

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE RÜZGÂR ENERJİ  
SANTRALLERİNİN BİLGİSAYAR BENZETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik-Elektronik Müh. Tutku YİĞİT**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELK. ELEKTRONİK MÜH.**

**Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU**

**Eylül 2009**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE RÜZGAR ENERJİ  
SANTRALLERİNİN BİLGİSAYAR BENZETİMİ**

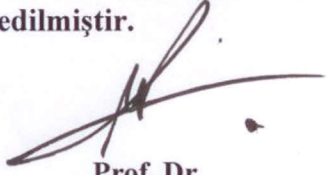
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik-Elektronik Müh. Tutku YİĞİT**

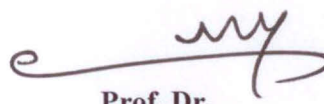
Enstitü Anabilim Dalı : ELK. ELEKTRONİK MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK

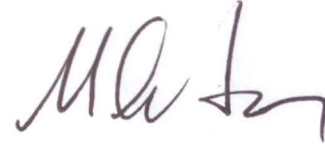
Bu tez 08/09/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.  
M. Ali YALÇIN  
Jüri Başkanı



Prof. Dr.  
Ertan YANIKOĞLU  
Üye



Yrd. Doç. Dr.  
Mehmet GÜNDÜZ  
Üye

## ÖNSÖZ

Bu projede doğanın varoluşuyla birlikte kullanımımıza sunulan ve dünya varlığını sürdürdükçe varlığını koruyacak olan bu saf enerjinin, en saf halinden kullanımımızda olan en kompleks cihazların ana unsuru olan elektrik enerjisine dönüşüm süreci incelenmiştir. İnsanoğlu bu yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgâr enerjisini yüzyıllardır kullanmaktadır. Hollanda'dan Amerika'ya birçok farklı coğrafyada rüzgâr enerjisi, yel değirmenleri vasıtasıyla un üretmek ve su kuyularından su çekmek gibi amaçlar için kullanılmıştır. Günümüzde ise modern rüzgâr türbinleri vasıtasıyla rüzgâr elektriğe dönüştürülerek insanoğlunun kullanımına sunulmaktadır.

Beni böyle bir konuda çalışmaya teşvik ederek, yönlendiren ve çalışma süresince değerli zamanını harcayarak bana yardımcı olan hocam Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU' na çok teşekkür ederim.

Tezim için gerekli kaynakları bulmamda, bu oluşum sürecinin tamamında yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Ahmet KÜÇÜKER, Hasan ÇAKIR, İsmail PEMBEĞÜLLÜ, Bünyamin SEZER, Burhan BARAKLI ve Melike DEMİR' e ayrıca maddi manevi olarak her konuda desteklerini daima yanımda hissettiğim tüm aileme çok teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1. Enerji Kaynaklarına Genel Bakış.....	1
1.2. Rüzgâr ve Oluşumu.....	3
1.3. Rüzgâr Enerjisi Kullanımının Tarihçesi.....	5
1.4. Rüzgâr Enerjisinin Küresel Durumu.....	7
1.5. Rüzgâr Türbinleri.....	8
1.6. Rüzgâr Enerjisinden Yararlanma Alanları.....	10
BÖLÜM 2	
RÜZGAR ENERJİSİNİN İLKELERİ.....	13
2.1. Toplam Güç.....	13
2.2. Maksimum Güç.....	13
2.3. Gerçek Güç.....	17
2.3.1. Kanatlar üzerindeki kuvvetler.....	18

## BÖLÜM 3

RÜZGAR SANTRALLERİNİN ÇALIŞMASI.....	22
3.1. Rüzgâr Santralinin Genel Yapısı.....	22
3.2. Rüzgâr Santralinin Kısımları.....	23
3.2.1. Rotor kanat sistemi.....	23
3.2.2. Kule.....	29
3.2.3. Dişli kutusu.....	29
3.2.4. Fren sistemi.....	29
3.2.5. Yaw hareketi aksamı.....	30
3.2.6. Elektrik sistemi.....	30
3.2.6.1. Generatörler.....	30
3.2.6.2. İnverterler.....	32
3.3. Kontrol ve Güvenlik Sistemleri.....	33
3.3.1. Kontrolör.....	38
3.3.2. Hidrolik sistem.....	41
3.3.3. Pervane uç frenleri.....	42
3.3.5. Güç kontrolü.....	43
3.3.5.1. Adım kontrolü .....	43
3.3.5.2. Stall kontrol .....	44
3.4. Rüzgâr Enerjisi ve Rüzgâr Türbinleri ile İlgili Özel Konular.....	46

## BÖLÜM 4

RÜZGAR SANTRALLERİNDE ELEKTRİK ÜRETİMİ.....	51
4.1. Dönüşüm Sistemleri ve Kontrol Teknikleri.....	51
4.1.1. Sabit hız sabit frekans dönüşüm sistemleri .....	51
4.1.2. Değişken hız sabit frekans dönüşüm sistemleri .....	52
4.1.3. Değişken hız değişken frekans dönüşüm sistemleri .....	56
4.2. Üç Fazlı PWM İnverter Kullanarak Yüklerin Beslenmesi.....	57
4.2.1. DC/DC Konverter devresi.....	58
4.2.2. Üç fazlı dört telli PWM inverter.....	59
4.3. Rüzgâr Türbin Generatörlerinde Dengesiz Gerilim Problemi.....	61
4.4. Güç Kalitesi ve Harmonik.....	63

4.4.1. Şebeke bozukluklarının tanımları.....	64
4.4.2. Harmonik bozulmaları ve standartlar.....	66
4.4.3. Harmonik ölçümü ve değerlendirme.....	67
4.4.3.1. Harmonik akım ve gerilimlerin görünen etkileri.....	69
4.5. Rüzgâr enerji sistemlerinin avantajları.....	70
4.5. Rüzgâr enerji sistemlerinin dezavantajları.....	71
BÖLÜM 5	
RÜZGAR ÇİFTLİĞİ BENZETİMİ.....	73
5.1. Benzetim Genel Açıklaması.....	73
5.2. Veri ve Benzetim Sonuçları.....	75
5.2.1. Türbinin rüzgârın hızındaki değişime tepkisi.....	75
5.2.2. 34,5 KV sistemdeki hatanın benzetimi.....	81
BÖLÜM 6	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	88
KAYNAKLAR.....	90
EKLER.....	92
ÖZGEÇMİŞ.....	98

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$V_r$	: Hesaplanmak istenen yükseklikteki rüzgâr hızı
$V_{ref}$	: Ölçüm sonuçları bilinen yükseklikteki rüzgâr hızı
$H$	: Hesaplanmak istenen noktanın yerden yüksekliği
$H_{ref}$	: Ölçüm sonuçları bilinen noktanın yerden yüksekliği
$\mu$	: Hellmann katsayısı
$V_ç$	: Çevresel hız
$n$	: Pervane milinin dakikadaki devir sayısı (d/d)
$\lambda$	: Devirlilik sayısı veya uç hız oranı
$P_{Toplam}$	: Toplam güç (W)
$M$	: Kütle akış hızı (kg/s)
$V_i$	: Gelen rüzgâr hızı (m/s)
$g_c$	: Dönüşüm katsayısı (kg/N.s <sup>2</sup> )
$\rho$	: Sisteme gelen rüzgâr yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$A$	: Akışın kesit alanı (m <sup>2</sup> )
$D$	: Türbin tekerinin çapı (m)
$L_p$	: Ses basıncı düzeyi (dB)
$P$	: Ses basıncı (N/m <sup>2</sup> )
$P_o$	: Referans ses basıncı
$\theta$	: Türbin kanat açısıdır.
$C_p$	: Güç katsayısı
$T_a$	: Hızlanma torku (Nm)
$T_\omega$	: Rüzgâr türbininden elde edilen tork (Nm)
$T_d$	: Asenkron generatörünün ürettiği tork (Nm)
$J$	: Eylemsizlik momenti (kg.m <sup>2</sup> )
$\omega$	: Açısal hız (rad/s)
$P_p$	: Stator sargılarının kutup sayısı

$P_c$	:Güç ve kontrol sargılarının kutup sayısı
$f_p$	:Şebeke frekansı
$f_r$	:Mil hızı
$f_c$	:Gerekli kontrol sargıları frekansı
$P_L$	:Yükün gücü
$P_B$	:Akü gücü
$n_w$	:Rüzgâr türbini sayısı
$\mu_w$	:Rüzgâr türbini verimi
$V_s$	:Her bir faz için stator terminal gerilimi
$I_s$	:Stator akımı
$V_{dc}$	:DC gerilim
$I_{dc}$	:DC akım
$\delta$	:Güç açısı
$[HD]_V$	:Gerilim harmonik bozulması
$[THD]_V$	:Toplam harmonik bozulması



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Dünya yüzeyinde rüzgâr sirkülasyonu.....	4
Şekil 1.2.	Smith-Putnam Rüzgâr türbini.....	6
Şekil 1.3.	Gedser türbini.....	6
Şekil 1.4.	Rüzgâr enerjisinin yıllara göre kullanımındaki ve tahmini durumu..	7
Şekil 2.1.	Yatay eksenli bir türbininden geçen rüzgârın basınç ve hız profilleri.....	14
Şekil 2.2.	Türbin çeşitlerinin kanat tipi rüzgâr hızı oranını güç katsayısı.....	17
Şekil 3.1.	Rüzgâr enerji santrali genel yapısı.....	22
Şekil 3.2.	Tekne ekipman ve konumları.....	22
Şekil 3.3.	Şebekeden bağımsız rüzgâr enerji sistemi.....	23
Şekil 3.4.	Pervane kanat tipleri.....	25
Şekil 3.5.	Kanat içyapısı.....	26
Şekil 3.6.	Kanadın iki yönden ve kesit görünüşü.....	27
Şekil 3.7.	Kanat giriş uzunluğu-kıvrılma açısı değişimi.....	27
Şekil 3.8.	Kanat boyutlandırılması.....	28
Şekil 3.9.	Kanat üzerine etkiyen kuvvetler.....	28
Şekil 3.10.	Da şönt generatör.....	31
Şekil 3.11.	Senkron generatör.....	32
Şekil 3.12.	Çeşitli inverter tipleri.....	33
Şekil 3.13.	Farklı hızlardaki güç eğrileri.....	37
Şekil 3.14.	Kontrolsüz aşırı hızlanma sırasında ivmelenme.....	38
Şekil 3.15.	Dişli kutusunun yüksek hız miline yerleştirilen CU.....	40
Şekil 3.16.	Profil etrafındaki bağımlı hava akışı.....	44
Şekil 3.17.	Pitch kontrollü bir rüzgâr türbininin güç eğrisi.....	45
Şekil 3.18.	Profil etrafındaki ayırık hava akışı.....	45
Şekil 3.19.	Stall kontrollü bir rüzgâr türbininin güç eğrisi.....	46

Şekil 4.1.	Senkron generatör alan uyarımlı SHSF dönüşüm sistemi.....	53
Şekil 4.2.	Kanat açısı kontrolüyle güç katsayısının uç-hız oranına göre değişimi.....	54
Şekil 4.3.	Kanat açısı ayarlı dönüşüm sistemi.....	54
Şekil 4.4.	Rotor direnç kontrollü DHSF dönüşüm sistemi.....	55
Şekil 4.5.	Fırçasız çift beslemeli asenkron generatörlü dönüşüm sistemi.....	56
Şekil 4.6.	Bilezikli asenkron generatörün kayma enerjisi kontrollü dönüşüm sistemi.....	56
Şekil 4.7.	Senkron generatör alan sargı kontrollü DHDF dönüşüm sistemi..	57
Şekil 4.8.	Kapasitör uyarımlı asenkron generatörlü dönüşüm sistemi.....	58
Şekil 4.9.	Rüzgârdan elektrik enerjisi üretiminin blok diyagramı.....	59
Şekil 4.10.	DC/DC Boost konverter devresi.....	60
Şekil 4.11.	Rüzgâr enerji sistemi ve kontrol birimi.....	61
Şekil 4.12.	Üç fazlı dört telli PWM inverter devresi.....	62
Şekil 4.13.	Dengesiz yüklenmiş sistemin şeması.....	63
Şekil 4.14.	(a) pozitif ve (b) negatif dizi eşdeğer devresi.....	64
Şekil 4.15.	Ses seviyesi grafiği.....	74
Şekil 5.1.	Rüzgar çiftliği simülasyonu.....	77
Şekil 5.2.	Arızasız durumda rüzgar türbin verileri (1).....	78
Şekil 5.3.	Arızasız durumda rüzgar türbin verileri (2).....	79
Şekil 5.4.	Arızasız durumda bara verileri (1).....	80
Şekil 5.5.	Arızasız durumda bara verileri (2).....	81
Şekil 5.6.	Arızasız durumda tüm türbin verileri.....	82
Şekil 5.7.	Arızasız durumda tüm bara verileri.....	83
Şekil 5.8.	Arıza durumunda türbin verileri (1).....	85
Şekil 5.9.	Arıza durumunda türbin verileri (2).....	86
Şekil 5.10.	Arıza durumunda bara verileri (1).....	87
Şekil 5.11.	Arıza durumunda bara verileri (2).....	88
Şekil 5.12.	Arıza durumunda tüm türbin verileri .....	89

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	Kaynağına göre enerji kaynaklarının sınıflandırılması .....	1
Tablo 1.2.	Yenilenebilir enerji kaynaklarının sınıflandırılması.....	2
Tablo 4.1.	EN 61000-3-2 standartlarına göre sınır harmonik akımları.....	70

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Rüzgâr enerjisi, Rüzgâr Türbin Sistemleri, Güç kalitesi

Güç kalitesi, şebekenin tanımlanan ucunda gerilimin genlik ve frekans değerlerinin anma değerlerini koruması ve gerilim dalga şeklinin sinüs biçimini koruması olarak tanımlanmaktadır. Tersine, gerilim genliğinin dalgalanması, kesintiler, darbesele değişimler, frekansın değişimi, kırpışma ve üç faz dengesizlikleri başlıca güç kalitesizliği biçimleri olarak görülmektedir. Genelde güç kalitesi şebekeden enerji çeken kullanıcılar (yükler) tarafından bozulmakta, gerilim dalga şeklinin sinüs biçiminden sapması ve bozulmalar başta harmonikler olmak üzere istenmeyen etkiler göstermektedir.

Bu çalışmada, rüzgâr santrallerinin bütün bu özellikleri incelenmiştir. Rüzgar santrallerinde senkron, asenkron ve doğru akım generatörler kullanılır. Senkron generatör, rüzgâr hızının sürekli sabit olduğu yerlerde ve büyük güçlerde kullanılır. Bunlarda gerilim ve frekans kararlı bir yapıya sahiptir. Ancak asenkron ve doğru akım generatörlerin kullanıldığı santrallerde gerilim ve frekans kararlılığı yönünden sorun yaşanır. Çünkü bu generatörler değişken yapıya sahip rüzgâr rejimlerinde çalışmak durumundadır. Sabit genlik ve sabit frekans elde edebilmek için generatör çıkışları doğrultucu, konverter, inverter ve filtre ile desteklenir.

# **COMPUTER SIMULATION OF WIND POWER STATIONS IN POWER SYSTEMS**

## **SUMMARY**

Key Words: Wind Energy, Wind turbine systems, Power quality

Power quality are defined that the amplitude and frequency rates of defined the tip of the network tension protect the mentioning rates and the type of the wavy tension protect the sinus shape. On the contrary, the waving of the tension amplitude, interruptions, stroking changes, changing of frequencies, scintillation and three phase instabilities are seen as a lack of power quality. Generally, power quality is broken down by the users which takes energy from the system and voltage wave form diverging from sine shape and spoilages cause unwanted effects as the harmonics.

In this study, all features of wind plants model has been formed. In wind plants, synchronous, inductions and DC generators are used. Synchronous generator is used in large powers and where the wind speed is always constant. Voltage and frequency has a stable structure in these. But, in plants where the induction and DC generators are used, voltage and frequency stability problem is faced up. Because these generators must operate in a wind regime which has a variable structure. To obtain fixed amplitude and frequency, generators outputs are backed up with rectifier, converter, inverter and filter.

# BÖLÜM 1. GİRİŞ

## 1.1. Enerji Kaynaklarına Genel Bakış

Yenilenebilir enerji türlerinden olan rüzgar enerjisi, fosil yakıtların tükeneceğinin idrak edildiği son yıllarda, enerji sorununa çözüm olarak görülen kaynaklardan birisidir. İlk kullanım örneklerine bundan 3000 yıl öncesinde rastlanmasına rağmen rüzgar enerjisi, son on yıl öncesine kadar yeterince irdelenmemiş ve değerlendirilmemiştir.

Dünyanın var olma süresinin referans olarak alındığı bir sınıflandırmaya göre; enerji, yenilenemeyen ve kendisini dünya var oldukça yenileyen, yani yenilenebilir enerjiler olarak iki grupta incelenebilmektedir.

Tablo 1.1. Kaynağına göre enerji kaynaklarının sınıflandırılması

Kaynak	Çeşit	Ömür
Yenilenebilir Enerji Kaynakları	Kömür, Linyit, Doğal Gaz, Nükleer	Rezerv durumuna göre sınırlı
Yenilenemeyen Enerji Kaynakları	Su (Hidrolik), Güneş, Rüzgar, Jeotermal, Gel-Git	Dünya ve Güneş var oldukça sınırsız

Yenilenebilir enerji kaynakları, enerjinin ana kaynağına göre; güneş kaynaklı, dünya kaynaklı ve ay kaynaklı olarak üç grupta incelenebilmektedir. Tablo 1.2' nin incelenmesinden görüleceği gibi, güneş kaynaklı olan rüzgar enerjisi, doğal enerji dönüşümü sonucunda kendisini atmosferde hava hareketi ve denizlerde dalga hareketi olarak hissettirmektedir. Bu mekanik-kinetik enerji, rüzgar enerjisi ve dalga enerjisi tesislerinde elektrik enerjisine veya su pompalanmasında olduğu gibi mekanik enerjiye dönüştürülebilmektedir.

Dünya enerji ihtiyacının karşılanmasında ağırlıklı olarak kullanılan fosil kaynaklı enerjiler ve nükleer enerji, kendine özgü ve tüm insanları doğrudan ilgilendiren sorunlara sahiptir. Bu sorunlardan ilki; nükleer enerjisinin kaynağı olan uranyumun 50 yıl, petrolün 44 yıl, doğal gazın 64 yıl ve kömürün de 185 yıl sonra tükenecek olmasıdır [1]. Fosil yakıtlar ve nükleer enerji ile ilgili diğer bir sorun da, çevreye verilen zararlardır. Halbuki, örneğin 1 kWh'lik rüzgar enerjisi; fosil yakıt kullanılarak elde edilen 1 kWh elektrik enerjisi ile karşılaştırıldığında; ortalama olarak 750–1250 g karbondioksit, 40-70 g kül, 5-8 g kükürtdioksit, 3-6 g azot oksit salınımını engellemektedir. Bu nedenle, son yıllarda enerji ihtiyacının karşılanması için; rüzgar, güneş, jeotermal, biyomas, gel-git ve hidrolik enerjilerinden oluşan çevre dostu yenilenebilir enerjilerin kullanımına yönelme olmuştur.

Tablo 1.2. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sınıflandırılması

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI					
Ana Kaynak	Enerji Kaynakları	Doğal Enerji Dönüşümü	Teknik Enerji Dönüşümü	Kullanımı Enerjisi	
Güneş	Su	Buharlaştırma, Yağış	Hidroelektrik Santraller	Elektrik	
	Rüzgar	Atmosferdeki Hava Hareketleri	Rüzgar Santralleri	Elektrik, Mekanik	
		Dalga Hareketi	Dalga Enerjisi Tesisi	Elektrik, Mekanik	
	Güneş Işınları	Yer ve Atmosferin Isınması	Isı Pompaları	Isı	
		Güneş	Kollektörler	Isı	
		Işınlan	Güneş Pilleri	Elektrik	
	Biyomas	Biyomas Üretimi	Isı Güç Tesisi	Isı, Elektrik	
			Dönüşüm Tesisi	Yakıt	
	Dünya	Yer Merkezi Isısı	Jeotermal Enerji	Jeotermal Güç Tesisi	Isı ve Elektrik
	Ay	Ay Çekim Gücü	Gel-Git olayı	Gel-Git Güç Santralleri	Elektrik

## 1.2. Rüzgar ve Oluşumu

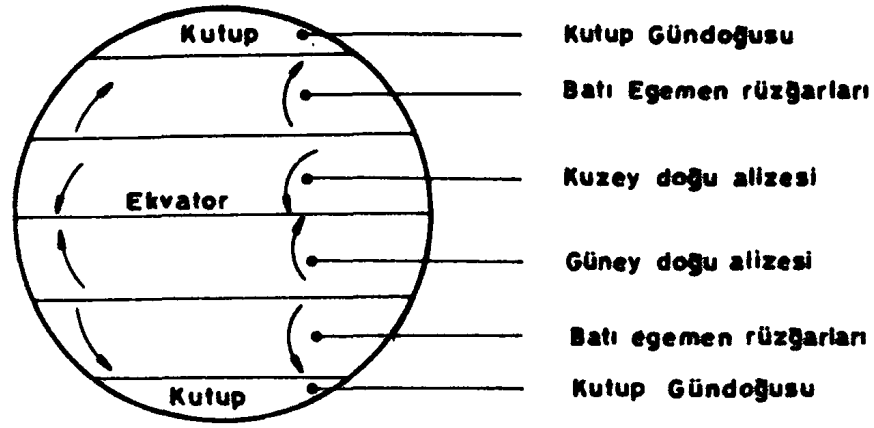
Gerekli enerjisini güneşten alan bir ısı makinesi olarak nitelenebilecek olan atmosferde; ısı potansiyel farklara sahip olan hava kütleleri, daha soğuk ve yüksek basınç alanı olan bir noktadan, daha sıcak ve alçak basınç alanına hareket ederler. Isı enerjisinin kinetik enerjiye dönüştüğü bu doğa olayındaki hava kütlesi hareketine, rüzgar adı verilir. Diğer bir deyişle rüzgar; dünyanın yeryüzüne göre bağlı hava hareketi olarak da tanımlana bilmektedir.

Isınma ve soğumanın homojen bir tarzda vuku bulmaması, hava kütlelerinin hareketine sebep olmaktadır. Rüzgarı doğuran ve rüzgarın hızına etkiyen belli başlı kuvvetler; basınç gradyan kuvveti, saptırıcı kuvvet ve merkezkaç kuvvetidir. rüzgarın doğuşunda etkili olmayan, fakat rüzgarın hızını etkileyen dördüncü kuvvet de sürtünme kuvvetidir. Basınç gradyan kuvveti, havayı yüksek basınçtan alçak basınca doğru akıtmaya çalışacak şekilde etki etmektedir.

Saptırıcı kuvvet, "yer dönmesinin saptırıcı kuvveti" olarak da adlandırılmaktadır. Bu kuvvet enlem daireleri boyunca oluşan hareketler için yer dönmesinin saptırıcı kuvveti ve ekvator dan kutuplara doğru ya da ters yönde oluşan hareketler için yer dönmesinin saptırıcı kuvveti olarak iki yönden etkili olabilmektedir.

rüzgarlar, genel olarak bir merkez etrafında dolanırlar. Bu hareketin sonucu olarak kendilerini dolanım merkezinden uzaklaştırmak isteyen kuvvetin etkisi altında bulunurlar. Bu kuvvete merkezkaç kuvveti denilmektedir. Bu kuvvet rüzgar hızının karesi ile doğru, rüzgarın dolanım yarıçapı ile ters orantılı olmaktadır. Rüzgarın doğuşunda etkili olmayan sürtünme kuvveti, rüzgar hızını yavaşlatmaya çalışır. Bu kuvvetin etkisi yer yakınında en büyüktür. Bu etki türbülans anaförleri (girdaplanmalar) ile yukarılara taşınmaktadır.





Şekil 1.1. Dünya yüzeyinde rüzgar sirkülasyonu

Rüzgarlar, sürekliliklerine göre bütün bir yıl boyunca esen sürekli rüzgarlar ve belli zamanlarda esen tayfun, tornado ve girdaplar gibi süreksiz rüzgarlar olarak iki grupta incelenebilirler. Alizeler; her mevsim kuzey ve güney yarım kürede  $30^\circ$  enlem üzerinde bulunan yüksek basınç kuşağından ekvator üzerindeki alçak basınç kuşağına doğru eserler. Kontralize rüzgarları ise, atmosferin yüksekliklerinde alize rüzgarlarının ters yönünde eserler ve oluşmalarının nedeni; ekvatorunda ısınan hava kütlelerinin yükselmesi ve ekvatorundan uzaklaşacak şekilde hareket etmeleridir. Meltem rüzgarları; karaların denizlerden ve dağların vadilerden daha çabuk ısınıp soğuması sonucu, üzerlerinde bulunan hava kütlelerini etkilemesi nedeni ile oluşurlar. Gündüzleri; denizlerden, çabuk ısınan karalara doğru deniz meltemleri, geceleri de; çabuk soğuyan karalardan, denizlere doğru kara meltemleri eser. Deniz ve kara meltemleri, sahilden 40 km içlere kadar etkili olurlar. Aynı şekilde, gündüzleri; vadilerden çabuk ısınan dağlara doğru vadi meltemleri, geceleri de; çabuk soğuyan dağlardan vadilere doğru dağ meltemleri eserler. Hareket halindeki bir hava külesinin; yüksekçe bir dağa çarparak her 100 m' de  $0,5^\circ\text{C}$  soğuyarak yükselmesi, daha sonra da dağın diğer yamacına her 100 m'de  $1^\circ\text{C}$  ısınarak inmesi hareketine föhn rüzgarları adı verilir.

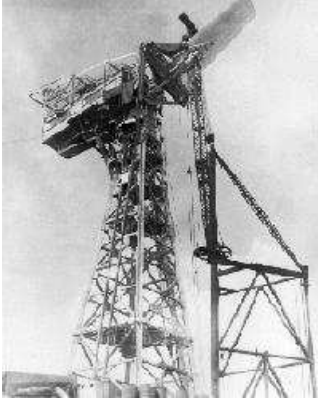
Anadolu; kışın, Sibiryaya yüksek basıncının etkisinde bir yüksek basınç alanı, Karadeniz ve Akdeniz ise bir alçak basınç alanıdır. Bu nedenle; kışın, rüzgarların karalardan denizlere doğru esmesi beklenir. Yazın ise Anadolu, güneyden gelen tropikal hava kütlelerinin etkisindedir ve Kuzeybatı Avrupa üzerinde yerleşen yüksek

basınç alanından Basra alçak basınç alanına yönelmiş rüzgarların etkisinde kalır [2]. Nitekim yazın; eteziyen adı verilen kuzey batıdan esen rüzgarlar, Marmara ve Ege'yi etkilerler. Türkiye'deki rüzgarların, bu genel beklentiye tam olarak uymadığı görülmektedir. Bunun nedeni; meltem ve föhn rüzgarlarını da oluşturan yerel etmenler ve Sibiryaya yüksek basınç alanının yıllara göre zayıf veya güçlü olmasıdır.

### 1.3. Rüzgar Enerjisi Kullanımının Tarihçesi

Rüzgar enerjisinin kullanımı çok eskilere dayanmaktadır. İlk olarak, Asya Medeniyetlerinden Çin, Tibet, Afganistan ve İran'da kullanıldığı bilinmektedir. Rüzgar Tribünlerinin (RT) kullanımına ait ilk yazılı bilgiler Büyük İskender tarafından M.Ö. 200–300 yıllarında basit yapıdaki yatay-eksenli rüzgar türbinleri hakkındadır. Düşey eksenli ilk rüzgar türbinleri, M.Ö.500–900 yıllarında Farşlılar tarafından dizayn edilip, buğday öğütme ve su pompalama amaçlı kullanılmıştır. Bu rüzgar türbinleri merkezi düşey bir shafta bağlı, ağaç ve kamış dallarından yapılan düşey yelkenlerden oluşmuş bir yapıya sahiptir. Ancak Yazılı belgeli ilk yel değirmeni, M.S. 644 yılına ait İran-Afganistan sınırındaki Seistan'dadır. Yel değirmenleri, Çin'de M.S. 750–850 yıllarında pirinç tarlalarının sulanmasında kullanılmıştır. İlk olarak Doğuda kullanılan düşey eksenli yel değirmenleri, Batılılar tarafından geliştirilmiş ve yatay eksenli hale getirilmiştir. Yatay eksenli ilk yel değirmeni örneği, 1180 yılında Normandiya Krallığı zamanına aittir. Yatay eksenli ve mekanik enerji amaçlı yel değirmenlerinin gelişimi; ayaklı yel değirmeni (Almanya), kule tipi yel değirmeni (Akdeniz Ülkeleri, Alaçatı), döner çatılı Hollanda tipi yel değirmeni (Hollanda) ve 1850 yılında Daniel Halladay tarafından rüzgar yönü yönlendiricisi takılan çok kanatlı Amerikan tipi yel değirmeni olarak sıralanabilir. 1882 yılında New York'da elektrik santrali kurulmuş ve daha sonra da elektrik enerjisi kullanımı yaygınlaşmıştır. İlk rüzgar elektriği de, Danimarkalı Profesör Paul La Cour tarafından 1891 yılında üretilmiştir [3]. Doğru akım elde eden Paul La Cour, elektroliz yoluyla hidrojen gazı elde etti ve bu şekilde rüzgar enerjisini depolamış oldu. 1918 yılı sonrasında büyük şehirler elektriğe kavuşmuş ve dizel yakıtların ucuzluğu nedeniyle rüzgar enerjisini değerlendirme çabaları, bir kenara bırakılmıştır. Rüzgar enerjisinin bu bir kenara itilmesi, enerji sıkıntısı nedeniyle 2. Dünya Savaşı'na kadar sürmüştür. Rüzgar enerjisi kullanımının tarihsel gelişimine;

1942 yılında üretilen 17 ,5 m rotor çaplı ve 50 kW nominal güçlü Smidth rüzgar türbini ve 1957 yılında üretilen 24 m rotor çaplı (Şekil 1.2) ve 200 kW nominal güçlü Gedser rüzgar türbini (Şekil 1.3) verilebilir.



Şekil 1.2. Smith-Putnam Rüzgar Türbini



Şekil 1.3. Gedser Türbini

1970'li yıllardaki petrol krizi ve yükselen yakıt fiyatları sonucu, rüzgar enerjisi tekrar hatırlanmış ve bu alanda yatırımlar artmıştır. Özellikle 1980'li yıllardaki gelişmeler sonucunda, seri olarak üretilen ve yaygın olarak kullanılan rüzgar türbini nominal güçleri 600 kW, 750 kW, 1000 kW, 1500 kW ve 2000 kW'dır. Gelecekte üretilen rüzgar türbinlerinin nominal güçlerinin daha da artması beklenmelidir. Örneğin, Alman Enercon Firması, 5 MW nominal güçlü bir rüzgar türbinini üretmeyi ve Hannover'de 6000 konutun elektrik enerjisinin büyük bir kısmını bu şekilde karşılamayı planlamaktadır.

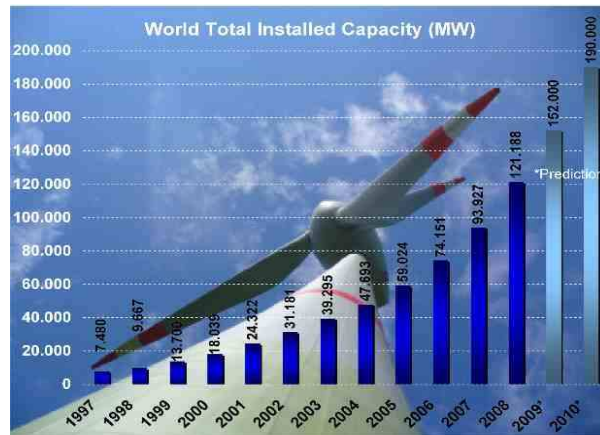
Türkiye'de genel kullanıma dönük ilk rüzgar elektriği, 1986 yılında Çeşme Altınyunus Tesisleri'nde kurulan Vestas marka 55 kW nominal güçlü rüzgar türbininden elde edilmiştir [2]. Bu türbinin göbek yüksekliği 24,5 m ve pervane çapı 14 m.'dir. 55 kW'lık nominal güce 12 m/s'lik rüzgar hızında erişen bu türbinden, Çeşme şartlarında yılda ortalama 100.000 kWh elektrik enerjisi elde edilmektedir. Bu miktar, tesis elektrik enerjisi ihtiyacının % 4'ünü oluşturmaktadır.

Türkiye'de uluslararası boyutta ilk rüzgar elektriği, 21 Şubat 1998 tarihinde Çeşme Germiyan Köyü'nde üretilmiştir. Bir Alman Firması'ndan satın alınarak kurulan ve herbiri 500 kW nominal güce sahip olan 3 adet Enercon-40 rüzgar türbininden oluşan

bu ilk rüzgar çiftliğinden, yılda 4,5 milyon kWh elektrik enerjisi elde edilmektedir. Enercon-40 adlı dişli kutusuz türbinlerin pervane çapı 40,3 m olup, senkron generatörlüdürler ve 18-38 devir/dakika'da enerji üretmektedirler. Bu türbinlerde 500 kW güç elde edilebilmesi için, rüzgar hızınının 14 m/s olması gerekmektedir. Germiyan rüzgar Çiftliği 1 "otoprodüktör" sistemiyle kurulmuş olup, burada üretilen enerji TEDAŞ'a verilmekte ve kurucu firma bünyesindeki bir plastik fabrikasının TEDAŞ'tan aldığı enerjiyi karşılamaktadır. Germiyan'da bir yılda rüzgardan üretilen elektrik enerjisi, bu fabrikanın tükettiği elektrik enerjisi miktarından fazla olduğunda, fazla üretilen enerjinin miktarının bedeli, rüzgar elektriği üreten firmaya ödenmektedir [6].

#### 1.4. Rüzgar Enerjisinin Küresel Durumu

Türbin teknolojisinin gelişmesiyle gittikçe azalan maliyetlerin etkisiyle birlikte fosil yakıtların çevreye verdikleri zararların etkileyici boyutlara ulaşması ve gelecekte kullanımlarının endişe yaratması gibi nedenlerden dolayı dünya genelinde rüzgar enerji kullanımı hızla yaygınlaşmıştır. 17 yıl gibi kısa bir sürede yılda % 25'e yakın bir büyüme hızı artışı meydana gelmiştir. Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliğinin raporlarına göre 2008 yılında yaklaşık 29 000 MW rüzgar enerjisi santrali kurulmuş ve dünya kurulu gücü 121.000 MW'a ulaşmıştır. Bugün rüzgar enerjisi dünya elektrik üretiminin %1,5 oluşturmakla beraber bu oran bazı ülkelerde %20'leri geçmektedir.



Şekil 1.4. Rüzgar enerjisinin yıllara göre kullanımdaki ve tahmini durumu.

Dünya rüzgar enerjisi sektöründe Avrupa %77 oranla lider konumda olsa da 2003 ve 2004 yılı verilerine bakıldığında (2003-%82, 2004-%79) kurulu kapasitede bir azalma görülmektedir. Yılda Avrupa pazarı sadece % 18 lik bir büyüme yaratabilmiştir. Asya ise %48'lik bir büyüme ile dünya rüzgar enerjisi sektörünün yeni lokomotifi pozisyonundadır. Amerika, küresel rüzgar enerjisi kapasitesinin %17 sini oluşturmaktadır ki bunun % 98 i Kuzey Amerika'dan gelmektedir. Özellikle, ABD 2.424 MW yeni kapasite artışı uluslararası alanda bir numaradır. Dünya sıralamasında İspanya'dan sonra 3. sırada yer almaktadır. Pasifik bölgesinde, Avustralya kapasitesine 193 MW ekleyerek 572 MW kurulu güce ulaştı. Ayrıca devletin uyguladığı MRET (Mandatory Renewables Energy Tariffs) ile yeni yatırımlar devam etmektedir. MRET, elektrik üreten şirketlere üretimlerinin %2' lik kısmının yenilebilir enerji kaynaklarında sağlanmasının zorunlu kılan bir uygulamadır.

Avrupa' da, Almanyave İspanya liderliklerini korurken, bir zamanların lideri olan Danimarka durgun bir yıl geçirmiştir. Günümüzün gelişen ve her alanda güç baskınlığını hissettiren Çin bu alanda da 2008 yılında 12 000 MW lık türbin yatırımıyla kendisinden söz ettirmektedir.

### **1.5. Rüzgar Türbinleri**

Tahrik edilen kısmı dönme hareketi yapan ve bir akışkanda bulunan enerjiyi milinde mekanik enerjiye dönüştüren makinelere türbin denir. Türbinler, en genel halde; buhar, gaz, su ve rüzgar türbinleri olarak dört grupta incelenirler. rüzgar türbinleri ile ilgili tanımlamalar, değişik kaynaklarda birbirleriyle çelişmektedirler. Bu konudaki en genel tanımlama aşağıdaki gibidir: Pervane kanatları, pervane göbeği ve pervane miline rotor veya türbin denilir. Pervane mili, dişli kutusuna bağlıdır. Dişli kutusunu generatöre bağlayan mile de generatör mili denir. Bunların tümü kule tarafından taşınır. Kule ile yer bağlantısı da temel aracılığıyla sağlanır. Tüm bu elemanlara en genel halde rüzgar enerjisi tesisi adı verilir. Bu gerçeğe rağmen yerli ve yabancı literatürde rüzgar enerjisi tesisi yerine, rüzgar türbini denilmesi alışkanlık olmuştur.

Rüzgar türbinleri; direnç veya kaldırma kuvvetinden yararlanmalarına göre, pervane ekseninin yatay ya da düşey olmasına göre veya aynı rüzgar hızındaki devir sayılarına göre sınıflandırılabilirler. Direnç kuvvetinden yararlanan türbinlerde, rüzgara karşı bir yüzey tutulur ve rüzgar basıncından dönme hareketi oluşur. Örnek olarak; kepçe tipi anemometreler, Fars çarkı ve Savonius türbini gösterilebilir. Direnç kuvvetinden yararlanan türbinler, pistonlu pompalar ile su pompalanması gibi yüksek moment gereken yerlerde kullanılırlar ve elektrik üretimi gibi yüksek güç gereken alanlarda pek kullanılmazlar. Kaldırma kuvvetinden yararlanan türbinlerde rüzgar; yüzeye belli bir açıyla gelir ve yüzeye etkiyen hava hızının doğrultusuna dik olarak oluşan kaldırma kuvveti, dönme hareketine dönüşür. Yüzey öncesinde yüksek basınç, yüzey arkasında ise alçak basınç oluşmaktadır. Örnek olarak, düşey eksenli Darrius türbini ve kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinleri gösterilebilir. Rüzgar türbinleri, nominal güçlerine göre de; 5 kW'a kadar küçük güçlü, 5 kW'ın üstünde ise büyük güçlü rüzgar türbinleri olarak sınıflandırılırlar. Bunların dışında da, yükselen hava akımlı rüzgar türbinleri gibi hava hareketindeki kinetik enerjiden yararlanan türbinler vardır. Enerji dönüştürücüsü yükselen hava akımlı rüzgar türbinleri (güneş enerjisi konveksiyon bacası), güneş ışınları enerjisi tarafından ısıtılan havanın yükselmesi ve yükselen havadaki kinetik enerjinin de rüzgar türbinini tahrik etmesi prensibine göre çalışır. Isınarak yükselmesi istenen hava, üstten cam veya plastik malzemeden yapılmış geçirgen bir çatı ile örtülüdür ve bu çatının ortasında yer alan betonarme bacada yükselir. Yükselen hava akımlı rüzgar türbinlerinde elde edilen güç; kollektör verimi, kollektör enine kesit alanı, havanın sabit basınçta özgül ısı kapasitesi, dış ortam sıcaklığı, güneş sabiti ve bacanın yüksekliğine bağlıdır. Buradaki baca yüksekliği arttıkça, elde edilen güç de artmaktadır. Baca boyu, yapım ve montajdaki teknik kısıtlar gibi; burkulma problemi ile de sınırlandırılmaktadır. Yükselen hava akımlı rüzgar türbinleri ile ilgili teorik ve deneysel araştırmalar devam etmektedir.

Yatay eksenli kanatlı rüzgar türbinlerinden daha fazla enerji alabilmek için, tarih boyunca öneriler yapılmıştır. Bunlardan birisi, iki pervanenin arka arkaya yerleştirilerek aynı generatör milinin döndürülmesidir. Arkadaki pervaneye, öndeki pervaneye gelen rüzgar hızının optimum durumda ancak üçte biri geleceğinden bu öneri verimli olmamıştır. Pervanenin önüne, rüzgar hızının artırılması için nozul

yapılması önerisi de, hava debisinin küçük kesit tarafından belirlenmesi ve rüzgar yönüne ters hava sirkülasyonu oluşması nedeniyle, bekleneni verememiştir. rüzgar türbini pervanesinin bir difizör içine yerleştirilmesi sonucunda, rüzgar yönünde hava sirkülasyonu oluşması ve bunun da hava hızını artırması nedeniyle, serbest pervaneye nazaran 3,5 kat daha fazla enerji elde edilmiştir. Fakat, bunun için difizör boyunun pervane çapının 2-3 katı olması gerekmektedir. Difizörün ağırlığı, hem ek bir yüküdür, hem pervane düzleminin rüzgar hızına dik konuma getirilmesi daha zor olmaktadır. Bu gibi nedenlerle, difizörden elde edilen ek kazanç, sistemin serbest pervaneye göre daha ekonomik olması için yeterli olmamaktadır. Aşağıda, yatay eksenli kanatlı rüzgar türbinlerini oluşturan ana elemanlar ile ilgili kısa bilgi verilmektedir.

Temel boyutları, türbin büyüklüğüne ve yerin özelliklerine bağlıdır. Temelin boyutlandırılmasında sadece statik hesap yapılır, dinamik hesap yapılmaz. Statik hesapta da, durmakta olan rüzgar türbininin yüz yılda karşılaşılabileceği rüzgar hızına ve nominal güçteki itmeye dayanması istenir.

Kule malzemesi, genellikle çelik veya betondur. Modern rüzgar türbinleri, halka enine kesitli kulelere sahiptir. Kule yüksekliği, yükseklerdeki daha büyük rüzgar hızlarından yararlanmanın getirisi ile boya bağlı artış gösteren kule maliyeti arasındaki optimum çözümlerle belirlenir. Kule boyutlandırmasındaki bir diğer parametre de, kule eğilme katılığıdır. Özellikle, kulenin birinci eğilme doğal frekansı, kule malzemesi ve dolayısıyla maliyeti önemli ölçüde etkilemektedir. rüzgar türbinlerinin tüm imalat giderlerinin % 11- 20'si kule imalatına aittir.

## **1.6. Rüzgar Enerjisinden Yararlanma Alanları**

Rüzgar enerjisinden, elektrik üretimi dışında da yararlanılmaktadır. Rüzgar enerjisinden başlıca yararlanma alanları aşağıda incelenmiştir.

a) Rüzgar Elektrığının Isıtma Amaçlı Kullanımı: Soğuk iklimli bölgelerde, bir evin elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık %80'i oda ısıtılmasından, %15'i ışıklandırma ve elektrikli ev aletlerinin çalıştırılmasından ve %5'i de kullanım suyunun ısıtılmasından

oluşur. Bu nedenle, oda ve kullanım suyu ısıtılmasında rüzgar enerjisinin kullanılması ve böylece daha az çevre kirletici fosil yakıt kullanılması yararlı olacaktır. Direnç tellerinden rüzgar türbinlerinden elde edilen akımın geçirilmesi ile kazanılan ısı enerjisinde, akım frekansı ve geriliminin önemi olmayacaktır. Bu da, şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinde bulunan devir sayısı ayar sistemlerine ihtiyaç olmaması demektir. Ayrıca, bu tür elektrik enerjisi-ısı enerjisi dönüşümünde, hemen hemen hiç kayıp olmayacaktır. Rüzgar enerjisi potansiyelinin düşük olduğu anlarda da ısıtma sağlanmak istendiğinde, güneş ışını enerjisi ve Rüzgar enerjisinin birbirlerini tamamlamaları nedeniyle, güneş kollektörleri veya güneş pillerine ihtiyaç duyulacaktır. Bu durumda, verimi daha iyi olan güneş kollektörlerini tercih etmek yerinde olacaktır.

b) Su Pompalanması: Rüzgar enerjisi insan ve hayvanlar için içme suyu sağlanmasında, tarlalar için sulama suyunun taşınmasında ve gerektiğinde bataklık alanlardaki mevcut suyun başka bir yere aktarılması sonucu kurutulmasında kullanılabilir. Su pompalanmasında genellikle pistonlu ve merkezkaç pompalar kullanılmaktadır. Pistonlu pompaların verimi %80-90 olmakta, devir sayısı düşse de bu verim sabit kalmaktadır. Merkezkaç pompaların verimi ise %50-75 arasındadır ve devir sayısı düştüğünde daha da azalmaktadır. Pistonlu pompalarda debi ile devir sayısı doğru orantılıdır ve debi, basma yüksekliğinden hemen hemen bağımsızdır. Merkezkaç pompalarda ise debi, basma yüksekliğine sıkı sıkıya bağlıdır. Ayrıca, merkezkaç pompalarda belli bir basma yüksekliği için belli bir minimum devir sayısı gerekir. Yüksek devirlilik sayılı rüzgar türbinlerinde (az kanatlı) merkezkaç pompaların kullanılması, rüzgar enerjisinden daha verimli yararlanmayı sağlamaktadır. Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi eldesi ve bu enerjinin de su pompalarının tahrikinde kullanılması, %30'luk ek enerji kaybını beraberinde getirir. Fakat rüzgar enerjisi potansiyeli uygun olan bir yer seçilerek elektrik enerjisi üretilmesi ve bunun da kablo ile istenilen yere iletilmesi sağlandığında, bu dönüşüm kaybı fazlasıyla karşılanabilmektedir.

c) Deniz Suyunun Tuzdan Arındırılması: İçme suyu, sıkıntı duyulan bölgelerde, rüzgar enerjisi kullanılarak deniz suyundan elde edilebilir. Bunun için temel iki yöntem vardır: Damıtma yöntemi ve ince zardan geçirme yöntemi. Damıtma



yönteminde, deniz suyundan tuzun hemen hemen tamamı ayrılabilir. Bu yöntemde gereken ısı enerjisi, rüzgar enerjisinden karşılanabilir. İnce zardan geçirme yönteminde, su ve tuza farklı geçirgenlik gösteren ince zarların özelliklerinden yararlanılır. Bu yöntemde gereken pompa gücü, rüzgar enerjisinden sağlanabilir. Günümüzde bu yöntem ile, 1 kg'ı içinde 35 gr tuz bulunan deniz suyundan, içinde 0,5 gr tuz bulunan içme suyu elde edilebilmektedir. Bu tuz yoğunluğu için 1 m<sup>3</sup> deniz suyunun arıtılmasında 10-15 kWh elektrik enerjisine gereksinim vardır. Rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek olan bölgelerde içme suyunun denizden sağlanması işleminde, enerji gereksiniminin dizel motorlar yerine rüzgar türbinlerinden karşılanması daha ekonomik olmaktadır.

## BÖLÜM 2. RÜZGAR ENERJİSİNİN İLKELERİ

### 2.1. Toplam Güç

Rüzgar akımının toplam gücü, pervane kanatlarına dıştan gelen akış (hareket) gücünün iç kısma geçen miktarından yararlanarak hesaplanır. Güç ifadesi aşağıda verilmiştir:

$$P_{\text{Toplam}} = m \cdot KE_i = m \cdot \frac{V_i^2}{2g_c} \quad (2.1)$$

Burada  $P_{\text{toplam}}$  güç (W),  $m$  kütle-akış oranı (kg/s),  $V_i$  gelen rüzgar hızı (m/s) ve  $g_c$  1,0 kg/(N.s<sup>2</sup>) olarak dönüşüm katsayısıdır.

Kütle-akış oranı  $m = \rho \cdot A \cdot V_i$  olarak denklem (2.1) de yerine yazılırsa,

$$P_{\text{Toplam}} = \frac{1}{2g_c} \rho A V_i^3 \quad (2.2)$$

bulunur. Burada  $\rho$  sisteme gelen rüzgar yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>) ve  $A$  akışın kesit alanı (m<sup>2</sup>) 'dır.

### 2.2. Maksimum Güç

Enerji korunumu kanunu gerekleri sürtünme, pervaneye çarpan akışkanın hızının sıfıra düşmemesi gibi kayıp kuvvetlerden dolayı toplam gücün tümünü mekanik enerjiye çevirmek mümkün değildir. Burada maksimum güç için yapılacak hesaplamalarda, günümüzde en çok kullanılan tip olan yatay eksenli pervane tipli türbin ve generatör ele alınmıştır.

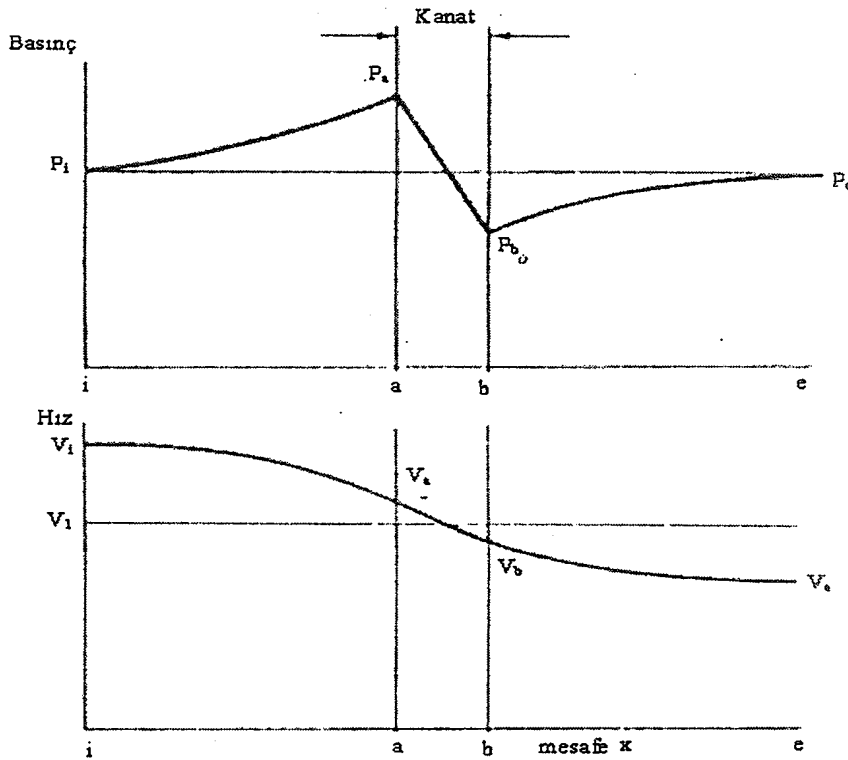
Türbinin ön kısmından gelen rüzgar basıncı ve hızı  $P_i$  ve  $V_i$ , arkadan çıkan rüzgarın basıncı ve hızı  $P_e$  ve  $V_e$ , olsun. Türbin ise a-b kalınlığında olup, rüzgar basınç ve hız profilleri Şekil 2.1 'de verilmiştir. Kinetik enerjinin bir kısmı türbin tarafından harcandığından  $V_e$ ,  $V_i$ 'den daha azdır, i ve a noktaları arasında hiçbir ısı ve iş değişiminin olmadığı, potansiyel enerjideki değişimin 0 olduğu varsayılarak (basınç ve ısı değişimleri ortamla karşılaştırıldığında çok küçük oldukları için uygun bir varsayımdır), i ve a arasından gelen havanın termodinamik bir sistem olduğu da hesaba katılarak; denk. (2.1) 'de kinetik ve akış enerjisi terimleri yok edilir. Böylece;

$$P_i \cdot v + \frac{V_i^2}{2g_c} + P_a \cdot V + V \frac{V_a^2}{2g_c} \quad (2.3)$$

veya

$$P_i + \rho \frac{V_i^2}{2g_c} = P_a + \rho \frac{V_a^2}{2g_c} \quad (2.4)$$

elde edilir.



Şekil 2.1. Yatay eksenli bir türbininden geçen rüzgarın basınç ve hız profilleri

Benzer şekilde çıkış bölgesi b-e aralığı için

$$Pe + \rho \frac{Ve^2}{2g_c} = Pb + \rho \frac{Vb^2}{2g_c} \quad (2.5)$$

dir. a dan b ye türbini kat eden rüzgarın hızı, kinetik enerjinin mekanik enerjiye dönüşmesinden dolayı düşer. Gelen rüzgarın  $V_i$  hızı aniden düşmez. Kademeli olarak, türbine yaklaşırken  $V_a'$  ya ve ayrılırken de  $V_e'$ 'ye düşer. Böylece  $V_i > V_a$  ve  $V_b > V_e$  olur. Bundan dolayı yukarıdaki denklemlerden  $P_a > P_i$  ve  $P < P_e$  olur. Yani rüzgar basıncı, türbine yaklaşırken ve ayrılırken artar.

Türbinden uzakta bir e noktasında rüzgar basıncının ortam basıncına eşitlendiği varsayımı kabul edilebilir.

$$P_e = P_i \quad (2.6)$$

Türbin içindeki  $V_t$  hızı değişmediği kabul edilir; çünkü dikkate alınan toplam uzaklığa göre karşılaştırıldığında kanat genişliği daha incedir.

$$V_t \cong V_a \cong V_b \quad (2.7)$$

$$P_a - P_b = \rho \left( \frac{V_i^2 - V_e^2}{2g_c} \right) \quad (2.8)$$

olur. Bir rüzgar türbininin kanatlarına dik olarak gelen rüzgarın, rüzgar akışına dik aksenal kuvveti şöyle bulunur.

$$F_x = (P_a - P_b) \cdot A = \rho A \left( \frac{V_i^2 - V_e^2}{2g_c} \right) \quad (2.9)$$

$$\text{ve buradan da } m = \rho \cdot A \cdot V_t \text{ olarak,} \quad (2.10)$$

$$F_x = \frac{1}{g_c} \rho \cdot A \cdot V_t (V_i - V_e) \quad (2.11)$$

Bu kuvvet aynı zamanda rüzgarın momentum değişimine de eşittir.

$$V_t = 1/2(V_i + V_e) \quad (2.12)$$

i ve e tarafından sınırlanan toplam termodinamik sistemde potansiyel enerji değişimi sıfırdır. Ancak bundan dolayı iç enerji ( $T_i = T_e$ ) akış enerjisi ( $P_i V = P_e V$ ) ve hiçbir ısı

değişimi eklenmez veya çıkarılmaz. Genel enerji denklemi, kararlı akış işi (W) ve kinetik enerji denkleminde indirgenir.

$$W = K.E_i - K.E_e = \left( \frac{V_i^2 - V_e^2}{2g_c} \right) \quad (2.13)$$

$$P = m \cdot \left( \frac{V_i^2 - V_e^2}{2g_c} \right) = \frac{1}{2g_c} \rho \cdot A \cdot V_i (V_i^2 - V_e^2) \quad (2.14)$$

elde edilir.

$$P = \frac{1}{4g_c} \rho \cdot A \cdot (V_i + V_e) (V_i^2 - V_e^2) \quad (2.15)$$

$V_i = V_i$  ve  $V_e = 0$  olduğunda denk.(2.15), denk(2.1) 'e dönüşür. Bu durum, rüzgarın türbinden ayrıldıktan sonra tamamen durgunlaştığını ifade eder. Ancak bu, imkânsız bir durumdur. Çünkü rüzgar, türbin çıkışında birikmez.  $V_e$ 'nin bir terimde pozitif, diğerinde de negatif olması nedeniyle, hesaplanan gücün çok düşük veya çok yüksek  $V_e$  değerleri için azalacağı, denklem (2.15) 'ten açıkça görülür. Böylece optimum çıkış hızı ( $V_{e \text{ opt}}$ ) için maksimum güç ( $P_{\text{max}}$ ) elde edilir.  $P_{\text{max}}$ ; verilen bir  $V_i$  değeri için denklem (2.15) in  $V_e$ 'ye göre türevinin sıfıra eşitlenmesiyle hesaplanabilir. Yani,

$dP/dV_e = 0$  'den  $3V_e^2 + 2V_i V_e - V_i^2 = 0$  bulunur. Buradan

$$V_{e \text{ opt}} = 1/3 V_i \quad (2.16)$$

elde edilir. Böylece

$$P_{\text{max}} = 8/27 g_c \rho A V_i^3 \quad (2.17)$$

olur. İdeal bir rüzgar türbininin maksimum teorik verimi  $\eta_{\text{max}}$ , rüzgardan elde edilen maksimum gücün rüzgarın toplam gücüne oranıdır.

$$\eta_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{toplam}}} = \frac{8}{27 g_c} \cdot 2 \cdot g_c = \frac{16}{27} = 0,5926 \quad (2.18)$$

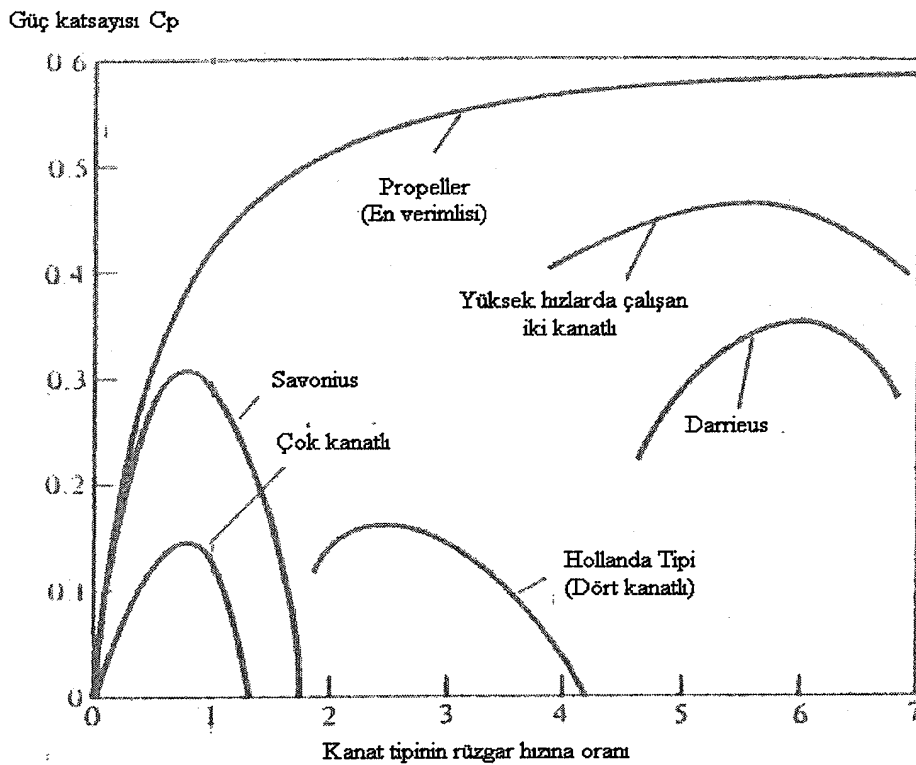
Yani; bir rüzgar türbini, rüzgarın toplam gücünün %60'ndan fazlasını kullanılabılır yararlı güce çeviremez.

### 2.3. Gerçek Güç

Buhar ve hidrolik türbinlerin kanatlarında olduğu gibi rüzgar türbinlerinde de hızdaki değişimler, kanat giriş açıları ve kanat hızlarına bağlıdır. rüzgar türbinlerinin kanatlarının hızı diğer türbinlerin kanatlarının hızından daha büyük yarıçap ile değişir ve bu yüzden kanatlar bükülürler. Çünkü kanatlar daha uzundur.

Rüzgardan yüksek verimle enerji üretilmesinde, kanat tipi çok önemlidir. Değişik kanat tipleriyle farklı güçler üretilebilir. Şekil 2.2'de değişik kanat tiplerinden elde edilen güç katsayıları gösterilmiştir. Gerçek güç değeri ise, gerçek verim değeri  $\eta$ 'den yararlanarak aşağıdaki ifade ile hesaplanır:

$$P = \eta \cdot P_{\text{Toplam}} = \eta \cdot \frac{1}{2g_c} \cdot AV_i^3 \quad (2.19)$$



Şekil 2.2. Türbin çeşitlerinin kanat tipi rüzgar hızı oranını güç katsayısı

### 2.3.1. Kanatlar üzerindeki kuvvetler

Pervane tipi bir rüzgar türbin kanatlarına etki eden kuvvetler 2 çeşittir. Bunlar tork'u üreten çarkın dönüş yönündeki dairesel kuvvetler ve uygun bir mekanik tasarım tarafından karşılanabilen aksel itme sağlayan, rüzgar akışı yönündeki aksel kuvvetlerdir.

Dairesel kuvvet veya tork (T),

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\pi DN} \quad (2.20)$$

şeklinde elde edilir. Burada

T: Tork (N)

$\omega$ : Türbin çarkının açısal hızı (m/s)

D: Türbin tekerinin çapı (m)

N: Çarkın birim zamandaki devir sayısı ( $S^{-1}$ )

Anma gücünde çalıştırılan bir türbin için tork;

$$T = \eta \frac{1}{8g_c} \rho \frac{DV_i^3}{N} \quad (2.21)$$

olarak bulunur. Maksimum verimde çalıştırılan bir türbin için ( $\eta_{\max}=16/27$  olarak)

$$T_{\max} = \frac{2}{27g_c} \eta \frac{DV_i^3}{N} \quad (2.22)$$

yazılabilir. Aksel kuvvet veya aksel itme;

$$F_x = \frac{1}{2g_c} \rho .A.(V_i^2 - V_e^2) = \frac{\pi}{8g_c} \rho D^2 .(V_i^2 - V_e^2) \quad \text{ve} \quad V_e = 1/3V_i, \quad \text{olduğu} \quad \text{noktada}$$

maksimum verimde çalıştırılan türbin çarkındaki aksel kuvvet şu şekilde olur:

$$F_{\max} = \frac{4}{g_c} \rho AV_i^2 = \frac{\pi}{9g_c} \rho D^2 V_i^2 \quad (2.23)$$

Büyük çaplı türbinlerde uğraşılması zor olan aksel kuvvetler, türbin çarkının karesi ile doğru orantılıdır. Tasarımı ve ekonomik olması açısından, çap seçiminin bir üst sınırı vardır.

Örnek:  $V=10$  m/s,  $15^\circ\text{C}$  de ve standart 1 atm basıncındaki rüzgar hızıdır. Buna göre;

- Rüzgar akışındaki toplam güç yoğunluğunu,
- Elde edilebilecek maksimum güç yoğunluğunu,
- $\text{W/m}^2$  cinsinden kabul edilebilir ölçüde elde edilebilecek güç yoğunluğunu,
- Türbin çapı 120 m ise kW cinsinden üretilecek toplam gücü,
- Türbin maksimum verimde ve 40 d/d hızda çalışıyorsa, momenti ve N aksel itmeyi hesaplayalım. (Hava karışımı için, gaz sabiti  $R=287$  j/(kg.k)  $1\text{atm}=1,01325 \times 10^5 \text{Pa}$ ,  $\rho=1,226$ ).

$$\text{a) } P_{\text{Toplam}}/A = \frac{1}{2g_c} \rho A V_i^3 / A = 613 \text{ W/m}^2$$

$$\text{b) } P_{\text{max}}/A = 8/27 g_c \rho A V_i^3 / A = 363 \text{ W/m}^2$$

$$\text{c) } \eta = \%40 \text{ olarak düşünülürse } \eta \cdot P/A = 0,4 \cdot 613 = 245 \text{ W/m}^2$$

$$\text{d) } P = 0,245 \cdot \frac{\pi D^2}{4} = 0,245 \cdot \frac{\pi \cdot 120^2}{4} = 2270 \text{ kW}$$

$$\text{e) } T_{\text{max}} = \frac{2}{27 g_c} \eta \frac{D V_i^3}{N} = 16,347 \text{ N}$$

$$F_{\text{max}} = \frac{4}{g_c} \rho A V_i^2 = \frac{\pi}{9 g_c} \rho D^2 V_i^2 = 616,255 \text{ N}$$

Bütün rüzgar makinelerinde güç, çarkın alanı ile doğru orantılı olan rüzgar hızı ile çark yarıçapına bağlı olarak üretilir. Çok sık olarak ortaya çıkan rüzgar hızındaki dalgalanmalar ise, güçte büyük dalgalanmalara sebep olur. Örneğin rüzgar hızındaki sadece %20 lik bir düşüş, güçte yaklaşık %50 kadar kayıpla sonuçlanır. Hızın yaklaşık yarı yarıya (0,464) düşüşü, gücün %10 oranında düşmesine sebep olur.



Güçteki en büyük kayıplar, makinelerdeki rüzgar hızından bağımsız olan kayıplar nedeniyle ortaya çıkar. Sonuçta makinenin parçalarında oluşan kayıplarda bir artış ve rüzgar hızının veriminde azalma olur ve güç düşer. Maksimum makine verimi, nispeten dar bir güç değişimi aralığındadır.

Güçteki büyük dalgalanmalar sakıncalıdır. Bunlar şebekede güç salınım problemleri ve makine donanımında zorlanma şeklinde ortaya çıkarlar. Ekonomik açıdan bir rüzgar santralindeki türbin ve generatörler, verilen bölgedeki ortalama rüzgar hızına göre maksimum veya maksimuma yakın bir oranda çıkış gücü üretebilmek için tasarlanmıştır. Bunun için daha küçük bir türbin ve generatör kullanarak, maksimum ortalama rüzgar hızına göre daha az çıkış gücü üreten ve bütün rüzgar hızları için sabit bir çıkış gücünü karşılayabilecek uygun maliyetli bir rüzgar generatörü dizayn edilir [5].

Düşük hızlı rüzgarda, verimde ve güçte büyük kayıplar olduğundan dolayı bir rüzgar türbini bölgedeki en az rüzgar hızında çalışabilecek şekilde dizayn edilir [5]. Bu durumda çok yüksek rüzgar hızlarında türbini yüksek rüzgarın olumsuz etkilerinden korumak için frenleyici sistemler kullanılır. Bununla birlikte değişken kanat sayılı sistemler kullanılarak yüksek rüzgar hızlarından da verim alınmaya çalışılır. Böylece rüzgar türbini en az rüzgar hızıyla, düz hızla ve yüksek rüzgar hızıyla çalışacak, daha yüksek rüzgar hızlarında da frenleme yapılarak çalıştırılabilirler. Bu şekildeki çalışmalar pahalı olmasına rağmen en yüksek verimli sistemlerdir. Rüzgar türbin hızları genellikle referans yüksekliğindeki rüzgar hızı olarak ve genellikle % 90 olan bir uygunluk faktörü ile verilir, genellikle bu 9,1 m ve yukarıdır.

Uygunluk faktörü, verilen periyot boyunca türbinin çalıştığı zamanın bir bölümü olarak tanımlanır. Türbin göbeğindeki gerçek rüzgar hızı, türbin gücünü genellikle daha yüksek olarak belirler. Çünkü türbinler, rüzgar hızları değişimi yüzünden ve tüm yük faktörünün (santral işletme faktörü), uygunluk faktörüne göre daha küçük olması sebebi ile daima normal hızdaki güçlerde çalışmazlar. Tüm yük faktörü, verilen bir zaman periyodundaki toplam üretilen enerjinin toplam enerji kapasitesine olan oranıdır.

Bu faktör, düz rüzgar hızına göre yapılan hesap işlemlerinde daha az yer tutar ve en az rüzgar hızının altındaki, yüksek rüzgar hızının üstündeki ve bakım onarım gibi değişik durumlarda ortaya çıkan güç kesintilerinde hesaba katılmaz.

Yük faktörü tipik olarak %30–40 civarındadır. Bir rüzgar enerji santralinde ortalama yük faktörü olarak 1/3 olarak dikkate alındığında, aynı büyüklükteki %80 yük faktörü civarında ve aynı oranda çalışan normal bir enerji santralinden, dikkate değer bir biçimde rüzgar santralinin ünite maliyeti/kW oranı yaklaşık 2,5 kat daha fazladır. Elde edilen faydanın gerçekçi maliyetine ulaşmak için, bir rüzgar türbini için ünite maliyeti oranını (\$/kW) 2,5 ile çarpmak gerekir [5]. Bu, rüzgar gücünün ekonomik yüklerinden biridir.

Pervane gücü, Momenti ve Devirlilik Sayısı: rüzgar etkisiyle dönmekte olan pervanenin pervane göbeğinden  $r$  uzaklıktaki bir kanat elemanının çevresel hızı  $V_{\phi}$ ,  $\omega$  açısal hız ve  $n$  pervane milinin dakikadaki devir sayısı olmak üzere,

$$V_{\phi} = \omega r = \frac{\pi n}{30} (m/s) \quad (2.24)$$

bağıntısıyla verilmektedir. Pervane yarıçapı  $R$  olmak üzere tanımlanan,

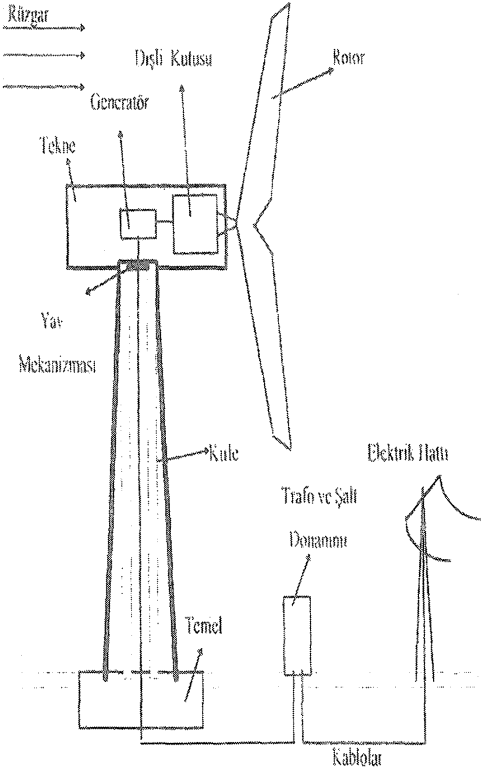
$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (2.25)$$

boyutsuz büyüklüğüne de devirlilik sayısı veya uç hız oranı denir.  $P_p$  pervane milindeki gücün, pervane düzlemi öncesindeki rüzgardaki kinetik enerjiden kaynaklanan  $P_r$  gücüne oranına da güç faktörü adı verilmektedir.

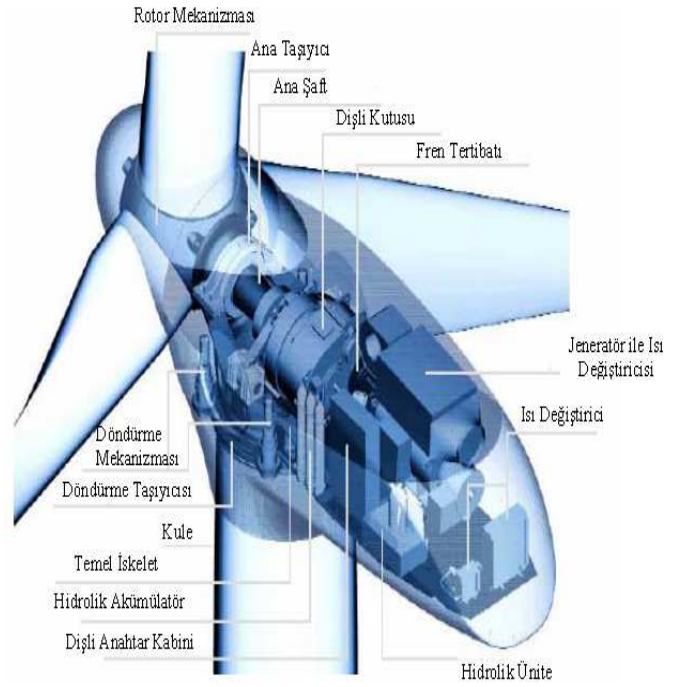
## BÖLÜM 3. RÜZGAR SANTRALLERİNİN ÇALIŞMASI

### 3.1. Rüzgar Santralinin Genel Yapısı

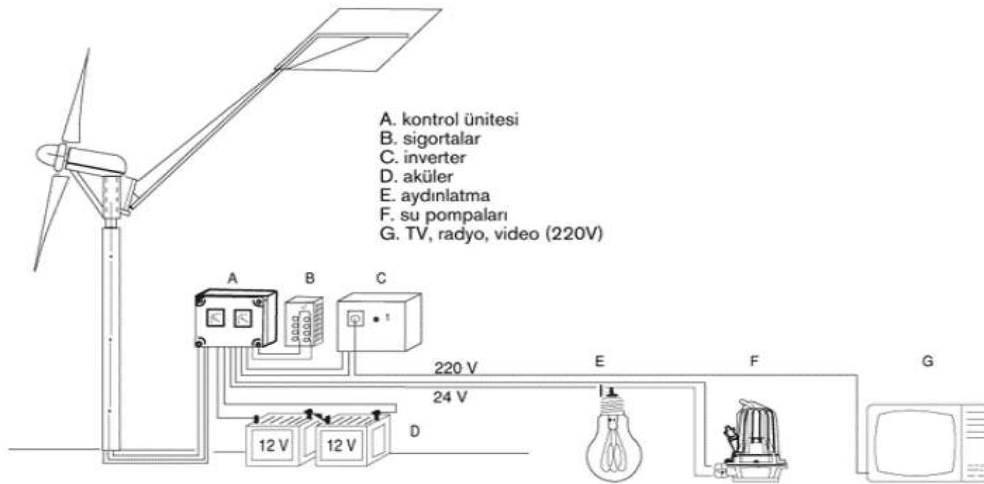
Rüzgardan elektrik enerjisi üretimini sağlayan bir rüzgar santralının genel yapısı Şekil 3.1'de, tekne ekipman ve konumları Şekil 3.2'de, şebekeden bağımsız model bir rüzgar enerji sistemi Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Santral; rüzgar türbinini oluşturan rotor ve kanat sistemi ile kule, yaw mekanizması, hareket iletim sistemleri, kontrol sistemleri, generatör ve diğer elektriksel aksamardan oluşmaktadır.



Şekil 3.1. Rüzgar enerji santrali genel yapısı



Şekil 3.2. Tekne ekipman ve konumları



Şekil 3.3. Şebekeden bağımsız model rüzgar enerji sistemi

Sistemin en önemli parçaları, tekne (nacelle) denilen kısma kurulmakta ve orada dış etkilerden korunmaktadır. Bu kısım, rüzgarın yönüne göre yaw mekanizması yardımı ile döndürülmektedir.

## 3.2. Rüzgar Santralinin Kısımları

### 3.2.1. Rotor kanat sistemi

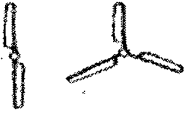
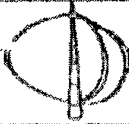

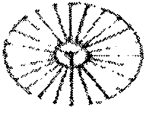



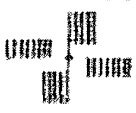
Rüzgar türbinlerinin pervaneleri; alüminyum, titan, çelik, elyaf ile güçlendirilmiş plastik (cam elyafı, karbon elyafı ve aramid elyafı) ve ağaçtan imal edilebilmektedir. Modern rüzgar türbinlerinin kanatlarının hemen hemen tamamı, cam elyafıyla güçlendirilmiş polyster veya epoksi gibi, cam elyafıyla güçlendirilmiş plastikten üretilirler. Çelikten üretilen kanatların eğilmeye dayanımları çok iyidir. Fakat, yorulma dayanımları ve korozyon problem oluşturmaktadır. Alüminyum kanatlar, çeliğe göre daha hafiftir, yorulma dayanımları daha iyidir ve korozyona daha dayanıklıdır. Alüminyum malzemenin zayıf noktaları; kabuk şeklindeki malzemenin burkulması, imalat tekniğinin zorluğu ve pahalı olmasıdır. Cam elyafının kopma mukavemeti,  $420 \text{ N/mm}^2$ , St52 çeliğinin kopma mukavemeti  $520 \text{ N/mm}^2$  'ye yakındır. Karbon elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzemenin kopma mukavemeti ise,  $550 \text{ N/mm}^2$  ile çelikten daha iyidir. Cam elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzemenin ana sorunu, elastisite modülünün  $15 \text{ kN/mm}^2$  ile çeliğe

nazaran ( $210 \text{ kN/mm}^2$ ) çok düşük olmasıdır [7]. Bu nedenle, çok uzun kanatlarda cam elyafı yerine, elastisite modülü  $44 \text{ kN/mm}^2$  olan karbon elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzeme kullanılır. Fakat, bu malzeme de pahalıdır.

Bir rüzgar santralının ana yapı elemanı türbindir. Günümüz rüzgar türbinleri, geliştirilmiş rüzgar enerjisi çevrim sistemleri (WECS) olarak tanımlanır. rüzgar santrallerinde kullanılan türbinlerin hemen tümü yatay eksenli propeller türbinlerdir. Büyük güçlerde rotor kanat sayılan bir ile üç arasında değişmektedir ve her bir kanat ağırlığı 2 ton kadar olabilmektedir. Genellikle up-wind ( üst-rüzgarlı) tip türbinler kullanılır.

Türbinler, rotor konumuna göre yatay, dikey ve eğik eksenli olurlar. Yatay eksenlilerin dönme eksenleri rüzgar yönüne paralel ve kanatları rüzgar yönüne diktir. Bu türbinler hızlı olup az kanatlıdırlar. Propeller türbinler, difürözlü türbinler ve tornado türbinler olarak üçe ayrılır. Dikey eksenli türbinlerin dönme eksenleri dikey ve rüzgara diktir. Kanat kirişleri dönme eksenine dik olacak şekilde yerleştirilmiştir.

Elektrik enerjisi üretiminde en gelişmiş rüzgar türbinleri olan hızlı rüzgar türbinleri, rüzgar generatörü olarak adlandırılmaktadır. Bu tip rüzgar türbinleri çok sayıda pervaneye sahip olabilirler. Rüzgar generatörünün verimi, elde edilecek elektrik enerjisinin miktarını büyük ölçüde değiştirmektedir. Rotorların; Pervane Tipi, Darrius Tipi, Cyclogiro Tipi, Çok Kanatlı Tip, Yelken Kanatlı Tip, Fan Tipi, Savonius Tipi ve Hollanda Tipi gibi çeşitleri mevcuttur. Ancak elektrik üretiminde en çok pervane tipi kullanılmaktadır ( Şekil 3.4).

ROTOR Tipleri	RPM	Tork Kullanım Yeri
PERVANE TİPİ 	Yüksek	Alçak Elektrik Üretimi
DARRIEUS TİPİ 	Yüksek	Alçak Elektrik Üretimi
CYCLOGIRO TİPİ 	Orta	Orta Elektrik Üretimi veya Su Pompalama
ÇOK KANATLI TİP 	Orta	Orta Elektrik Üretimi veya Su Pompalama
YELKEN KANAT TİPİ 	Orta	Orta Elektrik Üretimi veya Su Pompalama
FAN TİPİ 	Alçak	Alçak Su Pompalama
SAVANİUS TİPİ 	Alçak	Yüksek Su Pompalama
HOLLANDA TİPİ 	Alçak	Yüksek Su Pompalama veya Değirmen

Şekil 3.4. Pervane kanat tipleri

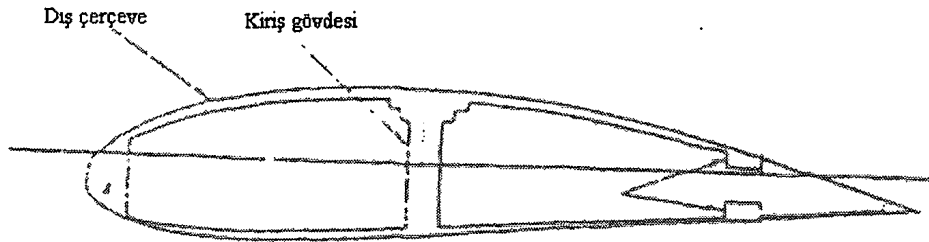
Rüzgar enerji sistemlerinde pervane kanatları, uçak pervanelerinin kanatlarına benzer şekilde profilli olarak yapılırlar. Pervane kanatlarının eğim açıları, kanadın ucundan itibaren merkeze doğru artmaktadır. Bu açının ortalama değeri  $10^\circ$  ile  $20^\circ$  arasında bulunmalıdır. İdeal kanatların eğim açılan  $16^\circ$  ile  $20^\circ$  arasında yapılır. Kanadın merkezinden uca doğru eğim açısı azalır. Buna benzer şekilde kalınlığı da uç tarafa doğru azalmaktadır. Bu incelmeye kanatların hareketlerinde önemli rol oynar. Kanatlar, çelik bileşenler içeren bir materyalden ve özellikle reçine ya da polyesterle güçlendirilmiş fiberglas bir malzemedendir.

Sabit hızlı türbin rotorlarının dakikadaki devir sayısı 30, 34, 35, 43 d/d düzeyindedir. Değişken hızlı rotorlar için bu değerler 15-44, 18-39, 36-45, 40-60 ve 58-72 d/d

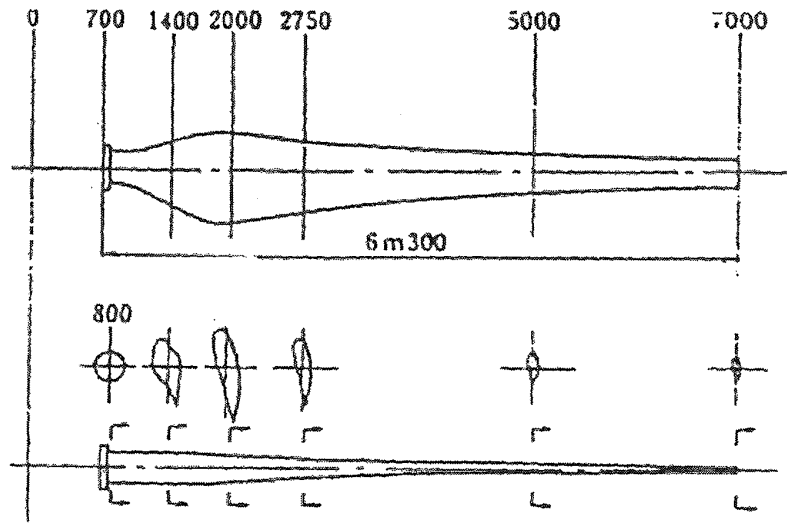
arasındadır[8]. Rotor ile generatör arasında, hızı yükseltecek dişli kutusu yer alır. Düşey eksenli rüzgar türbinlerinden savonius tipi türbinler, düşük rüzgar hızlarında (0.5 m/s) ilk hareketi kolay alabilen, küçük güçler üretebilen türbinlerdir. Rüzgar hızlarının 2-20 m/s olduğu bölgelerde rotor verimi yüksektir. Rüzgar hızına bağlı olarak rotor açılma hızı 30-170 d/d arasında değişmektedir. Rüzgar hızı sabit olarak 6 m/s olduğunda en iyi verim alınabilmektedir. Klasik savonius uygulamalarında oluşan girdaplar kayıplara yol açmaktadır [9]. Girdap oluşumunu engellemek için silindirik kanatların merkezleri birbirinden uzaklaştırılmakta veya yakınlaştırılmaktadır. Merkezler birbirinden uzaklaştırıldığında girdaplar kısmen giderilmekte ancak silindirik yüzeylerden birini terkeden akımla diğer yüzeylerdeki akım merkez nokta etrafında karışarak sorun oluşturmaktadır. Merkezler birbirine yaklaştırıldığında ise bir silindir yüzeyini terkeden akım düşük basınç bölgesi olan diğer silindir yüzeyine yönelir ve bu yüzeyin direnç etkisini azaltır.

Orta derece büyüklükteki türbinlerde kullanılan kanat yapılan Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de verilmiştir. Bu şekillerde yapı elemanı olarak NACA 4418 kanat modeli kullanılmıştır.

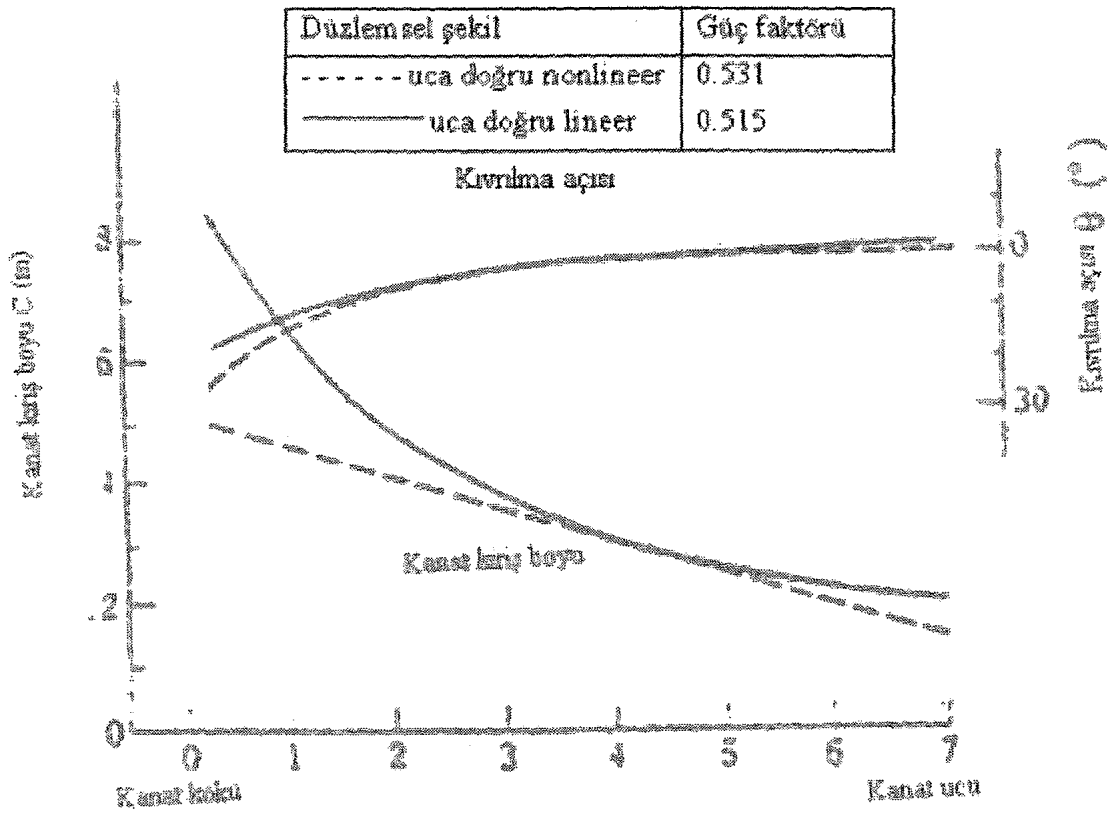
Şekil 3.5' de kanat iç yapısı, Şekil 3.6'da kanat dış yapısı ve Şekil 3.7'de ise kanat kiriş uzunluğunun kıvrılma açısı ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Kanat iç yapısı



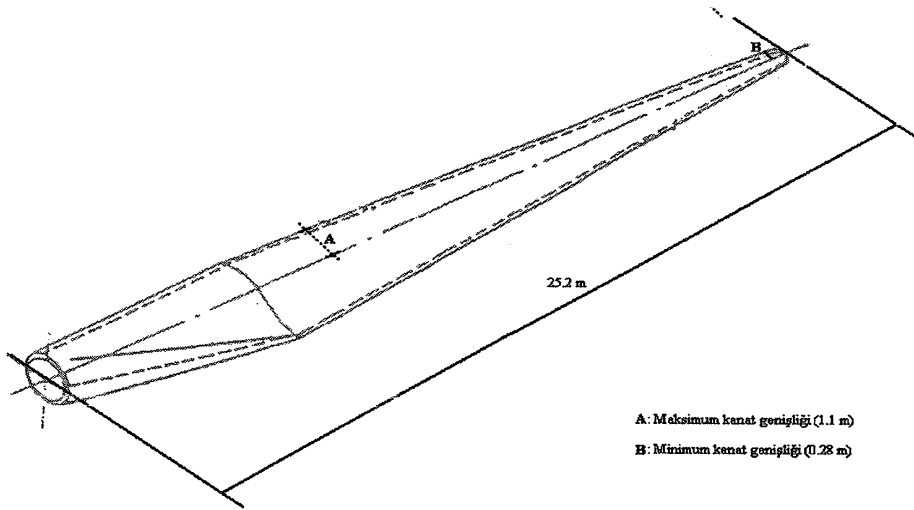
Şekil 3.6. Kanadın iki yönden ve kesit görünüşü



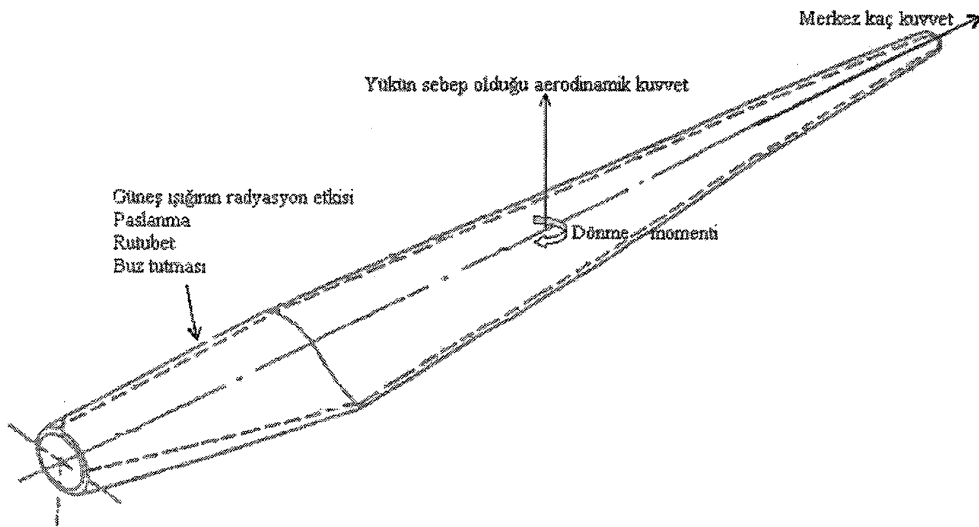
Şekil 3.7. Kanat kiriş uzunluğu-kıvrılma açısı değişimi



Büyük türbin kanatlarının yapılış Şekil 3.8 ve Şekil 3.9' de verilmiştir. Burada örnek olarak verilen kanatlar 52 m boyunda ve kalınlıkları göbekte kalın olup, uca doğru gittikçe incelmektedir. Şekil 3.8'de kanat elemanın boyutlandırılması, Şekil 3.9'de ise kanat üzerindeki aerodinamik kuvvet, atalet kuvveti ve çevresel faktörlerin etkisi gösterilmiştir. Tabiat şartları ve çevresel faktörler göz önünde bulundurulduğunda, paslanma ve korozyon, nemli hava, güneş ışınlarının radyasyon etkisi ve rüzgarla birlikte gelen küçük çakıl taşları kanatların eskimesini kolaylaştırır. Ancak kanatlar eskimeye karşı dayanıklılığını en az 20 yıl sürdürmelidir. Bu yüzden kanatların dışı alüminyum ile kaplanır.



Şekil 3.8. Kanat boyutlandırılması



Şekil 3.9. Kanat üzerine etkiyen kuvvetler

### 3.2.2. Kule

Yaygın olarak kullanılan kule çeşitleri, kafes ya da tüp şeklinde ve çelik ya da betondan yapılandır. Genelde, küçük ve ucuz kuleler kenarlarından tellerle yere monte edilir. Modern büyük kuleler tüp şeklindedir ve kötü hava şartlarında içerisinden nacelleye ulaşmayı sağlar. Kuleler, rüzgarı iyi alacak ve büyük rüzgarlardan da etkilenmeyecek şekilde yapılmalıdır.

Küçük kulelerin inşası, istenilen rüzgarın alınamamasını ve sonuçta verimin düşük olmasını beraberinde getirir. Yükseklerde rüzgar daha az türbülansa sahip olduğu için büyük kuleler tercih edilir. Ayrıca bina ve ağaçların da rüzgar akışını kesmesi engellenir. Bu yüzden öncelikli olarak büyük kanatlar değil, yüksek kuleler tercih edilir.

### 3.2.3. Dişli kutusu

Pervane muindeki enerji, generatöre bir dişli sistemi ile aktarılır. Dişli sistemi, pervane milinin devir sayısını generatörün gereksinim duyduğu devir sayısına çıkarır. Örneğin Nordex Firması tarafından üretilen N54 adlı, 1000 kW nominal güçlü rüzgar türbinlerinde dişli kutusunun çevrim oranı 1:70 'dir. Bu türbinlerin generatörlerinde, rüzgar hızına göre otomatik olarak devreye giren 6 veya 4 kutup söz konusudur. 6 kutbun devrede olması durumunda, pervane rotorunun dakikadaki devir sayısı 14, generatör milinin dakikadaki devir sayısı 1000 ve türbin gücü 200 kW olurken, 4 kutbun devrede olması durumunda, pervane rotorunun dakikadaki devir sayısı 22, generatör milinin dakikadaki devir sayısı 1500 ve türbin gücü 1000 kW olmaktadır.

### 3.2.4. Fren sistemi

rüzgar gücü, rüzgar hızının küpü ile orantılı olduğu için yüksek hızlarda çok büyük kuvvetler elde etmek mümkündür. Bu yüzden her mekanik içerikli sistemde fren sistemine ihtiyaç duyulacağı açıktır. Fren sistemleri, sistemin yüksek hızlarda veya acil durumlarda güvenli hale getirilmesini sağlarlar.

### 3.2.5. Yaw hareketi aksamı

Rüzgardan en iyi şekilde yararlanmak için nacelle'yi gelen rüzgarın yönüne göre çeviren bir sistem vardır. Bu sisteme yaw mekanizması denir. Eğer rüzgar pervaneye dik olarak gelmezse, rüzgardan maksimum şekilde yararlanılamaz ve rüzgarın bir kısmı boşa gider bunun sebebi kuvvet denkleminde dik gelen kuvvet alanı dikkate alınmasıdır. Bu yüzden yaw mekanizması rotor kanatlarını her zaman rüzgara dik tutmaya çalışır.

### 3.2.6. Elektrik sistemi

Elde edilen elektriğin kullanımı için sistemde generatör, inverter, konverter gibi elektrik elemanları vardır. Elektriksel aksam sistemin frekans, gerilim ve elde edilen gerilimin harmoniklerinin düzenlenmesi işini yüklenmiş durumdadır. Yalnız büyük sistemlerde frekans dışarıdan kullanılan düzenekler yardımı ile ayarlanabilmektedir.

#### 3.2.6.1. Generatörler

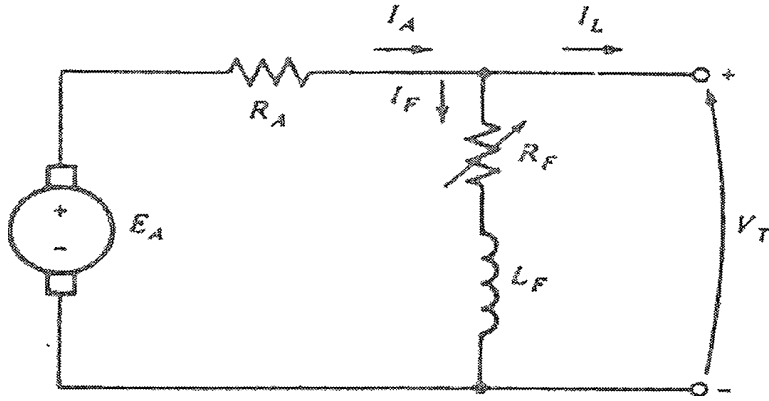
Generatörler iki kısımdır. Bunlar, alternatif akım (a.a.) ve doğru akım (d.a.) generatörlerdir. Tüm şebeke bağlantılı rüzgar türbinleri üç faz a.a. generatörlerinin hepsini sürebilirler. Generatörler temelde, Asenkron ve Senkron olarak iki sınıfa ayrılabilirler. Asenkron generatörler, bağlandığı şebekeye daima sabit frekansta gerilim verirler ve şebeke frekansından biraz daha yüksek frekansa sahiptirler.

rüzgar enerjisi elde etmede 3 çeşit generatör kullanılır:

1. D.A. Şönt Generatör
2. Senkron Generatör
3. Asenkron Generatör

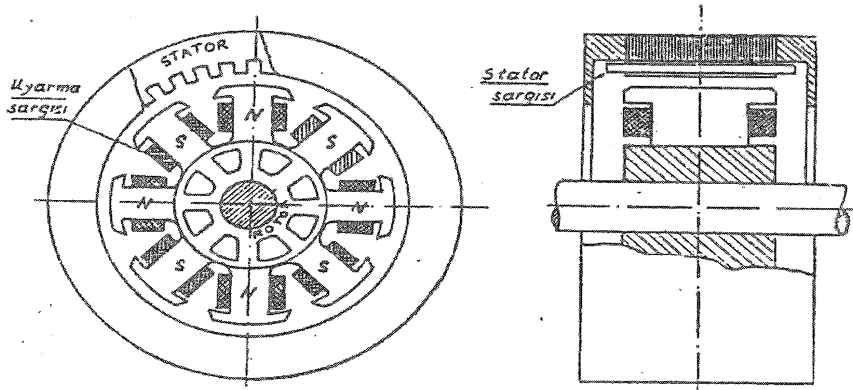
D.a. şönt generatörlerde dışarıdan güç kaynağı gerekmez. Bu özellik, bu generatörlerin avantajıdır. Bu generatörlerde kaldırma gerilimi şöyle elde edilir; ilk hareket generatörü harekete geçirir. Bilindiği gibi da generatörlerin kaldırma gerilimi generatörlerin kutuplarındaki artık mıknatısiyete bağlıdır. Generatör ilk dönmeye

başladığında artık mıknatısiyetten dolayı uyarma sargılarından uyarma akımı akar ve bu uyarma stator sargıların üzerinde gerilim düşümüne sebep olur. Bu generatörlerde gerilim kontrolü, mil hızını ve alan sargı dirençlerini değiştirerek yapılır. Şekil 3.10'da da şönt generatör devresi görülmektedir.



Şekil 3.10. D.a. şönt generatör

Senkron generatörlerde, her generatörde olduğu gibi, stator denilen sabit bir kısım ve rotor denilen dönen bir kısımdan oluşur. Statorlar direk hatta bağlanırlar. Üzerlerinde demir çekirdeğe sarılmış 3-faz sargılar vardır ve sabit bir hızda dönerek manyetik alan üretirler. Bu generatörlerin statorları, asenkron generatörlerin statorları ile aynı olmasına rağmen rotorları birbirinden çok farklıdır. Senkron generatörlerde rotor sargıların (alan sargıları) üzerinde doğru akım vardır ve buna uyarım akımı denir. Bu akım sabit bir manyetik alan oluşturur ve statorun oluşturduğu 3-faz manyetik alana kilitlenerek rotorun sabit bir hızda dönmesini sağlar. Şekil 3.11'da senkron generatörün yapısı görülmektedir.



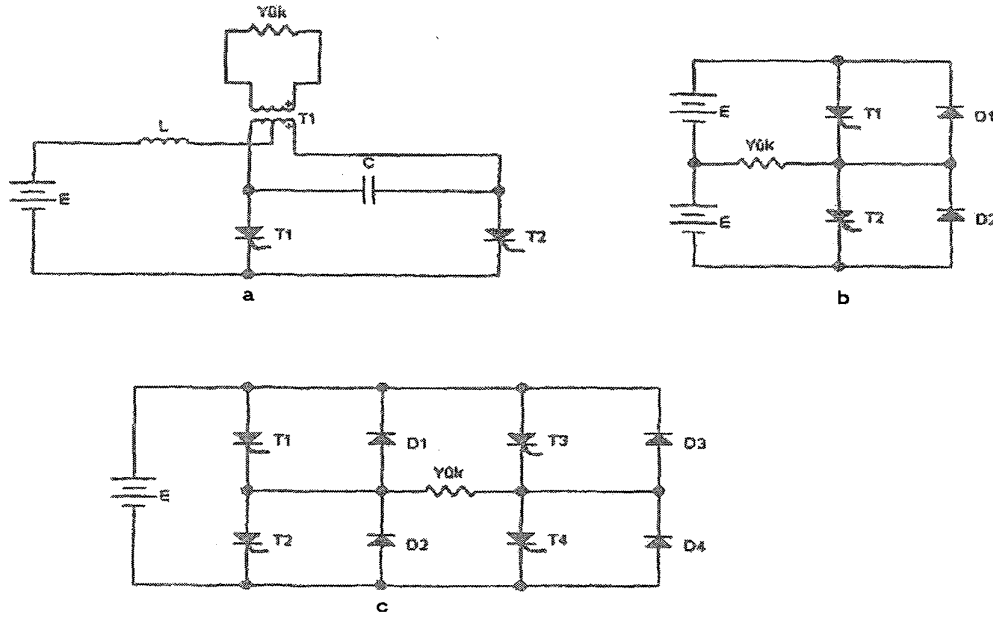
Şekil 3.11. Senkron generatör

Asenkron generatörler şebekeye direk bağlanabilirler. Frekans olarak şebekeden biraz daha fazla frekansta çalışırlar. Stator kısmında demir çekirdeğe sarılmış 3-faz sargılar vardır. Bunlar sabit bir hızda dönerek manyetik alan oluştururlar. Ancak rotor kısımları diğer generatörlerinkinden farklıdır. Sonları kısa devre edilmiş sincap kafes çubuklara sahiptirler. Rotor üzerinde hiç bir elektriksel bağlantı yoktur. Rotor akımı, stator tarafından oluşturulan, dönen manyetik alana karşı rotorun hareketi sonucu oluşturulmaktadır. Eğer rotor hızı stator tarafından oluşturulan manyetik alanın hızı ile aynı olursa rotorda akım oluşmayacaktır. Bu yüzden bu generatörler, statorun oluşturduğu alandan daima % 1 kadar daha hızlı dönerler. Böylece senkron makinelerin rotorlarında oluşan dönme momenti kaymaları bu makinelerde önlenmiş olur.

Bunun yanında bu makinelerin olumsuz yanları da vardır. Bu generatörlerde, senkron generatörlerde olduğu gibi herhangi bir güç faktöründe çalışma söz konusu değildir. Bu yüzden şebekeden reaktif güç çekerler ve istenmeyen güç kayıplarına neden olurlar. Bu yüzden kuleye bir kapasitörlü güç faktörü düzenleyici konur. Diğer istenmeyen durum ise şebeke bağlantısı yapıldığında çekirdeğin manyetize olması yüzünden yüksek, akımın şebekeye doğru akması söz konusudur.

### 3.2.6.2. İnverterler

Doğru akım enerjisini istenilen çıkış gerilimi ve frekansında alternatif akım enerjisine çeviren güç elektroniği devrelerine inverter denir. Harici ve senkronize olmak üzere ikiye ayrılırlar. Harici inverter 12 V veya 24 V'luk bir akü setinden gerekli olan doğru akımı, evlerde kullandığımız 220 V alternatif akıma çevirerek cihazın sorunsuz çalışmasını sağlar. Senkronize olanlar ise güneş paneli veya rüzgar türbinlerinin çıkışma bağlanarak şebekeye geri besleme yapma özelliğine sahiptirler. İnverterler çıkış gücüne ve çıkış dalga özelliklerine göre de gruplara ayrılmaktadır. Çıkış dalga özellikleri de kare, düzenlenmiş sinüs ve tam sinüs dalga olmak üzere üçe ayrılırlar. Şekil 3.12'de çeşitli inverter tipleri gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Çeşitli inverter tipleri a)Çıkış transformatörü ortadan ayrılmış b)Yarım köprü c)Tek fazlı

### 3.3. Kontrol ve Güvenlik Sistemleri

Rüzgar türbinleri, fırtınalı hava şartları da dâhil olmak üzere 120.000 çalıştırma saatinden daha fazla dayanma gücüne sahiptirler. Rüzgar türbinlerinin bu kadar uzun süre dayanabilmeleri ve güvenli çalışmayı sağlayabilmeleri için kontrol ve güvenlik sistemlerine ihtiyaç duyulur. Rüzgar türbinlerinde kontrol ve güvenlik sistemleri, Rüzgar türbinini tehlikeli durumlardan koruyan birçok farklı bileşenden oluşmaktadır. Bu sistem, karmaşık bir yapı içerisinde en az hata ile yapılan ölçümlerden gelen sonuçları değerlendiren kontrolör ve kontrolörün karar mekanizmasıyla devreye giren fren veya yavaşlatma sistemleri olarak özetlenebilir.

Bir rüzgar türbininde olabilecek en tehlikeli durum, yüksek rüzgar periyottan esnasında rüzgar türbininin kendiliğinden nominal hızının çok üstüne çıkmasıyla başlar. Planlı bir kontrol mekanizması olmadığı sürece türbini durdurabilecek seviyeye getirmek imkânsızlaşabilir. Bu esnada türbinin ürettiği güç çok yüksektir ve kontrol edilemediği ya da türbin pervanesinin dayanamadığı durumda hayati tehlike arz etmektedir. Bu gibi tehlikeli durumlardan korunmak için güvenlik sistemi kontrolsüz aşırı hızlanma durumlarına çok hızlı ters tepki verebilecek etkiye veya

sisteme sahip olmalıdır. Kontrolsüz aşırı hızlanma koşullarından kurtulmanın iki temel yolu vardır. Birincisi, rotasyonel pervane hızının nominal hızın üstüne çıkarak ivmelendiği ve güç üretiminin de arttığı durumlara karşı dayanabilecek pervane dizayn edilmesi, ikincisi ise bu şartlarda, yani devir hızının tehlikeli durumlara geldiği durumlarda, pervane devir hızının kontrol altına alınabilmesidir. Rüzgar türbinlerinin normal çalışmasının gözetim altına alındığı ve bunun için bazı istatistiklerin elde edilip ölçüm sonuçlarının değerlendirildiği birim kontrolördür. Kontrolör mikrobilgisayarla kullanımına dayandırılır. Bazı kontrol sistemlerinde mikrobilgisayarlar endüstriyel kullanımlar için özel olarak dizayn edildiğinden normal PC'lerden daha yüksek işlemci kapasitesine sahip olabilmektedirler. Güvenlik sistemleri, iç donanım hatalarından dolayı oluşabilecek arızalara karşın güvenlik önlemi için mümkün olduğunca az bileşenli olmalıdır ve kontrol sisteminde kullanılacak algılayıcılar optimum gereklilikler sağlanarak seçilmelidir.

Güvenlik sisteminde frenleme işlemini başlatan ve çalıştıran mekanizma hidrolik sistemdir. Hidrolik sistem, frenleme sistemlerini çalıştırırken, kontrolör de güvenlik sisteminde hangi işlemin uygulanacağına karar verir. Fren sistemleri genellikle Mekanik ve Pervane Uç Freni olarak iki mekanizmadan oluşmaktadır. Uç freni, pervane uçlarında belli bir mesafeden başlayarak, bir mekanizmanın pervane kanat ucunu hava akış yönüne göre pervaneyi frenleyecek şekilde döndürülmesini sağlamasıyla oluşur. Mekanik fren ise; pervane milinin dişlisine yerleştirilen ve fren diski adı verilen diskin fren bloğu ile sürtünmesi ile gerçekleşen bir frenleme ve yavaşlatma sistemidir.

Rüzgar türbininin dizaynı esnasında güç kontrolü için önlem alınması gereklidir. Bu aşamada rüzgar türbininin mekanik ve elektriksel aşırı yüklenmelere karşı sistemi koruyabilecek şekilde tasarlanması gerekir. Rüzgardaki gücün artışı çok hızlı olduğundan, bütün Rüzgar türbinleri yüksek hızlardaki güç toplamalarını önleyecek düzenlemeler ile donatılırlar. Yüksek hız koşullarında güç kontrolü için belli başlı üç yöntem vardır:

#### 1. Aerodinamik verimin değiştirilmesi

- a) Kanat açısını değiştirme veya kanatları döndürme

- b) Sabit devirde çalıştırma
- c) Kaldırma etkilerini azaltıp sürüklenme etkilerini çoğaltma

## 2.Kanatların Rüzgar ile etkileşim içinde olduğu alanı küçültme

- a) Rotoru hâkim rüzgar yönünden çevirme
- b) Rotor geometrisini değiştirme

## 3- Frenleme

- a) Mekanik, hidrolik
- b) Hava freni
- c) Elektrik (direnç, manyetik)

Bu yöntemler tek tek ya da yüksek hız kontrolü ve yük denetim kaybı durumlarında kombine olarak bir arada kullanılabilirler.

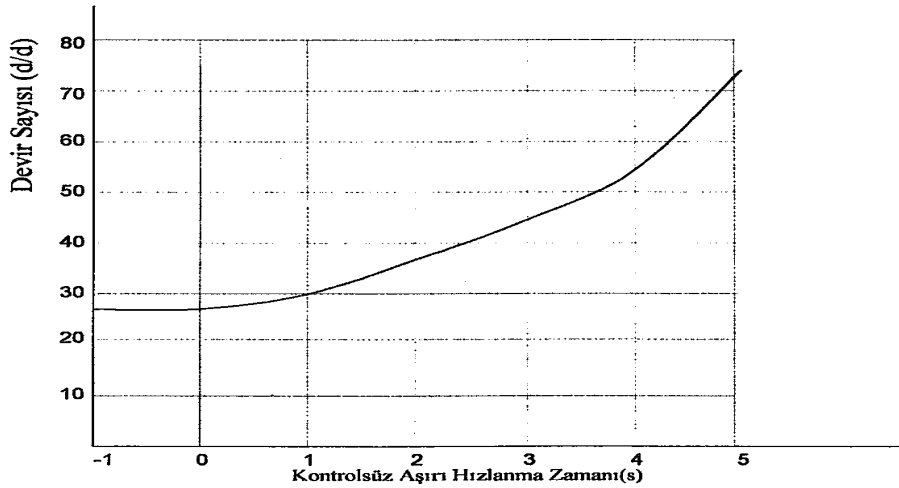
Kontrol ve güvenlik sistemleri değişik tipteki rüzgar türbinlerine göre farklılıklar göstermektedir. Burada, kontrol ve güvenlik sistemlerini oluşturan bileşenleri tanıyıp, bu kontrol sisteminin kurulduğu 600 kW'lık bir rüzgar türbininin güç ve ivmelenme eğrileri incelenecektir.

Rüzgar türbinlerinde kontrol ve güvenlik sistemlerinin kurulabilmesi için öncelikle çözülmesi istenen problemlerin belirlenmesi gerekir. Genel olarak iki tane önemli problem vardır. İlk problem tüm kontrol ve güvenlik sistemleri için geçerlidir. rüzgar türbinlerinin devamlı olarak kendi kendini kontrol edebilecek mekanizması yoktur. Kontrol sistemi Rüzgar türbininin çalışma şartlarında olup olmamasına göre iki fonksiyonlu olarak kurulmalıdır. Endüstrinin birçok alanında iç kontrol sistemlerine rastlamak mümkündür. Örneğin; güç istasyonlarında sistem devamlı olarak merkez kontrol odasından kontrol edilir. Beklenmedik bir durum meydana geldiğinde hızlı ara kontrol sistemi hemen etkisini göstermektedir. Rüzgar türbinlerinin kendi kendini kontrol edebilecek mekanizmaya sahip olmasının yanında, hatalar kayıt edebilme ve kayıtlı bilgileri tekrar ele alarak, olabilecek sorunlara mümkün olduğunca tam bir şekilde cevap verebilme yeteneğine sahip olması gerekir. Güvenilirlik konusunda



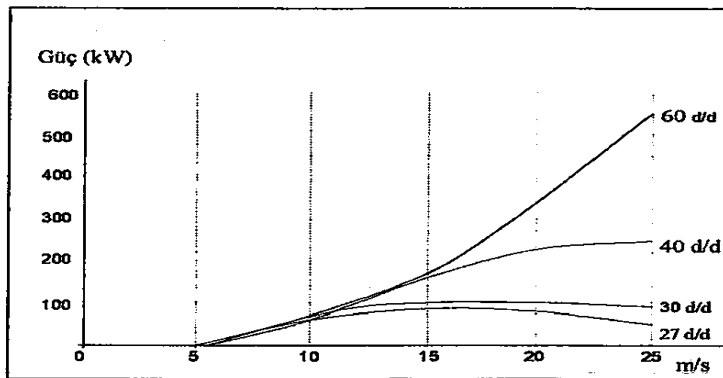
genel istek en az donanım ve devre ile koruma düzenlerinin oluşturulmasıdır. Algılayıcı ve diğer aktif bileşenlerin sayısı mümkün olduğunca sınırlı tutulmalı ve gerekli bileşenler mümkün olan en yüksek kalitede olmalıdır. Diğer problem ise güvenlik sistemleri ile ilgilidir. Rüzgar türbini eğer kontrol edilmezse yüksek rüzgar periyotları esnasında kendiliğinden aşırı hızlanacaktır veya normal hızının çok üstüne çıkacaktır. Planlı bir kontrol sistemi olmadığı sürece durdurulabilmesi imkânsız hale gelebilir. Rüzgar türbininin aşırı hızlandığı durumlarda ürettiği güç, üretmesini istediğimiz nominal gücünden çok daha fazla olabilir. Rüzgar türbininin rotor devir hızı bu yüzden sınırlandırılır ve rüzgar türbini şebeke bağlantılı generatör tarafından nominal gücünde işletilir. Rüzgar türbini normal çalışma şartlarındayken, eğer şebeke bağlantısı herhangi bir arızayla kesilirse rüzgar türbini ani bir şekilde ivmelenmeye başlayacaktır. Bu anda rüzgar türbini kontrolsüz aşırı hızlanma şartlarındadır.

Şekil 3.13'de kontrolsüz aşırı hızlanma durumundaki rüzgar türbininin, rotasyonel kanat hızının hızlı bir şekilde ivmelendiğini göstermektedir. 1. saniyede rotor hızı 30 d/d' ya ivmelenir ve 2,5 saniyeden sonra kanatlar 40 d/d' ya ulaşır. Bu durumdaki çıkış gücü 2000 kW'tır. Gücü bu seviyede tutan bir frenleme sistemi mümkün değildir. Bu yüzden güvenlik sisteminin kontrolsüz aşırı hızlanma durumlarına çok hızlı cevap verebilmesi çok önemlidir. Kontrolsüz aşırı hızlanma durumlarına kesin çözüm iki şekilde olabilir. Birincisi, rotasyonel kanat hızının ivmelenerek güç üretiminde aşırı bir artmanın sağlandığı rüzgar şartlarına kanatların dayanabilecek mukavemette ve dinamiklikte yapılabilmesi, ikincisi ise tehlikeli seviyelere yükselen devir hızının korunabilmesidir.



Şekil 3.13. Farklı hızlardaki güç eğrileri

Şekil 3.14'de rüzgar türbininin kontrolsüz aşırı hızlanma durumları gösterilmektedir. İlk grafik 600 kW'lık bir rüzgar türbini için rotasyonel kanat hızının bir fonksiyonu olarak güç eğrisini göstermektedir. Alttaki eğri, generatör tarafından denetlenen 27 dev/dak'lık rotasyon kanat hızındaki güç eğrisini göstermektedir. Diğer üç eğri de 30, 40 ve 60 dev/dak'daki güç üretim eğrilerini göstermektedir. Bu rüzgar türbini 20 m/s'lik rüzgar hızında, 600 kW'ın çok az altında normal bir üretim yapacaktır. Eğer sadece %10'luk bir ivmelenmeye izin verilirse bu durumda güç üretimi, 30 d/d rüzgar hızında yaklaşık 1000 kW'a ulaşabilecektir. 40 d/d rotasyonel kanat hızında güç 2000 kW'a ve 60 d/d hızında da 3300 kW'a ulaşır. 25 m/s rüzgar hızında, kanatlar 60 d/d da dönmeye dayanırsa, güç üretimi 5400 kW gibi yüksek bir değere ulaşmış olur [11].



Şekil 3.14. Kontrolsüz aşırı hızlanma sırasında ivmelenme

### 3.3.1. Kontrolör

Rüzgar türbini kontrolörü, rüzgar türbininin çalışma şartlarını devamlı olarak denetleyen, istatistikleri toplayan belirli sayıda bilgisayardan oluşmaktadır. Ayrıca kontrolör, rüzgar türbininin içerdiği butonları, hidrolik pompaları, valfleri ve motorları da denetler. rüzgar türbininin boyutlan büyüdükçe kontrolörün önemi de aynı ölçüde artmaktadır. Kontrolör sistemi, telefon hattı üzerinden veya diğer haberleşme sistemleri aracılığıyla rüzgar türbini operatörü ile iletişime geçebilir. Herhangi bir yerden rüzgar türbinini telefonla veya başka bir aracı sistemle arayarak istatistikleri alıp o andaki durum ile kıyaslama yapmak mümkündür. Birden fazla türbinden oluşan bir santrali kontrol etmek için rüzgar santrallerindeki türbinlerden birini, verileri toplamak için veya denetlemek için bilgisayarlar ile donatmak yeterlidir. Genellikle rüzgar türbini kulesinin tabanında ve üstünde bir kontrolör ünitesi bulunur. Son yıllardaki rüzgar türbini modellerinde, kontrolörler arasındaki iletişim fiber optik sistemlerle yapılmaktadır.

Bilgisayar birçok elektronik cihaz, kontaktörler, anahtarlar, sigortalar vb. ile beraber kontrol kabinine yerleştirilir. Kontrolörden beklentiler çok sayıda farklı bileşenden oluşan karmaşık bir yapı içinde sonuçlandırılır. Dolayısıyla denetim ne kadar karmaşık bir yapı içerisinde gerçekleşirse hata olasılığı da o kadar fazla olur. Kontrolörün de kendi kendisini kontrol etmesini sağlayan iç kontrol sistemi geliştirmek de mümkündür.

Arıza güvenlik sistemlerinde algılayıcıların gerekli olduğu kadarıyla sınırlandırılması şarttır. Modern rüzgar türbinlerinde 100 ile 500 arasındaki parametre değerlerini herhangi bir yerden monitörle takip etmek mümkündür. Kontrolör aşağıdaki parametreleri analog olarak ölçer:

- Üç faz gerilimi
- Üç faz akımı
- Bir faz frekansı
- Göbek içi sıcaklığı
- Generatör sıcaklığı
- Dişli kutusunun yağ sıcaklığı

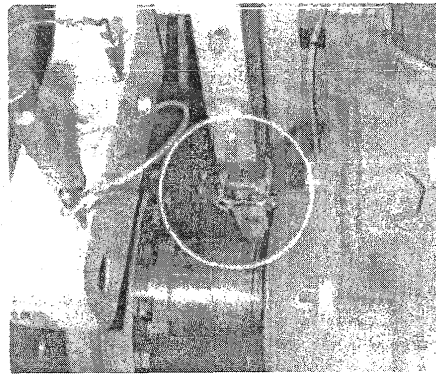
- Dişli yatağı sıcaklığı
- Rüzgar hızı
- Yalpalama açısı
- Düşük hızda rotasyonel mil hızı
- Yüksek hızda rotasyonel mil hız

Kontrolör ayrıca aşağıdaki parametreleri de dijital olarak ölçer:

- Rüzgar yönü
- Generatör sargılarındaki sıcaklık
- Valf fonksiyonu
- Titreşim seviyesi
- Güç kablosu burkulması
- Acil fren devresi
- Hidrolik pompaların ve diğer sistemlerin esnemedi dolayısı ısınmaması
- Fren ayarı
- Merkezkaç ayırma işlemi

Kontrolör, rüzgar hızını güce bağlı olarak denetler. Eğer bir periyotluk düşük rüzgar esnasındaki üretilen güç çok fazla ise veya yüksek rüzgar esnasındaki üretilen güç çok az ise kontrolör rüzgar türbinini durduracak ve rüzgar ölçüm hatasını gösterecektir. Rüzgar ölçüm hatası genellikle ya elektriksel bağlantıda ya da anemometre yatağında oluşabilecek arızalardan meydana gelmektedir. Rüzgar türbininin rüzgar ölçüm hatası ile işlemeye devam etmesi imkânsızdır. Çünkü rüzgar hızı ile güç üretimi arasında fonksiyonel bir bağıntı vardır. Rüzgar türbininin rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretmeye başladığı rüzgar hızına nominal rüzgar türbininin rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretmeye başladığı rüzgar hızına nominal rüzgar hızı, rüzgar türbinlerinin modellerine göre devreye girebileceği en düşük hıza devreye giriş hızı, belli bir rüzgar hızından sonra ise güvenlik nedeni ile devreden çıktıkları hıza da devreden çıkış hızı denmektedir. Nominal rüzgar hızından daha yüksek veya daha düşük rüzgarlarda anemometreler vasıtasıyla kontrol ünitesi devreye girmektedir. Kontrolör için başka bir güvenlik sistemi, tekrarlı sistemlerdir.

Mekanik merkezkaç birimleri buna iyi bir örnektir. Bu birimler kontrolörün hız ölçüm sisteminde hata olsa bile, rotasyonel kanat hızını ve aktif frenleme sistemlerini kontrol ederler. rüzgar türbinlerinde genellikle iki adet merkezkaç anahtarlama birimi kullanılır. Bunlardan birisi rüzgar türbininin göbeğinde yer alan hidroliktir ve CU (Centrifugal Release Unit-Merkezkaç Bırakma Ünitesi) şeklinde adlandırılır [12]. Rüzgar türbini çok yüksek rotasyonel hıza ulaştığında hidrolik valf açılır. Sonra hidrolik yağının kanat uçlarını yerinde tutan hidrolik silindirlere doğru akmasıyla kanat ucu hava frenleri aktif duruma geçer.



Şekil 3.16. Dişli kutusunun yüksek hız miline yerleştirilen CU

Bundan sonra kontrolör veya hidrolik sistemin hangi konumda olacağı önemli değildir. Basınç silindirlere devam etmeyecektir ve servis elemanı merkezkaç anahtarlama elemanını manuel olarak resetleyinceye kadar hava frenleri aktif halde kalmaya devam edecektir. Hidrolik merkezkaç anahtarlama (CU) biriminin avantajı, kontrolör ve hidrolik sistemden tamamen bağımsız olmasıdır. Ayrıca hayati önem taşıyan dizayn hatasının neden olduğu kontrolsüz aşırı hızlanma ile sonuçlanan durumlara da engel olur.

İkinci mekanik merkezkaç birim ise aşırı hızlanma durumlarına karşı dişli kutusu miline sabitlenen elektromekanik birimdir (HCU). Rüzgar türbini aşırı hızlandığında mekanik frenleme sistemi ve hava frenlerinin manyetik valfine elektrik akımının geçişini sağlayan iki küçük kol dışarıya doğru fırlayarak frenleme sistemlerini harekete geçirecektir. Hava freni ve mekanik fren valilerinin kapalı pozisyonda devam etmesi için elektrik devresinin kapalı devre pozisyonda olması gerekmektedir [13]. Bu sistem hata güvenlik sistemi olarak adlandırılır. Elektrik devresinin şebeke

ile bağlantısı kesilmesi ya da kontrolör tarafından olabilecek bir elektrik kesintisi sebebiyle valfler açılacak ve frenleri aktif hale geçirerek rüzgar türbininin yavaşlamasını ve durmasını sağlayacaktır. HCU devre kesimini mekanik olarak yapabilir ve bu suretle her iki frenleme sistemini de harekete geçirmiş olur. Rüzgar türbininin göbeğine monte edilen CU ise yalnızca kanattaki hidrolik sistemi keser. HCU bu yüzden daha üstündür. Bunun yanı sıra CU kendi ekstra valf sistemine sahiptir. Her iki mekanik merkezkaç birimi de nominal rotasyonel kanat hızına göre ayarlanır. Diğer yandan, mekanik merkezkaç birimleri sadece bakım testi için de tasarlanabilmektedir.

### 3.3.2. Hidrolik sistem

Hidrolik sistem frenleme sistemlerini çalıştırırken, kontrolör de güvenlik sisteminde hangi işlemlerin sonuçlandırılacağına karar verir. Bir hidrolik sistemde basınç altındaki sıvı, belirli bileşenleri hareket ettirmekte kullanılır. Bu sıvıya hidrolik yağ denir. Çalıştırma basıncı yaklaşık 1 bar'dır. Hareket eden bileşenler ise hidrolik silindirlerdeki pistonlardır. 50 mm'lik hidrolik silindirde 100 bar'lık basınç altındaki bir piston 2 ton kuvvet üretir. Pervane ucu freni ve mekanik frenin her ikisindeki hidrolik sistemler aynı zamanda hata güvenlik sistemleridir. Mesela, rüzgar türbininin çalışması için hidrolik yağa ihtiyaç vardır.

Hidrolik sistem, rüzgar türbini çalışmaya başladığı andan itibaren basınç uygular, duracağı zaman ise basıncı keser. İstenen basınç seviyesi bir pompa ile elde edilene kadar basınç uygulanır ve sonra basıncın aynı seviyede kalması sağlanır. Ayrıca sistem yedek basınç tankına sahiptir. Yağ basınç altında olduğu zaman piston havayı sıkıştırarak ve dolayısıyla tüm sistem çalışmasını sürdürecektir. Mekanik frenden ve pervane uç freninden basıncın uygulanması manyetik valfler ile gerçekleştirilir. Manyetik valfler elektromıknatısın kullanımıyla kapalı pozisyonda tutulur ve elektrik akımı olmaksızın otomatik olarak açılarak devre açma işlemini yerine getirirler.

### 3.3.3. Pervane uç frenleri

Pervane uç frenleri, pervane kanadının kendi boylamsal eksenini boyunca bir karbon mil üzerinden yaklaşık 90 derece döndürülmesi ile gerçekleşmektedir. Pervane uç freninin görüntüsü Pervanenin kanat ucu, kanadın ana gövdesi içerisindeki mil yatağına bağlanan bir karbon fiber miline sabitlenir. Kanat içerisindeki milin son kısmındaki mekanizma, kanat ucunun herhangi bir dış harekete maruz kaldığında dönmesini sağlar. Ayrıca milin içerisinde çelik bir tel vardır. Bu çelik tel kanat ucundan göbeğe kadar uzunlukta olan bir tüp içerisinden geçirilerek göbeğe bağlanır. Çalışma esnasında pervane kanadının ucu, göbek içerisindeki hidrolik silindir tarafından ana kanadın hızında döner. Pervanenin kanat ucunun ana kanat gövdesi ile aynı hızda dönmesi, çelik telin yaklaşık 1 tonluk kuvvet ile çekilmesi ile gerçekleşir. Herhangi bir nedenle türbini durdurmak gerekirse, silindirdeki yağ boşaltılarak harcanan güç kesilir. Bu suretle merkezkaç kuvveti ile kanat ucu dışarıya doğru itilir ve uç muindeki mekanizma kanat ucunu 90 derece frenleme pozisyonuna doğru döndürür. Hidrolik yağın boşalması küçük bir delik ile sağlandığı için hidrolik yağ tamamen boşalana kadar pervane yavaşça dönmeye devam eder. Böylelikle frenleme yavaş bir şekilde gerçekleştirilerek bu esnada oluşabilecek aşırı şok etkisi de önlenmiş olur. Görüldüğü gibi, türbinin çalışmaya devam edebilmesi için aktif bileşenlere (yağ basıncı) gerek vardır. Yani oluşturulan sistem hala güvenlik sistemidir içerisindeki mil yatağına bağlanan bir karbon fiber miline sabitlenir.

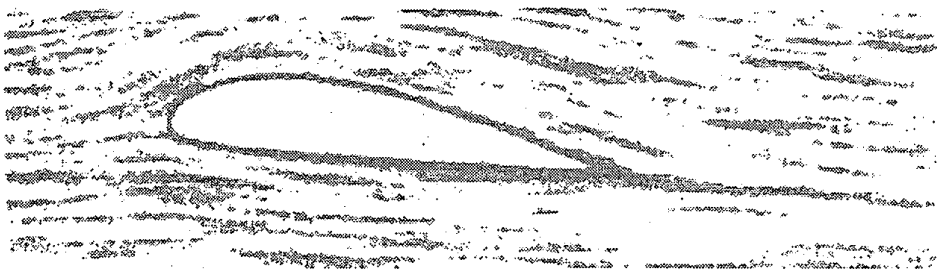
### 3.3.5. Güç kontrolü

Pervanedeki aerodinamiksel kuvvetlerden dolayı, rüzgar türbini rüzgar akışının kinetik enerjisini rotasyonel mekanik enerjiye dönüştürür. Bu aerodinamiksel kuvvetler rotor kanatları boyunca elde edilir. Hava akış hızının artışı ile beraber gücün ikinci kuvveti ve rüzgar hızı gücünün üçüncü kuvvetinden elde edilmiş enerjisi ile aerodinamik kaldırma kuvvetleri büyür. Rüzgar türbininin enerji iletim sistemlerinde çok etkili rotor güç kontrolü, mekanik ve elektriksel aşırı yüklemelere karşı sistemi korur.

Modern rüzgar türbinlerinde güç üretimini generatörün nominal gücünde sınırlandırmak için iki farklı aerodinamik kontrol prensibi kullanılır. Bunlardan pasif olanına "Stall kontrol", aktif olanına da "Pitch kontrol" adı verilir. Geçmişte çoğu büyük ve orta büyüklükteki rüzgar türbini generatör sistemleri daha basit olan Stall kontrol sistemini kullanmaktaydı. Fakat günümüzde rüzgar türbini boyutlarının büyümesiyle üreticiler rüzgar türbininin çalışmasına etki edebilecek daha çok olanaklar sunan Pitch kontrol sistemini daha fazla tercih etmektedirler.

### 3.3.5.1. Adım kontrolü

Pitch kontrol, generatör gücünden alınan giriş sinyaline duyarlı, aktif bir kontrol sistemidir. Generatör gücü nominal gücün üstüne çıkarsa, rotor kanatları daima uzunlamasına eksenine boyunca döndürülür. Başka bir deyişle, giren hava akışının açısını azaltmak için pitch açısını değiştirir. Rüzgarın geliş açısının azaltılması, rotor kanatlarını döndüren aerodinamik kuvvetleri azaltır ve böylece rüzgardan dolayı türbinin güç eldesi azaltılmış olur. Nominal rüzgar hızından daha yüksek olan tüm rüzgar hızları için, minimum olanı güç üretimine ihtiyaç duyar. Türbinin yalnızca nominal güç üretmesi için pitch açısı bu seçilir. Tüm rüzgar şartlarında, pervane profili etrafında akış, yüzeye bağlı durumdadır. Böylece çok küçük çekme kuvvetleri altında aerodinamik kaldırma üretilir. Şekil 3.16 'da profil etrafındaki bağımlı hava akışı gösterilmektedir.

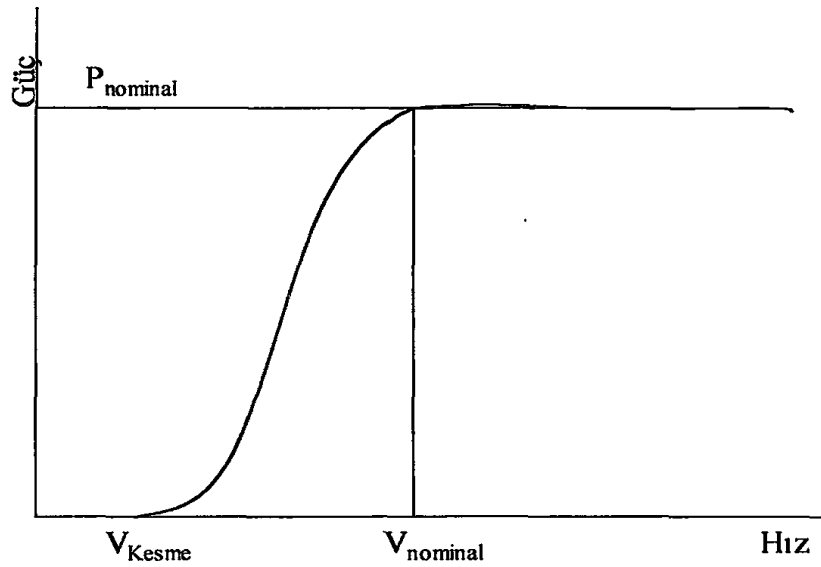


Şekil 3.16. Profil etrafındaki bağımlı hava akışı

Pitch kontrollü türbinler stall kontrollü türbinlerden daha gelişmiştir. Çünkü pitch açısı değiştirme sistemine ihtiyaç duyarlar. Pitch kontrolün avantajları şöyle sıralanabilir:



- Tüm rüzgar şartlarında aktif ve düşük kontrolüne olanak tanır.
- Hafif hava yoğunluğu şartlarında bile nominal güce ulaşırlar.
- Aynı şartlar altında daha yüksek enerji üretimi.
- Pitch açısı değiştirme sistemi ile daha çalıştırma.
- Acil durumlar için güçlü fren sistemine ihtiyacın olmaması.
- Nominal yükün üzerinde artan rüzgarlarla hafifleyen pervane yükü.
- Aşırı rüzgarlarda düşük yük olması için rotor kanatlarının kılıçlama pozisyonunda olması.
- Hafif pervane kütlesi ile daha hafif rüzgar türbini.



Şekil 3.17. Pitch kontrollü bir rüzgar türbininin güç eğrisi

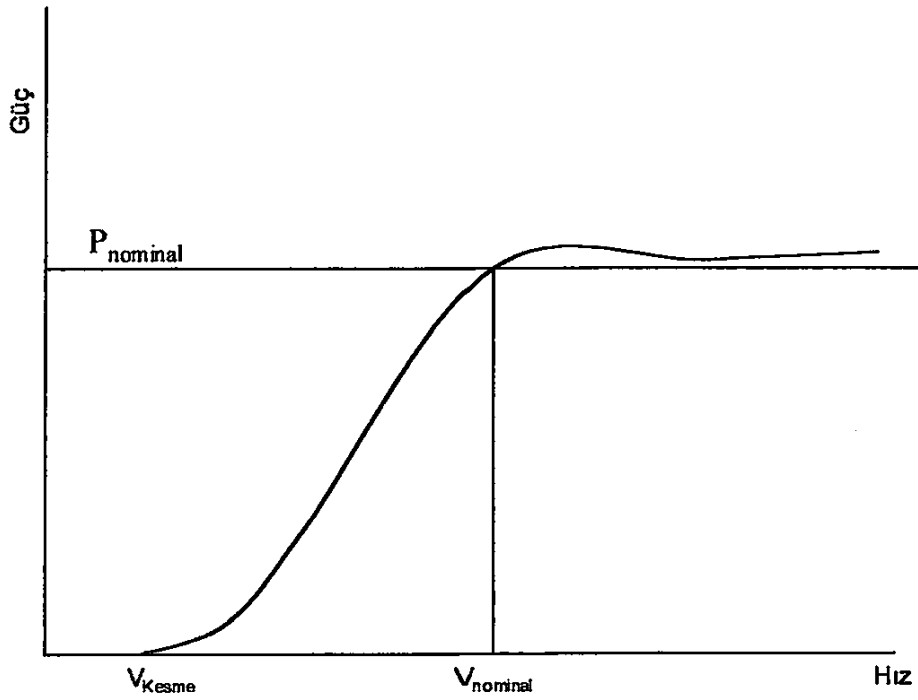
### 3.3.5.2. Stall kontrol

Hava akımının az veya rüzgar açısının fazla olması dolayısıyla pervane kanadının kaldırma kuvvetinin azalıp havada asılı kalmayacak hale gelmesi olayına stall veya perdovites adı verilmektedir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Profil etrafındaki ayırık hava akışı.

Stall kontrol, rüzgar hızına tepki veren pasif kontrol sistemidir. Pervane kendi pitch açısına sabitlenir ve kendi uzunlamasına eksenini boyunca dönmesi engellenir. Pitch açısı ise, nominal rüzgar hızından daha yüksek rüzgarlarda pervane profili etrafındaki akışın pervane yüzeyinden ayrılması yolu ile seçilir. Böylelikle aktif kaldırma kuvvetleri azaltılırken çekme kuvvetleri de artırılmış olur. Daha düşük kaldırma ve daha yüksek rotasyonel çekme, rotor gücünün daha çok artması yönünde hareket eder (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Stall kontrollü bir rüzgar türbininin güç eğrisi

Nominal rüzgar hızından daha yüksek rüzgar şartlarında pervane profili etrafındaki hava akışı pervane yüzeyinden kısmen de olsa ayrılır. Böylece daha az kaldırma ve daha çok çekme kuvvetleri üretilir. Stall kontrol Pitch kontrolden daha basittir. Kıyaslama yapılacak olursa;

- Pitch açısı değiştirme sistemine ihtiyaç duyulmaz
- Daha basit rotor göbek yapısı vardır.
- Hareketli parçanın daha az oluşundan dolayı daha az bakım gerekir.
- Güç kontrolünde yüksek güvenilirliğe sahiptir.

Dünyada stall kontrol hala geçerliliğini sürdürmektedir. Çoğu üreticiler genellikle şebekeye direkt bağlı olan ve sabit rotor hızına ihtiyaç duyan asenkron generatörün kullanıldığı basit güç kontrolünü kullanırlar. Son yıllarda stall ve pitch kontrolün bir kaşımı olan Aktif Stall Kontrol adı verilen kontrol sistemi kullanılmaktadır. Aktif stall kontrol sisteminde ise pervane pitch açısı stall yönüne doğru döndürülür. Bu sistemin avantajları ise:

- a. Çok küçük pitch açısı değiştirilmesine ihtiyaç duyulur.
- b. Olası düşük güç şartları altında güç kontrolü kolay sağlanır.
- c. Büyük rüzgarlarda küçük yük sağlamak için pervane kılıçlama durumu pozisyonunda olur.

### 3.4. Rüzgar Enerjisi ve Rüzgar Türbinleri İle İlgili Özel Konular

a)Kaplanan Alan; rüzgar santrali tesisleri, diğer enerji üretim tesisleriyle karşılaştırıldığında; çok küçük alan kaplamaktadırlar. 20 türbinden oluşan bir rüzgar çiftliğinin kapladığı alan yaklaşık 1 km<sup>2</sup> dir. Bu alan çiftliğin kurulu olduğu alanın %1'i dir. Bunun dışında kalan diğer alan ise tarımda kullanılabilir.

b)Pervane Kanadının Kopması: Pervane kanatları; türbin yükünün, şebeke bağlantısının aniden kesilmesi gibi durumlarda aniden ortadan kalkması ve frenleme sisteminin görevini yapmaması sonucu, pervane mili devir sayısının izin verilen değeri aşması sonucunda kopabilmektedirler. Pervane kanadının dönmesi sonucu oluşan merkezkaç kuvveti, devir sayısının karesi ile orantılıdır. Tehlikeli merkezkaç kuvvetlerini oluşturan devir sayısı, nominal devir sayısının 2-3 katıdır. Kopan pervane kanadı, kopma anında yatay ile 45° açı yapıyorsa, en uzağa uçmaktadır. Pervane kanatlarının kopma nedenlerinden bir diğeri de, malzeme yorulmasıdır. Bu güne kadar, büyük güçlü rüzgar türbinlerinde kanat kopma olayı sadece Smith-Putnam rüzgar türbininde 1941 yılında olmuştur. Malzeme yorulmasına dayanan bu kopmada, 8000 kg kütleli kanat 230 m uzağa uçmuştur. Kanat kopmasının çok nadir olan bir olay olduğu, teknik bir arıza sonucu oluşan uçak veya otomobil kazalarına nazaran daha az kişiyi hedefleyeceği ve dizayn ve konstrüksiyon aşamasında hata yapılmadığında meydana gelmeyeceği dikkate alındığında, kanat kopmasının çok büyük bir tehlike olmadığı anlaşılmaktadır.

c) Gürültü; Ses, titreşim yapan bir kaynağın, hava basıncında yaptığı dalgalanmalar ile oluşan ve insanda işitme duygusunu uyaran fiziksel bir olaydır. Gürültü ise, gelişigüzel bir yapısı olan ve istenmeyen ses olarak tanımlanan ses spektrumudur.

Gürültü Kontrol Yönetmeliği'ne göre, gürültü kaynağı olarak belirlenen makine, araç, gereç ve ulaşım araçlarını ve benzerlerini imal edenler, satanlar, kullananlar ve işletenler, yönetmelikte belirlenen en yüksek ses düzeylerini aşıp aşmadıklarının denetlenebilmesi amacı ile düzenli gürültü ölçmelerini yaptırarak belgelendirmek zorundadırlar. Bir makine olan rüzgar türbinleri de bu yönetmeliğe tabidirler.

Ses basıncı düzeyi, desibel (dB) ile ölçülür. Verilmiş bir ses şiddetinin kendisinden 10 kat az diğer bir ses şiddetine oranının 10 tabanına göre logaritmasına eşit ses şiddetine Bel, bunun 1/10'una ise desibel (dB) denilmektedir. Ses basıncı düzeyi,

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad (3.1)$$

bağıntısı ile verilir. Burada  $L_p$  ses basıncı düzeyini dB olarak,  $P$  ses basıncını N/m olarak ve  $P_0$  TS 187'e göre  $2 \cdot 10^{-4}$  N/m<sup>2</sup> olan referans ses basıncını simgeler. Birçok değişik frekanstan oluşan seslerin şiddetlerini kıyaslayabilmek için, sesin frekans bantlarındaki bileşenlerinin bulunması, her frekans bandındaki bileşenin kulağın o frekans aralığındaki duyarlılığı dikkate alınarak düzeltilmesi ve daha sonra da bu bileşenlerin tekrar toplanması gerekir. Bu işlemlerin yapılması sonucu bulunan değere, gürültü düzeyi (ses düzeyi) denilir ve bu değer dBA biriminde ifade edilir.

rüzgar türbinlerinin Gürültü Kontrol Yönetmeliği'ne uygunluğu belirlenirken, rüzgar kaynaklı arka plan gürültüsü, ölçülen gürültü düzeyinden çıkarılır. Eğer bu konuda ölçümler yoksa arka plan gürültüsü,

$$L_{AP} = 27,7 + 2,5 V_r \text{ dBA} \quad (3.2)$$

bağıntısından hesaplanır.

Rüzgar türbinleri; aerodinamik ve mekanik olmak üzere iki tür gürültü oluştururlar. Bu gürültü türlerinden en önemlisi; pervane kanatları arasından akan havadan kaynaklanan ve alınan önlemlerle ancak belli bir oranda azaltılabilen aerodinamik gürültüdür. Aerodinamik gürültünün ana nedeni, pervane kanat profillerinin sınır tabakasındaki türbülanslı hava ve kanat profillerinin çıkış uçlarında oluşan

girdaplardır. Kanat ucunda oluşan girdaplar, gürültüde ana rolü oynarlar. Bu nedenle, pervane kanatlarının uç kısımlarındaki profiller, girdap oluşturmayacak şekilde seçilmelidir.

Mekanik gürültü; dişli kutusu, hidrolik pompalar ve generatör soğutma sistemi gibi mekanik parçalardan kaynaklanmaktadır. Genellikle aerodinamik gürültü, mekanik gürültüye baskındır. Aksi bir durum söz konusuysa, öncelikle konstrüksiyon hatasından şüphelenmelidir. Mekanik gürültünün en aza indirilebilmesi için, gürültü kaynağı olan türbin elemanlarının ses izolasyonu dikkatle yapılmalıdır.

d) Süreksizlik: Yeryüzünde bir noktadaki rüzgar hızı, her an değişebildiği gibi önceden tam olarak bilinmesi de mümkün değildir. Bu da, rüzgardan elektrik üreten bir rüzgar türbininden elde edilen elektrik enerjisi miktarının devamlı değişmesine ve önceden bilinmemesine neden olmakta, rüzgar enerjisinin süreksizliği ve güvenilemezliği şeklinde yorumlara yol açmaktadır. Bu ifade, bir tek rüzgar türbini söz konusu olduğunda doğrudur. Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek olan alanlarında dağınık olarak kurulacak ve aynı şebekeyi besleyecek olan rüzgar türbinlerinde bu problem en aza inmektedir. Çünkü değişik yerlerdeki n adet rüzgar türbininden elde edilecek olan güçteki değişim miktarı, her bir rüzgar türbinindeki güç değişim miktarlarının toplamının  $\sqrt{n}$  ile bölümü sonucu bulunmakta ve buna da "bir bölü karekök n" yasası denilmektedir. Şebekeye bağlı olan dağınık rüzgar türbini sayısı arttıkça, toplam rüzgar elektriği gücündeki zamansal değişimler de azalmaktadır. Örneğin, değişik yerlerde faaliyet gösteren 10.000 adet rüzgar türbininden elde edilecek toplam güçteki değişim miktarı, bir rüzgar türbininin gücündeki değişimin %1'i kadar olacaktır. Buna rağmen, bugünkü şartlar altında, bir ülkenin elektrik enerjisi tüketiminin tamamen rüzgar enerjisinden karşılanabilmesi mümkün görülmemektedir.

Rüzgar enerjisinin süreksizliği problemi, en iyi şekilde rüzgar enerjisinin depolanması ile çözülebilir. Rüzgar enerjisi direkt olarak depolanmadığı için, depolanabilir başka bir enerji türüne dönüştürülmeli ve o şekilde depolanmalıdır. Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi durumunda iki ana depolama yöntemi vardır. Bunlardan birincisi; Rüzgar elektriği üretilen alan ile şehir elektrik

şebekesi bağlantısı mevcut ise, üretilen elektrik enerjisini şehir elektrik şebekesine vermek ve ihtiyaç duyulduğunda da şehir elektrik şebekesinden elektrik enerjisi almaktır. Bugün en çok kullanılan yöntem budur. Şehir elektrik şebekesinin olmadığı alanlarda ise, rüzgar elektriği, akülerde depolanmaktadır. Bunların dışında, suyun elektroliz yolu ile ayrıştırılarak hidrojen gazının depolanması, belli bir yerdeki suyun rüzgar türbinleri yardımıyla yüksek bir yere iletilerek depolanması ve daha sonra da yüksekteki suyun potansiyel enerjisinin kullanılması gibi yöntemler de rüzgar enerjisinin dolaylı olarak depolanmasında kullanılmaktadır.

Denizüstü rüzgar Türbinleri; 1 MW nominal güçlü deniz üstü rüzgar türbininin ilk yatırım maliyeti, kara alanlara kurulan rüzgar türbinlerinin yatırım giderlerinin yaklaşık iki katıdır. Bu maliyet farkının sebebi, deniz platformu ve üretilen enerjinin kıyıya kablolar ile taşınma giderleridir. Deniz üstü rüzgar türbinleri ömrünün 50 yıl olması durumunda, birim enerji maliyeti; iyi potansiyele sahip kara alan rüzgar türbinlerinden elde edilen enerjinin birim maliyetini yakalamaktadır.

Kuş Ölümleri; Gözlemler, rüzgar türbini çevresinde yaşayan kuşların türbinlere alıştıklarını göstermektedir. Yerli olmayan göçmen kuşlarının da en az 200 m yüksekten uçtukları düşünüldüğünde, rüzgar türbinlerinin kuşlar için çok tehlikeli olmadıkları sonucu doğmaktadır.

g) Gölge Etkisi; Tüm yüksek binalar gibi rüzgar türbinleri de, gölge etkisi göstermektedirler. Rüzgar türbinlerinden 500-1000 m uzaklıkta, bu etki yok denecek kadar azdır. Rüzgar santralleri genellikle yerleşim birimlerine kurulmadıkları için gölge etkisinin pek önemi olmamaktadır.

h) Televizyon Yayınları; Tüm büyük yapılar gibi rüzgar türbinleri de verici ile alıcı arasında bulunmaları durumunda televizyon yayınlarının izlenmesinde problem yaratmaktadırlar. Rüzgar türbinlerinin televizyon yayınlarını etkileme mesafesi; pervane yarıçapı ve televizyon sinyallerinin dalga boyu ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Rüzgar türbinleri nedeniyle oluşan televizyon yayınlarını izleyememe problemi; alıcı antenlerindeki düzenlemelerle veya bir yardımcı verici ile

çözölebilmektedir. Kablo yayınlan ve uydu vericili kanalların yayınlan ise, doğal olarak rüzgar türbinlerinden etkilenmemektedir.

i) İklima Etki; Betz'e göre, rüzgar türbinlerinden optimum enerji elde etmek için, pervane öncesi üç birimlik rüzgar hızı, pervane sonrasında bir birime iner. Bu nedenle, rüzgar türbinlerinin iklima etki yaptığı doğrudur. Fakat bu etki, ihmal edilebilecek düzeydedir, iklim açısından hava hareketlerine ihtiyaç duyulan düşük rüzgar hızlarında rüzgar türbinleri çalışmazlar. Yüksek rüzgar hızlarında ise, hareketli havanın frenlenmesi istenir. Rüzgar türbinleri de bunu yapmaktadır. Bu nedenlerle, rüzgar türbinlerinin iklima negatif etkide bulunduğu eleştirisine katılmak mümkün değildir.

i) Ekonomiklik: Rüzgar santralleri, yatırım maliyeti olarak çok pahalıdır. İşletilmeye başladığında kısa sürede yatırım maliyetini karşıladığı ve kullandığı yakıt ile kurulu tesisin işletme maliyetleri yok denecek kadar az olduğu göz önüne alındığında; cazip bir enerji üretim sistemi olduğu görülür.

## **BÖLÜM 4. RÜZGAR SANTRALLERİNDE ELEKTRİK ÜRETİMİ**

### **4.1. Dönüşüm Sistemleri ve Kontrol Teknikleri**

Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistemlerin çoğunda güç elektroniği teknikleri kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerde üretilen enerjinin istenen forma çevrilmesi ve belirlenen kontrol mantığı çerçevesinde rüzgardan optimum enerji elde edilmesi amaçlanmaktadır. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler, güç kapasitesi yüksek anahtarlama elemanları ve hızlı işlemcileri ortaya çıkarmış ve böylece rüzgar enerjisinden optimum güç elde edilmesini sağlayan sistemlerin tasarımına imkan sağlamıştır.

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri, türbin hızı ve üretilen gerilimin frekansı esas alındığında, çalışma prensiplerine göre 3 gruba ayrılabilir:

- a) Sabit hız, sabit frekans dönüşüm sistemleri
- b) Değişken hız, sabit frekans dönüşüm sistemleri
- c) Değişken hız, değişken frekans dönüşüm sistemleri

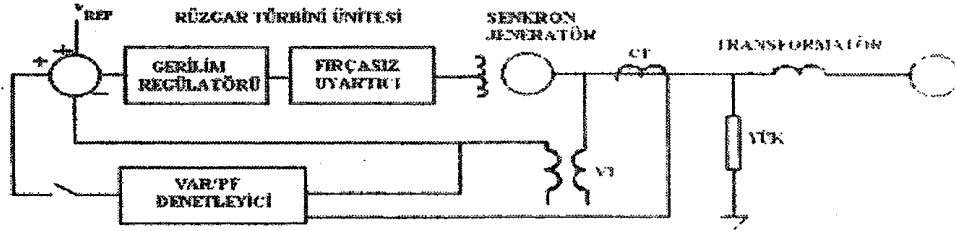
#### **4.1.1. Sabit hız sabit frekans dönüşüm sistemleri**

Bu tür sistemlerde rüzgar türbininin mili generatöre, generatör stator terminalleri ise enterkonnekte sisteme doğrudan bağlanmaktadır. Generatör olarak senkron veya asenkron generatör kullanılmaktadır. Senkron generatör kullanıldığı zaman uyarma akımı güç elektroniği devreleri ile kontrol edilerek güç faktörü ayarlanabilir. Asenkron generatör kullanılması durumunda rotor hızını senkron hızın üzerinde tutabilmek için türbin ile rotor arasında hız dönüşüm sistemi kullanılmalıdır.

Şekil 4.1'de verilen sistem şebekeden bağımsız olarak çalışan, düşük ve orta güçler için uygun bir uygulamadır. Yüksek güçteki dönüşüm sistemleri benzer şekilde



enterkonnekte şebekeye bağlanır ve generatörün gerilim seviyesi ile güç faktörü kontrolü aynı uyarım tekniğiyle gerçekleştirilir.



Şekil 4.1. Senkron generatör alan uyarımlı SHSF dönüşüm sistemi

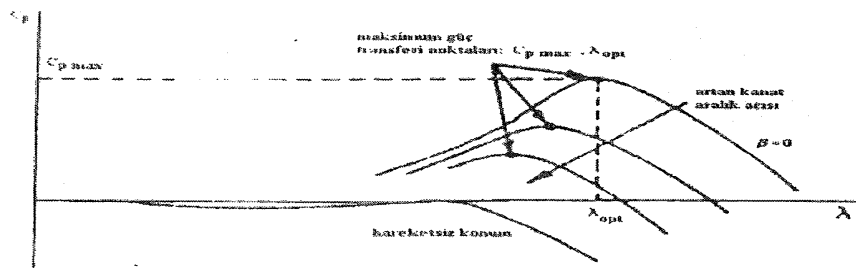
#### 4.1.2. Değişken hız sabit frekans dönüşüm sistemleri

Bir rüzgar türbininden elde edilebilecek güç denk.(2.1) ile verilmiştir. Bu eşitlik türbin güç katsayısı ( $C_p$ ) ve devirlilik oranına ( $\lambda$ ) bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$P = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho A v^3 \quad (4.1)$$

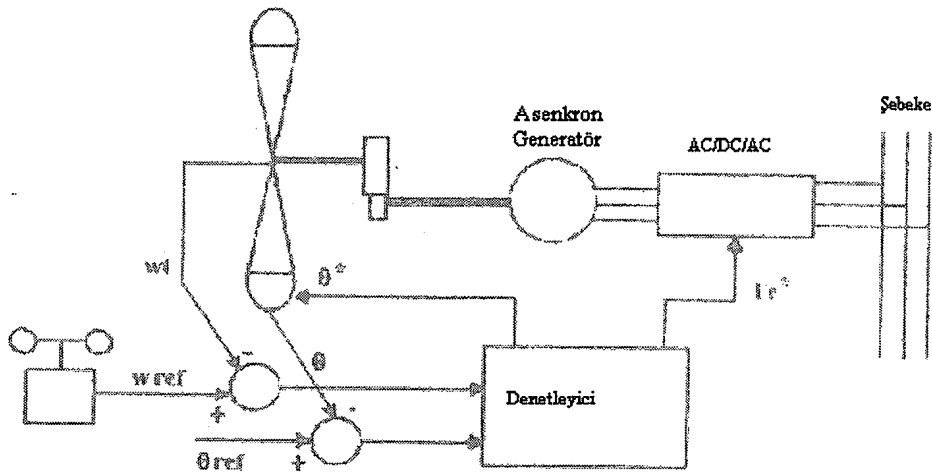
$$\lambda = \frac{\omega_1 r}{v} \theta \quad (4.2)$$

Türbin milinin açısal dönüş hızı,  $r$  türbin yarıçapı,  $\theta$  ise türbin kanat açısıdır.  $C_p$  güç katsayısının uç-hız oranına göre değişimi Şekil 4.2' de verilmektedir. Burada  $\theta$  kanat açısı kontrolüyle güç katsayısının değiştirilebileceği görülmektedir.



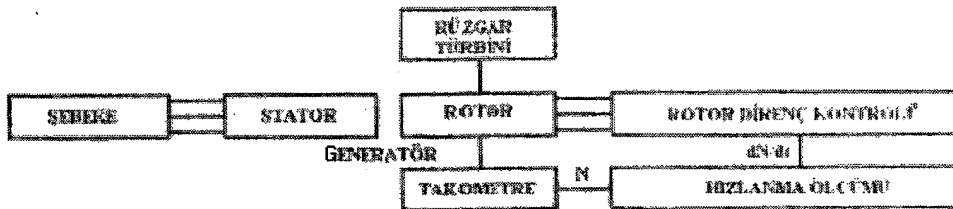
Şekil 4.2. Kanat açısı kontrolüyle güç katsayısının uç-hız oranına göre değişimi

Rüzgar hızının değiştiği durumlarda uç-hız oranı optimum bir değerde tutulmak suretiyle rüzgardan elde edilecek gücün maksimum transferi sağlanabilir. Rüzgar türbininden maksimum güç elde etmek için uç-hız oranı, kanat aralık açısı değiştirilmek suretiyle optimum değerde tutulabilir. Şekil 4.3' te gösterilen sistemde türbin kanat açısı ayarlanarak güç akışı kontrol edilmektedir. Burada generatör çıkışı değişken gerilim ve frekansta olacağından enterkonnekte şebekeye direkt bağlanamaz. Generatör çıkışlarını şebeke gerilim ve frekansı ile aynı hale getirmek için bir AC-DC-AC çevirici yardımıyla üretilen enerji önce DC, daha sonra da AC forma çevrilebilir.



Şekil 4.3. Kanat açısı ayarlı dönüşüm sistemi

Şekil 4.4' te gösterilen sistemde değişken hız uygulaması, generatör olarak kullanılan bilezikli asenkron makinenin rotor dirençleri değiştirilerek sağlanmaktadır.



Şekil 4.4. Rotor direnç kontrollü DHSF dönüşüm sistemi

Bu sistemde asenkron generatör bir çeviriciye ihtiyaç olmaksızın, doğrudan enterkonnekte şebekeye bağlanabilmektedir. Rotor dirençleri değiştirilmek suretiyle asenkron generatörün tork-hız eğrisi değiştirilerek güç akışı kontrol edilmektedir. Sistemin dinamik denklemi yazılacak olursa;

$$T_{\alpha} = J \frac{d\omega}{dt} = T_{\omega} - T_d \quad (4.3)$$

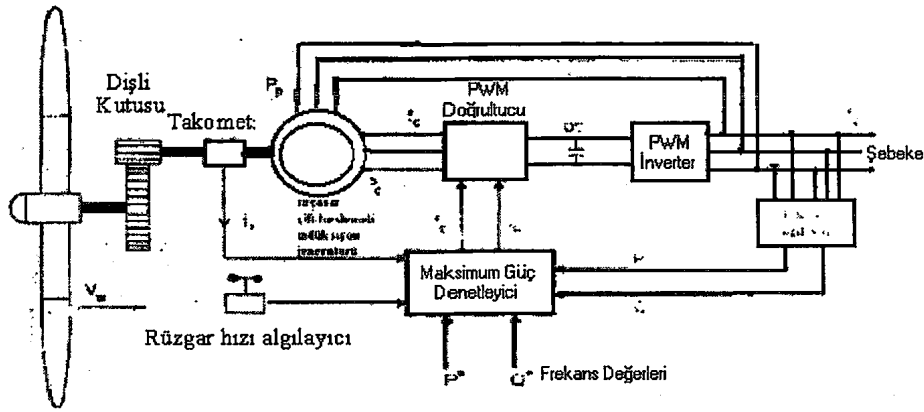
Burada;  $T_{\alpha}$  hızlanma torku (Nm),  $T_{\omega}$  rüzgar türbininden elde edilen tork (Nm),  $T_d$  asenkron generatörünün ürettiği tork (Nm),  $J$  tüm sistemin eylemsizlik momenti ( $\text{kg.m}^2$ ),  $\omega$  rotor milinin açısal hızı (rad/s) dir.

$T_{\omega}$ , rüzgar hızı ile mil hızının bir fonksiyonudur.  $T_d$  ise, mil hızı ve rotor direncinin bir fonksiyonudur. Asenkron generatörün ürettiği tork, mil hızı sabit kaldığı sürece, rotor direnci arttıkça azalır veya azaldıkça artar. Buna göre  $T_a$  değeri sıfır olacak şekilde, türbin hızı artma eğilimi gösteriyorsa ( $J > 0$ ) rotor direnci azaltılır veya azalma eğilimindeyse  $\left( J \frac{d\omega}{dt} \right)$  rotor direnci artırılır. Böylece rotor direnci değiştirilerek asenkron generatör sabit hız uygulamasından değişken hız uygulamasına geçirilir ve türbin verimi optimum değerinde tutulmuş olur.

Şekil 4.5' de verilen sistemde generatör olarak fırçasız çift beslemeli asenkron generatör kullanılmaktadır. Bu tür makinelerde stator kısmında farklı kutup sayılarında 2 adet sargı bulunmakta olup sırasıyla güç sargılan ve kontrol sargıları olarak adlandırılmaktadır. Stator sargı frekansları ile rotor mil hızı arasındaki ilişki şu şekildedir:

$$f_c = f_r (P_p + P_c) - f_p \quad (4.4)$$

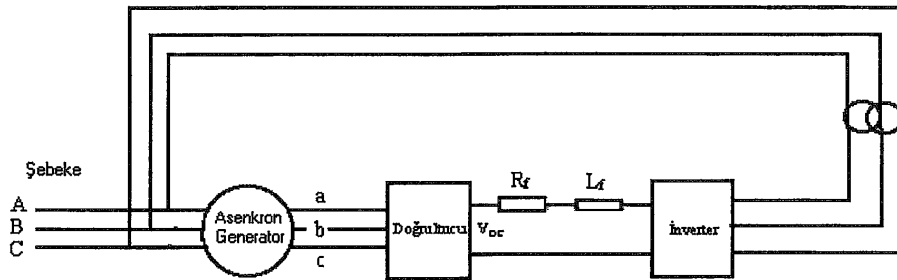
Burada;  $P_p$  ve  $P_c$  sırasıyla stator güç ve kontrol sargılarının kutup sayısı,  $f_p$  şebeke frekansı,  $f_r$  mil hızı,  $f_c$  gerekli kontrol sargıları frekansdır.



Şekil 4.5. Fırçasız çift beslemeli asenkron generatörlü dönüşüm sistemi

Buradaki sistemde kullanılan PWM çeviriciler yardımıyla asenkron generatörünün kontrol sargılan frekansı ayarlanarak denk. (4.4)'de gösterildiği gibi generatör mil hızı kontrol edilmekte ve değişken hız uygulaması sağlanmaktadır [16].

Şekil 4.6'da gösterilen sistemde generatör olarak bilezikli asenkron makine kullanılmaktadır. Buradaki sistemde makinanın rotor dirençlerinde kaybolabilecek enerji bir AC-DC-AC çevirici yardımıyla kaynağa geri gönderilmektedir.



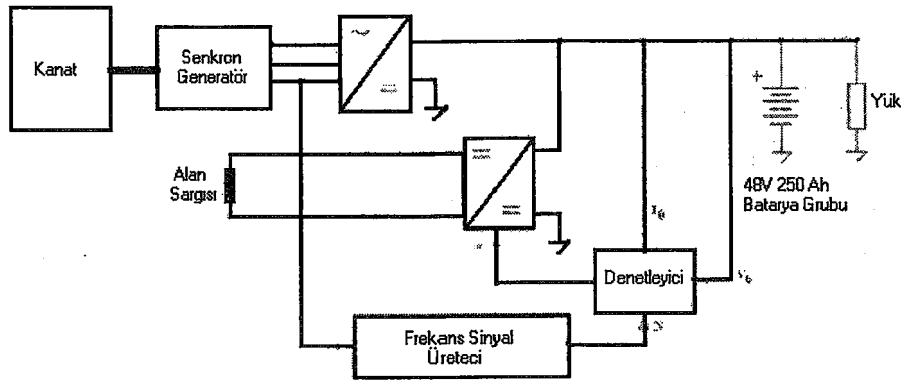
Şekil 4.6. Bilezikli asenkron generatörlü kayma enerjisi kontrollü dönüşüm sistemi

### 4.1.3. Değişken hız değişken frekans dönüştürme sistemleri

Üretilen gerilimin enterkonnekte şebekeye bağlanması zorunluluğu olmayan sistemlerde kullanılır. Bu tür sistemlerde genel olarak kapasitör yardımıyla kendinden uyarımlı asenkron generatörler, alan sargılı senkron generatörler veya sabit mıknatıslı alternatörler kullanılır. Generatör çıkışları bir kontrollü a.a.-d.a. doğrultucu yardımıyla doğru akıma çevrilip batarya şarjında kullanılabilir.

Kontrol edilmesi gereken parametreler, çıkış gerilim seviyesi olup değişen rüzgar hızı şartlarına göre uyarımı sağlayan asenkron generatörün mıknatıslama akımını sağlayan kapasitörlerin değerinin denetlenmesi gerekir. Alan sargılı senkron generatörlerde hem ikaz akımı hem de kontrollü a.a.-d.a. doğrultucu yardımıyla çıkış gerilimi denetlenebilir.

Şekil 4.7'de gösterilen sistemde rüzgar hızının aşırı yükseldiği durumlarda türbini korumak amacıyla kanat aralık açısı değiştirilmektedir. Bu sistemde çıkış gücü kontrol değişkeni olarak kullanılmaktadır.



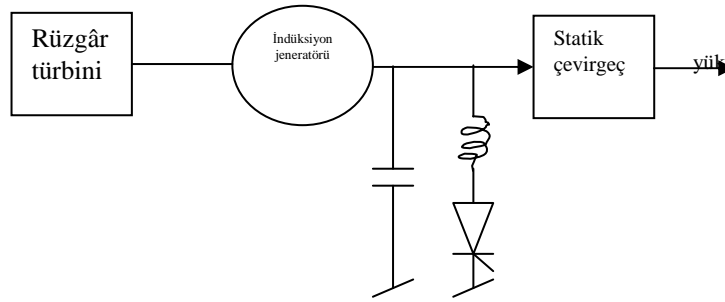
Şekil 4.7. Senkron generatör alan sargı kontrollü DHDF dönüştürme sistemi

Buna göre sistemin dinamik denklemi şöyledir;

$$j\omega_1 \frac{d\omega_1}{dt} = P1(\omega_1) - Pm(\omega_1) \quad (4.5)$$

Buradan da görüleceği gibi rüzgar hızı arttıkça  $j\omega_1 \frac{d\omega_1}{dt} > 0$  olur ve türbin daha fazla güç üretmeye başlar. Benzer şekilde rüzgar hızı azaldıkça  $j\omega_1 \frac{d\omega_1}{dt} < 0$  olur ve türbin gücü düşer. Buna göre batarya ve yükün güç ihtiyacına bağlı olarak DC referans akımı ayarlanır. Böylece sistemin maksimum güç veya gerilim/akım kontrolü altında çalışması sağlanır.

Şekil 4.8'de gösterilen sistemde ise generatör olarak sincap kafesli asenkron makinası kullanılmakta olup, generatörün uyarımı terminallerine bağlanan uyarım kapasitörleriyle gerçekleştirilmektedir. Generatör çıkışı bir kontrollü AC-DC çevirici yardımıyla DC forma çevrilmektedir.



Şekil 4.8. Kapasitör uyarımlı asenkron generatörlü dönüşüm sistemi

## 4.2. Üç fazlı pwm inverter kullanarak yüklerin beslenmesi

Şekil 4.9 'da, rüzgardan elektrik enerjisi üretiminin blok diyagramı görülmektedir. Rüzgar hızı ile türbin harekete geçmekte ve üç fazlı elektrik enerjisi üretilmektedir. Üretilen güç; rüzgar hızı, türbin sayısı, türbin verimi gibi parametrelere bağlıdır. Aşağıda bu durum formülle belirtilmiştir.

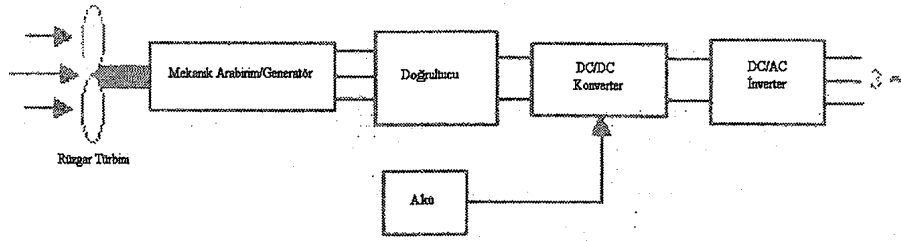
$$P_{wd} = (P_L + P_B) / (n_w \mu_w) \quad (4.6)$$

$P_{wd}$  Rüzgar türbininden elde edilen güç

$P_L$  Yükün gücü

$P_b$  Akü gücü

$n_w$  Rüzgar türbini sayısı



Şekil 4.9. Rüzgardan elektrik enerjisi üretiminin blok diyagramı

Rüzgar hızı, sürekli olarak değişse bile, DC/DC konverter ve inverter yardımıyla 3 fazlı sabit frekanslı AC çıkış elde etmek mümkündür. Akü grubu ile sistem desteklenmekte ve yükün enerjisiz kalması önlenmektedir. Rüzgar türbininin ürettiği üç fazlı AC gerilimi doğrultmak için AC/DC doğrultucu ve bu DC gerilimi invertere uygulamak için bir DC/DC konvertör kullanılmıştır. Sürekli yükün beslenebilmesi için, sistem bir akü grubuyla desteklenmiştir. DC/DC dönüştürücünden sonra, inverter katında altı adet IGBT anahtar ve çıkışta LC filtre devresi kullanılarak DC gerilimden 4 telli 3 faz elde edilmiştir [14]. Kontrol birimi; rüzgar türbinini, akü grubunu, DC/DC konvertörü, DC/AC invertörü kontrol etmektedir. Böylece sistem, bir veya üç fazlı olarak yükü besleyecek şekilde kullanılabilir.

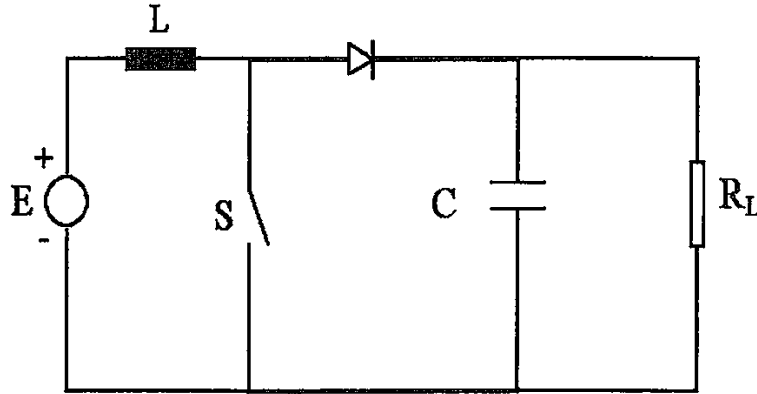
#### 4.2.1. DC/DC konverter devresi

Sabit frekans ve gerilimde enerji üretiminin sağlanabilmesi için rüzgar türbininin ürettiği gerilimin önce doğru akıma dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla da, bir doğrultucu ve bir konvertör devresi kullanır. Türbinden elde edilen 3 fazlı a.a. gerilim ilk önce doğrultucuya verilmekte, ardından gerekli frekans ve gerilim değerinin elde edilebilmesi için DC/DC konvertöre girmektedir. Burada istenilen d.a. gerilim değeri elde edildikten sonra, inverter vasıtasıyla istenilen 1 veya 3 fazlı çıkış değeri elde edilebilmektedir [15].

Şekil 4.10'da, bir Boost konvertör devresi görülmektedir. Bu devrede kullanılan yaniletken S anahtanna istenilen frekansta açma-kapama yaptırılmaktadır. Anahtar iletimde iken ( $T_{on}$ ), L indüktansında enerji depo edilir. Anahtar açıldığında L üzerindeki enerji yüke ve kondansatöre aktarılır. Devredeki diyot, anahtar kapalıyken kondansatörün deşarj olmasını önler. Anahtarın yalıtımda olduğu süre  $T_{off}$  olmak üzere çıkış gerilimi;

$$V_y = E \cdot (T_{on} + T_{off}) / T_{off} \quad (4.7)$$

Şeklinde verilebilir.



Şekil 4.10. DC/DC Boost konverter devresi

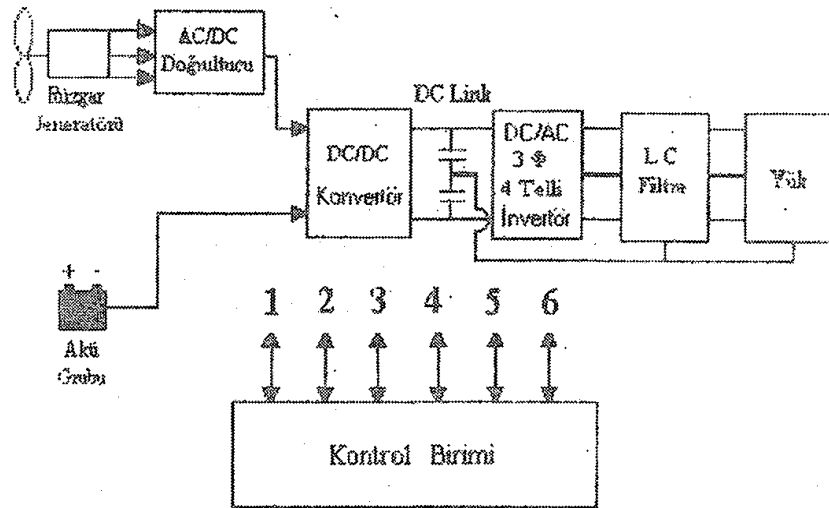
Boost konverter, rüzgar türbininin ürettiği ve rüzgar hızına bağılı olarak değeri sürekli olarak değışen a.a. gerilimin istenilen gerilim değeri ve frekansa inverter tarafından dönüştürülebilmesi için, üretilen bu a.a. sinyali gerekli d.a. değerine dönüştürür. İnverter bu şekilde girişine gelen d.a. sinyali, istenilen gerilim değeri ve frekansta a.a. 'ya dönüştürebilir. Akü grubu da uygun anahtarlama yapıldığı takdirde, bu konverterler üzerinden şarj olur, aynı zamanda yine bu konverterler üzerinden yükü besleyebilir.

#### 4.2.2. Üç fazlı dört telli pwm inverter

Şekil 4.11'deki sistemin amacı, istenilen sabit frekans ve gerilim değerinde bir ve üç fazlı yükleri beslemektir. Bunun için DC/DC konvertörlerden elde edilen sabit d.a. gerilim, DC link kapasitelerine uygulanmış, bu kapasitelerin orta noktasından alınan

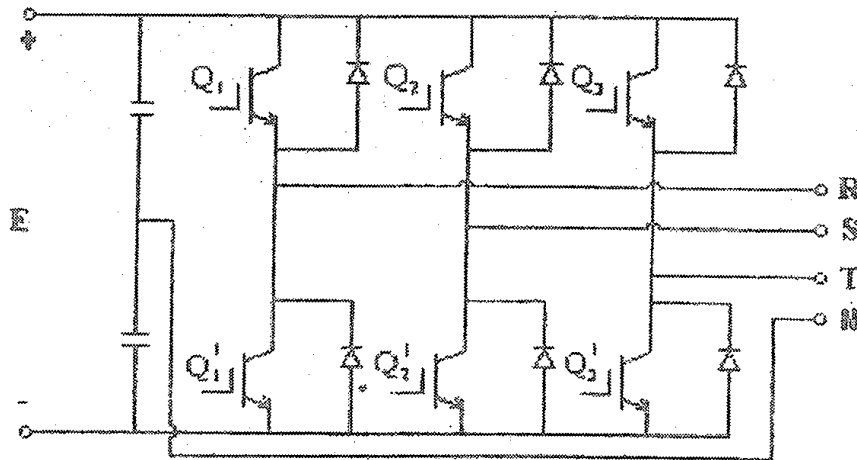


bir uç, LC çıkış filtresi ve yükə bağlanırken, diğər uçlar PWM invertere giriş olarak verilmiştir. PWM invertere uygulanan d.a. gerilim, inverterde üç faza dönüştürülerek sabit frekanslı, sinüzoidal a.a. gerilim elde edilmiştir. LC filtresi vasıtasıyla inverter çıkışındaki parazitler elimine edilir. Çıkışta üç fazlı, dört telli, sabit frekanslı a.a. gerilim elde edilir. Elde edilen bu gerilim ile hem bir, hem de üç fazlı yükler beslenebilir [17].



Şekil 4.11. Rüzgar enerji sistemi ve kontrol birimi

Şekil 4.12'de, sistemde kullanılan PWM inverter devresi görülmektedir. PWM tekniğinde, darbe (pulse) boşlukları korunmak şartıyla, darbe genişlikleri değiştirilerek çıkış ana dalgasının temel bileşeni değiştirilir [18].



Şekil 4.12. Üç fazlı dört telli PWM inverter devresi

İnverterdeki altı adet IGBT, istenilen dalga şeklini üretmek için periyodik olarak açılır ve kapanır. Anahtarlamının durumu kontrol edilerek çıkış gerilim ve frekans değeri belirlenebilir. Kullanılan inverter, DC Link üzerinden beslendiğinden gerilim, kaynaklı inverter olarak da tanımlanabilir.

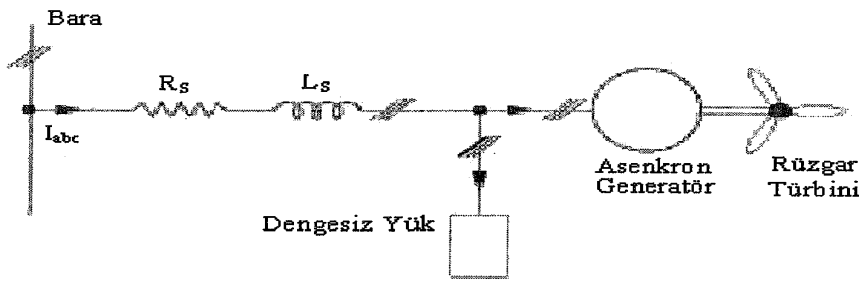
### 4.3. Rüzgar Türbin Generatörlerinde Dengesiz Gerilim Problemi

Rüzgar türbinlerini kırsal bölgedeki uzun iletim hatlarının sonunda kullanmak doğru olmaz. Yük dağılımının yanlış ve dengesiz olarak yapıldığı bir şebeke, asenkron generatörlü bir rüzgar santraliyle beslenirse dengesiz yüklenmeler sonucu ciddi problemler ortaya çıkar.

Asenkron ve senkron makinaların dengesiz işletilmesi ısı problemi ve verim kaybını ortaya çıkarır. Dengesiz işletmenin asıl sebebi, sistemdeki tek faz yüklerin 3 fazlı yüklerle dengeli olarak dağıtılmamasıdır. Bu özellikle, uzun dağıtım hatlarına ve rüzgar türbinleriyle sürülen asenkron generatörlerine sahip olan kırsal elektrik güç sistemlerinde olur.

Büyük santraller iyi dengelenmiş gerilim kaynağı olabilirler. Fakat tek fazlı yükler, üç faza dengeli olarak dağıtılmadığı takdirde dengesiz durumlar ortaya çıkabilir. Simetrik olmayan transformatör, iletim empedansları, iletim hatlarındaki dengesiz yükler ve daha bir çok sebepler dengesiz gerilim hallerine sebep olabilir [19].

Şekil 4.13'te bir güç sisteminin ya da uzun iletim hattının sonundaki bir rüzgar türbini ile sürülen bir asenkron generatörün bağlantı diyagramı görülmektedir. Dengesiz faz gerilimi küçük olduğu sürece büyük negatif akımlar generatörün düşük empedansını etkiler. Bu büyük akımlar sonunda makine kanatlarında dengesiz ısılar oluşturur ve bu ısı zamanla verimi düşürür.



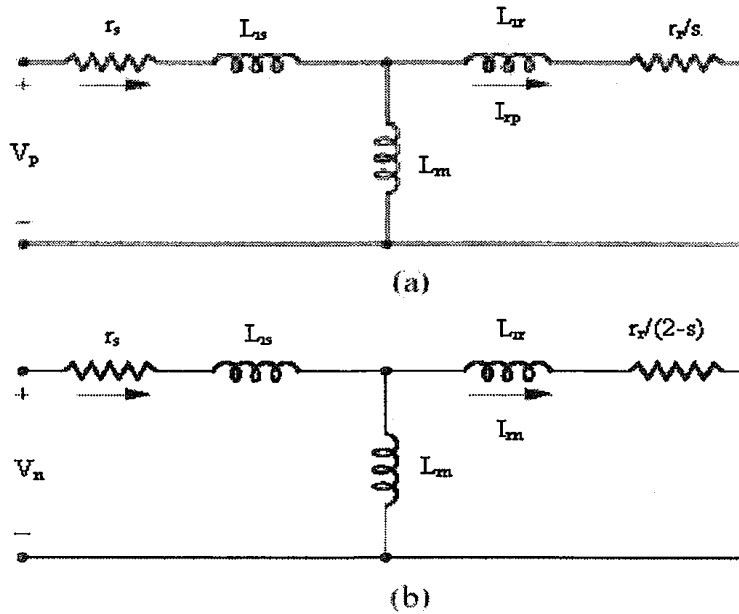
Şekil 4.13. Dengesiz yüklenmiş sistemin şeması

Asenkron makinenin stator kanatlarının nötr noktası topraklanarak, simetrik bileşenler kullanılarak pozitif, negatif ve sıfır eşdeğer devreler uygulanır. Şekil 4.14'deki eşdeğer devrelerden hesaplanan pozitif, negatif ve sıfır rotor akımları makinenin per-unit momentinin geliştirilmesi hesabında kullanılır.

$$T_p = \frac{1}{\omega_s} |I_p|^2 \frac{r_r}{s} \quad (4.8)$$

$$T_n = \frac{1}{-\omega_s} |I_n|^2 \frac{r_r}{2-s} \quad (4.9)$$

Her faz için stator ve rotor kanatlarındaki bakır kayıpları invers transformasyon pozitif, negatif ve sıfır akımlarıyla hesaplanabilir. Denk. (4.8) ve Denk. (4.9) denklemleri makinenin toplam momentini ( $T=T_p+T_n$ ) belirler.



Şekil 4.14. (a) pozitif ve (b) negatif dizi eşdeğer devresi

#### 4.4. Güç Kalitesi ve Harmonik

Yerleşim yerlerinin uzağında bulunan kaynaklardan üretilen elektrik enerjisi, kayıpları azaltmak amacıyla yüksek gerilimlere çıkarılır, DC (doğru) gerilim ya da AC (alternatif) gerilim şeklinde iletilir ve dağıtım noktasında alçak gerilimlere indirilerek dağıtılır.

Üretimden dağıtıma enerji şebekesi (jeneratör, transformatör, iletim ve dağıtım hatları ve yükler) pasif R,L,C ve bağımlı/bağımsız kaynaklarla modellenenbilir. Güç kalitesi, bu şebeke üzerinde herhangi bir noktada tanımlana bilmesine karşın, genelde kullanıcı ucunda önem kazanır; bu nedenle güç kalitesi kullanıcı için besleme noktasında tanımlanmaktadır. Güç kalitesini genelde doğrusal olmayan yükler bozmakta, şebeke trafosunun doymaya girmesi, güç kaynaklarının şebekeye bağlanması ya da yıldırım düşmesi diğer bozucu etkenler olarak değerlendirilmektedir.

Endüstriyel cihaz ve makinaların tanımlandığı gibi çalışmalarını engelleyen elektriksel kesintiler iletim yollu ve ışınım yollu kesintiler olmak üzere düşük frekanslı (9 kHz'nin altı) ve yüksek frekanslı (9 kHz'nin üstü) diye ikiye ayrılır. Güç kalitesi ölçümleri genelde düşük frekanslarda söz konusudur.

Güç kalitesi, şebekenin tanımlanan ucunda gerilimin genlik ve frekans değerlerinin anma değerlerini koruması ve gerilim dalga şeklinin sinüs biçimini koruması olarak tanımlanmakta. Tersine, gerilim genliğinin dalgalanması, kesintiler, darbesele değişimler, frekansın değişimi, kırpışma ve üç faz dengesizlikleri başlıca güç kalitesizliği biçimleri olarak görülmektedir. Genelde güç kalitesi şebekeden enerji çeken kullanıcılar (yükler) tarafından bozulmakta, gerilim dalga şeklinin sinüs biçiminden sapması ve bozulmalar başta harmonikler olmak üzere istenmeyen etkiler göstermektedir.

#### 4.4.1. Şebeke bozukluklarının tanımları

Elektrik şebekesindeki güç kalitesi bozuklukları şu isimler altında gruplanmakta:

**Kesinti (outage):** En az yarım dalga boyu süresince gerilimin sıfır değerini alması. Örneğin, 50 Hz frekanslı Türkiye dağıtım şebekesi için bir periyod 20 ms olduğuna göre 10 ms'den büyük kesintiler bu kapsama girmektedir.

**Gerilim darbesi (impulse):** Genlikleri 50 V ile 5 kV arasında değişen ve 0.5 ms ile 20 ms süreli gerilim darbeleri genelde yük ve şebeke açma/kapama, kontaklar arası arklar ve yıldırım kaynaklıdır.

**Çentik (notches):** Şebeke geriliminin bir tam dalgasında (20 ms süresince) doğrultucu darbe sayısı kadar tekrarlanan çökmelere verilen ad. Genelde doğrultucuları besleyen trafo ve hat endüktanslarının anahtar aktarımını geciktirmesiyle oluşur.

Rüzgar türbinleri elektrik üretmelerine bağlı olarak, dağıtım sisteminin gerilim seviyesinde bazı etkilerin oluşmasına sebep olurlar. Gerilim seviyesinde meydana gelen bu etkiler rüzgar türbinlerinin bağlı oldukları sistem noktasından başlayarak, dağıtım şebekesine kadar devam eder. MV büyüklüğündeki dağıtım istasyonları genellikle gerilim seviyesini regüle ederler. Bu durumda, rüzgar türbinleri sadece bağlandıkları hatların gerilim seviyesini etkilerler. Eğer, bu tür dağıtım istasyonlarında herhangi bir gerilim düzenlemesi yoksa, bu hatlardaki gerilim seviyesi etkilenir.

Rüzgar türbinleri sisteme aktif güç verdikleri için sistemdeki gerilim seviyesini arttırmırlar. Aynı zamanda sistemden reaktif güç çekmeleri nedeniyle seviyede düşüşler meydana gelir. Bu durumda, rüzgar türbinlerinin gerilime bağlı şebekeden ayrılması veya gerilime bağlı güç denetimi uygulaması yapılabilir. Böylece, türbindeki maksimum elektrik üretimi nedeniyle oluşan yüksek gerilim seviyelerinin bulunduğu durumlarda, gerilim seviyesi aşağıya çekilebilecektir.

Gerilim düşmesi (sag): Gerilimin bir tam dalgadan (20 ms'den) daha uzun sürelerde değerinde % 80 'den daha büyük düşmeler. Şebeke yetersiz kaldığında, aşırı yüklenmede ve kısa devrelerde görülmektedir.

Gerilim yükselmesi (swell): Gerilimin bir tam dalgadan (20 ms'den) daha uzun sürelerde değerinde % 110 'dan daha büyük değerlere çıkması. Şebekede yük azalması ve ayar zayıflıkları neden olmaktadır.

Rüzgar türbinlerinde asenkron generatör kullanılması durumunda, asenkron generatörün reaktif güç gereksinimi bir şekilde karşılanmalıdır. Asenkron generatör direkt olarak şebekeye bağlı olduğu için reaktif gücü, bu durumda şebeke üzerinden çekecektir, yada rüzgar türbinine yerleştirilecek kapasite gruplarının reaktif gücü kompanze etmeleri sağlanacaktır. Rüzgar türbinlerinin şebekeden çekecekleri reaktif gücün azaltılması gerilim seviyesini yükseltecektir. Bu sayede rüzgar türbinlerinin şebeke gerilimi üzerindeki etkileri azalacaktır.

Frekans değişimi: Şebeke frekansının anma değerinden sapması. Şebeke ve jeneratörlerde ayar düzensizliklerinden kaynaklanmaktadır.

Kırpışma (flicker): Gerilimin periyodik olarak 6-7 tam dalga (8-9 Hz) süresince azalması ya da artması. Nedeni ark fırını gibi dalgalı aşırı yükler. İnsan gözü 8.2 Hz frekansına duyarlı ve bu frekanslardaki işaretlerden (kırpışmadan) rahatsız olmaktadır. Rüzgar hızındaki kısa süreli değişimler, rüzgar türbininin çıkış gücünde dalgalanmalara sebep olmaktadır. Bu da gerilimde ani değişimlere (Flicker) yol açmaktadır. Dağıtım sisteminde oluşan gerilim dalgalanmaları, gerilimin frekansına ve büyüklüğüne bağlı olarak, güç kalitesini etkiler ve gürültüye sebep olur. Ayrıca, her bir rüzgar türbininin oluşturduğu ani değişimler, türbin büyüklüğü ile artmaktadır. Mesela, tek bir 1.5 MW'lık rüzgar türbininin gerilimde yaratacağı ani değişimler 10 adet 150 kW'lık türbininkinden 2-3 kat daha fazladır

DC Gerilim bileşeni: AC gerilimin pozitif yarım dalga ve negatif yarım dalga alanlarının birbirine eşit olmamasıdır.

Elektromanyetik girişim (EMI): Genliği 100  $\mu$ V ile 100 V, frekansı ise 10 kHz ile 1GHz arasında olan düşük enerjili bozucu dalgalar.

Harmonikler: Gerilim ve akım dalga biçiminin sinüs biçiminden uzaklaşması. Güç elektroniği devreleri ve doyma / ark ilkesiyle çalışan elektromekanik cihazlardan kaynaklanmaktadır.

Zamanla değişen işaretler enerjilerini belirli frekanslarda taşırlar. Rüzgar türbinlerinde kullanılan çeviricilerdeki anahtarlanmalardan dolayı tipik harmonikler oluşacaktır. Yüksek anahtarlama frekansları düşük harmonikli dalgalar üretmektedir. IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor) gibi katı hal yarı iletken transistörler ile yüksek frekanslı anahtarlama yapılarak harmonik bileşenleri küçük olan iyi bir akım dalgası üretebilir. Rüzgar jeneratörünü servis şebekesine bağlayan yükseltici transformatörler ile gerilimin yükseltilmesi halinde düşük olan harmonikler daha da azaltılabilmektedir. Böylece ortak bağlantı noktasında rüzgar türbinleri aracılığıyla harmoniklerin bozucu etkisi çok küçük olacaktır.

#### 4.4.2. Harmonik bozulmaları ve standartlar

Sinüzoidal olmayan bir gerilim işareti matematiksel olarak

$$V(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t + \Phi_1) + V_2 \sin(\omega t + \Phi_2) + V_3 \sin(\omega t + \Phi_3) + \dots + V_n \sin(\omega t + \Phi_n) \quad (4.10)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada

- $V_0(t)$  : Herhangi bir andaki çıkış geriliminin ani değeri
- $V_0$  : Doğru bileşen değeri
- $V_1$  : Teme bileşenin genliği
- $V_2$  : İkinci harmoniğin genliği
- $V_n$  : n. harmoniğin genliği
- $\Phi$  : gerilim / akım arasındaki faz farkı

AB'de şebeke enerjisi ile çalışan cihazlardan şebekeyi korumak için 1998'den bu yana uygulanan EN 61000-3-2 (Türkiye'de TS EN 61000-3-2, kabul tarihi: 3.3.2003, temiz şebeke enerjisinin sağlanması için gerekli Alçak Gerilimde Harmonik Akım Sınırları) standardı tanımları ve sınırlamaları içermekte. Buna göre Gerilim Harmonik Bozulması  $[HD]_V$  ve Toplam Harmonik Bozulması  $[THD]_V$

$$[HD]_V = \frac{V_K}{V_1}, [THD]_V = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} \quad (4.11)$$

olarak tanımlanmakta. Benzer şekilde kısa devre (KD) akımına göre sınıflandırılan akım harmonik bozulmaları da  $[HD]_I$  ve Toplam Harmonik Bozulması  $[THD]_I$

$$[HD]_I = \frac{I_K}{I_1}, [THD]_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \quad (4.12)$$

şeklinde hesaplanmakta.

#### 4.4.3. Harmonik ölçümü ve değerlendirme

Elektronik güç kaynakları, buzdolapları, otomatik programlı çamaşır ve bulaşık makineleri gibi cihazlar (yani doğrusal olmayan yükler) şebekeden sinüzoidal akım çekmezler. Bu yüklerin giriş akımları 50 Hz frekansına ayarlı tepeler ya da süreksizlikler şeklinde olduklarında istenmeyen harmonikler oluştururlar. Böyle bir çok yük şebekeye bağlandığında, istenmeyen harmoniklerin sayısı ve seviyeleri zararlı boyutlarda olabilir. Bu nedenle EN 61000-3-2, giriş akımı 16 A'den küçük bütün cihazlar için 1 Temmuz 1998'den itibaren zorunlu kılınmıştır.

EN 61000-3-2 standardında harmonik akımları için sınır değerler dört farklı sınıf cihaz için tanımlanmış durumda. Taşınabilir cihazlar B sınıfı, Yıldırımdan korunma cihazları C sınıfı, 600 W ve düşük güçlü PC ve TV alıcıları D sınıfı, bunu dışında kalan ve şebekeye bağlanarak çalışan tüm cihazlar A sınıfı olarak tanımlı. EN 61000-3-2'ye göre belirlenen harmonik sınırları Tablo 4.1'de gösterilmekte.



Tablo 4.1. EN 61000-3-2 standardına göre sınır harmonik akımları

Harmonik No	A sınıfı (A rms)	B sınıfı (A rms)	C sınıfı (%)	D sınıfı (mA / W)
2	1.08	1.62	2	—
3	2.30	3.45	30	3.4
4	0.43	0.645	—	—
5	1.14	1.71	10	1.9
6	0.30	0.45	—	—
7	0.77	1.115	7	1.0
$8 \leq n \leq 40$	$1.84 / n$	$2.76 / n$	—	—
9	0.40	0.60	5	0.5
11	0.33	0.495	3	0.35
13	0.21	3.15	3	0.296
$15 \leq n \leq 39$	$2.25 / n$	$3.375 / n$	3	$3.85 / n$

EN 61000-3-2 genel 50-60 Hz 220/380 V, 230/400 V ve 240/415 V besleme sistemleri için geçerlidir. Standartlarda en fazla kırkıncı harmonik ( $n=40$ ) için (2 kHz'ye kadar) test ve ölçüler istenir. Eğer 19. harmonikten yukarısı monoton olarak azalıyorsa, standartlarda ölçülen en yüksek harmonik  $n=19$  alınabilir. Cihaz ile gerçekleştirilen ölçülerde, giriş akımının % 6'sından ya da 5 mA den küçük harmonikler göz önüne alınmayabilir. Cihaz çalışırken:

- 10 s'den az süreleri geçici olarak gözlenen harmonikler, genlikleri ne olursa olsun, göz önüne alınmazlar.

-2-10 arası çift mertebeli ve 3-19 arası tek mertebeli geçici olarak gözlenen harmoniklerin genlikleri 150 s (2.5 dak) içerisinde 15 s süresince tablo değerlerinin 1.5 katına kadar çıkabilir.

Harmonik analizlerinde frekans seçiciliği olan herhangi bir ölçü aleti kullanılabilir. Ölçü aletinin hatası, tablolarda verilen limit değerlerin % 5'inden ya da cihaz akımının % 0,2'sinden büyük olamaz. Ölçü aletinin giriş empedansı, test edilen cihazın girişinde 0,15 V (tepe) dan fazla gerilim düşümü yaratmamalıdır. Beslemede  $f_1=50$  ya da 60 Hz için  $f_n$  harmoniklerinde seçicilik (zayıflama),  $2 f_1 < f_n < 12 f_1$  için 30 dB,  $12 f_1 < f_n < 20 f_1$  için 20 dB ve  $20 f_1 < f_n < 40 f_1$  için 15 dB olmalıdır. Dışarıdan katılan  $0,5 f_n$  içerisindeki işaret zayıflaması en az 50 dB olmalıdır. Dışarıdan katılan  $f_1=50$  ya da 60 Hz frekanslı işaret zayıflaması en az 60 dB olmalıdır.

Renkli ya da siyah-beyaz TV alıcıları, Ses kuvvetlendiricileri, Video-kaset kayıt cihazları, Lambalar, Elektrik süpürgeleri, Çamaşır makinaları, Mikrodalga Fırınları ve bilişim teknolojileri cihazları için koşullar ayrı ayrı belirtilmiştir. Cihaz için test gerilimi tek ve üç fazlı durumlarda 230-400 V arası olmalıdır. Test geriliminde en fazla  $\pm 2.0$  V luk, frekansında ise en fazla  $\pm 0.5$  lik değişime izin verilir. Cihaz uçlarındaki test gerilimi için aşağıdaki besleme koşulları istenir:

- |  |                                    |
|--|------------------------------------|
| 3. Harmonik için % 0.9                 | 5. Harmonik için % 0.4             |
| 7. Harmonik için % 0.3                 | 9. Harmonik için % 0.2             |
| 2-10 arası çift harmonikler için % 0.2 | 11-40 arası harmonikler için % 0.1 |

Gerek cihazlar için gerekse kurulu bir tesiste harmonik analizi için doğru olan ölçüm yapmaktır. Bu amaçla harmonik analizörleri kullanılmaktadır. Ölçüm sonrası yorumlar cihazdan cihaza ve tesisten tesise değişir. Ancak, endüstriyel tesisler için kabaca şu yorumları yapmak olası:

$[THD]_V < \% 2.5$  ve  $[THD]_I < \% 10$  çıkması durumunda tesiste harmoniklerden ötürü şebekeyi kirletme söz konusu değil

$[THD]_V \cong \% 2.5 - 3$  ve  $[THD]_I > \% 10$  için harmonik kirlenme söz konusu olabilir, harmonik filtre uygulamak gerekebilir

$[THD]_V > \% 3$  ise harmonik filtre kullanılması önem kazanır, hem ekonomik hem de teknik açıdan gerekli. [20]

#### 4.4.3.1. Harmonik akım ve gerilimlerin görünen etkileri

Harmonik etkilerinin görüldüğü tesislerde sıkça rastlanan sorunları gerilim ve akım harmonikleri alt başlıkları altında şu şekilde sıralarsak;

Akım harmonikleri:

- Kullanılabilir güçte azalma ve kayıplarda artma, düşük güç faktörü
- Üç faz sistemlerde nötr hatta aşırı akımların oluşumu
- Trafo ve jeneratörlerde aşırı ısınma
- Akustik gürültüde artma

e. Telefon hatlarında artan girişim

Gerilim harmonikleri:

- a. Trafo ve jeneratörlerde aşırı ısınma
- b. Kondansatörlerde aşırı ısınma
- c. Motorlarda ısınma
- d. İzolasyon sistemlerinde yalıtkan stresinin artması
- e. Rezonans oluşumu ve yüksek gerilim delinmesi

Endüksiyon motorlarda problemler, mekanik salınımlardır.

#### **4.5. Rüzgar enerji sistemlerinin avantajları**

Rüzgar türbinlerinin çevreye olan olumlu etkilerinin başında fosil yakıtlarının kullanımını azaltması ve yanma sonucu oluşan kirletici maddelerin (zararlı gazlar, havada ucan küller) emisyonunu azaltması sayılabilir. Bunlarda en önemlisi de karbon oksitler, sülfür ve nitrojen gibi zararlı gazları yaymıyor olmasıdır. Dolayısıyla sera etkisine neden olmamaktadır. Birçok konvansiyonel fosil yakıt kullanan santraller sülfür ve nitrojen oksitler yaymaktadır. Bu da çevreye önemli ölçüde zarar veren asit yağmurlarına yol açmaktadır.

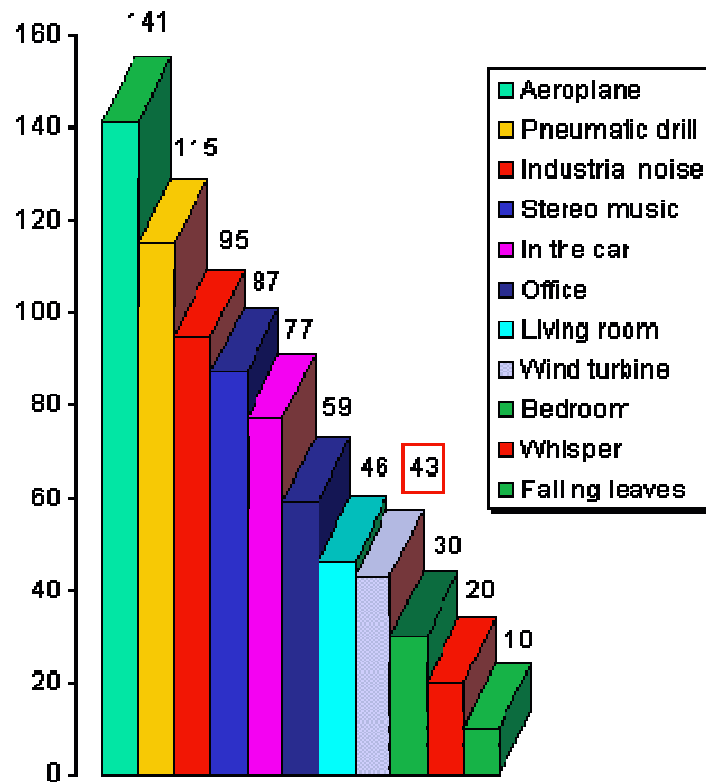
Rüzgar türbinlerinin diğer bir avantajı ise ekonomik alan kullanımıdır. Özellikle Rüzgar çiftliklerinde, rüzgardan daha iyi yararlanabilmek için türbinler birbirlerinden belirli mesafelere yerleştirildikleri için kapladıkları arazi oldukça geniştir. 20 türbinden oluşan tipik bir rüzgar çiftliği yaklaşık 1 km<sup>2</sup> (100 hektar) alan kaplar ama bu alanın sadece %1'ini kullanmaktadır. Geri kalan alanlar çiftlik için yada doğal alan olarak kullanılabilir. Bunun gibi bir proje 6,500 ila 10,000 arasında evin elektrik gereksinimini karşılayabilmektedir.

Ortalama bir sahada modern bir rüzgar türbini üç dört ay içerisinde imalatında kullanılan miktarda enerjiyi üretebilmektedir. Rüzgar çiftlikleri kolayca sökülebilmekte ve arazi kolayca eski haline getirilebilmektedir. Rüzgar türbinlerinin

geri kazanılabilirlik oranı artmakta ve böylece hurda makinelerden daha çok enerji kurtarılabilmektedir.

#### 4.5. Rüzgar enerji sistemlerinin dezavantajları

Rüzgar türbinlerinin dezavantajları, gürültü ve görüntü kirliliği, kuşlara ve radyo-TV sinyallerine zarar vermesi olarak sıralanabilir. Rüzgar türbinlerinde iki çeşit gürültü oluşmaktadır. Mekanik gürültü, dişli kutusu, generatör ve yedek motorların yarattığı gürültüdür. Mekanik gürültü, akustik kılıfların ve özel dişlilerin kullanılması ve dönen parçaların ses emici malzemeyle kaplanması ile giderilebilmektedir. Aerodinamik gürültü ise, hava içinde dönen kanatların hızına bağlı olarak artar. Rüzgar santrali içerisindeki ses 43 dB düzeyindedir. Bu karşılık araba içerisindeki ses seviyesi 70-80 dB arasındadır.



Şekil 5.1. Ses seviyesi grafiği

Gürültü etkisi yerleşim bölgelerinin yakınındaki yerlere göre rüzgar türbinlerinin özenle yerleştirilmesi ile giderilebilmektedir. Rüzgar santralleri ile yerleşim birimleri

ve konutlar arasındaki uzaklığın 500 m' den az olmaması, doğal olarak gürültüden korunmayı sağlar.

Rüzgar santrallerin yaygın olduğu Danimarka, Almanya ve Hollanda gibi ülkelerde yapılan çalışmalar, Rüzgar türbinleri yanında yaşayan insanların genellikle şehirde yaşayanlara göre türbinleri daha uygun bulduklarını göstermiştir. Estetik açıdan, büyük türbinler genellikle küçük türbinlerden daha düşük dönme hızına sahiptir. Bu yüzden büyük türbinler, hızlı dönen cisimlerin gözde yaptığı olumsuz etkiyi yapmaz. Ayrıca boru tipi kuleler, kafes tipi kulelere göre daha hoş görünümlü oldukları için, görüntü kirliliğini önlemek için boru tipi kuleler tercih edilmektedir.

Rüzgar türbinlerinin kuş yaşantısına olumsuz etkileri vardır. Kuşların kule veya kanatlara çarparak ölme ve yaralanması veya türbinlerin yuvalama ve göç yollarına zarar vermesi bu etkiler arasındadır. Fakat rüzgar türbinleri nedeniyle kuş ölümü seyrekdir. Genellikle kuş ölümlerine yüksek gerilim hatları neden olmaktadır. Danimarka'da, 3.500 rüzgar türbini üzerinde yapılan araştırmaya göre, yılda 20.000-25.000 kuş rüzgar türbinlerine çapma sonucu ölürken, yaklaşık 1 milyon kuş ise trafikteki araçlar tarafından öldürülmüştür.

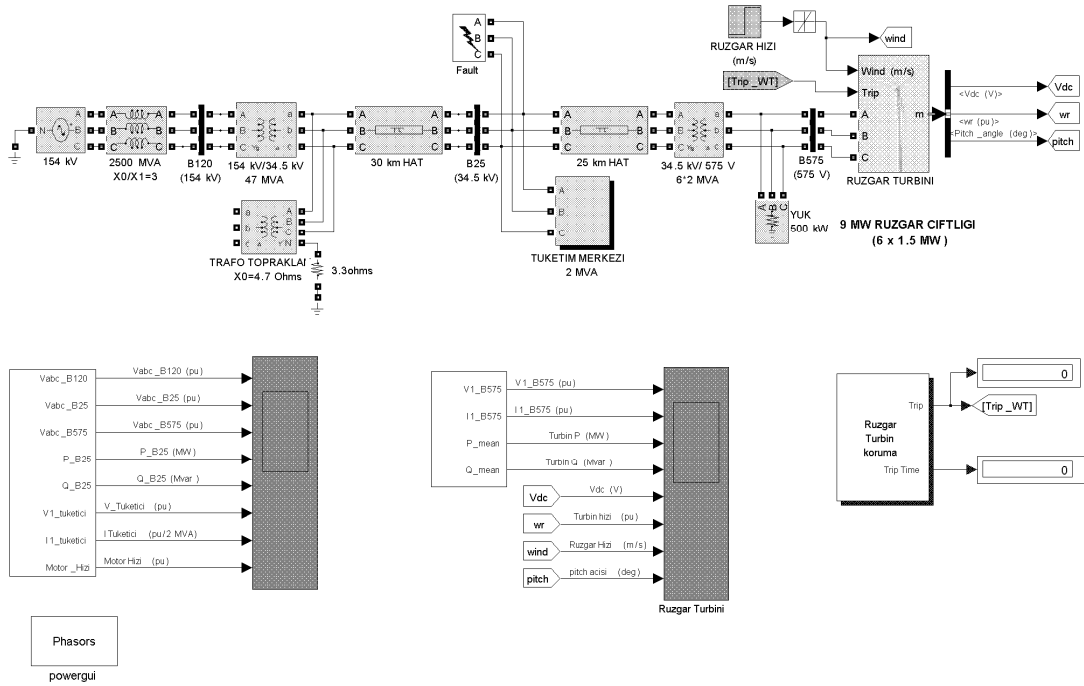
Rüzgar türbinlerinin radyo ve televizyon alıcılarında parazit oluşturması gibi bir olumsuz etkisi bulunmaktadır. Fakat bu etki 2-3 km' lik alanla sınırlı kalmaktadır ve türbin yerleşimi bu tür olgulara dikkat edilerek yapılırsa, olumsuz etkiler azaltılabilir veya ortadan kaldırılabilir.

## **BÖLÜM 5. RÜZGAR ÇİFTLİĞİ BENZETİMİ**

Rüzgar Modelde Altı adet 1,5 MW'lık rüzgar türbininden oluşan rüzgar çiftliği 575 V ile üretim yapıp üretim noktasında üçgen-yıldız trafo ile gerilimi 575 V tan 34,5 kV'ta yükseltilmekte 25 km lik hat ile tüketim ( 34,5 kV luk dağıtım sistemine) merkezine bağlanılmaktadır. Bu sistem 154 kV'luk baraya uzaklığı 55 km'dir. 2 MVA'lık işletmenin yükü motor (1.68 MW indüksiyon motoru ) ve bir 200 kW direnç yükünden oluşup B25 barasına bağlıdır.

Model üretim bölgesini temsilen rüzgar çiftliği, tüketim noktasını temsilen tüketim merkezi ve enterkonnekte sistemi temsilen gerilim kaynağından, bara gerilimleri, akımı devamlı izleyen rüzgar türbini korumayı sağlayan sistemden oluşmaktadır. Bu sistem de rüzgar türbin koruma bloğu olarak isimlendirilmiştir.

Koruma sistemin verdiği komut anlık olarak komut zamanını ve komut değerini gösterecek şekilde tasarlanmıştır. Koruma komutu direk olarak türbin bloğunda trip girişine bağlanmıştır. Bu blokta trip girişi gerçek bir şebekede röle ve kesici görevini yapmaktadır. İlgili giriş sıfır değerindeyken blok kesicisi kapalı olup türbin doğrudan şebekeye irtibatlıdır. Arıza durumu söz konusu olduğunda PWM kontrollü konverter gerilimi sabit tutmaya çalışacak ancak sistem direnci minimuma yaklaştığından akım maksimum olmak isteyecek istenmeyen durum sistemi çökmeye götürecektir. Bu durumda koruma sistemi blok trip girişine 1 komutunu verecek, blok kesicisi açılacak, şebeke irtibatı kesilmiş olacaktır.



Şekil 5.1. Rüzgar çiftliği simülasyonu

Ayrıca DFIG DC hat gerilimi de türbin blok çıkışından alınan verilerle izlenmektedir. Rüzgar türbinleri AC/DC/AC dönüştürmelerini IGBT'li PWM dönüştürücü ile yapmaktadır. Stator sargıları 50 HZ'lik baraya direk bağlanırken değişken frekanslı rotor beslemesi AC/DC/AC konvertere-invertere bağlanır.

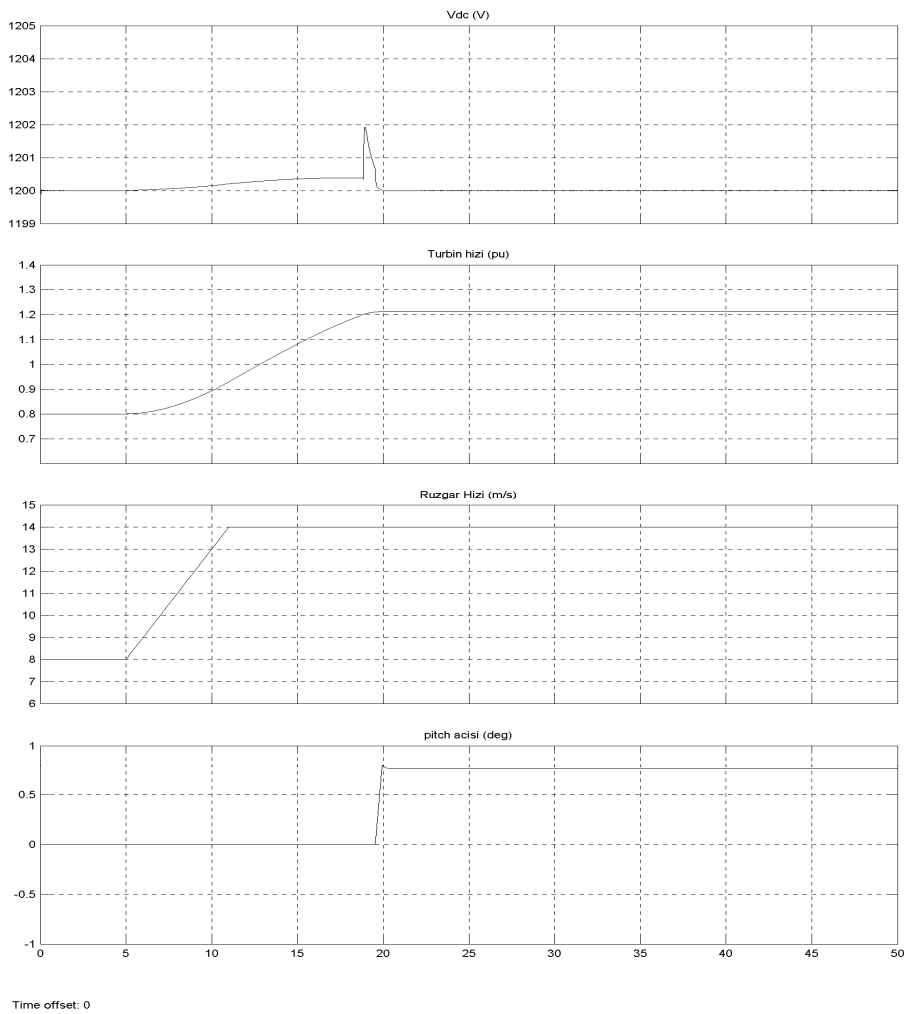
DFIG teknolojisi rüzgar hızındaki ani değişimlerle meydana gelen mekanik stresi minimize ederken düşük rüzgar hızlarında türbin hızını optimize ederek maksimum enerji eldesini sağlamaktadır.

Rüzgar türbin modeli simülasyonunda sistem 50 saniye boyunca izlenerek geçici durum olayları görülmektedir. Simülasyon süresi uzatılarak stabil hal değerleri de elde edilebilmektedir.

## 5.2. Veri ve Benzetim Sonuçları

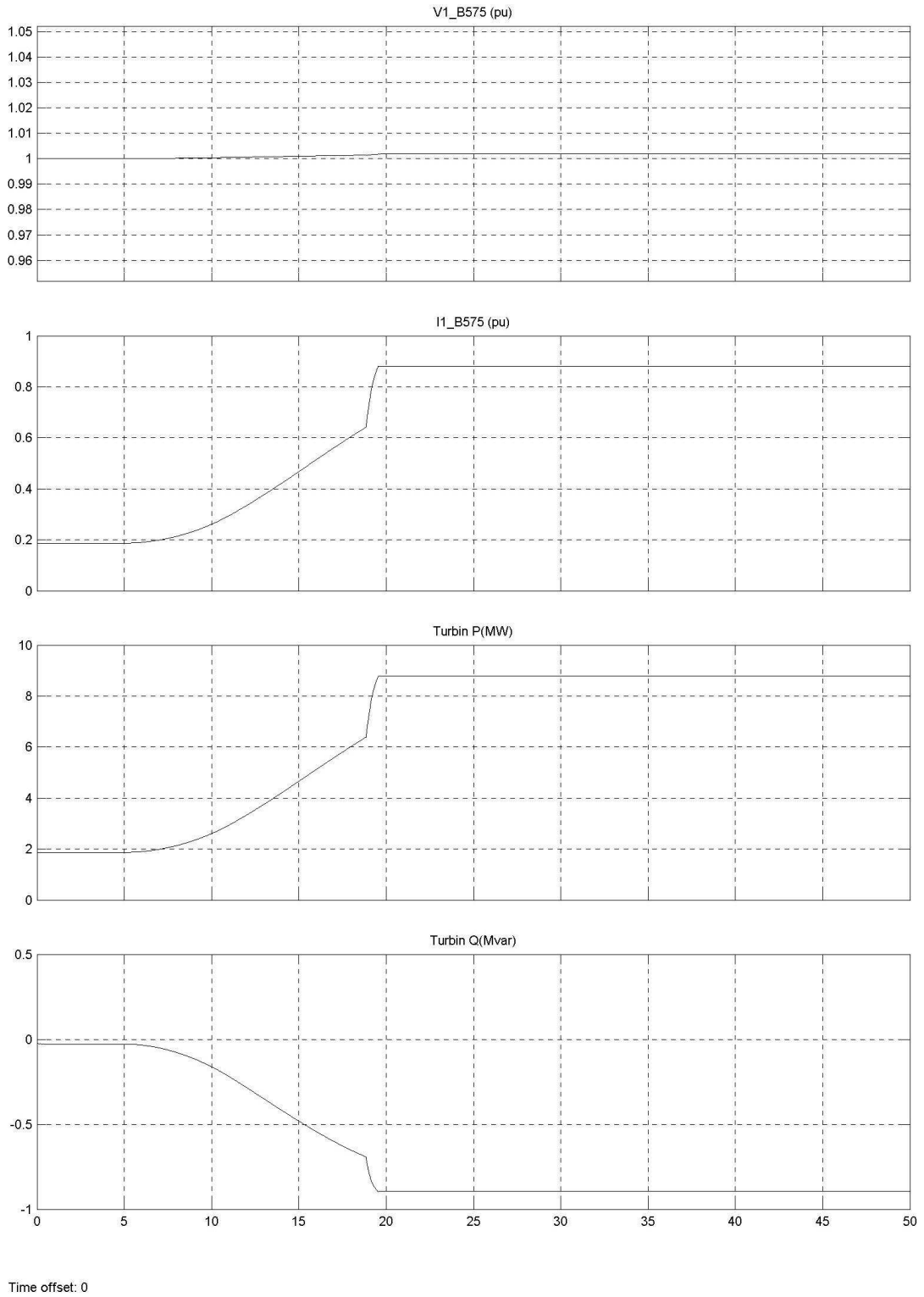
### 5.2.1. Türbinin rüzgarın hızındaki değişime tepkisi

Başlangıç koşullarında, rüzgar hızı 8m/s olarak seçilmiştir. Bu hız türbinin enerji üretimi yapabildiği ancak tam kapasitede de üretimin olmadığı bir seviyedir. İlk beş saniye süresince 8 m/s hız ile üretim yapılmakta beşinci saniyede rüzgar hızı zaman ile doğru orantılı olarak artırılarak 14m/s ye yükseltilmektedir.



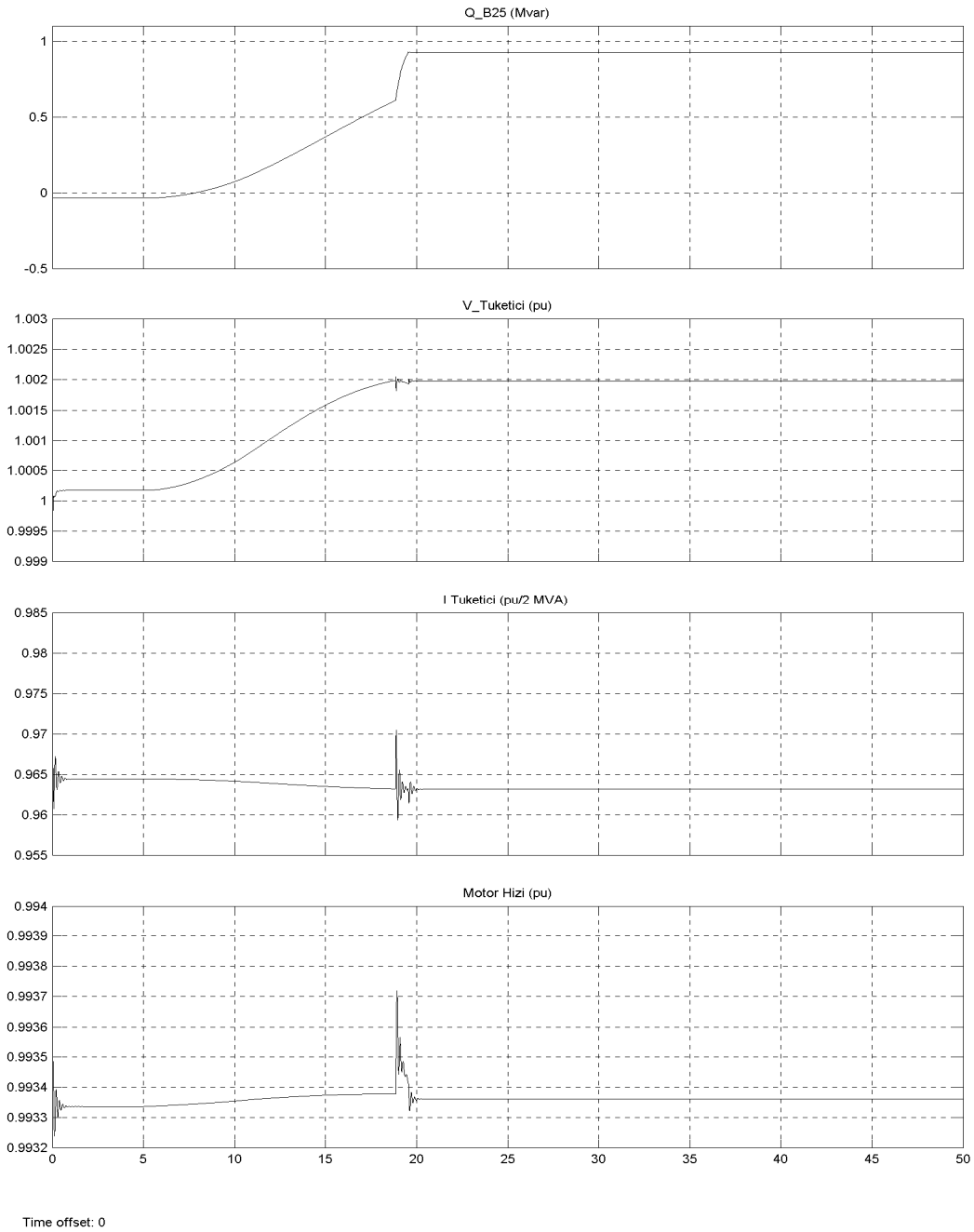
Şekil 5.2. Arızasız durumda rüzgar türbin verileri (1)



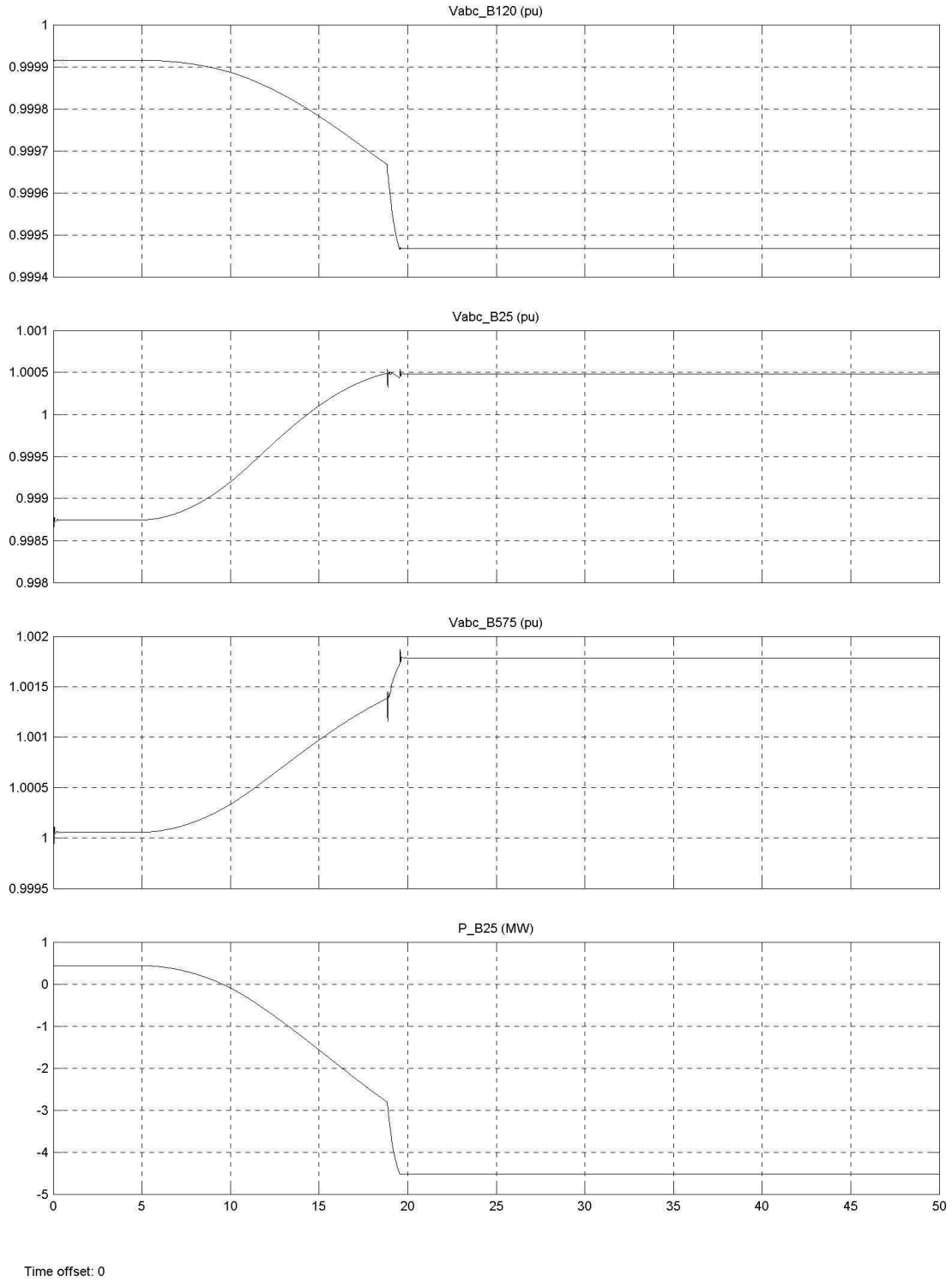


Şekil 5.3. Arızasız durumda rüzgar türbin verileri (2)

Üretilen aktif güç türbin hızıyla, türbin hızı da rüzgar hızıyla doğru orantılıdır. Beşinci saniyede artmaya başlayan rüzgar hızı makul bir tepkime süresiyle üretilen aktif güce yansımaktadır. Üretilen aktif güç atanan değer olan 9 MW a hıza orantılı şekilde yaklaşık on dokuzuncu saniyede da ulaşmaktadır.



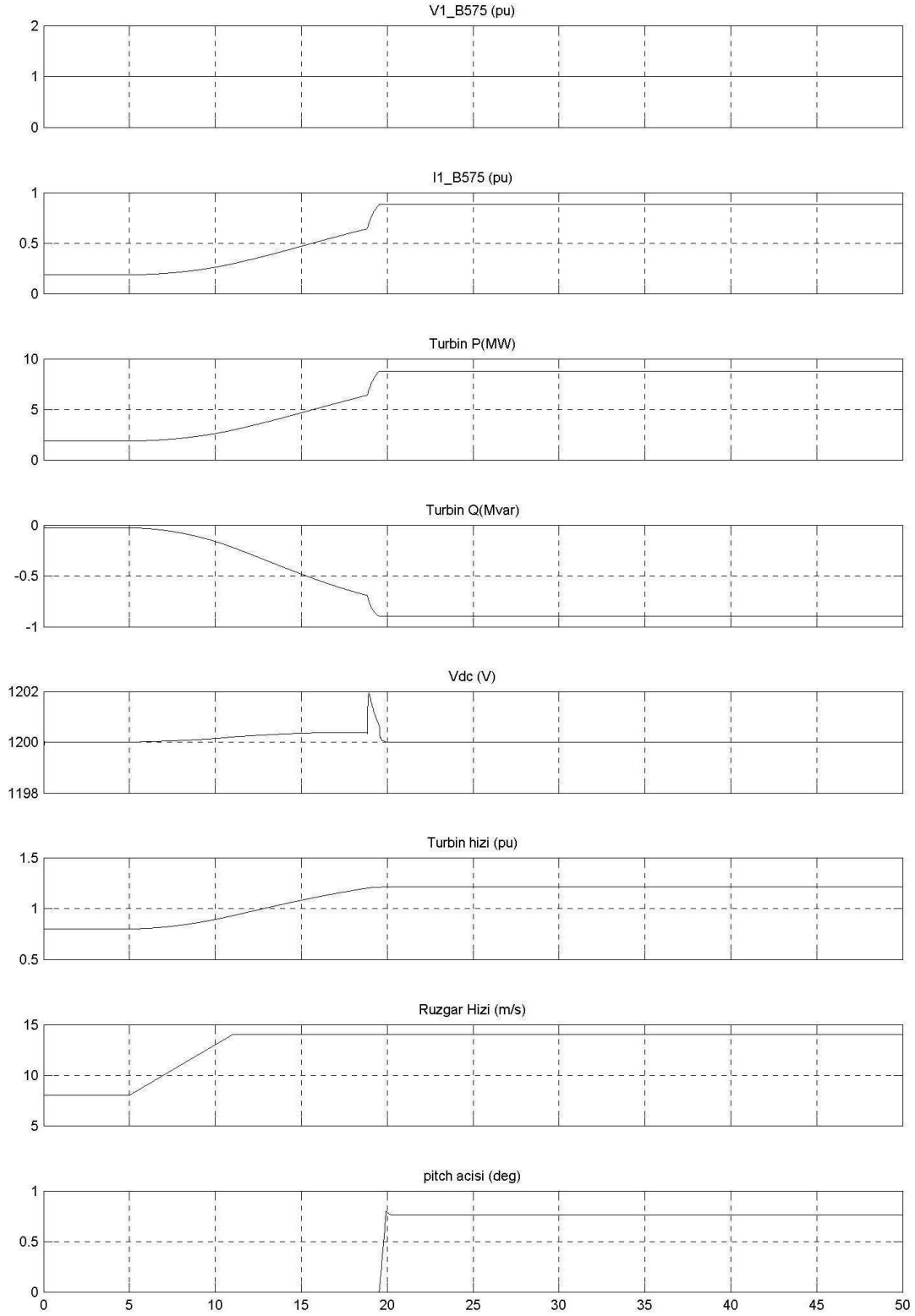
Şekil 5.4. Arızasız durumda bara verileri (1)



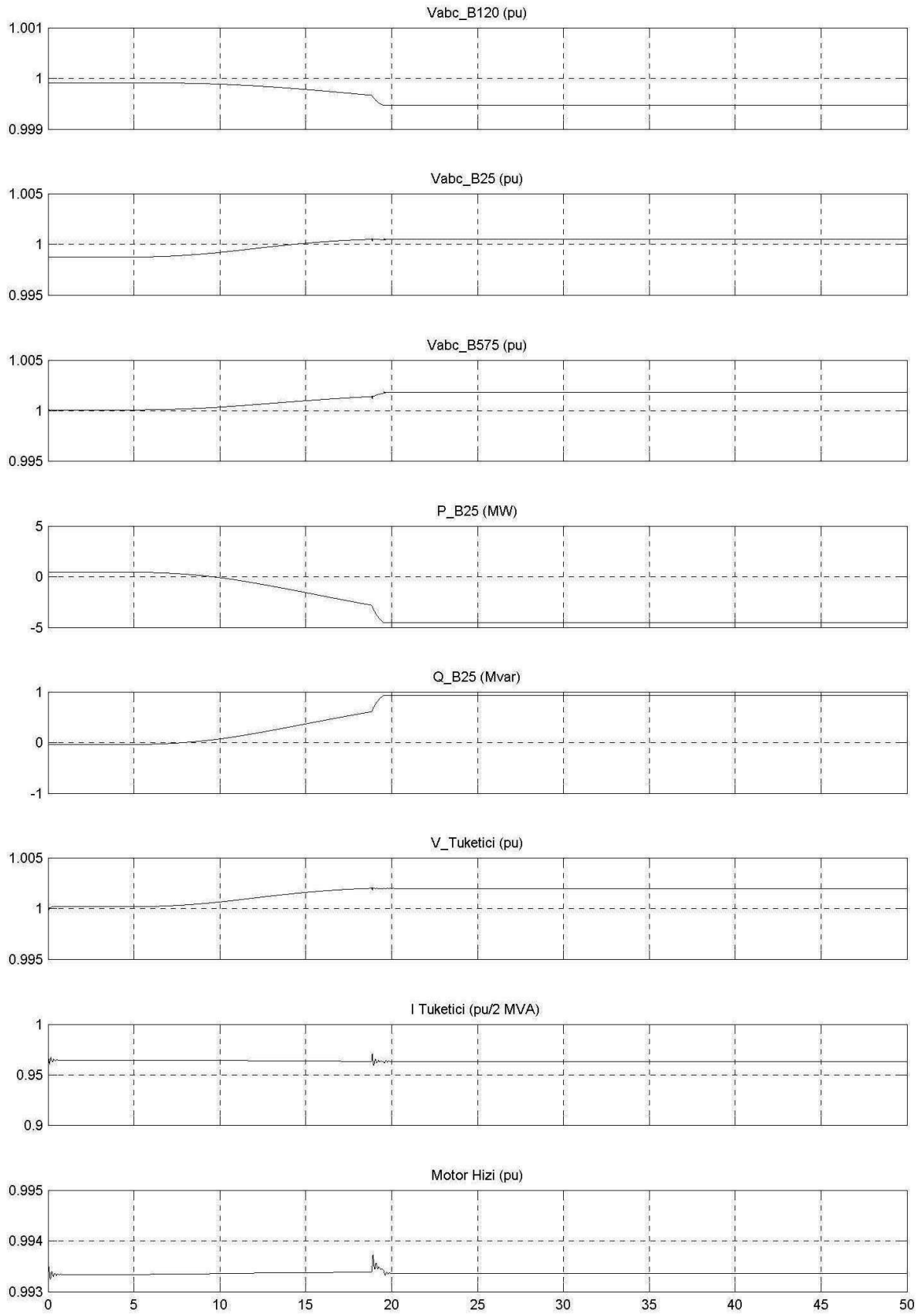
Şekil 5.5. Arızasız durumda bara verileri (2)

Rüzgar hızının 8 m/s den 14 m/s ye çıkışı ile beraber türbin açısai hızı yaklaşık 0.8pu dan 1.2pu ya yükselir. Başlangıç koşullarında türbin bıçaklarının pitch açi derecesi sıfırdır. Sonra açi derecesi mekanik gücü sınırlamak için sıfır dereceden 0,69

dereceye yükselir. Türbin gerilimi 1 pu da tutabilmek için yaklaşık 0,9Mvar reaktif güç tüketir.



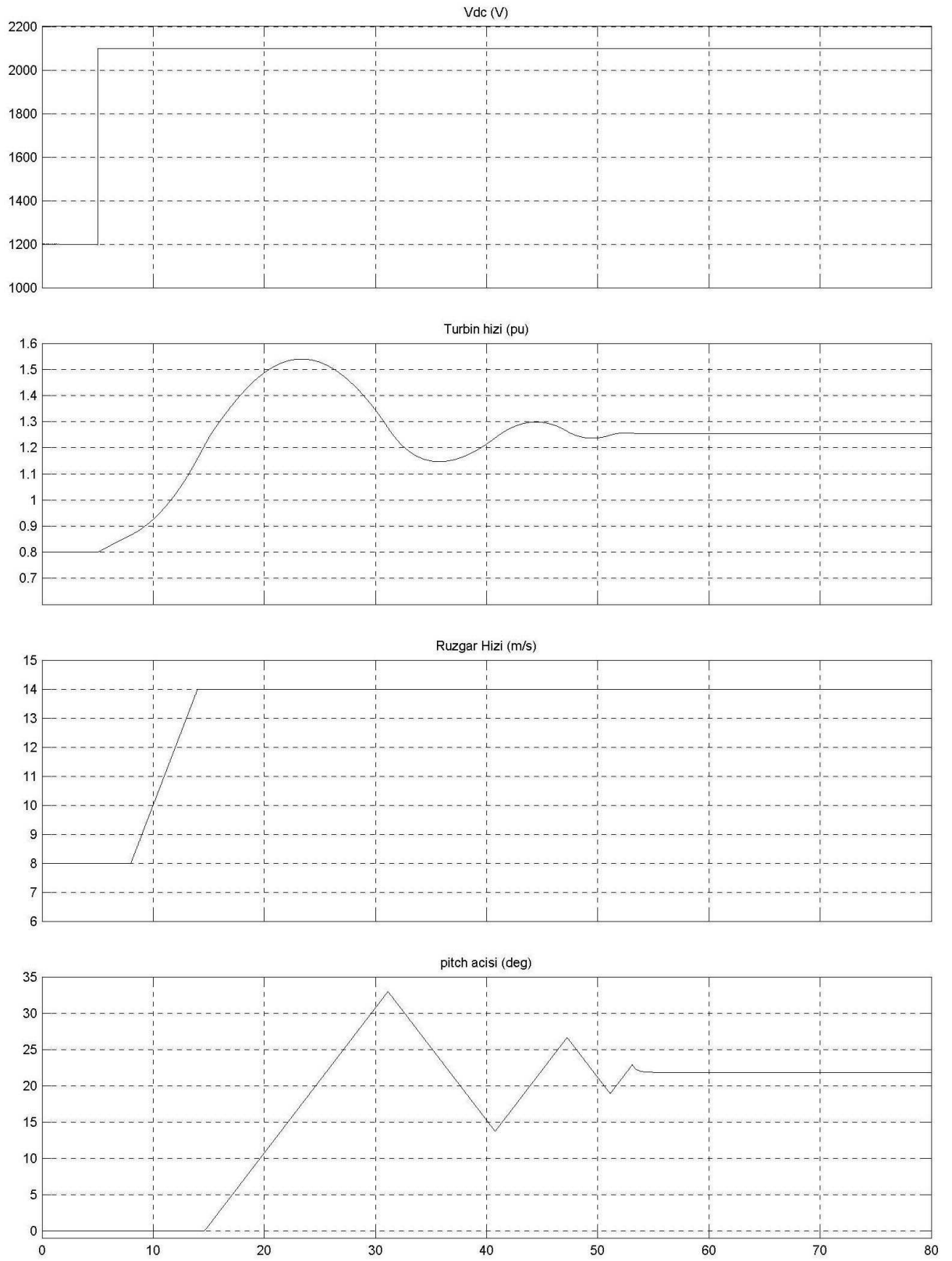
Şekil 5.6. Arızasız durumda tüm türbin verileri



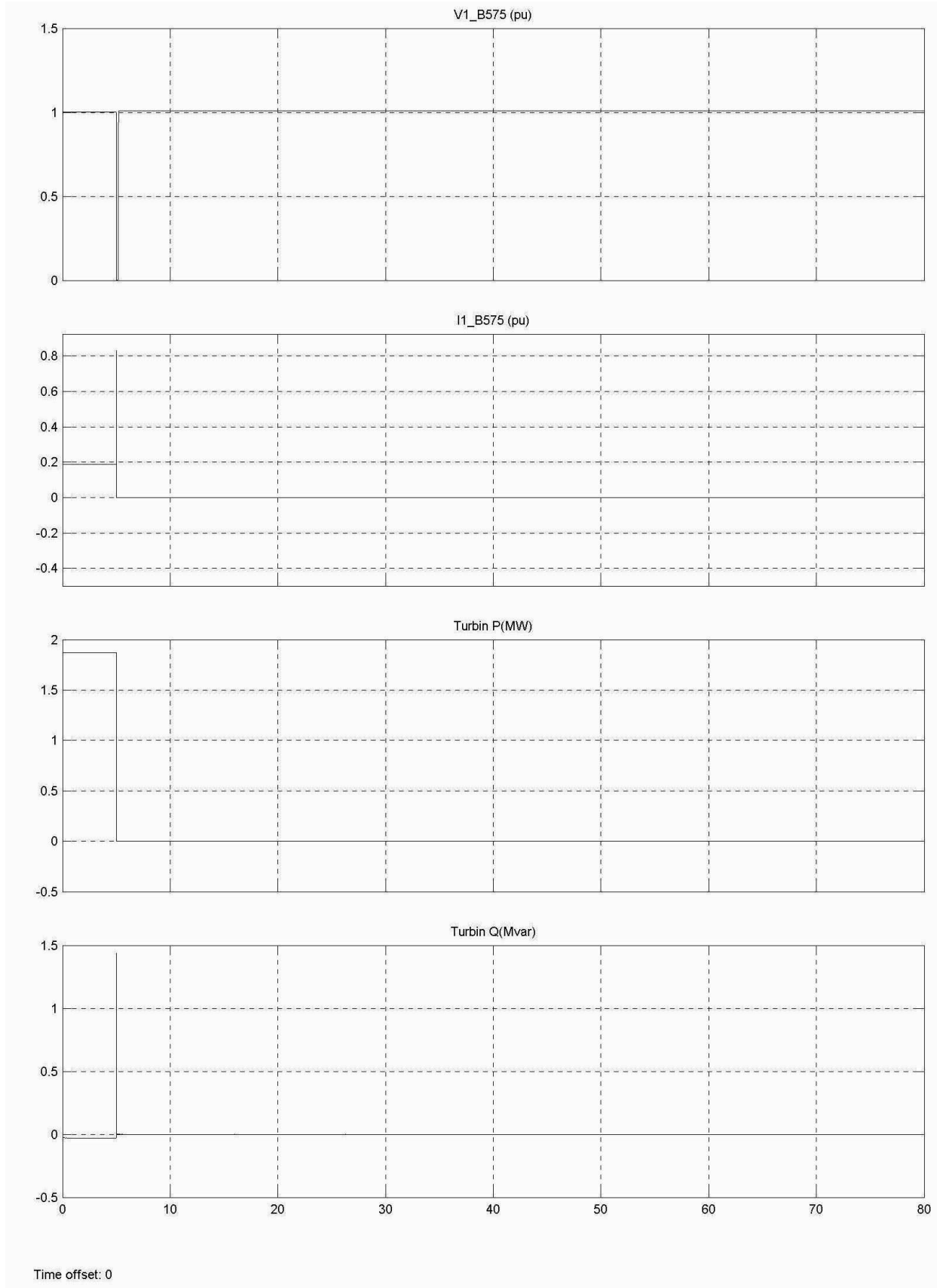
Şekil 5.7. Arızasız durumda tüm bara verileri

### 5.2.2. 34,5 KV sistemdeki hata benzetimi

Tüketim merkezinin bulunduğu barada beşinci saniyede de meydana gelen üç faz kısa devre arızası meydana geldiği düşünülmüştür. Arıza oluşumu senaryosu için tüketim merkezi üzerinde bulunan arıza bloğu kullanılacaktır. Blok özelliklerinde arızanın hangi fazlarda olması istendiği ve arıza esnası da toprak direncinin değeri atana bilmektedir. Var sayılan hatamız rüzgar hızının artmaya başlamadan üç saniye önce başlayarak beşinci saniyede olduğu düşünülecek. Yine blok özelliklerinde atanan değer olan 9/50 sn sürdürülecektir. Algoritması gereği koruma blokları açama komutunu verdirecek ve rüzgar çiftliği ile tüketim merkezi kesicileri açarak şebeke bağlantısını keseceklerdir. Bu durumda şebeke bağlantısı kesilen tüketim merkezi motor elemanı sahip olduğu enerji bitene kadar düşük hızla hareketine devam edecektir. Aynı zamanda şebeke bağlantısı kalmayan rüzgar türbini boşa çalışma durumunu alacaktır. Ani olarak yükün kalkmasıyla türbin hızı ani artış gösterecektir. Bu artışı rüzgar hızının artışı da destekleyecektir. Yükün ani kalkışı ile birlikte DC bara gerilimi 1200 V den yaklaşık 2000 V değerlerine çıkacak, mekanik güvenlik sağlanabilmek için rüzgar verimliliğini düşürülecek bunun içinde kanat açısı arttırılacak. Bu artış güvenli açılal hız yakalana kadar sürecektir. Son durumda türbinde endüklenen gerilim 575 V ile sabit kalıp açan kesiciler sebebiyle şebekeye enerji verimi olmayacaktır. Bu yüzden arıza anıyla beraber aktif ve reaktif güçler sıfır olacaktır. Beşinci saniyede te meydana gelen arıza ile beraber arıza barasında gerilimlerin düşüşü akımın ani artışı görülecek tüketim merkezi kesicisi açmasıyla baranın çektiği akım değeri sıfıra düşecek, arızanın 9/50 saniye sonra kalkmasıyla da gerilimlerin tekrardan 1 pu değerlerini aldıkları görülecektir.

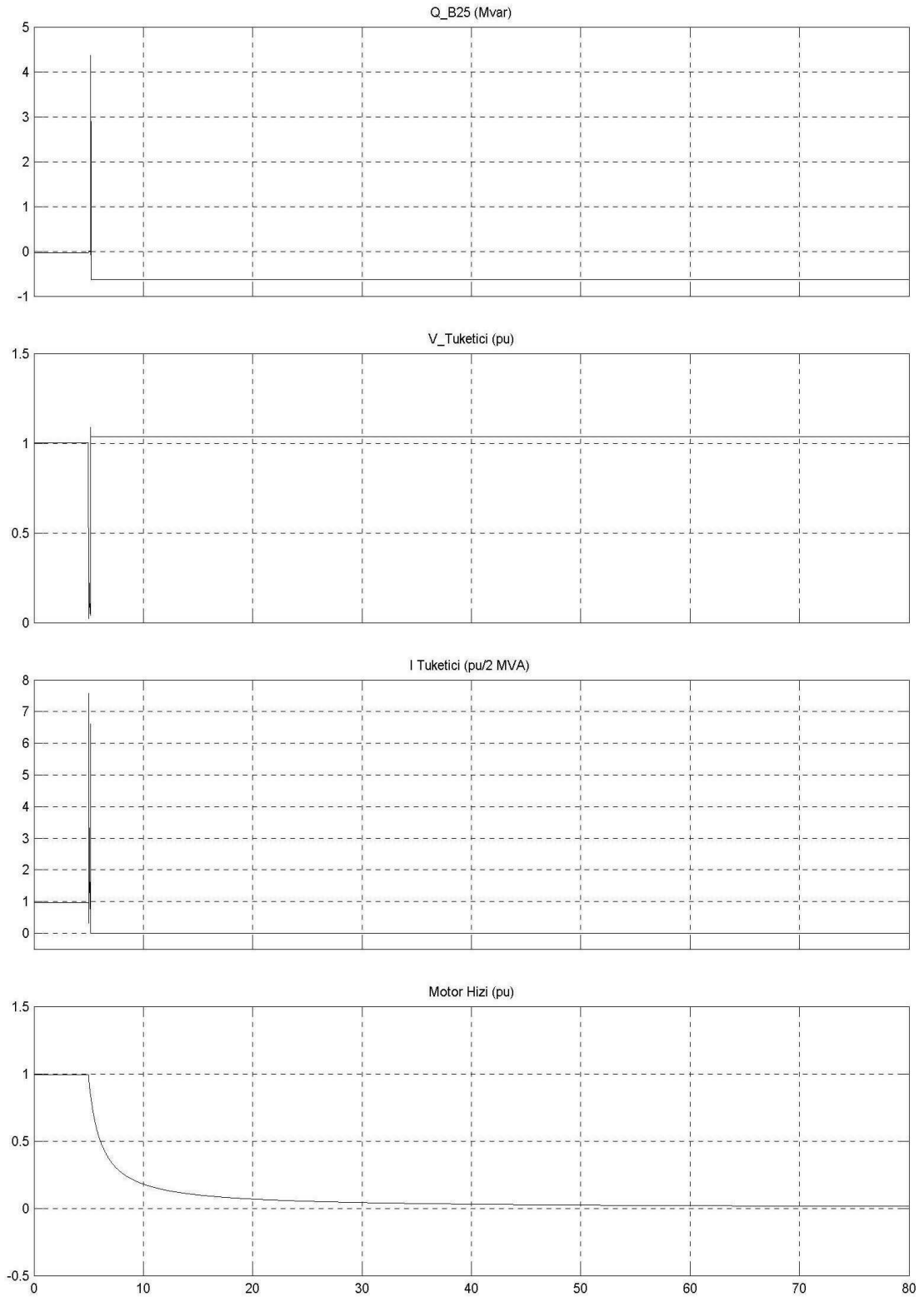


Şekil 5.8. Arıza durumunda türbin verileri (1)



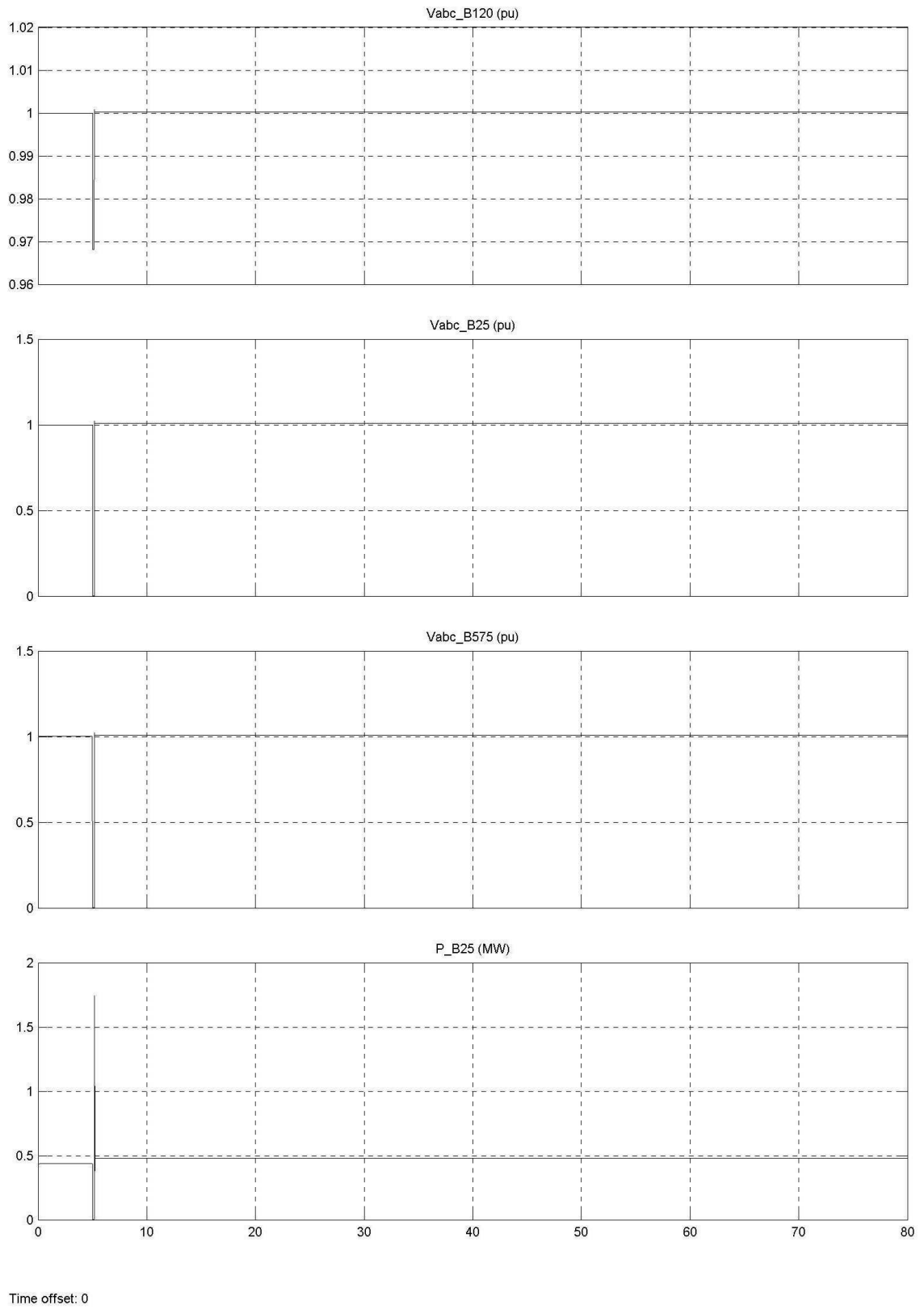
Şekil 5.9. Arıza durumunda türbin verileri (2)



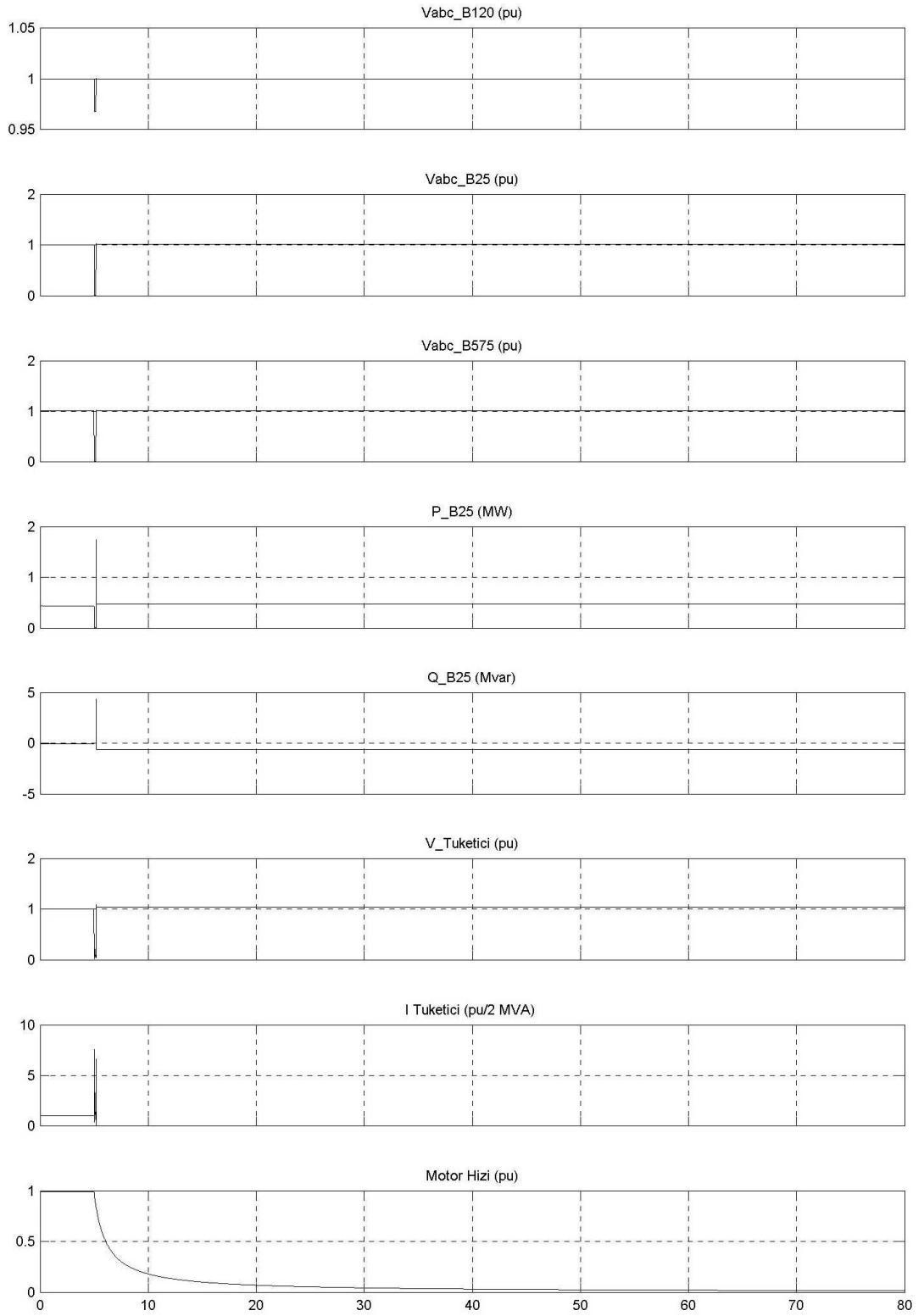


Time offset: 0

Şekil 5.10. Arıza durumunda bara verileri (1)

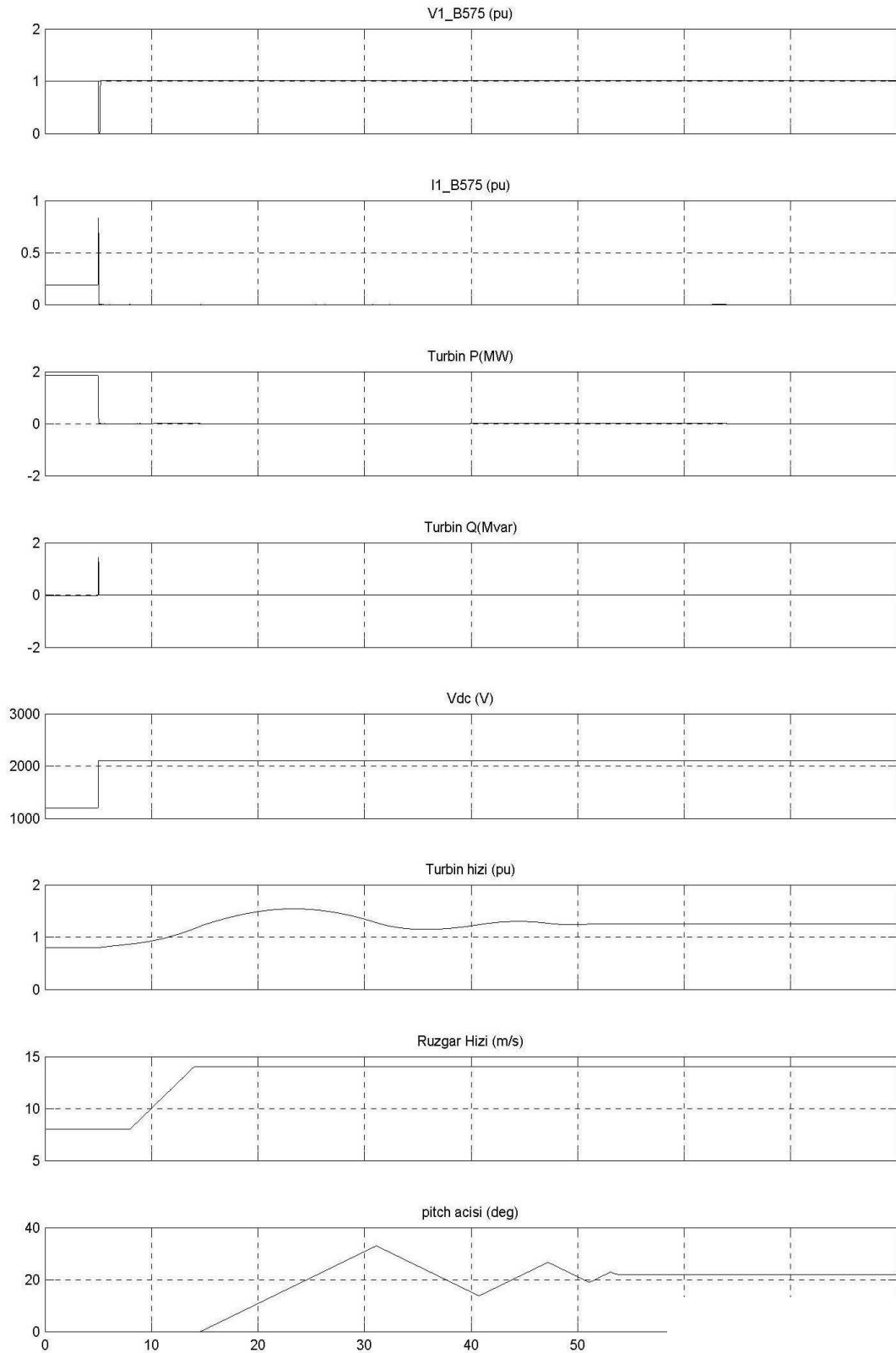


Şekil 5.11. Arıza durumunda bara verileri (2)



Time offset: 0

Şekil 5.12. Arıza durumunda tüm türbin verileri



Time offset: 0

Şekil 5.13. Arıza durumunda tüm bara verileri

## BÖLÜM 6. SONUÇLAR

Rüzgar santralleri, kanatlarına etkiyen gücün ani ve çok hızlı değişim gösterdiği şartlarda çalışmak durumundadır. Bu nedenle gelişmiş kontrol sistemlerine ihtiyaç duyarlar. Rotor hızlarının ani azalması ve artması durumları da dahil olmak üzere işletme süresince elde edilebilecek gücü ve dolayısı ile verimi maksimumda tutabilmek, ayrıca anormal işletme şartlarında da güvenlik sistemlerini çalıştırmak kontrol sistemlerinin görevidir.

Bu çalışmada rüzgar santrali modellerinin mekaniksel, elektriksel yapısı ve genel anlamda çevresel etkileri incelenmiştir.

Rüzgar hızının düşük olması durumunda, üretilen gerilim anma geriliminin altında kalır ve yeterli seviyede gerilim üretilemez. Böyle durumlarda genellikle rüzgar santrali ve fotovoltaik santralin birlikte çalıştığı hibrid sistemler kullanılır. Bu hibrid sistemin yapısı, Ek-1 gösterildiği gibidir. Burada rüzgar santralinin yetersiz kaldığı ve gerilim üretilmediği durumlarda yük, fotovoltaik santral tarafından doldurulan akü grubu ile beslenir.

Sonuç olarak, rüzgar enerjisi;

- a. Asit yağmurlarına yol açmayan,
- b. Atmosferik ısınmaya yol açmayan,
- c. CO<sub>2</sub> emisyonu olmayan,
- d. Radyoaktif etkisi olmayan,
- e. Hammadde sıkıntısı olmayan, sürekli bir hammaddesi olan,
- f. Teknolojik gelişmesi hızlı ve modern,
- g. Kısa sürede tesisi kurulabilen,
- h. Dışa bağımlı olmayan/döviz kazandırıcı,

- i. Doğal bitki örtüsü ve insan sağlığına olumsuz etkisi olmayan, ekonomik ve sağlıklı bir enerji kaynağıdır. Diğer enerji türlerini destekleyerek, doğal kaynakların tüketilmesini geciktirecek ve yeni teknolojilerin gelişmesi için zaman sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] UYAR,T.S., Türkiye de Rüzgâr Enerjisi Kullanım Seçeneklerinin Belirlenmesi, Türkiye 4. Enerji Kongresi, İzmir,1984
- [2] ÇABUK,A., Türkiye'nin Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin İncelenmesi ve Optimal Kullanım Kriterlerinin Saptanması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2000
- [3] Power Control Of Wind Turbines,  
<http://www.windpower.org/en/tour/wtrb/powerreg.htm>, Ağustos 2009
- [4] Wind Energy Information Brochure German Wind Energy Institute,  
<http://www.dewi.de/dewi/themen/magazin/18/index.php?id=44>, Ağustos 2009
- [5] El-Wakil, M.,M (University of Wisconsin at Madison)., Powerplant Technology, McGraw-Hill, 1984
- [6] Türkiye Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli, 3E dergisi, 36.sayı, 2007
- [7] The Wind Turbine Components and Operation, Bonus Info Autumn, 1999
- [8] ŞEFTER,Y., ROJDESTVENSKIY, İ. V., Poluavtomatiçeskle, stantsi inertsiomım akkumlyatorom, Vestnik sel'skohozyay stveunoy nauki,1984
- [9] FARZANE, N. G., MEHDİYEY, A. M., Turbiniye rashodomeri s avtomatiçeskoy korrektsiyey pokazaniy na izmeneniye vyzakosti potoka, Neftigaz, 1995
- [10] KOÇ, R., Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretim Mekanizması Tasarım ve İmalatı Yüksek Lisans Tezi, 1995
- [11] Wind Resource Assessment Handbook AWS Scientific Inc., NY., April 1997
- [12] American Wind Energy Association Homepage, <http://www.awea.org>, Nisan 2009
- [13] LİMA, M., L., SİLVIÑO, J., Controller For Variable-Speed, Adjustable-Pitch Wind Energy Conversion System' Proceedings of IEEE International

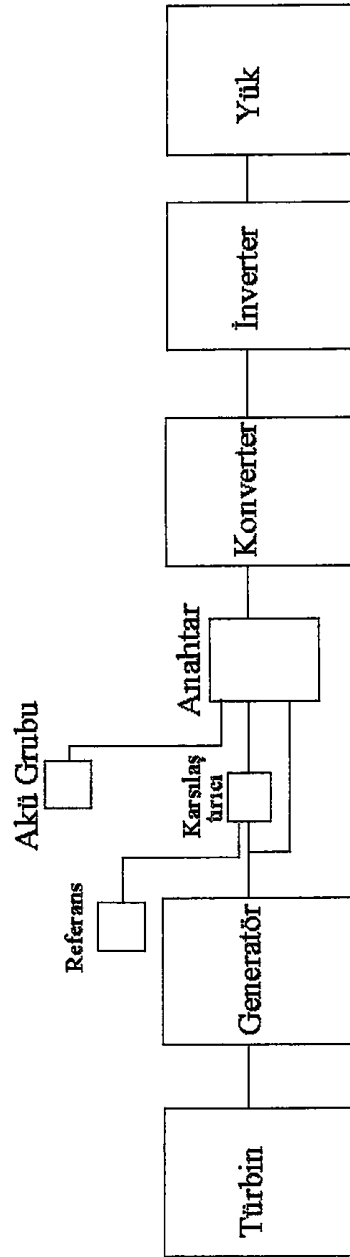
Symposium on Industrial Electronics,1999

- [14] BARBARİ, S., HOFFMAN, W., Discrete Time Control of a Three Phase 4 Wire PWM Inverter With Variable DC Link Voltage And Battery Storage for PV Application' Chemnitz, 1999
- [15] KHATER, F., Power Electronic in Wind Energy Conversion Systems Proceedings of Energy Conversion Engineering Conference, 1996
- [16] VELAYUDHAN, C., Solid State Controller For a Wind Driven Slip-Ring induction Generator, Proceedings of IEEE, 1999
- [17] RASHID, H, M., Power Electronics Circuits and Devices' pp, 320-323, New Jersey,1999
- [18] GÜRDAL, O., Güç Elektroniği Analiz, Tasarım ve Simülasyonu, 261s. , Ankara, 2004
- [19] ÇAKIR, H., Güç Sistemleri Analizi, Nesil Yayınlan, 190 s., İstanbul, 1986
- [20] Endüstriyel- Otomasyon Dergisi, Haziran, 2005

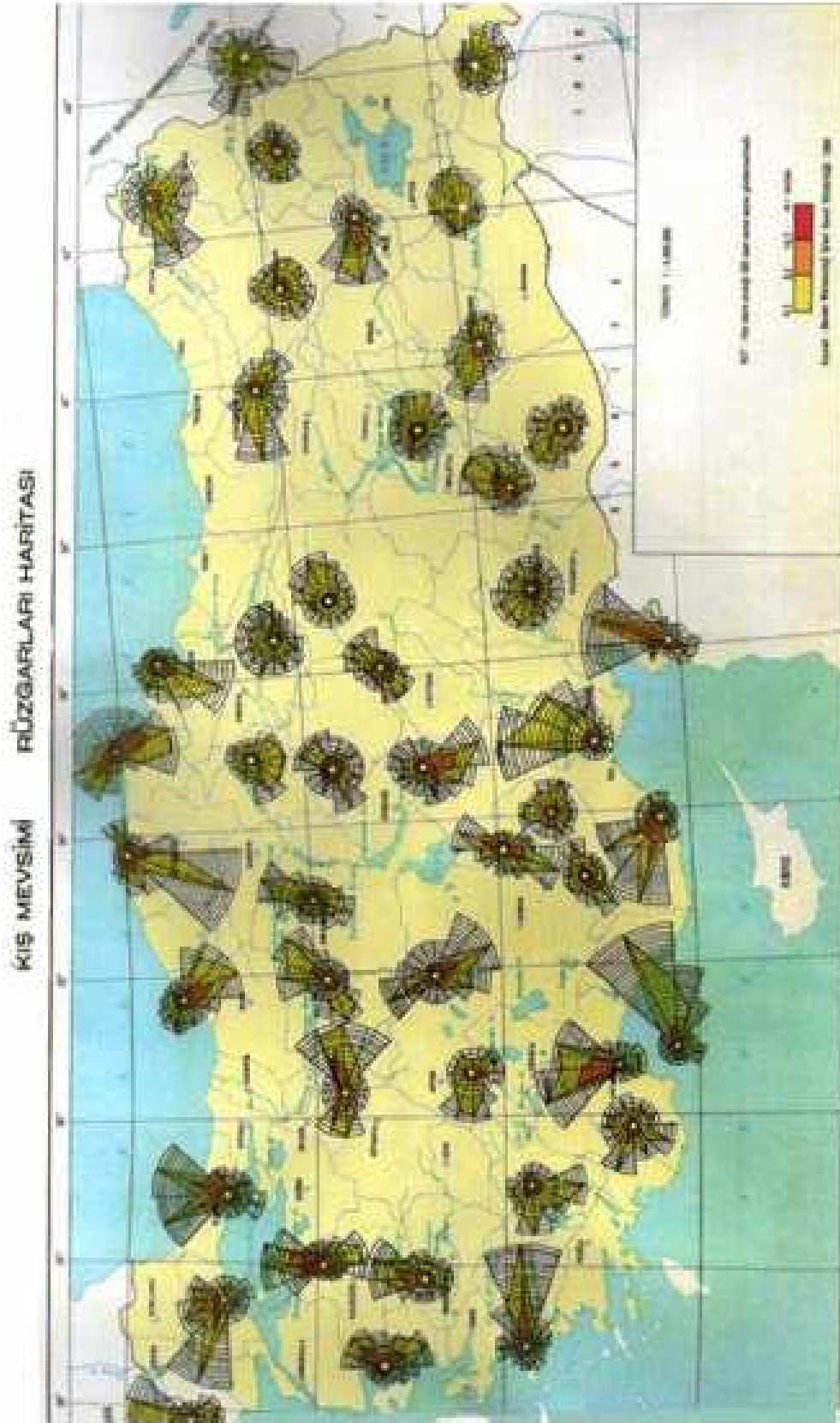


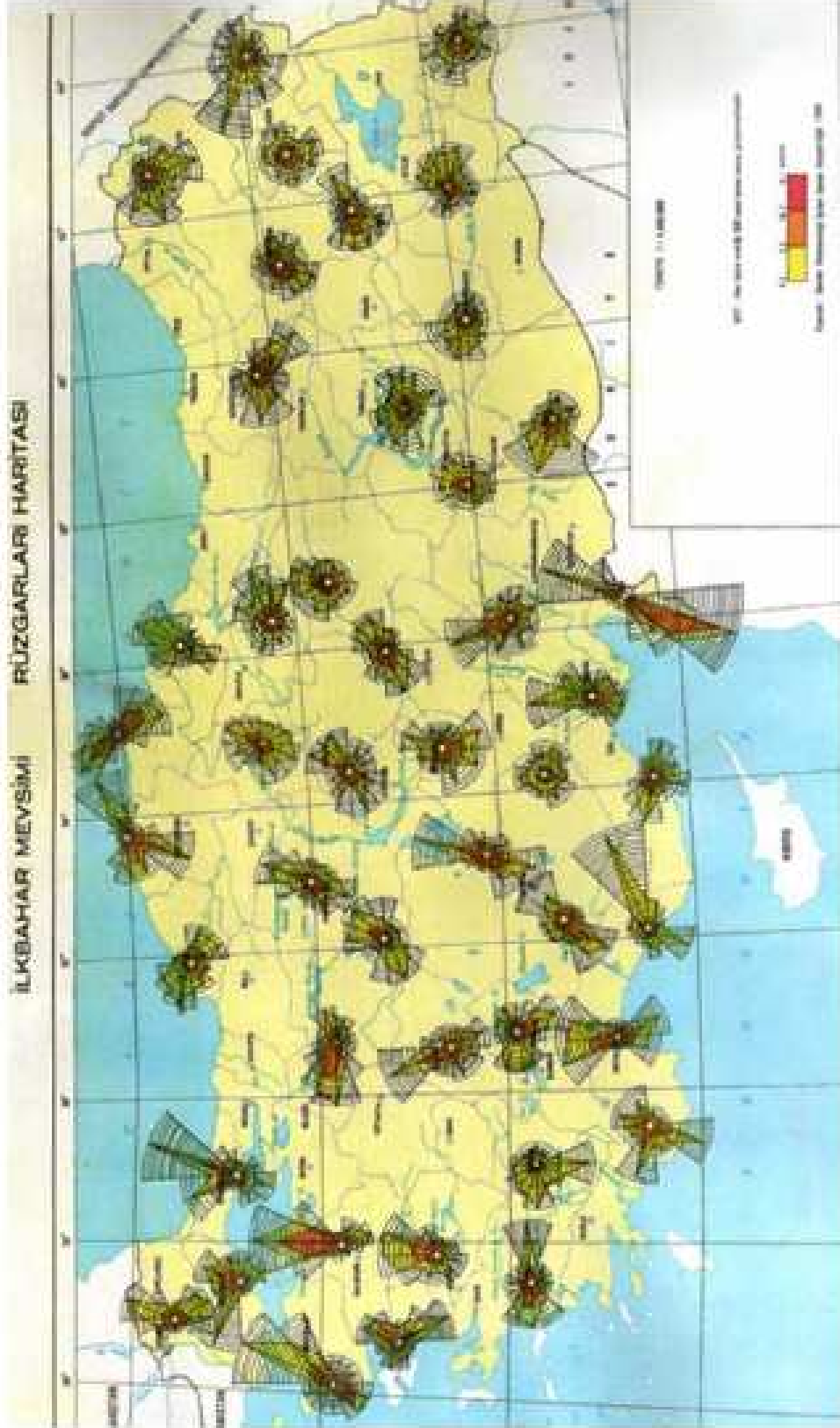
## EKLER

### EK-A



## EK-B

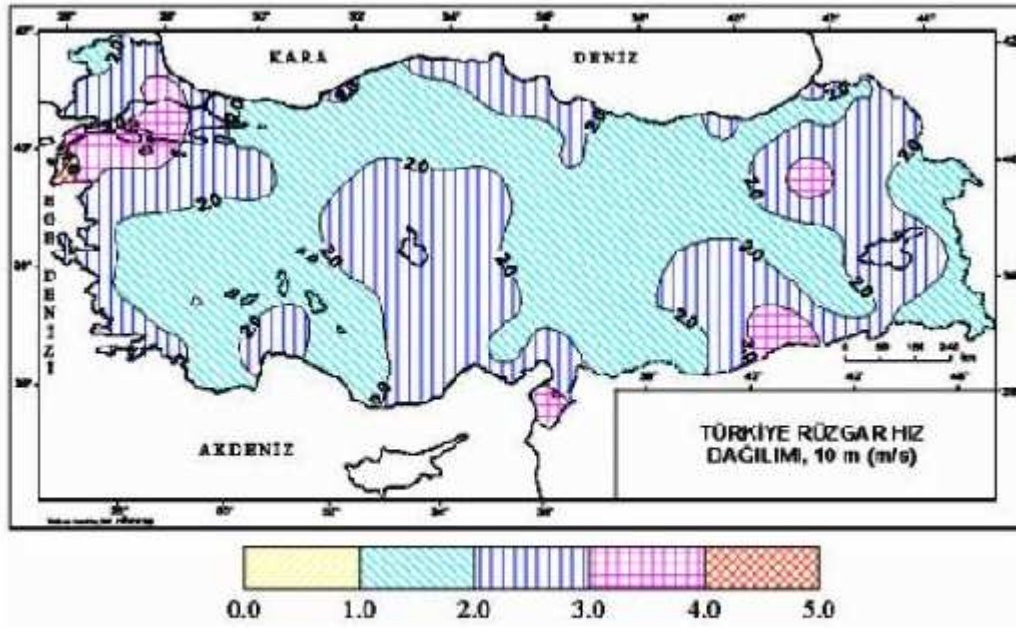






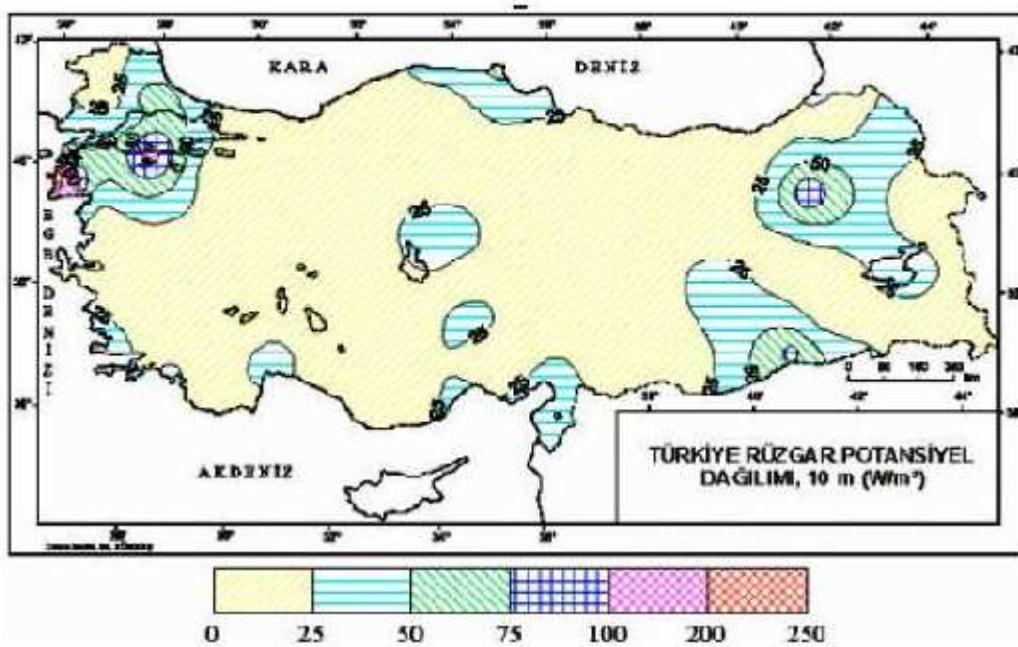


## EK-F



## Harita 2 : TÜRKİYE RÜZGAR POTANSİYEL DAĞILIMI

Kaynak : Yeri ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Araştırma Birimi



## ÖZGEÇMİŞ

Tutku YİĞİT, 01.06.1983 de Ankara' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Düzce'de tamamladı. 2001 yılında Düzce Anadolu Öğretmen Lisesi, Fen Bölümünden mezun oldu. 2001 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünü 2005 yılında bitirdi. 2003 yılında ikinci üniversite olarak Anadolu Üniversitesi Açık Öğretim Fakültesi Kamu Yönetimi bölümüne başladı. İlk üniversite mezuniyetinden 2005 yılında sonra Düzce' de AL-KA İnş. Nak. Taah. Tic. Ltd. Şti. firmasında Elektrik-Elektronik mühendisi olarak iş hayatına başladı. Şirket içinde farklı pozisyonlarda çalıştıktan sonra şuan yine AL-KA İnş. Nak. Taah. Tic. Ltd. Şti. firmasında, Türk Telekomünikasyon A.Ş. Erişim Şebekeleri Bakım Onarım Ve Arıza Islah İhalesi kapsamında Düzce ilindeki santral sahalarında Erişim Şebekeleri Tesis Standartları ve Malzeme Temin esaslarına göre her türlü kablolu erişim şebekesi ve alt yapı işleri ile proje işlerinin kısım kısım veya tamamının yapılması ve bu işlerde kullanılacak malzemelerin temin edilmesi ayrıca her türlü Bakım-Onarım ve Arıza Islahının yapılması işinin İl Sorumlusu/ Yöneticisi olarak görev yapmaktadır.