhisar Rüzgar Elektrik Santrali” (DURAK,M.) adlı yüksek lisans tezinde rüzgar türbinlerinin elektriksel yapısı ve ulusal şebekeye bağlantısını açıklamış, rüzgar potansiyelini belirlemede kullanılan WASP programı tanıtılmış ve Manisa İli Akhisar İlçesi Kayahöğlü Beldesinde Akhisar Rüzgar Elektrik Santrali (AKRES) isminde 12 MW kurulu gücündeki rüzgar santrali için en uygun rüzgar türbini belirlenmeye çalışılmıştır[19]. Bölgeden toplanan veriler ile elde edilen rüzgar gülü şablonu Şekil 1.5’de, aylık üretilen enerji miktarları ise Şekil 1.6’da verilmiştir.

Tablo 1.7 Batı Anadolu Bölgesi'ndeki sekiz yörenin rüzgar gücü yoğunluğu[12]

İstasyon Adı	Ortalama Rüzgar Gücü Yoğunluğu (W/m ²)	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)
Gökçeada	113	4.1
Bozcaada	320	6.4
Çanakkale	94	4.1
Edremit	20	2.4
Ayvalık	59	3.3
Dikili	21	2.5
İzmir	53	3.6
Bodrum	115	4.1



Şekil 1.5 Temmuz 1997 – Haziran 1998 tarihleri arasında alınan verilere göre çıkarılmış Akhisar Bölgesi rüzgar gülü şablonu[19]



Şekil 1.6 Akhisar Bölgesi aylık üretilen enerji miktarları[19]

“Saatlik ve Aylık Rüzgar Verisiyle Rüzgar Enerjisi Modellenmesi” (TÜRKSOY,F.) adlı doktora tezinden alınan rüzgar hızı değerlerinin yardımıyla Şekil 1.7’de verilen rüzgar enerjisi haritası oluşturulmuştur[20]. Haritada verilen değerler hesaplanırken

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1.1)$$

ampirik formülü kullanılmış ve ρ değeri $1,225 \text{ kg/m}^3$ olarak alınmıştır.

A : Rüzgar yönüne dik alan (m^2)

ρ : birim hacim için hava kütlesi (kg/m^3)

V : ortalama rüzgar hızı (m/s)

RÜZGAR ENERJİSİ

Bütün yenilenebilir enerji kaynaklarının (dalga enerjisi ve jeotermal enerji hariç) kaynağı Güneş'tir. Dünya'ya Güneş tarafından gelen enerji 100.000.000 GWh'dir. Bu enerjinin %1-2'si rüzgar enerjisine dönüşür.

Ekvator bölgesi Dünya'nın geri kalan bölgelerine göre daha fazla ısınır. Bu bölgede ısınan hava yaklaşık 10 km.'ye kadar yükselir, kuzeye ve güneye doğru yayılır. Eğer Dünya dönmeseydi, ısınan hava Kuzey Kutbu'na veya Güney Kutbu'na vardıktan sonra aşağı doğru hareket eder ve ekvatora geri dönerdi. Dünya döndüğü için, kuzey yarımküredeki her hareket sağa doğru yönlenir, güney yarımkürede ise sola doğru yönlenir. Bu kuvvete, Fransız matematikçi Gustave Gaspard Coriolis (1792-1843) bulduğu için, Coriolis Kuvveti denir.

Rüzgar, ekvator bölgesinde yükselir ve atmosferin yüksek katmanlarında kuzeye veya güneye doğru hareket eder. Her iki yarımkürede de 30° enlem civarında Coriolis Kuvveti havanın daha uzağa gitmesini engeller. Havanın aşağıya doğru hareket ettiği bu enlemden yüksek basınç alanı vardır. Havanın yükselmeye başladığı ekvator bölgesinde ise alçak basınç alanı vardır. Kutuplarda ise havanın soğuması nedeni ile yüksek basınç alanı vardır. Tablo 2.1'de verilmiş olan hakim rüzgar yönleri Coriolis Kuvveti'nin bir sonucudur. Bu rüzgar yönleri rüzgar türbinlerine yer seçimi açısından önemlidir. Çünkü, rüzgar türbinlerinin bu rüzgar yönlerinde engeli az olan alanlara kurulması istenir.

2.1 Küresel Rüzgarlar

2.1.1 Geostrophic Rüzgarlar

Geostrophic rüzgarlar sıcaklık ve basınç değişimlerinin sonucudur. Bu rüzgar tipine 1000 m.'nin üstündeki yüksekliklerde rastlanır. Meteoroloji balonları kullanılarak hızı ölçülebilir.

2.1.2 Yüzey Rüzgarları

Yüzey rüzgarlarına 100 m.'ye kadar olan yüksekliklerde Bu rüzgar tipinin hızı yeryüzünün pürüzlü yapısı ve engeller yüzünden daha yavaştır. Yeryüzüne daha yakın olan yüzey rüzgarlarının yönü, geostrophic rüzgar yönünden biraz farklıdır.

Tablo 2.1 Hakim rüzgar yönleri

Enlem	Rüzgar Yönü
90-60° Kuzey	Kuzey Doğu
60-30° Kuzey	Güney Batı
30-0° Kuzey	Kuzey Doğu
0-30° Güney	Güney Doğu
30-60° Güney	Kuzey Batı
60-90° Güney	Güney Doğu

2.2 Yerel Rüzgarlar

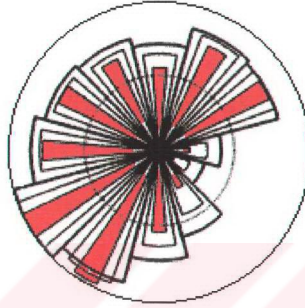
Küresel rüzgarlar belirli alanlardaki hakim rüzgar yönünü tespit etmekte önemli olmasına rağmen, yerel iklim koşulları rüzgar yönünün değişiminde önemli rol oynarlar. Önemli yerel rüzgarlar; deniz ve kara meltemi, dağ ve vadi meltemi, musondur.

Deniz meltemi gün boyunca kara ile deniz arasındaki ısı farklılığından oluşur. Gündüz, kara denize oranla daha çabuk ısınır. Daha sıcak olan kara üzerindeki hava yükselir ve denizden karaya doğru bir rüzgar eser. Bu rüzgar karada 50-150 km. içeri kadar sokulur. Bu hareketin tersi gece görülür. Kara meltemi soğuyan karadan denize doğru eser. Dağda da benzer bir mekanizma, vadi meltemi ile dağ melteminin dönüşümlü olarak esmesine yol açar. Vadi meltemi, gün boyunca vadiden tepelere doğru eser. Dağ meltemi ise gece boyunca tepelerden ovaya doğru eser.

Muson rüzgarları, tropikal enlemlerde, özellikle Güney Asya'da, görülür. Yazın denizden karaya (yaz musonu), kışın karadan denize doğru esen mevsimlik rüzgarlardır.

2.3 Rüzgar Gülü

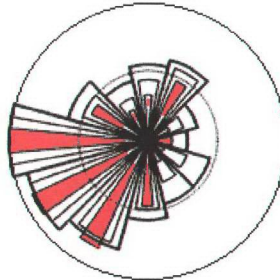
Güçlü rüzgarlar genellikle belirli bir yönden eserler. Rüzgar hızının dağılımını ve çeşitli rüzgar yönlerinin frekansını gösteren diyagrama rüzgar gülü adı verilir. Şekil 2.1'de Fransa'nın Brest bölgesinin rüzgar gülü verilmiştir.



Şekil 2.1 Fransa'nın Brest bölgesinin rüzgar gülü[3]

12 bölmenin en dışındaki alan rüzgar yönünün bağıl frekansını verir. Yani rüzgarın zamanın yüzde kaçında o yönden estiğini gösterir. İkinci alanda ortalama rüzgar hızı ile çarpılmış olarak aynı bilgiyi verir. En içteki alan ise rüzgar hızının küpü ile çarpılmış olarak en dıştaki alan ile aynı bilgiyi verir.

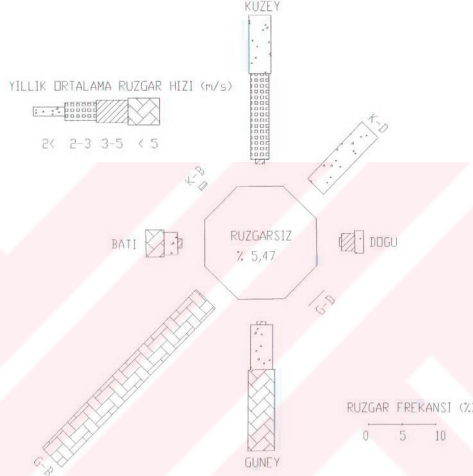
Rüzgar gülü bölgede bölgeye değişiklik gösterir. Örneğin Fransa'nın Caen bölgesinin rüzgar gülü Şekil 2.2'de verilmiştir. Bu bölge Brest'ten 150 km. uzaktadır. Başlıca rüzgar yönünün aynı olmasına rağmen, Caen bölgesinde rüzgar enerjisini batı ve güneybatıdan esen rüzgarlar oluşturmaktadır.



Şekil 2.2 Fransa'nın Caen bölgesinin rüzgar gülü[3]

Komşu bölgelerdeki rüzgar gülü genellikle çok benzerdir. Bu nedenle pratikte, çevredeki gözlemlere göre, bir interpolasyon yapılabilir. Ancak alan çok kompleks ise (dağlardan, vadilerden oluşuyor ise) böyle bir yaklaşım yapmak yanlış sonuçlar verir.

Şekil 2.3'de Antakya ilimizin rüzgar gülü şematik olarak verilmiştir. Yıllık ortalama rüzgar hızı ve rüzgar frekansı ölçeği şekilde verilmiştir. Şekle göre hakim rüzgar yönü güneybatıdır.



Şekil 2.3 Antakya ilimizin rüzgar gülü

2.4 Rüzgar Enerjisini Etkileyen Faktörler

2.4.1 Yeryüzünün Engebeliliği

1 km. yüksekliğe kadar yeryüzünün engebeliliği rüzgarın hızını etkiler. Rüzgarın hızı yeryüzüne karşı olan sürtünme nedeni ile azalır.

Rüzgar enerjisinde rüzgar koşullarını değerlendirmek için engebelilik sınıfı göz önüne alınır. Tablo 2.2'de engebelilik sınıfları verilmiştir.

Rüzgar hızı ölçümleri Dünya Meteoroloji Teşkilatı'nın belirlemiş olduğu 10m. yükseklikte yapılmaktadır. Türbinler ise genellikle 60 m. yüksekliğindedir. Bu yükseklikte hızı belirlemek için aşağıdaki formül kullanılır.

$$\frac{V_{h2}}{V_{h1}} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

V_{h2} : h_2 yüksekliğindeki rüzgar hızı

V_{h1} : h_1 yüksekliğindeki rüzgar hızı

h_1 : rüzgar hızının ölçümünün yapıldığı yükseklik

h_2 : rüzgar hızının hesaplanacağı yükseklik

α : yeryüzü engebeliliğine bağlı katsayı

Tablo 2.2 Engebelilik sınıfı

Engelbelilik Sınıfı	α	Açıklama
0	0,086	Deniz seviyesi
0,5	0,105	Açık alanlar
1	0,145	Çiti olmayan tarım alanları
1,5	0,159	Üzerinde ev bulunan ve 1250 m. uzunluğunda 8 m. Yüksekliğinde ağaçlarla çevrilmiş tarım alanı
2	0,175	Üzerinde ev bulunan ve 500 m. uzunluğunda 8 m. Yüksekliğinde ağaçlarla çevrilmiş tarım alanı
3	0,234	Köylerin, küçük kasabaların, ormanların bulunduğu alanlar
4	0,353	Yüksek binaların, gökdelenlerin bulunduğu büyük şehirler

2.4.2 Rüzgar Engelleri

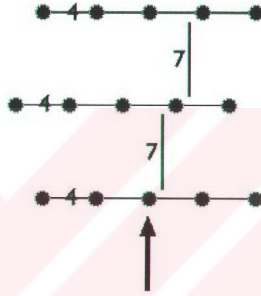
Binalar, ağaçlar, kayalar..vb. rüzgarın hızını azaltan engellerdir. Bu engeller çevrelerinde türbülans yaratırlar. Şekil 2.4'te bir engelin çevresindeki rüzgar akışı gösterilmiştir. Türbülans alanı engelin yüksekliğinin 3 katına kadar uzanabilir. Türbülans engelin arka tarafında daha belirgindir. Bu nedenle türbinin kurulacağı alanda bu tür engellerden kaçınılmalıdır.

Engellerin rüzgar hızındaki etkisi engelin porozitesine bağlıdır. Porozite, rüzgarın çarptığı nesnenin açık alanlarının yüzdesidir. Binaların porozitesi %0, sık ağaçların porozitesi %30, ağaçların porozitesi %50 ve yaprakları seyrek olan

[illegible]

2.4.3 Park Etkisi

Rüzgar türbini tarlasında bulunan her türbin rüzgarın hızını azaltır. Bu nedenle türbinler olabildiğince birbirinden uzağa yerleştirilir. Genel olarak türbinler hakim rüzgar yönünde 5 ile 9 rotor çapı, hakim rüzgar yönüne dik olarak da 3 ile 5 rotor çapı boşluk bırakılacak şekilde yerleştirilirler. Şekil 2.6'da bir rüzgar türbini tarlasının yerleşim şekli verilmiştir. Park etkisi nedeniyle %5 civarında bir enerji kaybı olur.



Şekil 2.6 Bir rüzgar türbini tarlasının yerleşim şekli[3]

2.4.4 Tünel Etkisi

Rüzgar binaların veya dağların arasında geçerken hızı artar. Bu etkiye tünel etkisi denir. Açık alanda hızı 6 m/s olan rüzgarın hızı, bu doğal tünellerde 9 m/s'ye kadar çıkabilir.

Düz olmayan tepelerin arasında yer alan tünellerde çok fazla türbülans olur. Bu da rüzgarın hızının artmasındaki avantajı boşa çıkarabilir.

2.4.5 Tepe Etkisi

Rüzgar türbinleprini yerleştirmenin yaygın yollarından biri, türbini tepeye koymaktır. Tepelerde rüzgar hızı çevreye göre daha fazladır. Eğer tepe sarp ise, tünel etkisinde olduğu gibi, meydana gelen türbülanslar rüzgarın hızının artmasındaki avantajı boşa çıkarabilir.

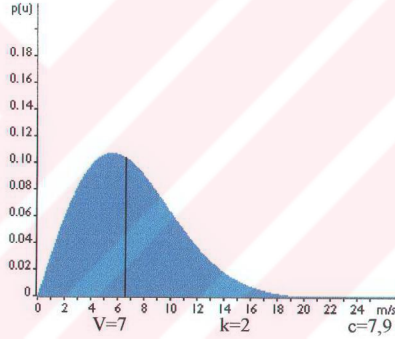
2.5 Weibull Dağılımı

Rüzgar enerjisinin frekans dağılımına en uygun istatistiksel dağılımının Weibull dağılımı olduğu başta Justus (1978) ve Lyons tarafından ifade edilmiştir. Rüzgar hız değerlerinin hakim yön ve şiddetlerinin bulunması, bu dağılımın kullanılmasının esas sebepleri arasında yer almaktadır. Buna göre Weibull dağılımı

$$P(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir[12].

V : rüzgar hızı(m/s)
c : ölçek değişkeni(m/s)
k : şekil değişkeni



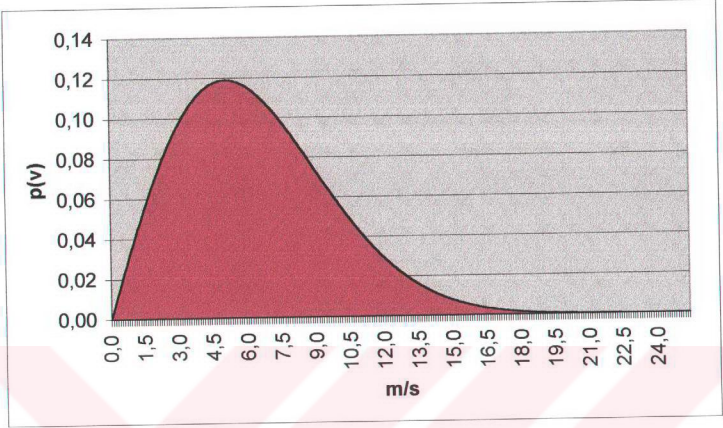
Şekil 2.7 Weibull dağılımı[3]

Şekil 2.7’de ortalama hızı 7 m/s, şekil değişkeni 2 ve ölçek değişkeni 7,9 alınarak çizilmiş bir Weibull dağılımı verilmiştir. Eğer şekil değişkeni 2 ise, şekildeki gibi, bu dağılıma Rayleigh dağılımı denir. Rüzgar türbini üreticileri, makinelerinin standart performans diyagramını Rayleigh dağılımını kullanarak verirler. Şekil 2.8’de ise Bozcaada için Rayleigh dağılımı verilmiştir.

2.6 Rüzgardan Elde Edilebilecek Elektrik Gücünün Hesabı

Rüzgar türbinin rotoru hava akımındaki enerjiyi absorbe eder ve bu da rüzgarın hızına bir etkide bulunur. Şekil 2.9’da havanın rotor çevresindeki akışı

verilmiştir. Rotoru terkeden havanın hızı azalır ve teğetsel olarak da yönünde bir sapma olur.



Şekil 2.8 Bozcaada için Rayleigh dağılımı

Rüzgar gücünün hesabında kinetik enerji formülü temel alınır. Türbine giren rüzgarın enerjisi ile çıkan rüzgarın enerjisi arasındaki fark elde edilen enerjiyi verir.

$$W_w = V_a \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) \quad (2.3)$$

ρ : Birim hacim için havanın yoğunluğu
 v_1 : Türbine giren rüzgarın hızı
 v_3 : Türbinden çıkan rüzgarın hızı
 V_a : Hava hacmi elemanı

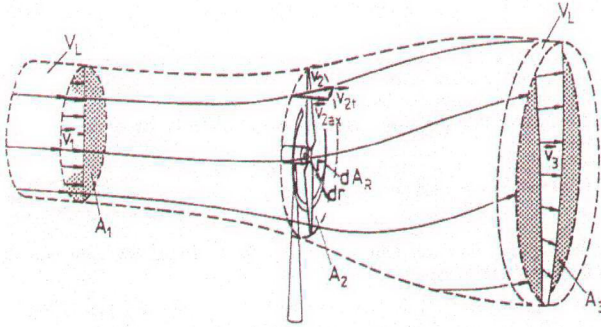
Rüzgar türbininin gücü şu şekilde ifade edilir:

$$P_w = \frac{dW_w}{dt} = d \left[\frac{V_a \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2)}{dt} \right] \quad (2.4)$$

Türbinin rotorundan geçen hava hacminin akışı ise

$$\frac{dV_a}{dt} = A_R v_2 \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir.



Şekil 2.9 Havanın rotor çevresindeki akışı[14]

Yarı kararlı halde güç:

$$P_w = A_R \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) v_2 \quad (2.6)$$

Güç absorpsiyonu ve türbinin işletme koşullarını efektif alan A_R , rüzgar hızı ve bu değerlerde oluşan değişiklikler belirler. Rüzgar türbininden elde edilecek maksimum güç Betz tarafından aşağıda verildiği gibi ifade edilmiştir[14].

$$P_{w_{max}} = \frac{16}{27} A_R \frac{\rho}{2} v_1^3 \quad (2.7)$$

Rotordan geçen havanın ortalama hızının, türbine giren rüzgarın hızı ile türbinden çıkan rüzgarın hızının ortalaması olduğunu varsayalım. Bu durumda rotordan geçen havanın kütlesi;

$$m = \rho A \frac{(v_1 + v_3)}{2} \quad (2.8)$$

olarak elde edilir.

Newton'un 2. Kanununa göre rotor tarafından rüzgardan elde edilen güç

$$P = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_3^2) \quad (2.9)$$

Denklem (2.8), Denklem (2.9)'da yerine konursa;

$$P = \frac{\rho}{4} (v_1^2 - v_3^2) (v_1 + v_3) A \quad (2.10)$$

Rotorun rüzgarı engellemediğini varsayarak aynı alandan geçen havanın gücü;

$$P_0 = \frac{\rho}{2} v_1^3 A \quad (2.11)$$

P ile P₀ arasındaki orana verim katsayısı denir.

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{\rho}{4} (v_1^2 - v_3^2) (v_1 + v_3) A}{\frac{\rho}{2} v_1^3 A} \quad (2.12)$$

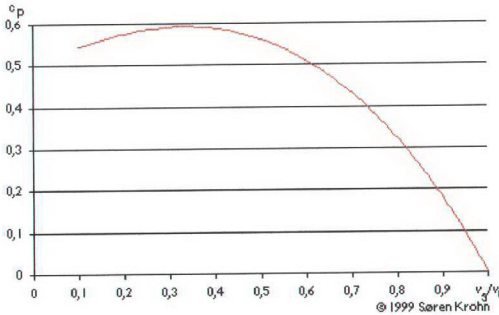
$$c_p = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right) \left(1 + \frac{v_3}{v_1} \right) \quad (2.13)$$

c_p 'nin v_3/v_1 'in fonksiyonu olarak çizilmiş eğrisi Şekil 2.10'da verilmiştir.

Eğriden de görüleceği gibi fonksiyon maksimuma $\frac{v_3}{v_1} = \frac{1}{3}$ değerinde ulaşmaktadır.

Elde edilecek maksimum güç ise toplam rüzgar gücünün $0,593$ 'ü veya $\frac{16}{27}$ 'sidir.

Yani bir rüzgar türbininde verim katsayısının alabileceği maksimum değer $0,593$ 'tür. Verim katsayısının pratikte alabildiği değerler ise $0,10$ ile $0,45$ arasında değişir{[1],[3]}.



Şekil 2.10 c_p 'nin v_3/v_1 'in fonksiyonu olarak çizilmiş eğrisi[3]

2.7 Rüzgar Türbinleri

Günümüzde değişik özellikte ve türde rüzgar türbinleri bulunmaktadır. Modern bir rüzgar türbininin yapısı Şekil 2.11'de verilmiştir.

Rüzgar türbinleri dönme eksenlerine göre üçe ayrılırlar:

2.7.1 Yatay Eksenli Türbinler

Verim katsayısının ($c_p=0,42$) ve kanat uç hızı rüzgar hızı oranın yüksekliğinden dolayı en fazla tercih edilen rüzgar türbidir. Dönme eksenleri rüzgar yönüne paralel ve kanatlar rüzgar yönüne diktir. Rotor, rüzgarı en iyi alacak şekilde döner bir tabla üzerine yerleştirilmiştir.

Yatay eksenli türbinlerin çoğu rüzgarı önden alacak şekilde tasarlanır. Rüzgarı arkadan alan türbinlerin ise yaygın bir kullanım alanı yoktur.

2.7.2 Düşey Eksenli Türbinler

Düşey eksenli türbinlerde, kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeni ile dönme hareketi oluşur. Bu türbinlerin dönme eksenleri düşey ve rüzgar yönüne diktir. Kanat kirişleri dönme eksenine dik olacak şekilde yerleştirilmiştir.

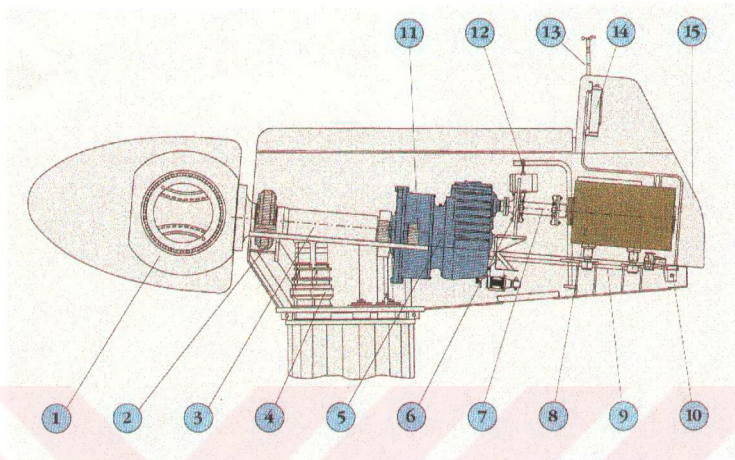
2.7.3 Eğik Eksenli Türbinler

Dönme eksenleri (Şekil 2.12), düşeyle rüzgar yönünde bir açı yapan türbinlerdir. Ayrıca, kanatlar ve dönme eksenini arasında da belirli bir açı bulunmaktadır. Yaygın bir kullanım alanı yoktur.

2.8 Rüzgar Enerjisinin Ekonomisi

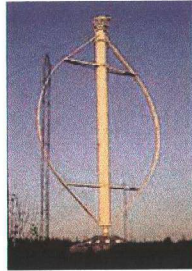
Ekonomik değerlendirme, yalnızca elektrik şebekesine bağlı, çalışma koşulları bilinen büyük rüzgar türbinleri için yapılmaktadır. Bu değerlendirme sonucunda rüzgar türbin tesisinin ekonomik olup olmadığı görülür. Küçük ve orta güçteki tesisler için böyle bir değerlendirme uygun değildir.

Yapılan ekonomik değerlendirmelerde biri basit, diğeri detaylı iki hesaplama yöntemi kullanılır. Basit yaklaşım türbin büyüklüğü arttıkça şirketler ve finans kurumları için yetersiz olacaktır.



- | | |
|---------------------------------|--|
| 1- Küresel kanat göbeği | 9- Karkas |
| 2- Ana mil yatağı | 10- Dişli kutusu yağının soğutulması için radyatör |
| 3- Ana şaft | 11- Dişli kutusu süspansiyonu |
| 4- Yaw ¹ dişlileri | 12- Vinç (bakım için) |
| 5- Dişli kutusu | 13- Anemometre ve rüzgar fırıldağı |
| 6- Hidrolik disk fren tertibatı | 14- Radyatör |
| 7- Esnek kavrama | 15- Kapak |
| 8- Sıvı soğutmalı generatör | |

Şekil 2.11 Rüzgar türbininin yapısı[15]



Şekil 2.12 Düşey eksenli rüzgar türbini

¹ Yaw: Makine odasının rüzgar yönünü takip etmek üzere yatay eksende dönmesi

Hesaplarda kullanılacak örnek ile ilgili değerler aşağıda verilmiştir.²

Rotor çapı	: 10 m
Ortalama rüzgar hızı	: 9 m/s
Tesis kapasitesi	: 11 kW
Tesis satın alma maliyeti	: 8600 pound
Genel enflasyon oranı	: $\alpha = \%8$
Konvansiyonel enerjinin	
karşılaştırmalı enflasyon oranı	: $\beta = \%15$
Kredi faizi	: $\tau = \%10$
Bakım maliyeti	: $\delta = \%3 \times \text{Satın alma maliyeti}$
Sistemin tahmini ömrü	: 20 yıl

2.8.1 Basit Hesap

Bu yöntem lineer bir değer düşüşü ile yapılır. Yakıt fiyatlarındaki enflasyondan kaynaklanan artışı ihmal eder.

$$F = \frac{C_i(\tau + \delta)}{100E} \quad (2.14)$$

F : Rüzgar türbininden kWh başına üretilen enerji maliyeti
 C_i : Tesis edilen sistemin ilk yatırım maliyeti
 E : Tesisten elde edilen yıllık enerji

Sonuçlar, Tablo 2.3 F sütununda gösterilmiştir.

2.8.2 Sermaye Bütçeleme Hesabı (Detaylı Hesap)

Standart sermaye bütçeleme hesap yöntemi, sistemin tahmini ömrü süresince, şimdiki değere indirgenmiş toplam nakit akışını verir.

$$C_0 = C_i + 0,03C_i \sum_{i=1}^{20} \left(\frac{1+\alpha}{1+\tau} \right)^i = 1,497C_i \quad (2.15)$$

Aynı teknikle konvansiyonel enerjideki indirgenmiş nakit tasarrufu, C_s belirlenir.

$$C_s = EG10^{-2} \sum_{i=1}^{20} \left(\frac{1+\beta}{1+\tau} \right)^i = 0,329EG \quad (2.16)$$

² Değerler EİEİ'sinin 1992 yılında yayınladığı Rüzgar Enerjisi kitabından alınmıştır.

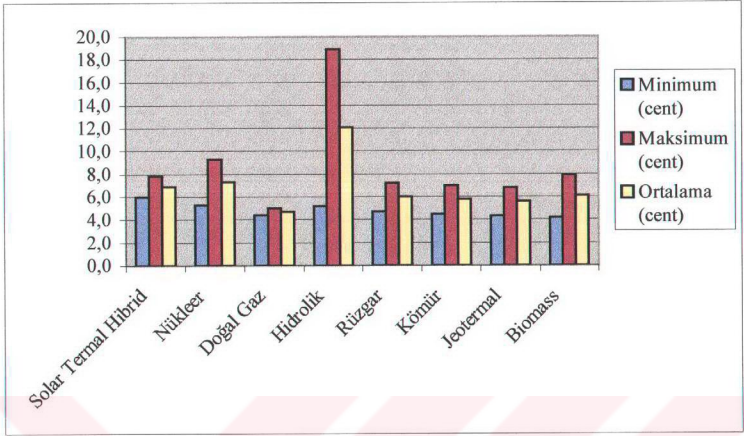
Tablo 2.3 Weibull dağılımını temel alan ve yılda üretilen enerji

Ortalama Yıllık Rüzgar Hızı m/s	E (kWh)	F (penny/kWh)	G (penny/kWh)
4	13.500	8,28	2,9
5	25.500	4,38	1,53
6	37.500	2,98	1,04
7	48.500	2,3	0,81
8	57.500	1,94	0,68

$C_0 = C_s$ olduğu zaman sistem ne kar ne de zarar eder. Tablo 2.3'teki G sütunu, bu durumdaki konvansiyonel yakıtların maliyetini verir. Eğer, yerine geçen yakıtların şimdiki maliyeti, G sütununda bulunan değerlerden fazla ise, rüzgar türbini tesisi ekonomik olacaktır.

1990 yılında dört rüzgar tarlasından elde edilen verilerde, üretilen elektriğin ortalama maliyetinin 0,06 ECU/kWh olduğu belirtilmektedir. Bu değer %5 faiz ve 20 yıl üzerinden sermaye maliyet amortismanının yanı sıra, işletim ve bakım harcamalarını da içerir.

Değişik kaynaklarla rüzgar arasında karşılaştırma yapılırken, elde güvenilir rakamların bulunmaması bir dezavantajdır. İngiltere'de elektrik endüstrisinin özelleştirilmesi ile farklı kaynaklardan elde edilen elektriğin maliyeti yeni bir boyut kazanmıştır. Bu ülkede, termik santrallerden elde edilen elektriğin maliyeti yaklaşık olarak 0,06 ECU/kWh'tir. Günümüzde, rüzgar tarlalarından üretilen elektrik, Şekil 2.13'de görüleceği gibi, termik ve nükleer santrallerden üretilen elektrikten ucuz, doğalgaz kullanan santrallerde üretilen elektrikten çok az bir miktar pahalıdır. Gelecek on yıl içinde rüzgar enerjisi maliyetinin %20-25 oranında azalacağı beklenmektedir [1],[16].



Şekil 2.13 Santrallerin elektrik enerjisi maliyetleri[19]

ŞEBEKE BAĞLANTISI

Bu bölüm, Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems kitabının dördüncü bölümünden yararlanılarak hazırlanmıştır.

Rüzgar enerjisinden elde edilen elektrik enerjisinin şebeke bağlantısı, sonsuz güçlü şebekeye bağlantı ve zayıf şebekeye bağlantı olarak ayrılmalıdır. Bu iki bağlantı şeklinde de rüzgar enerjisi çeviricileri güvenilir şekilde çalışmalıdır.

Rüzgar türbinleri, genellikle, sonsuz güçlü şebekeden uzak yerlerdedir. Bu nedenle, zayıf şebekeye bağlantı yapılmaktadır. Büyük rüzgar enerjisi çeviricilerinde ve rüzgar enerjisi tarlalarında güç, şebekenin ilettiği güç ile aynı seviyeye ulaşabilir. Bunun anlamı, şebekenin ve rüzgar tarlasının karşılıklı etkileri göz önüne alınmalıdır.

Rüzgar enerjisi çeviricilerinin şebeke bağlantısı için gereken cihazlar ve şartlar aşağıda özetlenmiştir.

Anahtar donanımı: Devre kesici minimum güç devresini açacak kapasitede olmalı ve maksimum kısa devre akımına göre tasarımı yapılmalıdır.

Koruma cihazları: Senkron ve asenkron generatörler için düşük gerilim $(1,0-0,7)U_N$, yüksek gerilim $(1,0-1,15)U_N$, düşük frekans (48-50Hz) ve yüksek frekans (50-52Hz) koruma cihazları gerekmektedir. Evirici için generatörlerdeki gibi gerilim koruması gerekmemekte fakat frekans koruması gerekmektedir.

Reaktif güç kompanzasyonu: Güç faktörü 0,9 kapasitif ve 0,8 endüktif arasında olmalıdır. Büyük güçteki rüzgar tarlalarında reaktif güç kompanzasyonu için elektrik firmasının onayı gerekmektedir.

Bağlantı şartları: Bağlantı bütün harici hatlarda gerilim olması halinde gerçekleşir. Senkron generatörler için senkronlama cihazı gereklidir. Gerilim toleransı $\Delta U \pm \%10 U_N$, frekans toleransı $\Delta f \pm 0,5\text{Hz}$ ve faz açısı toleransı $\Delta \phi \pm 10^\circ$ dir.

Asenkron generatörlerde ise $(0,95-1,05)n_{\text{syn}}$ aralığında bağlantı olmaz, ayrıca motor olarak yol vermek için başlangıç akımının sınırlandırılması gerekmektedir.

Evirici için ise alternatif akım tarafının yüksüz olması veya senkron generatör için gereken şartların gerçekleştirilmiş olması gerekmektedir.

Şebeke geri beslemesi: Çalışma koşullarının bozulmaması için harmonik akımları, gerilim dalgalanmaları ile ilgili geri besleme alınması gerekmektedir. Şebeke geri beslemesi şebekenin kontrolü için gereklidir.

Rüzgar enerjisi çeviricilerinin şebeke üzerindeki etkisi, şebeke bağlantısı sonucunda belirlenir. Şebekenin korunması, koruma cihazları ve kısa devre gücünün tesiri ile etkilenebilir.

3.1 Şebeke Bağlantısı

1980'lerde rüzgar enerjisi çeviricileri için kullanılan generatörün şebekeye bağlantısı geleneksel enerji kaynaklarının montajına dayanıyordu. 1980'lerin sonunda elektronik frekans çeviricilerin 50 kW'lık rüzgar enerjisi çeviricilerinde kullanılmasıyla yeni bir kapı açılmış oldu. Böylece, değişken hızda çalışan rüzgar türbinlerinin kullanılması sağlanmış oldu.

Asenkron generatörlü türbin ile karakterize edilen ve şebekeye doğrudan bağlı sistemlerin kullanımında artış olmuştur. Bununla beraber dişli çarkı olmayan, bilezikli tip, kontrollü veya kontrolsüz doğrultucu ile şebeke veya kendinden komütasyonlu eviricilerin kullanıldığı senkron makineler de yaygındır. Bu tür sistemlerdeki maliyet artışlarına, türbin hızının hakim rüzgar hızına göre ayarlanması, rüzgar enerjisi çeviricilerinin çevre ile uyumlu olması ve yüksek enerji çıkışı sağlaması nedeniyle tercih edilebilir.

Bu tür sistemler, rüzgar türbinine bağlı generatördeki değişken frekanslı elektrik enerjisini, sabit frekans ve gerilimdeki şebekeye iletecek frekans çevirici sistemlerine ihtiyaç duyarlar.

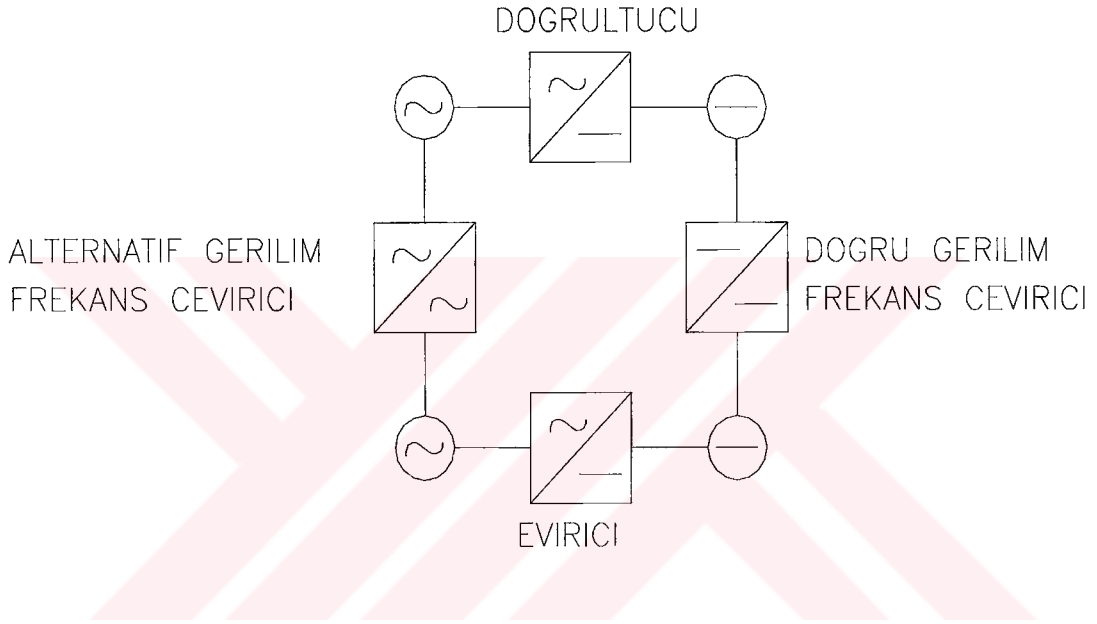
3.1.1 Frekans Çevirici Sistemleri

Elektronik frekans çeviricileri, elektrik enerjisinin çevrimi ve kontrolü için yaygın çözümlerden biridir. Rüzgar enerjisi çeviricilerinde de, özellikle değişken hızlı sistemlerde, generatörün frekans ve gerilimini şebeke frekans ve gerilimine ayarlamak için kullanılmaktadır.

Frekans çeviricilerinin döner alanlı transformatörlere göre avantajları;

- az kayıplı enerji dönüşümü,
- az hacim ve ağırlık,
- az bakım gerektirmesi,
- aşınmasız çalışmadır.

Şekil 3.1’de frekans çeviricisi kullanılarak yapılan enerji çevrimi gösterilmiştir.

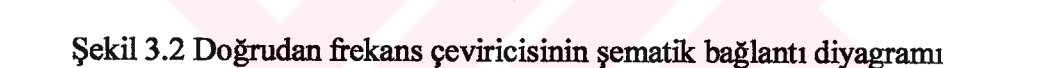


Şekil 3.1 Frekans çeviricisi kullanılarak yapılan elektrik enerjisi çevrimi

Bu çevirici sistemlerinin başlıca parçaları, yarıiletken anahtarlama elemanları, elektronik sinyal işleme ünitesi, koruma ve düzenleme yapan elemanlardır. Rüzgar enerjisi sistemlerinde üç fazlı generatörler kullanıldığı için üç fazlı çeviriciler göz önüne alınacaktır. Üç fazlı çeviricileri iki başlıkta inceleyebiliriz.

- Doğrudan frekans çeviricileri
- Ara devreli frekans çeviricileri

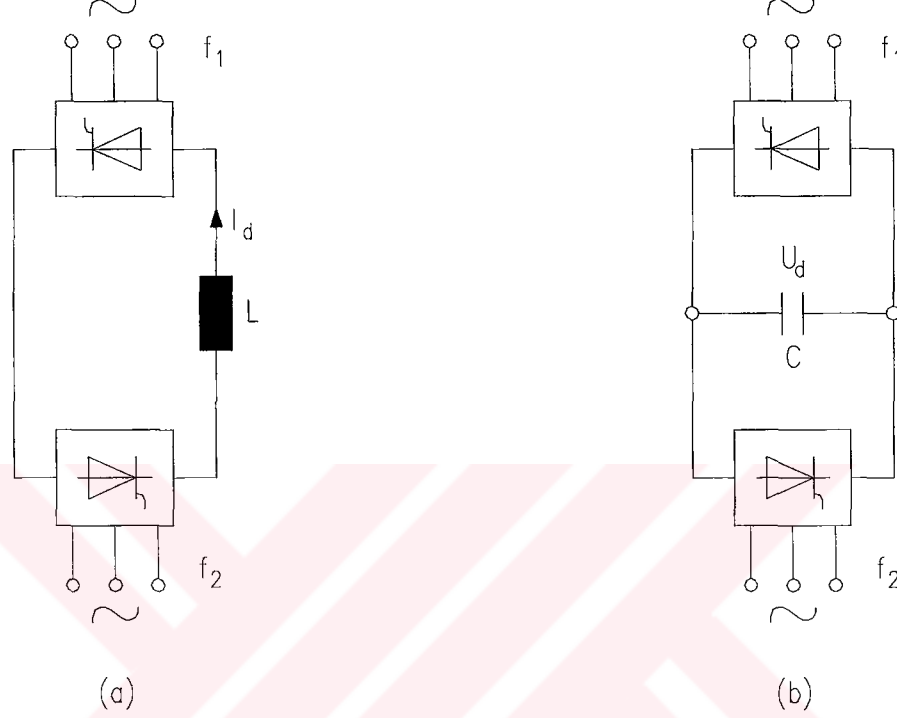
Doğrudan frekans çeviricileri, özellikle, frekansın azaltılması için kullanılır. Şekil 3.2’de doğrudan frekans çeviricisinin şematik bağlantı diyagramı verilmiştir. Doğrudan frekans çeviricilerinde, sistemi kaynak veya tüketici olarak çalıştırmak için iki adet paralel olmayan köprü çevirici vardır. Bu da kontrol elemanlarının ve güç kapılarının maliyetinin artmasına neden olur.



Are dermal fishers associated: 18% 14% 13% 18%

düzgünleştirmek için endüktans, U frekans çeviricisinde ise gerilimi düzgünleştirmek için kondansatör kullanılır.

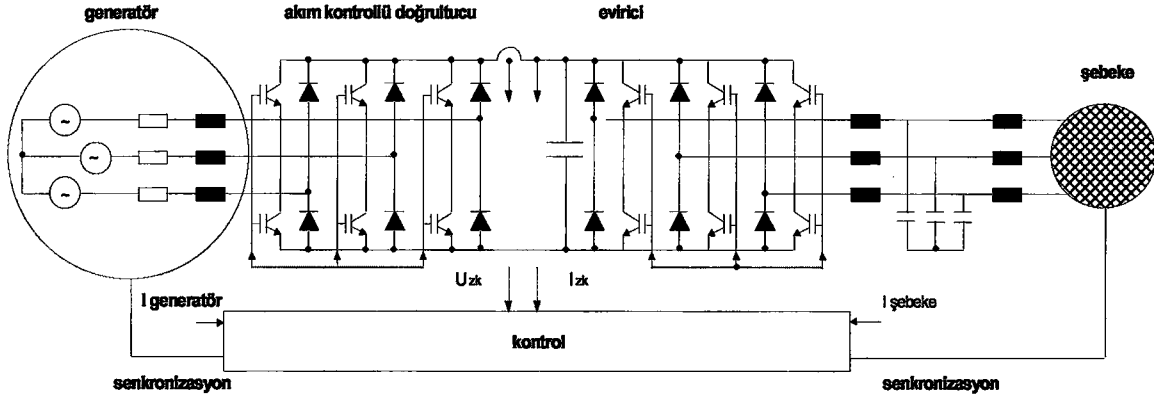
Ara devreli frekans çeviricileri enerji çevriminde ve değişken hızlı rüzgar enerjisinin şebekeye bağlantısında bir üstünlük sağlamıştır. Doğrudan frekans çeviricileri ise çift çıkışlı asenkron generatörlerin rotor devresinde kullanılır.



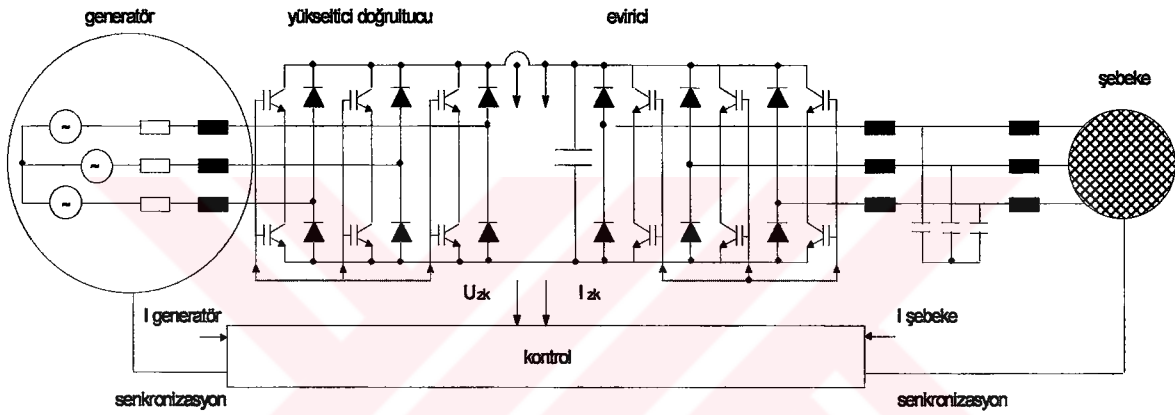
Şekil 3.4 (a) I frekans çeviricisi (b) U frekans çeviricisi

Şekil 3.5'te sinusoidal gerilim üreten senkron generatörlü rüzgar enerjisi çeviricisi için tasarlanmış frekans çevirici verilmiştir. Generatör akımının değeri doğrultucunun ateşlenmesiyle belirlendiği için akım kontrollüdür. Yüksek veya düşük uyarmalı çalışmada generatör akımında faz farkı oluşturularak generatör terminallerindeki gerilim seviyesi değiştirilebilir.

Trapezoidal gerilim üreten generatörler için doğrultucu tasarımı farklı olmalıdır. Gerilim, yükseltici (step up) doğrultucu kullanılarak yükseltilir. Şekil 3.6'da verilen altı darbeli köprü çevirici yükseltici çalışmada generatör sargılarını endüktans gibi kullanır. Bu tür sistemlerde doğrultucu generatöre mümkün olduğunca yakın olmalıdır. Çünkü, uzun mesafelerde yüksek frekans salınımları yüksek gerilimlere neden olur.



Şekil 3.5 Sinusoidal gerilim üreten senkron generatör için frekans çevirici



Şekil 3.6 Trapezoidal gerilim üreten generatörler için frekans çevirici

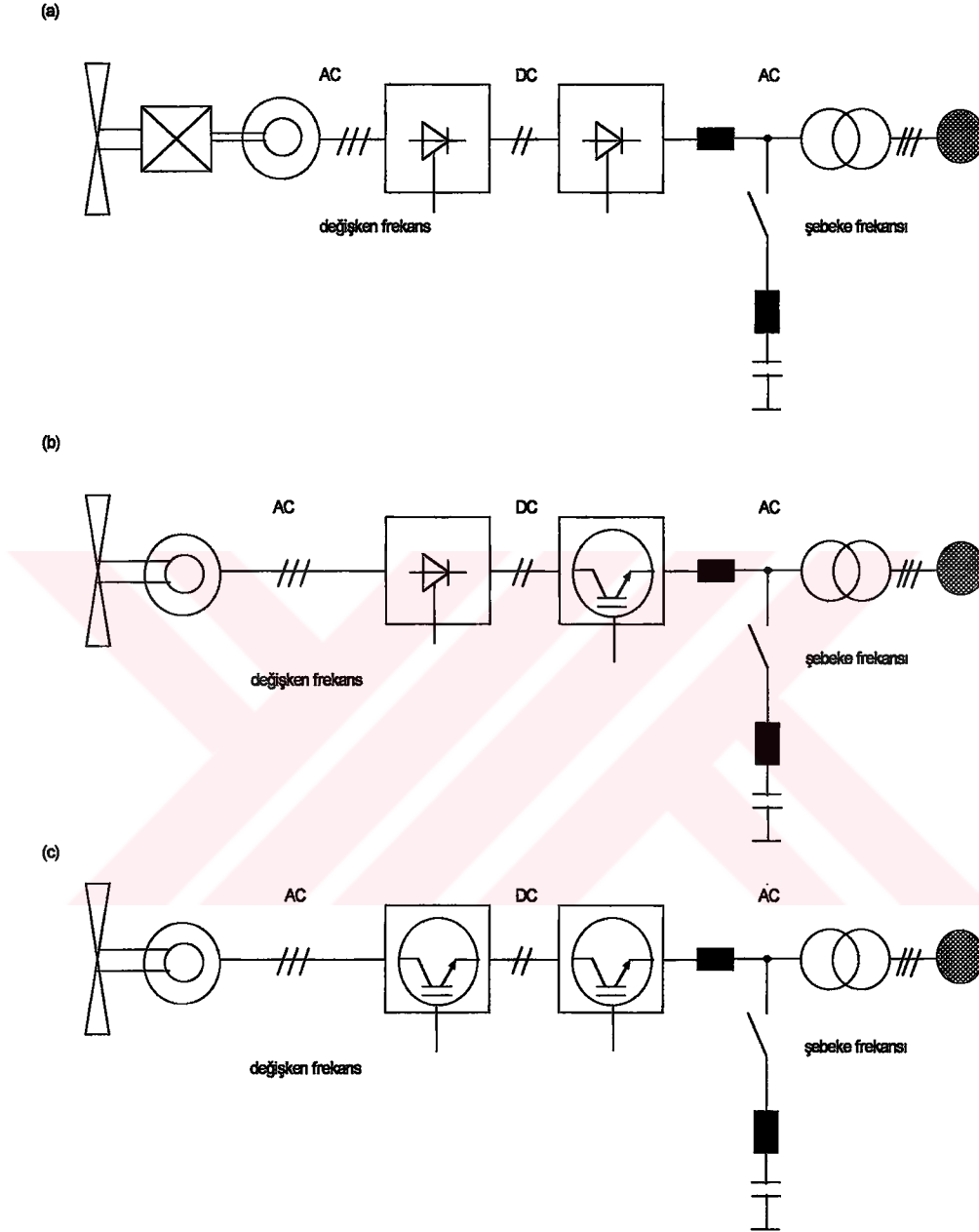
3.1.2 Frekans Çeviricilerinin Tasarımı

Rüzgar enerjisinin şebekeye bağlantısı, generatörün karakteristiği ve izin verilebilir şebeke tepkisi ile belirlenir. Frekans çeviricileri kullanıldığı zaman, çevrim kayıpları ve artan maliyetler yüksek enerji çıkışı ile dengelenir.

Şebekeye iletilen gerilimin ve akımın eğrisi sinusoidale yakın olmalıdır. Ayrıca harmonikleri az olmalıdır. Sürekli değişen hareketin kontrolü ve sabitlenmesi, özellikle sürekli uyarmalı senkron makinelerde, güvenli bir çalışma için gereklidir. Frekans çeviricilerin, şebeke gerilimini sınırlayan ve destekleyen bir ünite gibi çalışması istenir.

Frekans çevirici sistemleri, değişken hızlarda çalışan rüzgar enerjisi generatörleri tarafından üretilen geniş aralıktaki frekansları sabit şebeke frekansına çevirirler.

Uyarma sargılı generatörler, gerilimin terminallerden veya frekans çeviricisi bölümlerinde uyarma cihazları tarafından kontrolüne izin vermelidir.



Şekil 3.7 Şebeke bağlantılı rüzgar enerjisi santralleri için frekans çeviricileri

- (a) hat komütasyonlu evirici ile kontrolsüz doğrultucu
- (b) kendinden komütasyonlu evirici ile kontrollü tristör doğrultucu
- (c) darbe genişlik modülasyonlu evirici ve doğrultucu

Frekans çeviricisi, tasarımına bağlı olarak, generatörün ve ara devrenin çalışmasına etki edebilir. Kontrolsüz doğrultucu kullanıldığı zaman, frekans çeviricinin generatörün ve ara devrenin çalışmasına etkisi yoktur.(Şekil 3.7 (a)) Kontrollü tristör doğrultucu (Şekil 3.7 (b)), ara devredeki enerjini durumunu ve çıkış gücünün ayarlanmasını sağlar. Darbe genişlik modülasyonlu frekans çeviricileri (Şekil 3.7 (c)) ise ara devrenin gerilimini değiştirmek ve düzenlemek, generatör akımının büyüklüğünü ayarlamak için kullanılır.

Maliyet nedeniyle 100 kW ile 1 MW aralığındaki generatörler, çıkış gerilimi 1000 V'un altında olacak şekilde tasarlanır. 500 V ve 800 V arasında tasarım yapmak yaygındır. Bu ancak yarıiletken parçaların, seçilen frekans çeviricinin tasarımı için gerekli akım ve gerilim verilerini karşılaması ile mümkündür. Eğer, yarıiletken parçalar bu verileri karşılamıyorsa, anahtarlar veya çevirici bölümleri paralel bağlanmalıdır.

Generatör ve şebekenin ihtiyaçları tarafından belirlenen diğer sistem kriterleri, frekans çeviricisinin tasarımında göz önüne alınmalıdır. Elektromagnetik uygunluk, sistem kayıpları, şebekedeki enerji akışının kontrolü tasarımda önemlidir.

3.1.3 Ara Devreli Frekans Çeviricileri

Doğru akım veya gerilim ara devreli frekans çeviricisi ile çalışan şebeke bağlantılı rüzgar enerjisi çeviricileri Şekil 3.8'de gösterildiği gibi üç bölümden oluşur.

- Doğrultucu
- Ara devre
- Evirici

İyi bir frekans çeviricisi tasarımı, hem durum değişkenlerine hem de rüzgar enerjisi çevrim sisteminin yönetim ve izleme detaylarına dayanır.

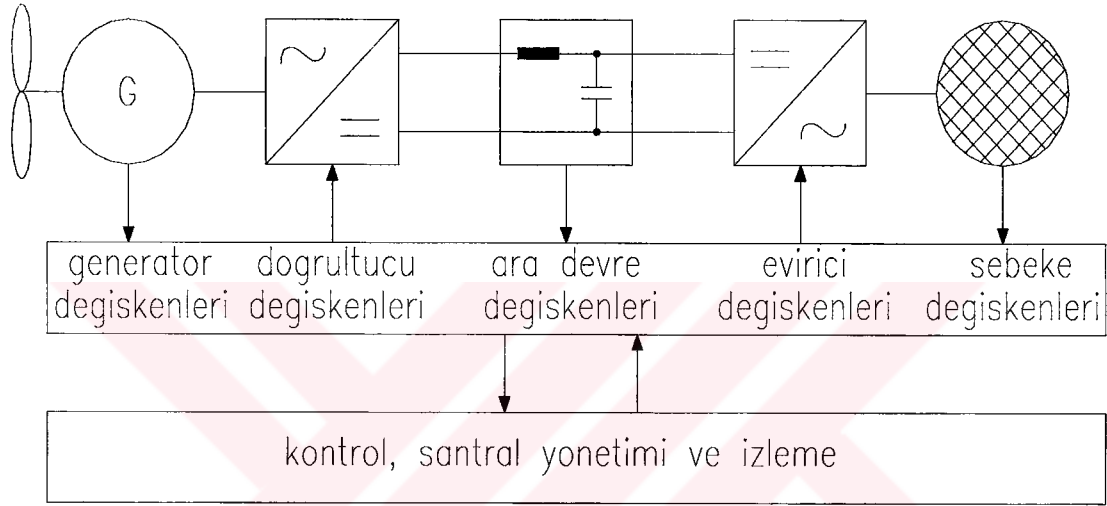
Doğrultucu, generatörün ürettiği alternatif akım ve gerilimi ara devreye doğru gerilim ve akım olarak çevirir. Buradaki değişkenler türbinin ve generatörün tahrik momenti, dönüş hızı, generatörün gerilimi ve akımıdır.

Enerji depolamalı ara devre, şebeke frekansını generatör frekansından ayırmaya yarar. Çalışması ara devredeki akım ve gerilim tarafından etkilenir.

Şebeke evirici üzerinden beslenir. Eviricinin çalışma durumu gerilim, akım, frekans, aktif reaktif güç değerleri ile karakterize edilir.

Doğru akım ara devreli frekans çeviricilerinin belirgin özelliği Şekil 3.4 (a)'da gösterildiği gibi ara devresinde endüktans olmasıdır. Bu, kısa komütasyon periyodu boyunca ara devre akımının sabit düşünülebileceği anlamına gelir

Doğru gerilim ara devreli frekans çeviricilerinin belirgin özelliği ise Şekil 3.4 (b)'de gösterildiği gibi ara devresinde kapasitans olmasıdır. Bu ara devre gerilimin diğerlerine oranla yavaşça değişmesine izin verir.

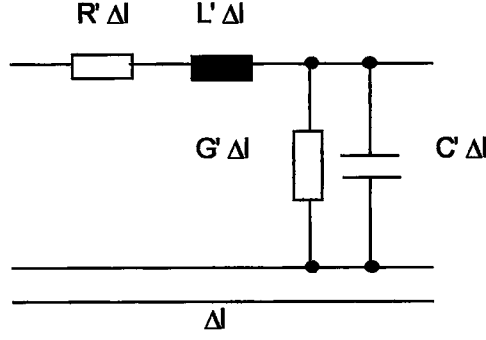


Şekil 3.8 Ara devreli frekans çeviricisi ile çalışan şebeke bağlantılı rüzgar enerjisi çevirici

3.1.3.1 Generatör ve Doğrultucu Arasındaki Hat

Kablolarda bir direnç söz konusu olduğu gibi endüktif ve kapasitif elemanlar da vardır. Hattın uzunluğuna (Δl) bağlı olarak, birim uzunluktaki direnç R' ve endüktans L' seri olarak, kondüktans G' ve kapasitans C' paralel olarak gösterilir (Şekil 3.9). Uzun hatlar bu elemanların bir çoğunun seri bağlantısı olarak gösterilebilir.

Rüzgar enerjisi çeviricilerinde generatör kulenin üstündedir. Fakat şebeke bağlantısı, kontrol ve frekans çevrim sistemleri kulenin altındadır. Bu nedenle hat frekans çeviricilerini etkiler.



Şekil 3.9 Hat elemanlarının eşdeğer devresi

Generatör ile 20 kHz'e kadar çalışma frekansı olan kontrollü doğrultucu arasında, düşük bağlantı kayıpları için, en kısa mesafeden bağlantı yapılmalıdır. Bu da hatta, geçici yüksek gerilimlere ve elektromagnetik emisyonu neden olan, yüksek frekanslı bozucu sinyallere neden olur. Gerilimin ani artışı iletken izolasyonunda bozulmalara neden olur. Uzun dönemde izolasyon zarar görür. LC alçak geçiren filtreler kullanılarak yüksek gerilim sınırlandırılır. Bununla beraber, bu generatör akımının şeklini etkiler.

3.1.3.2 Doğrultucular

Sürekli uyarmalı değişken hızlarda çalışan senkron generatörler, şebeke frekansından farklı frekanslar üretirler. Generatör çıkış geriliminin veya akımının doğrultulması ve ara devredeki elemanların filtre etkisi şebeke frekansının generatör frekansından ayrılmasını sağlar.

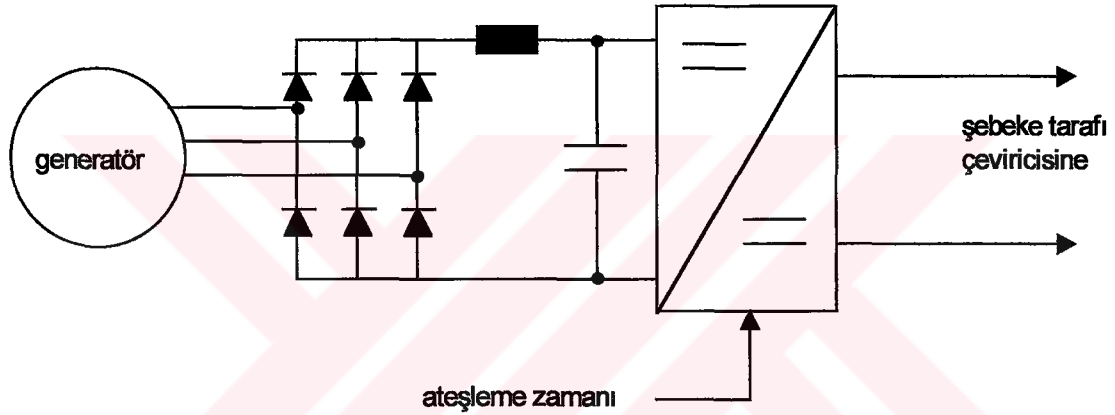
Frekans çevirici sistemlerinde doğrultucunun başlıca görevi, çıkışı kontrol ederek generatör ve türbinin kontrolünü sağlamak ve herhangi bir hata durumunda generatörü korumaktır.

Kontrolsüz diod doğrultucu köprüleri, generatör uyarma ünitesi ile gerilim regülasyonuna izin veriyorsa kullanılır. Sürekli uyarmalı generatör kullanıldığı zaman, kontrolsüz doğrultucuda uyarma etkisi görülmez. Doğrultucunun çalışması sadece şebeke tarafındaki frekans çeviricisinin güç çıkışı ve türbin hızı ile etkilenir.

Dinamik yük altındaki doğrultucu ile senkron generatör kombinasyonunun kararsız çalışmayı başlatacağı göz önüne alınmalıdır. Bu, ara devrede dik akım gerilim eğrisine neden olur. Bu da generatörün 10 Hz'in altında titreşim yapmasına yol açar. Kararlı çalışma kontrollü doğrultucuların kullanımı ile başılır.

Kontrolsüz doğrultucu ile doğru gerilim kıyıcısının kombinasyonu (Şekil 3.10), kontrollü doğrultucuya bir alternatiftir. Doğru gerilim kıyıcısı, ateşleme zamanının değiştirilmesiyle, ara devredeki gerilim değerini belirler. Yükseltici çevirici kullanarak düşük olan ara devredeki gerilimi şebeke tarafındaki frekans çeviricinin ihtiyaç duyduğu seviyeye çıkarabilmelidir.

Kontrollü doğrultucu rüzgar enerjisi çeviricilerinin kontrolü ve çalışması için arzu edilen ve istenen bir çok koşulu yerine getirir. Akımın ve gerilimin darbe genişlik modülasyonlu kontrolü generatör kontrolünün en iyi şekilde sağlanmasına yarar. Generatör akımındaki harmonikleri de büyük ölçüde azaltır.

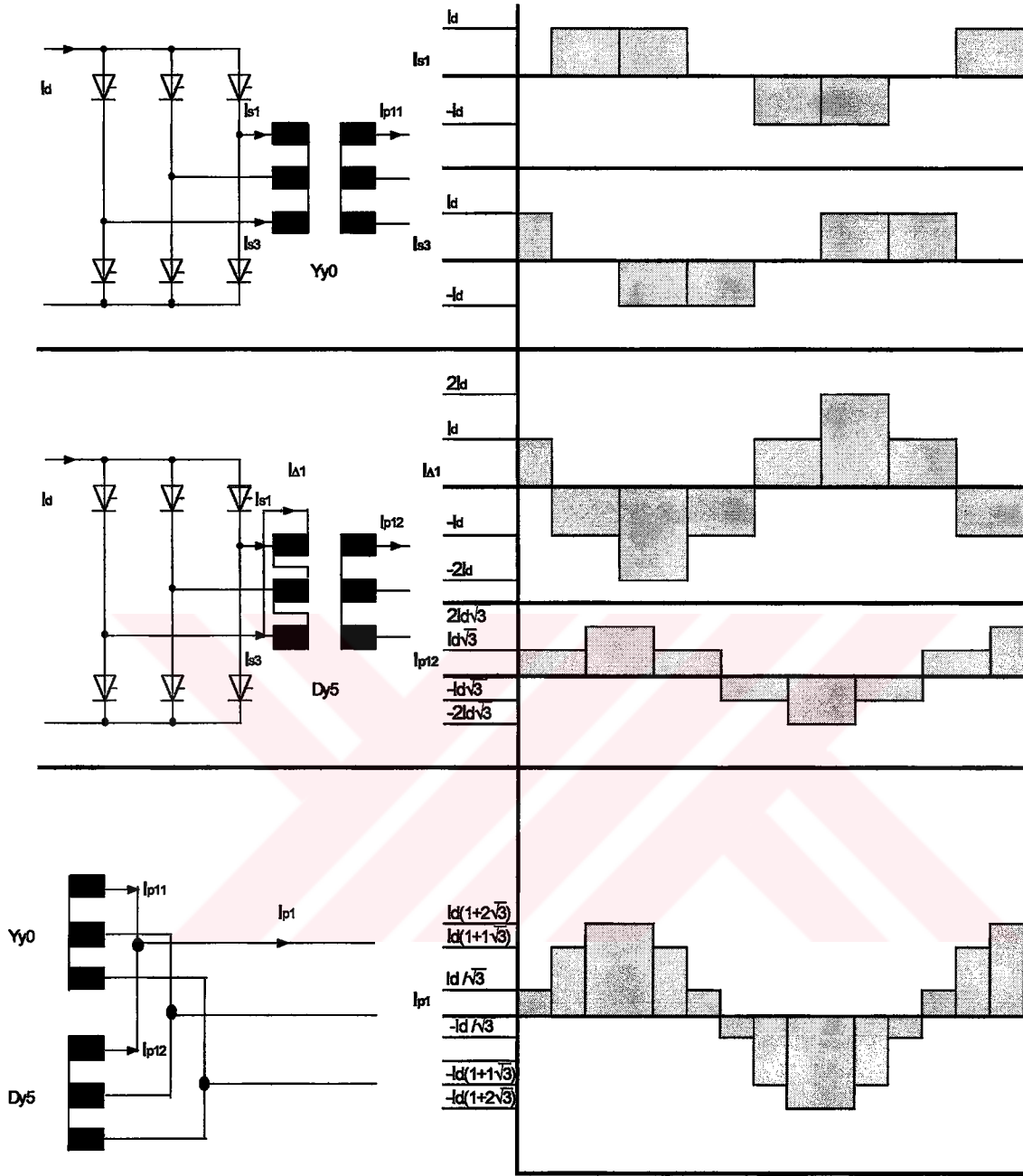


Şekil 3.10 Kontrolsüz doğrultucu ile doğru gerilim kıyıcısının kombinasyonu

Özet olarak, kontrollü doğrultucular yüksek maliyetlere sahiptir. Bununla birlikte, özellikle sürekli uyarmalı generatör çalıştırılırken, önemli avantajlar sağlar. Hem generatör akımının genliğinin hem de çıkış momentinin ayarlanmasını ve kontrolünü sağlar.

3.1.3.3 Tristörlü Eviriciler

Tristörlerin gelişimi ile şebeke komütasyonlu eviricilerin yapısı yenilendi. Yol verme ve enerji teknolojisinin uygulamalarında geniş bir alan açıldı. Altı darbeli evirici köprülerinde (Şekil 3.11 (a)), yüksek harmonik salınımları şebeke akımının sinusoidal formunda önemli sapmalara neden olmaktadır. Bu nedenle maliyeti yüksek filtre cihazları konmalıdır. Ayrıca, şebeke akımının faz sırasını ve frekansını ayarlamak mümkün değildir. Bunlar ateşleme açısına bağlı olduğu gibi, şebeke ve rüzgar enerjisi sistemine göre de önceden belirlenir.



Şekil 3.11 Eviricinin bağlantısı ve akım şekli

(a) altı darbeli evirici

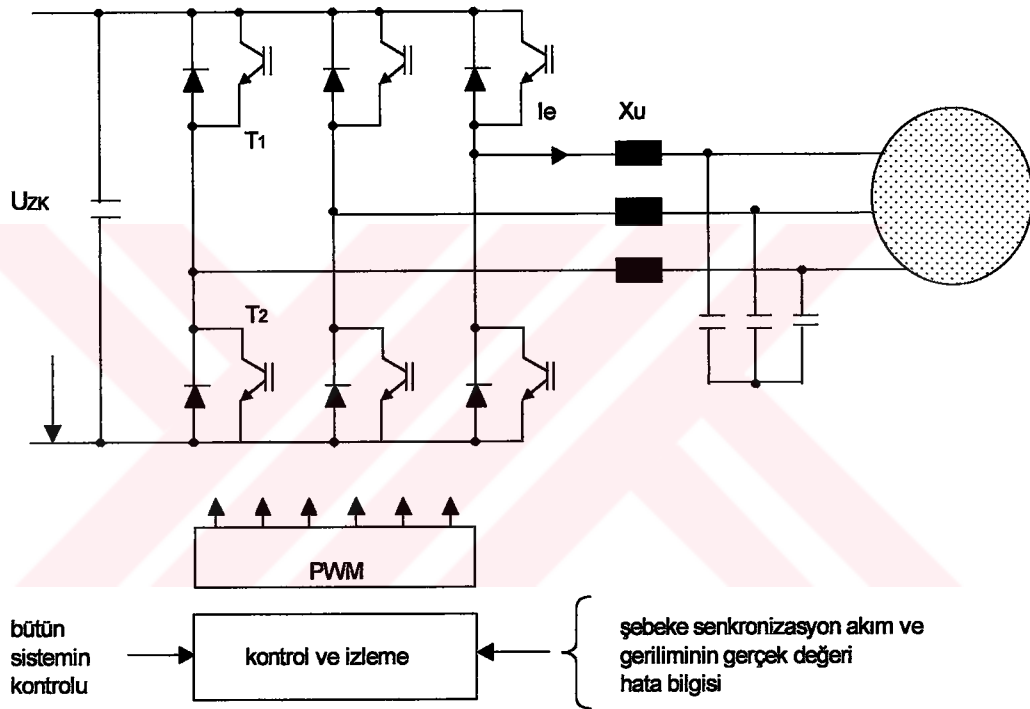
(b) on iki darbeli evirici

Şebekeye uygunluk on iki darbeli eviricilerin tasarımı ile mümkündür. On iki darbeli evirici, iki adet altı darbeli eviricinin paralel bağlanması ve 30° faz farklı iki sekonder sargılı transformatörün kullanılması ile elde edilir. (Şekil 3.11 (b)) Böylece şebeke akımı sinusoidal forma oldukça yaklaştırılır. 5. ve 6. harmonikler, altı darbeli

eviriciye oranla, hemen hemen kaybolur. Bununla beraber on iki darbeli eviriciler, generatörün ve iki sekonderli trasformatörün özel tasarımını gerektirir.

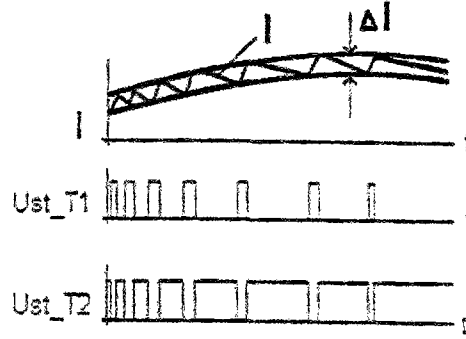
3.1.3.4 Darbe Genişlik Modülasyonlu Eviriciler

İyi şebeke bağlantısı, özellikle darbe genişlik modülasyonu metoduyla çalışan kendinden komütasyonlu frekans çeviricileri kullanılarak yapılır. Şekil 3.12’de gösterilen darbe genişlik modülasyonlu evirici devresi yüksek darbe frekansı ile hızlı kontrol sağlar. Buna ek olarak hemen hemen sinusoidal akım sağlar.



Şekil 3.12 Darbe genişlik modülasyonlu evirici

Darbe genişlik modülasyonlu frekans çeviricisinin karakteristiği darbe düzeninin kontrolü ile belirlenir. Şekil 3.13’te ΔI tolerans bandıyla ayarlanmış şebeke akımı (I), T_1 ve T_2 transistörlerinin anahtarlama çevrimleri gösterilmiştir. Şebeke akımı tolerans bandının üst seviyesine ulaştığında T_1 transistörü açılır, T_2 transistörü kapanır. Alt seviyeye ulaştığında ise işlem tam tersine döner. Akım maksimum ve minimum değerler arasında değişir. Bu nedenle tolerans bandı gerekli ateşlemeleri belirler. Seçilen tolerans bandına ve akımın fonksiyonuna bağlı olarak anahtarlama oranı ayarlanır.



Şekil 3.13 Akımın tolerans bandıyla regülasyonu ve transistörler için kontrol sinyalleri

3.2 Şebekenin Korunması

Şebeke koruması kullanılan elemanlara ve cihazlara zara verebilecek yüksek gerilim ve akımlara karşı korunmayı kapsar.

3.2.1 Kısa Devre Gücü

Şebeke kısa devre gücü S_k , değişkenlerin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Bu değişkenler şebeke geri beslemesinin değerlendirilmesi ve belirlenmesi için gerekli sınırlandırılmış değerlerin elde edilmesi için kullanılır. Şebeke kısa devre gücü

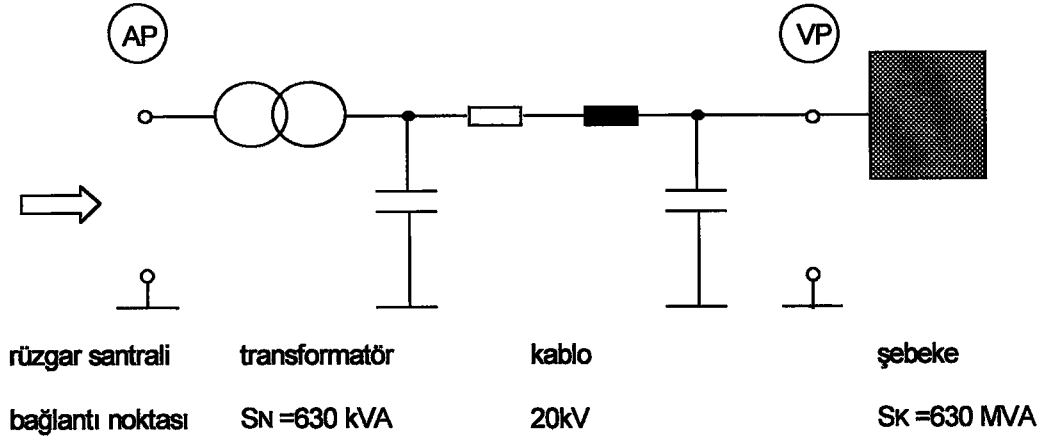
$$S_k = \frac{U_N^2}{Z_k} \quad (3.1)$$

denklemleriyle verilir. Burada U_N nominal gerilim, Z_k şebekenin kısa devre empedansıdır.

Şebeke geri beslemesinin değerlendirilmesinden farklı olarak, Denklem (3.2)'de verilen simetrik kısa devre gücü koruma cihazlarının tasarımına temel teşkil eder. Büyütme faktörü (magnification factor) c yüksek ve orta gerilim şebekelerinde 1,1, alçak gerilim şebekelerinde 1,05 alınır.

$$S_k^* = \frac{cU_N^2}{Z_k} \quad (3.2)$$

Şekil 3.14'te 500 kW'lık rüzgar enerjisi santralının şebeke bağlantısı gösterilmektedir. Rüzgar enerjisi santralının bağlantı noktası (AP) alçak gerilim tarafında seçilir. Ohmik, endüktif ve kapasitif elemanları olan transformatör ve yüksek ve orta gerilim kabloları üzerinden şebekeye bağlantısı yapılır. Bağlantı noktasının kapasitesi ve kısa devre gücü transformatöre, hatta ve şebekeye bağlıdır.



Şekil 3.14 Rüzgar enerjisi santralının şebeke bağlantısı

3.2.2 Kısa Devre Gücünün Artması

Çalışma esnasında, senkron ve asenkron generatörler şebekenin kısa devre gücünü artırır. Kısa devre gücü hesaplarında şebekeye devamlı bağlı olmayan makinelerin katılmaması ayırıcı cihazlarının boyutlandırılmasında hatalara yol açar.

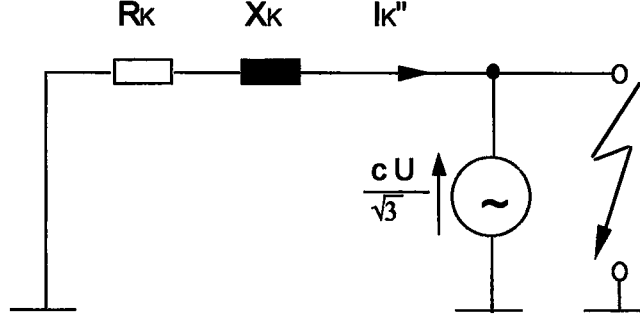
Basitleştirilmiş kısa devre eşdeğer devresi Şekil 3.15'te verilmiştir. Kısa devre esnasında sarımların ve kapasitelerin etkisi, değerleri çok az olduğu için, ihmal edilmiştir.

Senkron makinelerde Denklem (3.3)'de ifade edilen geçici boyuna reaktans eşdeğer devredeki kısa devre reaktansının belirlenmesinde temel oluşturur. Kısa devre akımının maksimum değerini belirlemek için boyuna reaktansın doymuş değeri göz önüne alınmalıdır.

$$X_d'' = x_d'' \frac{U_N^2}{S_N} \quad x_d'' = \frac{X_d''}{Z_N} \quad (3.3)$$

Asenkron makinelerde geçici zaman periyodundaki efektif geçici reaktans başlangıç empedansı ile belirlenir.

$$Z_{st} = \frac{U_N}{\sqrt{3}I_{st}} = \frac{I_N U_N^2}{I_{st} S_N} \quad (3.4)$$



Şekil 3.15 Basitleştirilmiş kısa devre eşdeğer devresi

Bu da makinenin kısa devresini karakterize eder. Stator ve rotorun kaçak reaktansları ve dirençleri makine parametrelerini belirler.

$$X_k = X_{st} = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' \quad (3.5)$$

$$R_k = R_{st} = R_1 + R_2' \quad (3.6)$$

Elektrik makineleri şebekenin kısa devre gücünü artırır. Diğerlerine oranla değeri az olan aktif elemanlar ihmal edilirse terminal yakınındaki kısa devre için büyütme faktörü senkron makinelerde

$$c_{SM} = \frac{1}{x_d} \quad (3.7)$$

asenkron makinelerde

$$c_{ASM} = \frac{I_{st}}{I_N} \quad (3.8)$$

olarak ifade edilir.

Generatörden uzakta olan kısa devrelerde hattın ve trasformatörün empedansı da göz önüne alınmalıdır. Uzun süreli kısa devrelerde, şebekenin senkron veya asenkron generatörden beslenmesine bağlı olarak önemli farklar ortaya çıkar.

Bununla beraber, generatör uyarma akımı şebekeden çekiliyorsa kısa devre terminal geriliminin sıfıra düşmesine neden olur.

3.2.3 Şebekedeki Yüksek Gerilim Hataları

Generatörler tarafından beslenen üç fazlı hatlarda, tek fazlı kısa devrede rezonans etkisi ortaya çıkar. Kapasitif kompanzasyon cihazlarının ve generatörlerin endüktivitelerinin etkisi, tüketicinin ve şebeke filtre reaktanslarının bağlantısı faz hatalarında yüksek gerilimlerin oluşmasına neden olur. Hesaplamalar ve ölçümler, orta ve yüksek gerilim şebekelerindeki bu tip hatalarda gerilimin, düşük yüklerde, nominal gerilimin 20 katına ulaştığını göstermiştir.

Yüksek gerilim koruma cihazları, bu tipi yüksek gerilimleri sınırlandırır. Ayrıca, böyle bir durumda ortaya çıkan enerjiyi absorbe edebilmelidir.

3.3 Şebeke Etkileri

Rüzgar enerjisi santrallerinin şebekeye bağlantısı şebekeyi etkiler. Bu etkiler

- kısa devre gücündeki değişimler,
- gerilim dalgalanmaları,
- gerilim simetrisizliği,
- harmonikler,
- çıkış değişiklikleri,

olarak sıralanabilir.

3.3.1 Rüzgar Enerjisi Santrallerinin Çıkış Davranışı

Rüzgar enerjisi santralleri normal çalışma koşullarında, kısmi veya tam yükte, santralin dizaynına bağlı olarak 10 Hz ile 1 kHz arasında çıkış verir. Çıkış dalgalanmaları, genlikleri ve değişme oranları ile belirlenir. Çıkış dalgalanmasına periyodik olan veya olmayan rüzgar hızı gradyeni neden olur.

Rüzgar enerjisi santrallerinin çıkış davranışı büyüklüklerini belirlemek için Westküste rüzgar enerjisi santralinde ölçümler yapılmıştır. Bu ölçüler, normal çalışmada, rüzgar yönünün, rüzgar hızının 10 m/s ile 15 m/s arasında değişmesiyle, hemen hemen aynı kaldığını göstermiştir. 50 kW civarında, şebekeye direk bağlı sabit hızlı asenkron generatörlerde, doğrultucusu ve eviricisi bulunan değişken hızlı senkron generatörlere oranla, çıkış dalgalanması azdır. Daha büyük asenkron generatörlerde, kaymanın küçük değişikliklerinde çıkış dalgalılığı artar. Diğer

tarafından rotorun yüksek zaman sabiti, değişken hızlı sistemlerde, çıkış düzgünlüğünü artırır. Sabit hızlıdaki ve değişken hızlıdaki çıkış gücü Şekil 3.16 (c) ve (d)'de gösterilmiştir.

Şekil 3.17 rüzgar enerjisi santrallerinin çıkış davranışlarının rüzgar hızına ve türbinlerin yerleşimine bağlı olduğunu göstermektedir. Örneğin, düşük rüzgar hızında ilk türbinin çıkış gücü $0,02P_N$ ile $0,38P_N$ (nominal çıkış gücü) arasında değişir.

Çıkışın düzgünlüğü rüzgar enerjisi türbinlerinin yerleştirme şekline ve yerel rüzgar koşullarına bağlıdır. Şebekeye bağlı sabit hızlı rüzgar türbinlerinin düzgünlük etkisi şebeke bağlantısının sütunlara veya satırlara göre bağlantısıyla farklılık gösterir.

Her iki hesaplamada da dalgalanma genişliği, standart sapma ve ortalama gösterilmiştir. Örneğin Şekil 3.18'de düşük rüzgar hızında 8 türbin çalışmaktadır. Hesaplamalar 1. ve 14. türbin; 1.,14. ve 2. türbin;;1.,14.,2.,9.,10.,12.,7. ve 20. türbinler göz önüne alınarak yapılmıştır. Şekil 3.19'daki değerler de aynı yöntemle elde edilmiştir.

3.3.2 Şebeke Gerilim Davranışı

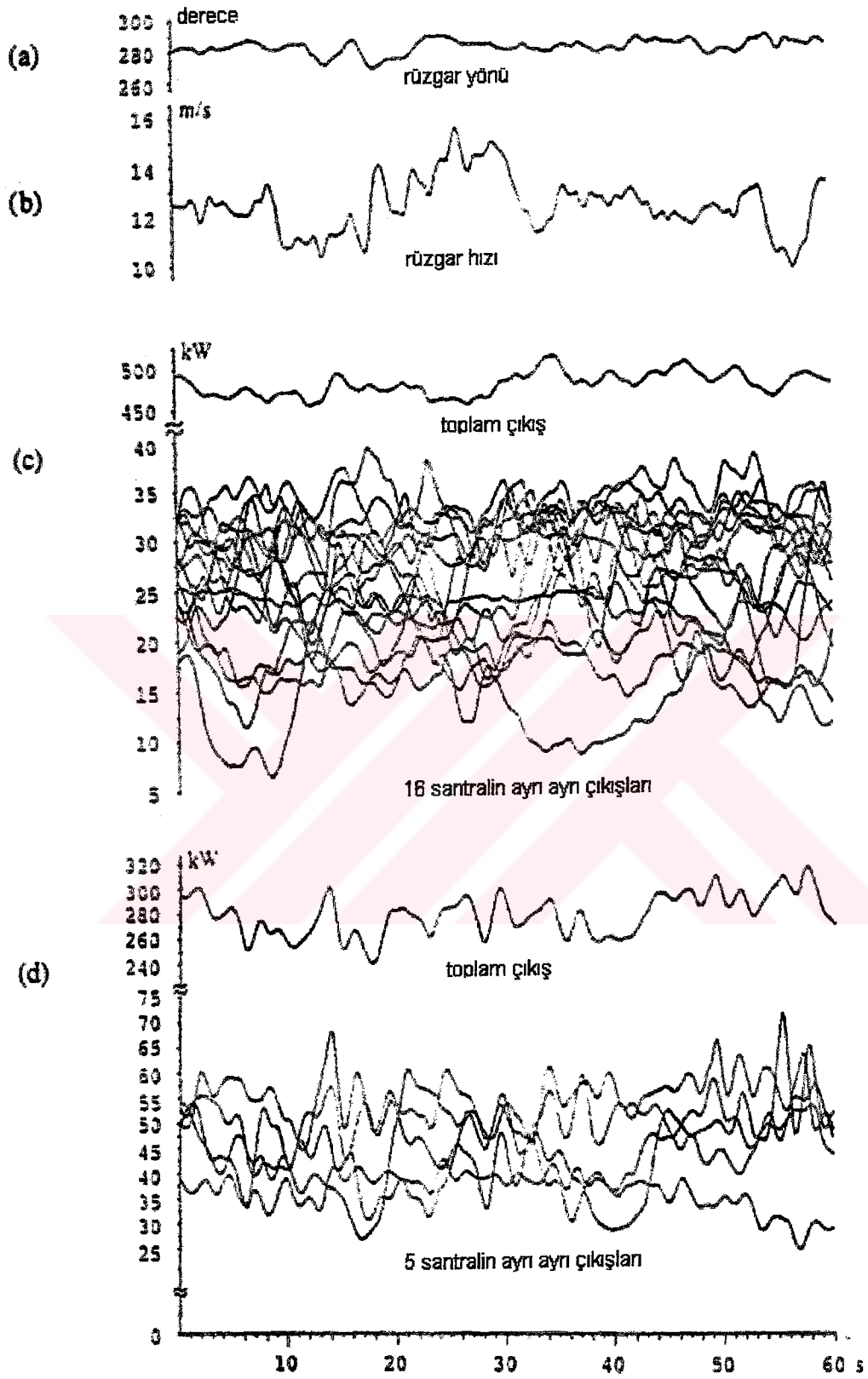
Rüzgar enerjisi santrallerinin şebekeye etkisi şebeke bağlantısı ve gerilim seviyesi ile belirlenir. Hem gerilimin simetrik olmayışı hem de gerilimdeki dalgalanmalar ve titreşimler göz önüne alınmalıdır.

3.3.2.1 Gerilim Seviyesi

Maliyet nedeniyle rüzgar enerjisi santrallerindeki elektriksel elemanlar alçak gerilime (1000 V'a kadar) göre tasarlanır. Orta ve yüksek gerilimli hatları besleyen 100 kW ile 1 MW arasındaki sistemler transformatör ile şebekeye bağlanır. 380 kV seviyesinde şebekenin beslenmesi, rüzgar enerjisi santralleri için bir seçenek değildir.

3.3.2.2 Gerilim Simetrisizliği

Şebeke bağlantılı rüzgar enerjisi santrallerinde sadece simetrik sargılı üç fazlı generatörler kullanılır. Güçlü makinelerde, normal çalışmada şebeke üzerindeki asimetrik etki ihmal edilebilir.



Şekil 3.16 (a) rüzgar yönü (b) rüzgar hızı (c) sabit hızdaki toplam çıkış gücü
(d) değişken hızdaki toplam çıkış gücü

Şebekedeki simetrik olmayan yükler hem senkron ve asenkron generatörleri hem de transformatör ve iletim hattını bozar. Simetrisizlik sisteme göre negatif bir alan yaratır. Bu da uyarma alanına ters ve iki kat hızla dönen bir döner alan oluşturur. Bu alan, özellikle rotorda, ek kayıplara neden olur.

3.3.2.3 Gerilimdeki Değişimler ve Gerilim Dalgalandırmaları

Eğer şebeke yükünün büyük bir bölümü rüzgar enerjisi santrallerinden besleniyorsa, rüzgar hızına bağlı olarak, çıkış değişkenleri gerilim dalgalanmalarına ve titreşim etkisine neden olur. Gerilim değişimleri, rüzgar hızının değişimi, generatör tarafındaki anahtarlama, yükün veya generatörün şebekeye bağlanması gibi özel durumlarda oluşur.

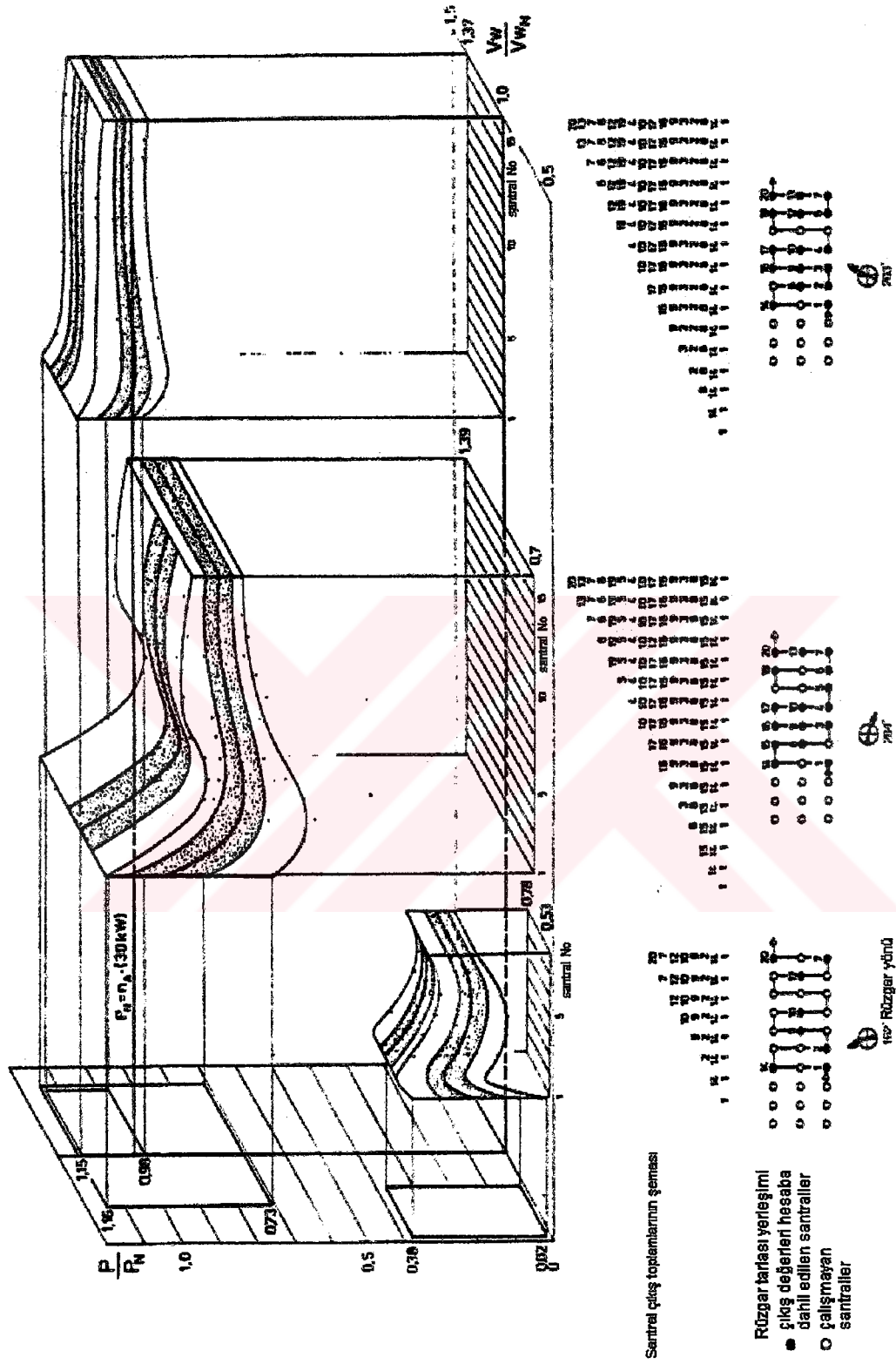
Büyük rüzgar enerjisi sistemlerinde, değişken hızda çalışmada, küçük rüzgar santrallerine oranla, çıkış düzgünlüğü daha iyidir. Bu tür santrallerde, kısa süreli gerilim değişimleri ve titreşimler ikinci derecede önemlidir.

Küçük ve orta büyüklükteki rüzgar enerjisi santralleri, büyük gruplar halinde şebekeye bağlandıklarında şebekeyi etkilerler. Bununla beraber, bir çok ünitenin bağlantısı toplam çıkışta daha iyi bir düzgünlük sağlar. Bu nedenle, normal çalışmada gerilim dalgalanmalarının herhangi bir zarar vermesi beklenmez.

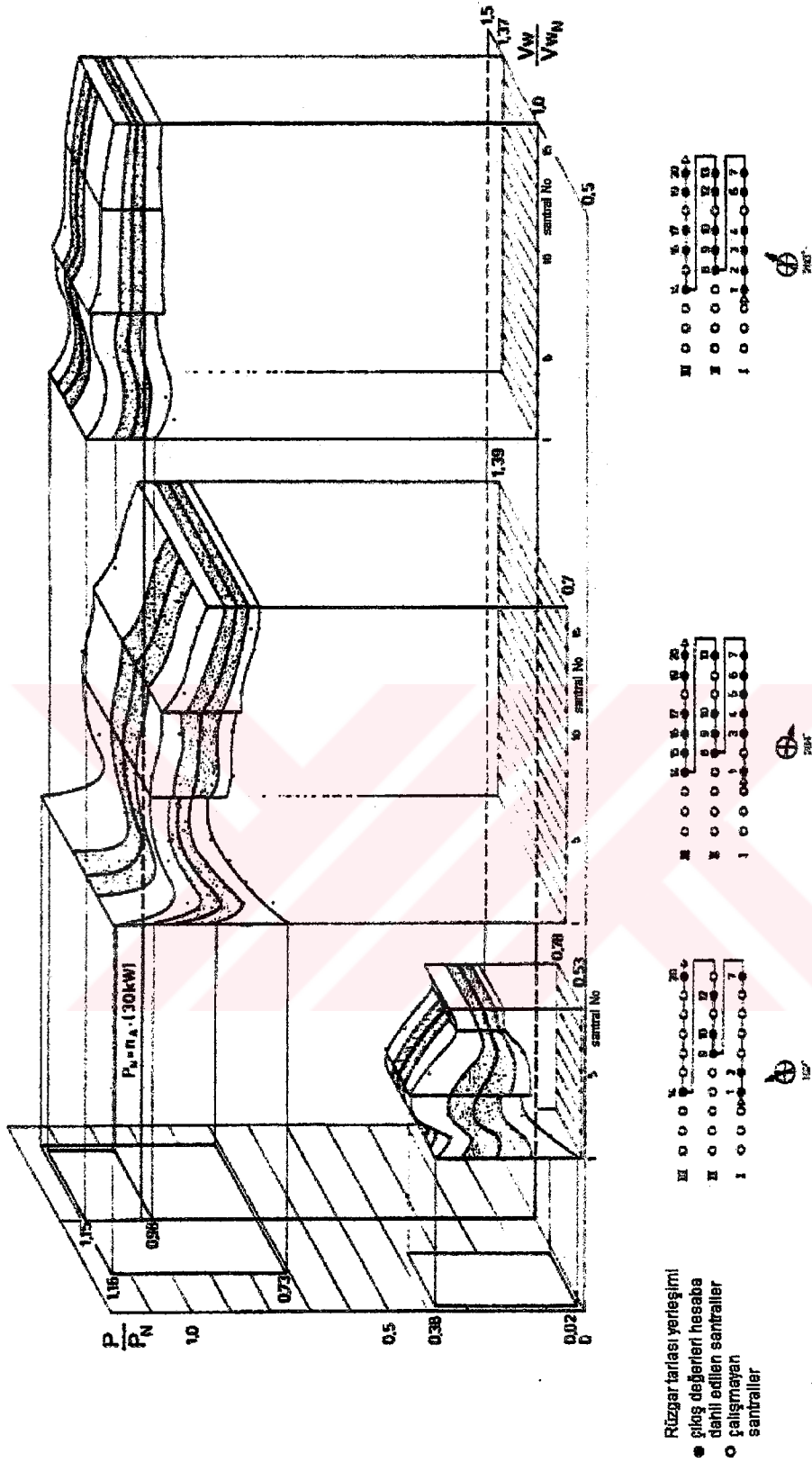
Tek başına çalışan rüzgar enerjisi santralının çıkışındaki yüksek dalgalanmalar, zayıf şebekelerde gerilim değişimlerine neden olur. Bu nedenle büyük ünitelerin çıkışındaki dalgalanmaların mümkün olduğunca az olması istenir. Bu da değişken hızlı türbin ve yüksek zaman sabitli rotora sahip generatör sistemi ile sağlanır.

Şekil 3.20 rüzgar santralının gücü şebeke kısa devre gücünün %5-10'unu oluşturuyorsa, şebekeyi besleme noktasındaki gerilimin güç faktörü ile ilgisini göstermektedir. Bu hesap transformatör ve hattın aktif ve reaktif elemanlarının oranı temel alınarak yapılır. ($R_{L+T} / X_{L+T} = 0,27$) Şebekenin ve santralin verilerini adapte eden bir kaynak kullanılarak, çıkış dalgalanması oluşsa bile, gerilim değişimleri önlenir.

Gerilim değişimlerinin değerlendirilmesinde, Şekil 3.21'de verilen fazör diyagramındaki aktif ve reaktif elemanların yönü ve büyüklüğü dikkate alınmalıdır.



Şekil 3.18 Farklı rüzgar hızlarında sütunlara göre çıkış toplamaları alınarak hesaplanmış çıkış düzgünlüğü



Şekil 3.19 Farklı rüzgar hızlarında satırlara göre çıkış toplamaları alınarak hesaplanmış çıkış düzgünlüğü

3.3.2.4 Titreşim Etkisi

Şebeke gerilimindeki periyodik olan ve periyodik olmayan dalgalanmalar filamanlı lambalardaki ışığın titreşimine neden olur. Tüketicie sağlanan gerilimdeki sapmaların sınırlandırılması gerekmektedir.

Titreşim etkisinde, 10 dakikalık süre içindeki kısa zaman ortalama değeri ile

$$A_{st} = \frac{\sum t_f}{10 \times 60s} < 0,2 \quad (3.9)$$

iki saat ortalama değerini

$$A_{st} = \frac{\sum t_f}{120 \times 60s} < 0,05 \quad (3.10)$$

t_f = titreşim etkisinin süresi

ayırarak gerekir.

Uygun santral tasarımı ve kontrol ile bozucu etkiye sahip olan gerilim dalgalanmaları ve titreşim mümkün olduğunca azaltılmalıdır.

3.3.3 Harmonikler

Harmonikler akım ve gerilim sinusoidal değilse oluşur. Harmonikler, lineer olmayan empedans karakteristiğine sahip kullanıcılar, güç elektroniği elemanları ve elektrik makinelerindeki doyma etkisi ile oluşurlar.

Deforme olmuş akım ve gerilimin periyodik olmayan değişimi diğer harmoniklerle temel salınımın süperpozisyonu olarak göz önüne alınabilir ve şu şekilde ifade edilir:

$$u(t) = U_0 + \sum_{v=1}^{\infty} U_v \sin(\omega_v t + \varphi_v) \quad (3.11)$$

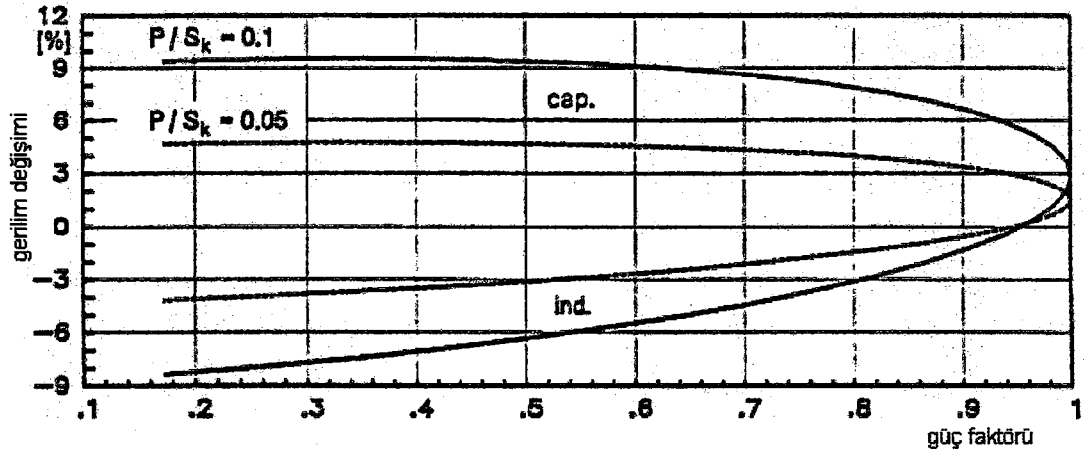
$$\omega_v = 2\pi f_v = 2\pi v f_1 \quad (3.12)$$

U_0 : doğru gerilim elemanı

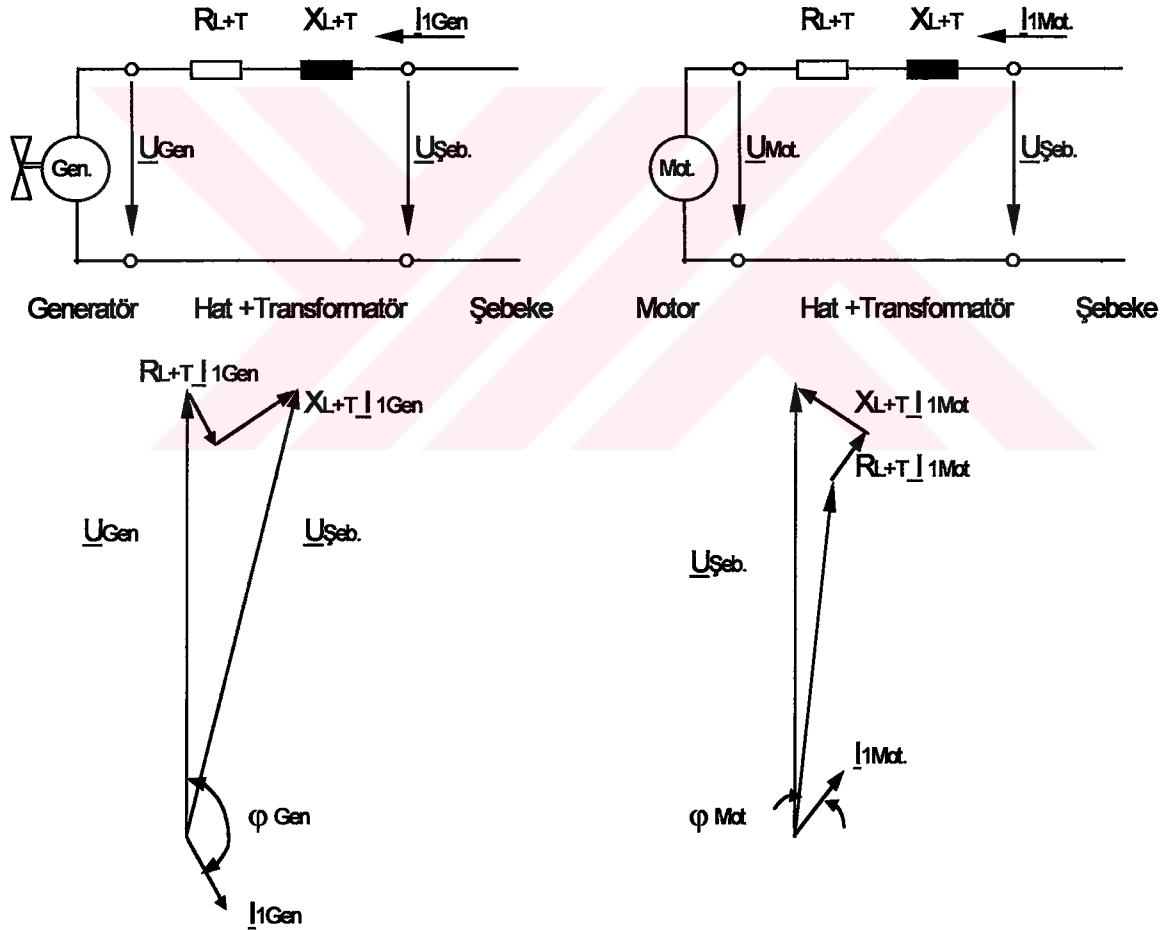
U_v : genlik

ω_v : devrenin frekansı

φ_v : v. harmoniğin güç faktörü



Şekil 3.20 Gerilim değişiminin güç faktörü ile ilgisi



Şekil 3.21 Generatör ve motor çalışma için eşdeğer devreler ve fazör diyagramları

Temel frekansın tamsayı katlarına sahip olmayan frekansa sahip sinusoidal salınımlara iç harmonikler (interharmonics) denir. Bu tip salınımlara frekans çeviricileri sebep olduğu gibi elektrik makineleri de sebep olur. İç harmonik

frekanslar harmonik salınım frekansının yüksek ve düşük bandlarında oluşur ve temel frekanstan küçüktür. Tamsayı olmama faktörü iç harmonikleri karakterize etmek için kullanılır.

$$\mu = \frac{f_{\mu}}{f_1} \quad (3.13)$$

Şebeke gerilimindeki distorsiyonu ölçmenin bir yolu harmonik distorsiyon faktörüdür. Burada harmonik distorsiyon faktörü ile toplam harmonik distorsiyonunu ayırmak gerekir. Harmonik distorsiyon faktörü (k_u), temel dalgası olmayan salınımın efektif değeri ile temel dalgalı salınımın efektif değerinin oranı verir.

$$k_u = \sqrt{\frac{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}{\sum_{v=1}^{\infty} U_v^2}} \quad (3.14)$$

Toplam harmonik distorsiyonu (k_{THD}) ise temel dalgalı salınımın efektif değeri ile temel dalganın efektif değerinin oranını verir.

$$k_{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}{U_1^2}} \quad (3.15)$$

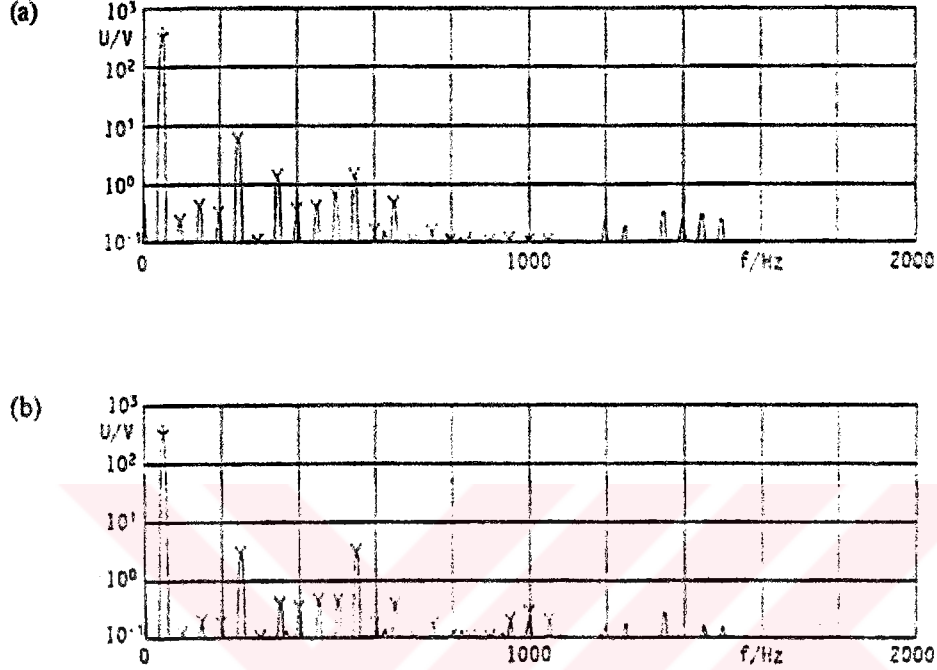
Rüzgar enerjisini şebekeye bağlamanın bir yolu olan şebeke komütasyonlu çeviriciler harmonik oluştururlar. Darbe sayısı p olan bir evirici Denklem (3.16)'ya göre harmonik spektrumu yaratır.

$$v = kp \mp 1 \quad k=1,2,3.... \quad (3.16)$$

Altı darbeli evirici için 5. ve 7. harmonikler en kuvvetli harmoniklerdir. On iki darbeli evirici için ise 11. ve 13. harmonikler en kuvvetli harmoniklerdir. Daha sonraki harmoniklerin genlikleri azdır.

Asenkron generatörlü ve direk şebeke bağlantılı rüzgar türbinleri için harmonikler 2000 Hz'e kadar ölçülmüş ve 40. harmoniğe kadar genlik spektrumu verilmiştir. Çok sayıdaki santrallerin düşük harmonik genliklerine sahip olduğu Şekil 3.22 (a) ve (b)'de görülmektedir. Bu olay, kısa devre gücünün ve kompanzasyon gücünün artması ile şebeke kapasitesinin artmasına neden olur. Buna karşın, altı

darbeli çevirici üzerinden şebekeye bağlanan rüzgar enerjisi santrallerinde, çok sayıda santral olduğunda yüksek harmonik genliklerine sahip olduğu Şekil 3.23 (a) ve (b)'de görülmektedir. Farklı sistemler bir arada bağlandığında, farklı bağlantı tiplerinin farklı davranışları harmoniklerin neden olduğu şebeke etkilerini azaltabilir.



Şekil 3.22 Asenkron generatörlü ve direk şebeke bağlantılı rüzgar türbinleri için gerilim spektrumu

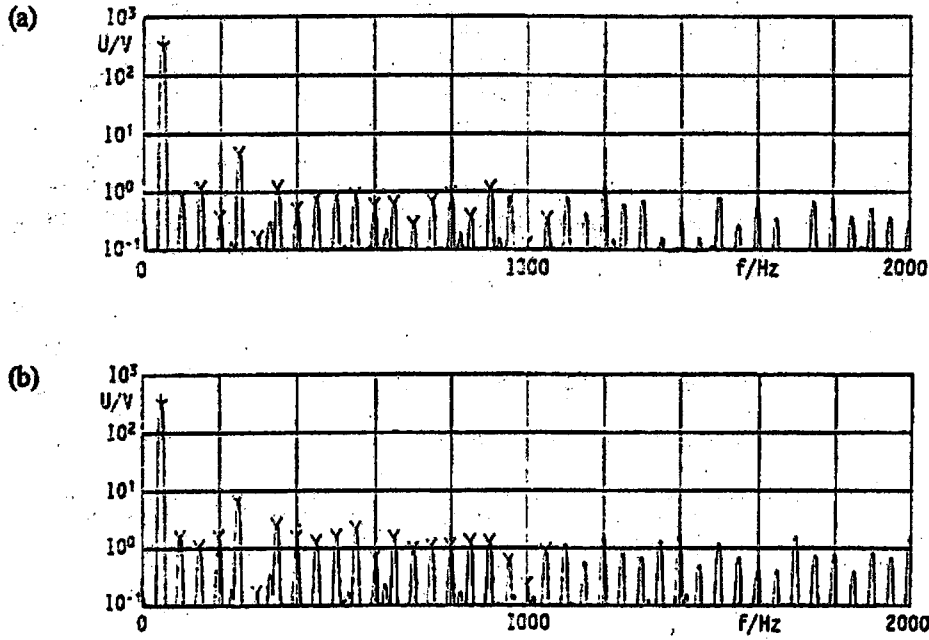
- (a) Bir santral için
(b) 18 santral için

3.4 Normal Çalışma Sırasında Şebekedeki Rezonans Etkisi

Eğer şebeke, bir veya birkaç rüzgar enerjisi santralının bağlantısı olarak düşünülürse, bu konfigürasyonun toplam empedansının şebekeyi besleme sırasındaki davranışı bellidir ve bu empedans kaynaktaki, dağıtım sistemindeki ve kullanıcıdaki ohmik, endüktif ve kapasitif yüklerin bileşimi temel alınarak belirlenir. Bu elemanların sayılarına bağlı olarak, bağlantıları ve empedans büyüklüğü uyarım halinde bağlı sisteme bağlı elemanlarda oluşabilecek akım ve gerilim artışları göz önüne alınarak belirlenir.

$$I_V = \frac{U_V}{Z_V} \quad Z_V \longrightarrow 0 \quad (3.17)$$

$$U_V = I_V Z_V \quad Z_V \longrightarrow \infty \quad (3.18)$$



Şekil 3.23 Çevirici üzerinden şebekeye bağlanan rüzgar türbinleri için gerilim spektrumu

(a) Bir santral için

(b) 5 santral için

Bu tip bir uyardırmaya kullanıcılar, reaktörler, elektrik makineleri ve özellikle güç çeviricileri neden olur. Çünkü güç eviricileri yüksek frekanslara neden olur.

Elektrik makinelerinde, şebekeye verebileceği harmonik uygun yerleşimlerle veya özel tasarımlarla düşük tutulabilir. Bu nedenle rezonans uyarımına hem rüzgar santrallerinde kullanılan frekans çeviricilerine hem de güç elektroniği tüketici sistemlerinin neden olduğu söylenebilir.

Rüzgar santrali şebekeye havai hat ile bağlı ise güçlü endüktif davranışlar, aynı empedansa sahip kablolarla oranla, rezonans frekansında ufak artışlara neden olur.

Asenkron generatörlü ve kompanzasyon ünitesine sahip rüzgar santrali şebekeden ayrılırsa empedans yolunda küçük değişiklikler olur. Farklı hat uzunluklarından dolayı gruplarda bir fark görülebilir.

3.5 Şebeke Etkisine ve Rezonansına Karşı Düzeltici Önlemler

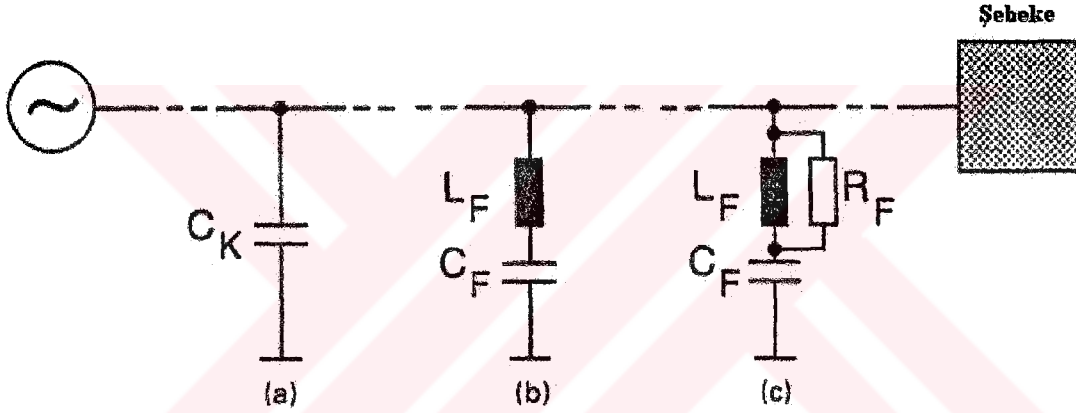
Elektronik güç çevrim sistemlerinin kullanılması yüksek verim ve iyi kontrol gibi avantajlar sağladığı gibi özellikle şebeke gerilimini bozulmasına neden olan

dezavantajları vardır. Etkiler yarıiletken anahtarların tipine ve bağlantı şekline bağlıdır.

Zayıf şebekelere bağlı yüksek performanslı frekans çeviricileri, şebekedeki harmonik geriliminin artmasına neden olur. Çalışma hatalarını ve sisteme arızalarını engellemek için harmonik akımları düşük tutulmalıdır. Bu amaçla şebeke etkisini azaltan özel sistemler kullanılmalı veya varolan harmonikler pasif devrelerle azaltılmalıdır.

3.5.1 Filtreler

Filtreler genellikle kapasitif ve endüktif elemanlar kullanılarak yapılır. Şekil 3.24 (a), (b) ve (c)'de kompanzasyon ve filtrelerin eşdeğer devresi verilmiştir. Direncin görevi, paralel rezonansa sahip filtrelerdeki yüksek empedansı azaltmaktır.



Şekil 3.24 (a) Kompanzasyon kapasitörü
(b) Seri rezonans filtre
(c) Geniş band geçiren filtre

Kapasitörler harmonik filtresi olarak kullanılırsalar bile büyük önem taşırlar. Kapasitörler motorların ve generatörlerin endüktif reaktif gücünü kompanse ederler ve güç faktörünü iyileştirirler. Empedansları Denklem (3.19)'da verilen formül ile hesaplanır.

$$Z_c(f) = \frac{U_c^2}{Q_c} = \frac{1}{2\pi f C_K} \quad (3.19)$$

Frekanstaki ve kapasitedeki artış düşük empedanslara neden olur. Bu harmonik akımlarını etkilemez. Fakat temel elemanı engeller. Dolayısıyla kompanzasyon kapasitörlerinin filtre etkisi vardır.

İyi filtreleme yöntemlerinden birisi de kapasitif ve endüktif elemanların seri bağlanması ile sağlanır. Bu şekilde elde edilen filtre seri rezonans filtresidir. Bu filtreler rezonans frekansına yakın çok küçük empedanslara sahiptir.

$$f_{rez} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_F C_F}} \quad (3.20)$$

Rezonans frekansının altında, filtre kapasitif davranış gösterir. Rezonans frekansının üstünde ise endüktif davranış gösterir.

Seri rezonans filtreleri dar frekans aralığında filtre edilecek akımlarda kullanılır. Bu nedenle filtre devresinde kullanılacak kapasite düşük tutulmalıdır.

Geniş frekans bandındaki akımları şebekeden temizlemek için geniş band geçiren filtreler kullanılmalıdır. Geniş band geçiren filtre, seri rezonans filtresinin endüktif elemanına paralel direnç eklenerek elde edilir. Geniş band filtresinin rezonans frekansı seri rezonans devresindeki gibi Denklem (3.20) kullanılarak belirlenir. Geniş band filtrelerinin davranışı düşük frekanslarda kapasitör ile yüksek frekanslarda direnç ile karakterize edilir.

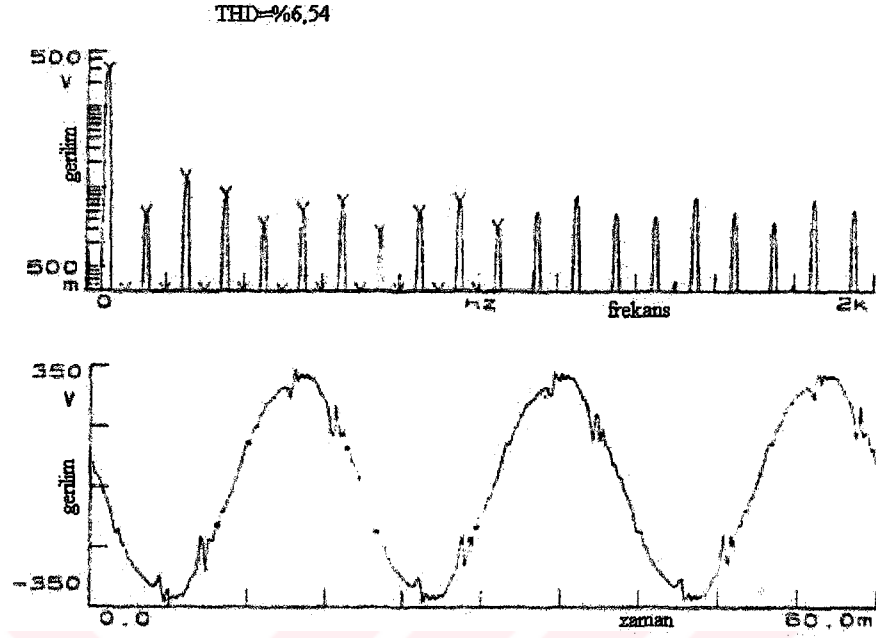
3.5.2 Filtre Tasarımı

Filtreler genellikle çeşitli bölümlerden oluşmaktadır. Bu özellik her bir filtre seviyesinin aynı veya farklı rezonans frekans seviyelerine ayarlanabilmesine imkan sağlar. Prensipte bir filtre devresi en küçük rezonans frekansına ayar edilir. Yüksek dereceden harmonikler için tasarlanan devreler artan sayı dizisi şeklinde boyutlandırılır. Aşırı gerilimi ve aşırı kapasitif akımları önlemek için rezonans frekansı, yok edilecek harmoniklerin frekansından daha düşük bir değerde seçilir. Uygun seviyeler kullanılarak belirli güç faktörü aralığındaki kapasitif reaktif güç, farklı yük tiplerine uyarlanabilir.

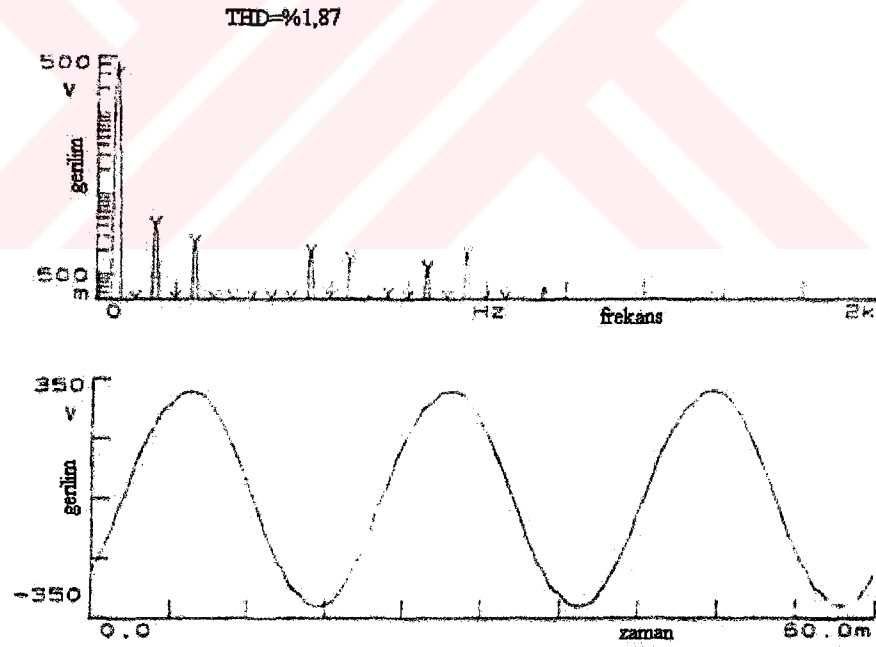
Eğer değişik rezonans frekanslı filtreler kullanılırsa paralel bağlantı nedeniyle bir paralel bağlantı rezonansı oluşur. Bu durum paralel bağlı filtrelerden endüktif ve reaktif empedans bileşenlerinin eşit olması halinde oluşur.

Farklı frekans yapısında iki filtre sistemi (seri rezonans devresi, geniş band geçiren filtre vb.) kullanılırsa paralel rezonans, belirli bir frekans aralığında veya iki harmonik arasında kalacak şekilde ayarlanmalıdır.

(a)



(b)



Şekil 3.25 Frekans spekturumu ve gerilim yolu

- (a) Kompanzasyon ünitesi ve filtre bulunmayan santral
(b) Kompanzasyon üniteli ve filtreli santral

3.5.3 Kompanzasyon Ünitesinin ve Seri Rezonans Filtresinin Görevi

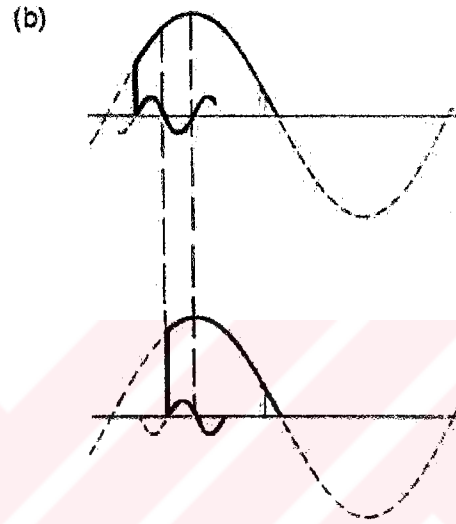
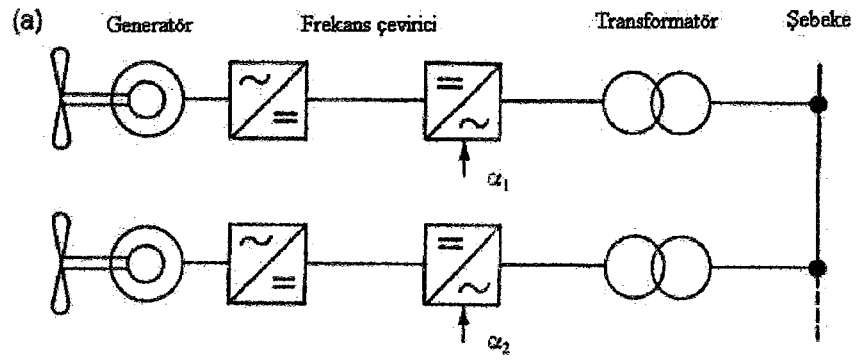
Şekil 3.25 küçük bir kasabayı besleyen 70 kW çıkışlı sistemin kompanzasyon ünitesinin ve filtre devresinin fonksiyonunu göstermektedir. Yarı yükteki frekans spektrumunu ve gerilim yolu filtresiz (Şekil 3.25 (a)) ve filtreli (Şekil 3.25 (b)) olarak gösterilmiştir.

Şekil 3.25 (a)'da görülen bütün bileşenleri bulunan spektrum fonksiyonu Şekil 3.25 (b)'de görüldüğü gibi tipik harmonik bileşenlere göre azalmıştır. Bu sayede gerilim yolu hemen hemen sinüsoidal formdadır. Bu şekiller filtre ünitesinin görevini açıkça anlatmaktadır.

Şebeke bağlantısına bağlı olarak farklı çevirici sistemleri harmoniklere karşı farklılıklar gösterir. Asenkron generatörler şebekeye direk bağlı çalıştıklarında şebeke reaksiyonlarına fazla bir etkide bulunmazlar.

Frekans çeviricili rüzgar santrallerinin kurulumu şebeke reaksiyonlarında düşüş sağlar. İki santraldeki frekans çeviricilerinin yarım çevrimde uygun ateşleme açılarıyla tetiklenmesi ile kritik harmoniklerin birbirlerini götürmesi sağlanır(Şekil 3.26).

Santral konumlarına bağlı olarak, rüzgar santralleri uygun generatör ve şebeke bağlantısı ile tasarlanırsa şebeke kapasitesi en iyi şekilde kullanılır.



Şekil 3.26 Farklı ateşleme açılarına sahip iki rüzgar santrali
 (a) Blok diyagramı
 (b) Harmonik salınım kompanzasyonu

SONUÇ

Günümüzde tüm dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında bir artış vardır. Özellikle rüzgar enerjisinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Türkiye’de de bu konudaki çalışmalar hızlanmıştır.

Rüzgar enerjisi santrallerinin avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Temiz bir enerji kaynağıdır. Çevre kirliliği yaratmaz.
- Dışa bağımlılığı azaltır.
- Diğer santrallere göre çok daha kısa zamanda kurulur.(Ortalama 4,5 ay)
- Hammadde ihtiyacı yoktur.

Rüzgar enerjisi santrallerinin bu avantajlarının yanı sıra teknolojinin ilerlemesiyle giderek azaltılan dezavantajları da vardır:

- Dişli kutusu, generatör ve kanatların havayı yarması nedeniyle ortaya çıkan gürültü
- Arazi kullanımı
- Sürekliliğinin olmaması

Dişli kutusu ve generatör nedeniyle ortaya çıkan gürültü iyi bir ses yalıtımıyla azaltılabilir. Kanatların havayı yarması nedeniyle ortaya çıkan gürültü ise kanat yapısında yapılacak değişiklikler ile azaltılabilir.

Büyük rüzgar tarlaları kurulurken, arazi kullanımı nedeni ile çevresel etki oluşur. Bağlantı yollarının yapımı, kablo çekimi ve transformatör merkezlerinin yapımı gibi nedenlerle toprağın bozulması sonucunda bölgedeki bitki ve hayvan topluluğu etkilenebilir.

Rüzgarın devamlılığı olmadığı için, rüzgar kesildiğinde şebeke başka enerji kaynakları ile beslenmelidir.

Rüzgar enerjisi santrallerinin bu dezavantajlarına, avantajları ile karşılaştırıldığında göz yumulabilir. Ancak, rüzgar santrallerinin tasarımı ve kurumu bu dezavantajlar göz önünde tutularak yapılmalıdır.

Rüzgar santrallerinin şebekeye bağlantısının yapılması aşamasında çıkış dalgalanmalarını, harmonikleri ve gerilim değişimlerini en aza indirecek tasarım yapılmalıdır. Çıkış dalgalanmalarını ve gerilim değişimlerini en aza indirecek tasarımda büyük önem taşıyan hakim rüzgar yönü, ortalama rüzgar hızı ve rüzgar frekansı için iyi bir fizibilite çalışması yapılmalıdır.

Türkiye’de hızlı sanayileşmeye paralel olarak enerji ihtiyacı da artmaktadır. Enerji üretiminde kullanılan doğalgaz ve petrol kaynakları Türkiye’de yeterli düzeyde değildir. Buna karşın Türkiye’de Marmara ve Ege kıyıları rüzgar gücü potansiyeli olarak oldukça iyi durumdadır. Yapılan son kanuni düzenlemeler, özel kuruluşların rüzgar enerjisi santralleri kurmasına olanak tanımıştır. Dolayısıyla özel kuruluşlar, Türkiye’nin çeşitli bölgelerinde fizibilite çalışmalarını sürdürmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Rüzgar Enerjisi Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Ankara, 1992
- [2] **Hanasçioğlu, M.** Wind Energy In Turkey, Renewable Energy, sf. 822-827,1999
- [3] www.windpower.dk
- [4] Milliyet Gazetesi 24 Mart 2000
- [5] **Uyar, T.S.**, Dünyada Rüzgar Enerjisinin Gelişimi ve Türkiye’de İlk Adımlar, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı 99, 1997
- [6] **Goldstein, L., Mortensen, J.,Trickett, D.**, Grid-connected Renewable Electric Policies in the European Union, NREL/TP.620.26247, 1999
- [7] **Weis-Taylor, P.**,International Energy Agency Wind Energy Annual Report 1998
- [8] **Bekdemir, Ş.,Yumurtacı Z.,Akgün M.,Yılmaz A.**, Türkiye Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli, 3E Dergisi, Sayı 36, 1997
- [9] **Yücel, B.**,Elektrik Krizi Kapımızda, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı 91, 1996
- [10] **Ültanır, M.Ö.**, Artık Güneş ve Rüzgar Elektrik Santralleri Planlamaya Alınmalı, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı 100, 1997
- [11] Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği Türkiye Şubesi Bülteni, Sayı 1, 1999
- [12] **Şahin, A.D., Şen, Z.**, Batı Anadolu Bölgesinde Rüzgar Değişkenlerinin Alansal Normal Dağılım Grafik Modelleri, 2. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Tebliğleri, 1997
- [13] **Denno, K.**, Engineering Economics of Alternative Energy Sources, CRC Press Inc., 1990
- [14] **Heier, S.**, Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, John Wiley&Sons Ltd., 1996
- [15] Micon A/S M1500-750 kW kataloğu
- [16] **Mays,I.**, Status of Wind Energy World Wide and Prospects in Europe,1997
- [17] **Ural,E., Sönmez,N.,Bingöl,S.,Fer,M.,Tokuş,T.**,Türkiye’nin Yeni ve Temiz Enerji Kaynakları, sf. 89, 1984

- [18] İstanbul Teknik Üniversitesi Teknik Toplantılar, Kasım 1999
- [19] **Durak,M.**, Rüzgar Enerjisi Teknolojisi ve Türkiye’ye Uygulanması: Akhisar Rüzgar Elektrik Santrali, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2000
- [20] **Türksoy,F.**, Saatlik ve Aylık Rüzgar Verisiyle Rüzgar Enerjisi Modellemesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2000
- [21] **Veziroğlu,N.**, Alternative Energy Sources IV Volume 4-Indirect Solar Wind Geothermal, 1982



ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında Erzurum’da doğdu. İlkokul ve ortaokulu İstanbul’da bitirdi. Liseyi Adana’da fen lisesinde bitirdikten sonra üniversite eğitimi için İstanbul’a döndü. 1996 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi’nden mezun oldu. Aynı yıl Yaptet A.Ş.’de proje mühendisi olarak çalışmaya başladı. Halen Metro Elektrik Mühendislik Taahhüt Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.’nde proje yönetiminde çalışmaktadır.

