

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR ENERJİSİ TÜRBİN SİSTEMLERİ İÇİN GERÇEK ZAMANLI DİNAMİK
ANALİZ SİMÜLATÖRÜ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

ENVER ŞİPAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNELERİ VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMANI
DOÇ.DR. ERKAN MEŞE**

İSTANBUL, 2011

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR ENERJİSİ TÜRBİN SİSTEMLERİ İÇİN GERÇEK ZAMANLI DİNAMİK
ANALİZ SİMÜLATÖRÜ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

ENVER ŞİPAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNELERİ VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMANI
DOÇ.DR. ERKAN MEŞE**

İSTANBUL, 2011

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR ENERJİSİ TÜRBİN SİSTEMLERİ İÇİN GERÇEK ZAMANLI DİNAMİK
ANALİZ SİMÜLATÖRÜ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Enver ŞİPAR tarafından hazırlanan tez çalışması 17/02/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Erkan MEŞE

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Erkan Meşe

Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. A. Faruk Bakan

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Engin Özdemir

Kocaeli Üniversitesi

ÖNSÖZ

Rüzgar enerjisi türbin sistemleri için gerçek zamanlı dinamik analiz simulatorünün gerçekleştirilmesi konulu tez çalışmamda, başlangıç olarak tarihteki rüzgar türbin kullanımından, günümüz modern yüksek güçlü türbinlere kadar olan sistemler incelenmiştir. Ardından dünyadaki ve Türkiye'deki rüzgar enerjisinin kullanımı ve tarihsel gelişimine değinilmiştir. Bu genel bilgilerin ardından rüzgar türbin sistemlerinde kullanılan jeneratör çeşitleri, güç elektroniği devreleri, elektriksel ve mekaniksel sisteme özgü matematiksel bağıntılar verilmiştir. Ardından tüm sistem bir bütün olarak değerlendirilip modellemeye geçilmiştir. Modelleme ve modellenen sistem ile ilgili olan bağıntılar verilmiştir. Modellenen devre ve bilgisayar üzerinde çalışan yazılım kısa ifadeler ile belirtilmiştir. Yılların bilgi ve tecrübesi ile gerek aldığım dersler, gerek ders dışındaki tavsiyeleri ile sayın Prof. Dr. Hacı BODUR'a, tez çalışmalarım sırasında bana yardımcı olup yol gösteren, her türlü desteğini veren sayın Doç. Dr. Erkan MEŞE'ye teşekkürlerimi borç bilirim. Ve tabiki; bugüne kadar maddi ve manevi olarak beni destekleyen sevgili aileme ve tüm dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Mart, 2011

Enver ŞİPAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMA LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT.....	xviii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	1
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2	
RÜZGÂR ENERJİ SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ	3
2.1 Tarihsel Gelişimi	3
2.2 Dünyada Rüzgar Enerjisine Bakış	7
2.3 Dünya Rüzgar Enerjisi Potansiyeli	8
2.4 Rüzgar Enerjisi Çalışmaları	12
2.5 Rüzgâr Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları.....	13
2.5.1 Rüzgâr Enerjinin Avantajları.....	13
2.5.2 Rüzgar Enerjisini Dezavantajları.....	14
BÖLÜM 3	
TÜRKİYE’NİN RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ	15
3.1 Türkiye’deki Rüzgâr Enerji Santralleri	20

BÖLÜM 4

RÜZGAR TÜRBİNLERİ.....	23
4.1 Rüzgar Enerjisi Türbinlerinin Tanımı.....	23
4.1.1 Rüzgar Türbinlerinin Özellikleri ve Yapısı.....	23
4.2 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	25
4.2.1 Rüzgar Kuvvetinden Yararlanma Şekline Göre Sınıflandırma.....	25
4.2.1.1 Rüzgârın Direnç Kuvvetinden Yararlanılan Türbinler.....	25
4.2.1.2 Rüzgarın Kaldırma Kuvvetinden Yararlanılan Türbinler.....	26
4.2.1.3 Yükselen Hava Akımlı Rüzgar Türbinleri	27
4.2.1.4 Pervane Ekseninin Konumuna Göre Sınıflandırılması.....	27
4.2.1.4.1 Yatay Eksenli Türbinler.....	28
4.2.1.4.2 Düşey Eksenli Türbinler.....	29
4.3 Modern Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerini Oluşturan Elemanlar	31
4.3.1 Türbinin Kule Üst Kısmı (Nacelle).....	32
4.3.2 Kanatlar	33
4.3.3 Kanatların Bağlantı Noktası.....	34
4.3.4 Düşük Hız Mili (Şaftı)	34
4.3.5 Dişli Kutusu.....	35
4.3.6 Mekanik Frenli Yüksek Hızlı Mil (Şaft)	35
4.3.7 Elektrik Jeneratörü.....	35
4.3.8 Rota (Yaw) Mekanizması.....	37
4.3.9 Elektronik Kontrolör.....	37
4.3.10 Hidrolik Sistem	37
4.3.11 Soğutma Birimi Fanı.....	37
4.3.12 Kule	38
4.3.13 Kule Seçimi.....	38
4.3.14 Anemometre ve Rüzgar Vanası.....	39
4.3.15 Yatak.....	40
4.3.16 Hız kontrolörü	41
4.3.17 Yönelme sürücüsü ve yönelme motoru.....	41
4.3.18 Rüzgar Türbinlerinden Elektrik Enerjisi Üretimi	41

BÖLÜM 5

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN JENERATÖR ÇEŞİTLERİ.....	42
5.1 Giriş	42
5.2 Jeneratör Seçim Kriterleri	44
5.2.1 DC Makine.....	44
5.2.2 Asenkron Makineler.....	44
5.2.3.1 Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör.....	45
5.2.3.2 Bilezikli Asenkron Jeneratör.....	46
5.2.3.3 Asenkron Jeneratörlerin Çalışma Şekli.....	46
5.2.3.4 Asenkron Jeneratörlerin Normal Çalışma Şartlarında Kullanım- Karakteristiği.....	46
5.2.3.5 Dişli Sistemi veya Çok Kutuplu Direk Sürücü	48

5.3 Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratörler (PMSG).....	49
5.3.1 Gerilim Regülasyonu	51
5.3.2 Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratörlerin Kontrolü.....	53
5.3.2.1 Sistemin Transfer Fonksiyonu ve Matematiksel Bağlılıkları.....	53
5.4 Senkron Jeneratörler	59
5.4.1 Yuvarlak Rotorlu Senkron Jeneratörler.....	59
5.4.1.1 Yapısı	60
5.4.2 Çalışması	63
5.5 Yüksek Gerilim Makinesi	63
5.6 Grafikler ve Analizler	65
 BÖLÜM 6	
RÜZGAR SANTRALLERİNDE KULLANILAN GÜÇ ELEKTRONİĞİ BİLEŞENLERİ	69
6.1 Güç Dönüştürücüleri	69
6.1.1 Yumuşak Anahtarlama Yolu Vericiler (Soft Starter)	69
6.1.2 Kapasitör Bankları	70
6.1.3 Diyotlu Kontrolsüz Doğrultucular	71
6.1.4 Geri Dönüştürücü (Back – To – Back) PWM – VSI Dönüştürücü	71
6.1.5 Güç Sistemlerinde Kullanılan Büyük Kapasiteli İnverterler	74
6.1.6 Tandem Konverter	76
6.1.7 Rezonans Konverter	78
 BÖLÜM 7	
RES MATEMATİKSEL DENKLEMLERİ	82
7.1 RES Enerji Dönüşümü.....	82
7.1.1 Rüzgar Hızı ve Güç Arasındaki İlişki.....	82
7.2. Atmosferik Şartların Rüzgar Gücü Üzerindeki Etkileri	85
7.2.1. Sıcaklığın Hava Yoğunluğuna Etkisi	85
7.2.2 Rakımın Hava Yoğunluğuna Etkisi	86
7.2.3 Kule Yüksekliğinin Etkisi	89
7.2.4 Rüzgârdan Yakalanan Mekaniksel Güç	90
7.2.5 Türbin Rotorundan Alınabilecek Faydalı Güç	95
 BÖLÜM 8	
8.1 Karakteristik Eğri Metodu	99
8.2. Ortalama Güç Metodu	102
8.3. Maksimum Güç Metodu	102
 BÖLÜM 9	
RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ŞEBEKEYE BAĞLANMASI.....	104
9.1 Filtre Çeşitleri	107
9.1.1 L-Filtre	107
9.1.2 LCL – Filtre.....	108

9.1.3 Transformatör	109
9.1.4 Şebeke	110
9.1.5. Asenkron Jeneratör Çeşitlerine Özgü Modeller.....	111
9.1.6 Senkron Jeneratör Çeşitlerine Özgü Modeller.....	112
BÖLÜM 10	
BİLGİSAYAR ORTAMINDA SİSTEMİN MODELLENMESİ.....	116
10.1 Rüzgârın Modellenmesi	117
10.1.1 Süper pozisyon Teoremine Göre Rüzgar Hızının Hesaplanması	117
10.1.2. Van Der Hoven ve Von Karmen Modeli Rüzgar Hızının Hesaplanması.....	119
10.2 Türbinin Modellenmesi	120
10.3 Direk Sürülebilen Jeneratör	121
10.4 Mil (Şaft) Dinamiği.....	122
10.5 Doğrultucu ve VSI İnverter Kontrolü.....	123
10.6 Değişken Hız Kontrolü	124
10.7 Çift Çıkışlı Asenkron Jeneratörün Şebekeye Bağlanması	125
BÖLÜM 11	
TASARLANAN SİSTEM	126
11.1 Sistem.....	127
11.1.1 PC ve Kontrol Paneli.....	128
11.1.2 PMSG Modeli	132
11.1.3 Türbin Parametreleri.....	132
11.2 Donanım.....	132
11.3 Yazılım	135
11.4 Devre.....	141
11.4.1 Devre Üzerinde Kullanılan Ekipmanlar	142
11.4.2 Akım Transtüseri	142
11.4.3 Gerilim Transformatörü	143
11.4.4 Motor Sürücü Devresi	144
11.4.5 Röle Sürme Devresi.....	147
11.4.6 Haberleşme Arayüzü.....	148
BÖLÜM 12	
SONUÇ VE ÖNERİLER	150
KAYNAKLAR.....	151
EK-A	
5 HAZİRAN 2009 TARİHİNDE SUNULAN “RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ” İSİMLİ BİLDİRİ.	154
EK-B	

PC ÜZERİNDE ÇALIŞAN YAZILIMIN KODLARI	161
EK-C	
MİKRODENETLEYİCİ ÜZERİNDE ÇALIŞAN PROGRAMIN KODLARI	179
ÖZGEÇMİŞ	185

SİMGE LİSTESİ

VSI	Gerilim kontrollü inverter
CSI	Akım kontrollü inverter
PWM	Darbe genlik modülasyonu
PAM	Dalga genişlik modülasyonu
C_p	Türbin güç katsayısı
U	Rüzgâr kinetik enerjisi
M	Rüzgâr kütlesi
u	Rüzgar hızı
P_w	Rüzgâr gücü
A	Rotor süpürme alanı
ρ	Hava yoğunluğu
R	Rotor çapı
T	Sıcaklık [Kelvin]
x	Genişlik
v_d, v_q	Stator gerilimine ait d ve q eksen bileşenleri
i_d, i_q	Stator akımına ait d ve q eksen bileşenleri
λ_d	d eksen manyetik akısı
λ_q	q eksen manyetik akısı
λ_{PM}	Mıknatıs (PMSG) kutupları arasında oluşan manyetik akı.
P	Kutup sayısı
R_s	Armatür sargı direnci
L_d, L_q	d ve q eksen self endüktans değeri
p	Türev operatörü
ω	Rotor hızı
θ	Rotorun elektriksel açısı
F	Sürtünme sabiti
T_e	Elektromanyetik Moment
T_r	Yük Momenti
K_e	EMF sabiti
K_t	Moment sabiti
u	Kontrol matrisi
f(x)	Sistemin durum matrisi
H	Çıkış matrisi
T_m	Türbinin mekaniksel momenti.
J_m	Türbinin atalet momenti.

T_s	Türbinden şafta aktarılan momentin ifadesidir.
V_g	Şebeke gerilimi
f	Şebeke gerilim frekansı
n	Devir sayısı
V_{pcc}	Ortak bara gerilimi
M	Metre
kW	Kilowatt
mW	Megawatt
sn	Saniye

KISALTMA LİSTESİ

RES	Rüzgâr Elektrik Santrali
REPA	Rüzgâr Enerji Potansiyel Atlası
WEC	Dünya Enerji Konseyi
WMO	Dünya Meteoroloji Örgütü
AC	Dalgalı Akım
DC	Doğru Akım
AWEA	Amerikan Rüzgâr Enerjisi Kurumu
ADC	Analog Dijital Dönüştürücü
EİE	Elektrik İşleri Enstüt İdaresi
DMI	Devlet Meteoroloji İşleri
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme
PM	Sabit Mıknatıs
PMSG	Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratör
Mt.	Metre
SCIG	Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör
PC	Kişisel Bilgisayar
PCC	Ortak Bara
WECS	Rüzgâr Enerjisi Çevrim Sistemi
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
B2B	Back to Back
GUI	Graphic User Interface

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1	Gedser rüzgâr türbini	4
Şekil 2. 2	Darrieus tipi dikey eksenli rüzgar türbinleri.....	5
Şekil 2. 3	Deniz üstü (Off Shore Wind) rüzgar santralleri	6
Şekil 2. 4	İzmir - Çeşme, Alaçatı mevkiinde bulunan Türkiye'nin ilk rüzgar santrali	7
Şekil 2. 5	Yatay eksenli rüzgar türbini ve bir rüzgar çiftliği.....	13
Şekil 3. 1	Türkiye rüzgar atlası[2].....	16
Şekil 3. 2	Dünyadaki rüzgar enerjisindeki kurulu gücün yıllara göre değişimi.	20
Şekil 4. 1	Savonius rüzgar türbini ve yapısı.....	26
Şekil 4. 2	Darrieus tipi rüzgar türbini.....	27
Şekil 4. 3	Yatay eksenli bir rüzgar türbini	28
Şekil 4. 4	Düşey eksenli rüzgar türbini.....	30
Şekil 4. 5	Rüzgar türbininin temel parçaları.	31
Şekil 4. 6	Modern rüzgar türbinlerinde kullanılan tipik bir nacelle yapısı.....	33
Şekil 4. 7	1,5 MW. Gücündeki bir rüzgar türbininin saftı	34
Şekil 4. 8	Dişli kutusu	35
Şekil 4. 9	AC jeneratör	36
Şekil 4. 10	Farklı güçlerdeki rüzgar türbinlerinin kule uzunlukları[5].....	39
Şekil 4. 11	Türbin boyutlarının tarihsel olarak gelişimi.	40
Şekil 4. 12	Bir rüzgar türbin sistem yapısı.	40
Şekil 4. 13	Rüzgar türbin sistemlerinde enerji dönüşümü	41
Şekil 5. 1	Sincap kafesli asenkron makinenin görünüşü.....	45
Şekil 5. 2	Çift kutuplu bir asenkron makinedeki manyetik akının izlediği yörünge....	45
Şekil 5. 3	Jeneratör olarak kullanılan bir SKAJ'ın şebekeye bağlantı şeması.....	45
Şekil 5. 4	Asenkron Motorun verimli çalışma yüzey 3D görüntüsü	48
Şekil 5. 5	PMG'nin ön görünüşü.	49
Şekil 5. 6	PMSG' ün gerilim regülasyon eğrisi	50
Şekil 5. 7	Resistive yüklenme durumunda PMSG' nin gerilim regülasyonu eğrisi	51
Şekil 5. 8	Şebeke tarafı tristör kontrollü inverter sistemin blok şeması	52
Şekil 5. 9	Geri dönüşlü PWM dönüştürücülü sistemin blok şeması	52
Şekil 5. 10	Yarı kontrollü doğrultucu ve mosfetlerden oluşan sistemin blok şeması ..	53
Şekil 5. 11	DC/DC dönüştürücülü inverter sistemin blok şeması.....	53
Şekil 5. 12	PMSG'ün eşdeğer devresi	54
Şekil 5. 13	Rüzgar hızı ve türbin rotor hızının değişimi	57
Şekil 5. 14	Rotorun devir sayısına bağlı olarak, Moment ve Güç değişim eğrisi.....	58

Şekil 5. 15	Vd – Vq ve Id – Iq değişim eğrisi	58
Şekil 5. 16	Çıkık kutuplu ve silindirik kutuplu senkron makineler [8].	60
Şekil 5. 17	Çıkık kutuplu senkron makinenin moment karakteristiği [8].	61
Şekil 5. 18	Çok kutuplu bir senkron makinenin rotoru.	62
Şekil 5. 19	Yüksek gerilim düşük hızlı bir senkron makinenin üç fazlı stator sargısı. ...	62
Şekil 5. 20	Çıkık rotor, fırçasız uyarıcı ve damper sargısı.	63
Şekil 5. 21	İndüksiyon Makine ve Senkron Makinenin ağırlık – güç eğrisi [8].	65
Şekil 5. 22	Beş farklı asenkron ve iki farklı senkron makinenin fiyat – güç eğrisi [8]...	66
Şekil 5. 23	Dişli kutusunun ağırlık – güç değişim eğrisi	67
Şekil 5. 24	Dişli ağırlık eğrisi.	67
Şekil 5. 25	Dişli kutusunda bulunan yağ miktarının güce göre değişim eğrisi.	68
Şekil 5. 26	Dişli kutusunda bulunan yağ miktarının güce göre değişim ergisi.	68
Şekil 6. 1	Jeneratörün soft starter ile şebekeye bağlantı seması.....	70
Şekil 6. 2	Güç faktörünü düzeltmek için kullanılan kapasitör bankları.	70
Şekil 6. 3	Üç fazlı ac/dc dönüştürücü diyot kıyıcısı.	71
Şekil 6. 4	Geri dönüşlü (back-to-back) PWM-VSI inverterin mimarisi.....	72
Şekil 6. 5	Şebeke tarafında kullanılan IGBT'ler.....	73
Şekil 6. 6	Yüksek güçlü hibrit inverter.	75
Şekil 6. 7	İnverter kontrol sisteminin blok diyagramı.....	76
Şekil 6. 8	Tandem Konverter. Bu mimaride asenkron jeneratör kullanılmıştır.....	77
Şekil 6. 9	Üst ve alt sıra konverterin ve toplam yük akımının dalga şekilleri.	77
Şekil 6. 10	NCC mimarisi. Bu mimaride asenkron jeneratör kullanılmıştır.	79
Şekil 6. 11	NCC üzerindeki anahtarlama işlemi.....	80
Şekil 7. 1	Rüzgâr Enerjisinin Dönüşüm Aşamaları.....	82
Şekil 7. 2	Düşey eksenli rüzgâr türbininin yaklaşık alan hesabı.....	84
Şekil 7. 3	1 atm. basınç altında hava yoğunluğunun sıcaklık ile değişimi.....	86
Şekil 7. 4	Hava koridoru.....	87
Şekil 7. 5	15 °C'de hava basıncının ve yoğunluğunun rakım ile değişim eğrisi.	89
Şekil 7. 6	Bir rüzgâr türbininin maruz kaldığı rüzgar hızları.....	91
Şekil 7. 7	Cp'nin λ ile değişim ergisi.....	92
Şekil 7. 8	Rotor süpürme alanı	93
Şekil 7. 9	Kanat uç hız oranı.....	94
Şekil 7. 10	Kanat sayısı- λ dediği mi	94
Şekil 7. 11	Farklı kanat yapılarına Cp - λ değişim eğrileri	94
Şekil 7. 12	Enerji aktarımı.....	95
Şekil 7. 13	Türbine ait moment ifadesinin Cp ve λ değişimine göre elde edilişi.....	96
Şekil 8. 1	Genel bir türbin kontrol blok diyagramı.....	97
Şekil 8. 2	Rüzgâr enerjisi donuşu sistemi	98
Şekil 8. 3	Farklı kanat açılara göre Cp/ λ ergisi [7].	100
Şekil 8. 4	PMSG için basit bir kanat açısı kontrol diyagramı.....	1000
Şekil 8. 5	Çıkış gücünün hesaplanması	101
Şekil 8. 6	Adaptif kontrol yönteminin blok şeması.....	102
Şekil 9. 1	RES ve şebeke bağlantısı.....	105
Şekil 9. 2	Jeneratörlerin şebekeye bağlantı prensip şeması.....	105
Şekil 9. 3	Şebeke tarafındaki dönüştürücüye ait kontrol yöntemleri [11].	106
Şekil 9. 4	Modellenen L-filtre.	107
Şekil 9. 5	LCL filtre	108

Şekil 9. 6	Lineer transformatörün eş değer devresi.	109
Şekil 9. 7	Trafoya ait parametrelerin primer tarafa indirgenmesi.	110
Şekil 9. 8	Şebekenin eşdeğer Thevenin devresi.....	110
Şekil 9. 9	Asenkron jeneratörlerin şebekeye bağlantı modelleri.	112
Şekil 9. 10	Senkron jeneratörlerin şebekeye bağlantı modelleri.	113
Şekil 9. 11	İnverter sınıflandırması	114
Şekil 10. 1	Şebeke bağlantısı için bir sistemin simülasyon modeli.....	116
Şekil 10. 2	GUST faktörünün değişim eğrisi.....	118
Şekil 10. 3	Von Der Hoven metoduna göre rüzgar hızının anlık değişim grafiği	120
Şekil 10. 4	Bir rüzgâr türbininden alınan parametreler.....	121
Şekil 10.5	Jeneratöre ait katalog değerleri.....	121
Şekil 10. 6	Mil (Şaft) dinamiğinin modellenmesi.	122
Şekil 10. 7	Şebeke bağlantısı yapılan sistemin blok şeması.	123
Şekil 10. 8	Doğrultucu ve VSI inverter modeli.....	124
Şekil 10. 9	Türbin hızındaki değişime göre mekaniksel gücün değişim eğrisi.	124
Şekil 11. 1	Tasarlanan sistemin blok şeması.....	126
Şekil 11. 2	Sistemin akış şeması.....	127
Şekil 11. 3	VC# üzerinde hazırlanmış programın giriş sayfası.	128
Şekil 11. 4	VC# üzerinde hazırlanmış programın ayarlar ve analiz sayfası.....	129
Şekil 11. 5	Türbin ve PMSG'e ait parametrelerin set edilmesi.....	129
Şekil 11. 6	Set edilen parametrelere göre hesaplanan değerler.....	130
Şekil 11. 7	Çeşitli kanat açılarına göre C_p -lamda değişim eğrisi [14].	131
Şekil 11. 8	Uygulama devresi.....	133
Şekil 11. 9	Uygulama devresi.....	134
Şekil 11. 10	Uygulama devresi	134
Şekil 11. 11	Tasarlanan sistemde TSR, $C_p(\lambda)$ değişim grafiği.....	136
Şekil 11. 12	Rüzgar Hızının zamana bağlı değişimi.	137
Şekil 11. 13	Çizelge 11.1'de verilen sistemin $P_e (W) - P_t (W)$ değişim grafiği.....	139
Şekil 11. 14	Çizelge 11.1'de verilen sistemin $T_e (W) - T_t (W)$ değişim grafiği	139
Şekil 11. 15	$V_{RÜZGAR}$: 11 (m/sn) sabit ve rotor hızı değişken	140
Şekil 11. 16	Sabit rüzgar hızına karşılık türbin güç ve momentinin değişim grafiği... ..	140
Şekil 11. 17	Sabit rüzgar hızına karşılık d-q akım ve gerilimdeki değişimler.	141
Şekil 11. 18	PIC 18F452	141
Şekil 11. 19	LTS 25-NP Hall effect akım transtüseri	142
Şekil 11. 20	LTS-25 NP akım transtüserinin akım gerilim karakteristiği.....	143
Şekil 11. 21	LTS-25 NP akım transtüserinin içyapısı	143
Şekil 11. 22	230 VAC / 6 VDC ve 2x0.75VA, EI30R gerilim trafosu.....	144
Şekil 11. 23	Gerilim trafosunun, mikro denetleyiciye bağlantı şeması.....	144
Şekil 11. 24	DC motorların devre ile olan bağlantısı	144
Şekil 11. 25	L293D entegresinin diğer ekipmanlar ile olan bağlantısı	145
Şekil 11. 26	Devre üzerinde L293D motor sürme entegresi	145
Şekil 11. 27	DC Motor sürme devresi.....	146
Şekil 11. 28	Türbin kanat ve gövdesinin hareketini sağlayan DC motorlar.....	146
Şekil 11. 29	Sistemin röleler üzerinden kumandasının ekran üzerinden gösterimi... ..	147
Şekil 11. 30	Röle sürme devresi	148
Şekil 11. 31	Devre üzerindeki Max232 ve Max485 entegrelerinin yerleşimi.....	149
Şekil 11. 32	RS-232/RS-485 Haberleşme devresi.	149

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1	Dünyada rüzgar enerji santrallerinin kurulu gücü (2009)	9
Çizelge 3. 1	50 m. yükseklikteki rüzgar hız dağılımları [2].	16
Çizelge 3. 2	Türkiye’de bazı bölgelerde yıllık ortalama rüzgar hızı.....	17
Çizelge 3. 3	Bölgelere göre ortalama rüzgar gücü yoğunlukları.....	17
Çizelge 3. 4	Rüzgar potansiyeli açısından zengin bazı bölgeler[2].	18
Çizelge 3. 5	İşletmedeki RES’ler.....	21
Çizelge 5. 1	Bir PMSG’e ait parametreler	57
Çizelge 7. 1	1 atm basınç altında hava yoğunluğunun sıcak ile değişimi	86
Çizelge 7. 2	15 °C’de hava basıncının ve yoğunluğunun rakım ile değişimi.	89
Çizelge 7. 3	α pürüzlülük kat sayısının yüzey şekillerine göre değerleri.	90
Çizelge 11. 1	Simülasyonu yapılan bir sisteme ait parametrelerin değişimi.....	138

RÜZGAR ENERJİSİ TÜRBİN SİSTEMLERİ İÇİN GERÇEK ZAMANLI DİNAMİK ANALİZ SİMÜLATÖRÜ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Enver ŞİPAR

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Erkan MEŞE

Rüzgar enerjisi, fosil yakıt kullanımına ihtiyaç duymadığından çevre dostu bir enerji biçimidir. Rüzgar türbinlerinin, termik santraller yada dizel santraller gibi emisyonları bulunmamaktadır. Bu türden emisyonlar asit yağmurları ve küresel ısınmayı gerçekleştiren sera etkisine neden olmaktadır. Rüzgar enerjisinin en önemli özelliği, yenilenebilir enerji kaynağı olmasıdır. Bundan dolayı fosil yakıtlar gibi tükenmesi söz konusu değildir.

Rüzgar, günümüz yenilenebilir enerji kaynakları arasında en ekonomik çözüm olsa da, hali hazırda üretilen elektrik enerjisi ile rekabeti çok zordur. Ancak çok yüksek hızda, sürekli rüzgar alan bölgelerde kurulması rekabet gücünü artırmaktadır. Kurulum maliyetleri çok fazla olsa da, bakım ve işletme giderleri çok azdır.

Rüzgarın süreksizliği büyük bir problemdir. Bu yüzden şebeke ile bağımsız çalışması, kesintilere ve dalgalanmalara neden olmaktadır. Genel olarak kararsız bir enerji kaynağıdır. Günümüzde güç elektroniği uygulamalarının gelişimi ve ilerlemesi ile bu problemler azalmaktadır. Çift yönlü dönüştürücüler sayesinde değişken rüzgar hızlarında da sabit gerilim ve frekansta çıkış verilebilmektedir.

Yapılan bu tez çalışması kapsamında, öncelikli olarak rüzgar enerji sistemleri, elektrik makineleri ve güç elektroniğı incelenmiş ve tüm sistemi kapsayan matematiksel model ortaya çıkartılmıştır. Bu matematiksel model ile bilgisayar üzerinde çalışan simülatör programı ile türbine ve çevreye ait veri toplama kartı yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar enerji sistemleri, Matematiksel model, Simülatör, Devre

WIND ENERGY TURBINE SIMULATOR SYSTEMS FOR ACHIEVING REAL-TIME DYNAMIC ANALYSIS

Enver ŞİPAR

Master's Thesis, Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Erkan MEŞE

Wind energy is a clean renewable energy and does not depend on fossil fuel. Wind power plants do not have air polluting emissions. In conventional power plants, these kind of emissions causes greenhouse effect, acid rain and global warming.

Although wind energy is the most economical solution in renewable energy systems, is still expensive to compete with the conventional power plants. The biggest problem in wind power plants, is the foundation and installation costs.

Another disadvantage is the instability of wind. Without an interconnection to grid, isolated wind power systems, has instability and flicker problems. These problems are being solved with the development and improvement of the new technologies in power electronics. Bidirectional power converters can provide fixed voltage, fixed frequency outputs in variable wind conditions.

In this master of science thesis, the wind energy systems are studied from the view of electrical machinery and power electronics and build mathematical model of all systems. A PC program have build using this mathematical model for simulation all system and a circuit made to take of all parameters from wind turbine and environment.

Keywords: Wind Energy Systems, Mathematical Model, Simulator, Circuit

**YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE**

1.1 Literatür Özeti

Enerji ihtiyacının her geçen gün artması, enerji elde etmek uğruna çeşitli çevre felaketlerinin yaşanması sebebiyle birçok kamu ve özel teşebbüsler rüzgar enerjisine yönelmişlerdir.

Yapılan araştırma – geliştirme faaliyetleri sonucunda, rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesi gün geçtikçe daha kolaylaşmakta ve maliyetler azalmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Farklı ortam şartlarında özellikle değişken ve düşük hızlı sistemlerde enerjinin devamlılığını sağlamak ve sistemin verimini en üst düzeye çıkartabilmek için ortam şartları detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Bu amaca yönelik olarak sistemin simülasyonunu yapmak büyük önem taşımaktadır.

Tez kapsamında, ilerleyen bölümlerde daha detaylı anlatılacak olan, sistemin simülasyonunu yapan ve verimi artırmak için kontrol sinyalleri üreten bir sistem oluşturulmuştur.

Tez kapsamında incelenen konular:

- Rüzgar türbin sistemlerinin tarihsel gelişimi
- Yapılarına göre türbin çeşitleri
- Türkiye’de ve dünyadaki rüzgar enerjisi kullanımındaki gelişmeler ve değişimler
- Türbinlerde kullanılan jeneratör çeşitleri

- Güç elektroniği devreleri
- Türbin kontrol metotları
- Enerji donuřum denklemleri
- Yapılan PC programı ve veri toplama kartı üzerinde durulmuştur.

1.3 Hipotez

Tasarımı yapılan sistem ile bir türbinin en yüksek verimde çalışmasını sağlayacak kontrol sinyalleri üretilmiştir. Kontrol sinyallerinin üretilirken devre üzerinde canlı, gerçek veriler (rüzgar hızı, rotor dönüş hızı, kanat açısı gibi) kullanılmıştır.

Bu sistem ile bir türbin sisteminin elektronik olarak kontrol, kumandası ve en yüksek verimde çalışması sağlanmıştır.

RÜZGÂR ENERJİ SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

2.1 Tarihsel Gelişimi

Rüzgar enerjisi tarihte ilk olarak yelkenli gemilerin güç kaynağı olarak kendini göstermiştir. Jeneratör teknolojilerinde meydana gelen gelişmeler rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü de sağlanmıştır.

Rüzgar enerjisi ilk kullanımı M.Ö. 2800 yıllarına kadar uzanmaktadır. Rüzgar enerjisi ilk olarak Orta Doğuda kullanılmıştır. M.Ö.17. Yüzyılda Babil kralı Hammurabi döneminde Mezopotamya'da sulama amacıyla kullanılan rüzgar enerjisinin, aynı dönemde Çin'de de kullanıldığı belirtilmektedir. Persler M.S. 7. yüzyıl ortalarında dikey eksenli rüzgar değirmenleri yaygın olarak kullanmaktaydılar.

Yel değirmenleri, ilk olarak İskenderiye yakınlarında kurulmuştur. Türklerin ve İranlıların ilk yel değirmenlerini M.S.7. yüzyılda kullanmaya başlamalarına karşın, Avrupalılar yel değirmenlerini ilk olarak Haçlı seferleri sırasında görmüşlerdir. Fransa ve İngiltere'de rüzgar değirmenlerin kullanılmaya başlanması 12.yüzyılda olmuştur.

18.Yüzyılın sonunda yalnızca Hollanda'da 10.000 yel değirmeni bulunmaktaydı. 19. yüzyıla gelindiğinde rüzgâr enerjinin en önemli kullanım alanı su pompalarıydı. Buhar makinesinin yapılması ve odun, kömür gibi yakıtlardan kesintisiz enerji üretimine başlanması ile rüzgâr enerjisi önemini yitirmeye başlamıştı. Bununla beraber, rüzgâr türbini denilen ve elektrik üretiminde kullanılan ilk makineler 1890'ların başlarında Danimarka'da yapılmıştır. 23 m. çapında olan bu rüzgâr türbini elektrik üretimi gerçekleştirilen ilk rüzgâr türbini oldu. Aynı dönemde, bu makinelerin geliştirilmesi için Almanya'da da önemli çalışmalar yapıldığı bilinmektedir. Rüzgâr kuvvet makineleri

yerlerini yakıtlı kuvvet makinelerine bırakırken, rüzgâr enerjisi kullanımının sürmesi için yeni bir teknoloji de başlıyordu. Ancak 19.yüzyılda geliştirilen ilk rüzgâr türbinlerin verimlerinin düşük olmasına rağmen 1910 yılına gelindiğinde güç değerleri 5 ile 25 kW. arasında değişen birkaç yüz rüzgar ünitesi Danimarka’da enerji üretmekteydi.

1925 yılından sonra 2 ve 3 kanatlı rüzgâr türbinleri Amerikan pazarında kendilerini göstermeye başladılar. 1961 yılında Roma'da Birleşmiş Milletler tarafından düzenlenen "Enerjinin Yeni Kaynakları Konferansı"nda ele alınan üç kaynaktan biri rüzgar enerjisi idi. Böylece çok eskiden bu yana tanınan rüzgar enerjisi, teknolojik gelişmelerle ele alınıyor, yeni ve yenilenebilir kaynaklar arasına sokuluyordu.

1961-1966 yılları arasında Almanya’ da rotor çapı 35 m. olan 100 kW'lık bir modelin geliştirilmesi üzerinde duruluyordu. 1970'lerde Danimarka'daki (Şekil 2.1’ de görülen) Gedser türbini, gücü 650 kW olan büyük türbinlerle değiştiriliyordu. Bu dönemde rüzgar jeneratörleri üzerinde İsviçre, Avusturya ve İtalya'da da teknolojik çalışmalar yapmaktaydı. Amerika'da 1970'lerde büyük tip yatay eksenli makineler üzerinde yeniden çalışılırken, dikey eksenli Darrieus tipi (Şekil 2.2’ de görülen) makineler üzerinde de çalışmalar başlatılmıştır. Ucuz petrol döneminde süreklilik kazanamayan rüzgar enerjisi, 1974-1978 yılları arasındaki yapay petrol bunalımlarının ardından, gündeme daha çok girmiştir.



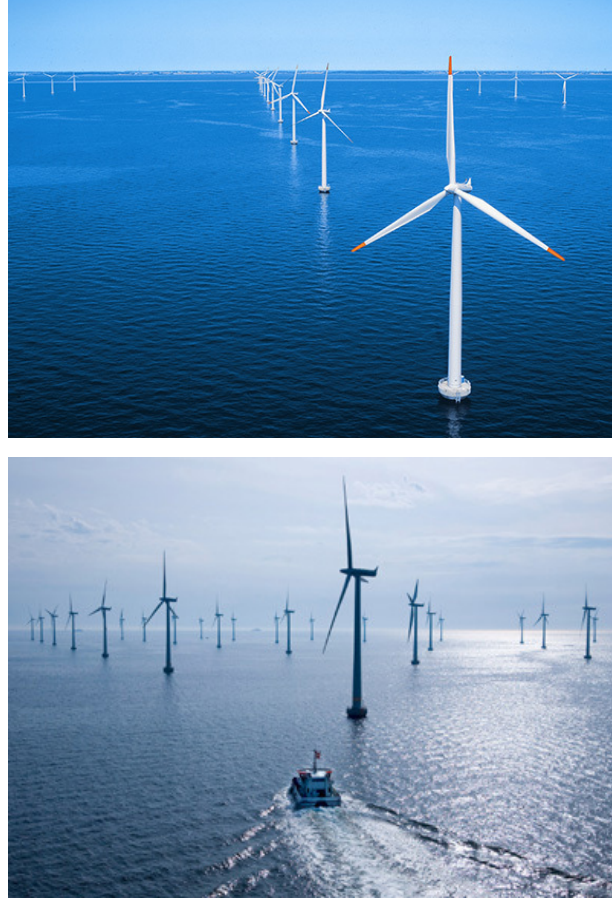
Şekil 2. 1 Gedser rüzgâr türbini



Şekil 2. 2 Darrieus tipi dikey eksenli rüzgar türbinleri

Rüzgâr enerjisinin gelişimine, 1980'li yıllarda Uluslararası Enerji Ajansı eşgüdümünde yürütülen araştırma geliştirme çalışmalarının büyük etkisi olmuştur. Artık, eski tip rüzgar jeneratörleri yerine modern ve çağdaş rüzgar enerjisi çevrim sistemleri (WECS) kurulmaktadır. Ayrıca, rüzgâr türbini ile beraber, dizel motor ve güneş fotovoltaik jeneratör içeren rüzgâr-dizel-PV hibrid sistemlerde geliştirilmiştir.

Günümüzde rüzgâr santralleri karalarda olduğu kadar denizlerde de kurulmaktadır. Karadan denize geçiş ilk uygulamalarla teknik alanda başarılmış ve ticari uygulamaları da gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte daha gelişkin sistemler için AR-GE çalışmaları sürmektedir. Deniz üstü rüzgar enerjisi (Şekil 2.3) ile ilgili ilk çalışmalar 1970'li yılların sonuna doğru Danimarka, Hollanda, İsveç ve ABD'de başlamıştır. 1980'li yılların başında bu çalışmalar Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) bünyesinde yürütülmüştür.



Şekil 2. 3 Deniz üstü (Off Shore Wind) rüzgar santralleri

İlk deniz üstü “rüzgar çiftliği” Danimarka’da Loland adası yanında kurulan Vindeby rüzgar çiftliğidir. Bu çiftlikte 5 MW’lık enerji üretilmektedir. 1991 yılı ortalarında işletmeye açılan çiftlik, Danimarka Enerji Bakanlığı’nın 100 MW’lık projesinin bir bölümünü oluşturuyordu. Avrupa’da 1995–1997 yılları arasında kapasitesi 12 MW. olan rüzgar santralleri kurulmuş olup günümüzde bu santrallerin kapasitesi arttırılmaktadır. Sözelimi İngiltere’nin doğu kıyısında, Inner Dowsing adı verilen bölgede karaya 5 km. uzaklıkta yapılması planlanan bu santralde hedef 1.4 MW. gücünde 9 türbin kurup 12.6 MW. enerji üretmektir [1].

Ülkemizde 1992 yılında Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği kurulmuştur ve Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliğine bağlanmıştır. Pek çok kamu kurumu ve özel sektörden katılan üyelerden oluşmaktadır. Enerji bakanlığının ve özellikle bu birliğin etkin çalışmaları sonucu, özel şirketler tarafından ilk defa 1998’lerde İzmir- Çeşme, Alaçatı mevkiinde (Şekil 2.4) ARES – Güç Birliği şirketi tarafından toplam 7.2 MW. gücünde rüzgar türbinleri kurularak elektrik üretimine geçilmiştir. Aynı yıllarda Çanakkale-Bozcaada’da

Demirer Holding tarafından 10.2 MW'lık güçte rüzgar türbinleri kurulmuştur. Bu türbinler dönmeye ve elektrik üretmeye devam ederken ülkemizde pek çok yerde daha kurulması için büyük şirketlerin çalışmalarının devam etmektedir.



Şekil 2. 4 İzmir - Çeşme, Alaçatı mevkiinde bulunan Türkiye'nin ilk rüzgar santrali

Ülkemizde bu konuda yapılan çalışmalar özellikle bu yıl içerisinde büyük bir ivme kazanmıştır. Şirketlerin yatırım yapmalarını kolaylaştırmak amacıyla REPA (Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası) gectigimiz yıllar içerisinde tanıtılarak, bu sektördeki firmaların kısa sürede yol alarak yatırımlarını tamamlamaları ve hem şirketler adına hem de ülke adına geride kalınan bu konuda büyük bir gelişme kaydedilmesine çalışılmaktadır.

Rüzgâr enerjisi konusunda çalışan bir çok ünlü firma son dönem içerisinde çalışmaları hızlandırmışlardır. Bunlar, As Makinsan A.Ş.; İzmir-Çeşme'de ve Çanakkale-Karacaören'de ve Demirer Holding; İzmir-Çeşme ve Muğla-Datça'da rüzgâr türbin kurma çalışmalarını sürdürmektedir. Aynı şekilde Interwind Ltd.; Çanakkale-İntepe ve Atlantis Tic.; Balıkesir-Bandırma'da türbin kurma çalışmalarını sürdürmektedir. Ülkemizde rüzgar enerjisinden rüzgar türbinleri kurarak elektrik üretmek amacıyla çalışan diğer büyük şirketlerin isimleri de şöyledir: Prokom A.Ş., Mage A.Ş., Yapısan Ltd., Ak-En A.Ş., Enda A.Ş., Simelko A.Ş., Teknik Tic., Akfırat A.Ş., Bilgin Holding- Escort A.Ş. gibi .

Ayrıca Dünya Bankası, Avrupa Yatırım Bankası gibi finans kurumları ülkelerdeki temiz enerji kaynaklarından enerji üretecek projelere kredi vermektedir.

2.2 Dünyada Rüzgar Enerjisine Bakış

Öncelikle tüm dünya geneli için rüzgar enerjisinin değerlendirilmesi ve diğer ülkelerin bu enerjiye bakış açılarını incelersek, daha sonra ülkemiz için yapacağımız değerlendirmeler daha tutarlı olacaktır. Bu açıdan öncelikle potansiyeli incelemek bize yön gösterici olacaktır.

2.3 Dünya Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Dünyanın rüzgar enerjisi potansiyelini tahmin etmek ve belirlemek zordur. Fakat bilimsel çalışmalar ham rüzgar potansiyelinin sadece % 10'nun kullanılmasıyla, dünyanın elektrik enerji gereksiniminin tamamının karşılanabileceğini göstermiştir.

Dünya Enerji Konseyi (WEC) dünya rüzgar kaynağının teknik potansiyelini, km² başına 8 MW. üretim kapasitesi ve %23 kapasite faktörü kabul ederek, dünya potansiyelini yılda 20.000 TWh. olarak tahmin etmiştir. Yerden 10 metre yükseklikte dünya yüzeyinin yaklaşık % 27'sinin yıllık ortalama rüzgar hızı 5.1 m/s'den daha yüksektir. Uygun olmayan arazi, yerleşim alanları, tarımsal amaçlar ve diğer arazi kullanımları nedeniyle bu alanların sadece %4'ü elektrik üreten rüzgar tarlaları için uygundur. Bu alanlar kıta alanlarının 50° kuzey ve güney enlemleri arasında 1000 km²'lik sahil şeridi içinde bulunmaktadır. Ekonomik, estetik ve fiziksel planlama kısıtları nedeniyle bunun yaklaşık üçte birinin gerçekleştirilebileceği kabul edilmiştir.

Rüzgâr enerjisi bakımından denizler, karasal alanlara göre daha zengindir. Kıydan 10 km. açıklıkta ve 10 m. derinlikteki alanların potansiyeli 750 TWh/yıl iken, kıydan uzaklığı 30 km. ve su derinliği 40 m. olan yerlerde 3500 TWh/yıl düzeyine çıkmaktadır [2].

Rüzgâr enerjisinin gün geçtikçe önem kazandığı günümüz koşullarında dünya üzerinde de bu konuda birçok kapsamlı araştırma ve projeler yürütülmektedir. Küresel ısınmanın da etkisini yadsınmadığı bu koşullar dünya üzerinde rüzgâr enerjisinin kısa bir süre içerisinde daha yaygın olarak kullanılacağıнын sinyallerini vermektedir. Rüzgâr enerjisi dünyada ciddi biçimde yaygınlaşacaksa, öncelikle bu hedefleri gerçekleştirecek doğal kaynakların var olup olmadığını açıkça anlamak gerekir. Uygulamada, elektrik üretiminde kaynak yetersizliğinin, rüzgar gücü kullanımı açısından sınırlayıcı bir etken olma olasılığı yoktur. Dünyanın rüzgar kaynaklarının 53.000 TWs/yıl olduğu hesaplanırken, 2020 yılına kadar dünya elektrik tüketiminin 25.579 TWs/yıl'a yükselmesi beklenmektedir. Bu nedenle teknik olarak elde edilebilecek küresel rüzgâr kaynağı, dünyanın tüm elektrik gereksinimi için yapılan tahminin iki katından fazladır.

Bugüne kadar yapılmış araştırmalar, dünyanın rüzgâr kaynaklarının çok büyük ve neredeyse tüm bölgelere ve ülkelere yayılmış durumda olduğunu göstermektedir. Bunların büyüklükleri konusunda birçok değerlendirme yapılmıştır.

Bu tür çalışmalarda kullanılan yöntem, yer düzeyinden 10 m. yükseklikte, saniyede 5-5,5 m/sn. aşkın ortalama yıllık rüzgar hızları olan kaç kilometrekare alan mevcut olduğunu değerlendirmektir. Bugünün enerji üretim maliyetleri ile rüzgar enerjisinin kullanılması için bu ortalama hız uygun kabul edilmektedir. Dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü (Çizelge 2.1) 2009 Ocak ayı tarihi itibarıyla 115 254 MW. düzeyine ulaşmıştır [2].

Çizelge 2. 1 Dünyada rüzgar enerji santrallerinin kurulu gücü (2009)

AVRUPA	2008 BAŞLANGICI (MW)	BUGÜNKÜ TOPLAM (MW)
Almanya	22.247	23.600
İspanya	15.145	16.000
Danimarka	3.124	3.171
İtalya	2.726	3.290
İngiltere	2.425	3.242
Fransa	2.370	3.427
Portekiz	2.150	2.700
Hollanda	1.747	2.225
Avusturya	982	995
Yunanistan	871	985
İrlanda	806	1.036
İsveç	788	788
Norveç	386	444
Polonya	280	350
Belçika	287	287
Türkiye	192	483
Finlandiya	110	128

Çizelge 2.1'in devamı.

Ukrayna	86	86
Estonya	58	58
Çekoslovakya	56	106
Litvanya	52	52
Macaristan	65	112
Lüksemburg	35	35
Bulgaristan	62	169
Letonya	27	27
Hırvatistan	17	59
İsviçre	12	14
Rusya	7	7
Slovakya	5	5
Romanya	8	8
TOPLAM	57.126	63.889
PASİFİK BÖLGESİ	2008 BAŞLANGICI (MW)	BUGÜNKÜ TOPLAM (MW)
Japonya	1.538	1.675
Avusturalya	824	824
Yeni Zelanda	322	322
Filipinler	25	25
Pasifik Adaları	24	24
TOPLAM	2.733	2.870
ORTADOĞU VE AFRİKA	2008 BAŞLANGICI (MW)	BUGÜNKÜ TOPLAM (MW)
Mısır	230	310
Fas	124	184
İran	67	67
Tunus	20	54
Reunion (Fransa)	10	10
İsrail	8	8
Yeşil burun (Cape Verde)	3	3
Güney Afrika	3	9

Çizelge 2.1'in devamı.

Ürdün	2	2
TOPLAM	467	647
KANADA	2008 BAŞLANGICI (MW)	BUGÜNKÜ TOPLAM (MW)
Kanada	1846	1846
TOPLAM	1.846	1.846
A.B.D.	2008 BAŞLANGICI (MW)	BUGÜNKÜ TOPLAM (MW)
TOPLAM	16.971	25.408
LATİN AMERİKA	2008 BAŞLANGICI (MW)	BUGÜNKÜ TOPLAM (MW)
TOPLAM	547	670
ASYA	2008 BAŞLANGICI (MW)	BUGÜNKÜ TOPLAM (MW)
TOPLAM	14.191	19.524
ASYA	2008 BAŞLANGICI (MW)	BUGÜNKÜ TOPLAM (MW)
TOPLAM	14.191	19.524

Daha ayrıntılı değerlendirmeler, gerçekte beklenenden çok daha fazla sayıda potansiyel sahanın kullanılabilir olduğunu kanıtlamaktadır. Bunun iyi bir örneği Almanya'nın iç bölgelerindeki daha az rüzgârlı görünen sahaların keşfi olmuştur. Kaliforniya'nın dağ geçitlerinde olduğu gibi diğer örneklerde, yerel topografya olağanüstü iyi koşullar yaratmaktadır. Bu nedenle dünyadaki toplam rüzgâr kaynağının, bölgesel iklim gözlemlerine dayalı değerlendirmelerin gösterdiğinden daha da yüksek olmasıdır. Son olarak teknolojinin daha da geliştirilmesi 5 m/s'lik rüzgâr hızlarının kullanılma potansiyelini kesinlikle artıracaktır.

Çizelge 2.1'de de görüldüğü gibi bugün dünyada rüzgar enerjisi kullanımı giderek yaygınlaşırken, bu çevre dostu enerjiyle Danimarka, Finlandiya, Norveç ve İsveç'in enerjisi ihtiyacı karşılanmaktadır. Yeryüzü Politikası Enstitüsü'nün geçici verilerine göre, rüzgar enerjisi üretim kapasitesi 2000 yılında 17800 MW. iken 5500 MW (%31)'lik artışla 2001'de 23300 MW'a çıkmıştır. Oysa bu rakam daha 1994 yılında sadece 3488

MW'dı. Aynı yıl dünyada 742 MW'lık rüzgar tesisi kurulmuş olup, bu oran 1993 yılındakinden %50 daha fazladır. 1995 yılında eklenen kapasite ise, 1253 MW ile 1994 yılında eklenenin 1,7 katıdır. 1996 yılında 1292 MW, 1997 yılında 1568 MW, 1998 yılında 2597 MW, 1999 yılında ise 3922 MW'lık rüzgar enerjisi tesisi kurulmuştur.

Görüldüğü gibi tesis kurulma hızı, her yıl bir önceki yıldan daha fazla artmaktadır. Bu da rüzgar enerjisinin önünün açık olduğunun bir göstergesidir.

2.4 Rüzgar Enerjisi Çalışmaları

Günümüzde modern rüzgar enerjisi sistemleri üzerinde çalışılmalarının hız kazanması ile birlikte birden çok türbin içeren rüzgar çiftlikleri ile elektrik şebekelerinin beslenmesi amaçlanmıştır. Yapılan sistem analizlerinde rüzgar enerjisi gelişiminde hub yüksekliği 70-126 m çapında olan sistemler (1.5-5 MW) optimum büyüklük olarak tespit edilmiştir. 1981'de ABD 'de tesis edilen sistemlerde rüzgâr türbin gücü 100 kW'dan daha azdı. 1980'lerin sonu ile 1990'lı yılların başında kullanılan rüzgar türbin gücü 100 kW ile 500 kW arasındaydı. 1990'lı yılların ortalarında bu türbin güçleri 750 kW ile 1000 kW arasında değişmekteydi.

1990'lı yılların sonunda ise bu güç 2.500 kW'a yükseldi. Bu yıllarda piyasalarda bulunan makinelerin 500-750 kW arasında olanları en düşük fiyattan elektrik enerjisi üretebilmektedir. Bugün için dünya piyasasında bulunan ve santral kurmak için kullanılabilecek rüzgar türbinlerinin güçleri yaklaşık 3.5 MW'tır. 250-750 kWa arası türbinler yaygın biçimde bulunmaktadır.

Tümü yatay eksenli (Şekil 2.5) propeller tipi türbinler olup, rotor kanat sayıları iki ile üç arasında değişmektedir. Genellikle önden rüzgarlı tip türbinlerdir. Yaklaşık % 93'ü üç kanatlı, geriye kalan % 7'si iki kanatlıdır. Rotor çapları 18-65 m, rotor süpürme alanları 255-3.320 m², rotor dönüş hızları 28-60 devir arasındadır. Çalışmaya başlangıç rüzgar hızı 3-4 m/s kadar olup nominal güçlerini 11-14 m/s rüzgar hızlarında üretmektedirler. Çalışmanın durdurulması rüzgar hızı 20-28 m/s arasındadır. Rotorların zarar görebileceği rüzgar hızı 50 ve 70 m/s'den büyüktür.



Şekil 2. 5 Yatay eksenli rüzgar türbini ve bir rüzgar çiftliği

Rüzgar hızına göre rotor güç ayarları için, kanat eğimi denetimli veya aktif durdurma denetimli sistemler kullanılmaktadır. Makinelerin teknolojisi itibariyle verimleri % 98-99 civarındadır. Kanatlar polyester ile kuvvetlendirilmiş fiberglas veya epoksi ile güçlendirilmiş fiber karbondan yapılmakta ve çelik omurga ile desteklenmektedir. Hub yüksekliği 30'm. ile 70'm. kadardır. Mekanik frenleri disk fren iken, aerodinamik frenleri aktif negatif kanat ayarı olmaktadır.

Rüzgar enerjisi için bir diğer uygulama alanı küçük güçlerde olmak üzere oto prodüktör elektrik üretimi ve mekanik enerji ile su pompalamadır. Küçük güçlü rüzgar jeneratörleri birkaç yüz W ile birkaç kW. arasında değişmektedir. Bunlar küçük ve uzak yerler için güvenilir güç üretebilmek için kullanılabilir [3].

2.5 Rüzgâr Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları

2.5.1 Rüzgâr Enerjinin Avantajları

- Rüzgâr enerjisi, fosil yakıtlarla, kömür ve doğal gazla yanmaya dayanan işletmeler gibi havayı kirletmez.
- Rüzgâr türbinleri asit yağmurlarına sebep olan atmosferik emisyonlar üretmez.

- Rüzgâr türbinlerinde enerji üretimi sırasında hammadde maliyeti yoktur.
- Rüzgâr enerjisi ülke içi enerji kaynağıdır.
- Rüzgâr enerjisi tükenmeyen rüzgar gücünün yenilenebilir olmasına prensibine dayanır.
- Rüzgâr enerjisi hala yenilenebilir enerji kaynaklarından en düşük fiyatlılarından biridir.
- Rüzgâr türbinleri çiftliklere inşa edilebilir, böylece en iyi rüzgar konumlarının bulunduğu kırsal bölgelerde ekonomiden faydalanır. Çiftçiler arazilerinde çalışmaya devam edebilir.
- Yakıt olarak rüzgarı kullanılmasından dolayı atmosfere zehirli gazlar vermezler.
- Rüzgâr çiftliklerinin söküm maliyetleri yoktur. Çünkü sökülen türbinlerin hurda değeri söküm maliyetlerini karşılamaktadır.
- Bu çiftliklerin ömürlerini tamamlamasından sonra türbinlerin kullanıldığı alan eski haline kolayca getirilmektedir.

2.5.2 Rüzgar Enerjisini Dezavantajları

- İlk kurulum maliyetlerinin yüksek olması rüzgar santrallerinin en önemli dezavantajlarından biridir.
- Rüzgâr hızının sabit olmamasından dolayı üretilen enerji değişkendir. Bu durumda enerjinin depolanmasını zorunlu kılmaktadır.
- Yüksek verimli rüzgar santralleri enerji ihtiyacının yüksek olduğu şehir merkezlerinden uzaktır.
- Gürültüldürler ve kuş ölümlerine neden olur, radyo ve TV. alıcılarında parazite neden olurlar. Bu nedenle İngiltere başta olmak üzere bir çok Avrupa ülkesinde büyük rüzgar türbinlerinin yarattığı çevre sorunları nedeniyle milli park alanlarının sınırları içine ve çok yakınlarına kurulması yasaklanmıştır.

TÜRKİYE’NİN RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ

Türkiye coğrafi konumu nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları önemli bir potansiyele sahiptir. Rüzgar enerjisi bu kaynaklar içinde önemli bir yer kaplamaktadır. Türkiye, orta kuşakta yer almasından dolayı, soğuk ve sıcak hava kütlelerinin karşılaştığı bir alandadır.

Rüzgarın oluşabilmesi için gerekli olan basınç farkını bu iki farklı hava kütlesi sağlar. Türkiye batı rüzgarları kuşağında yer alır. Balkan yarımadası üzerinden gelen kuzey rüzgarlarının etkisiyle, kış boyunca Karadeniz’de güçlü rüzgarlar oluşur. Fakat Karadeniz kıyılarının, sarp kayalıklardan ve ani yükselen tepelerden meydana gelmesi yüzünden bu rüzgarların gücünden yararlanılamamaktadır.

Anadolu’nun güneydoğu kıyıları, batı kıyıları ve Marmara Bölgesi rüzgar gücü bakımından zengin alanlarımızdır.

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) istasyonlarının 1970-1980 dönemi rüzgar verileri değerlendirilerek, Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli belirlenmeye çalışılmıştır. Ancak, DMİ tarafından yapılan ölçümler meteorolojik amaçlıdır (klimatolojik, sinoptik, hava kirliliği vb.) ve yerel rüzgarların ölçümleri Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) kurallarına göre 10 m’de yapılmaktadır. Enerji amaçlı rüzgar ölçümlerinde ise rüzgar hızı, rüzgar yönü ve çevre sıcaklığı gibi parametreler 30 m. ve mümkünse türbin hub (göbek) yüksekliğinde en az bir yıl boyunca periyodik olarak (her 10 dk, 1 saat gibi) ölçülmeli ve bilgisayar ortamında değerlendirilebilecek şekilde veri paketi olarak tespit edilmelidir [2].

Bu nedenle, ülkemizin rüzgâr potansiyelinin belirlenmesi ve rüzgâr enerjisinin yurdumuz ekonomisine katkısının hızlandırılması, yatırımcılara rüzgâr enerjisi

potansiyeli yüksek olan yerlerin sunulması için 2002 yılında EİE. ve DİM. işbirliği ile "Türkiye Rüzgar Atlası" yapılmıştır. Türkiye Rüzgâr Atlası genel olarak bir fikir vermektedir. Hazırlanmış olan Türkiye rüzgâr atlasına göre yer seviyesinden 50 m. yükseklikteki rüzgâr potansiyelleri incelendiğinde Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz Bölgelerinin en yüksek potansiyele sahip olduğu görülmektedir.

Bugünkü teknik potansiyelimiz 88 000 MW. ve ekonomik potansiyelimizin ise 10 000 MW. civarında olacağı tahmin edilmektedir.

Aşağıda gördüğümüz şekilde ve bir sonraki çizelgede gösterilen lejant renkleri Avrupa'nın da kullandığı renklerdir. Ülkemizde rüzgâr potansiyeli olarak en son kırmızı renkte rüzgarlar görülmektedir. En üst katmanda görmüş olduğumuz lacivert renkle gösterilen rüzgar tipine ülkemizde rastlanılmamaktadır [2].



Şekil 3. 1 Türkiye rüzgar atlası[2].

Çizelge 3. 1 50 m. yükseklikteki rüzgar hız dağılımları [2].

Beş farklı topoğrafik durum için yer seviyesinden 50 m. yükseklikteki rüzgar potansiyelleri										
	Kapalı Araziler		Açık Araziler		Kıyılar		Açık Deniz		Tepe ve Bayırlar	
	1/ms	2/Wm	1/ms	2/Wm	1/ms	2/Wm	1/ms	2/Wm	1/ms	2/Wm
	>5.0	>250	>7.5	>500	>8.5	>700	>9.0	>800	>11.5	>1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
	4.5-5.0	100-150	5.8-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	200-400	5.5-7.0	200-400	7.0-8.0	400-600
	<3.5	<50	<4.5	<100	<5.0	<150	<5.5	<200	<7.0	<400

Çizelge 3.1’de beş farklı topoğrafik durum için yer seviyesinden 50 m. yükseklikteki rüzgar hız dağılımları verilmiştir.

Bandırma (5.1–5.2 m/s.), Bozcaada (6.3–7 m/s.), Karaburun ve Karabiga (6.4 m/s.), Nurdağı (7.1 m/s.), Şenköy (7 m/s.) yıllık ortalama rüzgar hızı yüksek olan bölgelerimizdir.

Çizelge 3.2’de Türkiye’nin değişik bölgelerindeki bazı yerlerin yıllık ortalama rüzgar hızı verilmektedir.

Çizelge 3. 2 Türkiye’de bazı bölgelerde yıllık ortalama rüzgar hızı

Bölge	Rüzgar hızı (m/s)	Bölge	Rüzgar hızı (m/s)	Bölge	Rüzgar hızı (m/s)
Antakya	4.2	Florya	3.5	Silifke	3.1
Antalya	3.2	Gökçeada	4.4	Sinop	4.7
Ayvalık	3.2	Göztepe	3.0	Siverek	4.0
Balıkesir	3.1	İnebolu	3.7	Sivrihisar	3.0
Bandırma	5.2	İpsala	3.8	Şile	3.1
Bergama	3.2	İzmir	3.5	Tefenni	3.3
Ankara	3.2	K.maraş	3.4	Tekirdağ	3.1
Bilecik	3.4	Karapınar	3.6	Uzunköprü	4.1
Bozcaada	7.0	Kırklareli	3.0	Yenişehir	3.0
Cihanbeyli	3.7	Kumköy	4.9	Yozgat	3.0
Çanakkale	4.9	Menemen	4.1		
Çeşme	3.8	Muğla	3.4		
Çorlu	3.9	Nevşehir	3.2		
Dikili	3.0	Niğde	3.4		
Doğubeyazıt	3.1	Kireçburnu	4.7		
Kdz.Ereğli	3.8	Seydişehir	3.3		

Çizelge 3. 3 Bölgelere göre ortalama rüzgar gücü yoğunlukları

Bölge Adı	Ortalama Rüzgar Gücü Yoğunluğu W/m ²
Akdeniz Bölgesi	21,36
İç Anadolu Bölgesi	20,14
Ege Bölgesi	23,47

Çizelge 3.3'ün devamı.

Doğu Anadolu Bölgesi	13,19
Güneydoğu Anadolu Bölgesi	29,33
Marmara Bölgesi	51,91
Karadeniz Bölgesi	21,31

Rüzgâr gücü yoğunluğunun DMİ. kayıtlarına göre Türkiye genelinde rüzgar potansiyeli açısından zengin bazı bölgeler Çizelge 3.4'de verilmektedir.

Çizelge 3. 4 Rüzgar potansiyeli açısından zengin bazı bölgeler[2].

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

Rüzgâr enerjisi potansiyelinin enerji üretimi amacıyla belirlenmesi kapsamında EİEİ. genel müdürlüğünce “Rüzgar Enerjisi Gözlem İstasyonu Projesi” başlatılmıştır. Proje kapsamında kurulan istasyonlarda, rüzgâr verilerini toplama çalışmaları sürdürülmektedir.

Enerji konusunda sıkıntı yaşamamak adına özel sektör temiz enerji olan rüzgâr enerjisine ilgi duymaktadır. Bu konuda birçok tanınmış şirket yatırımlarını bu yönde yapma taraftarıdır. Son dönem tartışılan konular üzerine çok önemli hale gelen ve gelişimi büyük bir hız kazanan rüzgâr enerjisi için türbin üretici firmalar çalışmalarına ve araştırma-geliştirme faaliyetlerine giderek artan oranda önem vermektedir.

Ülkemizde rüzgâr enerjisi ile ilgilenen şirketler uygun yerler için araştırmalarını yapıp lisans başvurularını yaparken, üretici firmalar en erken 2012–2013 yılları için tarih verebilmektedir. Tüm dünyanın dikkatini rüzgâr enerjisine çevirmiş olması, daha

önceden bu konuda üretim yapmak üzere yatırım yapmış firmalara iyi fırsatlar sunmaktadır.

Ülkemiz için de; 2002 yılında kurulan, 450 kişiye iş imkânı sağlayan, iç pazar harici 26 ülkeye ihracat yapan ve yıllık cirosu 28 milyon Euro olan Enercon-Demirer Holding ortaklığında İzmir'deki Aero Rüzgâr türbini kanat fabrikasında jeneratör üretimi hariç türbinin kalan kısımları üretilmekte. Genel ortaklık yapısına zaman zaman bu iki şirketin dışında Polat Holding'in de dahil olduğunu görüyoruz.

2011'e sonuna kadar Demirer Enerji ile birlikte yaklaşık 500 MW kurulu gücünde rüzgar enerjisi yatırımı amaçlayan Polat Enerji, önümüzdeki günlerde hayata geçireceği yeni proje kapsamında rüzgar santralleri için jeneratör imalatını hedeflemektedir. 30 milyon Euro'luk yatırım hazırlığında olan bu şirketler, hem iç pazara hem de dış pazara yönelik üretim yapacaktır.

Türkiye'de ilk rüzgar enerjisi yatırımı yapan şirketlerden Demirer Holding ile Polat Enerji'nin şu anda ayrı ayrı ve ortak girişimleri yürüttükleri 500 MW güce sahip olacak rüzgar santralleri projeleri kapsamında 2009 yılı içerisinde Çanakkale'de 15 MW., Manisa'da ise 30 MW. kurulu gücünde rüzgar santrali yatırımlarını devreye almışlardır. 2011 yılı sonuna kadar da 400 MW. kurulu gücünde yatırımın tamamlanması planlanmaktadır.

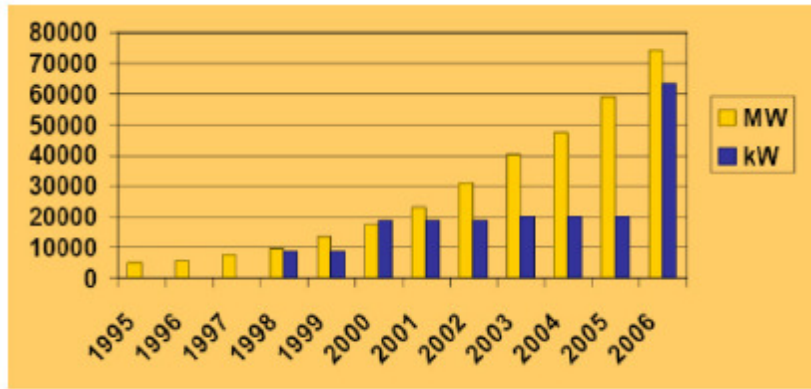
Enerji sektöründe faaliyet gösteren firmalardan olan Zorlu, Aksa ve Sanko'da yenilenebilir enerjiye yatırım yapmaktadırlar. Elektrik dağıtım ihaleleri kadar, yenilenebilir enerjiyle de yakından ilgilenen Zorlu Enerji bölgede lider olmayı hedeflemektedir. Zorlu Enerji'nin Pakistan'daki rüzgâr santrali projesi kapsamında rüzgâr ölçüm istasyonunun kurulması ile birlikte çalışmalarına başlamıştır.

Yenilenebilir enerji yatırımlarına yönelen gruplardan bir diğeri ise Sanko Grup, Türkiye'de 800 milyon dolar ile 1 milyar dolar arasında enerji yatırımı yapacağını belirtmektedir. Finansal destek olarak da Garanti bankası, 42,5 MW kurulu gücüyle en büyük rüzgar elektrik santrali olacak Bergama Projesi için MV Holding'e 41,75 milyon Euro tutarında proje finansmanı kredisi sağlayacağını açıklamıştır.

EPDK. ise 9 Mart'ta toplam 136,55 MW kurulu gücünde 7 ayrı rüzgar enerjisi santrali kurulması için lisans talebini kabul etmiştir. Lisans verilen şirketler arasında Didim'de

31,5 MW kurulu gücünde rüzgar santrali yatırımı gerçekleştirmeyi planlayan Ayen Enerji ile Balıkesir’de 16 MW kurulu gücünde rüzgar santrali kuracak olan Akenerji de bulunmaktadır. Ayres, İstanbul Enerji, Belen Elektrik, Kapıdağ, lisans alan diğer şirketler arasındadır. Enerji Bakanlığı Türkiye’de 2020’ye kadar 3000 MW kurulu güce sahip rüzgar santralinin devreye girmesini planlamaktadır.

Tüm dünya üzerinde rüzgar enerjisi kurulu gücü, yıllık %20-30’luk bir artış seviyesi ile, 2006 yılı içersinde 74 GW. seviyesine ulaşmıştır.



Şekil 3. 2 Dünyadaki rüzgar enerjisindeki kurulu gücün yıllara göre değişimi.

Şekil 3.2’de dünyada kurulu rüzgar enerjisi gücünün (MW), Türkiye’de kurulu rüzgar enerjisi gücü (kW) ile kıyaslaması görülmektedir.

3.1 Türkiye’deki Rüzgâr Enerji Santralleri

Türkiye’de rüzgâr enerjisinden elektrik üretim amaçlı ilk modern rüzgâr türbini Çeşme Altın Yunus tesislerinde 1985’te kurulmuştur. Bu rüzgâr türbininin gücü 55 kW’tır. Bu gücüne 12 m/s’lik rüzgâr hızında erisen türbinde, Çeşme koşullarında yılda ortalama 100.000 kWh elektrik enerjisi üretilmekteydi. ilk rüzgar elektrik santrali yine aynı bölgede oto prodüktör statüsünde kurulmuştur. Bu rüzgâr çiftliğinde her biri 500 kW gücüne sahip 3 adet rüzgâr türbini bulunmaktadır.

21 Şubat 1998 tarihinde işletmeye alınmıştır ve kurulu gücü 1.5 MW’tır. Türkiye’deki rüzgar enerjisinden yararlanılarak yapılan ilk Yap–işlet–devret model elektrik santrali, 28 Kasım 1998 tarihinde işletmeye açılan Çeşme Alaçatı’daki rüzgar santralidir.

Toplamda 7.2 MW. kurulu güce sahip olup 600 kW. gücünde 12 tane türbininden oluşmaktadır. Türkiye’de 3. rüzgar çiftliği toplam kurulu kapasitesi 10.2 MW. olarak

Haziran 2000’de Bozcaada’da işletmeye alınmıştır. Bu rüzgar çiftliğinde 600 kW gücüne sahip 17 tane türbin bulunmaktadır. İstanbul’da 1.2 MW’lık rüzgar elektrik santrali oto prodüktör statüsünde 2003 yılında İstanbul’da işletmeye alınmıştır. İstanbul Silivri’de 2006 yılında 850 kW’lık rüzgar türbini devreye girmiştir. Bandırma’da 30 MW’lık rüzgar santrali da 2006’da işletmeye alınmıştır.

Toplam kurulu güç kapasitesi ise 101.25 MW’ tır. Çizelge 3.5.’de Türkiye’deki işletme halinde olan RES’ler görülmektedir. Bitmek üzere olan projelere bakıldığında, 2008 yılında toplam kurulu güç 272 MW olarak görülmektedir. Kurulu gücün 2010 yılında 500 MW olması beklenmektedir.

Çizelge 3. 5 İşletmedeki RES’ler

RES Adı	Yer	Kurulu Güç (MW.)
Ares	Çeşme	7,2
Delta	Çeşme	1,5
Sunjüt	Hadımköy	1,2
Bores	Bozcaada	10,5
Bares	Bandırma	30
Tepe	Silivri	0,85
Mazi	Çeşme	39,2
Deniz A.Ş.	Akhisar	10,8
Toplam:		101,25

Türkiye’de rüzgar enerji sektörünün başlangıcı 5346 Sayılı “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına ilişkin Kanun” (Kanun) çerçevesinde YEK’lere dayalı üretim yapan tesislere ilişkin destek yöntemleri aşağıda anlatılmıştır:

- Kanun kapsamındaki YEK’lerden üretilen elektrik enerjisi, perakende satış lisansı sahibi tüzel kişiler tarafından aşağıda yazılı hükümlere göre tesis edilen ikili anlaşmalar çerçevesinde satın alınır.

a) Perakende satış lisansı sahibi tüzel kişilerin her biri, bir önceki takvim yılında satışa sundukları elektrik enerjisi miktarının, ülkede sattıkları toplam elektrik enerjisi miktarına oranı kadar, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından ilan edilen YEK Belgeli elektrik enerjisinden satın almakla yükümlü olup ülkede arz edilen YEK

Belgeli toplam elektrik enerjisi miktarının yeterli olması halinde, perakende satış lisansı sahibi tüzel kişilerin alım yükümlülüğü bir önceki takvim yılında sattıkları elektrik enerjisi miktarının yüzde sekizinden daha az olamayacaktır.

b) 2011 yılı sonuna kadar bir takvim yılı içerisinde bu Kanun kapsamında satın alınacak elektrik enerjisi için uygulanacak fiyat; EPDK'nın belirlediği bir önceki yıla ait Türkiye ortalama elektrik toptan satış fiyatı olacaktır. Bu fiyatı her yılın başında en fazla % 20 oranında artırmaya Bakanlar Kurulu yetkili bulunmaktadır.

c) 2011 yılı sonundan itibaren bu fiyat uygulaması işletmede yedi yılını tamamlamış olan YEK Belgeli elektrik enerjisi üreten tesisler için sona ermektedir.

Perakende satış şirketleri, bu Kanun kapsamında almakla yükümlü oldukları YEK Belgeli elektrik enerjisini, öncelikle işletmede yedi yılını doldurmamış olanlardan EPDK'nın belirlediği bir önceki yıla ait Türkiye ortalama elektrik toptan satış fiyatına göre satın almakla ve aldıkları elektrik enerjisi miktarı yüzde sekizin altında kaldığı takdirde bu orana ulaşmak için kalan gerekli miktarı, ikili anlaşmalar çerçevesinde Türkiye ortalama elektrik toptan satış fiyatından yüksek olmamak üzere piyasa koşullarında satın almakla yükümlüdürler.

- Yeterli jeotermal kaynakların bulunduğu bölgelerdeki valilik ve belediyelerin sınırları içinde kalan yerleşim birimlerinin ısı enerjisi ihtiyaçlarını öncelikle jeotermal ve güneş termal kaynaklarından karşılamaları esas alınmaktadır.
- Kanun kapsamındaki enerji üretim tesis yatırımları, kullanılacak elektromekanik sistemlerin yurt içinde imalat olarak temini, güneş pilleri ve odaklayıcı üniteler kullanan elektrik üretim sistemleri kapsamındaki yapılacak AR-GE ve imalat yatırımları, biyokütle kaynaklarını kullanarak elektrik enerjisi veya yakıt üretimine yönelik AR-GE tesis yatırımları Bakanlar Kurulu kararı ile teşviklerden yararlandırılmaktadır.

RÜZGAR TÜRBİNLERİ

4.1 Rüzgar Enerjisi Türbinlerinin Tanımı

Tahrik edilen kısmı ile dönme hareketi yapan ve bir akışkanda bulunan enerjiyi milinde mekanik enerjiye dönüştüren makineler türbin olarak adlandırılmaktadırlar. Rüzgar türbinleri ile ilgili tanımlar, değişik kaynaklarda birbirleriyle çelişmektedir.

Bu konudaki en genel tanımlama ise: Pervane kanatları, pervane göbeği ve pervane miline rotor veya türbin denilir. Pervane mili dişli kutusuna bağlıdır. Dişli kutusunu jeneratöre bağlayan mile de, jeneratör 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 tabiri kullanılmaktadır.

4.1.1 Rüzgar Türbinlerinin Özellikleri ve Yapısı

Rüzgar enerjisi üretimi için kullanılan türbinler teknolojik gelişmeler sayesinde gün geçtikçe modernleşmekte ve eksik olduğu düşünülen konular bir bir tamamlanmakta. Performansı arttırıcı sistemler ile rüzgar dünden bugüne yel değirmenlerinden modern türbinlere kadar basamak basamak bir gelişim gösterdi. Şimdi kısaca modern türbinlerin genel yapısına bakacak olursak;

- Modern rüzgar türbinleri 2-3 kanatlıdır.
- Kanat çapları yaklaşık olarak 30 m'dir.
- Belli bir zaman aralığında rüzgar hızı değişmez değildir. Ancak, şebekeye enerji, rüzgar jeneratörü ve kanat özellikleri ile yaklaşık olarak değişmez olarak verilir.

- İki rüzgar türbini arasındaki uzaklık yaklaşık olarak 150-300 m. arasında değişebilir. Bu nedenle arazinin yaklaşık %99'luk kısmı tarım, hayvancılık ve diğer amaçlar için kullanılabilir.
- Enerji üretimi rotor yüksekliğinde rüzgar hızının küpüne ve kanatların süpürme alanına bağlıdır.
- Her türbin bilgisayar sistemi ile denetlenmektedir.
- Rüzgardan üretilen elektriğin birim maliyeti giderek düşmektedir. 2010 yılına kadar maliyetlerin %25 azalması beklenmektedir.
- Türbin güçleri birkaç kW tan birkaç MW a kadar değişebilmektedir.
- Rüzgar türbinleri karaya kurulduğu gibi denizlerde de kurulabilmektedir.

Rüzgar türbinine bağlı elektrik üretici, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Rüzgar enerjisi dönüştürme sistemleri 50W ile 2-3 MW arasında mekanik veya elektrik gücü sağlayabilmektedir. Havanın özgül kütlesi az olduğundan, rüzgardan sağlanacak enerji rüzgar hızına bağlıdır. Rüzgar hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı biçimde artar. Rüzgarın sağlayacağı enerji, gücüne ve esme saati sayısına bağlıdır, özgül rüzgar gücü, hava debisine dik birim yüzeye düşen güçtür.

Topografik koşullara göre yerden 50 m. yükseklikte özgül güç, hız 3.5 m/s den küçük iken, $50W/m^2$ den az olabileceği gibi hız 11.5 m/s den büyük iken $1800W/m^2$ den çok olabilir. Ortalama rüzgar hızı yıldan yıla değişebilir. Rüzgar hızının değişkenliğinden dolayı, rüzgar enerjisi potansiyelinden elde edilecek enerji, yıllık ortalama hız değerinden hesaplanan enerjiden daha fazla olmaktadır. Bu yüzden belli bir bölgede rüzgar türbinleri ile üretilebilecek elektrik enerjisi üretim miktarının hesabında, yıllık ortalama rüzgar hızından çok gözlemlenen dağılım veya Weibull dağılımı ile hesap edilmiş rüzgar hızı sıklık dağılımı kullanılmaktadır. Türbin tarafından üretilen enerjinin miktarı, rüzgar hızı dağılımına bağlıdır. Rüzgar hızları, frekans dağılımına bağlı olarak, aynı ortalama rüzgar hızına sahip farklı yerlerde iki kata varabilecek güç yoğunluğu farklılıkları olabilir. Bu durum küp çarpanından kaynaklanmaktadır.

Elde edilen rüzgar kayıtları, kalite kontrolü yapılarak istatistik çözümlemeler de kullanılmak üzere değerlendirilir. Değerlendirmelerde, hem uzun dönemli rüzgar

kayıtlarını elde etmek, hem de farlı site ve farklı yüksekliklerde rüzgar özelliklerini belirlemek için rüzgar hızı dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılır. Bu fonksiyonlar, Weibull dağılımı, Rayleigh dağılımı ve Rüzgar gülüdür.

4.2 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgar türbinleri, direnç, kaldırma ve yükselen hava kuvvetinden yararlanmalarına göre, pervane ekseninin yatay yada düşey olmasına göre sınıflandırılabilirler.

4.2.1 Rüzgar Kuvvetinden Yararlanma Şekline Göre Sınıflandırma

Rüzgar türbinleri rüzgar kuvvetinden yararlanma şekillerine göre 3 kısımda incelenirler.

Bunlar;

- Rüzgârın Direnç Kuvvetinden Yararlanılan Türbinler
- Rüzgârın Kaldırma Kuvvetinden Yararlanılan Türbinler
- Yükselen Hava Akımlı Rüzgâr Türbinleri

4.2.1.1 Rüzgârın Direnç Kuvvetinden Yararlanılan Türbinler

Direnç kuvvetinden yararlanan türbinlerde, rüzgâra karşı bir düzey tutulur ve rüzgar basıncından dönme hareketi oluşur. Örnek olarak; kepçe tipi anenometreler, Fars çarkı ve Savonius türbini gösterilebilir (Şekil 4.1). Direnç kuvvetinden yararlanan türbinler, pistonlu pompalar ile su pompalanması gibi yüksek moment gereken yerlerde kullanılmaktadırlar.

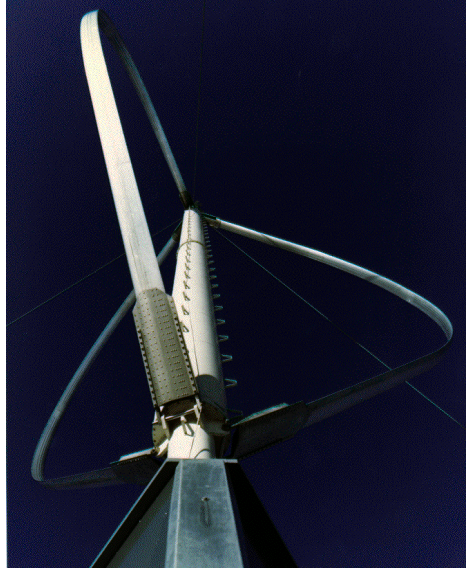


Şekil 4. 1 Savonius rüzgar türbini ve yapısı.

4.2.1.2 Rüzgarın Kaldırma Kuvvetinden Yararlanılan Türbinler

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 5kW. ile 100kW. arasında olanlar küçük güçlü, 100kW'ın üstünde ise büyük güçlü rüzgar türbinleri olarak sınıflandırılır.



Şekil 4. 2 Darrius tipi rüzgar türbini

4.2.1.3 Yükselen Hava Akımlı Rüzgar Türbinleri

Yükselen hava akımlı rüzgar türbinleri, hava hareketindeki kinetik enerjiden yararlanan türbinlerdir. 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. Isıtılarak yükselmesi istenen hava, üsten cam veya plastik malzemedен 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. Bu baca, alttan ankastre mesnet üsten serbest bir çubuk olarak idealleştirilmektedir.

4.2.1.4 Pervane Ekseninin Konumuna Göre Sınıflandırılması

Rüzgar türbinleri pervane eksenlerinin konumlarına göre 2 ayrı kategoride sınıflandırılırlar

Bunlar;

- Yatay Eksenli Türbinler
- Düşey Eksenli Türbinler

4.2.1.4.1 Yatay Eksenli Türbinler

Dönme eksenleri rüzgar yönüne paralel ve kanatlar rüzgar yönüne diktir. Ticari türbinler genellikle yatay eksenlidir Rotor, rüzgarı en iyi alacak şekilde döner bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. Yatay eksenli türbinlerin çoğu rüzgarı önden alacak şekilde tasarlanır. Rüzgarı arkadan alan türbinlerin ise, yaygın bir kullanım alanları yoktur.

Yatay eksenli türbinlerde (Şekil 4.3) rotor, dişli çark, jeneratör ve fren bir kule üzerinde yatay safta bağlanmışlardır. Büyük güçlü türbinlerde (1 MW'dan büyük) transformatör de kulenin tepesinde türbin gövdesinde yer alır. Küçük güçlü türbinlerde ise, transformatör şebeke bağlantı sistemleri ile birlikte yerde bulunur.



Şekil 4. 3 Yatay eksenli bir rüzgar türbini

Rotora iki veya üç kanat bağlıdır. Üç kanatlı rotor sürekli (değişikliği az, satabil) üretim sağlayıp daha sessiz çalışmasına karşın, bu tip rotorların maliyetleri yüksektir. 500 kW ile 3 MW arasındaki türbinler için rotor çapı (=D) genellikle 40-80 m. arasında değişmektedir. Rotor genellikle kulenin önünde yer alır. Rotorun kulenin arkasında kalması halinde kulenin yarattığı türbülans türbin verimini düşürmektedir. Rotorun türbin önünde rüzgâr doğrultusuna göre ayarlanabilmesi için elektrikli yönlendirici bulunur ve bu türbin gövdesi ile kule arasında yer alır. Kule genellikle çelikten imal edilir. Büyük türbin kuleleri betondan da olabilmektedir.

Jeneratörün sabit hızlı olması halinde rotor hızının kontrolü gerekmektedir. Aksi halde aşırı rüzgâr hızlarında rotor kontrolsüz hızlanır ve kazaya sebep olur. Rotor kontrolü iki şekilde yapılmaktadır:

a) Rotor kanatlarının uygun dizaynı ile rüzgâr hızı belirli bir değerin üstüne çıksa dahi (örneğin: 25 m/s.) türbin hızı sabit kalmaktadır (stall control). Bu olay hidroelektrik türbinlerindeki kavitasyon ile benzerlik göstermektedir.

b) Kanatların rüzgâr doğrultusu ile açısının bir hidrolik sistemle değiştirilmesi (pitch control) ile rotor kontrolü sağlanabilmektedir. Çok yüksek hızlarda kanatlar rüzgâra en az direnç gösterecek şekilde çevrilerek türbin hızı ayarlanabilmektedir. Bunun hidroelektrikteki benzeri Kaplan türbinleridir. Açısı değiştirilebilen rotor kanatlarının diğer faydası düşük rüzgâr hızlarında da yüksek verimin elde edilebilmesidir. Asenkron jeneratörlerin rüzgar türbinlerinde kullanılmaya başlanmasıyla birlikte tüm rüzgar hızlarında enerji dönüşümü mümkün kılınmıştır.

Senkron jeneratör kullanılan rüzgar türbinlerinin hızını jeneratörün dizayn hızına çıkartmak için rotor ile jeneratör arasında dişli çark kullanılmaktadır. Ancak bu hem maliyeti hem de bakım masraflarını arttırmaktadır.

4.2.1.4.2 Düşey Eksenli Türbinler

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

Aynı ilke Savonius rotorlarda daha özel bir şekilde kullanılır. Bu rotorda güç katsayısı 0,15'den daha azdır. Bu nedenle güç üretiminde tercih edilmezler.



Şekil 4. 4 Düşey eksenli rüzgar türbini

Kanatlar bir düşey mile bağlanmıştır. Bu türbinler G.J.M. Darrieus isimli bir Fransız mühendis tarafından 1931'de icat edildiğinden Darrieus türbini olarak da isimlendirilir.

Yatay eksenli türbinlere göre üstünlükleri şunlardır:

- Rüzgâr doğrultusundan etkilenmez. Dolayısıyla yönlendiriciye ihtiyaç yoktur.
- Bütün elektromekanik aksam yerde olduğu için yatırım ve bakım masrafları daha azdır.

Buna karşılık düşey eksenli türbinlerinin başlıca iki eksikliği var:

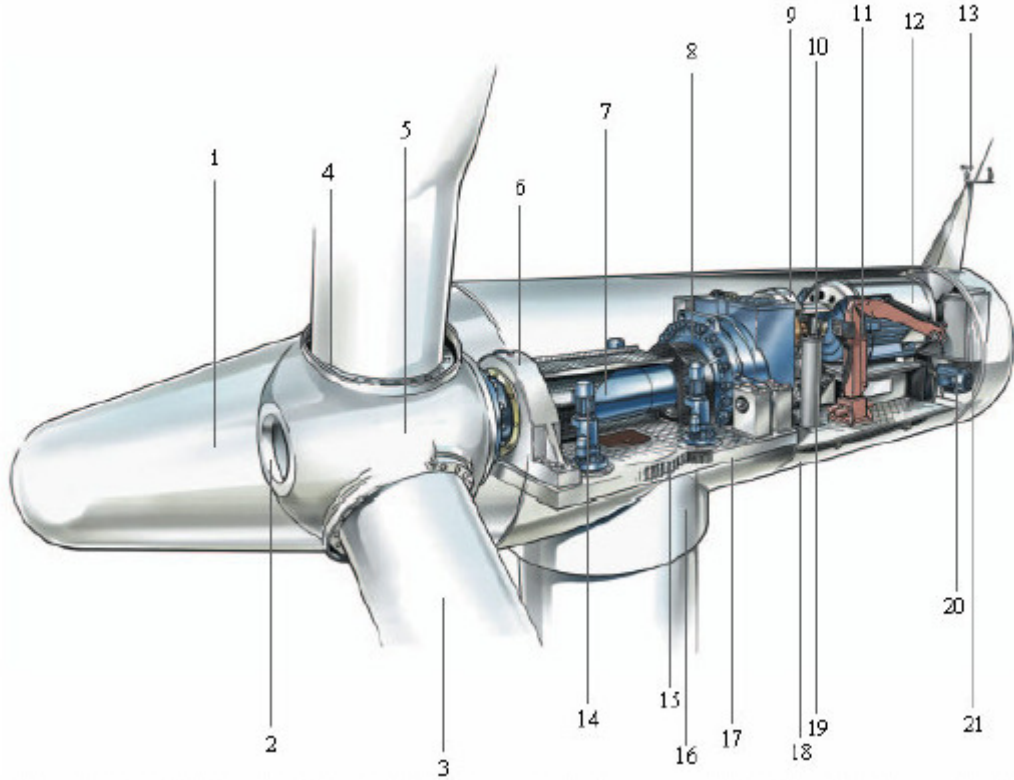
- Türbin kanatları dizaynı dolayısıyla verimleri düşüktür.
- Kanatların yere yakınlığı sonucu düşük rüzgâr hızına maruz kalırlar, bu ise enerji üretimini azaltır.

Verim düşüklüğü nedeniyle düşey eksenli rüzgâr türbinleri fazla uygulama alanı bulamamıştır.

Uygulama Kanada ve Kaliforniya'daki birkaç ünite ile sınırlı kalmıştır. "H" türbini denen ve bir kulenin tepesinde düşey mil (şaft) üzerine yerleştirilen türbin araştırma konusu oluyorsa da henüz ekonomik açıdan fizibil olamamıştır.

4.3 Modern Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerini Oluşturan Elemanlar

Yer konumuna göre, rotoru yatay eksenle çalışan yatay eksenli rüzgar türbinleri, daha geleneksel ve daha modern bir kullanımı sunarlar. Bir rüzgar türbinin elektrik sistemi mekanik enerjinin elektriksel enerjiye dönüşümü sağlayacak tüm ekipmanın yanında, kontrol ve izleme ekipmanlarını da içermelidir.



Şekil 4. 5 Rüzgar türbininin temel parçaları.

Şekil 4.5’de verilmiş olunan rüzgar türbinine ati sistemin parçaları ise:

1-Pervane muhafazası, 2- Pervane birleştirici, 3- Kanat, 4. Kanat eğim yatağı, 5 – Rotor Göbeği, 6- Merkezi mil yatağı, 7- Ana mil (şaft), 8 – Dişli kutusu, 9 – Fren diski, 10 – Bağlantı noktası, 11 – Servis vinci, 12 – Jeneratör, 13 – Meteoroloji algılayıcılar, 14 – Yaw dişlisi, 15 – Yaw yatağı, 16 – Kule, 17 – Türbin taban plakası, 18 – Gövde, 19 – Yağ filtresi, 20 – Jeneratör fanı, 21 – Yağ soğutucu.

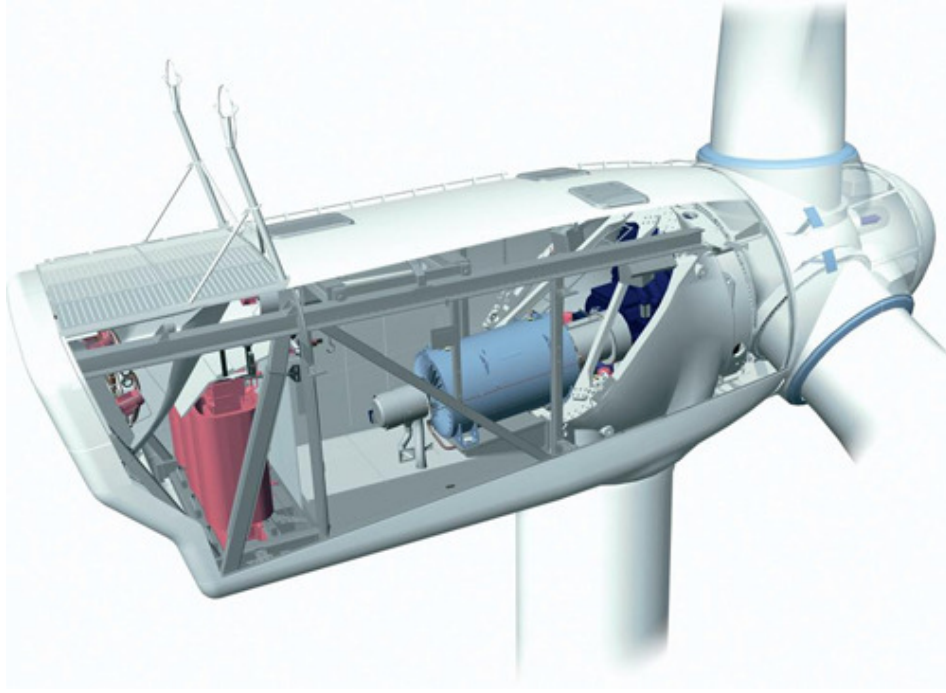
Modern yatay eksenli kanatlı rüzgar türbinlerini oluşturan ana elemanlar aşağıdaki gibi sıralanabilirler;

- Türbinin kule üstündeki kafa kısmı (Nacelle)

- Kanatlar (Rotor Blades)
- Kanatların bağlantı noktası (Hub)
- Düşük Hız Mili (Şaftı)
- Dişli Kutusu (Gearbox)
- Mekanik frenli Yüksek Hız Mili (Şaftı)
- Elektrik Jeneratörü
- Rota Mekanizması (Yaw)
- Elektronik Kontrolcü
- Hidrolik Sistemi
- Serinletme Birimi
- Kule (Tower)
- Anemometre ve Rüzgar Vanası

4.3.1 Türbinin Kule Üst Kısmı (Nacelle)

Rüzgar türbininin dişli kutusunu ve jeneratör dahil ana parçalarını içine alır (Şekil 4.5). Servis personeli nacelle'ye türbin kulesinden girebilir. Nacelle'nin solunda rüzgar türbin rotoru, kanatlar ve kanatların bağlantı noktası bulunur.



Şekil 4. 6 Modern rüzgar türbinlerinde kullanılan tipik bir nacelle yapısı

4.3.2 Kanatlar

Rüzgarı yakalar ve onun gücünü kanatların bağlantı noktasına aktarır. Rüzgar türbinlerinin pervaneleri; alüminyum, titanyum, çelik, elyaf ile güçlendirilmiş plastik (cam elyafı, karbon elyafı ve aramid elyafı) ve ağaçtan imal edilebilmektedir. Modern rüzgar türbinlerinin kanatlarının hemen hemen tamamı, cam elyafı ile güçlendirilmiş polyester veya epoksi gibi, cam elyafıyla plastikten üretilmektedirler. Çelikten üretilen kanatların eğilmeye dayanımı büyüktür. Fakat, yorulma dayanımları ve korozyon sorunu yaratmaktadırlar.

Alüminyum kanatlar, çeliğe göre daha hafif ve korozyona daha dayanıklıdır. Alüminyum malzemenin zayıf noktaları; kabuk şeklindeki malzemenin burkulması, imalat tekniğinin zorluğu ve pahalı olması olarak gösterilebilir.

Cam elyafının kopma mukavemeti, 420 N/nm^2 ile St 52 çeliğinin kopma mukavemeti 520 N/nm^2 'ye yakındır. Karbon elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzemenin kopma mukavemeti ise, 550 N/nm^2 ile çelikten daha iyidir.

Cam elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzemenin ana sorunu, elastisite modülünün 15 kN/nm^2 ile çeliğe nazaran (210 kN/nm^2) çok düşük olmasıdır. Bu

nedenle, çok uzun kanatlarda cam elyaf yerine, elastisite modülü 44 kN/nm^2 . olan karbon elyafı ile güçlendirilmiş epoksi plastik malzeme kullanılır.

600 KW'lık modern bir rüzgar türbininde, her bir kanat 20 m. uzunluğundadır ve bir uçak kanadının oldukça benzeri olarak dizayn edilmektedir.

Ayrıca kanatlarda rüzgar enerjisinden maksimum düzeyde yararlanmak için kendi eksenleri etrafında 90° hareket kabiliyetine sahiptirler [2].

4.3.3 Kanatların Bağlantı Noktası

Kanatların gövde ile olan bağlantı noktalarını oluşturur. Bu noktalar, bazı türbinlerde verimliliği artırabilmek için servo kontrollü hareketli parçalardan oluşur. Bu sayede kanatlar açısal olarak kontrol edilir ve rüzgarın hızına göre optimum açıda kontrol sağlanır.

4.3.4 Düşük Hız Mili (Şaftı)

Rüzgar türbinini kanatların bağlantı noktası yüksekliğinden dişli kutusuna bağlar. 600 kW'lık modern bir rüzgar türbin rotoru 19-30 devir/dakika (rpm) kadar, nispeten yavaş döner. Mil (Şaft), aerodinamik frenleri işletebilecek hidrolik sistemleri borulara bağlar.

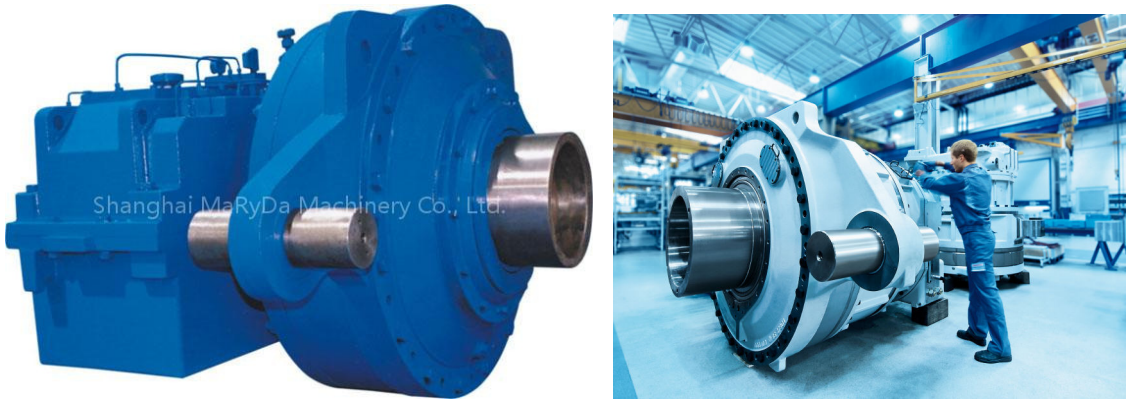


Şekil 4. 7 1,5 MW. Gücündeki bir rüzgar türbininin saftı

4.3.5 Dişli Kutusu

Pervane milindeki enerji, jeneratöre bir dişli sistemi ile aktarılır. Dişli sistemi, pervane milinin devir sayısını jeneratörün gerek duyduğu devir sayısına çıkarır. Dişli kutusu bir rüzgar türbinin en ağır parçasıdır (Şekil 4.8).

Düşük hızlı milden (şafttan) yaklaşık olarak 50 kat daha hızlı dönen yüksek hızlı mil ise sağındadır. Düşük hızlı mil ile yüksek hızlı mili birbirine bağlayan bu parça, elektrik üretmek için birçok jeneratörün ihtiyaç duyduğu dönüş hızı olan dakikada 30-60 (rpm) devirden, dakikada 1000-1800 (rpm) devire kadar çıkarır.



Şekil 4. 8 Dişli kutusu

Yüksek hız milinin görevi jeneratörü sürmektir, düşük hız mili ise rotor tarafından tahrik edilen mildir.

4.3.6 Mekanik Frenli Yüksek Hızlı Mil (Şaft)

Yaklaşık 1.500 devir/dakika (rpm) ile döner ve elektrik jeneratörünü çalıştırır. Acil bir mekanik disk freni ile birliktedir. Aerodinamik frenler kusurlu olduğu zaman veya türbin hizmette olduğu zaman mekanik fren devreye girer.

4.3.7 Elektrik Jeneratörü

Rüzgar enerjisi tesislerinde kullanılan jeneratörler, alternatif akım veya doğru akım jeneratörleri olabilir. Burada elde edilen elektrik akımı, yetersiz kalitede alternatif akım veya doğru akım bile olsa, çeşitli güç elektroniği düzenekleriyle şebekeye uygun hale getirilebilirler.

Doğru akım jeneratörleri, büyük güçlü rüzgar enerjisi tesislerinde tercih edilmemektedir. Bunun nedeni, sık bakım gereksinimi sahip olmaları ve alternatif akım jeneratörlerine göre daha yüksek maliyetli olmalarıdır. Doğru akım jeneratörleri, günümüzde sadece küçük güçlü rüzgar enerji tesislerinde akülere enerji depolamak için kullanılır.

Direkt şebekeye bağlantı sistemlerinde; alternatif akım jeneratörlerini oluşturan asenkron veya senkron jeneratörlerin millerinin devir sayısı $n_{\text{senkron}} = 60.f/p$ (d/d) bağlantısı ile verilir. Burada f Hertz biriminde elektrik şebekesi frekansı, p çift kutup sayısı ve n dakikada devir sayısıdır.



Şekil 4. 9 AC jeneratör

Dişlideki kayıplar ve gürültünün önlenmesi amacıyla, çok kutuplu jeneratörü olan dişli kutusuz türbinler de kullanılmaktadır. Bu bağıntıdan da anlaşılabileceği gibi, jeneratörün kutup sayısı arttıkça, 50 Hz'lik elektrik şebekesi frekansına uygun akım için gereken jeneratör mili devir sayısı da azalmaktadır. Bu nedenle, yüksek kutup sayılı jeneratörler de dişli kutusuna gerek kalmamaktadır.

Asenkron jeneratör kullanılan rüzgar türbinlerinin bağlandıkları şebekeye olan etkileri ikiye ayrılabilir;

- Kararlı hal güvenliği

➤ Güç kalitesi

Kararlı hal güvenliğındeki amaç rüzgar gücü enjekte edildiğinde, şebeke güç kararlılığı koşullarını kontrol etmektir. Güç kalitesi analizi ise rüzgar hızındaki değışmelere karşı üretilen gerilim dalgasındaki bozulmaları izler[4].

4.3.8 Rota (Yaw) Mekanizması

Yaw mekanizması, rüzgar vanasını kullanarak rüzgar yönünü belirleyen elektronik kontrolcü tarafından işletilir. Rüzgar yönü değıştiğı zaman, normal olarak o anda yaw sadece bir kaç derece kadar olacaktır. Rüzgara karşı nacelle ile rotoru döndürmek için elektrik motorlarını kullanır.

4.3.9 Elektronik Kontrolör

Elektronik kontrolcü, rüzgar türbininin çalışma şartlarını sürekli olarak takip eden ve yaw mekanizmasını kontrol eden bir bilgisayar bulundurur. Herhangi bir bozukluk (dişli kutusu veya jeneratörün aşırı ısınması gibi) durumunda türbini otomatik olarak durdurur ve türbin operatörü bilgisayara modem hattı ile çağrı mesajı gönderir.

Ayrıca türbinin devreye girme ve devreden çıkma hızlarında da türbinin durdurulması işlemi elektronik kontrolcü vasıtasıyla yapılmaktadır.

4.3.10 Hidrolik Sistem

Türbinin aerodinamik frenlerini ayarlamak için kullanılır. Türbinin aşırı hızlanması durumunda kanat kontrolü ve gövde kontrolü ile yavaşlama sağlanamıyorsa veya bu tür kontrol sistemlerinin bulunmadığı eski tip türbinlerde hidrolik fren sistemi kullanılmaktadır.

4.3.11 Soğutma Birimi Fanı

Elektrik jeneratörünü soğutan kısımdır. Ayrıca dişli kutusunun yağını soğutan bir yağ soğutma birimini de bulundurur. Bazı türbinler su-soğutmalı jeneratörlere sahiptir.

4.3.12 Kule

Rüzgar türbininin kulesi, nacelle ve rotoru üzerinde taşır. Genellikle kulenin yüksek olması bir avantajdır çünkü, rüzgar hızları yerden yükseldikçe artar. Tipik olarak 600 kW'lık modern bir rüzgar türbininin kulesi 40-60 m. yüksekliktedir. Kuleler tüp yada kafes biçimindedir.

Tüp biçimli kuleler çalışanlar için daha avantajlıdır, çünkü gerektiğinde bir merdivenle içerden türbinin tepesine çıkmak daha kolaydır. Kafes kulelerin avantajı esas olarak ucuz oluşlarıdır.

Kule malzemesi, genelde çelik veya betondur. Modern rüzgar türbinleri, halka enine kesitli kulelere sahiptir Kule yüksekliği, yüksekteki daha rüzgar hızlarından yararlanmanın getirisi ile boya bağlı artış gösteren kule maliyeti arasındaki optimum çözümle belirlenir.

Kule boyutlandırılmasındaki bir diğer parametre de, eğilme doğal frekansı, kule malzemesi ve dolayısıyla maliyeti önemli ölçüde etkilemektedir. Rüzgar türbinlerinin tüm imalat giderlerinin % 11-20' si kule imalatına aittir.

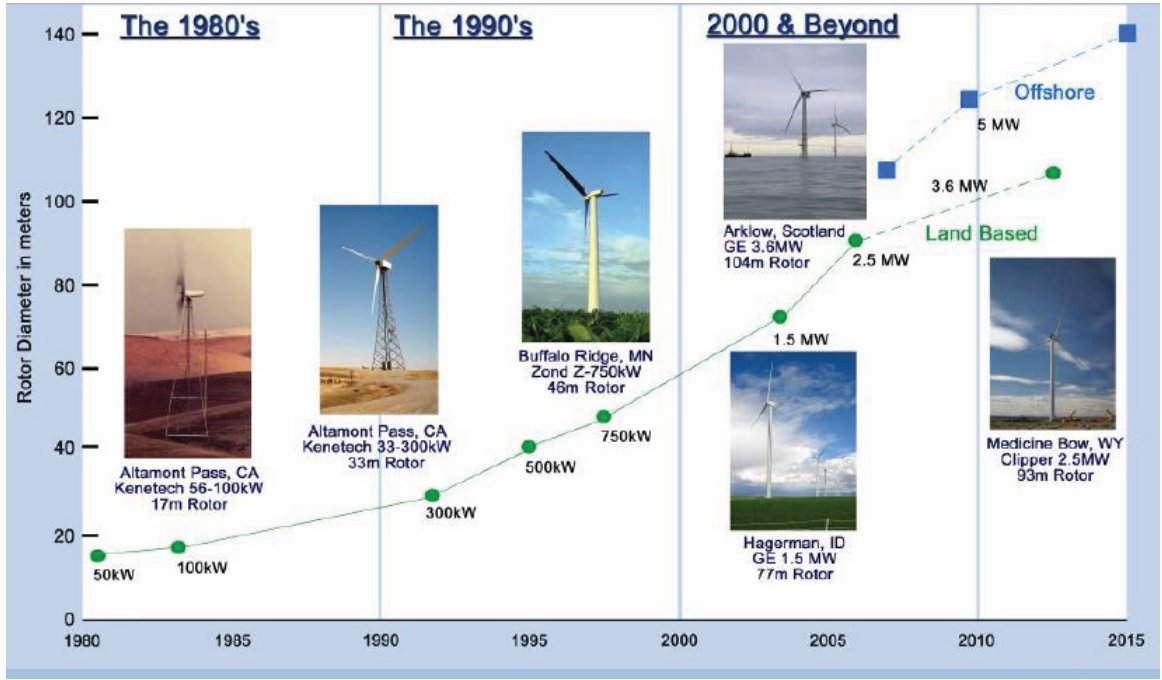
4.3.13 Kule Seçimi

Kule, rüzgar türbinlerinde yatak ve rotoru taşır. Kuleler genellikle tüp şeklinde çelik, kafes yapılı veya betonarme olarak inşa edilir. Halat destekli direk tipi kuleler genellikle küçük türbin uygulamalarında kullanılır.

Tüp şeklindeki kule şekli en çok tercih edilen kule şeklidir. Genellikle 20 – 30 metre yükseklikte üretilir. Kafes yapılı kuleler çelik profillerin kaynaklanarak birleştirilmesi ile oluşturulur. En temel avantajları maliyetlerinin düşük olmasıdır. Benzer boyutlarda bir tüp kulenin hemen hemen yarısı kadar malzeme ve yapım maliyeti vardır.

Birçok küçük türbin halat destekli direk tipi kule kullanılarak inşa edilir. En büyük avantajı ağırlığının çok az ve maliyetlerinin çok düşük olmasıdır. Dezavantajları ise araziye kurulum zorluğu ve tarım alanlarının kullanımını engellemesidir.

Büyük bir türbinden, küçüğüne oranla daha büyük bir güç elde edileceği muhakkaktır. Şekil 4.10'da sırası ile 225 kW. , 600 kW. ve 1500 kW'lık türbinleri görülmektedir.



Şekil 4. 10 Farklı güçlerdeki rüzgar türbinlerinin kule uzunlukları[5].

Kule ve kanat boyutları elde edilen güç/maliyet oranı ekonomik olduğu sürece büyük uzunlukta seçilebilmektedir.

4.3.14 Anemometre ve Rüzgar Vanası

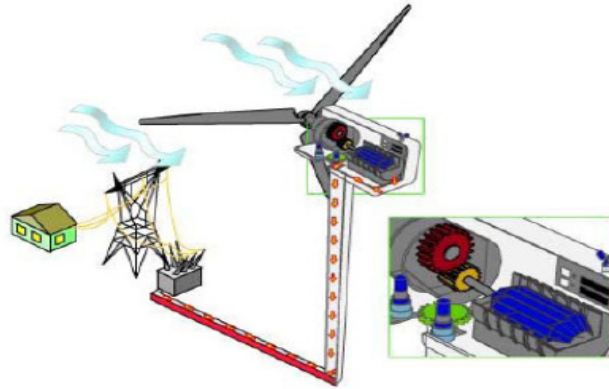
Rüzgarın hızını ve yönünü ölçmek için kullanılırlar. Rüzgar hızı 5 m/s.'ye eriştiğinde türbini harekete geçirmek için rüzgar türbininin elektronik kontrolcüsü tarafından anemometrenin gönderdiği elektronik sinyaller kullanılır. Eğer rüzgar hızı 25 m/s.'i aşarsa bilgisayar, türbini ve çevresindekileri korumak için rüzgar türbinini otomatik olarak durdurur. Rüzgar vanasından gelen sinyaller, rüzgar türbini elektronik kontrolcüsü tarafından alınarak, yaw mekanizması yardımıyla rüzgara karşı türbini döndürmek için kullanılır.



Şekil 4. 11 Türbin boyutlarının tarihsel olarak gelişimi.

Birçok boyutta rüzgar türbini bulunmaktadır. Şekil 4.11’de kronolojik olarak çeşitli türbin boyutları gösterilmiştir. Rotor çapları, güçleri, yıllık enerji üretim miktarları ve kapasite faktörleri gösterilmiştir. Türbin özellikleri her geçen gün gelişmektedir. Günümüzde 5 MW. gibi büyüklüklerdeki türbin kapasiteleri test edilmektedir.

Ayrıca basitçe rüzgar türbininin çalışmasını gösteren bir şekil bu konuda daha açıklayıcı olacaktır. Şekil 4.12’de bir rüzgar türbininin sistem yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4. 12 Bir rüzgar türbin sistem yapısı.

4.3.15 Yatak

Yatak, kulenin en üstünde bulunan ve içerisinde dişli kutusunu, düşük ve yüksek hız milini jeneratörü, kontrolörü ve fren sistemini bulunduran kısımdır.

4.3.16 Hız kontrolörü

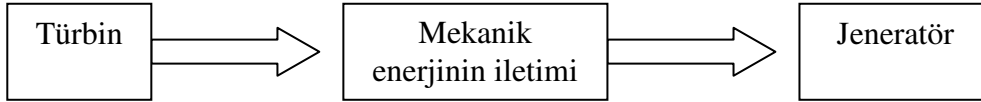
Rüzgar türbinin çalışma aralığını belirleyen kısım hız kontrolörüdür. Rüzgar türbinlerinin enerji üretimine başlayacağı rüzgar hızı (cut-in speed) ve türbinin devre dışı kalacağı rüzgar hızı (cut-out speed) değerlerinin uygulanması hız kontrolörü tarafından yapılmaktadır.

4.3.17 Yönelme sürücüsü ve yönelme motoru

Rüzgar türbinlerinde rotorun rüzgarın esme yönüne göre hareketini belirleyen ekipman yönelme sürücüsüdür. Yönelme motoru ise sürücüden aldığı komutlar doğrultusunda rotorun hareketini sağlar.

4.3.18 Rüzgar Türbinlerinden Elektrik Enerjisi Üretimi

En basit hali ile bir rüzgar türbinindeki enerji dönüşümü kanatlara çarpan rüzgarın rotoru çevirmesi ve rotorun miller vasıtası ile jeneratörü tahrik etmesi ile açıklanabilir.



Şekil 4. 13 Rüzgar türbin sistemlerinde enerji dönüşümü

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN JENERATÖR ÇEŞİTLERİ

5.1 Giriş

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan jeneratörler, türbin rotorundan aldıkları mekaniksel enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Türbin rotoruna olan mekaniksel bağlantı mil aracılığıyla sağlanır, sistemlerin tasarımına göre mil ile jeneratör direk veya dişli kutusu ile bağlanır. Dişli kutusunun kullanılmasıyla türbinin rotor hızının jeneratörün nominal dönüş hızına ulaşması sağlanır.

Kanatların fonksiyonu, rüzgâr kinetik enerjisini dönen mil gücüne çevirerek jeneratörün dönmesini ve böylece elektrik gücünü üretmektedir. Akü şarjı yapan küçük rüzgâr türbinleri dc jeneratörleri kullanırken, şebekeye paralel çalışan rüzgar türbinlerinde ise ac jeneratörler (asenكرون ve senكرون) kullanırlar.

Rüzgar türbinlerinde üretici firmalar tarafından birçok jeneratör çeşitli kullanılmaktadır. Jeneratör çeşitleri içerisinde ilk sırayı sincap kafesli asenكرون jeneratörler, ikinci olarak yuvarlak rotorlu asenكرون jeneratörler, üçüncü olarak sabit uyarımlı senكرون jeneratördür. Sabit hızlı sistemlerde bu farklı yapılar direk olarak şebekeye bağlanabilir.

Sabit uyarımlı senكرون jeneratörler ve asenكرون jeneratörler rüzgar enerjisi sistemlerinde, sağlam bir yapıya sahip olmaları, maliyetlerinin düşük olması, işletme kolaylığı ve işletme maliyetlerinin düşük olması sebebiyle genellikle tercih edilmektedirler. Buna rağmen sabit mıknatıslı senكرون jeneratörlerin, büyük güçlü sistemler dışında, kullanımı yaygın değildir [6].

Yeni tasarlanan sistemlerde, daha düşük hacimde olmaları, karlılık ve veriminin yüksek olması sebebiyle PMSG'ler tercih edilmektedir . Bu jeneratörler, uygun güç elektroniği devreleri ile birlikte, değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılmaya başlanılmıştır [7].

Büyük güçlü sistemlerde PMSG'ler kullanılmasının sağladığı en önemli avantaj jeneratörler ile aktif ve reaktif güç sağlanmaktadır ve reaktif güç akışı kontrol edilebilmektedir. Reaktif güç kontrolünün yapılması sebebiyle senkron jeneratörler istenilen güç faktörü ile kontrol edilebilmektedir.

Bununla birlikte asenkron jeneratörlerden sadece aktif güç akışı sağlanmaktadır ve reaktif güç akışının harici sistemler ile (kapasitor bankaları ile) sağlanması gerekmektedir. Yeni tasarlanan sistemlerde senkron jeneratörler dişli kutusu kullanılmadan VSI inverteri ile direk olarak şebeke bağlantısı ve çıkış gerilimi-frekansı kontrol edilebilmektedir.

Bilezikli asenkron jeneratörler, sabit hızlı rüzgar türbinlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bazı uygulamalarda ise sincap kafesli asenkron jeneratörler, adaptif kontrol yöntemleri ile birlikte kullanılmaktadır. Bu yöntem ile sincap kafesli asenkron jeneratörün verimi artırılır. Asenkron jeneratörler de kullanılan dönüştürücü/evirici (converter/inverter) devreleri, çıkış gerilimini ve frekansı sabitleme özelliğine sahip olduğundan dolayı daha kompleks bir yapıya sahiptir.

Sincap kafesli asenkron makine bir AC sisteme doğrudan bağlanıp sabit hızda işletilebileceği gibi güç elektroniği üniteleri ile birlikte değişken hızlarda da işletilebilir. Bilezikli asenkron jeneratör ise güç elektroniği dönüştürücülerinin boyutuna bağlı olarak çok daha geniş aralıklarda hız ayarlama imkanı verir.

Dişli kutusunun kullanılması jeneratörün bazı karakteristik özelliklerinin optimizasyonunu imkan sağlar fakat dişli kutusunun en büyük dezavantajı mekaniksel yapıda olmasından dolayı zamanla yıpranma ve aşınma meydana gelir.

Frekans konverterlerinde yüksek güçlü yarı iletkenlerin kullanılmasıyla değişken hızlı türbinlerin ve jeneratörlerin doğrudan şebeke bağlantısı sağlanabilir. Elektrik konvertörleri dişli kutusu gibi davrandığından dolayı daha güvenilir ve esnek bir yapı oluşturur ayrıca konverter türbin üzerinde herhangi bir yere montaj edilebilir. Ayrıca yarı iletken güç elemanları sayesinde yeni kontrol ve koruma metotları geliştirilebilir.

5.2 Jeneratör Seçim Kriterleri

Aktif materyallerin ağırlıkları, kullanım şekilleri, karakteristikleri, kullanılan yari iletken teknolojisi, korunmaya olan ihtiyaçları, servis ve bakım ihtiyacı, çevreye olan etkileri ve maliyeti seçim kriterlerini oluşturur.

5.2.1 DC Makine

İç yapıları itibari ile bütün elektrik makineleri alternatif akım makinesidir, çünkü iletkenler N-S kutupları arasındaki manyetik alan içerisinde alternatif forma döner. DC makineler AC'den DC'ye dönüşümü mekanik anahtarlama yoluyla yapar. Komütatörler, AC-DC işlemini karbon fırçaları bakır segmentler üzerinde kaydırarak gerçekleştirir. Kontaklar yüksek bakım maliyeti ve düşük güvenilirliğe sebep olurlar. Bu dezavantaja rağmen hız kontrolü kolay olduğu için geçmişte sıkça tercih edilmiştir.

Klasik DC makineler doğru akım taşıyan şönt veya seri bobin aracılığı ile kendinden uyarımlı olarak (manyetik alanı üretmek için) dizayn edilirler. Günümüzde ise DC makinelerde manyetik alan, sabit mıknatıs kutupları aracılığı ile elde edilmektedir. Böylece alan akımı ihtiyacı ve komütatör ihtiyacı ortadan kalkmaktadır.

Sabit mıknatıs kutupları rotora yerleştirilmiş olup, statora AC akım üreten armatür sargıları yerleştirilmiştir. Daha sonra AC güç elektroniği elemanları vasıtasıyla DC'ye çevrilir. Bu şekildeki bir makine fırçalara ve komütatöre ihtiyaç duymaz, böylece güvenilirlik arttırılmış olur. Bu şekildeki sabit mıknatıs kutuplu DC makineler ancak küçük boyutlu rüzgâr türbinlerinde kullanılabilirler.

5.2.2 Asenkron Makineler

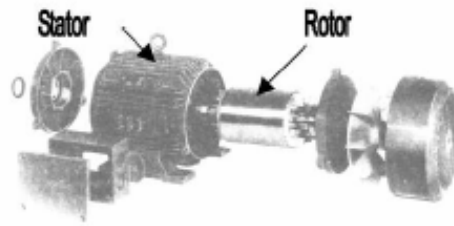
Asenkron makineler, sincap kafesli ve bilezikli olmak üzere iki kısma ayrılır. Birçok araştırmalarda asenkron makinelerinin jeneratör olarak kullanılabileceği öngörülmüştür ve günümüzde rüzgar türbinlerin de jeneratör olarak yaygın olarak kullanılmaktadır.

Asenkron makine kullanımının en büyük avantajı değişken rüzgar hızlarında sistemin çalışmasına izin vermesidir. Buna karşılık manyetik devresinin uyarıma ihtiyacı olması en büyük dezavantajdır.

5.2.3.1 Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör

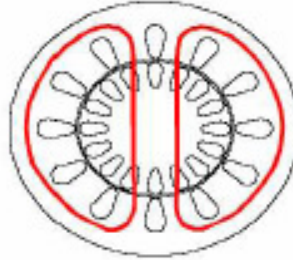
Basitliği ve sağlamlığı nedeniyle sincap kafesli asenkron jeneratörlerin kullanımı birçok üretici firma arasında yaygındır. Stator sargısı yüke veya uyarım kaynağına bağlanır ve izolelidir. Rotor ise izolesiz sargılardan oluşur ve yüksek bir direnç değerine sahiptir.

Bakıma ihtiyaç duymazlar, bakım olarak sadece yataklarının periyodik olarak yağlanması gerekir. SKAJ'nin en büyük problemi stator terminallerinden gerekli olan uyarım akımının elde edilmesidir.

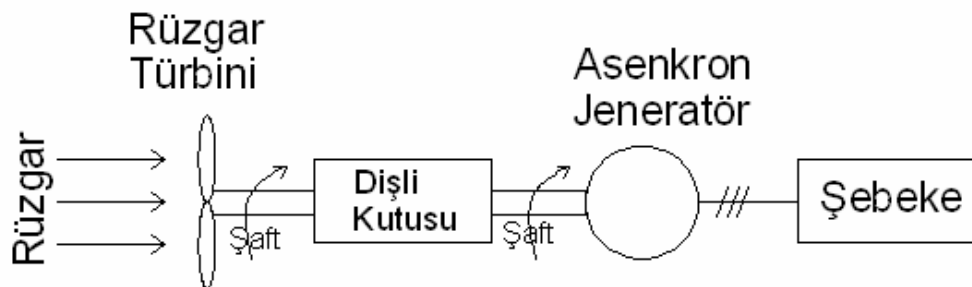


Şekil5. 1 Sincap kafesli asenkron makinenin görünüşü.

Birkaç yüz MW'a kadar asenkron makineler mevcuttur. Kendinden uyarımlı sistemlerin uygulanması ile birlikte tam bir senkronizasyon kolaylıkla sağlanabilmektedir.



Şekil 5. 2 Çift kutuplu bir asenkron makinedeki manyetik akının izlediği yörünge.



Şekil 5. 3 Jeneratör olarak kullanılan bir SKAJ'ın şebekeye bağlantı şeması

Kontrol ünitesinde sistemin gücü kadar frekans inverteri, kapasitor, tristör ve statik VAR. kontrolleri içerir.

5.2.3.2 Bilezikli Asenkron Jeneratör

Yuvarlak rotorlu asenkron makinenin rüzgar türbinlerinde jeneratör olarak kullanıma oldukça elverişlidir. Bu makinelerde rotor, statorda olduğu gibi üç fazlı izolasyonlu sargılara sahiptir.

Jeneratörün çıkış gücü rotor kayıpları ile kontrol edilir. Güç elektroniğindeki gelişmeler ile birlikte rotor devresinde kaybedilen slip enerji ortadan kaldırılır ve çıkışa aktarılır. VESTAS WIND, "OPTOSLIP" modeli ile slip enerjisi güç devreleri kullanılarak çıkışa aktarımı sağlanmıştır.

Yuvarlak rotorlu asenkron jeneratörün kullanımının birçok avantajı olmasına rağmen sincap kafesli asenkron jeneratörlere göre pahalıdır. Rotor üzerinde bulunan izolasyon sargısı vibrasyonun ve döndürme setresinin artmasına sebep olur ve bu jeneratörün ömrünü azaltır.

5.2.3.3 Asenkron Jeneratörlerin Çalışma Şekli

Asenkron jeneratör daha önceden de bahsedildiği gibi rotor ve stator sargıları olmak üzere iki tip sargıdan oluşur. Stator sargısı uyarma veya magnetizasyon alan sargısı ile birlikte üretilen akımı üzerinde taşır.

Rotor sargılarında armatür akımı dolaşır. Sargılara AC uyarma verildiği zaman, manyetik alan uyarma akımının frekansında ve senkron hızda döner alan oluşturur.

Rotor senkronizasyon hızından farklı bir hızda dönüyorsa, rotor sargısı üzerinde üretilen gerilimin frekansı kayma frekansı kadar farklıdır. Bu gerilim armatür akımını oluşturur ve rotor hızı senkron hızın üzerine çıkartılarak jeneratör olarak çalışma sağlanır.

5.2.3.4 Asenkron Jeneratörlerin Normal Çalışma Şartlarında Kullanım Karakteristiği

Normal çalışma şartlarında, Asenkron jeneratörlerin AC şebekeye doğrudan bağlanabilir ve asenkron makinelerin karakteristikleri gereği oluşan kayma yük ile

birlikte artar. Burada karşılaşılan en büyük problem, stator sargıları için gerekli olan manyetik akımın şebekeden sağlanmasından dolayı, tam yükte güç faktörünün çok düşük olmasıdır. Güç faktörü düşük ise kapasitör bankaları kullanılarak sistem kompanze edilir. Asenkron jeneratör ile güç faktörü kontrol edilemez.

Mil gücündeki dalgalanmadan şebeke etkilenir ve bu jeneratörün iç emperdansı tarafından düzeltilir. Bazı üretici firmalar yükte meydana gelen dalgalanma sonucunda ortaya çıkan etkiyi çeşitli kontrol yöntemleri ile kompanze edebilmektedir. Bu yöntemlerden biri rotora izolasyonlu bir sargı eklemektir ve bu sargılar aracılığıyla sistemin güç elektroniği dönüştürücüleri ile kontrolü edilmesidir. Bu yöntemle rotor gücü sınırlı olarak kontrol edilir bununla birlikte slip gücünün kontrolü ile aynı sonuca varılabilir.

Bir diğer yöntem ise armatür devresine güç dönüştürücüsünün seri olarak bağlanmasıdır. Bu yöntemle asenkron jeneratörün tam güç kontrolü sağlanabilir ancak burada dikkat edilmesi gereken konu dönüştürücü güç sistemin, jeneratörün gücü kadar olmasıdır ve buda maliyeti etkileyen faktördür.

Yukarıdaki kontrol yöntemlerinin sonuçları iyidir ve sistemin şebekeye bağlanmasını kolaylaştırır. Bununla birlikte her bir kontrol sisteminin kendine göre farklı avantajı ve dezavantajı vardır.

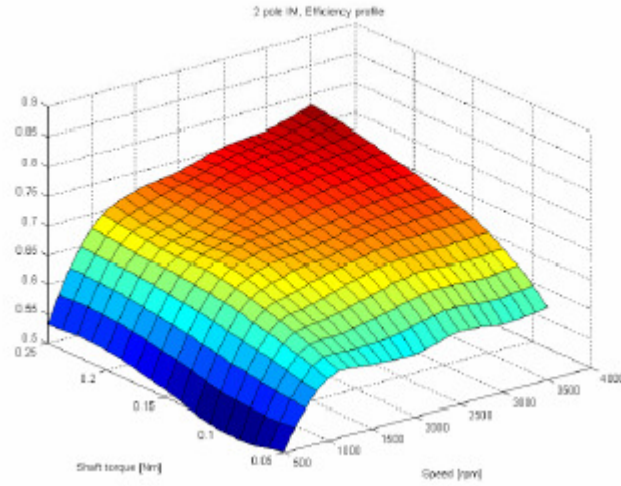
5.2.3.5 Arıza Durumunda Sistemin Davranışı

Sistemin kendi içerisinde oluşan hataların-arızaların hesaplanması ve izolasyonu zordur. Genel olarak sistem içerisindeki aşırı sıcaklık artışı sıcaklık sensörleri tarafından veya aşırı vibrasyonlar ölçer tarafından tespit edilerek sistemin sağlıklı bir şekilde çalışması için gereken önlemlerin alınması sağlanır. Arızaların başlangıç anından tespit edilmesi, arızaların önlenmesine yönelik hazırlanmış olan anlık senaryoların devreye alınması açısından önemlidir.

Ani hataların yerlerinin tespit edilmesi, önlenmesi ve sınıflandırılmasına yönelik yeni metotlar; elektroniğin, hesaplama yöntemlerinin ve sinyal işleme tekniklerinin gelişmesi ile birlikte araştırılmaya ve geliştirilmeye başlanılmıştır. Arıza sırasındaki yapılması gereken işlemler sınıflandırılır ve otomatik koruma sistemi devreye girerek sistemin aşırı şekilde zarar görmesini engeller.

5.2.3.6 Yük ve Hızın Fonksiyonu Olarak Asenkron Jeneratörlerin Verimi

Standart küçük bir asenkron motorun verimli çalışma yüzeyi Şekil 5.4’de verilmiştir. Verim mil hızının ve momentin bir fonksiyonu olarak şekilde gösterilmiştir. Jeneratör maksimum verim bölgesinde, her bir çalışma noktası için kontrol edilmiştir. Fakat hız kritik seviyenin altına düşerse, sistemin kabul edilebilir bir verimde çalışmasını sağlamak imkansızdır.



Şekil 5. 4 Asenkron Motorun verimli çalışma yüzey 3D görüntüsü

Yukarıdaki resim küçük bir asenkron motorun test edilmesiyle elde edilmiştir. Bu yaklaşım tarzı geliştirilerek, verimleri yüksek olsa bile, büyük güçlü asenkron jeneratörlere uygulanabilir.

5.2.3.5 Dişli Sistemi veya Çok Kutuplu Direk Sürücü

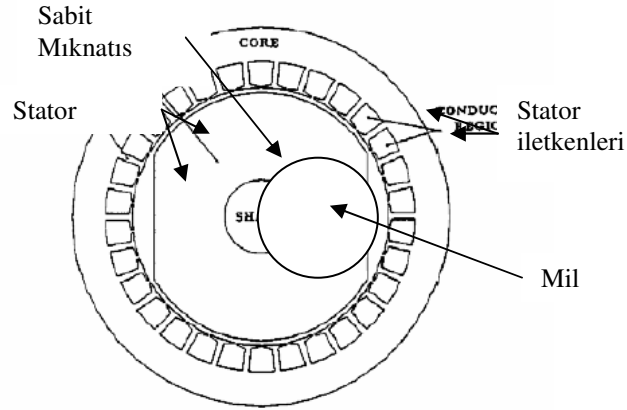
Genelde düşük rüzgar hızlarında, küçük hava aralığı sebebiyle, indüksiyon makinenin çok kutuplu olmasından dolayı sızıntı akısı kabul edilmeyecek düzeye kadar artabilir. Makine ihtiyacı olan torku oluşturabilmek için gereken akıyı sağlayamaması ve kaçak akıların oluşması kontrolü zorlaştırır.

Çok fazla kutup sayısına sahip olan indüksiyon makineler her fazın her bir kutbuna yeterli sayıda oluk yerleştirilecek kadar büyük olmalıdır. Bu çok kutuplu indüksiyon makinenin istenilen çıkışı alabilmek için boyutlarının kaçınılmaz şekilde büyük olacağı anlamına gelir.

5.3 Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratörler (PMSG)

İsminden de anlaşıldığı gibi bu tür jeneratörlerin rotorlarında sabit mıknatıslar kullanılır ve statoru harici bir uyarma akımına ihtiyaç duymazlar.

Şekil 5.5’de tipikal bir Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratörün (PMSG.) ön görünüşü gösterilmiştir. PMSG rotor üzerindeki sabit mıknatıslar sayesinde miklatılanma sağladığından dolayı asenkron jeneratörden farklıdır çünkü asenkron jeneratörler uyarma akımını armatür sargı terminallerinden sağlarlar. Bu ise senkron modda çalışmanın asenkron modda çalışmanın zıddı olduğu anlamına gelir. PMSG’ de çıkış frekansı tamamen mil hızına bağlıdır ve bu frekans neredeyse şebeke frekansına yakındır.



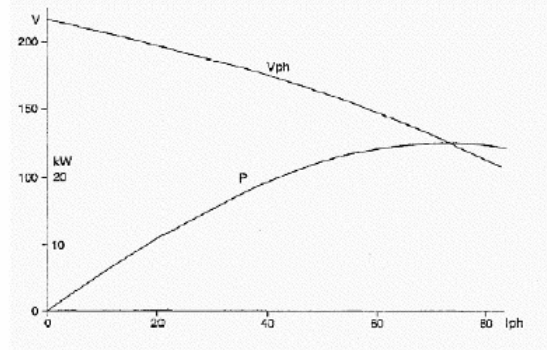
Şekil 5. 5 PMG'nin ön görünüşü.

Sabit mıknatıslı makineler "yüzeysel monte edilmiş mıknatıslar", "gömülü mıknatıslar", "damper sargılılar"...gibi olmak üzere çeşitli kategorilere ayrılabilirler. Bu sistemlerin her birinin kendilerine özgü avantajları vardır.

Günümüzde çok farklı tasarımlar yapılmakla birlikte; genel olarak yüksek hızlı , küçük güçlü uygulamalarda merkez kaç kuvvetlerinin etkisini azaltabilmek için iç içe gömülü mıknatıs yapısı tercih edilmektedir. Bu yapıda boyuna eksen (q-ekseni) boyunca manyetik relüktans enine eksen (d-ekseni) boyunca manyetik relüktanstaki daha büyüktür. Bu durumda $L_d < L_q$ olur.

Rotor yüzeyine yerleştirilmiş mıknatıslı PMSG, aynı rotor uzunluğuna ve çapına sahip rotor içinde gömülü mıknatıs yapısındaki PMSG'ye nazaran biraz daha fazla güç sağlayabilir. Rotor yüzeyine monte edilmiş durumda $L_d = L_q$ olur.

Değişken hızlarda sabit çıkış gerilimi sağlayabilmek amacıyla kapalı çevrim kontrol ve tam statik güç dönüşümü gereklidir. Bu kullanım şekliyle güç elektroniği kontrollü PMSG, yüksek güç yoğunluğu ve düşük kayba sahip olur. Şekil 5.6'da 12 kutuplu, yüzeysel montaj yapılmış mıknatıslara sahip PMSG'nin gerilim regülasyon eğrisi görülmektedir.



Şekil 5. 6 PMSG' ün gerilim regülasyon eğrisi

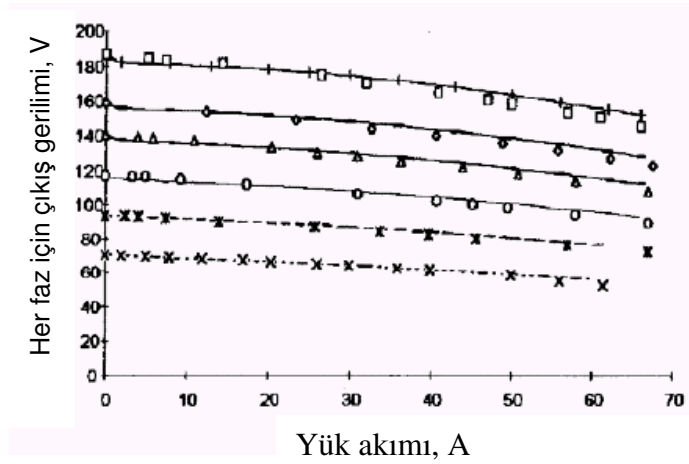
Birçok araştırmalar ve çalışmalar PMSG'nin rüzgar türbini uygulamalarını teşvik etmiştir. PM' in kendinden uyarmalı olması, yüksek güçlerde güç faktörünü ve verimi artırıcı etki yapması iyi bir avantaj olurken, harici bir kısa devrede sistemin çok kötü bir performans sergilemesi ve düzensiz rüzgar hızlarında sistemin kararsız çalışması büyük bir dezavantajdır. Bu sistemi kararsızlığa götürür. Stator sargısı yüke bağlanır ve izolelidir.

Rotor sabit mıknatıslı kutuplardan oluşmaktadır, bu manyetik malzeme toz girişinin oluşturduğu muhtemel etkiye karşı dayanıklıdır. Ayrıca mıknatıslar demir tozlarını çekecektir. Bakımı ise sadece yağlamaktan oluşmaktadır. Buradaki asıl problem rotorun sıcaklığının manyetik malzemenin maksimum sıcaklığının altında tutulması gerekliliği ve bu manyetik malzemenin Curie noktasıyla sınırlıdır ayrıca birleştirici-yapıştırıcı materyalin termal özellikleri sıcaklığa bağlıdır.

Büyük makinelerin raporları-çalışma karakterleri hazırlanmıştır fakat birçok araştırmacılar 10 kW.'ın altındaki sistemler üzerinde durmaktadırlar. Senkron hızda sistemi çalıştırma, senkronizasyon ve gerilim regülasyonu problemlerine sebep olmaktadır. Kontrol metotları sistemin gücünde frekans inverterine ve konverterine ihtiyacı vardır. Metotlar gerilim regülasyonu artırmaktadır ve sistem büyük değerli kondansatörlere ihtiyacı vardır.

5.3.1 Gerilim Regülasyonu

PM jeneratörün en büyük dezavantajı mil hızı ve yük akımı değiştiğinde sabit bir gerilim vermemesidir (Mitcham&Grum,1998). Gerilim regülasyonu, yükteki değişimler sonucunda terminal gerilimindeki değişimleri ifade eder ve değişim eğrisi Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Alan sargılı bir senkron makinede bu regülasyonu manyetik akimin değiştirilmesiyle kompanze edilebilir. Ferit manyetiklere sahip 30 W’lık bir jeneratör de regülasyonun çok yüksek olduğu deneyler sonucunda tespit edilmiştir. Paralel bağlı kondansatörler çıkış geriliminde artışa sebep olur. Aşağıda anlatılacak olan "Torus" jeneratörler kabul edilebilir bir gerilim regülasyonun sahip olduğu deneysel çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir.

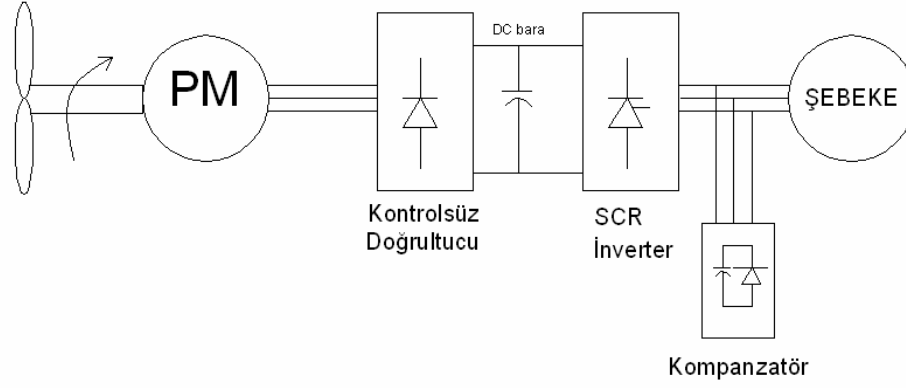


Şekil 5. 7 Resistive yüklenme durumunda PMSG' nin gerilim regülasyonu eğrisi

PMSGlerden alınan enerjinin kontrolü için 4 farklı tipte yapılabilmektedir.

➤ Şebeke Tarafı Tristör Kontrollü İnverter

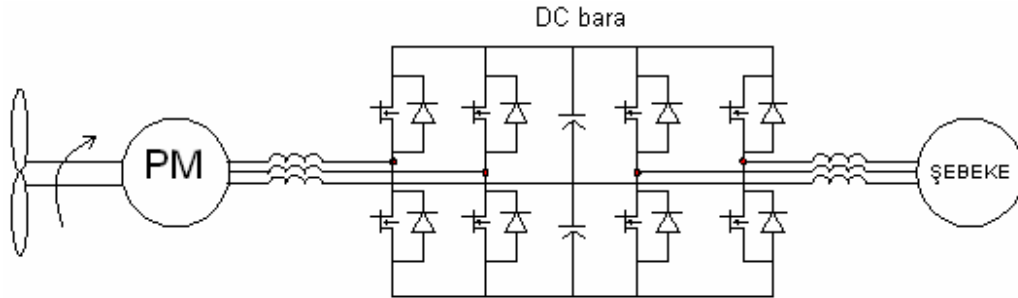
Şebekeye enerjinin aktarılması, inverterde bulunan tristörlerin tetikleme açılarının kontrol edilmesiyle sağlanır. Bu tip inverterlerin en büyük avantajı fiyatlarının diğer sistemlere göre daha ucuz olması ve büyük güçlerde üretim yapılabilmesidir fakat sert anahtarlama yapılmaması en büyük dezavantajıdır. Anahtarlama sonucunda oluşan harmonikler filtrelenmelidir.



Şekil 5. 8 Şebeke tarafı tristör kontrollü inverter sistemin blok şeması

➤ Geri Dönüslü (Back – to – Back) Pwm Dönüştürücü

Jeneratör ve şebeke tarafında olmak üzere toplam 8 adet anahtardan (MOSFET) oluşur. Genellikle jeneratör tarafındaki inverter PI denetleyici ile kontrol edilir ve maksimum akımda, maksimum torku sağlayabilmek için d-ekseni akımları sıfırda tutulmaya çalışılır. Çıkış gücünü, rüzgar hızına göre en üst noktaya çekmek için MPPT algoritmaları uygulanır.

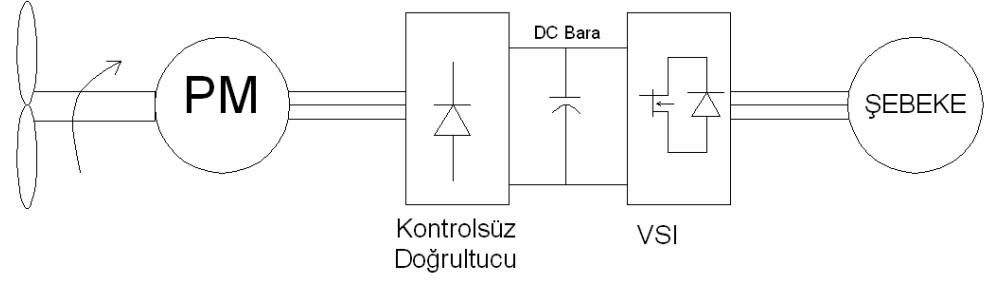


Şekil 5. 9 Geri dönüslü PWM dönüştürücülü sistemin blok şeması

➤ Yarı Kontrollü Doğrultucu ve Mosfetlerden Oluşan Sistem

Sistemin en büyük dezavantajı Mosfetlerin kontrolü sırasında sert anahtarlama yapılımasıdır.

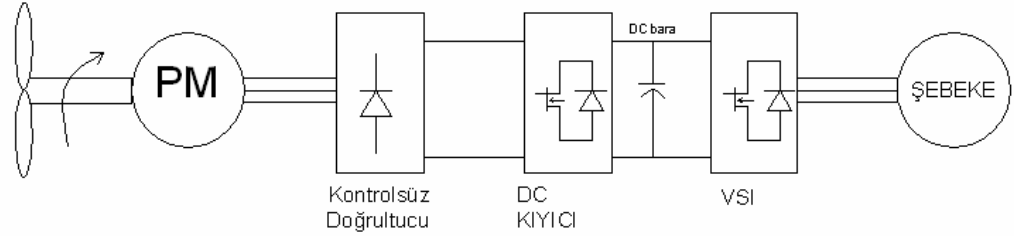
Bu sistemde stator frekansındaki ve DC bara gerilimindeki değişmelere karşın, oransal kontrol yöntemi kullanılır. DC bara gerilimini, referans güç değerine göre ayarlayabilmek için MPPT algoritmaları kullanılır.



Şekil 5. 10 Yarı kontrollü doğrultucu ve mosfetlerden oluşan sistemin blok şeması

➤ DC/DC Dönüştürücü İnverter

Yumuşak anahtarlamaların yapıldığı sistemdir. Kontrol sistemi, hat akımının büyüklüğünü kontrol eder ve akım ile gerilim arasındaki faz farkının ayarlanması ile şebekeye aktif – reaktif güç aktarımını sağlar. VSI ayrıca harmoniklerin filtrelenmesini sağlamak amacıyla farklı frekanslarda tetiklenebilir. Bu sistem ile mil hızına göre optimum dc bara gerilimi ayarlanır. Şebekeye aktarılan aktif-reaktif gücü maksimuma çekebilmek için DC bara gerilimi sabit tutulup reaktif güç ayarı yapılır.



Şekil 5. 11 DC/DC dönüştürücülü inverter sistemin blok şeması

5.3.2 Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratörlerin Kontrolü

5.3.2.1 Sistemin Transfer Fonksiyonu ve Matematiksel Bağlantıları

PMSG'ün eşdeğer devresi şekil 5.12'de ve devre parametreleri çizelge 5.1'de verilmiştir.

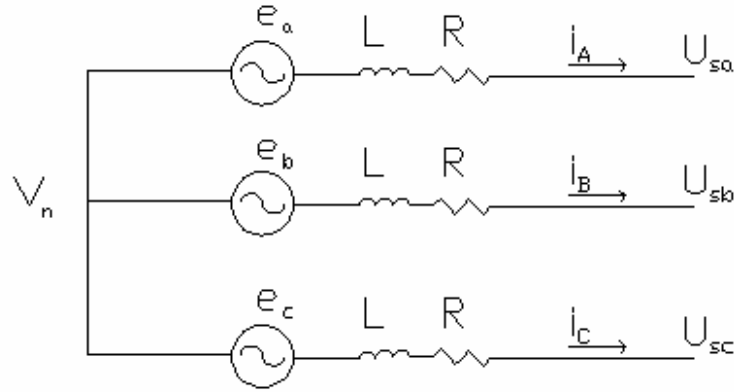
Sistemin matematiksel modellenmesinde PMSG'e ait zaman sabitleri eşitlik 5.1'deki gibi hesaplanır.

$$\tau_d = \frac{L_d}{R}$$

$$\tau_q = \frac{L_q}{R}$$
(5.1)

τ_d = d eksen zaman sabiti

τ_q = q eksen zaman sabiti



Şekil 5. 12 PMSG'ün eşdeğer devresi

Üç fazlı şebeke değişkenlerini, d-q-o eksen takımına aktaran temel park dönüşüm matrisi eşitlik 5.2'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} F_{sd} \\ F_{sq} \\ F_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{sA} \\ F_{sB} \\ F_{sC} \end{bmatrix}$$
(5.2)

Eşitlik 5.2'deki temel dönüşüm matrisinde bulunan F genel değişkeni d-q eksen gerilimi ($V_d - V_q$) ve d-q eksen akımı ($i_d - i_q$) elde edilir.

Eşitlik 5.3'de, şekil 5.12'den yola çıkılarak senkron jeneratöre ait sinüzoidal akı dağılımının ifadesi verilmiştir.

Buradaki:

R ve L : senkron jeneratörün direnç ve endüktansının ifadesi,

u_a : faz – nötr terminal gerilimi,

e_a : sabit mıknatıslar arasında üretilen faz- nötr emf kuvvetinin ifadesidir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} + \frac{V_n}{L} \quad (5.3)$$

eşitlik 5.4’da PMSG’nin d-q eksen takımına göre matematiksel modeli verilmiştir.

$$v_d = R \times i_d + L_d \times \frac{d}{dt} \times i_d - \omega_e \times L_q \times i_q \quad (5.4)$$

$$v_q = R \times i_q + L_q \times \frac{d}{dt} \times i_q + \omega_e \times (L_d \times i_d + \lambda_{PM}) \quad (5.5)$$

5.4 ve 5.5’de verilen eşitliklere ait matris formatı eşitlik 5.6’de verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \frac{\omega_e \times L_q}{L_d} \\ -\frac{\omega_e \times L_q}{L_d} & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\lambda_{PM}}{L_d} \end{bmatrix} \omega_e \quad (5.6)$$

Manyetik kuplaj nedeniyle oluşan d-q eksenel gerilim ifadeleri (eşitlik 5.4 ve 5.5’de bulunan) ihmal edilirse, eşitlik 5.7 ve 5.8’de bulunan ifadeler elde edilir.

$$v_d = R \times i_d + L_d \times \frac{d}{dt} i_d \quad (5.7)$$

$$v_q = R \times i_q + L_q \times \frac{d}{dt} i_q \quad (5.8)$$

v_d ve v_q stator terminal gerilimlerinden elde edilen d-q gerilim ifadesi,

i_d ve i_q stator akımlarının ifadesidir.

λ_{PM} : sabit mıknatıslar arasında üretilen manyetik akının ifadesidir.

PMSG’den alınabilecek güç ifadesi ise eşitlik 5.9’da verilmiştir.

$$P_e = \omega_m \times T_e = \frac{3}{2} \times \omega_e \times [\lambda_d \times i_q - \lambda_q \times i_d] \quad (5.9)$$

Elektriksel açısal frekans ile mekaniksel açısal frekans arasındaki ilişki ise eşitlik 5.10’de verilmiştir.

$$\omega_e = \frac{P}{2} \times \omega_m \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} \lambda_d &= L_d \times i_d + \lambda_{PM} \\ \lambda_q &= L_q \times i_q \end{aligned} \quad (5.11)$$

P: kutup sayısı.

λ_d : d eksen manyetik akısı

λ_q : q eksen manyetik akısı

PMSG'e ait moment ifadesi eşitlik 5.12'de verilmiştir.

$$T_e = \frac{3}{4} \times P \times \left[\lambda_{PM} \times i_q + (L_d - L_q) \times i_d \times i_q \right] \quad (5.12)$$

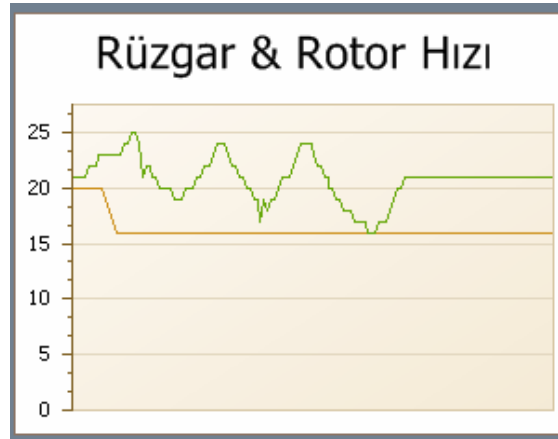
5.12'de verilen moment ifadesi görüldüğü gibi iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki sabit mıknatısların etkisi ile oluşan akı vasıtasıyla elde edilen senkron moment ve ikinci kısım ise manyetik kuplajın etkisi ile oluşan relüktans momentidir ve $L_d = L_q = L$ alındığı takdirde eşitlik 5.13'de verilen denklem elde edilir.

$$T_e = \frac{3}{4} \times P \times \lambda_{PM} \times i_q \quad (5.13)$$

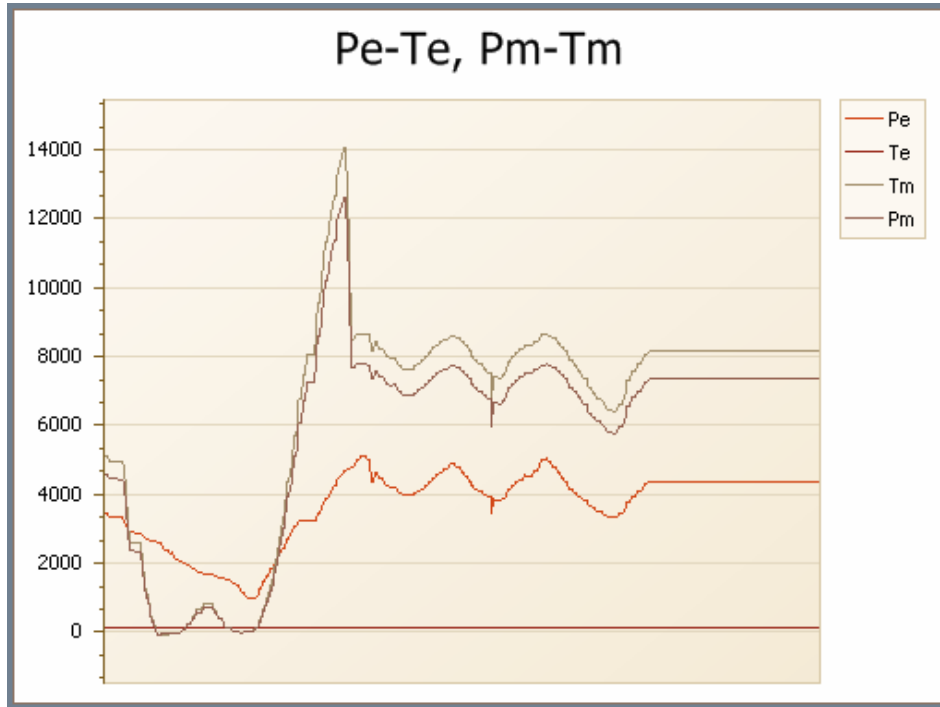
Çizelge 5. 1 Bir PMSG'e ait parametreler

Parametreler	Sembol	Değer	Birim
Güç	P_n	9,42	kW
Faz Gerilimi	V_n	185	V
Nominal Akım	I_n	19,5	A
Nominal Moment	T_n	20	Nm
Nominal Hız	n_n	500	rpm
Stator Direnci	R_s	0,18	ohm
Senkron Endüktans	L_d	2	mH
Senkron Endüktans	L_q	2	mH
Akı	λ_{PM}	0,123	Wb
Atalet Momenti	J	0,48	mKgm2
Kutup Sayısı	$P/2$	4	-

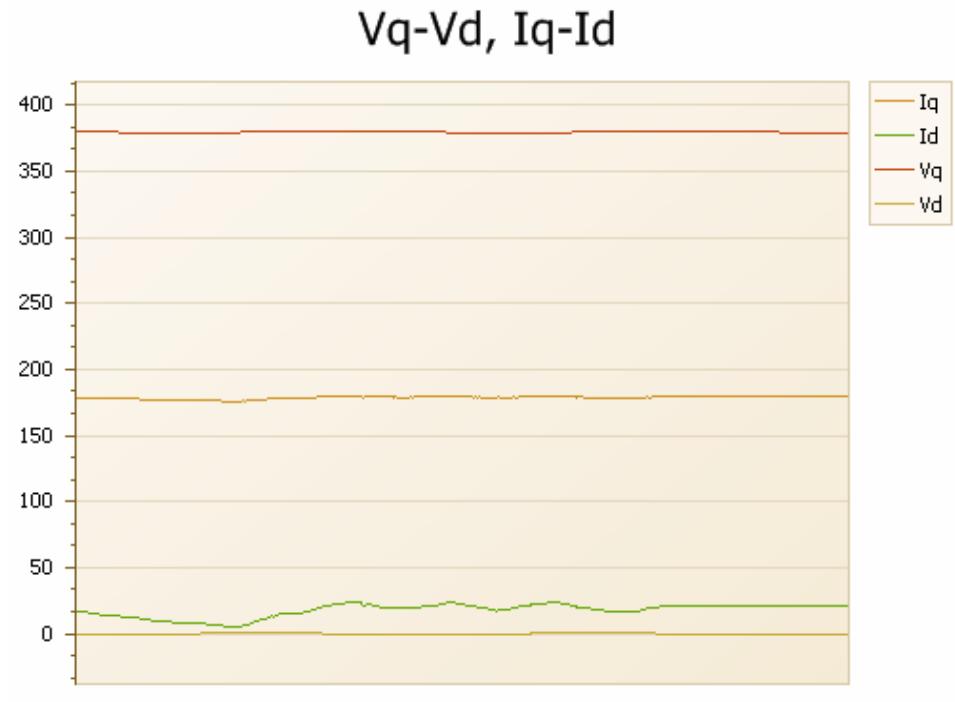
Şekil 5.14 ve şekil 5.15’de yukarıda parametreleri verilmiş olan PMSG’e ait; moment, güç, d-q akım ve gerilim değişimleri verilmiştir. Şekil 5.13’de ise rüzgar ve rotor hızının değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 5. 13 Rüzgar hızı ve türbin rotor hızının değişimi



Şekil 5. 14 Rotorun devir sayısına bağlı olarak, Moment ve Güç değişim eğrisi



Şekil 5. 15 $V_d - V_q$ ve $I_d - I_q$ değişim eğrisi

5.4 Senkron Jeneratörler

Elektriksel güç üretmekte en çok kullanılan makinedir. Senkron makine sabit hıza bağlı olarak sabit frekansta çalışır. Bu sebepten dolayı değişken hızlı rüzgar türbin uygulamaları kullanımı için uygun değildir. Fakat fırça ve komütatör bakımı olmaması en büyük avantajıdır. Güvenliğinin yanı sıra bakım ve işletme maliyeti de çok düşüktür. Relüktans senkron jeneratör ise küçük rüzgar türbinleri için geliştirilmektedir. Senkron makinenin ideal kullanımı, solar termal güç alanları ile birlikte sabit hızda kullanılmasıdır. Şebekeye bağlı sistemlerde kullanılması reaktif güç ihtiyacı olmamasından dolayı uygundur. Fakat günümüzde birçok uygulamada endüksiyon makine tercih edilmektedir.

5.4.1 Yuvarlak Rotorlu Senkron Jeneratörler

Yuvarlak rotorlu senkron jeneratörler elektrik güç sistemlerinde en çok tercih edilen jeneratör tipidir. Günümüzde enerjinin büyük bir kısmı senkron jeneratörlerden elde edilmektedir. Yuvarlak rotorlu jeneratörler uzun yıllardır kullanıldığından dolayı kararlı hal şartlarındaki performansı ve arıza durumundaki davranışı hakkında birçok döküman, araştırma ve kaynağa ulaşılabilir. Buhar türbini gibi yüksek hızlı uygulamalarda silindirik rotorlu kullanılırken su türbini, rüzgar türbini gibi yavaş hızlı uygulamalarda çıkık kutuplu jeneratörler kullanılmaktadır. Rüzgar türbinleri gibi düşük hızlı uygulamalarda çalışan senkron makineler dizayn edilmiştir. ENERCON ve LAERWEY gibi üretici firmalar birçok uygulamalarında bu tip senkron makineleri tercih etmişlerdir.

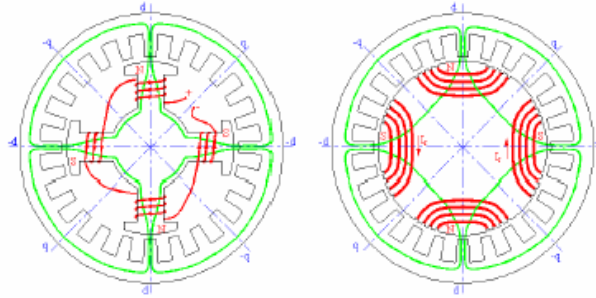
Senkron makinelerde güç elektroniği dönüştürücüleri kullanılarak tam güç kontrolü yapılabilmektedir. Güç kontrolünün yapılabilmesi değişken hızlardan sistemin çalışmasını sağlar. Bu ise iyi bir avantajdır. Diğer durumlarda senkron makineler sabit hızlı sistemlerde kullanılır.

Senkron makinelerden çıkış alınması için gereken rotor akımı, fırçasız uyarıcı sistemlerle, kıyıcılarla veya kayan fırça ve bileziklerle sağlanır. Fırçasız uyarıcı sistemler için bir diğer sargı ve kıyıcı gerekmektedir. Kayan bileziklerdeki fırçalar kayıplarını artırıcı etki yapar. Fırça ve bileziklerle yapılan her iki uygulamada bakıma ihtiyaç duyarlar ve çok fazla güvenilir sistemler değildir.

5.4.1.1 Yapısı

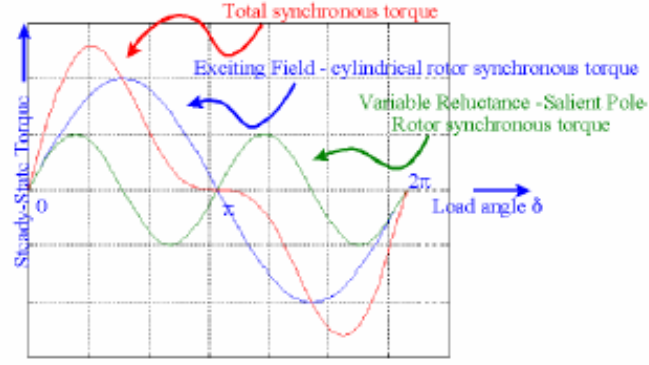
Senkron makineler bilindiği gibi rotor ve statordan oluşmaktadır. Stator duran kısımdır ve üç fazlı sargıları ferromanyetik bir çekirdek ile üzerinde taşır. Stator birçok uygulamada şebekeye direk bağlanır. Rotor hareketli kısımdır, harici bir tork kaynağı ile döndürülür, alan sargılarını üzerinde taşır ve bu alan sargıları ile rotor manyetik alanını oluşturur. Üç fazlı döner manyetik alan stator sargıları üzerinde AC gerilim oluşturur. Stator sargıları üzerinde oluşan manyetik alan ile elektromanyetik moment meydana gelir. Oluşan bu moment ile elektrik enerjisi elde edilir.

Rotor, Şekil 5.16'de gösterildiği gibi çıkık kutuplu veya yuvarlak kutuplu olmak üzere iki farklı şekle sahiptir. Daha öncede bahsedildiği gibi çıkık kutuplu senkron makineler genellikle düşük hızlı sistemlerde kullanılır ve rüzgar türbünü gibi uygulamalar için en kullanışlı olanıdır. Çıkık kutuplu makinelerin rotor çapı çok büyüktür, kutup sayısı fazladır (20 ile 120 arası olabilir) ve daha fazla tork alınır. Yuvarlak rotorlu senkron jeneratörler buhar ve gaz türbini gibi yüksek hızlı uygulamalarda kullanılır.



Şekil 5. 16 Çıkık kutuplu ve silindirik kutuplu senkron makineler [8].

Şekil 5.16'de çıkık kutuplu bir senkron makinenin moment karakteristiği yük açısının bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir.



Şekil 5. 17 Çıkık kutuplu senkron makinenin moment karakteristiği [8].

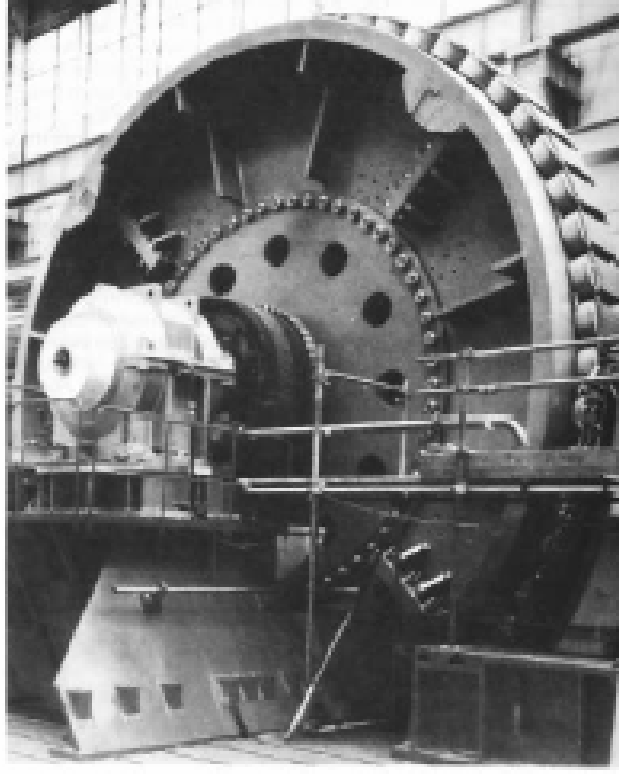
Düşük hızlarda çalışan çıkık kutuplu senkron makineler genellikle çok fazla kutba sahiptir. Şekil 5.18’de çok kutuplu, çıkık kutuplu tipik bir senkron makinenin rotoru görülmektedir. Şekil 5.19’da ise düşük hızlı, yüksek gerilim sargılarına sahip bir stator görülmektedir.

Rotor dönerken alan sargısı için DC gerilime ihtiyaç vardır. İhtiyaç duyulan DC gerilim iki şekilde üretilebilir. Bunlar:

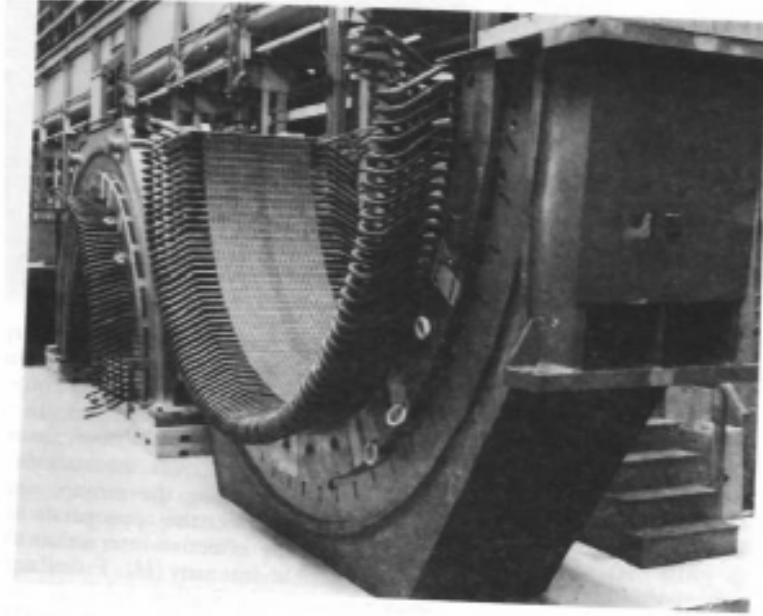
Birçok küçük senkron makinede fırça ve bilezikler kullanılmaktadır. Harici bir DC kaynağın fırça ve bileziklere bağlanması ile uyarım akımı sağlanabilir.

Büyük güçlü senkron makinelerin miline bir DC motorun bağlanması ile uyarım akımı elde edilir.

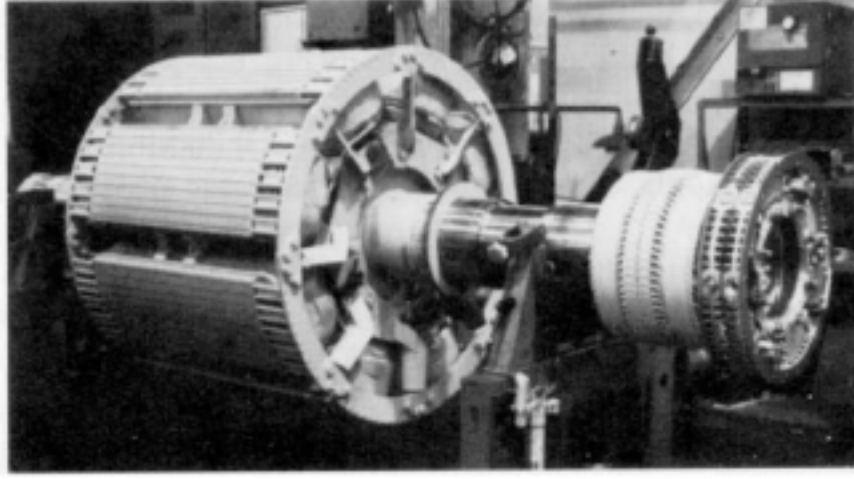
Alan sargısı için gereken DC uyarım akımı alternatif olarak sabit mıknatıslardan (permanent magnets) elde edilebilir. Uyarım akımı sabit mıknatıslardan karşılanması durumunda jeneratörden daha yüksek moment veya çıkış gücü alınır, rotor üzerinde oluşan bakır kayıpları önlenir ve bu sayede sistemin verimi artırılmış olur. Buna karşılık uyarım alanının kontrol edilememesi ve rotor tasarımının zor olması sabit mıknatıslı rotorun dezavantajıdır.



Şekil 5. 18 Çok kutuplu bir senkron makinenin rotoru.



Şekil 5. 19 Yüksek gerilim düşük hızlı bir senkron makinenin üç fazlı stator sargısı.



Şekil 5. 20 Çıkık rotor, fırçasız uyarıcı ve damper sargısı.

5.4.2 Çalışması

Senkron makine bir jeneratör olarak kullanılır ise çıkış gücünü kapsayacak bir güç elektroniği konverteri kullanılarak kontrol edilmesi tavsiye edilen yöntemdir. Güç elektroniği devreleri ayrıca şebekeden gelen transientleri üzerinde tutacaktır ve değişken hızlı uygulamalara izin verecektir.

5.5 Yüksek Gerilim Makinesi

Yüksek gerilim makineleri senkron ve asenkron makine olabilir. Bu makineler yüksek gerilime ihtiyaç duyulan her yerde, özellikle büyük santrallerde güç jeneratör olarak, bununla birlikte büyük pompaların, cement millerinin ve fanların beslemesinde kullanılabilir. Yüksek gerilimde çalışmanın faydaları ise hatta taşınan akımı azaltması, bakır kayıplarını azaltması ve transformatöre ihtiyaç duymadan direk olarak şebekeye bağlanabilmesidir. Bununla birlikte jeneratörün boyutları küçültülebilir, özellikle büyük yükler altında rüzgar türbininin verimi artırılabilir.

Günümüzde yüksek gerilim jeneratörüne sahip ancak az sayıda rüzgar türbini bulunmaktadır. Bunlar genellikle prototip olarak üretilmiş rüzgar türbinleridir.

Örneğin TJEAREBORG' in 2 MW (asekron jeneratör kullanılmıştır) ve GROWIAN' in 3 MW'lik (türbininde çift beslemeli asenkron jeneratör kullanılmıştır) sistemleridir. Önümüzdeki yıllarda üretilecek rüzgar türbinlerinde yüksek gerilim makineleri kullanılmaması tasarlanmaktadır.

Sistem kurulumunda dikkat edilmesi gerekenler ise fiyat ve malzemelere erişim kolaylığı, şebekeye bağlantı ve kontrol mekanizmasının özellikleri, sistemin bakım ihtiyacı, bakım elemanlarının yeterlilikleri, sistemin güvenlik ihtiyacıdır.

Yüksek gerilim makineleri ile (3 MW. ve üzeri) genellikle rüzgâr türbinleri uygulamalarında kullanılmaktadır. Daha yüksek güçlerde makine üretimini engelleyen faktörler ise makinelerin fiyatı, yüksek maliyetli yardımcı ekipmanlar ve yedek parçalardır. Üretim maliyetleri rüzgar türbinlerinde yüksek gerilim jeneratörlerinin kullanılmasıyla azaltılabilir. Güç elektroniği bileşenlerinin yüksek gerilim uygulamaları için halen pahalıdır ve üretici sayısı azdır. Yüksek gerilim jeneratör uygulamalarında dikkat edilmesi gereken en önemli husus güvenliktir, uluslar arası standartlarda düşük gerilim (<1000Vac) uygulamalarına göre ihtiyaçları tamamen farklıdır.

ABB firmasının WINDFORMER isimli çok kutuplu, yüksek gerilim PM senkron jeneratörü rüzgar türbünü uygulamaları için geliştirmiştir. WINDFORMER ABB'nin POWERFORMER konseptinin bir ürünüdür ve stator sargıları yüksek gerilim kablolarından yapılmıştır. Bu yapı sayesinde sistem şebekeye direk olarak bağlanabilmektedir. Çok kutuplu rotorda Permanent magnetlerin kullanılması rotor kayıplarını belirgin bir şekilde azaltır ve dişli sisteme olan ihtiyacı ortadan kaldırır.

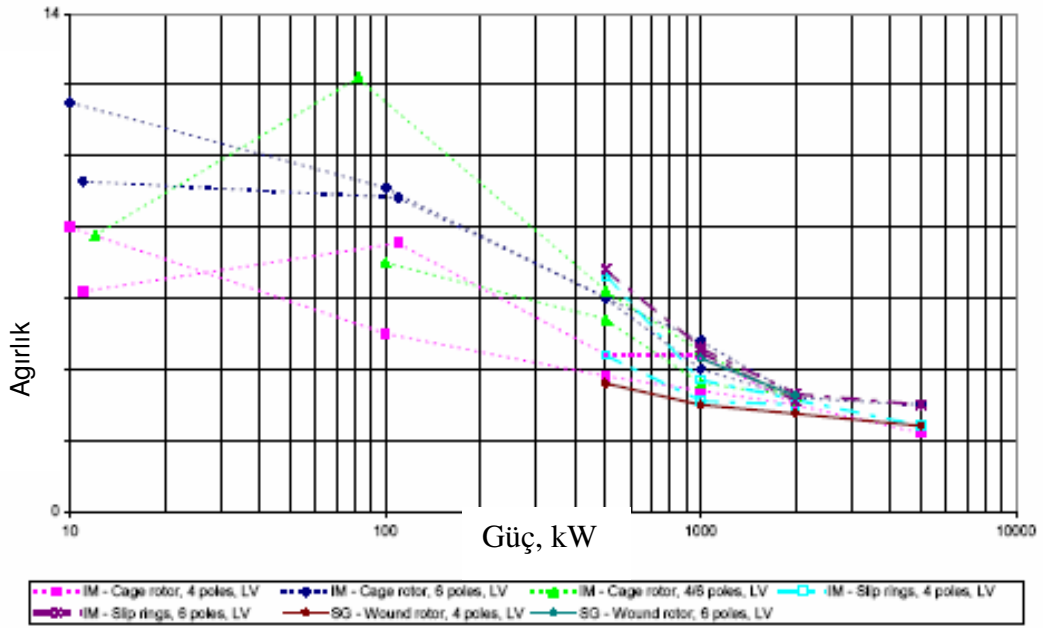
ABB WINDFORMER teknolojisi ve HVAC teknolojisi ile şebekeye direk bağlanabilen komple bir rüzgar çiftliği uygulaması yapmaktır. WINDFORMER ile amaçlananlar:

- Dişli kutusu olmayan, rüzgar türbinlerinde kullanılabilen basit bir güç elektroniği (diyotlu kıyıcı) devresi oluşturmak, bakım giderlerini azaltıp kullanılabilirliği artıran basit bir sistem oluşturmak,
- Verimli bir jeneratör kullanarak sistemin mevcut verimini artırmak ve kayıpları çok az olan diyotlu kıyıcılar üretmek,
- Yüksek kalitede şebeke bağlantısı oluşturmaktır.

ABB halen üretmiş olduğu jeneratör prototipini test etmektedir ve SCANWIND A/S firması ile birlikte testleri tamamlamayı hedeflemektedir. En büyük dezavantaj ise tüm sistemin maliyetinin tam olarak kestirilemeyişi ve mevcut ekipmanların yeni sistemlerle birlikte uzun süreli performansının bilinmemesidir.

11.3 Grafikler ve Analizler

Şekil 5.21 ve şekil 5.22’de yedi çeşit jeneratörün ağırlık ve fiyat hakkındaki değişimlerin fiyat ilişkisi görülmektedir. Burada beş tane çıkık kutuplu asenkron motor, üç tane çıkık rotorlu 4, 6 ve 4/6 kutuplu ve iki tane kayan fırçalı makine 4 ve 6 kutuplu ve iki tane yuvarlak rotorlu, 4 ve 6 kutuplu senkron makine. Şekil 5.21’de beş farklı indüksiyon makine ve iki farklı senkron makinenin ağırlık – güç eğrisi görülmektedir.

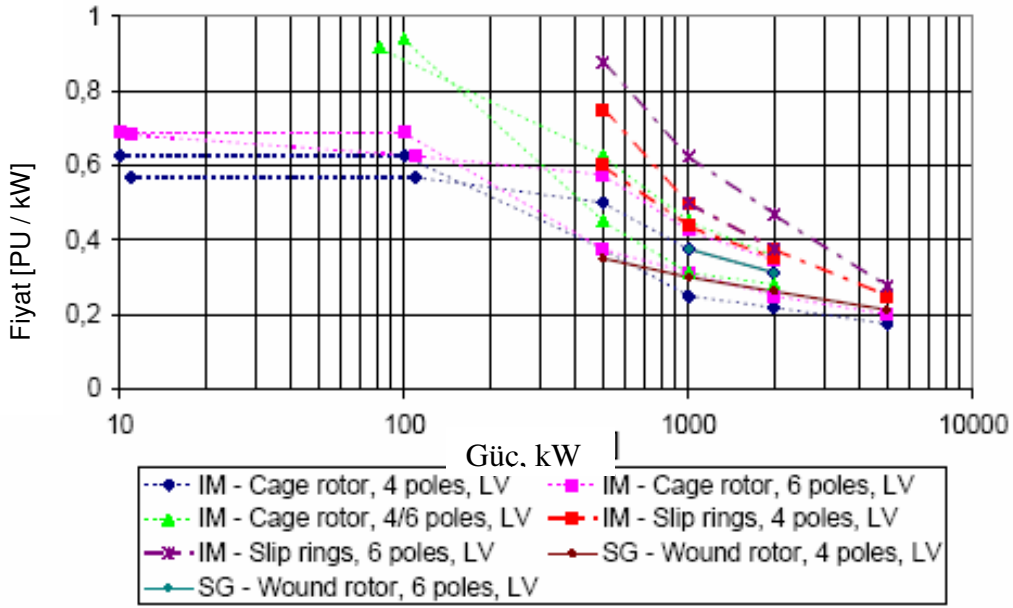


Şekil 5. 21 İndüksiyon Makine ve Senkron Makinenin ağırlık – güç eğrisi [8].

Şekil 5.21’ye bakıldığında özel jeneratör ağırlığının yaklaşık 3 kg/kw’dir ve sapma ise çok küçüktür. Şekil 5.22’deki fiyat faktörüne göre büyük makineler fiyat-güç oranının artıracaktır.

Seçilen dizayn kriterlerine, kayan bilezikli makineler daha düşük fiyat performansına sahip oldukları halde, 4 kutuplu çıkık rotorlu makinenin maliyeti en fazla olandır ve Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de karşılaştırılan makineler düşük gerilim makineleridir.

Rüzgar türbininden alınan nominal güç miktarını artırabilmek için orta ve yüksek gerilimli makineler kullanılmalıdır. Bu makinelerin daha kopmak bir yapıya sahip olması ve akımın artırılması ile ilgilidir.

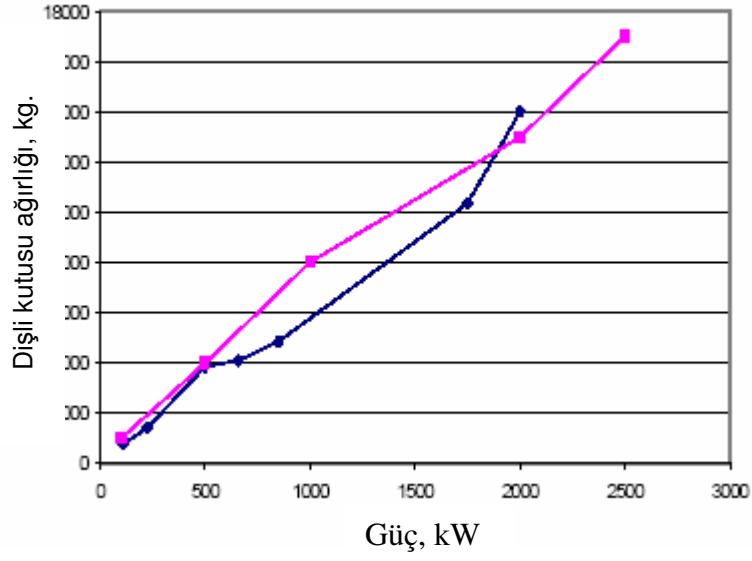


Şekil 5. 22 Beş farklı asenkron ve iki farklı senkron makinenin fiyat – güç eğrisi [8].

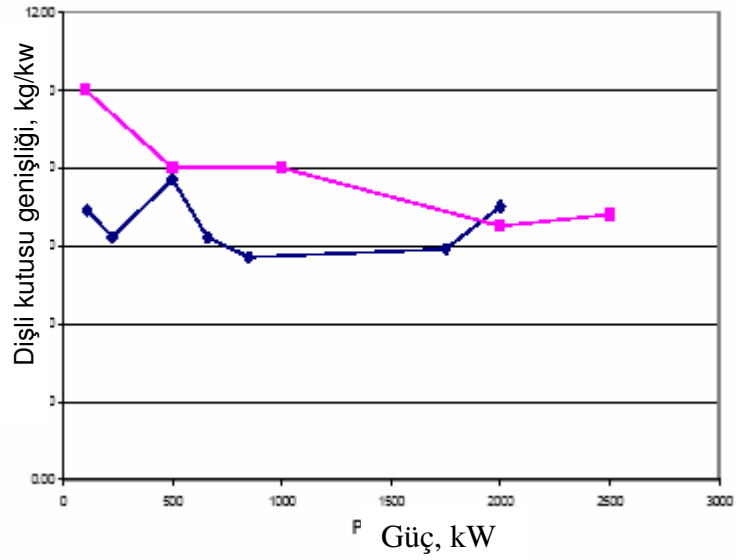
Jeneratörler hakkında yukarıda yapılan analizlerin ışığında, hacimde ki artış en iyi ağırlık ve fiyat ilişkisini vereceği çıkartılabilir. Bununla birlikte eğriler halen büyük rüzgar türbinlerine karsıdır. Gelecekte yapılacak uygulamalar da dişli kutusu kullanılmayacaktır çünkü güç elektroniği devreleri dişli kutusunun görevini daha esnek olarak yerine getirecektir. Birçok üretici firma PM’li jeneratörler ile ilgilenmektedir ve mıknatısların fiyatlarına bağlı olarak bu jeneratörlerin fiyatları da ucuzlayacaktır. Megawatt seviyesindeki yeni jeneratör konsepti halen çok pahalı ve prototip sistemler üretilmektedir.

Mekaniksel zorlanma değişken hızlarda azaltılmalıdır. Çift sargılı asenkron jeneratörler halen geniş bir alanda kullanılmaktadır fakat bu jeneratörün davranışları kontrol ve kayıplarını en aza indirecek dizaynı hakkındaki araştırmalar halen devam etmektedir.

Dişli kutusu kullanılan makineler ile kullanılmayan makineleri karşılaştırıldığında en önemli etken dişli kutusunun ağırlığıdır. Bununla ilgili veriler Şekil 5.23’de gösterilmiştir. Şekil 5.23’den sonraki 3 şekil benchmark kriteri ile üretilmiştir. Şekil 5.23’den da görüldüğü gibi dişli kutusunun ağırlığı neredeyse rüzgar türbininin gücünün bir fonksiyonu ile lineer olarak artmaktadır. Şekil 5.24’de belirli bir ağırlık verilmiştir:



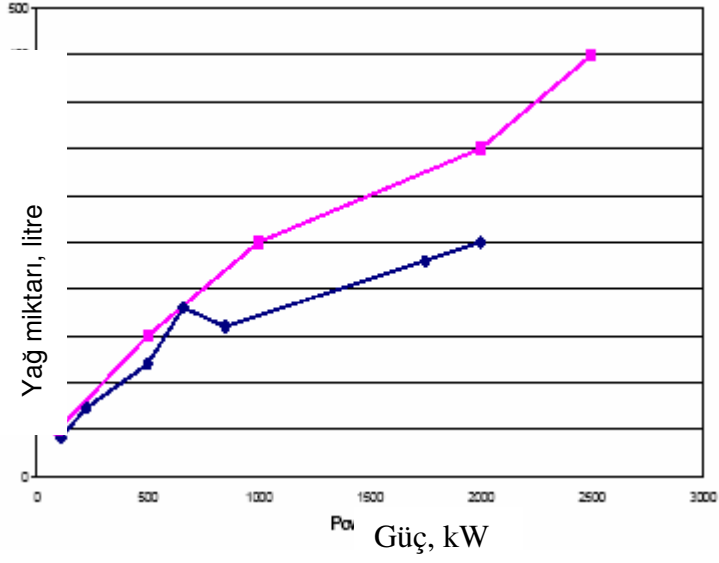
Şekil 5. 23 Dişli kutusunun ağırlık – güç değişim eğrisi



Şekil 5. 24 Dişli ağırlık eğrisi.

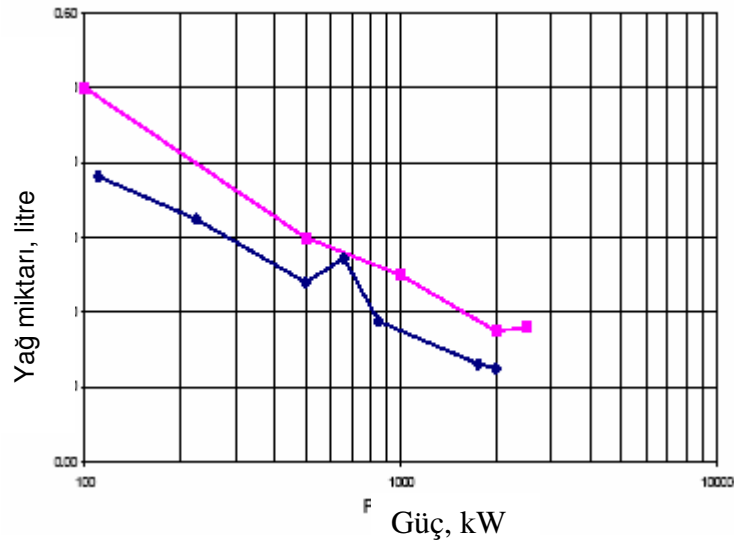
Şekil 5.24’de verilen eğri yakınsanırsa dişli kutusunun ağırlığı yaklaşık olarak 6-7 kg/kW. olduğu tespit edilir. Dişli kutusunun ağırlığı ve dört kutuplu çıkık rotorlu bir makine için yaklaşık olarak 10kg/kW. dir. Çok kutuplu senkron jeneratörlere bu oran 20- 30kg/kW. civarındadır.

Dişli kutusu ile ilgili diğer bir parametre ise yağ miktarıdır. Bu Şekil 5.23’de verilmiştir.



Şekil 5. 25 Dişli kutusunda bulunan yağ miktarının güce göre değişim eğrisi.

Şekil 5.25’da verilen eğri doğrusaldır ve açıkça görüldüğü üzere yüksek güçlü sistemler daha fazla yağ’a ihtiyacı vardır. Yağ değerine bakıldığında ise enteresane bir gerçek ortaya çıkmaktadır. Yağ değeri güç ile birlikte şekil 5.26’de görüldüğü gibi eksponansiyel olarak azalmaktadır. Bu değişim dişli kutusunun iyi bir optimizasyona ihtiyacı olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. 26 Dişli kutusunda bulunan yağ miktarının güce göre değişim eğrisi.

RÜZGAR SANTRALLERİNDE KULLANILAN GÜÇ ELEKTRONİĞİ BİLEŞENLERİ

Güç elektroniğindeki gelişmeler bu alandaki birçok teknolojinin hızlı bir şekilde gelişmesine sebep olmuştur. Devre elemanlarının yüksek akım ve gerilim taşıma kapasitesine sahip olması, güç kayıplarının azalması ile birlikte tasarlanan cihazları daha verimli yapmaktadır. Tasarlanan bu cihazlarla mega ölçekli güç sistemlerinin kontrolü çok kolaydır. Devre elemanlarının fiyatlarının zamanla düşmesi güç konverterlerini cazip hale getirmektedir ve rüzgar türbini uygulamalarının performansını artmaktadır.

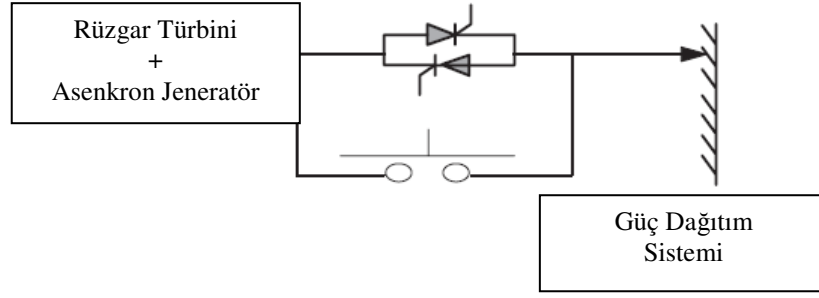
Bu kısımda güç konverterlerinin yapısı incelenecektir. Ayrıca bu alandaki muhtemel farklı çözümler incelenecektir.

6.1 Güç Dönüştürücüleri

Rüzgar türbini uygulamalarına çok farklı güç konverter yapıları (topolojileri) uygulanabilir. Asenkron jeneratörlerden alınan değişken gerilim ve frekans güç konverterleri ile sabit gerilim ve frekansa dönüştürülür. Konverterler topolojileri içerisinde en çok kullanılan soft starter topolojisidir. Bu sayede kalkış akımı sınırlandırılarak şebekeye bağlantı sırasındaki dalgalanma ve bozucu etkenler azaltılır.

6.1.1 Yumuşak Anahtarlama Yol Vericiler (Soft Starter)

Bir güç elektroniği devresi olan “Soft Starter” jeneratörün şebekeye bağlanma ve ayrılma sırasında oluşan geçici akım dalgalanmasını sınırlamak ve düşürmek için kullanılır. Jeneratör senkron hıza ulaştığında soft starter devreye girer ve tristörün tetikleme açısını kontrol ederek şebekeye bağlantıyı kolaylıkla sağlar. Şekil 6.1’de soft starter ile jeneratörün şebekeye bağlantı seması verilmiştir.



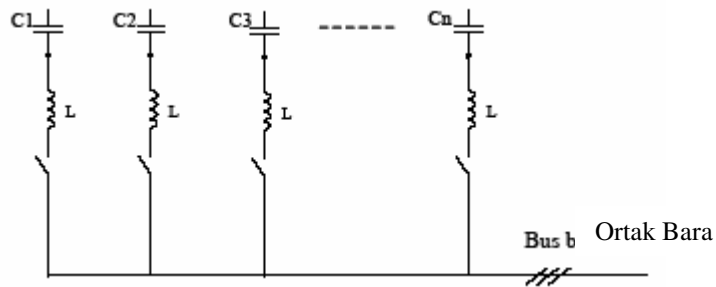
Şekil 6. 1 Jeneratörün soft starter ile şebekeye bağlantı seması.

Her fazda ters paralel bağlı iki tane tristör bulunur. Tetikleme açısı (α) ile soft starterin davranışı lineer değildir ve bu bağlanılan şebekenin güç faktörüne bağlıdır. Resistive yüklerde, α tetikleme açısı 0° (full on) ile 90° (full off) arasında, endüktif yüklerde ise, 90° (full on) ile 180° (full off) arasında değişir.

Jeneratör şebekeye tamamen bağlanmasının ardından by-pass anahtarı vasıtasıyla soft starter by-pass edilir. Böylece soft startere bağlı kayıplar önlenilmiş olunur. Birçok rüzgar türbünü uygulamasında fiyat avantajı nedeniyle soft starterler kullanılmaktadır.

6.1.2 Kapasitör Bankları

Jeneratörde oluşan reaktif güç kompanze etmek, güç faktörünü düzeltmek için AC kapasitör bankları kullanılır. Şekil 6.2’de sistemin prensip seması görülmektedir. Jeneratörler tüm güç aralığının kompanze edebilirler. Kapasitör banklarının devreye alınması tüm periyot içerisinde ölçülen ortalama reaktif gücün değerine göre yapılır.



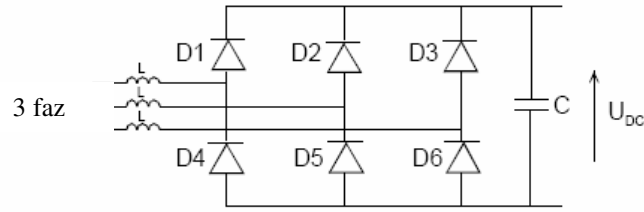
Şekil 6. 2 Güç faktörünü düzeltmek için kullanılan kapasitör bankları.

Kapasitör bankları genellikle kulenin aşağısına veya türbin gövdesine monte edilir. Kapasitörleri devreye alma veya çıkarma sırasında oluşan pik akımlarının etkisini azaltmak için kapasitörlere bir bobin (L) seri olarak bağlanır.

Burada kapasitörlerin aşırı yüklenilmesi engellenmelidir. Çünkü aşırı yüklenmeler kapasitörlerin yüksek gerilimden dolayı zarar görmesine sebep olacaktır ve işletme giderlerini artıracaktır.

6.1.3 Diyotlu Kontrolsüz Doğrultucular

Güç elektroniği uygulamalarında diyotlu kıyıcılar en çok kullanılan topolojidir. Üç fazlı bir sistem altı adet diyot içerir. Sistemin basit seması şekil 6.3’de verilmiştir.



Şekil 6. 3 Üç fazlı ac/dc dönüştürücü diyot kıyıcısı.

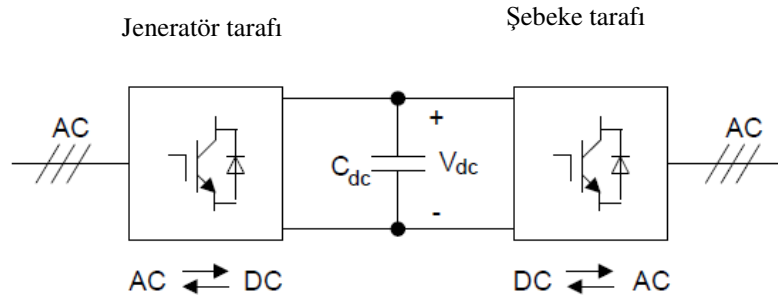
Diyotlu doğrultucular kontrol edilemezler. Bu sistemin direk olarak DC şebekeye bağlanması gerektiğinde kullanılır.

6.1.4 Geri Dönüslü (Back – To – Back) PWM – VSI Dönüştürücü

Günümüzde geri dönüslü (B2B) dönüştürücü birçok rüzgar türbini uygulamalarında kullanılmaktadır. B2B PWM-VSI dönüştürücü, iki tane PWM-VSI içeren çift yönlü dönüştürücü ve bu iki dönüştürücü arasına bağlanmış olan kondansatör gruplarından oluşur. Sistemin prensip şeması Şekil 6.4’de verilmiştir.

Şekil 6.4’de görüldüğü gibi güç akışı jeneratör ve şebeke arasında iki yönlü olarak sağlanır. VSI kıyıcı veya inverter olarak çalışır. Jeneratör tarafındaki dönüştürücü ile AC gerilim DC gerilime dönüştürülür. Şebeke tarafındaki dönüştürücü ile de DC bara gerilimi, AC şebeke gerilimi seviyesine dönüştürülür. Bu çalışma şekli ile dc Şebekeye bağlantı akiminin tam olarak kontrol edilebilmesi için, DC bara gerilimi, şebekenin fazlar arası geriliminden daha yüksek olacak şekilde yükseltilmelidir. DC bara geriliminin sabit tutulmasıyla, jeneratör tarafındaki dönüştürücü ile; jeneratörün hızının ve momentini kontrol edilebilir. Birçok araştırmalarda, makalelerde ve uygulamalarda back-to-back PWM-VSI in rüzgar türbini uygulamalarında nasıl

kullanılacağı anlatılmıştır. Şekil 6.4’de back-to-back PWM-VSI’in mimarisi görülmektedir.



Şekil 6. 4 Geri dönüşlü (back-to-back) PWM-VSI inverterin mimarisi

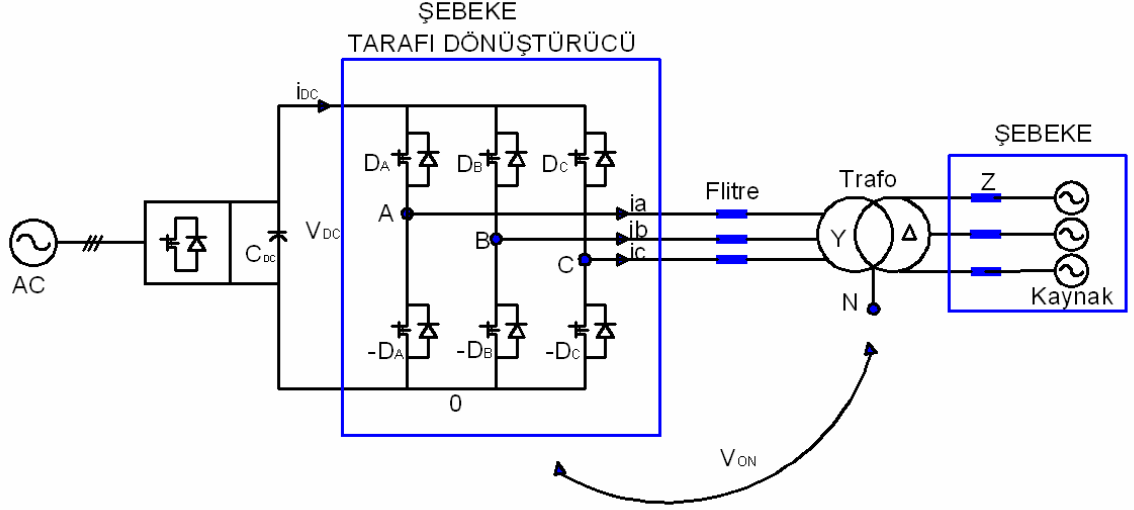
PWM-VSI genellikle üç fazlı frekans konverteri olarak kullanılır. PWM-VSI konverterinin avantajlarından biri ise güç faktörünü düzeltmek için kullanılan kapasitor banklarına ihtiyaç duymamasıdır.

DC bara devresine bir endüktans ilave edilmesiyle şebeke tarafında harmonik filtreleme yapılır ve konverter şebeke tarafında oluşacak anormal durumlardan korunmuş olur buna karşılık devrede kullanılmış olan devre elemanı sayısı artar.

DC barada kullanılan kondansatörler VSI’den kaynaklanan gerilimdeki dalgalanmaları filtre eder [9]. Bununla birlikte DC barada kullanılan kondansatörün büyük ve ağır olması sebebiyle sistemin kurulum maliyeti artar ayrıca sistemin toplam ömrünü azaltıcı yönde etki eder. Bu ise sistemin dezavantajlarından biridir.

PWM-VSI dönüştürücülerin bir diğer dezavantajı ise anahtarlama kayıplarıdır. Yüksek hızlı anahtarlamalarda şebeke tarafında EMI filtreye ihtiyaç duyulabilir.

VSI’in eş değer devresi şekil 6.5’de verilmiştir. Tam dalga dönüştürücüde anahtarlama sağlamak için IGBT’ler kullanılmıştır. Anahtarlama durum değişkeni olan D ’nin, iletimde ve kesimde olmak üzere iki farklı durumu olabilir. Anahtarlama durumlarına göre VSI’da sekiz farklı durum oluşur.



Şekil 6. 5 Şebeke tarafında kullanılan IGBT'ler.

Şekil 6.5'daki devre şekline göre ve yıldız bağlı transformatörün bağlı bulunduğu bir sistemde, fazlar arası gerilim değeri aşağıdaki 6.1 ve 6.3 eşitlikleri ile ifade edilebilir.

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} \quad (6.1)$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} \quad (6.2)$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} \quad (6.3)$$

$$V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0 \quad (6.4)$$

anlaşıldığı üzere eşitlik 6.4 bize sistemin dengede olduğunu göstermektedir. Eşitlik 6.5 ise, faz gerilimleri ile DC bara gerilimleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = V_{DC} \times \begin{bmatrix} D_A \\ D_B \\ D_C \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Buradaki V_{an} , V_{bn} ve V_{cn} ortalama faz gerilimlerini ve D_A , D_B ve D_C ise her bir kolun anahtarlama durumlarını göstermektedir. Yıldız bağlantı noktası N ile nötr noktası arasındaki gerilim bağıntısı eşitlik 6.6'da verilmiştir.

$$V_{ON} = \frac{(V_{AN} + V_{BN} + V_{CN})}{3} = \frac{V_{DC}}{3} \times (D_A + D_B + D_C) \quad (6.6)$$

6.1 ve 6.3’de bulunan eşitlikler tekrar düzenlenmesi durumunda, eşitlik 6.7 elde edilir [10].

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

Buradan faz akımlarına göre i_{dc} bağıntısı eşitlik 6.8’deki gibi elde edilir.

$$i_{DC} = D_A \times i_a + D_B \times i_b + D_C \times i_c \quad (6.8)$$

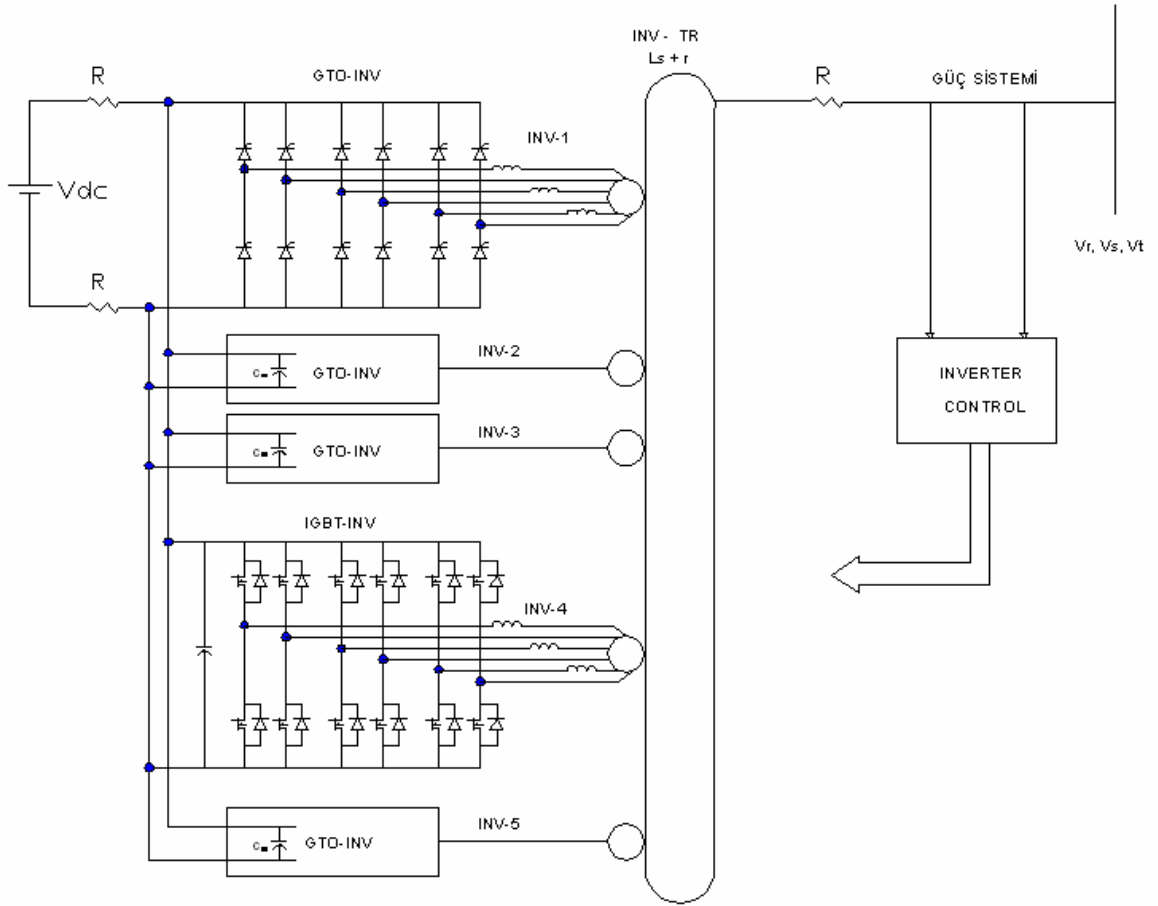
VSI’larda kontrol metodu olarak genellikle uzay vektör modülasyonu (UVM) kullanılmaktadır. UVM yöntemi ile, D_a , D_b ve D_c anahtarlama durumları uygun biçimde IGBT’lerin girişlerine uygulanır. UVM yöntemi ile üç faz gerilimine ait eşitlikler iki boyutlu α ve β uzay vektörlerine çevrilir.

UVM yöntemi, alan yönlendirmeli kontrol için çok uygundur. Çünkü bu yöntem ile hassas bir şekilde gerilime ait genişlik, frekans ve faz anahtarlama periyoduna bağlı olarak kontrol edilir.

6.1.5 Güç Sistemlerinde Kullanılan Büyük Kapasiteli İnverterler

Yüksek güçlü inverterler tasarlanırken, inverter kayıpları ve harmoniklerin azaltılması önemlidir. Bununla birlikte ani gerilim çökmesi gibi bozucu etkenler sonucu oluşabilecek aşırı akımlara karşı sistemin korunması gerekir.

Burada anlatılacak olan yüksek güçlü inverter hibrit yapıdadır ve GTO ve IGBT güç elektroniği elemanlarını içerir. Şekil 6.6’da sistemin blok şeması görülmektedir.

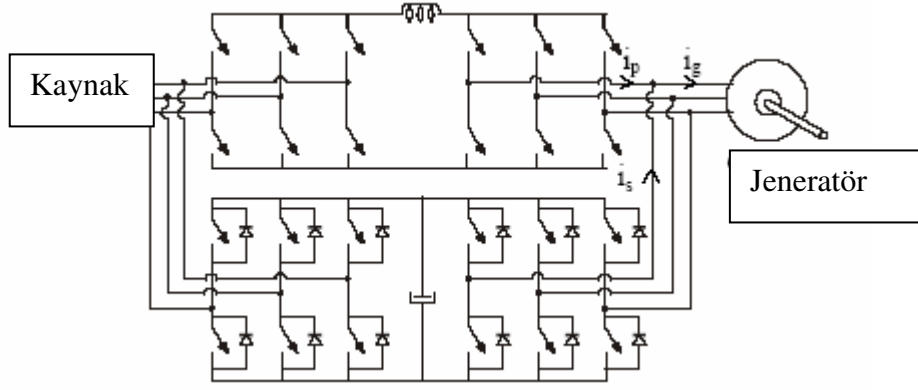


Şekil 6. 6 Yüksek güçlü hibrit inverter.

Şekil 6.6'de görülen blok şemada düşük anahtarlama ve iletim kayıplı GTO'lar ve yüksek frekanslı IGBT'ler kullanılmıştır. Bu sistemin optimum çalışabilmesi için IGBT ile GTO'lar üzerindeki toplam güç yoğunlukları arasındaki oran 0.2 olmalıdır.

$$\frac{IGBT \text{ (toplam güç yoğunluğu)}}{GTO \text{ (toplam güç yoğunluğu)}} = 0.2$$

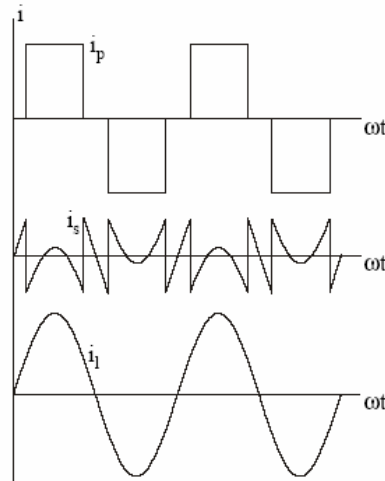
Kontrol sistemi ile GTO'ların dalga genişliği ve PWM ile IGBT inverter çıkış gerilimi kontrol edilmektedir. Dalga genişlik kontrolcüsü sistemin çıkış gerilimini kontrol ederek giriş ve çıkış gerilimi arasındaki senkronizasyonu sağlar. Bu sayede anahtarlama kayıpları azaltılır.



Şekil 6. 8 Tandem Konverter. Bu mimaride asenkron jeneratör kullanılmıştır.

Tandem konverter bir tane akım kaynaklı konverter içerir, CSC, mimarideki üst kısımdaki konverterdir ve alt kısımdaki konverter ise PWM-VSI'dir. Tandem konverter dört adet kontrol edilebilir konverter içerir ve bu sayede birçok farklı açıda sinüsoidal çıkış akımı oluşturulabilir. CSC içerisindeki güç elemanları temel periyot boyunca bir defa anahtarlanırlar ve çıkış akımı da girişi takip eder. Üst sıradaki konverterler GTO, IGBT veya Diyot olabilir.

PWM-VSI konverter yüksek hızlı anahtarlama frekansına sahiptir fakat anahtarlanan akım yük akımının küçük bir kısmını oluşturur. Şekil 6.9'da akımın dalga şekilleri gösterilmiştir. Burada i_p üst sıra konverteri, i_s alt sıra konverteri ve i_t toplam akımı göstermektedir.



Şekil 6. 9 Üst ve alt sıra konverterin ve toplam yük akımının dalga şekilleri.

Üst sıradaki konverterlerin düşük anahtarlama frekansına sahip olması ve alt sıra konverterinin düşük akımda anahtarlanması tandem konverterin dikkat çeken bir

avantajdır. Bu şekilde anahtarlama ile anahtarlama kayıpları %70 azalır ve konverterin verimi artar.

Bu konverter CSI ile karşılaştırılırsa, Tandem konverterin üç geriliminde gerilim dalgalanması, alt sıra konverterde bulunan DC bara kondansatörü sayesinde, oluşmaz.

Akımın genişliği gerilim kontrollü konverter tarafından ve faz kaydırılması akım kontrollü konverter tarafından kontrol edilmesi sebebiyle sistemin dinamik performansı CSC'ye ve VSI'ya göre çok iyidir.

Tandem konverterin yapısında çok sayıda konverter ve sensör bulunması sistemin en büyük dezavantajıdır. Bu sistemin maliyetini artırmakla birlikte yazılım ve donanım yönünden kontrolünü karmaşıktırır.

Jeneratörün çıkış gerilimi direk olarak alt sıra konverterine verilmesinden dolayı konverter üzerindeki gerilim stresi çok fazladır.

Tandem konverterin, back-to-back PWM-VSI konverterine göre dezavantajı ise çıkış geriliminin düşük olmasıdır.

6.1.7 Rezonans Konverter

Güç konverterlerindeki anahtarlama kayıplarını azaltmak için birçok rezonans konverter mimarisi kullanılmaktadır.

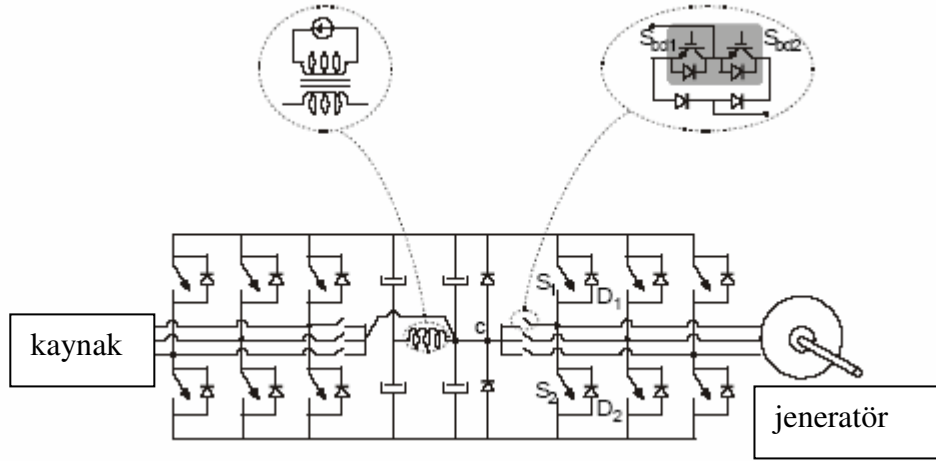
Bu sistemin dezavantajları ise:

Donanımsal yapısı ve kontrolü karmaşıktır.

DC barada yüksek değerlerde pik gerilimi oluşur.

Rezonans devresi içerisinde çok yüksek akım dolaşır.

Aşağıda Natural Clamped Converter (NCC) rezonans konverter mimarisi verilmiştir.

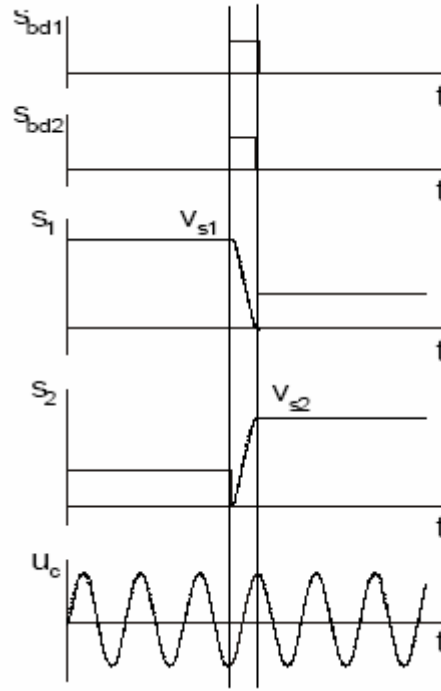


Şekil 6. 10 NCC mimarisi. Bu mimaride asenkron jeneratör kullanılmıştır.

NCC back-to-back PWM-VSI içerir ve ek bir devre ile rezonans elde edilir. Rezonans endüktans üzerinde enerji transferi ile elde edilir. Şebekedeki DC akımın kontrol edilebilmesi için DC bara gerilimi yükseltilmelidir. Şekil 6.11’da yükseltici tip endüktans gösterilmiştir. Rezonans devresinde kullanılan anahtarlama elemanları ters paralel bağlıdır ve burada hazır tasarlanmış modüller kullanılabilir. Şekil 6.10’da gösterilen ters paralel bağlı anahtarlar standart iki tristör modülünün ve iki diyotun birleştirilmesiyle yapılabilir.

NCC’nin çalışmasını açıklayabilmek için başlangıç şartları olarak yük akımının D2 diyortu üzerinden aktığını farz edelim. Bu durumda S2 anahtarı kesimdedir. Ters paralel bağlı Sbd1 ve Sbd2 anahtarlarının her ikisi de, c noktasındaki gerilim $U_{DC}/2$ iken, iletimdedir. Ardından S₂ anahtarı sıfır gerilimde kesime gider.

Rezonansın yarım periyot sonrasında yük akımı Sbd1 üzerinden sağlanır ve S1 üzerindeki gerilim azalmaya başlar, c noktasındaki gerilim $U_{DC}/2$ ’nin üzerinde iken S1 anahtarının uçlarındaki gerilim sıfır (0) olması ile birlikte Sbd2 anahtarı kesime, S1 anahtarı iletme ve Sbd1 kesime gider. Bu komutasyon işlemi Şekil 6.10’da verilmiştir.



Şekil 6. 11 NCC üzerindeki anahtarlama işlemi.

NCC ayırık darbe modülasyonu (DPM) ve darbe genişlik modülasyonu (PWM)'e göre daha kullanışlıdır. NCC' de rezonans gerilimi hiç bir zaman DC bara geriliminin altına düşmez, rezonans devresi güç konverter devresinin bir elemanı değildir ve sadece bir rezonans devresi konvertere ihtiyaç duyar.

Şekil 6.10'da anlatılan mimariye göre NCC üç fazlı uygulamalarda kullanılabilir. Ters paralel bağlı anahtarlar tüm gücü üzerlerine alabilecek güçte olmalıdırlar.

Back-to-back PWM-VSI ile karşılaştırılacak olunursa NCC'nin en büyük avantajı anahtarlama kayıplarının azaltılmış olmasıdır ve ayrıca EMI azalır, çıkış filtre endüktans küçültülebilir.

Donanım ve kontrol yönünden back-to-back PWM-VSI'ya göre daha kompleks bir yapıya sahip olması ve birçok ek komponente ihtiyaç duyması NCC'nin bir dezavantajıdır. Bununla birlikte sıfır geçiş geriliminin algılanması için sensör kullanılmalıdır ve rezonans için gereken enerji hesaplanması sistemin ayrı bir dezavantajıdır.

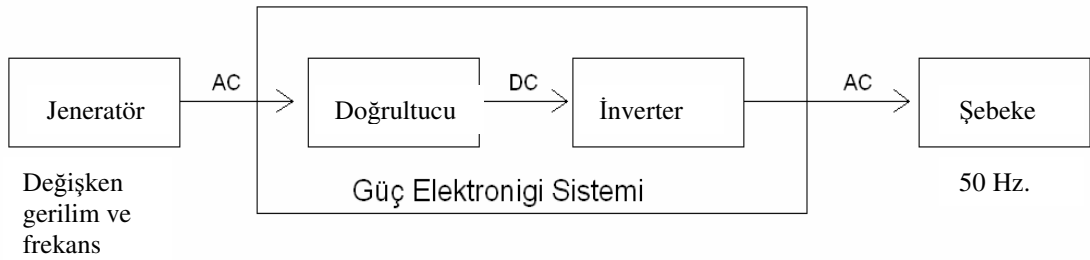
DPM (Direct Pulse Modulation) kullanılırsa sistemin dinamik davranışını artırır fakat yüksek frekansta anahtarlama sonucunda harmonikler oluşur. Harmoniklerin filtrelenmesi için ek tasarımlara gidilmesi sistemi daha kompleks bir yapıya götürür.

Ana kondansatörler üzerindeki gerilim dalgalanması anahtarlama elemanları üzerinde komutasyon problemlerine sebep olabilir. Çünkü her komutasyonda sadece bir kondansatör deşarj olmalıdır. Anahtarlama sinyallerinde oluşacak problemler direk olarak çıkış gerilimini etkiler. Gerilimdeki bozulmaları filtre edebilmek için ise aktif kompanzatörler kullanılmalıdır.

RES MATEMATİKSEL DENKLEMLERİ

7.1 RES Enerji Dönüşümü

Rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin temel safhaları Şekil 7.1’de verilmiştir. Türbin rotoru aerodinamik olarak dizayn edilmiş kanatları vasıtasıyla rüzgâr dalga enerjisinin bir kısmının yakalayarak mekanik enerjiye çevirir. Düşük hızlı bu mekanik enerji, sistemde kullanılan jeneratörün tipine göre dişli kutusu kullanılarak veya kullanılmayarak, jeneratörün aracılığı ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Jeneratörün çıkışından alınan elektrik enerjisi tasarlanan sistemin mimarisine (topoloji) göre transformatör kullanılarak veya direk güç elektroniği devreleri ile şebekeye aktarılır.



Şekil 7. 1 Rüzgâr Enerjisinin Dönüşüm Aşamaları

7.1.1 Rüzgar Hızı ve Güç Arasındaki İlişki

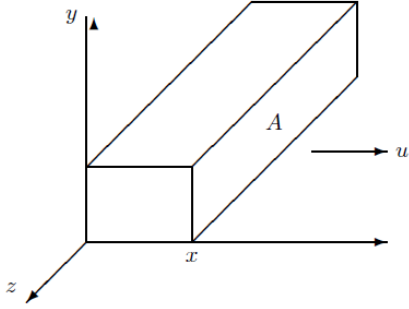
Rüzgârdaki enerji, sahip olduğu hızdan kaynaklanan kinetik enerjidir.

“v” hızı ile hareket eden “m” kütleli havanın kinetik enerjisi SI birim sistemine göre:

$$W_{KE} = \frac{1}{2} \times m \times V^2 \quad (7.1)$$

$$P = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \times m \times V^2 \right] = \frac{1}{2} \times \frac{dm}{dt} \times V^2 \quad (7.2)$$

Buradan; A alanı boyunda v hızı ile hareket eden hava kütlesinin gücü;



Yoğunluk ile hacmin çarpımı kütleyi vereceğinden,

$$m = \rho \times v \quad (7.3)$$

Akışkan bir kütle için m'nin zamana göre türevi alınır,

$$\frac{dm}{dt} = \rho \times A \times v \quad (7.4)$$

Buradaki güç, rüzgâr şiddeti ve dolayısıyla güç yoğunluğu anlık değerlerdir.

Denklem kanatların kestiği A süpürme alanı boyunca oluşan rüzgâr gücü şeklinde yazılırsa;

$$P_w = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad \text{Watt} \quad (7.5)$$

Şeklinde bulunur.

Burada;

P_w : rüzgâr (hava) akısındaki mekaniksel güç (watt),

ρ : hava yoğunluğu [kg/m³],

1 atm basınçta ve 15 °C sıcaklıkta $\rho=1,225$ kg/m³ dur.

A: rotor kanatlarının süpürdüğü alan.

v: Rüzgâr hızı.

Teorik olarak rüzgâr türbin gücünün maksimum olduğu zaman, sisteme çarpan V rüzgâr hızının, sistem tarafından frenlenip arka kısma geçen, V2 rüzgâr hızına oranı 1/3'dir. Aerodinamik faktörlerden dolayı maksimum dinamik güç, türbin gücünden fazla olmaktadır. Rüzgar türbini tarafından üretilen güç, havadaki orijinal gücün %59,3'u kadar olmaktadır.

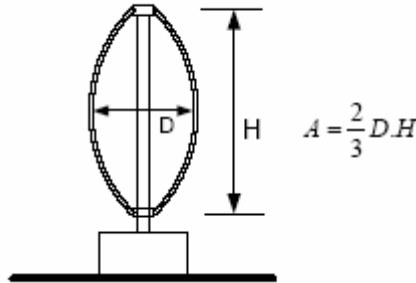
Hava yatay bir eksende rüzgâr türbinine yaklaşırken, silindirik bir akışı olduğu kabul edilir. Dolayısıyla akışkan kayıplar yüzünden, türbin kanatlarıyla dağıtılan gerçek güç, Pmax'dan daha azdır. Bu durumda sistemin verimi, rotorun yapısına, tipine, hız oranına ve kanatların tipine bağlıdır. İyi bir hava dinamiği tasarımının iki kanatlı rotor için tahminen dönüşüm verimi %75 olarak kabul edilir.

Rüzgâr gücü rotor çapının (D) karesi ile orantılıdır. Kanat çapı 2 katına çıkartılırsa, rüzgâr gücü 4 katına çıkar. Anlaşıldığı üzere daha büyük rüzgâr türbinlerinin kullanılması ile enerji üretimi daha ekonomik olmaktadır. Bir rüzgâr türbininin maliyeti yaklaşık kanat çapı ile orantılı artar, hâlbuki güç kanat çapının karesi ile orantılıdır. Sonuç olarak daha büyük rüzgâr türbinleri daha ekonomiktir.

Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin süpürdüğü rotor alanı tam dairesel değildir. Bundan dolayı süpürme alanı

$$A = \frac{2}{3} \times D \times H \quad (7.6)$$

bağıntısı ile elde edilir.



Şekil 7. 2 Düşey eksenli rüzgâr türbininin yaklaşık alan hesabı

Burada;

D: rotor kanatlarının maksimum genişliği

H: rotor kanatlarının dikey maksimum yüksekliği

7.2. Atmosferik Şartların Rüzgar Gücü Üzerindeki Etkileri

7.2.1. Sıcaklığın Hava Yoğunluğuna Etkisi

Hava yoğunluğu, rüzgâr hızını etkileyerek, rüzgarın iş yapabilme yeteneğini engellemektedir. Belirli bir yerdeki hava yoğunluğu, teorik olarak ideal gazların karakteristik denklemleriyle hesaplanır.

Rüzgâr güç verileri genellikle hava yoğunluğunun 1,225 kg/m³ olduğu, yani hava şartlarının 15 °C, 1 atm basınç altında olduğu kabul edilir. Fakat hava şartları için hava yoğunluğu “ideal gaz kanunundan” hareketle elde edilir.

$$P \times V = n \times R \times T \quad (7.7)$$

P: mutlak basınç (atm)

V: hacim (m³)

n: kütle (mol)

R: ideal gaz sabiti = 8.2056.10⁻⁵ [m³.atm/K.mol]

T: mutlak sıcaklık (K= Kelvin) K °C + 273,15

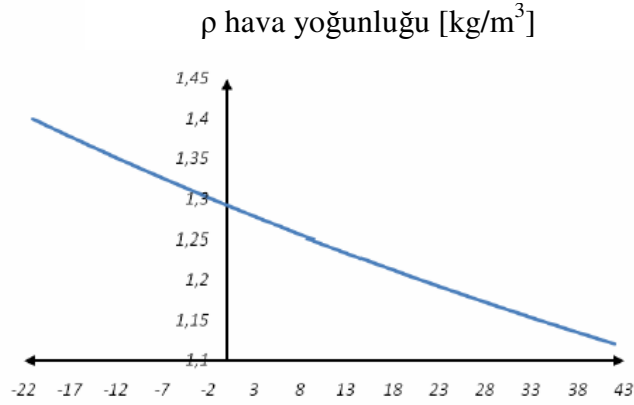
MA: gazın mol ağırlığının (g/mol).

$$\rho = \frac{P \times MA \times 10^{-3}}{R \times T} \quad (7.8)$$

denklemini elde edilir.

Çizelge 7. 1 1 atm basınç altında hava yoğunluğunun sıcak ile değişimi

Sıcaklık(°C)	Hava Yoğunluğu (kg/m ³)	Sıcaklık Değişimi İçin Yoğunluk Oranı, $\gamma_T = \frac{\rho_T}{\rho_{(15^\circ\text{C})}}$
-21	1,400	1,143
-18	1,384	1,130
-15	1,368	1,116
-12	1,352	1,104
-9	1,337	1,091
-6	1,322	1,079
-3	1,307	1,067
0	1,293	1,055
3	1,278	1,044
6	1,265	1,032
9	1,251	1,021
12	1,238	1,011
15	1,225	1,000
18	1,213	0,990
21	1,200	0,980
24	1,188	0,970
27	1,176	0,960
30	1,165	0,951
33	1,153	0,941
36	1,142	0,932
39	1,131	0,923
42	1,120	0,915

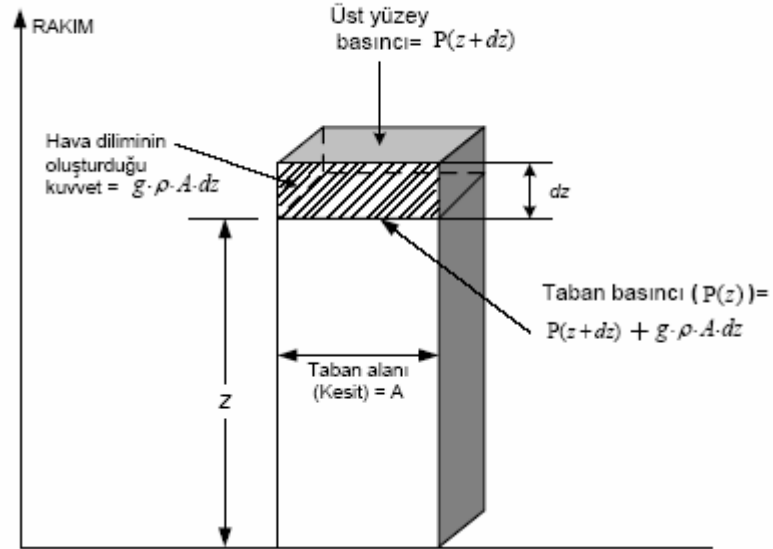


Şekil 7. 3 1 atm. basınç altında hava yoğunluğunun sıcaklık ile değişimi

7.2.2 Rakımın Hava Yoğunluğuna Etkisi

Hava yoğunluğu ve dolayısıyla rüzgâr gücü atmosferik basınca ve sıcaklığa bağlıdır. Hava basıncı ise rakımın bir fonksiyonu olduğundan deniz seviyesinin üstündeki

bölgelerde rüzgar gücü tahmin edilirken bir düzeltme faktörü kullanılmalıdır. Şekil 7.4'de yükseklik ve basınç arasındaki ilişkiyi bulmak için kullanılan hava koridorunun kesiti verilmiştir ve burada düşey ekseninde statik bir hava kesiti (A) alınır:



Şekil 7. 4 Hava koridoru.

Verilen düşey kolondaki dz kalınlığa sahip ρ yoğunluklu havanın kütlesi $\rho \cdot A \cdot dz$ ile verilir. $z+dz$ yüksekliğindeki yüzeyde hava basıncı $P(z+dz)$ olarak verilirse hava diliminin alt yüzeyindeki $P(z)$ basıncı, $P(z+dz)$ basıncı ile ilgili hava diliminin birim alan ağırlığı toplamına eşittir.

$$P(z) = P(z+dz) + \frac{g \times \rho \times A \times dz}{A} \quad (7.9)$$

$$P(z) = P(z+dz) + g \times \rho \times dz \quad (7.10)$$

g =yer çekimi ivmesi = $9,8 \text{ m/s}^2$

artımsal dP basıncı, yükseklikteki dz artımsal değişimi için yazılırsa

$$d = P(z+dz) - P(z) = -g \times \rho \times dz \quad (7.11)$$

$$dp = -g \times \rho \times dz$$

$$\frac{dp}{dz} = -g \times \rho \quad (7.12)$$

Buradan:

$$\frac{dp}{dz} = - \left(\frac{g \times P \times MA \times 10^{-3}}{R \times T} \right) \quad (7.13)$$

Eşitliği elde edilir.

Burada rakımın sıcaklık üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir. Rakımdaki her bir km'lik artış, sıcaklıkta yaklaşık 6,5 °C'lik artış, sıcaklıkta yaklaşık 6,5 °C'lik bir azalma oluşturur. Bu ihmal küçük bir hataya neden olur. Yukarıdaki formülde sabitler ve birim dönüştürme faktörlerini yerlerine yazılırsa,

$$P = P_o \times e^{-1,185 \times 10^{-4} \times H} = 1(atm) \times e^{-1,185 \times 10^{-4} \times H} \quad (7.14)$$

elde edilir. Burada;

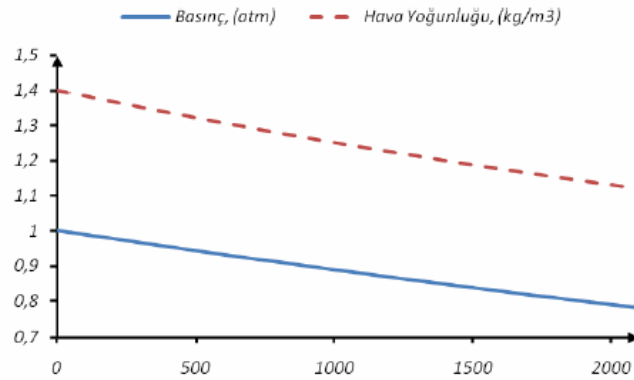
Po= Referans basınç

H= Rakım

Çizelge 7.2'de 15 °C'de hava basıncının ve yoğunluğunun rakım ile olan değişimi verilmiştir.

Çizelge 7. 2 15 °C'de hava basıncının ve yoğunluğunun rakım ile değişimi.

Rakım (m)	Basınç (atm)	Hava Yoğunluğu (kg/m ³)	Yükseklik Değişimi İçin Basınç Oranı, $r_A = \frac{P(H)}{P(0 \text{ metre})}$
0	1,000	1,225	1,000
100	0,988	1,211	0,988
200	0,977	1,197	0,977
300	0,965	1,182	0,965
400	0,954	1,168	0,954
500	0,942	1,155	0,942
600	0,931	1,141	0,931
700	0,920	1,128	0,920
800	0,910	1,114	0,910
900	0,899	1,101	0,899
1000	0,888	1,088	0,888
1100	0,878	1,075	0,878
1200	0,867	1,063	0,867
1300	0,857	1,050	0,857
1400	0,847	1,038	0,847
1500	0,837	1,026	0,837
1600	0,827	1,014	0,827
1700	0,817	1,002	0,817
1800	0,808	0,990	0,808
1900	0,798	0,978	0,798
2000	0,789	0,967	0,789
2100	0,780	0,955	0,780



Şekil 7. 5 15 °C'de hava basıncının ve yoğunluğunun rakım ile değişim eğrisi.

7.2.3 Kule Yüksekliğinin Etkisi

Rüzgâr gücü, rüzgâr hızının küpü ile doğru orantılı olduğundan, rüzgâr hızındaki ufak bir artış bile ekonomik açıdan oldukça önemlidir. Türbini yüksek hızlı rüzgârlara maruz bırakmanın bir yolu da, türbinleri daha uzun kulelere monte etmektir. Yer seviyesinin ilk birkaç yüz metre yüksekliklerinde, rüzgâr hızı yeryüzü ile olan sürtünme ve etkileşiminden dolayı oldukça fazla etkilenir. Pürüzsüz yüzeyler örneğin; durgun deniz

yüzeyi rüzgâra karşı oldukça düşük bir direnç gösterir. Rüzgâr hızındaki değişim oranı yüksekliğin artmasıyla birlikte daha düşük seviyelerde kalacaktır. Diğer yandan yüzey rüzgârları oldukça tümsekli arazilerde, orman ve bina alanlarında oldukça düşük olacaktır.

Yüzey pürüzlülük faktörünün rüzgâr hızı üzerindeki etkisi aşağıdaki ifade ile karakterize edilebilir:

$$\frac{v}{v_o} = \left(\frac{H}{H_o} \right)^\alpha \quad (7.15)$$

Burada, H yüksekliğindeki rüzgâr hızı iken v_o ise H_o referans yükseklikteki rüzgâr hızıdır. (Genelde $H_o = 10\text{m}$ alınır). α ise sürtünme katsayısıdır.

α sürtünme katsayısı rüzgâra maruz kalan yer yüzeyinin topolojisine bağlı olan pürüzlülük katsayısıdır ve 0.1 ile 0.4 arasında değişir.

Çizelge 7.3’de farklı yeryüzü topolojileri için α katsayıları verilmiştir.

Çizelge 7. 3 α pürüzlülük kat sayısının yüzey şekillerine göre değerleri.

Yeryüzü Karakteristiği	Sürtünme Katsayısı, α
Pürüzsüz sert toprak, durgun su	0,10
Toprak seviyesinde uzun çimenli bölge	0,15
Toprak seviyesinin üzerinde daha uzun mahsul	0,20
Kırsal orman alanları, bir çok ağaç	0,25
Ağaçlık ufak kasabalar	0,30
Uzun binalarla dolu büyük şehirler	0,40

Rüzgâr enerjisindeki değişim ise;

$$\frac{E}{E_o} = \left(\frac{H}{H_o} \right)^{3\alpha} \quad (7.16)$$

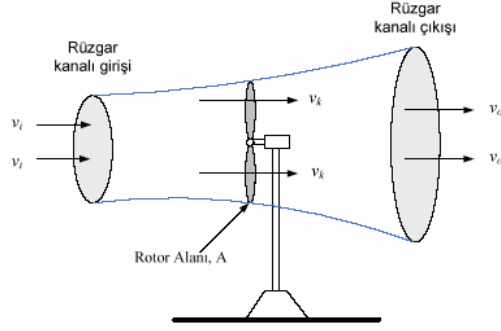
$0.3 < 3\alpha < 1.20$ olacaktır.

7.2.4 Rüzgârdan Yakalanan Mekaniksel Güç

Kanatları kesen rüzgârın tamamı rotorda mekaniksel güce dönüşmez. Rüzgârın kinetik enerjisinden elde edilen mekaniksel güç ifadesi için rotor verimi hesaplanmalıdır.

Rotor kanatları tarafından yakalanan gerçek güç miktarı, rüzgâr kanalı girişi ile rüzgâr kanalı çıkışı hava akışları arasındaki kinetik enerjilerin farkıdır.

$$P_k = \frac{1}{2} \times \frac{dm}{dt} \times (v_i^2 - v_o^2) \quad (6.17)$$



Şekil 7. 6 Bir rüzgâr türbininin maruz kaldığı rüzgar hızları.

$P_k \rightarrow$ Rotor kanatlarının yakaladığı mekanik güç (Türbin gücü)

$v_t \rightarrow$ Rotor kanatlarının girişindeki rüzgâr hızı

$v_o \rightarrow$ Rotor kanatlarının çıkışındaki rüzgâr hızı

$v_k \rightarrow$ Rotor kanatları düzlemindeki rüzgâr hızı (v_{kanat})

$$v_k = \frac{v_i + v_o}{2} \quad (7.18)$$

Görüldüğü gibi rüzgâr kanalı boyunca (rüzgâr hızı v_i 'den v_o 'a) hareket ederken sürekli sabit formda değildir. Dolayısıyla dönen kanatlar boyunca hareket eden havanın kütle akış oranı (birim zamanda akan kütle miktarı) ortalama hız ile hava yoğunluğunun çarpımından elde edilebilir (veya rotor düzlemindeki rotor süpürme alanı v_b içerisindeki hızı dikkate alınır).

$$\frac{dm}{dt} = \rho \times A \times v_k = \rho \times A \times \frac{v_i + v_o}{2} \quad (7.19)$$

İfadesi güç denkleminde yerine konulursa,

$$P_k = \frac{1}{2} \times \left(\rho \times A \times \frac{v_i + v_o}{2} \right) \times (v_i^2 - v_o^2) \quad (7.20)$$

Elde edilir. Buradan gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$P_k = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v_i^3 \times c_p \quad (7.21)$$

Eşitliği elde edilir. Genel olarak $v_i = v$ ve $\lambda = v_o/v$ tanımlanırsa,

$$c_p = \frac{1}{2} \times (1 + \lambda) \times (1 - \lambda^2) \quad (7.22)$$

Burada C_p rotor verimi olarak bilinir. Maksimum rotor verimini bulmak için C_p 'nin λ 'ya göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse;

$$\frac{dc_p}{d\lambda} = \frac{1}{2} \times [(1 - \lambda^2) + (1 + \lambda) \times (1 - 2\lambda)] = 0$$

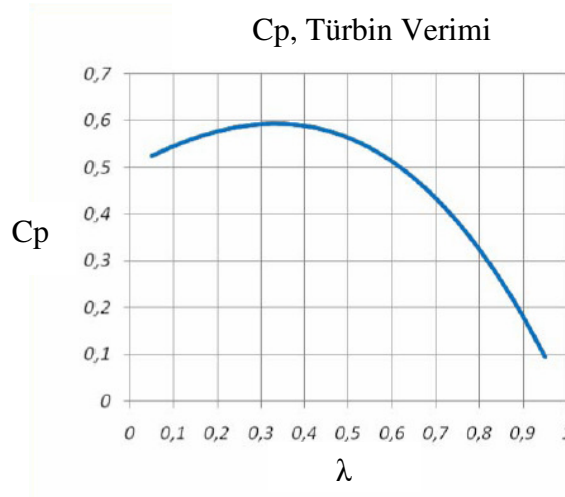
$$= \frac{1}{2} \times (1 + \lambda) \times (1 - 3\lambda) = 0 \rightarrow$$

$$\lambda = \frac{v_o}{v} = \frac{1}{3} \quad (\text{Not: } \lambda = -1 \text{ çözüm değil})$$

$\lambda = 1/3$ iken rotor verimi,

$$c_{p \max} = \frac{1}{2} \times \left(1 + \frac{1}{3}\right) \times \left(1 - \frac{1}{3^2}\right) = \frac{16}{27} = 0.5926 = \%59.26$$

C_p 'nin λ ile değişimi çizilir ise,



Şekil 7. 7 C_p 'nin λ ile değişim eğrisi.

Bu durumda maksimum teorik verim %59.26' tür bu verime "Betz" verimi veya "Betz kanunu" denir. Bu değer pratikte olarak iki kanatlı ve yüksek hızlı sistemlerde 0,5, düşük hızlı ve çok kanatlı sistemlerde 0,2-0,4 arasındadır.

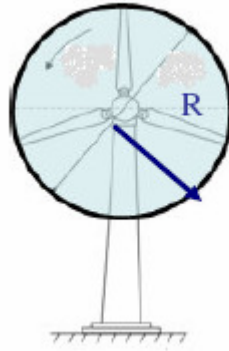
Eğer rotor çok hızlı dönüyorsa rotor verimi yine düşer, çünkü bir kanatın neden olduğu türbülans gittikçe artan bir oranda takip eden diğer kanadı etkiler. Genel bir yöntem olarak rotor verimi kanat uçlarındaki hız oranının (tip-speed-ratio=Kanat-ucu hız oranı = KHO) bir fonksiyonu olarak tanımlanır. (Not: KHO , literatürde λ olarak da verilir.). Rüzgâr türbinleri için kanat-ucu hız oranı, kanat ucu dönüş hızının gerçek rüzgâr hızına oranıdır. Farklı rotor ve kanat tipleri için oldukça farklı eğriler olabilir.

Değişken hızda rüzgâr türbinin optimum işletimi için KHO değeri kullanılır. KHO maksimum gücü elde edecek işletim noktasını belirler. C'_p nin hangi KHO değerinde maksimum olacağını türbinin aerodinamik yapısı belirler. Genel olarak, yüksek rüzgâr hızında yüksek hızı yakalayabilmek için, rotorda yüksek hızda dönmelidir, böylece optimum bir seviyede KHO sabit tutulmuş olur.

Güç denklemlerinde daha önce verildiği gibi rüzgar türbinlerinin güç çıkışı rotor süpürme alanı ile doğrusal bir değişkenlik gösterir. Yatay eksenli türbin için rotor süpürme alanı:

$$A = \pi \times R^2 \quad (7.23)$$

R: rotor çapı (kanat uzunluğu)



Şekil 7. 8 Rotor süpürme alanı

Kanat uç hız oranı (λ) ifadesi ise:

$$\lambda = \frac{\omega \times R}{V_{Rüzgar}} \quad (7.24)$$

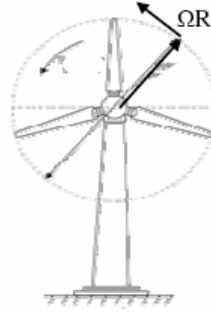
$$\omega = \frac{2 \times \pi \times n}{60}$$

ω = Rotasyonel hız (rad/sn),

R = Rotor yarıçapı (m),

n = Rotorun devir sayısı (dev/dk),

$V_{Rüzgar}$ = Serbest rüzgâr hızı (m/sn), olarak tanımlanır.



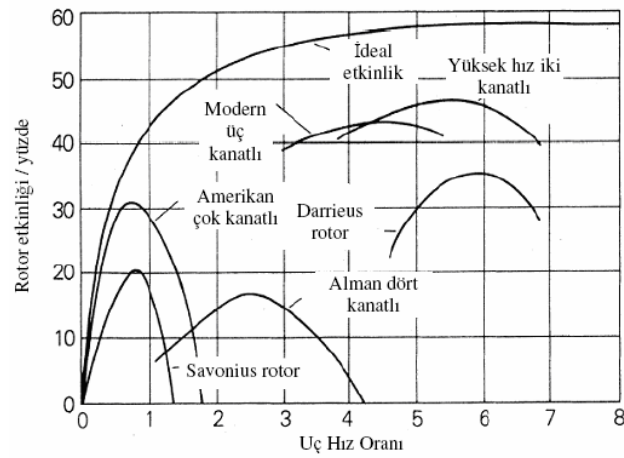
Şekil 7. 9 Kanat uç hız oranı

Kanat sayısı ile kanat uç hız oranı (λ) arasındaki ilişki şekil 7.10’da verilmiştir.

Kanat Sayısı	λ
8-24	1
6-12	2
3-6	3
2-4	4
2-3	>5

Şekil 7. 10 Kanat sayısı- λ dediğimi

Şekil 7.11’da farklı kanat yapılarına göre $C_p - \lambda$ değişim eğrileri verilmiştir.



Şekil 7. 11 Farklı kanat yapılarıca $C_p - \lambda$ değişim eğrileri

7.2.5 Türbin Rotorundan Alınabilecek Faydalı Güç

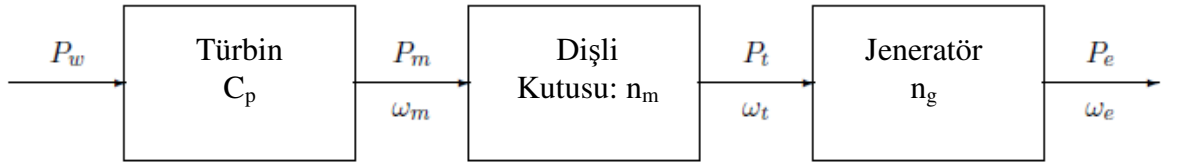
Rüzgar türbinlerinden alınabilecek mekaniksel güç, türbinin o anki çalışma karakteristiği olan C_p değerine bağlıdır. Türbin rotorunda jeneratör rotoruna aktarılan gücün ifadesi eşitlik 7.25’de verilmiştir.

$$P_m = c_p \times \left(\frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \right) = c_p \times P_w \quad W \quad (7.25)$$

Şekil 7.12’de genel olarak bir rüzgar türbin sistemindeki enerji akış diyagramı verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi ortamdaki rüzgar hızına göre elde edilecek enerjinin ifadesi P_w ’dir. Bu enerji türbin rotorundan P_m mekaniksel güç ifadesi ve ω_m açısal hızı ile alınır. Sistemde dişli kutusu kullanılmış ise mekaniksel enerji dişli kutusunun çevrim oranı ile birlikte P_t ifadesi ile alınır.

$$P_t = n_m \times P_m \quad W \quad (7.26)$$

n_m = dişli kutusunun verimi.



Şekil 7. 12 Enerji aktarımı

Mekaniksel enerji aktarımında olduğu gibi, elektriksel enerji aktarımında; P_e elektriksel enerji enerjisi, aktarılan mekaniksel enerjinin jeneratörün verimi ile çarpılmasıyla elde edilir.

$$P_e = n_g \times P_t \quad W \quad (7.27)$$

7.25, 7.26, 7.27 eşitlikleri tekrar düzenlenirse:

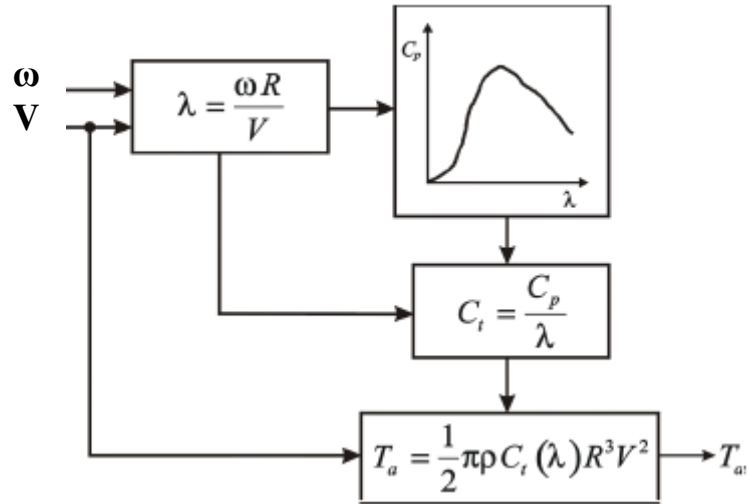
$$P_e = c_p \times n_m \times n_g \times P_w \quad W \quad (7.28)$$

Çıkış gücü ifadesi elde edilir.

Türbinden alınabilecek moment ifadesi ise:

$$T_a = \frac{1}{2} \times \pi \times \rho \times c_t(\lambda) \times R^3 \times V^2 \quad (7.29)$$

$$c_t = \frac{c_p}{\lambda} \quad (7.30)$$

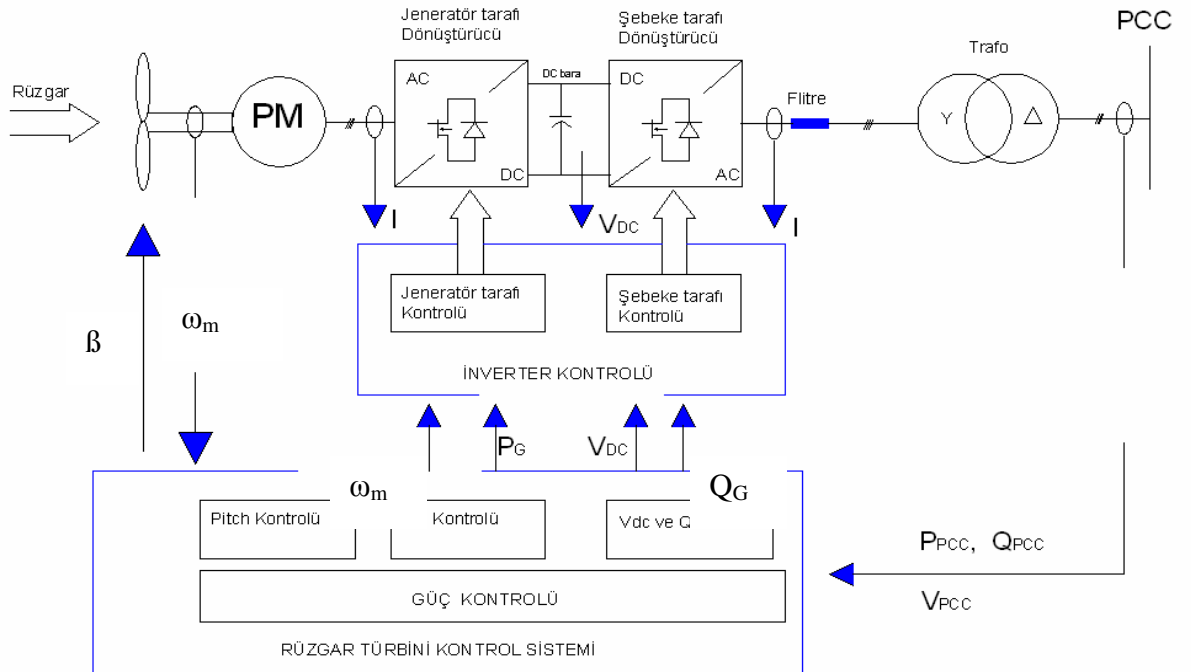


Şekil 7. 13 Türbine ait moment ifadesinin C_p ve λ değişimine göre elde edilişi.

GÜÇ KONTROL METODU (TÜRBİN KONTROL METODU)

Rüzgâr enerji sistemleri, uygulaması yapılacak ortama ait ortalama rüzgâr hızına göre tasarlanırlar. Ortalama hızın dışındaki hızlarda kontrol sistemi devreye girerek sistemi en uygun güç akısını sağlayabileceği noktaya çeker.

Kontrol sistemi, türbin performansını etkileyen en önemli unsurdur. Kontrol sistemleri sayesinde türbin tam verim ile çalışması sağlanır. Türbinden tam verim alınabilmesi için, türbinin farklı parçalarına farklı kontrol metotları uygulanır. Şekil 8.1’de genel bir türbin kontrol blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 8. 1 Genel bir türbin kontrol blok diyagramı.

Bu kontrol yöntemlerinden biri türbinin kanat açılarının kontrol edilmesidir. Diğer bir kontrol yöntemi ise dönüştürücüler sayesinde PMSG'ün kontrolü sağlanmasıdır.

Back-to-back VSI dönüştürücü ile jeneratörün şebeke ile bağlantısı sağlanır ve bu dönüştürücüler tüm sistemin kontrolünü ve kararlılığını sağlar. Bu kontrol sistemi jeneratör tarafı ve şebeke tarafı olmak üzere iki kısımdan oluşur ve bu iki kısmın kullanım amacı farklıdır.

Jeneratör tarafındaki dönüştürücü, rotor hızını maksimum güç noktasına göre ayarlar. Şebeke tarafındaki dönüştürücü ise DC baradaki gerilim seviyesini, çıkış gerilim seviyesini ve bu kapsamda şebekeye aktarılan aktif – reaktif gücü kontrol eder.

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminde yaşanan en önemli sorunlar;

- Sistemi ideal şartlara yakın bir şekilde çalıştırabilmek,
- Kule etkisi (Tower effect),
- Sistemde salınımların oluşmasıdır.



Şekil 8. 2 Rüzgâr enerjisi donuşu sistemi

Burada önemli olan tüm sistemin bileşenlerini kapsayan şekil 8.2’de görüldüğü gibi bir kontrol sisteminin tasarlanmasıdır. Kontrol sistemi ise mikroişlemci tabanlı kontrol üniteleri ve bu kontrol üniteleri ile haberleşen, sistemin çalışma durumunu gösteren ve gerektiğinde sisteme müdahale eden, pc üzerinde koşan bir SCADA programından oluşur.

Kontrol sistemi rüzgar enerjisinin dönüşümü sırasında çok önemli bir rol oynar, sistemin kalbi durumundadır. Kontrol düzeneği ile;

- Sistemin çıkış gücü kontrol edilir,
- Çıkış gücünün durumuna göre sürücü ve kontrol devrelerinin giriş parametrelerini ayarlar,
- Sürücü ve kontrol devrelerini korur,

- Çalışma sırasında oluşan transientleri regüle edilmesini sağlar.
- Rüzgarın hızına göre türbinin çalışmasını kontrol eder. Tasarım kriterlerine göre belirli bir hızın altında ve üstünde çalışmasını engeller.
- Rotor hızında meydana gelen değişmelere göre, güç konverterlerinin giriş parametrelerini ayarlar.

Kule etkisi ve rüzgar hızında meydana gelen değişmeler sebebiyle çıkış gücünde dalgalanmalar oluşur. Bu dalgalanmalar sönümlenmesi gerekir ve bunu sağlamak için güç dönüştürücüsü kullanılır.

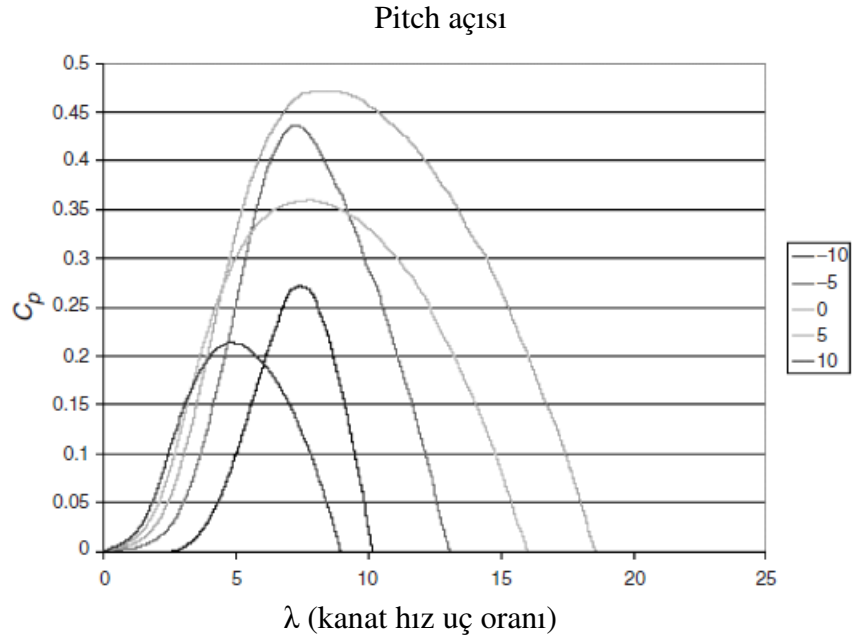
Kontrol metotları:

- Karakteristik eğri metodu: kontrol sisteminin çıkışları daha önceden hesaplanmış olan verim eğrisinin değişimine göre belirlenir.
- Ortalama güç metodu: kontrol sisteminin çıkışları giriş parametrelerinin ortalaması alınarak elde edilir.
- Maksimum değer metodu: Bu metot ile sistemin kontrol sisteminin çıkış parametreleri maksimum güce göre hesaplanır.

8.1 Karakteristik Eğri Metodu

Bu tarz kontrol sistemi değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde uygulanır ve bu sistemde kullanılan jeneratör seçiminden bağımsızdır. Jeneratörün dönüş hızı belirli aralıkta şebeke frekansına sabitler. Nominal hızda jeneratör şebekeye kilitlenir ve rotor hızındaki küçük değişmeler ihmal edilir. Rotor hızında, nominal hızın dışında meydana gelecek değişmelerde sistemin çalışabilmesi, türbin aerodinamik yapısı değiştirilerek yani kanat (pitch) kontrolü ile sağlanır.

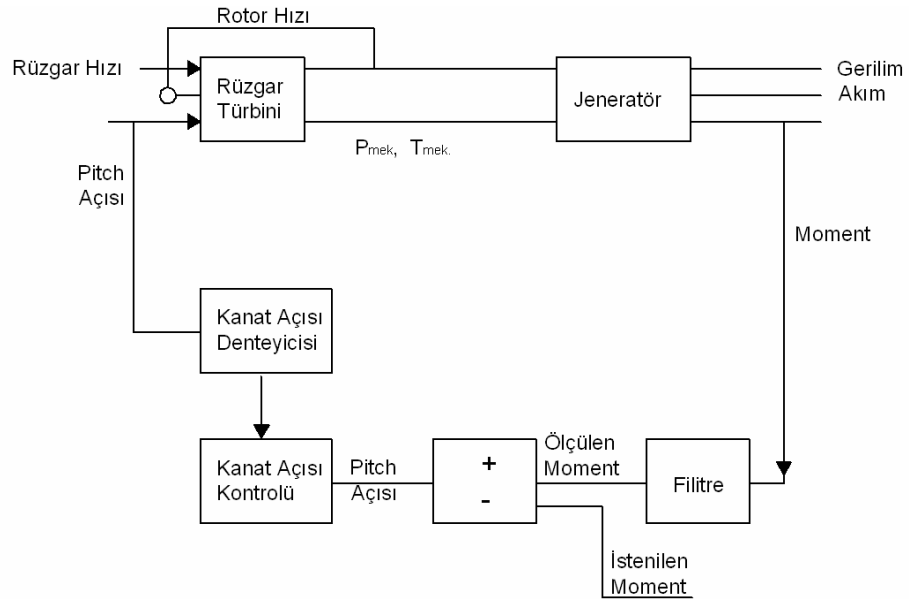
Nominal hızların dışında türbinin kanat açısı kontrol edilmesi ile sistemin sürekliliği sağlanır ve kanatlar üzerindeki stres azaltılır. Şekil 8.3’de rüzgar hızına göre, kanat açısının değişimi ve momentte meydana gelen değişim görülmektedir.



Şekil 8. 3 Farklı kanat açılarına göre C_p/λ ergisi [7].

Kanat açısının kontrolünün yapılması yüksek hızlarda güç akısını sınırlamak ve jeneratörün çıkış momentini kontrol etmek açısından önemlidir.

Kanat açısının kontrolünün yapılmasının bir diğer faydası ise, yüksek ve düşük hızlardan türbinin korumasıdır. Sistemin sürekliliğini sağlayabilmek için türbin belirli hızlar arasında çalıştırılmalıdır. Hız limitlerinin dışında, türbinin zarar görmesini engellemek için durdurulmalıdır. Şekil 8.4’de basit bir kanat açısı kontrol sistemi verilmiştir.



Şekil 8. 4 PMSG için basit bir kanat açısı kontrol diyagramı.

Şekil 8.4'deki sistemde PMSG dişli kutusuz olarak kullanılmıştır.

Bu sisteme ait matematiksel bağıntılar ise:

Güç etkileşim değeri P_t :

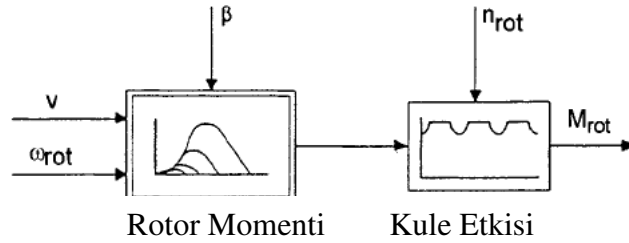
$$P_t = \frac{\rho}{2} \times \pi \times r^3 \times v^2 \times \frac{c_p(\lambda)}{\lambda} \quad (8.1)$$

Formülüne göre hesaplanır. Elektriksel güç ise η_c : mil (şaft) verimi, η_g : asenkron jeneratörün verim katsayıları ile hesaplanır. Yani:

$$P_e = n_c \times n_g \times P_t = n_{tot} \times P_t \quad (8.2)$$

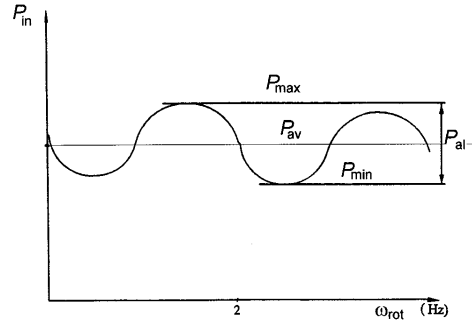
bağıntısı elde edilir. Burada η_{tot} : toplam verimdir.

Karakteristik eğri grafiğinden herhangi bir γ (pitch açısı) açısına göre C_p değeri belirlenir. Bu değer ile birlikte, rüzgâr hızı ve jeneratörün rotasyonel dönüş hızı kullanılarak türbinin kanat uç hız oranı (λ) değeri hesaplanır. Hesaplanan bu değere göre moment C_t katsayısı tablodan seçilir ve güç C_p değeri hesaplanır. Hesaplanan bu değer kontrol sisteminin giriş parametresini oluşturur.



Şekil 8. 5 Çıkış gücünün hesaplanması

Rüzgar hızında ani değişimler meydana gelirse hesaplanan çıkış gücünde doğal olarak dalgalanmalar meydana gelecektir. Bu sorunu çözmek için adaptif kontrol yöntemi kullanılabilir



Şekil 8. 6 Adaptif kontrol yönteminin blok şeması.

Rüzgâr hızında ki değişim sonucunda giriş gücünde bir dalgalanma meydana gelir. Bu dalgalanmanın farkından P_{al} değeri elde edilir. P_{al} değeri, P_{in} değerinin $(\pm)\%5$ sınırları içinde tutulmaya çalışılır. Sistemin çalışması asenkron jeneratörün durdurulma noktası civarında ise giriş gücünün artırılmasından kaçınılmalıdır. Bu durumda elektriksel torkta bir artış meydana gelmesi durumunda rotor hızı yavaşlamaya başlar.

8.2. Ortalama Güç Metodu

Güç kontrol sisteminin giriş parametreleri, giriş gücünde meydana gelen değişimlerden elde edilir. Kontrol sistemi anlık değişimleri sürekli olarak okur. Anlık kanat uç hız değişimi λ değeri, anlık olarak okunan değerlere göre ve bir numaralı denklemdeki gibi hesaplanır. Senkron hızın üzerinde, anlık olarak meydana gelen elektriksel güçte meydana gelen değişimler bir zaman periyodu içerisinde kaydedilir. Zaman periyodu sonunda hesaplanan ortalama değer, rüzgâr hızı yeterli ise, kontrol sisteminin giriş değişkeni olarak kullanılır.

8.3. Maksimum Güç Metodu

Bu metot ile sistemin kontrol sisteminin çıkış parametreleri maksimum güce göre hesaplanır. Kontrol sistemi çıkış gücünü düzeltmek için rüzgârın hızında meydana gelen değişimleri ve güç karakteristik eğrisini kullanır. Kontrol sisteminin çalışması adaptif kontrol sistemine benzer.

Yani:

Giriş gücünde bir artış meydana geldiğinde sistemin çıkış gücü P_{out} izin verilen P_{max} değerine kadar artırılır ve bu değerde sabit kalır. P_{in} giriş gücünde azalma meydana

geldiğinde P_{out} değeri, P_{min} değerine kadar azalmasına izin verilir. Sistem P_{max} ile P_{min} arasında osilasyon yapar.

Bu metodun dezavantajı, rüzgâr hızında meydana gelen anlık değişimler gibi bozucu etkenlere karşı duyarlı olmasıdır. Elde edilen güç değeri ölçülen hızın küpü ile doğru orantılı olmasından dolayı hız değişiminin etkisi büyük olacaktır. Bu ise yanlış anahtarlamalara sebep olur. Bundan dolayı bu metot yüksek hızlı rüzgâr türbinlerinde uygulanmamalıdır.

Kontrol sistemleri içerisinde ilk metot genellikle diğer iki metoda tercih edilir.

RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ŞEBEKEYE BAĞLANMASI

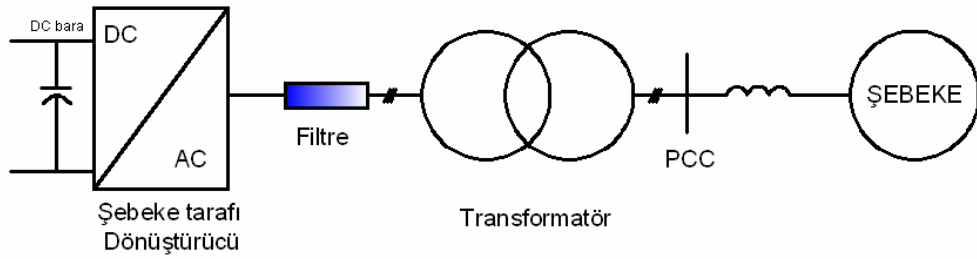
Rüzgar türbinlerinden yeteri kadar büyük miktarda enerji alınması halinde, birçok kullanıcının bu enerjiden faydalanabilmesi için, rüzgar türbini şebekeye online olarak bağlantısı yapılmalıdır.

Şebeke bağlantısını sorunsuz bir şekilde sağlayabilmek için operatörler, teknik ve ekonomik anlamda birçok problem ile karşılaşabilmektedir. Bu problemlerin en büyüğü kuşkusuz gerekli güç kalitesinin sağlanması, frekans ve gerilimin istenilen aralıklarda hassas bir şekilde kontrol edilebilmesidir. Bu parametreler şebeke bağlantısının yapılabilmesi için gerekli olan en önemli unsurlardır.



Şekil 9. 1 RES ve şebeke bağlantısı

Şebeke bağlantısının yapılabilmesi için genel bir prensip şema şekil 9.2 de verilmiştir.

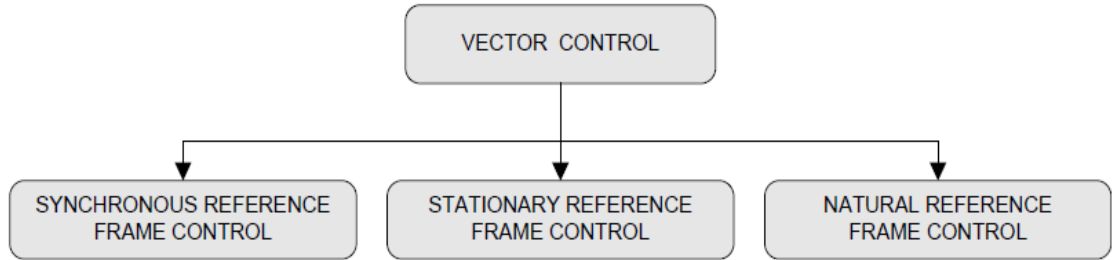


Şekil 9. 2 Jeneratörlerin şebekeye bağlantı prensip şeması

Şebekeye enerji aktarabilmek için, şebeke tarafındaki dönüştürücü üzerinde çeşitli kontrol yöntemleri uygulanır. Bu kontrol yöntemlerinin ortak amacı DC-bara gerilimini,

aktif ve reaktif güç akışını kontrol etmek, şebeke senkronizasyonunu sağlamak ve güç kalitesini artırmaktır [11].

Bu kontrol yöntemleri referans noktalarına göre sınıflandırılırlar ve şekil 9.3 de gösterilmiştir [11].



Şekil 9. 3 Şebeke tarafındaki dönüştürücüye ait kontrol yöntemleri [11].

Burada belirtilen bütün yöntemlerde ki kontrol sistemleri iç içe iki farklı çevrimden oluşur. İç kısımdaki çevrim ile şebeke akımı ve dış kısımdaki çevrim ile DC bara gerilimi ile reaktif güç kontrol edilir. Akım kontrolü ile güç kalitesi, harmonik filtreleme yapılır. Dış kısımdaki çevrim ile sistemden aktarılan gücün regülasyonun aktif-reaktif güç ayarı ile sağlar [12].

Güç akışında kullanılan kontrol yöntemleri bütün sistemlerde aynıdır. dq-eksenindeki, aktif ve reaktif güç eşitlikleri kaynak geriliminden elde edilir ve eşitlik 9.1 ve 9.2 de verilmiştir.

$$P = \frac{3}{2} \times V_d \times I_d \quad (9.1)$$

$$Q = \frac{3}{2} \times V_d \times I_q \quad (9.2)$$

9.1 ve 9.2 eşitlikleri bize aktif ve reaktif gücün nasıl kontrol edileceğini göstermektedir ve açıktır ki akımın d ve q bileşenlerinin kontrol edilmesi ile aktif ve reaktif güç akışı kontrol edilmektedir.

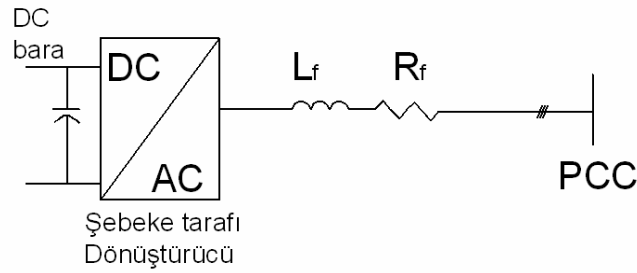
Bahsedilen kontrol sistemleri arasındaki temel fark ise, akım kontrolünü sağlayan referans noktalarının farklı noktalardan alınmasından dolayı iç çevrimden kaynaklanmaktadır.

Bu prensip şemadan anlaşılacağı üzere, şebeke tarafındaki dönüştürücünün anahtarlama frekansından dolayı çıkış akımında dalgalanmalar oluşur. Dönüştürücünün çıkış akımında oluşan bu dalgalanmayı önlemek için filtre kullanılır. Sistemin şebeke bağlantısının sağlanabilmesi için ise uygun büyüklükte transformatörün kullanılması gerekmektedir.

9.1 Filtre Çeşitleri

9.1.1 L-Filtre

En basit ve en çok kullanılan filtre çeşididir ve her bir faza endüktansların seri bağlanması ile oluşur. Buradaki çalışmada sadece bir L-filtre yerine, sistem bir endüktans ve küçük bir direnç şeklinde modellenmiştir. Modellenen filtre şekil 9.4’de verilmiştir.



Şekil 9. 4 Modellenen L-filtre.

Bu sisteme ait gerilim bağıntısı eşitlik 9.3’de, s dolmenindeki karşılığı eşitlik 9.4’de ve transfer fonksiyonu ise eşitlik 9.5’de verilmiştir.

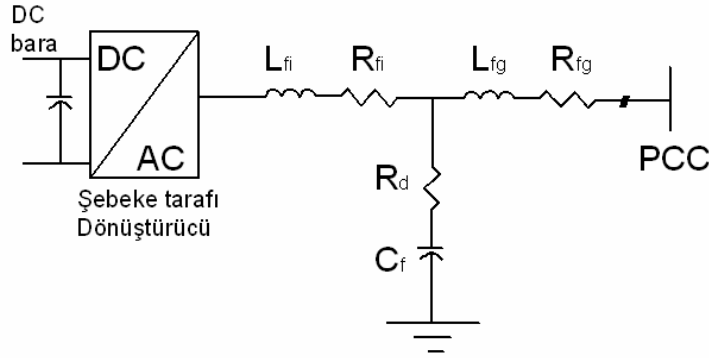
$$V_f(t) = I_f(t) \times (j\omega \times L_f + R_f) \quad (9.3)$$

$$V_f(s) = I_f(s) \times (s \times L_f + R_f) \quad (9.4)$$

$$F(s) = \frac{1}{(s \times L_f + R_f)} \quad (9.5)$$

9.1.2 LCL – Filtre

Yapısı diğer filtre çeşitlerine göre daha karmaşıktır ancak rezonans probleminin en aza indirmesi sebebiyle daha kullanışlıdır. Akım distorsiyonunun çok düşük olması ve güç sistemi için gerekli olan reaktif gücü üretmesi LCL filtrenin en büyük avantajıdır. Rezonans frekansı şebeke parametrelerine göre anlık olarak hesaplanabilir. LCL filtre ye ait sistemin blok şeması şekil 9.5’de verilmiştir.



Şekil 9. 5 LCL filtre

Bu sistem üzerinde Kirchhoff kanunlarına göre aşağıdaki eşitlik 9.5 ve 9.6 yazılabilir.

$$I_i \times \left(s \times L_{fi} + R_{fi} + R_d + \frac{1}{s \times c_f} \right) - I_g \times \left(R_d + \frac{1}{s \times c_f} \right) = V_i \quad (9.5)$$

$$I_g \times \left(s \times L_{fg} + R_{fg} + R_d + \frac{1}{s \times c_f} \right) - I_i \times \left(R_d + \frac{1}{s \times c_f} \right) = 0 \quad (9.6)$$

9.5 ve 9.6 eşitliklerinden yola çıkılarak elde edilen transfer fonksiyonu eşitlik 9.7’de verilmiştir.

$$H = \frac{s \times R_d \times c_f + 1}{s^3 \times K1 + s^2 \times K2 + s \times K3 + R_{fg} + R_{fi}} \quad (9.7)$$

$$K1 = (L_{fg} \times L_{fi} \times c_f),$$

$$K2 = (L_{fg} \times c_f \times (R_{fi} + R_d))$$

$$K3 = (c_f \times (R_{fg} \times R_{fi} + R_{fg} \times R_d + R_{fi} \times R_d) + L_{fg} + L_{fi}),$$

Bu sisteme ait rezonans frekansı ise eşitlik 9.8’de verilmiştir.

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_{fi} + L_{fg}}{L_{fi} \times L_{fg} \times c_f}} \quad (9.8)$$

9.1.3 Transformatör

Bu noktada türbinden alınan gerilim seviyesi, iletim hattının gerilim seviyesine yükseltilir. Burada kullanılan transformatör ile türbin ortak baraya (PCC: Point of Common Coupling) bağlanır.

Transformatörlerin iç yapısına ait matematiksel bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$V_L = j\omega \times L_L \times I_L + j\omega \times L_m \times I_H \quad (9.9)$$

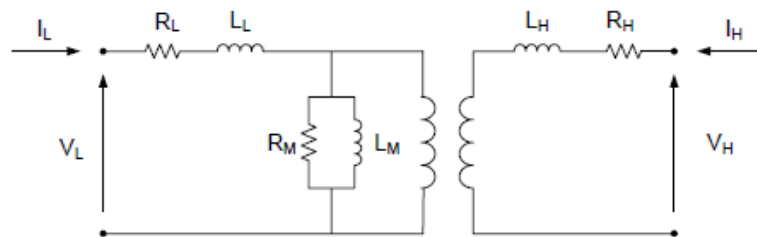
$$V_H = j\omega \times L_H \times I_H + j\omega \times L_m \times I_L \quad (9.10)$$

Buradaki L_L ve L_H , transformatörün primer ve sekonder tarafındaki self-endüktans değeri ve L_m ise yine transformatörün primer ve sekonder arasındaki manyetik endüktans değeridir. Sisteme ait bir diğer önemli değişken olan, transformatörün sarım sayısı olan k değişkeni eşitlik 9.11’de verilmiştir.

$$k = \frac{V_H}{V_L} = \frac{I_L}{I_H} = \frac{N_H}{N_L} \quad (9.11)$$

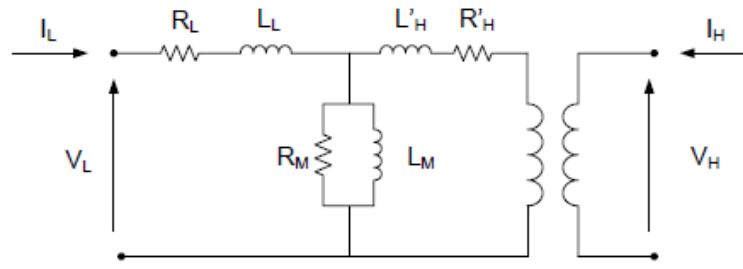
eşitlik 9.11 deki N_L ve N_H , primer ve sekonder tarafın sarım sayısını simgelemektedir.

Şekil 9.6’de bir transformatörün eş değer devresi verilmiştir.



Şekil 9. 6 Lineer transformatörün eş değer devresi.

Transformatöre ait bağıntılar primer tarafa indirgenmiştir. Transformatör bağıntılarının primer tarafa indirgenmesi ile oluşan devre şekil 9.7’de görülmektedir.



Şekil 9. 7 Trafoya ait parametrelerin primer tarafa indirgenmesi.

Transformatöre ait direnç ve endüktans değerlerinin primer tarafa indirgenmesi sonucu hesaplanacak yeni değerlerine ait bağıntılar eşitlik 9.12 ve 9.13’de verilmiştir.

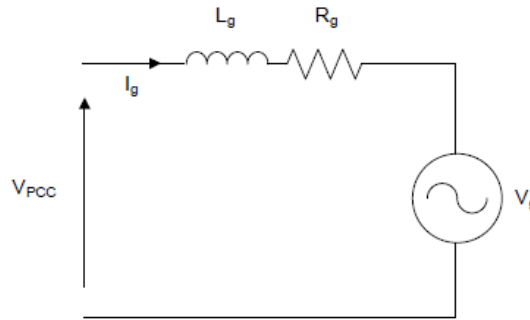
$$R_H = \frac{R_H}{k^2} \quad (9.12)$$

$$L_H = \frac{L_H}{k^2} \quad (9.13)$$

Üç fazlı transformatörler, üç adet birbirinden bağımsız transformatörlerin uygun şekilde bağlanması ile elde edilir. Transformatörlerin primer ve sekonder taraflarının, yıldız / üçgen bağlantı şekillerine göre dört farklı şekilde bağlanabilir.

9.1.4 Şebeke

Sisteme ait şebeke modellemesi ise Thevenin eşdeğer devresi ile elde edilir. Her bir faza ait eşdeğer devre şekil 9.8’deki gibi yazılır. R ve L parametreleri iletim hattını simgelemektedir.



Şekil 9. 8 Şebekenin eşdeğer Thevenin devresi

Her bir faza ait gerilim denklemi eşitlik 9.14’deki gibi yazılabilir:

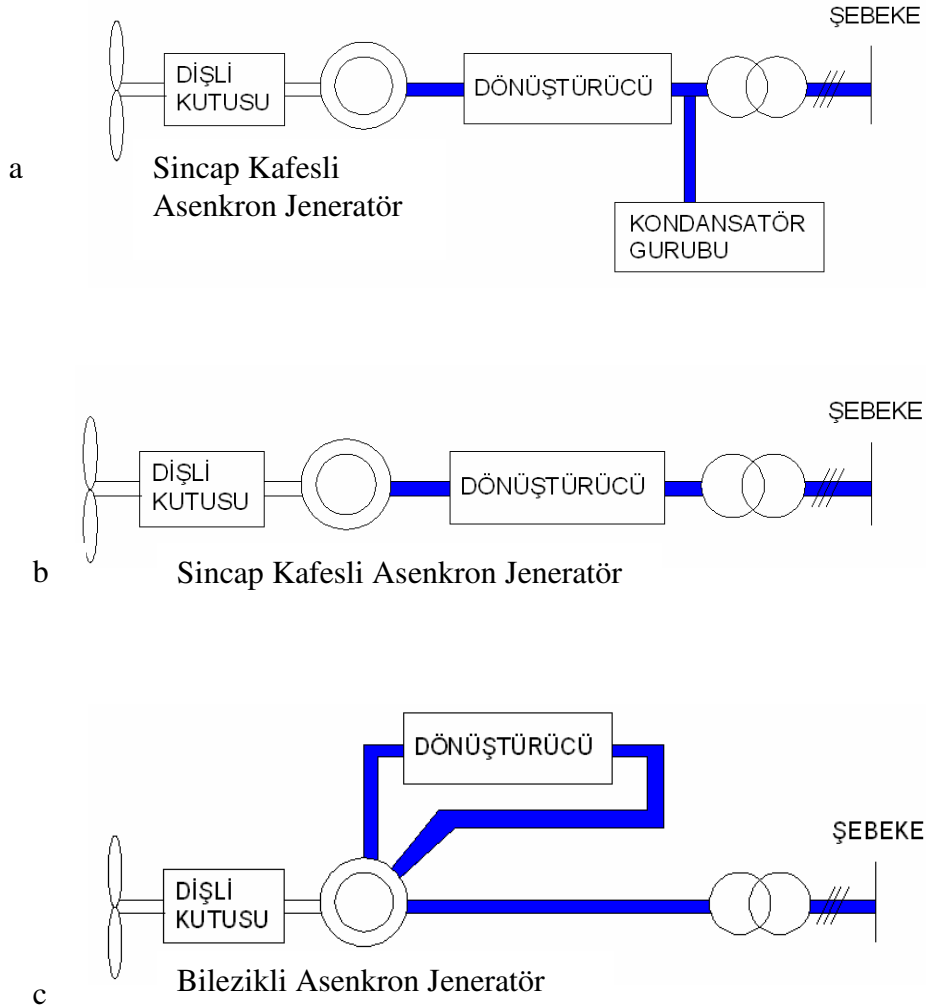
$$V_g = R_g \times I_g + L_g \times \frac{dI_g}{dt} + V_{PCC} \quad (9.14)$$

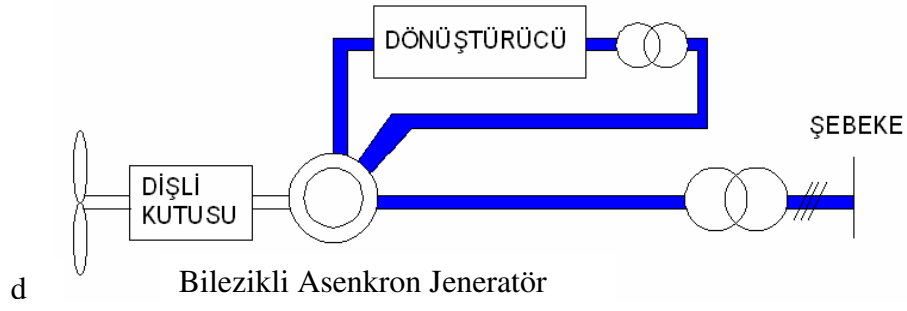
eşitlik 9.14'deki V_g : şebeke gerilimi, V_{pcc} : Ortak bara gerilimini göstermektedir.

Büyük güçlü rüzgar santrallerinde kullanılan asenkron ve senkron jeneratörlerin yapılarına özgü şebekeye bağlantı şekilleri vardır. Genel olarak bu modeller:

9.1.5. Asenkron Jeneratör Çeşitlerine Özgü Modeller

Şekil 9.9'de Asenkron jeneratör kullanılan rüzgar santrallerinin şebekeye bağlanması sırasında kullanılan güç elektroniği devrelerinin konfigürasyonu görülmektedir.





Şekil 9. 9 Asenkron jeneratörlerin şebekeye bağlantı modelleri.

Şekil 9.9 - a) Birçok Danimarkalı üretici firmanın uygulamakta olan yapıdır. Bu yapıda genellikle üç kanatlı rüzgâr türbini ve sincap kafesli asenkron jeneratör kullanılmıştır. Burada kullanılan kapasitör banklarının jeneratörün reaktif güç ihtiyacını karşılarken güç elektroniği devresi olarak soft starter kullanılır ve bu şekilde direkt olarak şebekeye bağlanır.

Şekil 9.9 - b) Bu yapıda kapasitör banklarının ve soft starterin yerine frekans konverteri (inverter) kullanılır. Burada frekans konverterin seçimine dikkat edilmelidir.

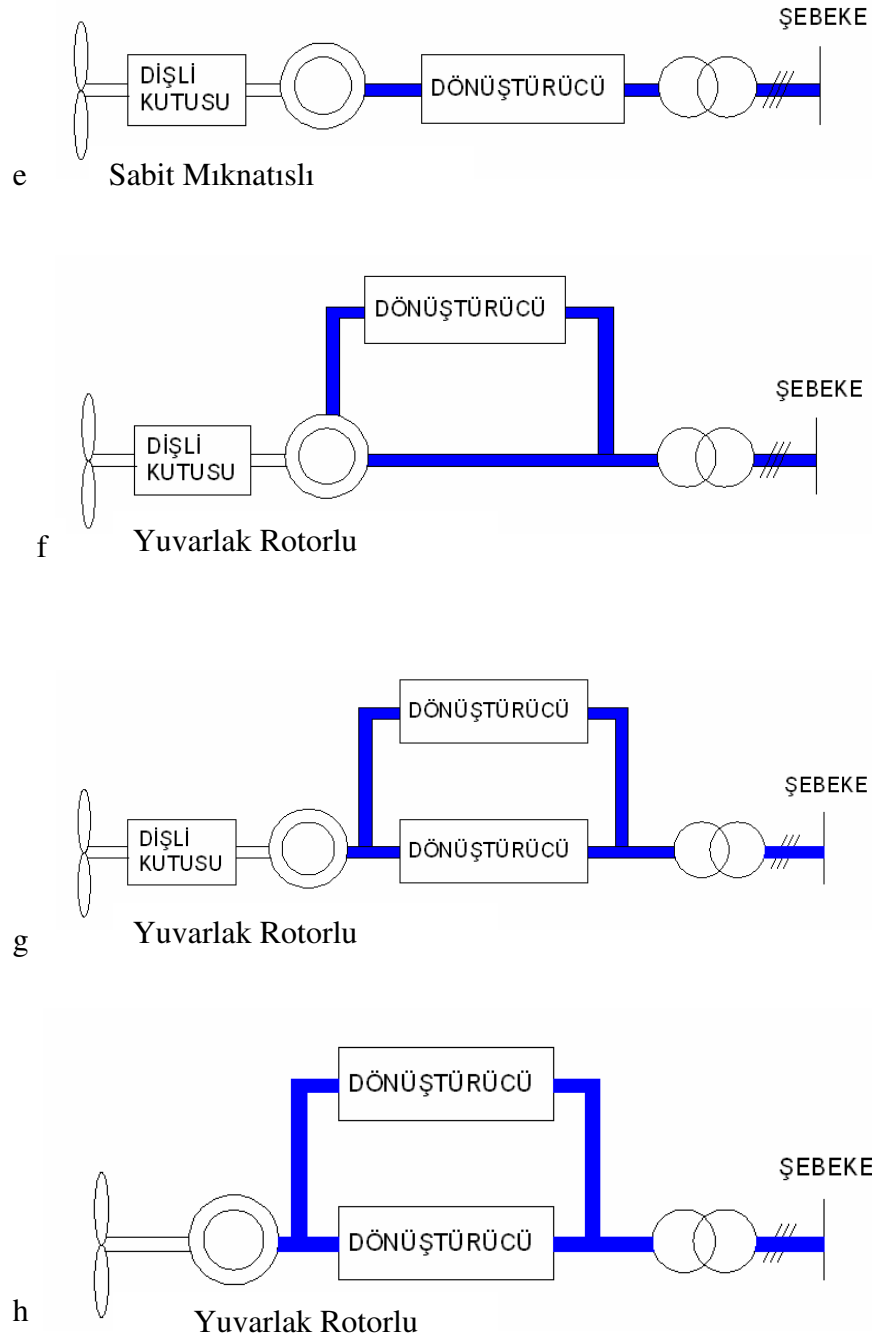
Çünkü değişken hızlı sistemlerde türbinin maksimum gücünü karşılayacak kadar güçte frekans konverteri kullanılması gerekirken, sabit hızlı uygulamalarda türbinin gücünün %20-%30 gücünü karşılayacak (reaktif güç ihtiyacını karşılamak için) büyüklükte bir frekans konverteri kullanılmalıdır.

Şekil 9.9 - c) Bu yapıda jeneratör olarak yuvarlak rotorlu asenkron jeneratör kullanılır ve rotora harici bir direnç bağlanması ile, rotorun toplam direnci kontrol edilir. Güç elektroniği devresi rotora bağlanır ve bu sayede asenkron generatorun kayması ayarlanarak çıkış gücü kontrol edilir.

Şekil 9.9 - d) Bu mimari ise çift beslemeli asenkron jeneratörler de kullanılır. Frekans konverteri jeneratörün rotor sargılarındaki akımı direkt olarak kontrol eder. Bu yapı ile generatorun tüm çıkış gücü kontrol edilir ve kullanılan güç elektroniği devresinin gücü, sistemin toplam gücünün %20-%30'u arasındadır.

9.1.6 Senkron Jeneratör Çeşitlerine Özgü Modeller

Şekil 9.10'da senkron jeneratör kullanılan rüzgar santrallerinin şebekeye bağlanması sırasında kullanılan güç elektroniği devrelerinin konfigürasyonu görülmektedir.



Şekil 9. 10 Senkron jeneratörlerin şebekeye bağlantı modelleri.

Şekil 9.10 - e) Bu konfigürasyon genellikle 20kW'a kadar olan küçük rüzgar türbin uygulamalarında kullanır. Bu konfigürasyon bazı üretici firmalar tarafından çok kutuplu ve 3.5 MW gücünde sabit mıknatıslı jeneratör de (PMG) ve 21kV DC diyotlu doğrultucular ile kullanılmıştır.

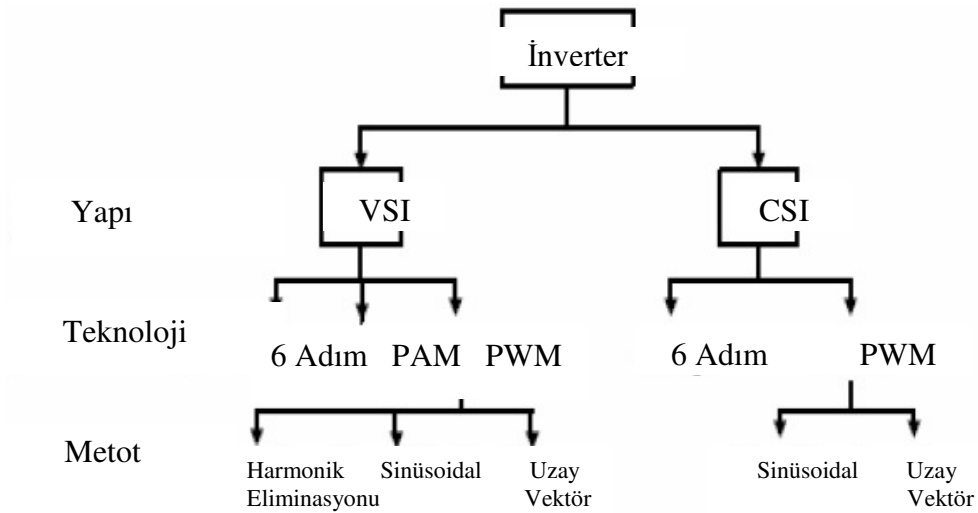
Şekil 9.10 - f) Bu konfigürasyon rüzgar türbini uygulamalarında sıklıkla tercih edilen bir mimari değildir. Az tercih edilmesinin sebepleri ise:

- Harici bir uyarıcı güç elektroniği devresine ihtiyaç duyması,
- Kayan bileziklere ihtiyaç duyması,
- Türbinin güvenliği daha kompleks olmasıdır.

Şekil 9.10 - g) Rüzgâr türbini uygulamalarında genellikle tercih edilen mimaridir. Şekil 9.10'deki yapıdan farklı olarak değişken hızlı sistemlerde kullanılabilir olmasıdır.

Şekil 9.10 - h) Bu yapıda çok kutuplu, yuvarlak rotorlu senkron jeneratör kullanılır. Sistemin çalışması şekil 9.10 – g)'de ki sistem gibidir fakat tek farkı bu sistemde dişli kutusu kullanılmaz. Birçok türbin üreticisi firma bu yapıyı kullanmaktadır.

Şekil 9.9 ve Şekil 9.10 içerisinde kullanılan inverterin yapısı Şekil 9.11'de verilmiştir.



Şekil 9. 11 İnverter sınıflandırması

VSI : Gerilim Kontrollü İnverter (Voltage Source Inverter)

CSI : Akım Kontrollü İnverter (Current Source Inverter)

PWM : Dalga Genlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)

PAM : Dalga Genişlik Modülasyonu (Pulse Amplitude Modulation)

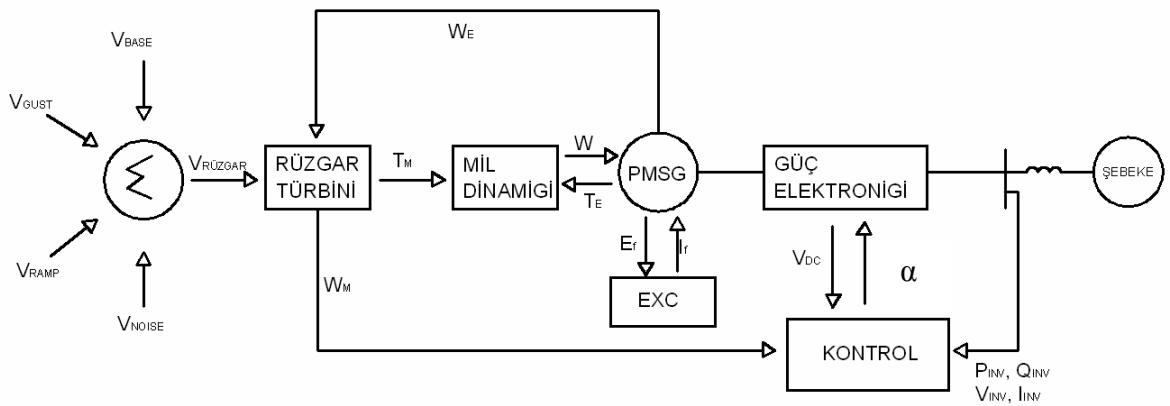
VSI, elektrik makinesinin terminallerinden alınan gerilimi anahtarlama sonucunda AC gerilime çevirir ve burada sistemin girişinde büyük bir kondansatör kullanılmalıdır.

CSI, DC gerilimi AC gerilime çevirir ve girişinde büyük bir seri endüktans bağlanmalıdır.

Bu sistemlerde VSI ve CSI sonuçta AC gerilim (akım) üretirler. Şekil 9.11’de görüldüğü gibi VSI ve CSI’in sürülmesi için aşağıdaki metotlar uygulanır.

BİLGİSAYAR ORTAMINDA SİSTEMİN MODELLENMESİ

Değişken hızlı sistemlerden elde edilen enerji, sabit hızlı sistemlere göre %20-%30 oranında daha fazladır, çıkış güçteki dalgalanma daha azdır ve reaktif güç kontrolü daha kolaydır. Güç elektroniğinde meydana gelen gelişmelerle birlikte değişken hızlı sistemlerin uygulamanı, kontrolü ve şebekeye bağlantısı kolaylaşmıştır.



Şekil 10.1 Şebeke bağlantısı için bir sistemin simülasyon modeli

Şekil 10.1'de görülen sistemde diğli kutusu kullanılmamıştır ve back-to-back VSI güç elektroniği sürücü devresinden oluşur.

Şebekeye bağlantısı yapılacak sistemin simülasyonunun yapılabilmesi için gereken değişkenler şekil 10.1'da görüldüğü gibi,

- Rüzgârın modellenmesi,
- Rüzgâr türbininin modellenmesi,
- Direk sürülebilen jeneratör,
- Mil (şaft) dinamiği,

- Kıyıcı ve VSI inverter kontrolü,
- Güç sisteminin kontrolünü içerir.

10.1 Rüzgârın Modellenmesi

Rüzgâr hızının ortama ve zamana göre sürekli değişken bir yapıya sahip olması nedeniyle modellenmesi çok zordur. Bu zorluklara rağmen rüzgar hızını ortaya koyan çeşitli yaklaşımlar vardır. Bunlardan bir tanesinin temeli süper pozisyon teoremine dayanır. Yani sisteme etki eden tüm bileşenler ayrı ayrı hesaplanarak toplanır. Bir diğer yöntem ise Van Der Hoven ve Von Karman'ın geliştirmiş olduğu modeldir.

10.1.1 Süper pozisyon Teoremine Göre Rüzgar Hızının Hesaplanması

Rüzgar modelinin içerisine aşağıdaki bağıntıda görülen dört farklı bileşen katılabilir.

$$V_W = V_{BASE} + V_{GUST} + V_{RAMP} + V_{NOISE} \quad (10.1)$$

Burada:

V_{BASE} = temel bileşen [m/s];

V_{GUST} = rüzgâr hızının belirli bir süre içerisindeki en yüksek değeri [m/s];

V_{RAMP} = rampa fonksiyonu şeklinde tanımlanan rüzgâr bileşeni [m/s];

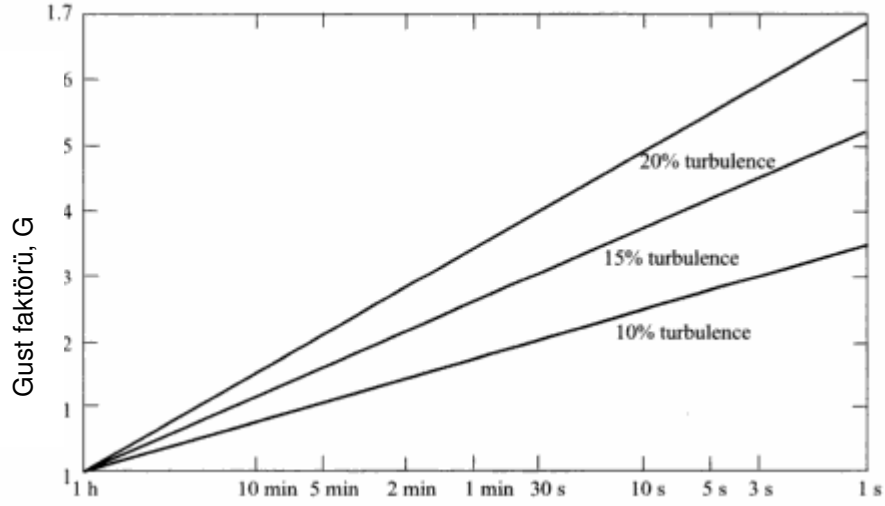
V_{NOISE} = sisteme etki eden dış etkenler (noise) [m/s];

V_{BASE}

Temel bileşen rüzgârın sabit hızını ifade eder.

V_{GUST}

Belirli iki zaman aralığı içerisinde beklenen en yüksek rüzgar hızıdır ve genellikle bir saatlik dilim içerisinde belirlenir ve hava akımı şiddetinin bir fonksiyonudur. Şekil 10.2'de Gust faktörünün değişim eğrisi görülmektedir.



Şekil 10. 2 GUST faktörünün değişim eğrisi

t süresi içerisindeki Gust faktörü fonksiyonu:

$$G(t) = 1 + 0.42 \times I_a \times I_n \left(\frac{3600}{t} \right) \quad (10.2)$$

şeklinde. Burada I_a yer eksenine paralel olan hava akımı şiddetidir. Şekil 10.2’de çeşitli hava akımı şiddeti ve bu değerler ile zamana göre gust değişim eğrisi verilmiştir.

V_{RAMP}

Rampa fonksiyonu şeklindeki değişimdir. Bu değişime göre:

$$V_{RAMP} = \begin{cases} 0 & t < T_{1R} \\ V_{RAMP} & T_{1R} < t < T_{2R} \\ 0 & t > T_{2R} \end{cases}$$

ve

$$V_{RAMP} = \left[1 - \frac{t - T_{2R}}{T_{1R} - T_{2R}} \right] \quad (10.3)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Burada;

T_{1R} = ramp fonksiyonunun başlangıç zamanı,

T_{2R} = ramp fonksiyonunun en yüksek olduğu zamanı ifade eder.

V_{NOISE}

Bu ifade aşağıda Van Der Hoven metodunda anlatılmış olan yöntemin ikinci (toplamsal şekilde ifade edilen kısım) kısmıdır.

10.1.2. Van Der Hoven ve Von Karmen Modeli Rüzgar Hızının Hesaplanması

Bu modele göre rüzgâr hızı sürekli değişkendir ve anlık değeri $V_w(t)$ belirli bir süre içerisindeki tüm değerlerin toplamına dayanır. Bu değer:

$$V_w(t) = V_{WM} + \sum_{i=1}^N A_i \times \cos(\omega_i t + \Psi_i) \quad (10.4)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

V_{WM} = Rüzgar hızının ortalama değeridir ve genellikle 10 dakika içerisindeki ortalama değer ifadesidir,

$A_i = \omega_i$ ayırık frekanstaki dalgalanmanın genliğini ifade eder. Burada $i=[1,N]$ ve N rüzgar hızından alınan örnek sayısıdır.

Ψ_i değişken faz açısının ifadesidir ve $-\pi, \pi$ aralığında değişir.

A_i genlik ifadesi spektral yoğunluğun $S(\omega)$ bir fonksiyonudur. Bu ifade ile türbülansın etkisi sisteme dahil edilir. $S(\omega)$ bağıntısı ise;

$$S(\omega) = \frac{0.475 \times \sigma^2 \frac{L}{V_{WM}^{\frac{5}{6}}}}{\left[1 + \left(\frac{\omega \times L}{V_{WM}} \right)^2 \right]^{\frac{5}{6}}} \quad (10.5)$$

şeklinde verilir.

Burada L bozucu etki olan türbülansın uzunlunun ifadesidir. L' nin belirlenme kriteri ise:

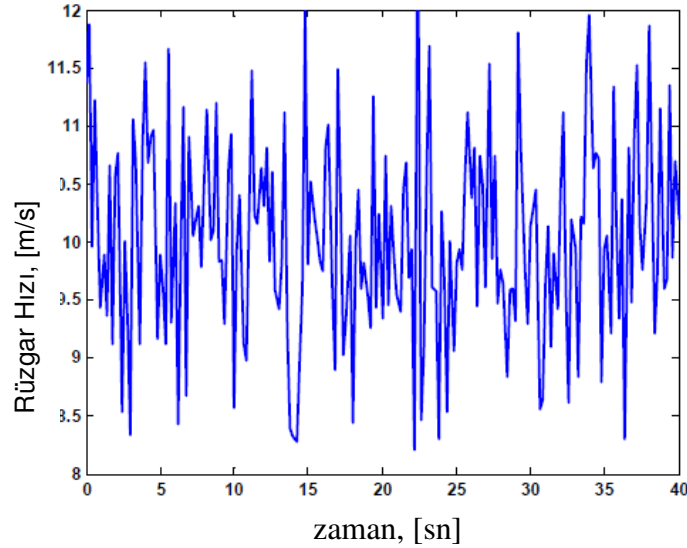
$$\begin{cases} 20h \rightarrow h \leq 30m \\ 600 \rightarrow h > 30m \end{cases}$$

şeklinde verilir. h ifadesi ise rüzgar hızının ölçüm yapıldığı yüksekliktir. Sonuç olarak A_i ifadesi:

$$A_i(\omega_i) = \frac{2}{\pi} \times \sqrt{\frac{1}{2} [S(\omega_i) + S(\omega_{i+1})]} \times (\omega_{i+1} - \omega_i) \quad (10.6)$$

şeklinde hesaplanır.

Von Der Hoven metoduna göre rüzgar hızının değişimi Şekil 10.3’de verilmiştir.



Şekil 10. 3 Von Der Hoven metoduna göre rüzgar hızının anlık değişim grafiği

10.2 Türbinin Modellenmesi

Sistemden mekaniksel moment ve elektriksel güç ifadeleri daha önce matematiksel bağıntılar kısmında anlatılmıştır. Burada kısaca bahsedecek olursak:

$$\lambda = \frac{\omega_m \times R}{V_R} \quad (10.7)$$

$$P_M = \frac{1}{2} \times \rho \times \pi \times R^2 \times V_R^3 \times C_P \quad (10.8)$$

$$T_M = \frac{P_M}{\omega_M} = \frac{1}{2} \times \rho \times \pi \times R^5 \times C_P \times \frac{\omega_M^2}{\lambda^3} \quad (10.9)$$

mekaniksel momentten rüzgar jeneratörünün giriş gücü elde edilir. Güç (C_P) katsayısı tip hız oranının (λ =TSR) bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi elde edilir. Buradaki β kat sayısı türbin gövdesinin açısını ifade eder. Şekil 10.4’de bir rüzgar türbininden alınan parametreler görülmektedir.

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167 \times \beta) \times \sin \frac{\pi \times (\lambda - 2)}{(13 - 0.3 \times \beta)} - 0.00184 (\lambda - 2) \times \beta \quad (10.10)$$

Güç	1.0 [MW]	Nominal rüzgar hızı	12.35 [m/s]
Kanat yarıçapı	37.38 [m]	En düşük hız	4 [m/s]
Hava yoğunluğu	0.55 [kg/m ³]	En yüksek hız	25 [m/s]
Nominal hız	2.808 [rad/s]	Pitch açısı	0

Şekil 10. 4 Bir rüzgâr türbininden alınan parametreler.

10.3 Direk Sürülebilir Jeneratör

Fiyatı, ebatları ve sürekli bakım gerektirmesi nedeniyle dişli kutusu kullanımı giderek azalmaktadır ve jeneratörler uygun dizayn ile direkt olarak sürülebilmektedir. Birçok uygulamada düşük hızlı, direkt sürülebilir jeneratörler kullanılmaktadır. Bu amaçla tasarlanan senkron jeneratörlerin kutup sayısı 50 ile 300 arasında olabilirken, nominal devir sayısı 20 ile 60 arasında olabilmektedir.

Dişli kutusu kullanılmayan değişken hızlı uygulamalarda, rüzgâr türbininin elektriksel çıkış frekansı şebeke frekansından farklıdır ve genelde düşüktür. Temel açısal frekans ω_B aşağıdaki eşitliklerden elde edilir. Jeneratöre ait parametreler eşitlik 10.7 ve 10.8' de verilmiştir.

$$f_B = \frac{N_P}{2} \times \frac{RPM_{TUR}}{60} \quad (10.7)$$

$$\omega_B = 2 \times \pi \times f_B = \pi \times N_P \times \frac{RPM_{TUR}}{60} \quad (10.8)$$

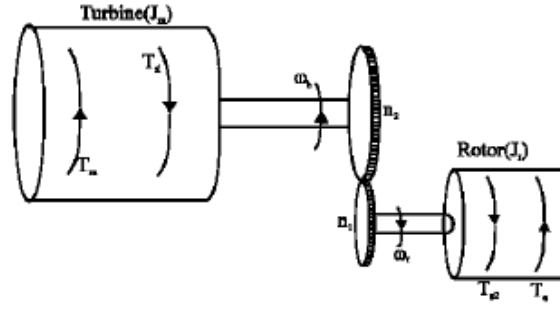
Jeneratör gücü	1.2 [MW]
Nominal faz-nötr gerilimi (rms)	1.1 [kV]
Nominal hat akımı (rms)	0.5363 [kA]
Kutup sayısı	84
Açısal frekans	117.93 [rad/s]

Şekil 10.5 Jeneratöre ait katalog değerleri

10.4 Mil (Şaft) Dinamiği

Türbin rotoru ile jeneratör birbirine mil aracılığı ile dişli kutulu veya dişli kutusuz olarak bağlanırlar. Şekil 10.7’de dişli kutusu kullanılan bir sistemin modelini göstermektedir.

Rüzgâr türbini ile jeneratör aynı mil üzerinde ise iki kütle arasında bir burulma salınımı meydana gelir. Türbin ile jeneratör arasında meydana gelen burulma karakteristiğini tespit edebilmek için milin dinamik davranışı bilinmelidir.



Şekil 10. 6 Mil (Şaft) dinamiğinin modellenmesi.

T_m = Türbin momentinin ifadesidir ve rüzgâr tarafından oluşturulur.

J_m = Türbinin atalet momenti.

T_{s1} = Türbinden mile aktarılan momentinin ifadesidir.

ω_b = Türbinin açısal hızı

Rüzgârın oluşturduğu T_m momentinin ile mil üzerinde ω_b açısal hızı ile bir döndürme momenti oluşturur.

$$T_m - T_{s1} = J_m \times \frac{d\omega_b}{dt} \quad (10.9)$$

milin jeneratör tarafında ise:

T_{s2} = Milin jeneratör tarafına aktarılan moment,

T_e = Jeneratör üzerinde oluşan moment,

ω_r = Jeneratör rotorunun açısal hızı,

J_r = Jeneratör rotorunun açısal hızını ifade eder.

Bu ifadelerle göre jeneratör tarafına aktarılan mekanik güç bağıntısı,

$$T_{s2} - T_e = J_r \times \frac{d\omega_r}{dt} \quad (10.10)$$

Dişli kutusunun ideal, kayıplarının olmadığı ve milin her noktada aynı mukavemeti gösterdiği kabul edilirse

$$\frac{T_{s1}}{T_{s2}} = \frac{\omega_r}{\omega_b} = \frac{n_1}{n_2} \quad (10.11)$$

oranı elde edilir. Burada n_1/n_2 dişli kutusunun dönüştürme oranıdır. Yukarıdaki ifadeler uygun şekilde birleştirilir ve gereken sadeleştirmeler yapılırsa,

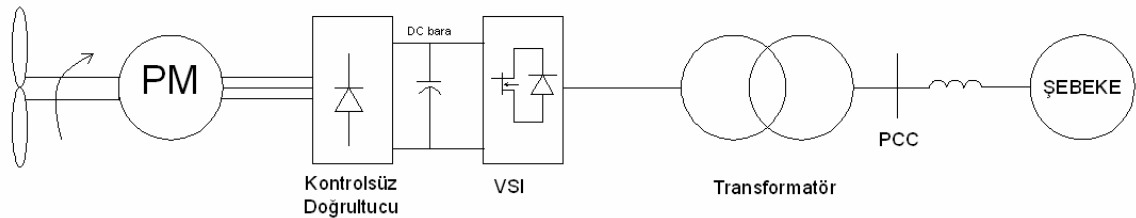
$$T_m \left[\frac{n_2}{n_1} \right] + T_e = \left[\frac{J_m \times \left[\frac{n_2}{n_1} \right]^2 + J_r}{J_{eq}} \right] \times \frac{d\omega_r}{dt} \quad (10.12)$$

bağıntısı elde edilir.

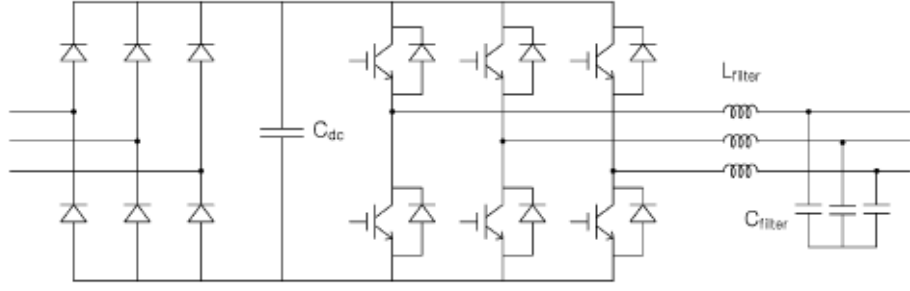
Sistemde eğer dişli kutusu kullanılmıyorsa n_1/n_2 dönüştürme oranı 1 alınır.

10.5 Doğrultucu ve VSI İnverter Kontrolü

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde, daha önceden anlatıldığı gibi birçok güç elektroniği devreleri kullanılabilir. Şekil 10.7’de tasarlanan sistemde VSI inverter kullanılmıştır. VSI inverterde, jeneratör terminallerinde oluşan harmonikleri filtrelemek için LC harmonik filtre kullanılır. Şekil 10.8’de kıyıcı ve VSI modeli görülmektedir.



Şekil 10. 7 Şebeke bağlantısı yapılan sistemin blok şeması.



Şekil 10. 8 Doğrultucu ve VSI inverter modeli.

10.6 Değişken Hız Kontrolü

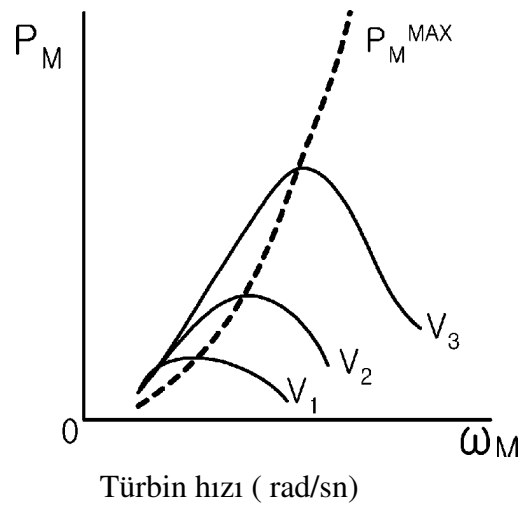
Sistemden alınacak P^{MAX} maksimum gücün ifadesi ve şekil 10.9’de ergisi verilmiştir. Bu ifadenin basitçe anlamı, maksimum güç, rüzgar hızının değişim ergisi takip edilerek elde edilir. Sistemin çıkışından alınan asıl güç ise maksimum gücün verim ile çarpımından elde edilir (eşitlik 10.14).

$$P_M^{MAX} = \frac{1}{2} \times \pi \times \rho \times R^5 \times \frac{C_P^{MAX}}{\lambda^3} \times \omega_M^3 \quad (10.14)$$

maksimum güç ifadesi.

$$P_{ref} = \eta \times P_M^{MAX} \quad (10.15)$$

sistemin çıkışından alınan asıl gücün ifadesi.



Şekil 10. 9 Türbin hızındaki değişime göre mekaniksel gücün değişim eğrisi.

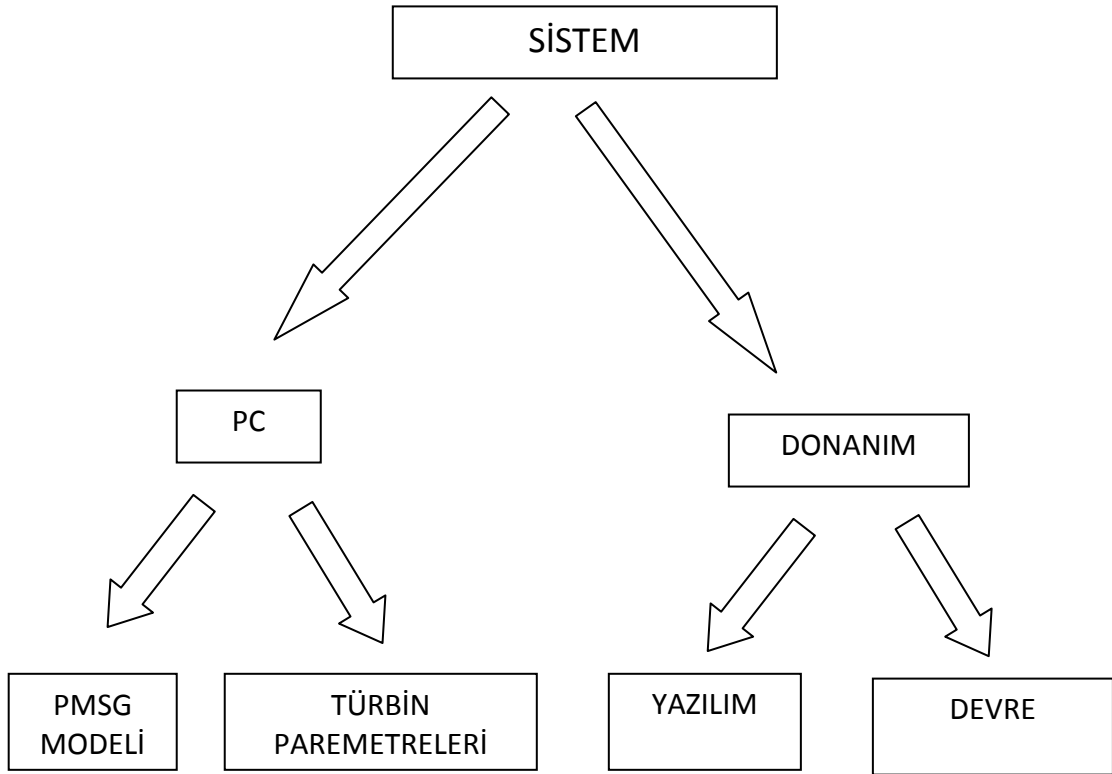
Sistem modellenmesinin yapılmasıyla elde edilen simülasyon ile rüzgar enerjisi temelli güç sisteminde meydana gelen transientler ve sistemin davranışı kestirilebilir, değişken hızlı sistemlerde, sistemin dinamik davranışı ve güç akışı analiz yapılabilir.

10.7 Çift Çıkışlı Asenkron Jeneratörün Şebekeye Bağlanması

Günümüzde rüzgâr türbinlerinde alınan çıkış gücü sürekli olarak artmaktadır. Büyük güçlü sistemlerde şebekeye bağlantı sırasında mekaniksel strese ve güçte meydana gelen artışlar belirli bir seviyede tutmak için hız kontrol sistemleri kullanılmalıdır. Çift çıkışlı asenkron jeneratörlerin (DOIG: Double Output Induction Generator) hızları çok geniş bir aralıkta ayarlanabilir. Bu sistemde iki tane konverter DOIG ile akuple edilmiştir. VSI konverter şebekeye aktarılan aktif ve reaktif gücü kontrol eder ve harmonik bozulmayı azaltır/önler.

TASARLANAN SİSTEM

Tasarlanan sistemi bir bütün olarak Rüzgar Türbinine ait parametrelerin alınması, sistemin dinamik modellemesinin oluşturulması, davranışlarının izlenilmesini ve sistemin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla kontrol kısmını içermektedir. Tasarlanan sistemin blok şeması Şekil 11.1’de verilmiştir.

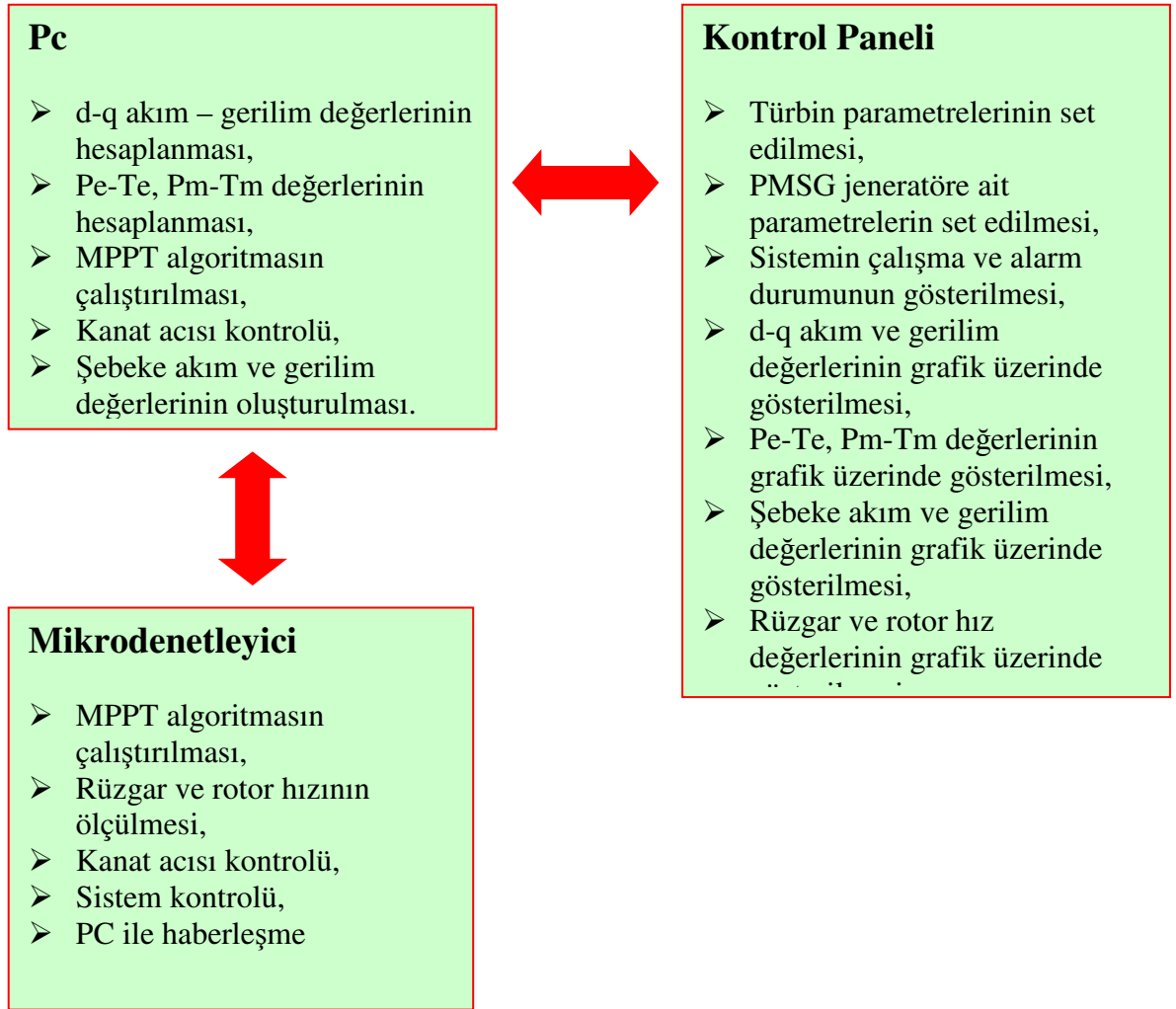


Şekil 11. 1 Tasarlanan sistemin blok şeması

11.1 Sistem

Türbin kontrol sisteminin tamamını kapsamaktadır yani çatısını oluşturmaktadır. Donanım kısmından gelen parametreler ve pc üzerinden set edilen parametreler bir bütünün parçalarını oluşturmaktadır.

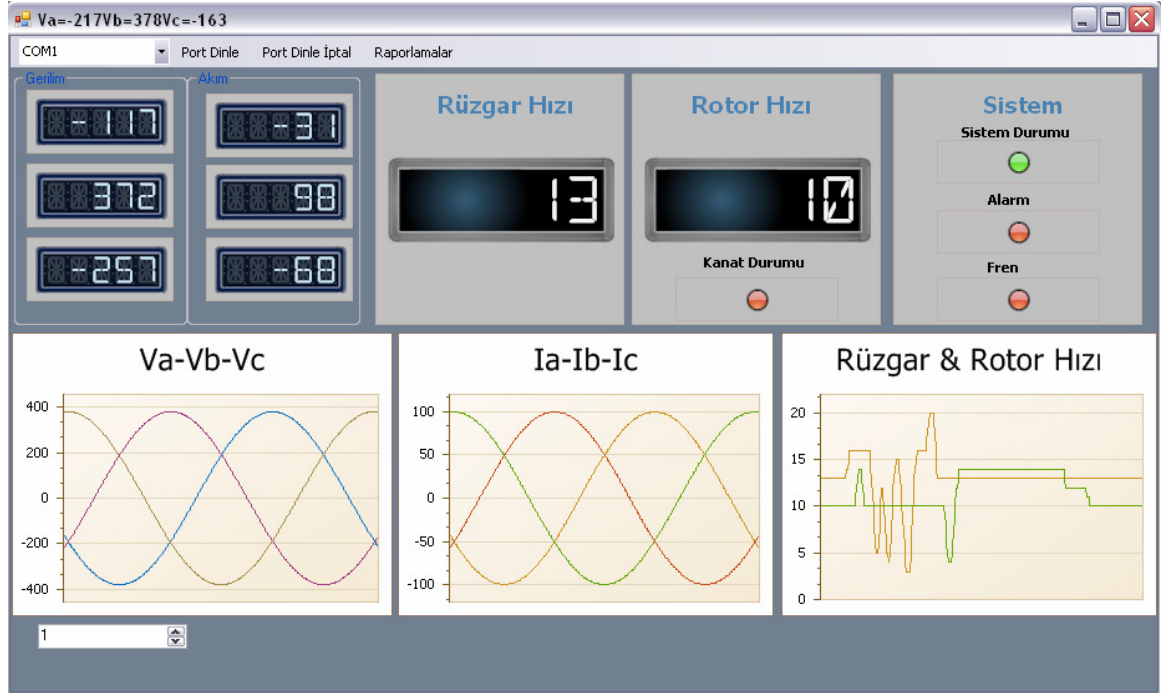
Pc üzerinde set edilen parametreler ile donanım üzerinden gelen türbine ait parametreler değerlendirilip yine pc üzerinde işlenilerek sonuçlandırılmakta ve ekranlanmaktadır. Pc üzerinde işlenen verilere göre türbin kanatları ve gövdesi sistemin güvenliğini, uygun ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlayacak şekilde kontrol edilmektedir. Şekil 11.2’de sistemin akış şeması verilmiştir.



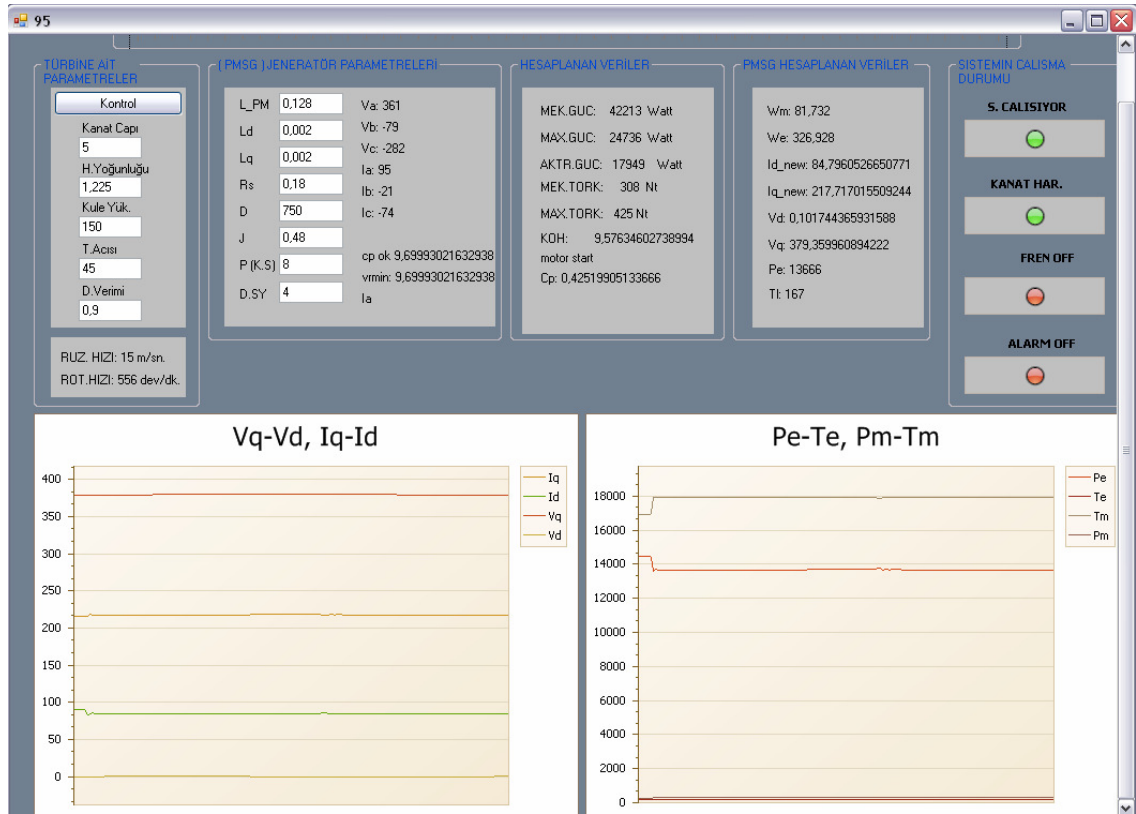
Şekil 11. 2 Sistemin akış şeması

11.1.1 PC ve Kontrol Paneli

PC üzerinde Visual C#.net programı ile hazırlanmış arayüz (kontrol paneli) bulunmaktadır (Şekil 11.3 ve şekil 11.4). Bu arayüz ile türbine ait kanat çapı, hava yoğunluğu, kule yüksekliği, dişli kutusunun verimi gibi parametreler set edilmektedir. Bununla birlikte rüzgar hızı ve rotor hızı parametreleri donanım üzerinde hazırlanmış devre ile ölçümleri uygun şekilde yapılarak pc ye RS-485 ara yüzü ile aktarılmaktadır.



Şekil 11. 3 VC# üzerinde hazırlanmış programın giriş sayfası.



Şekil 11. 4 VC# üzerinde hazırlanmış programın ayarlar ve analiz sayfası.

Pc üzerinde set edilen parametrelerden bir diğerini ise PMSG'e ait parametreler L_d - L_q , R_s , λ_{PM} , J ve P' den oluşturmaktadır. Program üzerinden set edilen parametreler Şekil 11.5'de gösterilmiştir

Şekil 11. 5 Türbin ve PMSG'e ait parametrelerin set edilmesi.

Set edilen ve donanım üzerinden alınan parametreler, kontrol programı üzerinde işlenmekte ve sonuç olarak sisteme ait mekaniksel güç, mil gücü, jeneratörden alınan güç, moment, kanat uç hız oranı hesaplanmakta ve ekranlanmaktadır.

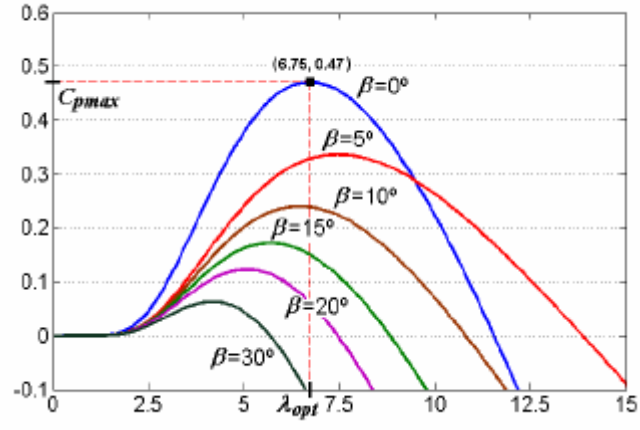
HESAPLANAN VERİLER	PMSG HESAPLANAN VERİLER
MEK.GUC: 78603 Watt	W_m : 74,676
MAX.GUC: 46061 Watt	W_e : 298,704
AKTR.GUC: 32658 Watt	I_{d_new} : 78,4604224220092
MEK.TORK: 614 Nt	I_{q_new} : 220,828410382928
MAX.TORK: 866 Nt	V_d : -0,111265155975178
KOH: 7,11198336903919	V_q : 379,632600649364
motor start	P_e : 12665
C_p : 0,415478374348831	T_t : 170

Şekil 11. 6 Set edilen parametrelere göre hesaplanan değerler.

Ayrıca sistemi maksimum verimde çalıştırabilmek için oluşturulan MPPT algoritması ile kontrol edilmektedir.

Şekil 11.7’da bulunan temsili gösterime göre MPPT algoritması çalışmaktadır. Bu algoritmaya göre öncelikle program üzerinden set edilen parametrelere göre sistemin çalışabileceği en büyük C_p değeri hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu C_p değerine en yüksek hassasiyette yaklaşılarak sistemin maksimum verimde çalışması sağlanmaktadır.

Hesaplanan maksimum C_p değerini yakalamak için, kanat açısı açılmak / kapatılmak suretiyle kontrol edilmektedir. Eğer kanat açısının kontrolü sistemi kararsızlıktan kurtarıyorsa devreye ikinci bir kontrol sistemi olan gövde açısı kontrolü girmektedir. Eğer gövde açısı kontrolü ile sistemi kararsızlıktan kurtarılamıyor ise türbinin güvenliğini sağlayabilmek için türbin durdurulmaktadır.



Şekil 11. 7 Çeşitli kanat açılarına göre C_p -lamda değişim eğrisi [14].

11.1.2 PMSG Modeli

Sistemin detayları “Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratör” kısmında detaylı olarak açıklanmıştır. Burada PC üzerinde çalışan program üzerinde sistemin matematiksel modeli oluşturulmuştur ve d-q eksenli endüktans değeri, rotor direnci gibi parametreler set edilmektedir.

Sisteme ait akım ve gerilim değerleri program içerisinde matematiksel denklemlerle oluşturulmuştur. Bu veriler ile birlikte matematiksel model aracılığıyla PMSG’e ait güç ve moment hareketleri anlık olarak izlenilmektedir ve sistemin davranışlarına göre uygun kontrol sinyalleri oluşturulmaktadır.

11.1.3 Türbin Parametreleri

Bu kısımda türbine ait kanat uzunluğu, kule yüksekliği gibi parametreler ekran üzerinden set edilir ve türbin kanatlarından alınabilecek mekanik enerji için gerekli olan rüzgar hızı, rotor dönüş hızı gibi parametreler devre üzerinden donanımsal olarak alınır.

11.2 Donanım

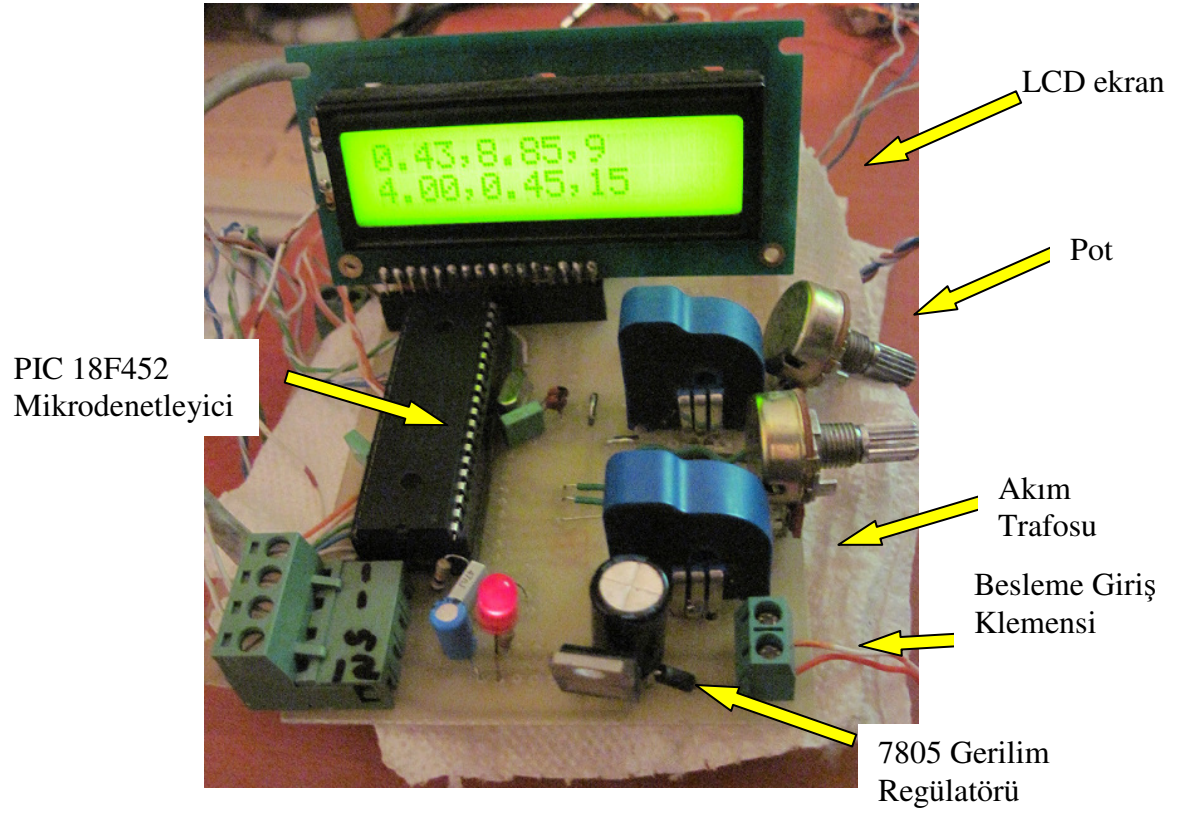
Donanım kısmı kendi içerisinde, yazılım ve devre olmak üzere iki parçadan oluşur. Devre mikro denetleyici tabanlıdır, sistemin kontrol-kumandasını sağlamaktadır. Uygulaması yapılan devreye ait resimler şekil 11.8, 11.9 ve 11.10’da verilmiştir.

Sistemden alınan veriler ise:

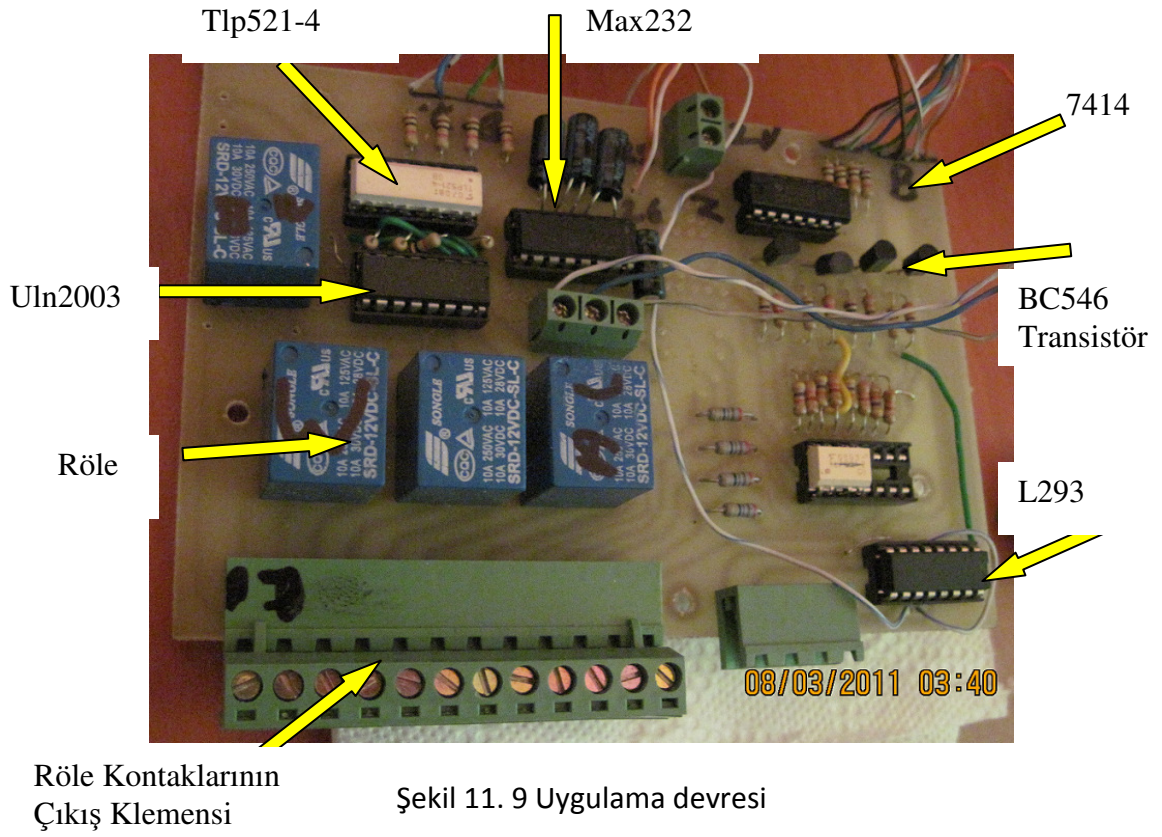
- Türbin rotorunun dönüş hızı,
- Rüzgâr hızı,
- Hat akımı,
- Hat gerilimi,
- 4 adet dijital girişten oluşmaktadır.

Kontrol edilen kısımlar ise:

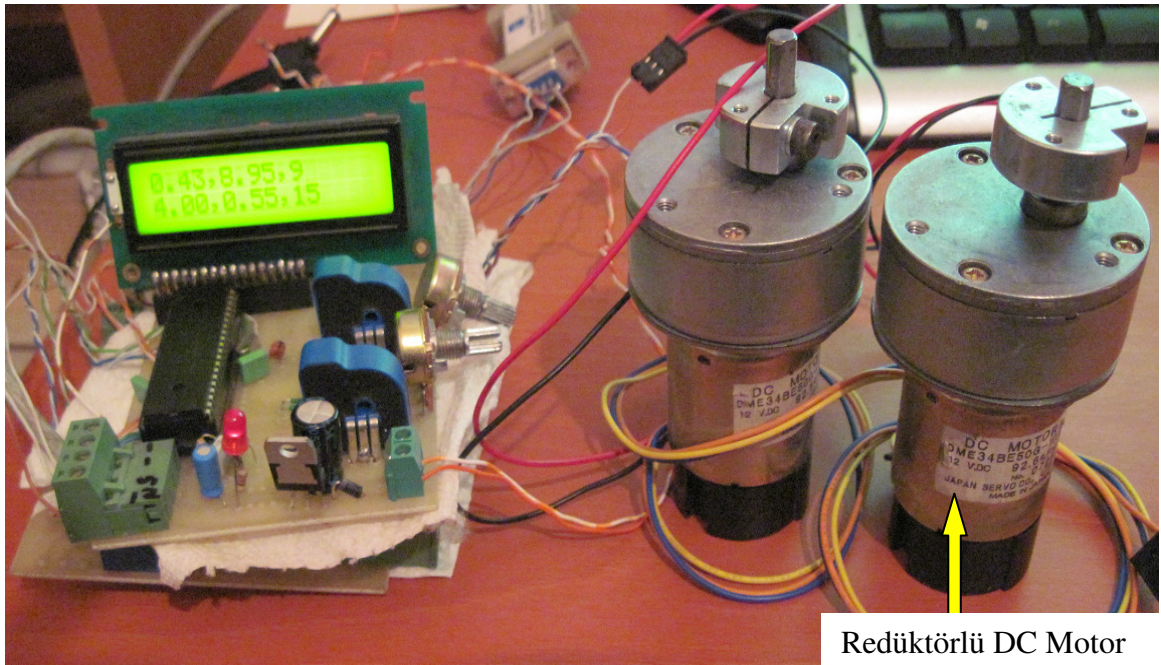
- Kanat açısı,
- Türbin gövde açısını içermektedir.



Şekil 11. 8 Uygulama devresi



Şekil 11. 9 Uygulama devresi



Şekil 11. 10 Uygulama devresi

Sistemden alınan veriler RS-485 haberleşme arayüzü ile ve mikro denetleyici içerisinde koşan program sayesinde pc'ye gönderilmektedir. Bu iki kısmın detayları aşağıda açıklanmıştır.

11.3 Yazılım

Bu kısımdan kastedilen mikro denetleyici içerisinde koşan programdır. Mikro denetleyici olarak Microchip firmasının üretmiş olduğu 16 bitlik işlem yapma kapasitesine sahip Pic18f452 kullanılmıştır.

Burada mikro denetleyicinin görevi:

- Analog girişlerini kullanarak türbine ait üç faz çıkış akım ve gerilim değerlerini okuyarak güç değerlerini hesaplamak.
- Rüzgâr hızını ve türbin rotorunun dönüş hızını analog okuma yöntemi ile okumak.
- Okunan akım, gerilim, rüzgâr ve rotor hız parametrelerini belirlenen formatta depolayarak RS-485 ara yüzü ile pc üzerinde çalışan kontrol programına göndermek.
- Pc üzerinden gelen verilere göre, türbinin kanatlarını ve gövdesinin MPPT algoritmasına uygun açıyı alana kadar döndürmek / hareketini sağlamak.

Mikro denetleyici içerisindeki bu yazılım sayesinde dinamik olarak sistem analiz edilmekte ve rüzgar hızı ve rotor dönüş hızına göre optimum $C_p(\lambda)$ parametresi hesaplanmaktadır. Hesaplanan $C_p(\lambda)$ parametresine göre türbinin kanat açısı kontrol edilmektedir. Bu sayede rüzgara karşı optimum yönelim ve sonuçta maksimum verim sağlanmaktadır. Şekil 10.11'da tasarlanan sisteme ait $\lambda - C_p(\lambda)$ değişim grafiği verilmiştir. Bu grafik sistemin çalışma aralığı içerisindeki tüm rüzgar hızlarını karşılamaktadır ve bu değişken hıza karşılık cevabı içerisinde en optimumu sağlayacak şekilde tespit edilmektedir.

Bu sistemde $C_p(\lambda)$ değişiminin yatay eksenin altında kalmaması için rüzgar hızının belirli değerin altına düşmemesi gerekmektedir ve $C_p(\lambda) > 0$ olması için rüzgar hızının (V_R) alabileceği en düşük değer eşitlik 11.1'de verilmiştir.

$C_p \geq 0$ Olmalı.

$$C_p = 0.44 * \sin\left(\frac{\pi \times (\lambda - 2)}{13}\right) \geq 0 \Rightarrow$$

$$\left(\frac{\pi \times (\lambda - 2)}{13}\right) \leq \pi \Rightarrow \quad (11.1)$$

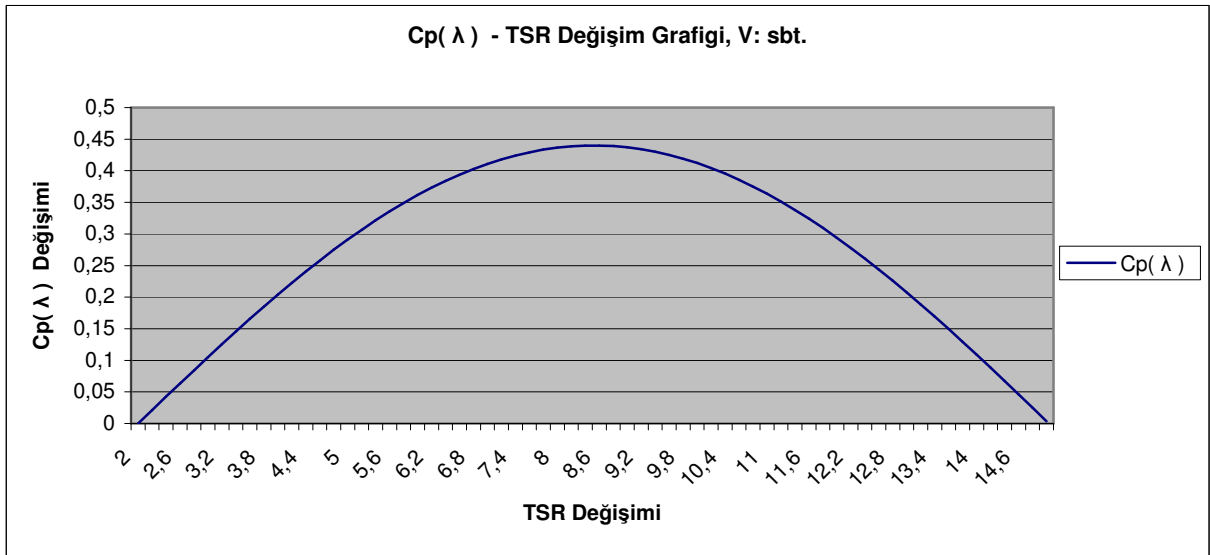
$$\lambda \leq 15 \Rightarrow \frac{2\pi n R}{60 \times V_R} \leq 15 \Rightarrow$$

$$V_R \geq \frac{n \times R}{143.6} \text{ Olmalıdır.}$$

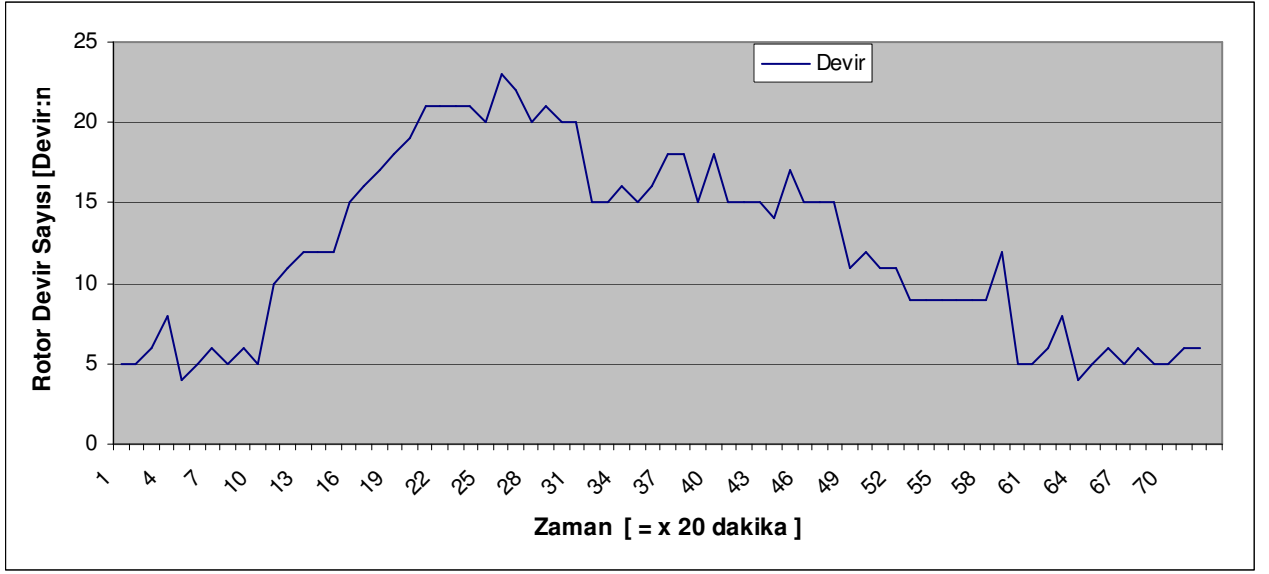
Eşitlik 11.1 ifadesinde ki, n: rotor devir sayısı ve R: türbin kanatlarının yarı çapına karşılık gelmektedir.

Bir sistemde λ 'nın alabileceği en büyük değer ise 15 ve en küçük değer ise 2'dir. Yani $\lambda \leq 15$, $\lambda \geq 2$ olmalıdır. λ ifadesi, bu değerlerin üzerine çıktığında C_p değeri grafik üzerinde negatif eksene kaymaktadır. Bu ise istenmeyen bir çözüm ve kontroldür.

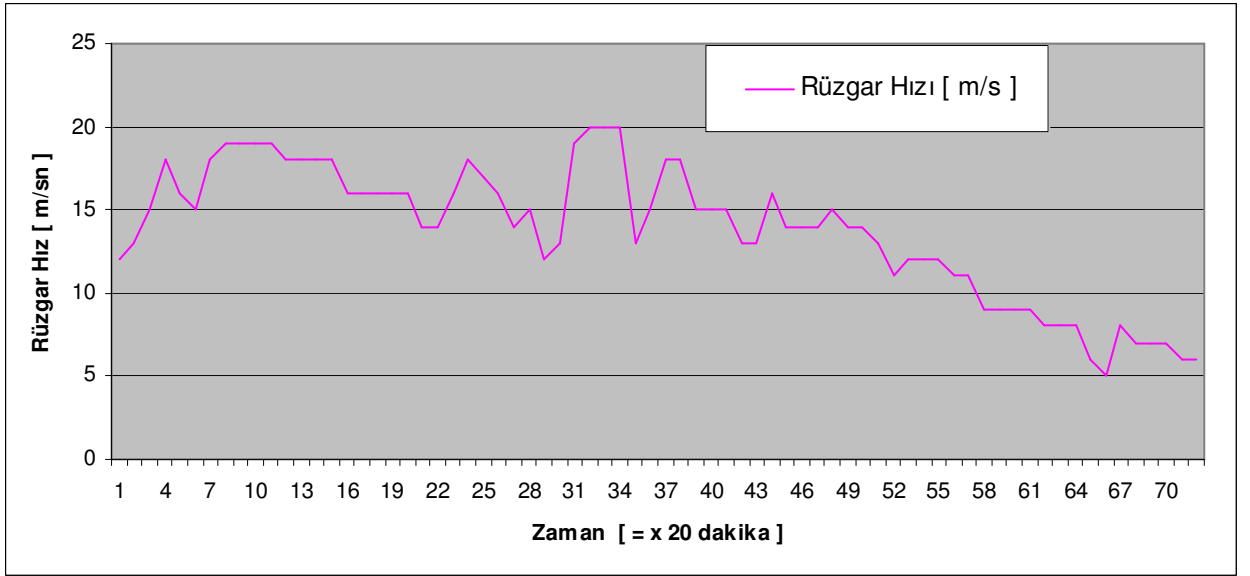
Şekil 11.13'de devre üzerinden alınan, rüzgar hızının zamana bağlı değişimi görülmektedir ve rüzgar hız değişimine karşılık şekil 11.12'de türbin rotoruna ait hız bilgisini temsil eden grafik verilmiştir.



Şekil 11. 11 Tasarlanan sistemde TSR, $C_p(\lambda)$ değişim grafiği.



Şekil 11.12 20 dakika aralıklarla alınmış olan türbin rotorunun dönüş hız bilgisi.



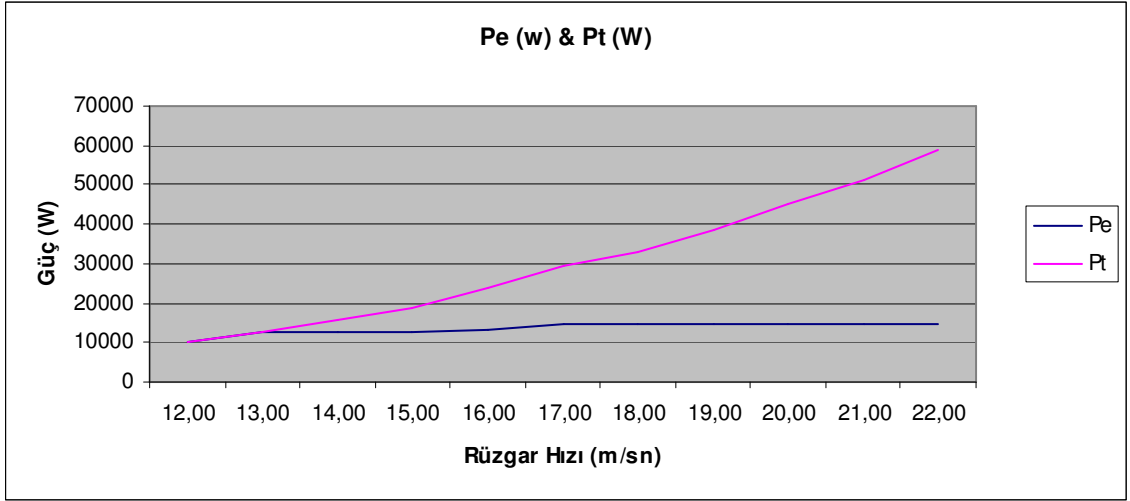
Şekil 11. 12 Rüzgar Hızının zamana bağlı değişimi.

Çizelge 11. 1 Simülasyonu yapılan bir sisteme ait parametrelerin değişimi.

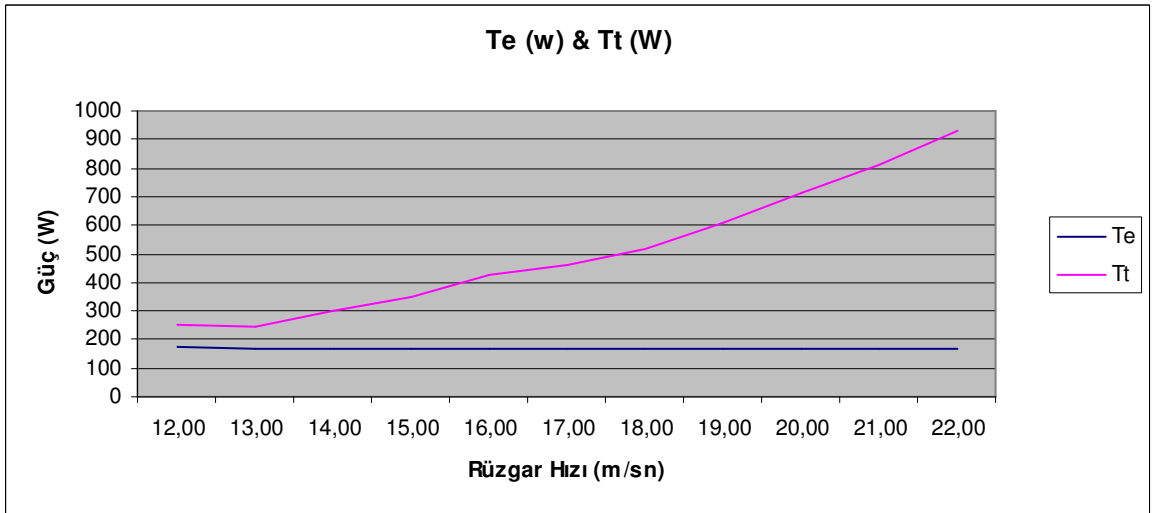
Kanat Çapı (mt)	Rüzgar Hızı (m/s)	Devir Sayısı (d/dak)	Pe (W)	Te (Nt)	Pt (W)	Tt (Nt)	Cp	KOH
5,00	12,00	400	10095	173	10314	249	0,439	8,27
5,00	13,00	500	12700	169	12815	245	0,423	9,62
5,00	14,00	500	12700	169	15632	299	0,435	9,09
5,00	15,00	500	12700	169	18530	347	0,438	8,17
5,00	16,00	535	13230	168	23758	424	0,439	8,48
5,00	17,00	600	14536	165	29256	465	0,438	8,82
5,00	18,00	600	14536	165	32936	520	0,439	8,60
5,00	19,00	600	14536	165	38490	608	0,437	8,14
5,00	20,00	600	14536	165	45349	716	0,431	7,68
5,00	21,00	600	14536	165	51194	808	0,422	7,33
5,00	22,00	600	14536	165	58921	930	0,408	6,91

Çizelge 11.1’de simülasyonu yapılmış bir rüzgar türbinine ait parametrelerin değişimi verilmiştir. Bu sistemin güvenli çalışabileceği rüzgar hızı $22 \text{ (m/sn)} > V_{\text{rüzgar}} > 12 \text{ (m/sn)}$ ve rotor devir sayısı $600 \text{ (dev/dk.)} > V_{\text{rot}} > 400 \text{ (dev/dk.)}$ aralığında değişmektedir.

MPPT algoritmasına göre rüzgar hızı (17 m/sn) den itibaren artsa bile devir sayısı mekanik frenleme ile 600 (dev/dk.)’da sabit tutulmuştur. Ancak rüzgar hızı 22 (m/sn)’nin üzerine çıktığında ve 400 (dev/dk.)’nin altına düştüğünde güvenlik açısından sistem durdurulmuştur. Yukarıda parametreleri verilmiş olan sistemin, elektriksel güç ile mekaniksel gücün değişimi şekil 11.14’de ve elektriksel moment ile mekaniksel moment değişimi şekil 11.15’de verilmiştir. Şekil 11.14 ve şekil 11.15’de görüldüğü gibi sistemin elektriksel gücü ve elektriksel moment, rüzgar hızının artışına karşılık MPPT. algoritması ile sabit tutulmuştur ve sınır aşımında sistem durdurulmuştur.



Şekil 11. 13 Çizelge 11.1’de verilen sistemin Pe (W) – Pt (W) değişim grafiği.



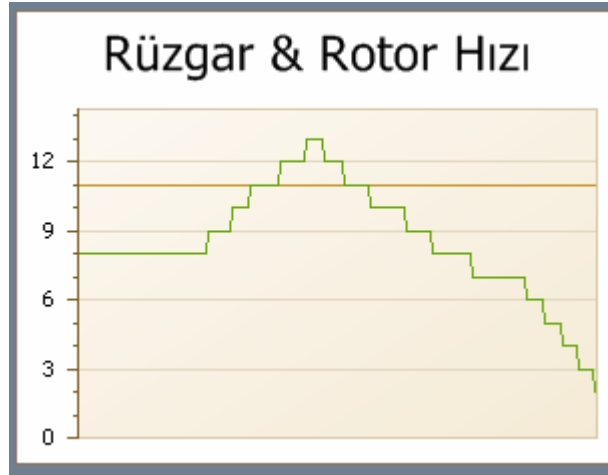
Şekil 11. 14 Çizelge 11.1’de verilen sistemin Te (W) – Tt (W) değişim grafiği

Rüzgar hızının yetersiz olduğu durumda ise sistemin davranışlarını gösteren grafikler aşağıda verilmiştir.

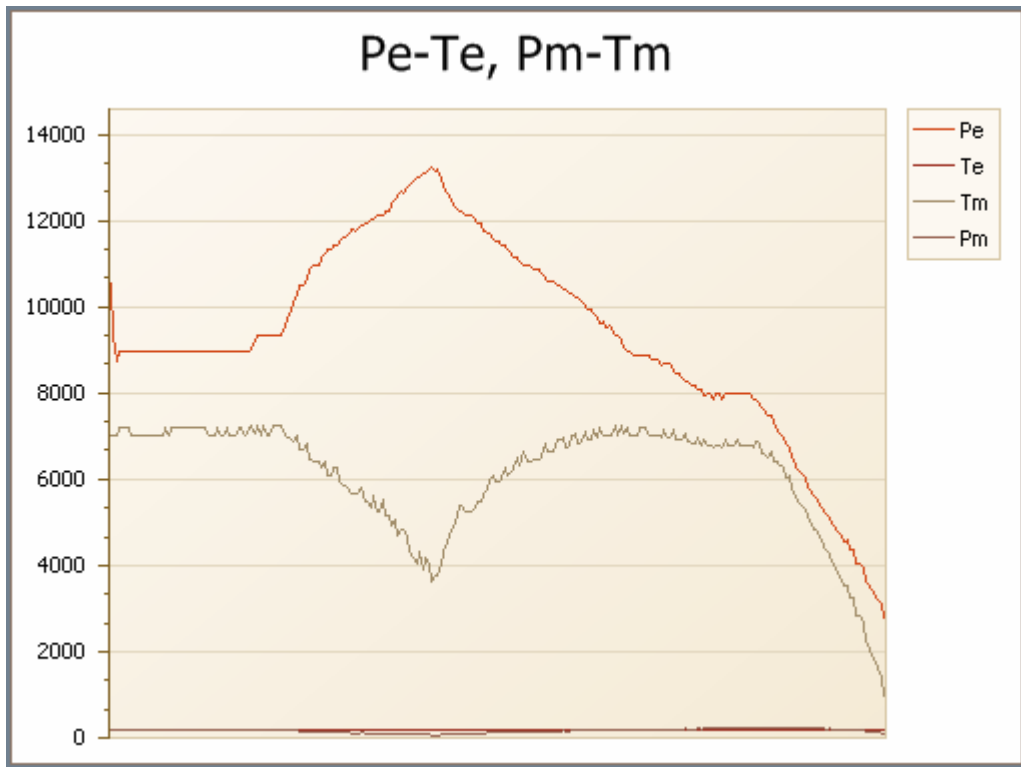
Şekil 11.16’de rüzgar hızı 11 (m/sn)’de sabit tutulmuştur. Bu rüzgar hızı sistemin çalışma hız aralığının dışında olduğundan dolayı türbinin kanat açısı değiştirilerek, rotor hızının artırılmasına çalışılıyor.

Şekil 11.18’da bu rüzgar hızına karşın türbin ve jeneratörün çıkış güç ve momentindeki değişim grafiği verilmiştir.

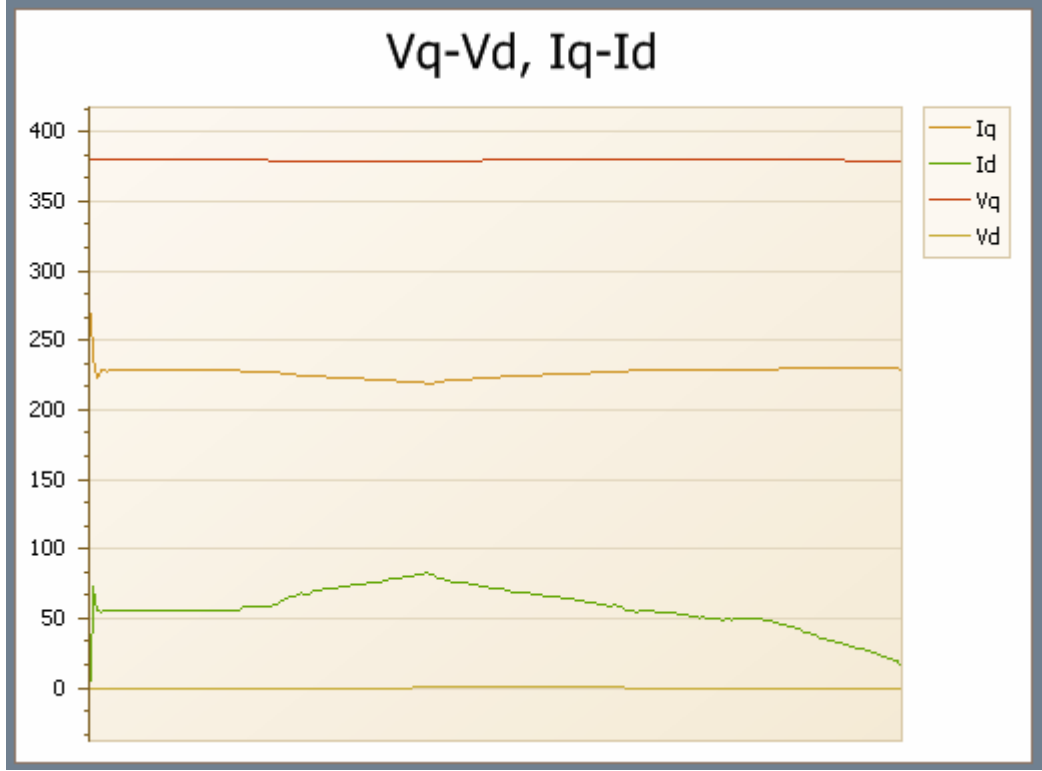
Bu grafiğe göre türbin rotorundan alınacak mekaniksel güç, rotor hızındaki değişmeye rağmen çıkış gücünü karşılamaya yetmiyor ve sistem durduruluyor.



Şekil 11. 15 $V_{RÜZGAR} = 11$ (m/sn) sabit ve rotor hızı değişken



Şekil 11. 16 Sabit rüzgar hızına karşılık türbin güç ve momentinin değişim grafiği.

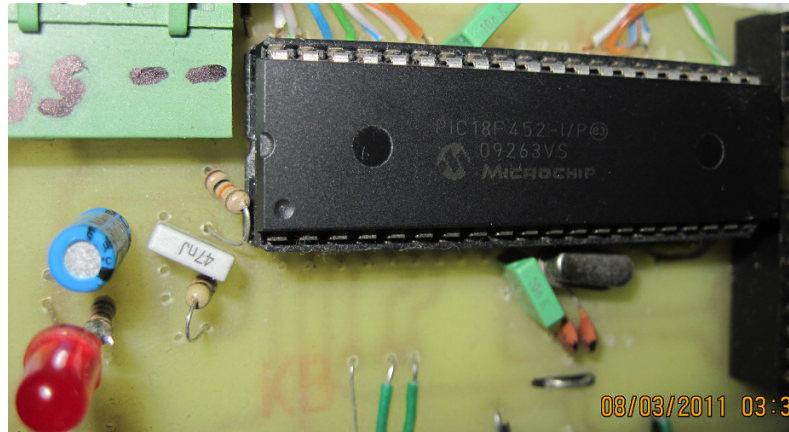


Şekil 11. 17 Sabit rüzgar hızına karşılık d-q akım ve gerilimdeki değişimler.

11.4 Devre

PC ve mikro denetleyici üzerinde koştan yazılıma göre sistemi kontrol eden, sistemin çalışmasını ve devamlılığını sağlayan kısımdır. Şekil 11.19'de devre üzerindeki PIC 18F452 mikrodenetleyicisi görülmektedir.

16 bitlik mimariye sahip olması, 20 Mhz'de çalışması ve kullanım kolaylığından dolayı Microchip firmasının bir ürünü olan PIC 18F452 mikrodenetleyici kullanılmıştır.



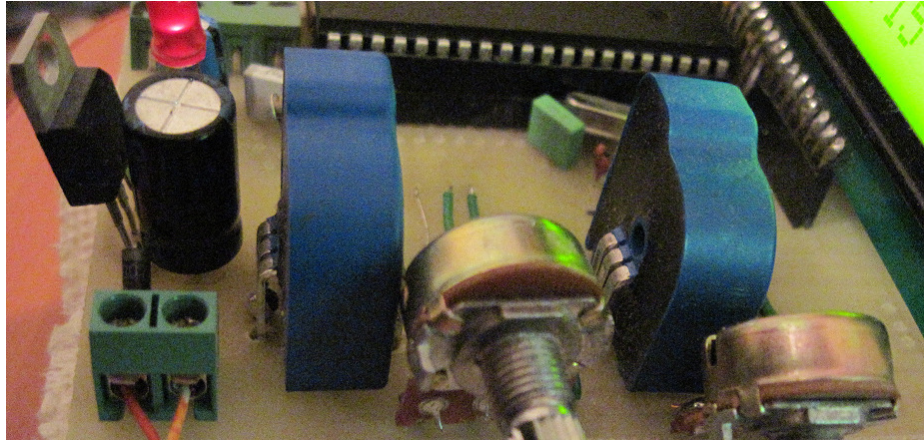
Şekil 11. 18 PIC 18F452

Mikro denetleyicinin görevi, yukarıdaki konu başlıkları içerisinde detaylı olarak açıklanmıştır.

11.4.1 Devre Üzerinde Kullanılan Ekipmanlar

11.4.2 Akım Transtüseri

Akım Transtüseri olarak LEM firmasının ürünü olan LTS 25- NP Hall effect akım transtüseri kullanılmıştır (Şekil 11.20). Uygun pin bağlantısı yapılmasıyla bu akım transtüseri 80A AC akıma kadar ölçüm yapılabilmektedir. Akım transtüserinin girişindeki ac akım değerine karşın, çıkışında dc gerilim üretmektedir. Üretilen dc gerilim seviyesi ise 5 volt değerinin altındadır. Bu ise mikro denetleyicinin anlayacağı bir gerilim seviyesidir ve analog girişi kullanılarak ölçüm yapılmıştır. LTS-25 akım transtüserinin giriş akımına karşı çıkışından alınacak gerilim seviyesinin değişimi şekil 11.21’de ve iç yapısı şekil 11.22’de verilmiştir.



Şekil 11. 19 LTS 25-NP Hall effect akım transtüseri

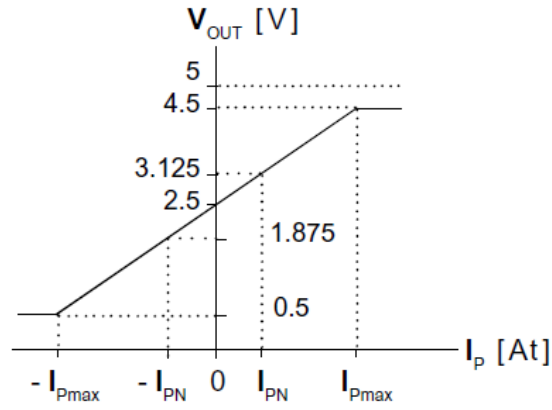
Grafik üzerindeki

I_{PN} : Nominal giriş akımı,

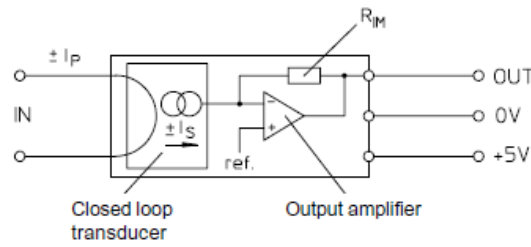
I_{PMAX} : En fazla ölçülebilecek giriş akım seviyesi,

I_P : Ölçülebilecek giriş akım aralığı,

V_{OUT} : Giriş akımına karşı oluşturulan analog çıkış gerilim seviyesi.



Şekil 11. 20 LTS-25 NP akım transtüserinin akım gerilim karakteristiği



Şekil 11. 21 LTS-25 NP akım transtüserinin içyapısı

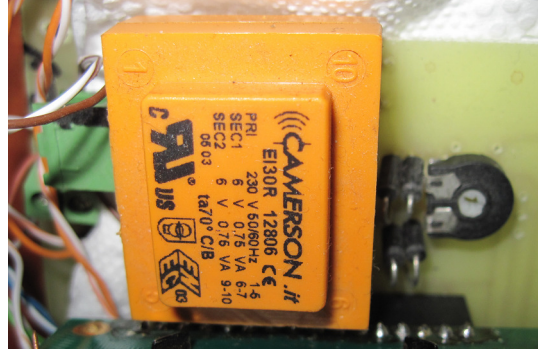
Şekil 11.21'deki grafik de görüldüğü gibi akım transtüseri $I_{P\text{MAX}}$ akım seviyesine kadar lineerlik göstermektedir ve bu değerden sonra doyuma ulaşmaktadır. Doyum noktasından sonra çıkış gerilim seviyesi değişmemektedir ve kendini 4.5 vdc seviyesinde sabitlemektedir.

Çıkış gerilimine karşı hesaplanacak giriş akım değerine ait bağıntı eşitlik 11.1'de verilmiştir.

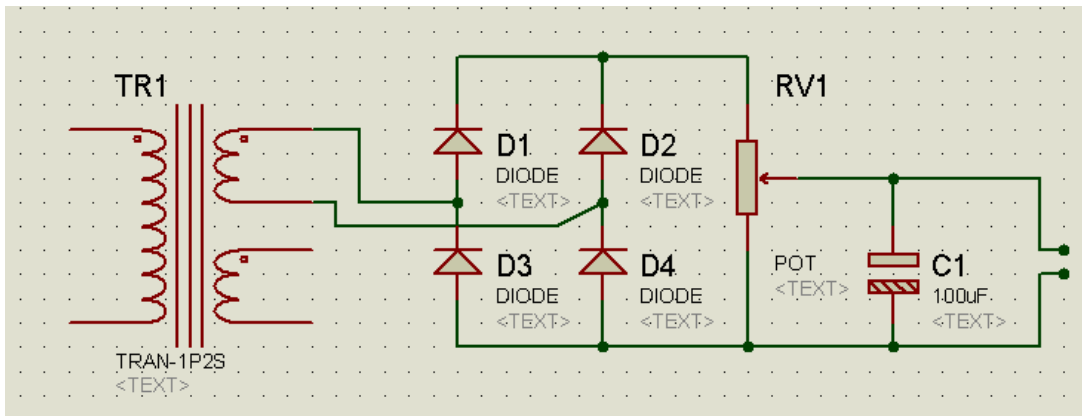
$$I_P = 125 - 40 \times V_{OUT} \quad (11.1)$$

11.4.3 Gerilim Transformatörü

Gerilim transformatörü olarak Camerson firmasının ürünü olan 230 VAC / 6 VDC ve 2x0.75VA katalog değerlerine sahip EI30R kullanılmıştır (Şekil 11.23). Şekil 11.24'de gerilim trafosunun, mikro denetleyicinin analog girişlerine bağlantı şeması verilmiştir. Devre şemasından da görüldüğü gibi gerilim trafosunun çıkışları tam köprü doğrultucu ile doğrultulup, ardından trimpot ve kondansatör kullanılarak çıkış gerilim seviyesi 4.5 vdc seviyesine ayarlanmıştır. Burada 4.5 vdc gerilim seviyesi 230 vac giriş gerilim seviyesini göstermektedir.



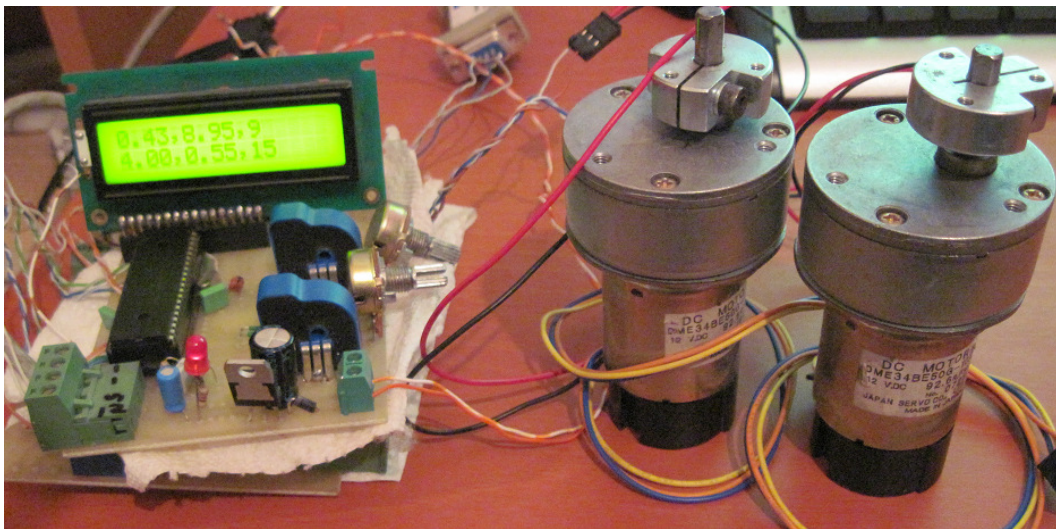
Şekil 11. 22 230 VAC / 6 VDC ve 2x0.75VA, EI30R gerilim trafosu



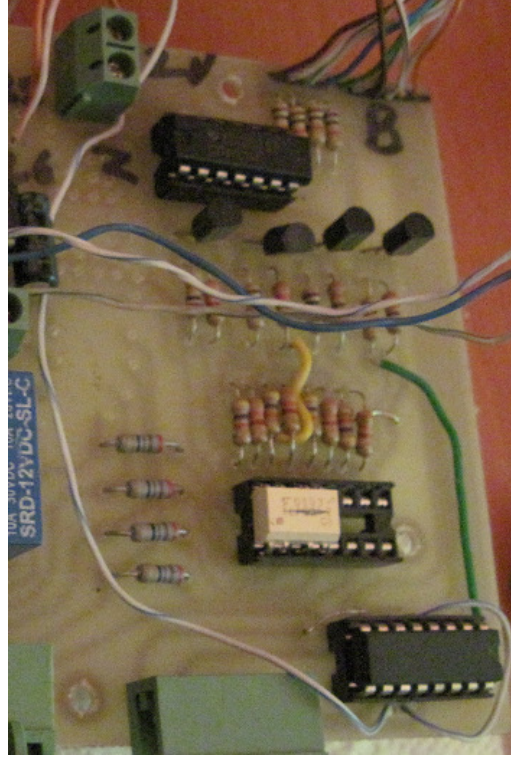
Şekil 11. 23 Gerilim trafosunun, mikro denetleyiciye bağlantı şeması

11.4.4 Motor Sürücü Devresi

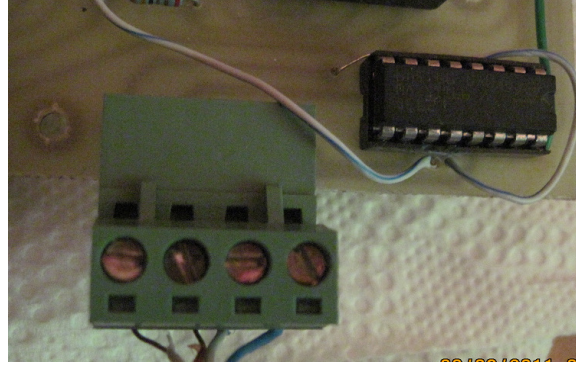
Motor sürücü entegresi olarak L293D kullanılmıştır. Bu entegre ile iki ayrı DC motorun yön kontrolü ve sabit hızda hareketi sağlanmıştır (Şekil 11.26).



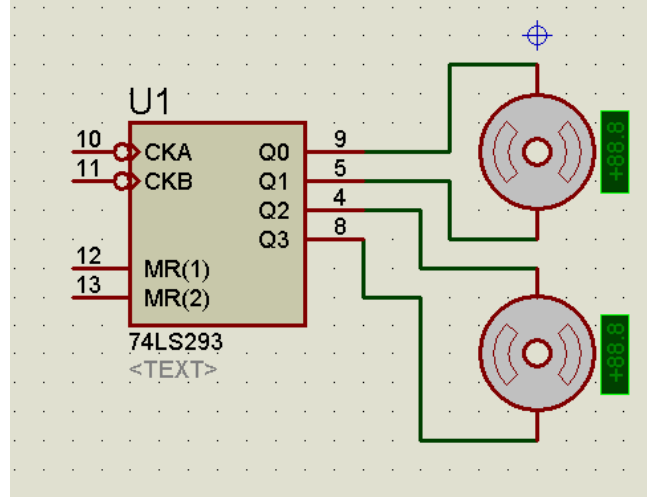
Şekil 11. 24 DC motorların devre ile olan bağlantısı



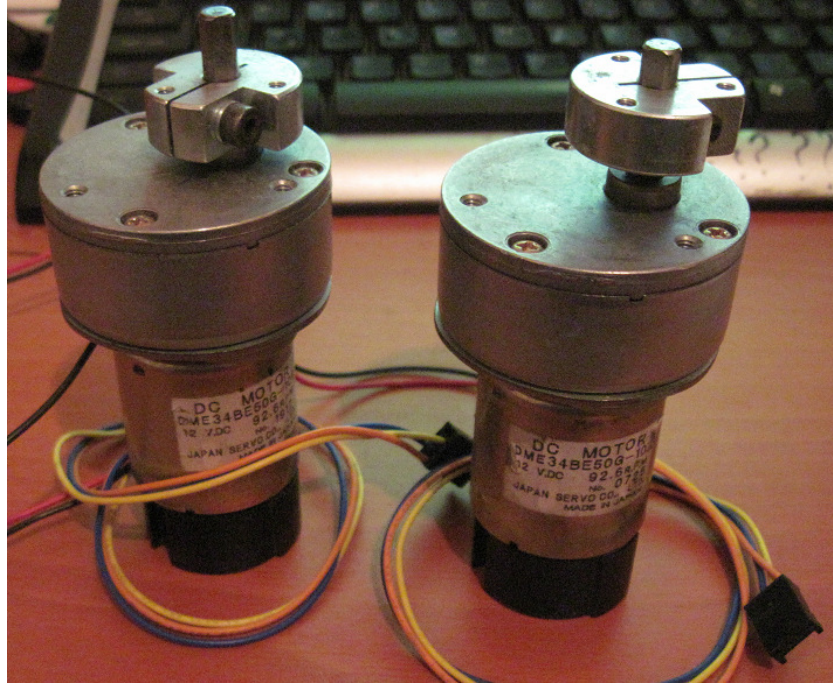
Şekil 11. 25 L293D entegresinin diğer ekipmanlar ile olan bağlantısı



Şekil 11. 26 Devre üzerinde L293D motor sürme entegresi



Şekil 11. 27 DC Motor sürme devresi



Şekil 11. 28 Türbin kanat ve gövdesinin hareketini sağlayan DC motorlar

11.4.5 Röle Sürme Devresi

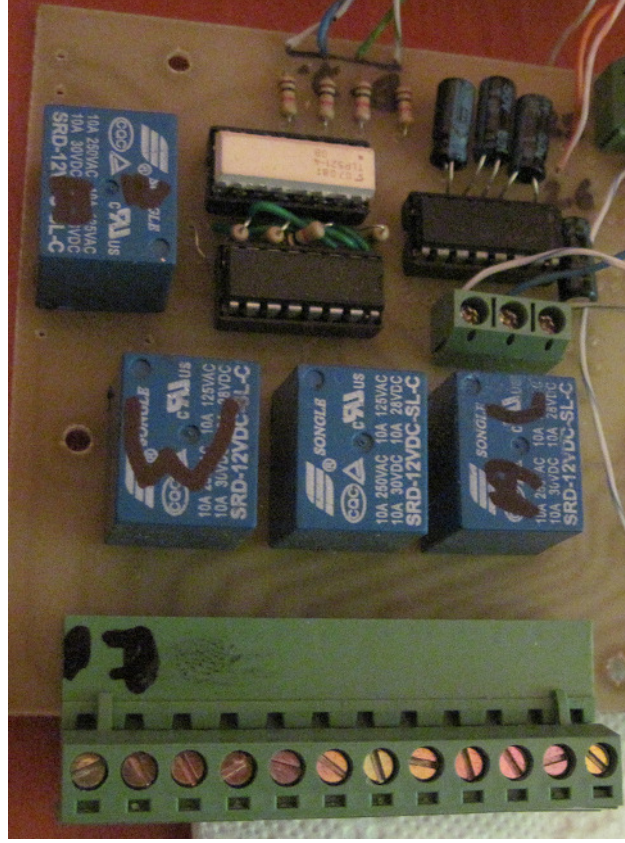
İhtiyaç durumunda çeşitli sistemlerin kumandasını sağlamak amacı ile devreye 230VAC-8A dayanma kapasitesine sahip, 12VDC bobinli röle kullanılmıştır (Şekil 11.31). Röleler ile işlemci arasında izolasyonu sağlamak amacı ile sürme işlemi LTS521 optotransistörler ile sağlanmıştır.

Kart üzerindeki bu dijital çıkışlar:

- Türbin rotoru güvenli çalışma bölgesi sınırları dışına çıktığı anda sistemi durdurmak (Şekil 11.30),
- Sisteme ait, sistem çalışıyor – arıza – alarm bilgilerini vermek ve kullanıcıları uyarmak amacıyla kullanılmak üzere tasarlanmıştır.



Şekil 11. 29 Sistemin röleler üzerinden kumandasının ekran üzerinden gösterimi



Şekil 11. 30 Röle sürme devresi

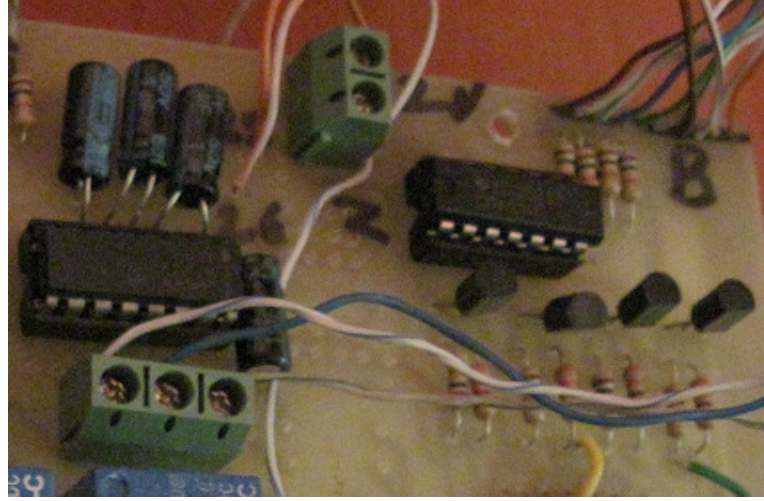
11.4.6 Haberleşme Arayüzü

Pc üzerinde koşan program ile kontrol kartı arasındaki veri alışverişini sağlayabilmek amacı ile RS-485 ve RS-232 arayüzü kullanılmıştır. Devre şeması Şekil 11.32’de verilmiştir ve uygulama devresi üzerinde her iki port da mevcuttur (Şekil 11.32).

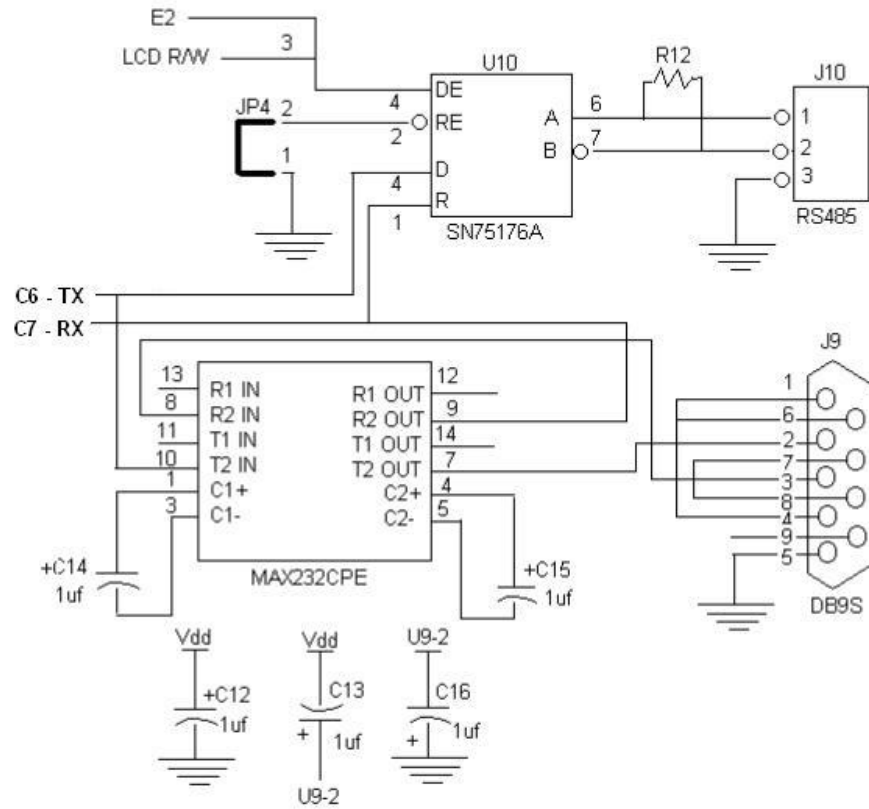
Burada RS-485 haberleşme arayüzü için MAX485 entegresi ve RS-232 haberleşme arayüzü için MAX232 entegresi kullanılmıştır.

Sistem ile haberleşme de RS-485 altyapısı tercih edilmesinin avantajları ise:

- Alıcı – verici arasındaki mesafe 1200 mt. ye kadar çıkabilmektedir. Bu mesafe özellikle 50 mt. üzeri yüksekliğe sahip türbinler için büyük bir avantajdır. Çünkü; sisteme ait trafo yerleşmesi ve ana dağıtım panosunun genellikle yerde, rüzgar hızını ve yönünü ölçen sistemler türbinin en yüksek noktasında bulunmaktadır. Bu dağınık sistemlerin tek bir kablo ile birleştirilmesi kolaylıkla yapılmaktadır.
- En fazla 32 adet kart birbiri ile haberleştirilme özelliğinden dolayı, dağınık sistemlerin kontrolü kolaylıkla yapılabilir.



Şekil 11. 31 Devre üzerindeki Max232 ve Max485 entegrelerinin yerleşimi



Şekil 11. 32 RS-232/RS-485 Haberleşme devresi.

Yazılım ve donanım arasındaki haberleşme ile veriler 15 byte'lık dizi oluşturmak suretiyle, uygun formatta PC'ye gönderilmekte ve PC üzerinde koşan program içerisinde parçalanmaktadır. Yine PC üzerinden 6 byte'lık veri uygun formatta gelmekte ve sistemin kumandası sağlanmaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yazılımsal ve donanımsal olarak hazırlanan bu sistemde, rüzgar türbinine ait enerji hareketleri, sistemin dinamik davranışı elde edilmiştir.

Sisteme ait ve yukarıda çeşitli konu başlıkları altında verilen matematiksel denklemler bilgisayar üzerinde çalışan yazılım içerisinde ve sistemin dinamik kontrolüne yönelik olan matematiksel ifadeler ise mikro denetleyici içerisinde çalışan yazılım vasıtası ile adım adım çözülmüştür.

Bu hiyerarşik yapı sayesinde sistemin ham maddesi olan rüzgar hızının girişte ölçülmesi ile birlikte oluşturulan MPPT algoritması vasıtasıyla türbinin kanat açısı rüzgar hızından optimum faydalanacak şekilde ayarlanmaktadır, bu sayede rotor hızı değiştirilmektedir ve en ideal $C_p(\lambda)$ değeri yakalanmaktadır.

Sistemin girişinden alınan mekaniksel moment ile sabit mıknatıslı senkron jeneratörün çıkış akımı istenilen yüke göre sürekli hesaplanmaktadır. Yük akımını maksimum tutabilmek için, türbin kanatlarının açısını ayarlamak sureti ile rüzgara doğru yönelim sağlanmaktadır.

Şu anada laboratuvar şartlarında hazırlanmış ve bazı parametreleri ihmal edilen bu sistemin, çalışan bir türbin sistemi üzerinde denenmesi, gerçek parametreler ile karşılaştırılması sağlanılabilir ve ardından devre üzerinde iyileştirmeler yapılarak daha güvenilir bir sistem yapılabilir.

Devrenin, sistemi kontrol etme özelliklerinin artırılması ile bir rüzgar türbin sistemin tamamen şebeke ile bağlantısı sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Yalçın, U., (2007), “Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi Kullanılarak Rüzgâr Enerjisi Santral Yer Seçimi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [2] Türkiye'nin rüzgar haritası, yıllara göre Türkiye'deki ve dünyadaki kurulu rüzgar gücünün değişimi. www.eie.gov.tr, 11 Temmuz 2010
- [3] Seul, K. K., ve Eung, S. K., (2005), “PSCAD/EMTDC-Based Modeling and Analysis of a Gearless Variable Speed Wind Turbine”.
- [4] Ramos, C.J., Martins, A.P., Araujo, A.S., ve Carvalho, A.S., (2002) “Current Control in the Grid Connection of the Double – Output Induction Generator Linked to a Variable Speed Wind Turbine”, IEEE, 0-7803-7474
- [5] Rüzgar türbin ve jeneratör çeşitleri, rüzgar türbin bileşenleri www.nrel.org, 23 Mayıs 2010
- [6] D’Souza, N. S., Lopes, L. A. C., ve Liu, X., (2005), “An Intelligent Maximum Power Point Tracker Using Peak Current Control”, 36th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conf.
- [7] Nayar, C. V., Islam, S. M., Dehbonei, H., Tan, K., ve Sharma, H., “Power Electronics for Renewable Energy Sources”.
- [8] Hansen, L. H., Helle, L., Blaabjerg, F., Ritchie, E., Nielsen, S. M., Bindner, H., Sørensen P., ve Jensen, B., (2001) “Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines”, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- [9] Carlsson, A., (1998), “The Back to Back Converter”.
- [10] Kazmierkowski, M. P., Krishnan, R., ve Blaabjerg, F., (2002), “Control in Power Electronics”, Academic Press ISBN 0-12-402772-5.
- [11] WPS4-1050 Project, “Vector control of PMSG for grid-connected wind turbine applications”, Group Master’s Thesis, Aalborg University, Denmark
- [12] Akira, N., Naoya, E., ve Yoske, N., “High Speed Large Capacity Inverter for Power System Apparatus”
- [13] Seyfullah, U., (2005), “Rüzgar Enerjisi ile Elektrik Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [14] Molina, M.G., ve Mercado, P.E., "An Efficient Control Strategy of Variable Speed Wind Turbine Generator for Three-Phase Grid Connected Applications", Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Conicet Instituto de Energía Eléctrica, IEE Universidad Nacional de San Juan – UNSJ Argentina
- [15] Anastassia, K., Tsvetan, M., ve Nikolay, H., "Power Electronic Devices for Wind Turbines", Department of Power Electronics, Technical University of Sofia, Sozopol, Bulgaria.
- [16] Blaabjerg, F., Teodorescu, R., Liserre, M., ve Timbus, A. V., (2006), "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 53: 1398–1409
- [17] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., ve Bossanyi, E., "Wind Energy Handbook".
Barakati, S.M., (2008), "Modeling and Controller Design of a Wind Energy Conversion System Including a Matrix Converter ", University of Waterloo.
- [18] Charles, L.K., Manoharan, T., ve Albrecht, W. (2001), "System Management of a Wind-Energy Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, 16: 3.
- [19] González, L. G., Figueres, E., Garcerá, G., ve Carranza, O., "Dynamic Response Analysis of Small Wind Energy Conversion Systems (WECS) Operating With Torque Control versus Speed Control".
- [20] Iov, F., Hansen, A.D., Sørensen, P., ve Blaabjerg, F., (2004), "Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink: General Overview and Description of the Models", Aalborg University, ISBN 87-89,179-46-3.
- [21] Mahdi, A.J., Tang, W.H., Jiang, L., ve Wu, Q.H., "A Comparative Study on Variable-Speed Operations of a Wind Generation System Using Vector Control", Department of Electrical Engineering and Electronics, The University of Liverpool, Liverpool, L69 3GJ, U.K.
- [22] Stephen, B., "Performance Analysis of Renewable Energy Sources", Doctor of Philosophy-Texas Tech University, United States.

**5 HAZİRAN 2009 TARİHİNDE SUNULAN “RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMLERİNİN
MATEMATİKSEL MODELLENMESİ” İSİMLİ BİLDİRİ.**

RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMİN MODELLENMESİ

Enver Şipar

Elektrik – Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü
Elektrik Makineleri ve Güç Elektroniği Ana Bilim Dalı
Yıldız Teknik Üniversitesi
e-posta: enversipar@yahoo.com & f5507004@yildiz.edu.tr

Giriş

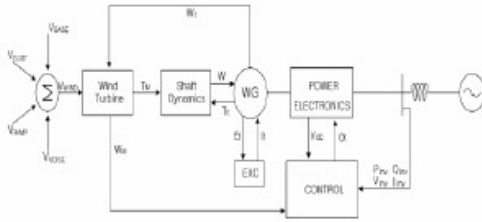
Bir sisteme etki eden tüm faktörlerin dikkate alınması ile ortaya çıkartılan matematiksel model vasıtasıyla o sistemin tüm davranışları, iyi bir simülasyon programı aracılığıyla, analiz edilebilir, bozucu etkenlerin etkisi daha iyi anlaşılabilir. Bu analizler neticesinde sistem hakkında öngörülen ve özellikle öngörülmeleyen birçok bilgiye ulaşılır, oluşabilecek problemler kestirilerek önceden önlem alınabilir.

Hazırlanan bu çalışmada rüzgâr türbinlerinin matematiksel modeli çıkartılmıştır.

Anahtar sözcükler: Matematiksel model, simülasyon, sistemin analizi.

Şebekeye bağlantısı yapılacak sistemin simülasyonunun yapılabilmesi için gereken değişkenler şekil-1 de görüldüğü gibi,

- Rüzgarın modellenmesi,
- Rüzgar türbininin modellenmesi,
- Generatörün modellenmesi,
- Shaft dinamiğinin modellenmesi,
- Kırıyıcı ve VSI inverter kontrolü ve modellenmesi,
- Güç sisteminin kontrolünü içerir.



Şekil - 1: Şebeke bağlantısı için bir sistemin simülasyon modeli

Şekil-1' de görülen sistemde dişli kutusu kullanılmamıştır ve back-to-back VSI güç elektroniği sürücü devresinden oluşur.

Rüzgârın Modellenmesi

Rüzgar hızının ortama ve zamana göre sürekli değişken bir yapıya sahip olması nedeniyle modellenmesi çok zordur. Bu zorluklara rağmen rüzgar hızını ortaya koyan çeşitli yaklaşımlar vardır. Bunlardan bir tanesinin temeli **süper pozisyon** teoremine dayanır. Yani sisteme etki eden tüm bileşenler ayrı ayrı hesaplanarak toplanır. Bir diğer yöntem ise Van Der Hoven ve Von Karman'ın geliştirmiş olduğu modeldir.

Süper pozisyon Teoremine Göre Rüzgar Hızının Hesaplanması

Rüzgar modelinin içerisine aşağıdaki bağıntıda görülen dört farklı bileşen katılabilir.

$$V_W = V_{BASE} + V_{GUST} + V_{RAMP} + V_{NOISE}$$

Burada:

V_{BASE} = temel bileşen [m/s];

V_{GUST} = rüzgâr hızının belirli bir süre içerisindeki en yüksek değeri [m/s];

V_{RAMP} = rampa fonksiyonu şeklinde tanımlanan rüzgâr bileşeni [m/s];

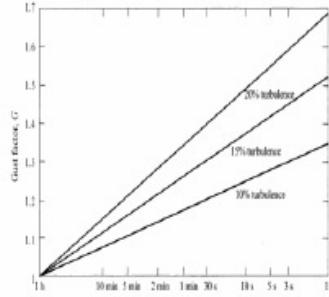
V_{NOISE} = sisteme etki eden dış etkenler (noise) [m/s];

V_{BASE}

Temel bileşendir ve rüzgârın sabit hızını ifade eder.

V_{GUST}

Belirli iki zaman aralığı içerisinde beklenen en yüksek rüzgar hızıdır. Bu bileşen genellikle bir saatlik dilim içerisinde belirlenir ve hava akımı şiddetinin (turbulence intensity) bir fonksiyonudur. Şekil -5'de gust faktörünün değişim eğrisi görülmektedir.



Şekil - 2: Gust faktörünün değişim eğrisi

t süresi içerisindeki Gust faktörü fonksiyonu:

$$G(t) = 1 + 0.42 I_u \ln \frac{3600}{t}$$

şeklinde. Burada I_u yer eksenine paralel olan hava akımı şiddetidir. Şekil -2'de çeşitli hava akımı şiddeti ve bu değerler ile zamana göre gust değişim eğrisi verilmiştir.

V_{RAMP}

Rampa fonksiyonu şeklindeki değişimdir. Bu değişime göre:

$$V_{RAMP} = \begin{cases} 0 & t < T_{1R} \\ V_{RAMP} & T_{1R} < t < T_{2R} \\ 0 & t > T_{2R} \end{cases}$$

ve

$$V_{RAMP} = [1 - (t - T_{2R}) / (T_{1R} - T_{2R})]$$

Şeklinde tanımlanmıştır. Burada;

T_{1R} = ramp fonksiyonunun başlangıç zamanı,
 T_{2R} = ramp fonksiyonunun en yüksek olduğu zamanı ifade eder.

V_{NOISE}

Bu ifade aşağıda Van Der Hoven metodunda anlatılmış olan yöntemin ikinci (toplamsal şekilde ifade edilen kısım) kısmıdır.

Van Der Hoven ve Von Karmen Modeli Rüzgar Hızının Hesaplanması

Bu modele göre rüzgar hızı sürekli değişkendir ve anlık değeri $V_w(t)$ belirli bir süre içerisindeki tüm değerlerin toplamına dayanır. Bu değer:

$$v_w(t) = V_{MW} + \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t + \Psi_i),$$

bağıntısı ile hesaplanır.

V_{MW} = Rüzgar hızının ortalama değeridir ve genellikle 10 dakika içerisindeki ortalama değerin ifadesidir.

$A_i = \omega_i$ ayrı frekanstaki dalgalanmanın genliğini ifade eder. Burada $i=[1, N]$ ve N rüzgar hızından alınan örnek sayısıdır.

Ψ_i değişken faz acısının ifadesidir ve $-\Pi, \Pi$ aralığında değişir.

A_i genlik ifadesi Spectral yoğunluğun $S(\omega)$ bir fonksiyonudur. Bu ifade ile türbülansın etkisi sisteme dahil edilir. $S(\omega)$ bağıntısı ise;

$$S(\omega) = \frac{0.475 \sigma^2 \frac{L}{V_{MW}}}{[1 + (\frac{\omega L}{V_{MW}})^2]^{\frac{5}{2}}}$$

şeklinde verilir. Burada L bozucu etki olan türbülansın uzunluğunun ifadesidir. L' nin belirlenme kriteri ise:

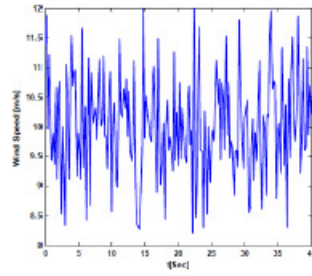
$$L = \begin{cases} 20h & \text{if } h \leq 30m \\ 600 & \text{if } h > 30m \end{cases}$$

şeklinde. h ifadesi ise rüzgar hızının ölçüm yapıldığı yüksekliktir. Sonuç olarak A_i ifadesi:

$$A_i(\omega_i) = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1}{2} [S(\omega_i) + S(\omega_{i+1})] (\omega_{i+1} - \omega_i)}$$

şeklinde hesaplanır.

Von Der Hoven metoduna göre rüzgar hızının değişimi Şekil -3'de verilmiştir.



Şekil - 3: Von Der Hoven metoduna göre rüzgar hızının anlık değişim grafiği

Türbinin Modellenmesi

Türbinden alınacak mekaniksel tork ve güç ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$\lambda = \frac{\omega_M R}{V_{WIND}}$$

$$P_M = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_P V_{WIND}^3$$

$$T_M = \frac{P_M}{\omega_M} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_P \frac{\omega_M^2}{\lambda^3}$$

mekaniksel torktan, rüzgar jeneratörünün giriş gücü elde edilir. Güç coefficient (C_P) katsayısı tip hız oranının ($\lambda=TSR$) bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi elde edilir. Buradaki β kat sayısı türbin gövdesinin acısını ifade eder.

$$C_P = (0.44 - 0.0167\beta) \sin \frac{\pi(\lambda - 2)}{13 - 0.3\beta} - 0.00184(\lambda - 2)\beta$$

Generatörün Modellenmesi

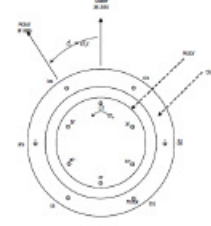
Şekil-4'de üç fazlı bir asenkron makinenin rotor ve statorun eşdeğer devresi verilmiştir. Stator sargılarındaki dengeli üç fazlı AC gerilim rotor üzerinde bir akım indüklenmesine neden olur. Stator akımı makinenin hava aralığında, senkron hızda sinüzoidal bir manyetik akı oluşturur. Makinenin hava aralığındaki senkron hızın ifadesi ise:

$$\omega_s = \frac{2}{p} \omega_p$$

şeklindedir. burada ω_s senkron hız (rad/san), ω_e statorun elektrik acısal frekansı (rad/san) ve p rotorun kutup sayısını ifade eder. Asenkron makinenin çalışma karakteristiğinden dolayı rotorun hızı senkron hızdan jeneratör çalışmada yüksektir ve bu iki hız farkından dolayı bir kayma meydana gelir. Bu kaymanın ifadesi ise:

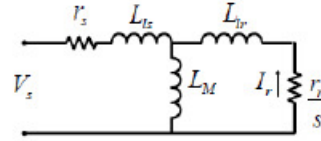
$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

şeklindedir. Burada s kaymayı, ω_r rotor frekansını ifade eder.



Şekil - 4: Asenkron makinenin tek faz eşdeğer devresi

Asenkron makinenin her bir fazı, kararlı hal şartlarında şekil -5'de görüldüğü gibi primere indirgenmiş bir transformör şeklinde tasarlanabilir.



Şekil - 5: Asenkron makinenin primere indirgenmiş transformör eş değer devresi.

Burada r_s stator direnci, L_{ls} stator endüktansı, L_M mıknatıslanma endüktansı, r_r statora indirgenmiş rotor direnci, L_{lr} statora indirgenmiş rotor endüktansını ifade eder. r_r/s değeri jeneratör çalışmada negatiftir.

Kararlı hal şartlarında şaftın elektromanyetik torku rotor akımına, direncine ve kaymaya bağlıdır ve bu ifade:

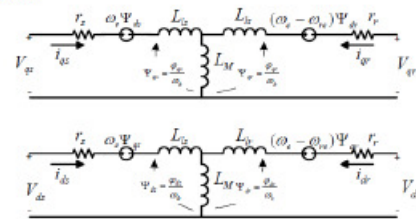
$$T_e = \frac{3}{\omega_s} I_r^2 \frac{r_r}{s}$$

şeklinde ifade edilir.

Generatorun çıkış gerilimi, makinenin hava aralığında oluşan mıknatıslanma ergisinin şekline çıkartılabilir ve bu şekil ayrıca makinenin kapasitif reaktif gücünü sağlamak için hatta bağlanmış olan kondansatör banklarına bağlıdır.

Asenkron Makinenin Dinamik Modeli

Akı girişim yöntemi asenkron makinenin dinamik modellemesinde en yaygın kullanılan yöntemdir. Asenkron makinenin qdo'ya bağlı dinamik eşdeğer devresi şekil -6'da verilmiştir.



Şekil - 6: Asenkron makinenin qdo eşdeğer devresi

Şekil -6'daki devreden akı girişimine bağlı olarak dört farklı diferansiyel denklem yazılır ve bu denklemlerin sonucunda,

$$i_{ds} = \frac{1}{x_{ls}} (\psi'_{ds} - \psi'_{md}) ,$$

$$i_{qr} = \frac{1}{x_{lr}} (\psi'_{qr} - \psi'_{mq}) ,$$

$$i_{dr} = \frac{1}{x_{lr}} (\psi'_{dr} - \psi'_{md}) ,$$

akım bağıntıları ile,

$$\psi'_{mq} = x_{ml} \left[\frac{\psi'_{qs}}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{qr}}{x_{lr}} \right]$$

$$\psi'_{md} = x_{ml} \left[\frac{\psi'_{ds}}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{dr}}{x_{lr}} \right]$$

akı bağıntıları elde edilir. Bu bağıntılardan asenkron makinenin elektro mekanik torku:

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) \frac{1}{\omega_b} (\psi_{ds} i_{qr} - \psi_{qs} i_{dr})$$

şeklinde yazılır.

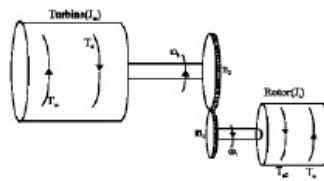
Denklemlerde kullanılan semboller ise:

$\Psi_{ds}, \Psi_{qs}, \Psi_{dr}, \Psi_{qr}$: stator ve rotora ait akı girişimlerini, r_s ve r_r : rotor ve stator dirençlerini, ω_e, ω_b : rotor ve taban elektriki acısal hızları, ω_e : rotor elektriki hızı, v_{qs}, v_{ds} : q ve d eksenli stator gerilimlerini, v_{qr}, v_{dr} : d ve q eksenli rotor gerilimini ve T_e, T_L : elektro mekanik ve yük torkunu ifade eder.

Shaft Dinamiğinin Modellenmesi

Türbin rotoru ile generatör birbirine şaft aracılığı ile dişli kutulu veya dişli kutusuz olarak bağlanırlar. Şekil - 4'de dişli kutusu kullanılan bir sistemin modelini göstermektedir.

Rüzgar türbini ile generatör aynı shaft üzerinde ise iki kütle arasında bir burulma osilasyonu meydana gelir. Türbin ile generatör arasında meydana gelen burulma karakteristiğini tespit edebilmek için shaft'ın dinamik davranışı bilinmelidir.



Şekil - 7: Shaft dinamiğinin modellenmesi.

T_m = Türbin torkunun ifadesidir ve rüzgar tarafından oluşturulur.

J_m = Türbinin atalet momenti.

T_{st} = Türbinden şafta aktarılan torkun ifadesidir.

ω_b = Türbinin açısal hızı

Rüzgârın oluşturduğu T_m torku ile şaft üzerinde ω_b acısal hızı ile bir döndürme momenti oluşturur.

$$T_m - T_{st} = J_m \frac{d\omega_b}{dt}$$

Şaftın generatör tarafında ise:

T_{s2} = Şafttan generatör tarafına aktarılan tork,

T_e = Generatör üzerinde oluşan tork ,

ω_r = Generatör rotorunun açısal hızı,

J_r = Generatör rotorunun açısal hızını ifade eder. Bu ifadelerle göre generatör tarafına aktarılan mekanik güç bağıntısı,

$$T_{s2} - T_e = J_r \frac{d\omega_r}{dt}$$

gibidir. Dişli kutusunun ideal, kayıplarının olmadığı ve şaftın her noktada aynı mukavemeti gösterdiği kabul edilirse

$$\frac{T_{s1}}{T_{s2}} = \frac{\omega_r}{\omega_b} = \frac{n_1}{n_2}$$

oranı elde edilir. Burada n_1/n_2 dişli kutusunun dönüştürme oranıdır. Yukarıdaki ifadeler uygun şekilde birleştirilir ve gereken sadeleştirmeler yapılırsa,

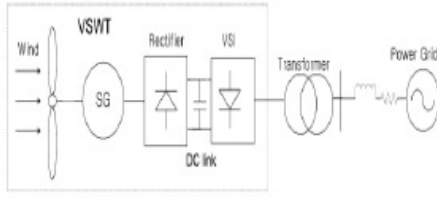
$$T_m \left[\frac{n_2}{n_1} \right] - T_e = \left[\frac{J_m \left[\frac{n_2}{n_1} \right]^2 + J_s}{J_{eq}} \right] \frac{d\omega_b}{dt}$$

bağıntısı elde edilir.

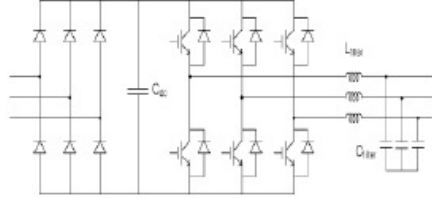
Sistemde eğer dişli kutusu kullanılmıyorsa n_1/n_2 dönüştürme oranı 1 alınır.

Kıyıcı ve VSI İnverter Kontrolü

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde, tasarlanan sistemin ihtiyacına göre birçok güç elektroniği devreleri kullanılabilir. Şekil -8'de referans alınan sistemde VSI inverter kullanılmıştır. VSI inverterde, generatör terminallerinde oluşan harmonikleri filtrelemek için LC harmonik filtre kullanılır. Şekil - 9'de kıyıcı ve VSI inverter modeli görülmektedir.



Şekil - 8: Şebeke bağlantısı yapılan sistemin blok şeması.



Şekil - 9: Kırıyıcı ve VSI inverter modeli.

Şekil - 10'de verilen modelde kırıyıcı, generatorun çıkışından alınan AC gerilimi kontrolsüz olarak DC gerilime dönüştürür. Akım kontrollü VSI inverter aktif ve reaktif gücün aktarımını sağlar ve çıkışta AC sinüzoidal bir dalga oluşturur.

Şekil - 11'de VSI inverterin matematiksel modeli verilmiştir. Asıl kontrolü yapan aktif target, aktif ve reaktif güç ayarını yapar, P_{ref} ve Q_{ref} gerçek aktif ve reaktif gücü takip eder. Aktif ve reaktif güç ayarı yapabilmek için öncelikle sistem için gerekli olan $I_{d,ref}$ ve $I_{q,ref}$ akımlarını hesaplamaktır. d - q eksenlerine ait bileşenler, a - b - c eksenlerine ait ifadelerin $T(\Phi)$ dönüşüm matrisi ile çarpımları sonucunda elde edilir. $T(\Phi)$ dönüşüm matrisi

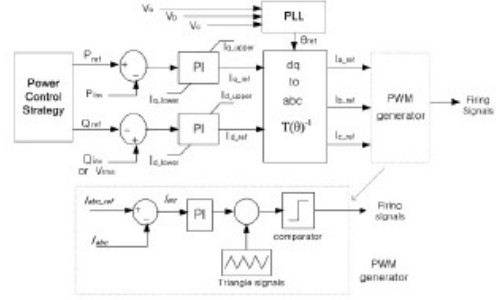
$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

şeklinde ifade edilir. d - q dönüşümü aşağıdaki dönüşüm matrisi kullanılarak yapılır.

$$[V_o, V_d, V_q]^T = T(\Phi) [V_a, V_b, V_c]^T$$

Dönüşüm matrisi içerisindeki semboller ise:

V_o, V_d, V_q : d - q eksenine ait değişkenler,
 V_a, V_b, V_c : a - b - c eksenine ait değişkenler,
 Φ : V_a bileşenine ait faz açısını ifade eder.



Şekil - 10: Akım kontrollü VSI inverterin matematiksel modeli.

Üç fazlı, dengeli sistemlerde anlık aktif ve reaktif (P, Q) değişimi:

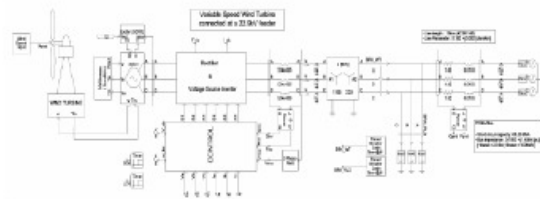
$$P = \frac{3}{2}(V_d I_d + V_q I_q), \quad Q = \frac{3}{2}(V_d I_q - V_q I_d).$$

bağıntıları ile hesaplanır. Buradaki V_q inverter terminallerindeki anlık gerilimdir ve V_d gerimi d - q dönüşümü sonucunda 0 olur. P ve Q ifadeleri tekrar düzenlenirse:

$$P = \frac{3}{2}|V_o|I_q, \quad Q = -\frac{3}{2}|V_o|I_d$$

elde edilir. P ve Q ifadesindeki $|V_o|$ inverterin anlık çıkış geriliminin büyüklüğüdür.

Şekil 10'da verilen blok şemada görüldüğü gibi P_{ref} ve P_{inv} , Q_{ref} ve Q_{inv} arasındaki hata PI kontrollerden geçirilmesi ile $I_{d,ref}$ ile $I_{d,ref}$ akım bilgileri elde edilir. d - q eksenindeki bu veriler a - b - c eksenine dönüştürülür. PLL (Phase Lock Loop) devresi sistem için gerekli olan Q_{ref} açısını oluşturur ve bu referans açısına göre $T(\Phi)^{-1}$ matrisi ile d - q eksenel dönüşümü yapılır. Sistem PWM tekniği ile kontrol edilir. PWM bloğu içerisinde $I_{abc,ref}$ referans akımı ile I_{abc} anlık akım değeri karşılaştırılması sonucunda I_{err} hata sinyali elde edilir. Bu hata sinyalleri ile IGBT'leri sürme sinyalleri oluşturulur. q eksenine ait üst ve alt akım ($I_{q,upper}$ ve $I_{q,lower}$) değerleri sistemi korumak için VSI'nin nominal akım değerinin 1.1 ile 1.5 katına set edilir.



Şekil - 11: Sistemin matematiksel modelin detaylı gösterimi.

Değişken Hız Kontrolü

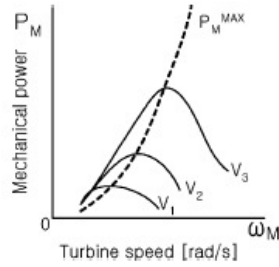
Sistemden alınacak P_M^{MAX} maksimum gücün ifadesi ve şekil-7 da ergisi verilmiştir. Bu ifadenin basitçe anlamı, maksimum güç rüzgar hızının değişim ergisi takip edilerek elde edilir. Sistemin çıkışından alınan asıl güç ise maksimum gücün verim ile çarpımından elde edilir.

$$P_M^{MAX} = \frac{1}{2} \pi \rho R^5 \frac{C_P^{MAX}}{\lambda_{OPT}^3} \omega_M^3$$

maksimum güç ifadesi.

$$P_{ref} = \eta P_M^{MAX},$$

sistemin çıkışından alınan asıl gücün ifadesi.



Şekil - 11: Türbin hızındaki değişim eğrisine göre gücün değişimi.

Sistem modellenmesinin yapılmasıyla elde edilen simülasyon ile rüzgar enerjisi temelli güç sisteminde meydana gelen transienler ve sistemin davranışı kestirilebilir, değişken hızlı sistemlerde, sistemin dinamik davranışı ve güç akışı analiz yapılabilir.

Kaynakça

System Management of a Wind-Energy Converter
Charles Lemogo Kana, Manoharan Thamodharan, and Albrecht Wolf
IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 16, NO. 3, MAY 2001

High Speed Large Capacity Inverter for Power System Apparatus
Akira Nakamori, Naoya Eguchi, Yoske Nakanishi, Member, IEEE

Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd.

Current Control in the Grid Connection of the Double – Output Induction Generator Linked to a Variable Speed Wind Turbine

C.J.Ramos, A.P.Martins, A.S. Araujo, A.S.Carvalho
0-7803-7474-6/02/ 2002 IEEE

Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines

L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. M. Nielsen, H. Bindner, P. Sørensen and B.Jensen.
Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark December 2001

DA/AA Dönüştürücü

Onur Ortaç, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi.

PSCAD/EMTDC-Based Modeling and Analysis of a Gearless Variable Speed Wind Turbine

Seul-Ki Kim and Eung-Sang Kim
0885-8969 © 2005 IEEE

POWER ELECTRONIC DEVICES FOR WIND TURBINES

Krusteva Anastassia, Marinov Tsvetan, Hinov Nikolay
Department of Power Electronics, Technical University of Sofia, – 22 September, Sozopol, BULGARIA

RÜZGAR ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

Seyfullah UGUZ, YÜKSEK LİSANS TEZİ, GAZİ ÜNİVERSİTESİ, EKİM 2005

WIND ENERGY HANDBOOK

T.Burton, D.Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi

Modeling and Controller Design of a Wind Energy Conversion System Including a Matrix Converter

S. Masoud Barakati, A thesis presented to the University of Waterloo-2008

PC ÜZERİNDE ÇALIŞAN YAZILIMIN KODLARI

VC# 1. SAYFAYA AİT KODLAR

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;
using System.IO.Ports;
using System.Threading;
using DevExpress.XtraCharts;
using System.Globalization;

namespace Yildiz_Teknik
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        delegate void MyCrossThreadDelegate(List<int> Veriler);
        delegate void __RS232GelenVeri(List<int> Veriler);
        event __RS232GelenVeri __ERS232GelenVeri;
        public int RuzgarHizi { get; set; }
        public int RotorHizi { get; set; }
        public bool SistemDurumu { get; set; }
        public bool KanatDurumu { get; set; }
        public bool _alarm { get; set; }
        public bool _fren { get; set; }
        public int Ia { get; set; }
        public int Ib { get; set; }
        public int Ic { get; set; }
        public int Va { get; set; }
        public int Vb { get; set; }
        public int Vc { get; set; }
        public int Adres { get; set; }
        public static List<int> __Gerilim = new List<int>();
        public static List<DateTime> __GerilimTZaman = new List<DateTime>();

        public bool PortKapat { get; set; }
        double aci=0,beta = 0;
```



```

public int __Sayac { get; set; }

public Form1()
{
    InitializeComponent();

    CheckForIllegalCrossThreadCalls = false;
}

SerialPort __Seriport;

public List<int> __Veriler { get; set; }
public int Grafik1Indeks1 { get; set; }
public int Grafik1Indeks2 { get; set; }
public int Grafik1Indeks3 { get; set; }

Series SeriesV1 { get { return this.chartControl1.Series.Count > 0 ? this.chartControl1.Series[0] : null;
}}
Series SeriesV2 { get { return this.chartControl1.Series.Count > 1 ? this.chartControl1.Series[1] : null;
}}
Series SeriesV3 { get { return this.chartControl1.Series.Count > 1 ? this.chartControl1.Series[2] : null;
}}

Series SeriesI1 { get { return this.chartControl2.Series.Count > 0 ? this.chartControl2.Series[0] : null;
}}
Series SeriesI2 { get { return this.chartControl2.Series.Count > 1 ? this.chartControl2.Series[1] : null;
}}
Series SeriesI3 { get { return this.chartControl2.Series.Count > 1 ? this.chartControl2.Series[2] : null;
}}

Series SeriesR1 { get { return this.chartControl3.Series.Count > 0 ? this.chartControl3.Series[0] : null;
}}
Series SeriesR2 { get { return this.chartControl3.Series.Count > 0 ? this.chartControl3.Series[1] : null;
}}

RegressionLine RegressionV1 { get { return GetRegressionLine(SeriesV1); } }
RegressionLine RegressionV2 { get { return GetRegressionLine(SeriesV2); } }
RegressionLine RegressionV3 { get { return GetRegressionLine(SeriesV3); } }

RegressionLine RegressionI1 { get { return GetRegressionLine(SeriesI1); } }
RegressionLine RegressionI2 { get { return GetRegressionLine(SeriesI2); } }
RegressionLine RegressionI3 { get { return GetRegressionLine(SeriesI3); } }

RegressionLine RegressionR1 { get { return GetRegressionLine(SeriesI1); } }
RegressionLine RegressionR2 { get { return GetRegressionLine(SeriesI1); } }

static RegressionLine GetRegressionLine(Series series)
{
    if (series != null)
    {
        SwiftPlotSeriesView swiftPlotView = series.View as SwiftPlotSeriesView;
        if (swiftPlotView != null)
            return swiftPlotView.RegressionLines[ValueLevel.Value];
    }
    return null;
}

```

```

private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
{
    System.Diagnostics.Process[] uygulama_kontrol =
System.Diagnostics.Process.GetProcessesByName("Yıldız Teknik");
    if (uygulama_kontrol.Length > 1)
    {

        MessageBox.Show("Masaüstünde Çalışan Bir Program Var", "Yıldız Teknik",
MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Warning);
        Application.Exit();
    }
    this.toolStripComboBox1.Items.AddRange(SerialPort.GetPortNames());
    this.toolStripComboBox1.SelectedIndex = 0;
    __ERS232GelenVeri += new __RS232GelenVeri(Form1__ERS232GelenVeri);
}

void Form1__ERS232GelenVeri(List<int> Veriler)
{
    if (Veriler[0] == 15)
    {

        VeriAnalizi(Veriler);

        Grafik3();
        Application.DoEvents();
    }
}

public void __MSeriPortAnaDongu(object Comport)
{
    __Seriport = new SerialPort((string)Comport, 9600, Parity.None, 8, StopBits.One);
    try
    {
        if (!__Seriport.IsOpen)//port kontrol ediliyor
        {
            __Seriport.Open();

        }
        else
        {
            return;
        }
    }
    catch
    {
        return;
    }

    List<int> __GelenVeriler = new List<int>();
    __Seriport.ReadTimeout = 5;
    while (true)
    {

```

```

Application.DoEvents();
if (PortKapat)
{
    __Seriport.Close();
    break;
}
try
{
    __GelenVeriler.Add(__Seriport.ReadByte());
    if (__GelenVeriler.Count >= 15)
    {
        if (!__ERS232GelenVeri.Equals(null))
        {
            __ERS232GelenVeri(__GelenVeriler);

        }
        __GelenVeriler.Clear();
        Application.DoEvents();
    }
    else if (__GelenVeriler[0] != 15)
    {
        __GelenVeriler.Clear();
    }
}
catch
{
}

Application.DoEvents();
}

}

private void VeriAnalizi(List<int> __GelenVeriler)
{
    ProgramDegiskenleri.__Veriler.Clear();
    ProgramDegiskenleri.__Veriler.AddRange(__GelenVeriler);
    RuzgarHizi = (__GelenVeriler[1])/10;
    RotorHizi = __GelenVeriler[2]/10;
    SistemDurumu = Convert.ToBoolean(__GelenVeriler[3]);
    KanatDurumu = Convert.ToBoolean(__GelenVeriler[4]);
    _alarm = Convert.ToBoolean(__GelenVeriler[5]);
    _fren = Convert.ToBoolean(__GelenVeriler[6]);

    this.digitalGauge1.Text = Va.ToString();
    this.digitalGauge2.Text = Vb.ToString();
    this.digitalGauge3.Text = Vc.ToString();

    this.digitalGauge4.Text = Ia.ToString();
    this.digitalGauge5.Text = Ib.ToString();
    this.digitalGauge6.Text = Ic.ToString();
}

```

```

this.digitalGauge7.Text = RuzgarHizi.ToString();
this.digitalGauge8.Text = RotorHizi.ToString();
//this.digitalGauge9.Text = _alarm.ToString();
this.stateIndicatorComponent1.SetStateByName("Sistem Durumu");
if (SistemDurumu)
{
    this.stateIndicatorComponent1.StateIndex = 3;
}
else
{
    this.stateIndicatorComponent1.StateIndex = 1;
}

if (KanatDurumu)
{
    this.stateIndicatorComponent2.StateIndex = 3;
}
else
{
    this.stateIndicatorComponent2.StateIndex = 1;
}

if (_fren)
{
    this.stateIndicatorComponent4.StateIndex = 3;
}
else
{
    this.stateIndicatorComponent4.StateIndex = 1;
}
if (_alarm)
{
    this.stateIndicatorComponent5.StateIndex = 3;
}
else
{
    this.stateIndicatorComponent5.StateIndex = 1;
}
}

private void Form1_FormClosing(object sender, FormClosingEventArgs e)
{
    PortKapat = true;
    try
    {
        if (__Seriport.IsOpen)
        {
            __Seriport.Close();
        }
    }
    catch
    {
    }
}

```



```

    }

    private void toolStripMenuItem1_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        if (this.toolStripComboBox1.Text.Equals(String.Empty))
        {
            MessageBox.Show("Port Seçiniz!!!", "Port Kontrol", MessageBoxButtons.OK,
                MessageBoxIcon.Warning);
            return;
        }
        else
        {
            PortKapat = false;
            __MSeriPortAnaDongu(this.toolStripComboBox1.Text);
        }
    }

    private void toolStripMenuItem2_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        PortKapat = true;
    }

    private void Grafik1()
    {
        this.Text = "Va=" + Va.ToString() + "Vb=" + Vb.ToString() + "Vc=" + Vc.ToString();
        if (SeriesV1 == null || SeriesV2 == null || SeriesV3 == null)
            return;

        //(DateTime.Now.Year,DateTime.Now.Month,DateTime.Now.Date,DateTime.Now.Hour,DateTime.Now.
        Minute,DateTime.Now.Second,DateTime.Now.Millisecond);

        SeriesV1.Points.Add(new SeriesPoint(__Sayac,Va));
        SeriesV2.Points.Add(new SeriesPoint(__Sayac,Vb));
        SeriesV3.Points.Add(new SeriesPoint(__Sayac,Vc));
        Grafik1Indeks1++;
        if (Grafik1Indeks1 > 500)
        {
            SeriesV1.Points.Clear();
            SeriesV2.Points.Clear();
            SeriesV3.Points.Clear();
            this.chartControl1.ClearCache();
            Grafik1Indeks1 = 0;
        }
    }

    private void Grafik2()
    {
        if (SeriesI1 == null || SeriesI2 == null || SeriesI3 == null)
            return;

        //(DateTime.Now.Year,DateTime.Now.Month,DateTime.Now.Date,DateTime.Now.Hour,DateTime.Now.
        Minute,DateTime.Now.Second,DateTime.Now.Millisecond);

        SeriesI1.Points.Add(new SeriesPoint(__Sayac, Ia));

```

```

SeriesI2.Points.Add(new SeriesPoint(__Sayac, Ib));
SeriesI3.Points.Add(new SeriesPoint(__Sayac, Ic));
Grafik1Indeks2++;
if (Grafik1Indeks2 > 500)
{
    SeriesI1.Points.Clear();
    SeriesI2.Points.Clear();
    SeriesI3.Points.Clear();
    this.chartControl2.ClearCache();
    Grafik1Indeks2 = 0;
}
}
private void Grafik3()
{
    if (SeriesR1 == null)
        return;

//(DateTime.Now.Year,DateTime.Now.Month,DateTime.Now.Date,DateTime.Now.Hour,DateTime.Now.
Minute,DateTime.Now.Second,DateTime.Now.Millisecond);
SeriesR1.Points.Add(new SeriesPoint(DateTime.Now.Ticks, RuzgarHizi));
SeriesR2.Points.Add(new SeriesPoint(DateTime.Now.Ticks, RotorHizi));
Grafik1Indeks3++;
if (Grafik1Indeks3 > 500)
{
    SeriesR1.Points.Clear();
    SeriesR2.Points.Clear();

    this.chartControl3.ClearCache();
    Grafik1Indeks3 = 0;
}
}
private void raporlamalarToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
{
    Form2 f = new Form2();
    f.__EventMotoValistir += new MotorCalistir(f__EventMotoValistir);
    f.Show();
}

void f__EventMotoValistir(byte[] Veri)
{
    __Seriport.Write(Veri, 0, Veri.Length);
}

private void timer1_Tick(object sender, EventArgs e)
{
    Threadmetot();
}

private void Threadmetot()
{
    if (this.numericUpDown1.Value != 0)
        this.timer1.Interval = (int)this.numericUpDown1.Value;

    aci = aci + 1;
    if (aci >= 360)

```

```

{
    aci = 0;
}
beta = 3.14 * (aci / 180);
Ia = Convert.ToInt16(100 * (Math.Sin(beta)));
Ib = Convert.ToInt16(100 * (Math.Sin(beta - 2.088)));
Ic = Convert.ToInt16(100 * (Math.Sin(beta + 2.088)));

Va = Convert.ToInt16(380 * (Math.Sin(beta)));
Vb = Convert.ToInt16(380 * (Math.Sin(beta - 2.088)));
Vc = Convert.ToInt16(380 * (Math.Sin(beta + 2.088)));

Grafik1();
Grafik2();
__Sayac++;
}
}
}

```

VC# 2. SAYFAYA AİT KODLAR

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;
using DevExpress.XtraCharts;

namespace Yildiz_Teknik
{
    public delegate void MotorCalistir(byte[] Veri);
    public enum MotorDurumu
    {
        Start = 0,
        Stop = 1
    }

    public partial class Form2 : Form
    {
        public MotorDurumu __MotorDurumu { get; set; }
        public event MotorCalistir __EventMotoValistir;
        public int _RuzgarHizi { get; set; }
        public int _RotorHizi { get; set; }
        public bool _SistemDurumu { get; set; }
        public bool _KanatDurumu { get; set; }
        public bool __alarm { get; set; }
        public bool __fren { get; set; }
        public int _Ia { get; set; }
        public int _Ib { get; set; }
        public int _Ic { get; set; }
        public int _Va { get; set; }
        public int _Vb { get; set; }
        public int _Vc { get; set; }
        public int _Adres { get; set; }
        decimal[] SUM = new decimal[100];
        Byte[] hex_format = new Byte[8]; Byte[] matris = new Byte[5];
        double _aci = 0, _beta = 0;
        String[] s1 = new string[10];
        double[] cp_old = new double[100];
        string[] s2 = new string[10];
        string[] s3 = new string[10];
        double[] l = new double[4];
        double[,] A = new double[4, 4];
        double[] vg = new double[4];
        double[,] z = new double[4, 4];
        double[] m_mat = new double[4];
        double[,] a1 = new double[4, 4];
        double[,] b1 = new double[4, 4];
        double[,] c1 = new double[4, 4];
        double[] Zl = new double[4];
        double[] V_Zl = new double[4];
        double[,] AV_Zl = new double[4, 4];
        decimal sur_katsayisi = Convert.ToDecimal(.2);
    }
}
```

```

double k_uz, h_yog, k_yuk, m_guc, r_hz, cp, d_say, t_aci, KOH, a_hiz;
double max_guc, mek_guc, d_verim, g_guc, vr_min, lamda_new, lamda_old, lamda_i;
double ld, lq, p, at_m, vsa_c, vsb_c, vsc_c, vsa_s, vsb_s, vsc_s, vsq, vsd;
double id_old = 0, iq_old = 0, id_new, iq_new, lamda_pm, r_s, D, w_e, w_m, P_el, T_l, lamda_d,
lamda_q, mek_tork;

public Form2()
{
    InitializeComponent();
}

public List<int> __Veriler { get; set; }
public int Grafik1Indeks1 { get; set; }
public int Grafik1Indeks2 { get; set; }

Series SeriesV1 { get { return this.chartControl3.Series.Count > 0 ? this.chartControl3.Series[0] : null;
}}
Series SeriesV2 { get { return this.chartControl3.Series.Count > 0 ? this.chartControl3.Series[1] : null;
}}
Series SeriesV3 { get { return this.chartControl3.Series.Count > 0 ? this.chartControl3.Series[2] : null;
}}
Series SeriesV4 { get { return this.chartControl3.Series.Count > 0 ? this.chartControl3.Series[3] : null;
}}

RegressionLine RegressionV1 { get { return GetRegressionLine(SeriesV1); } }
RegressionLine RegressionV2 { get { return GetRegressionLine(SeriesV2); } }
RegressionLine RegressionV3 { get { return GetRegressionLine(SeriesV3); } }
RegressionLine RegressionV4 { get { return GetRegressionLine(SeriesV4); } }

Series SeriesV11 { get { return this.chartControl1.Series.Count > 0 ? this.chartControl1.Series[0] :
null; } }
Series SeriesV12 { get { return this.chartControl1.Series.Count > 0 ? this.chartControl1.Series[1] :
null; } }
Series SeriesV13 { get { return this.chartControl1.Series.Count > 0 ? this.chartControl1.Series[2] :
null; } }
Series SeriesV14 { get { return this.chartControl1.Series.Count > 0 ? this.chartControl1.Series[3] :
null; } }

RegressionLine RegressionV11 { get { return GetRegressionLine(SeriesV11); } }
RegressionLine RegressionV12 { get { return GetRegressionLine(SeriesV12); } }
RegressionLine RegressionV13 { get { return GetRegressionLine(SeriesV13); } }
RegressionLine RegressionV14 { get { return GetRegressionLine(SeriesV14); } }

static RegressionLine GetRegressionLine(Series series)
{
    if (series != null)
    {
        SwiftPlotSeriesView swiftPlotView = series.View as SwiftPlotSeriesView;
        if (swiftPlotView != null)
            return swiftPlotView.RegressionLines[ValueLevel.Value];
    }
    return null;
}

private void timer1_Tick(object sender, EventArgs e)
{
    try

```

```

{
    _RuzgarHizi = ProgramDegiskenleri.__Veriler[1];
    _RotorHizi = ProgramDegiskenleri.__Veriler[2];
    _SistemDurumu = Convert.ToBoolean(ProgramDegiskenleri.__Veriler[3]);
    _KanatDurumu = Convert.ToBoolean(ProgramDegiskenleri.__Veriler[4]);
    __alarm = Convert.ToBoolean(ProgramDegiskenleri.__Veriler[5]);
    __fren = Convert.ToBoolean(ProgramDegiskenleri.__Veriler[6]);
}
catch
{
    return;
}

_aci = _aci + 1;
if (_aci >= 360)
{
    _aci = 0;
}

_beta = Math.PI * (_aci / 180);

_la = Convert.ToInt16(100 * (Math.Sin(_beta)));
_lb = Convert.ToInt16(100 * (Math.Sin(_beta - 2.094)));
_lc = Convert.ToInt16(100 * (Math.Sin(_beta + 2.094)));

_Va = Convert.ToInt16(380 * (Math.Sin(_beta)));
_Vb = Convert.ToInt16(380 * (Math.Sin(_beta - 2.094)));
_Vc = Convert.ToInt16(380 * (Math.Sin(_beta + 2.0948)));

vsa_c = 380 * (Math.Cos(_beta)); //OLCULEN FAZ GERILIM DEGERLERI
vsb_c = 380 * (Math.Cos(_beta - 2.094));
vsc_c = 380 * (Math.Cos(_beta + 2.094));

vsa_s = 380 * (Math.Sin(_beta)); //OLCULEN FAZ GERILIM DEGERLERI
vsb_s = 380 * (Math.Sin(_beta - 2.094));
vsc_s = 380 * (Math.Sin(_beta + 2.094));

vds = (253 * (((Math.Sin(_beta)) * (Math.Cos(_beta))) + ((Math.Sin(_beta - 2.094)) * (Math.Cos(_beta - 2.094))) + ((Math.Sin(_beta + 2.094)) * (Math.Cos(_beta + 2.094))))); //D GERILIMI
vsq = (253 * (((Math.Sin(_beta)) * (Math.Sin(_beta))) + (Math.Sin(_beta - 2.094)) * (Math.Sin(_beta - 2.094)) + (Math.Sin(_beta + 2.094)) * (Math.Sin(_beta + 2.094)))); //Q GERILIMI

this.Text = _la.ToString();
Hesapla();
Grafik1();
Grafik2();
}

private void Form2_Load(object sender, EventArgs e)
{
    textBox1.Text = Convert.ToString(4);
    __MotorDurumu = MotorDurumu.Stop;
    try
    {
        _RuzgarHizi = ProgramDegiskenleri.__Veriler[1];
    }
}

```

```

    _RotorHizi = ProgramDegiskenleri.__Veriler[2];
    _SistemDurumu = Convert.ToBoolean(ProgramDegiskenleri.__Veriler[3]);
    _KanatDurumu = Convert.ToBoolean(ProgramDegiskenleri.__Veriler[4]);
    __alarm = Convert.ToBoolean( ProgramDegiskenleri.__Veriler[5]);
    __fren = Convert.ToBoolean(ProgramDegiskenleri.__Veriler[6]);
}
catch
{

    return;
}

r_hz = ((double)_RuzgarHizi / 10);
label46.Text = "RUZ. HIZI: " + Convert.ToString(r_hz) + " m/sn.";
d_say = (double)(_RotorHizi * Convert.ToInt16(textBox1.Text));
label47.Text = "ROT.HIZI: " + Convert.ToString(d_say) + " dev/dk.";
Hesapla();
}

private void Hesapla()
{
    if (textBox1.Text == "")//lamda_pm miknatıslanma akısı
    {
        textBox1.Text = Convert.ToString(4);
    }
    r_hz = ((double)_RuzgarHizi / 10);
    d_say = (double)(_RotorHizi * Convert.ToInt16(textBox1.Text));
    label47.Text = "ROT.HIZI: " + Convert.ToString(d_say) + " dev/dk.";
    label46.Text = "RUZ. HIZI: " + Convert.ToString(r_hz) + " m/sn.";
    if (textBox11.Text == "")//lamda_pm miknatıslanma akısı
    {
        textBox11.Text = Convert.ToString(0.128);
    }
    if (textBox12.Text == "")//Ld
    {
        textBox12.Text = Convert.ToString(0.002);
    }
    if (textBox13.Text == "")//Lq
    {
        textBox13.Text = Convert.ToString(0.002);
    }
    if (textBox14.Text == "")//D=turev operatoru ve carpanı
    {
        textBox14.Text = Convert.ToString(750);
    }
    if (textBox16.Text == "")//j atalet momenti
    {
        textBox16.Text = Convert.ToString(0.48);
    }
    if (textBox17.Text == "")//kutup sayisi
    {
        textBox17.Text = Convert.ToString(8);
    }
    if (textBox22.Text == "")//Rs
    {
        textBox22.Text = Convert.ToString(0.18);
    }
}

```

```

}
lamda_pm = Convert.ToDouble(textBox11.Text); //lamda_pm değişkeni ataması
D = Convert.ToDouble(textBox14.Text);
ld = Convert.ToDouble(textBox12.Text); //Ld
lq = Convert.ToDouble(textBox13.Text); //Lq
r_s = Convert.ToDouble(textBox22.Text); //Rs
p = Convert.ToDouble(textBox17.Text); //cift kutup sayısı ataması
at_m = Convert.ToDouble(textBox16.Text); //atalet momentinin ataması

w_m = (0.147*d_say);//*****
w_e = (w_m * p / 2);

label63.Text = "Wm: " + Convert.ToString(w_m);
label64.Text = "We: " + Convert.ToString(w_e);

id_new = ((vsd - (r_s * id_old) + (w_e * lq * iq_old)) / (ld * D));
iq_new = ((vsq - (r_s * iq_old) - (w_e * (ld * id_old - lamda_pm))) / (lq * D));

id_old = id_new;
iq_old = iq_new;

lamda_d = (ld * id_new + lamda_pm);
lamda_q = (lq * iq_new);

P_el = (1.5 * w_e * (lamda_d * iq_new - lamda_q * id_new));//pmsg un elektriksel çıkış gücü
label7.Text = "Pe: " + Convert.ToString(Math.Round( P_el));
T_l = (0.75 * p * lamda_pm * iq_new);//pmsg un moment ifadesi
// T_l=(P_el/w_m);
label12.Text = "Tl: " + Convert.ToString(Math.Round( T_l));

label65.Text = "Vd: " + Convert.ToString(vsd);
label66.Text = "Vq: " + Convert.ToString(vsq);
label100.Text = "Id_new: " + Convert.ToString(id_new);
label101.Text = "Iq_new: " + Convert.ToString(iq_new);

label93.Text = "Va: " + Convert.ToString(_Va);
label94.Text = "Vb: " + Convert.ToString(_Vb);
label95.Text = "Vc: " + Convert.ToString(_Vc);
label96.Text = "Ia: " + Convert.ToString(_Ia);
label97.Text = "Ib: " + Convert.ToString(_Ib);
label98.Text = "Ic: " + Convert.ToString(_Ic);

if (textBox4.Text == "") //KANAC CAPI VERISI ALINIYOR
{
    textBox4.Text = Convert.ToString(5);
}
else
{
    k_uz = (Convert.ToDouble(textBox4.Text) / 2);//kanat yarıcağı
}

if (textBox6.Text == "")//HAVA YOGUNLUGU VERISI ALINIYOR
{
    textBox6.Text = Convert.ToString(1.225);
}

```



```

else
{
    h_yog = Convert.ToDouble(textBox6.Text);

}
if (textBox7.Text == "")//KULE YUKSEKLIGI
{
    textBox7.Text = Convert.ToString(150);
}
else
{
    k_yuk = Convert.ToDouble(textBox7.Text);

}

if (textBox10.Text == "")//KULE YUKSEKLIGI
{
    textBox10.Text = Convert.ToString(45);
}
else
{
    t_aci = Convert.ToDouble(textBox10.Text);

}
if (textBox9.Text == "")//disli verimi
{
    textBox9.Text = Convert.ToString(.9);
}
else
{
    d_verim = Convert.ToDouble(textBox9.Text);

}

if (_SistemDurumu)
{
    labelControl4.Text = "S. CALISIYOR";
    this.stateIndicatorComponent1.StateIndex = 3;
}
else
{
    labelControl4.Text = "S. DURUYOR";
    this.stateIndicatorComponent1.StateIndex = 1;
}

if (_KanatDurumu)
{
    labelControl5.Text = "KANAT HAR.";
    this.stateIndicatorComponent2.StateIndex = 3;
}
else
{
    labelControl5.Text = "KANAT DUR.";
    this.stateIndicatorComponent2.StateIndex = 1;
}
if (__fren)
{

```

```

        labelControl6.Text = "FREN ON";
        this.stateIndicatorComponent4.StateIndex = 3;
    }
    else
    {
        labelControl6.Text = "FREN OFF";
        this.stateIndicatorComponent4.StateIndex = 1;
    }
    if (__alarm)
    {
        labelControl2.Text = "ALARM ON";
        this.stateIndicatorComponent6.StateIndex = 3;
    }
    else
    {
        labelControl2.Text = "ALARM OFF";
        this.stateIndicatorComponent6.StateIndex = 1;
    }
}

lamda_old = KOH;
KOH = ((Math.PI * k_uz * d_say) / (30 * r_hz));
label16.Text = "KOH: " + Convert.ToString(KOH);
lamda_new = KOH;

a_hiz = (Math.PI * d_say / 30);
cp = (0.44 * Math.Sin(Math.PI * (KOH - 2) / 13));
label1.Text = "Cp: " + Convert.ToString(cp);

kontrol();

mek_guc = 1.57 * h_yog * Math.Pow((k_uz), 2) * Math.Pow(r_hz, 3); // rotordan alınan güc;
label48.Text = "MEK.GUC: " + Convert.ToString(Math.Round(mek_guc)) + " Watt";

m_guc = 1.57 * h_yog * Math.Pow((k_uz), 2) * Math.Pow(r_hz, 3) * cp; // aktarılan faydalı güc;

max_guc = h_yog * Math.Pow((k_uz), 2) * Math.Pow(r_hz, 3) * 0.92; // *cp=0,59 iken;
label14.Text = "MAX.GUC: " + Convert.ToString(Math.Round(max_guc)) + " Watt";

g_guc = m_guc * d_verim;

//label10.Text = "hes.tork: " + Convert.ToString(h_yog * Math.PI * cp * Math.Pow(k_uz, 3) *
Math.Pow(r_hz, 2) / 2 / KOH);
mek_tork = Math.Round(m_guc / a_hiz);
label15.Text = "MEK.TORK: " + Convert.ToString(mek_tork) + " Nt";
label13.Text = "AKTR.GUC: " + Convert.ToString(Math.Round(m_guc)) + " Watt ";
label45.Text = "MAX.TORK: " + Convert.ToString(Math.Round(max_guc / a_hiz)) + " Nt";
label46.Text = "RUZ. HIZI: " + Convert.ToString(_RuzgarHizi / 10) + " m/sn.";
}
private void kontrol()
{
    lamda_i = 8.4;
    vr_min = d_say * k_uz / 143.3;

    label5.Text = "vrmin: " + Convert.ToString(vr_min);
    if (r_hz >= (vr_min))

```

```

{
    label2.Text = "cp ok " + Convert.ToString(vr_min);

    if ((Math.Abs(lamda_i - KOH)) > 1)
    {
        label4.Text = "motor start";
        // if (__MotorDurumu == MotorDurumu.Stop)
        //{
            // byte[] MotorCalisstir = { 1, 1, 1, 1, 1 };

            //if (__EventMotoValistir != null)
            // __EventMotoValistir(MotorCalisstir);

            //__MotorDurumu = MotorDurumu.Start;
        //}
    }
    if ((Math.Abs(lamda_i - KOH)) <= 1)
    {
        label4.Text = "motor stop";
        // if (__MotorDurumu == MotorDurumu.Start)
        //{
            // byte[] MotorStopp = { 0, 0, 0, 0, 0 };
            // if (__EventMotoValistir != null)
            //     __EventMotoValistir(MotorStopp);

            // __MotorDurumu = MotorDurumu.Stop;
        //}
    }
}
else
{
    label2.Text = "cp nok " + Convert.ToString(vr_min);
}
}

private void trackBarControl1_EditValueChanged(object sender, EventArgs e)
{
}

private void trackBarControl1_EditValueChanged_1(object sender, EventArgs e)
{
    this.labelControl1.Text = "Veri Yenileme Süresi:" + (this.trackBarControl1.Value * 1).ToString() + "
ms";
    this.timer1.Interval = this.trackBarControl1.Value * 1;
}

private void Grafik1()
{
    if (SeriesV1 == null || SeriesV2 == null || SeriesV3 == null)
        return;

    //(DateTime.Now.Year,DateTime.Now.Month,DateTime.Now.Date,DateTime.Now.Hour,DateTime.Now.
Minute,DateTime.Now.Second,DateTime.Now.Millisecond);

```

```

SeriesV1.Points.Add(new SeriesPoint(DateTime.Now.Ticks, iq_new));
SeriesV2.Points.Add(new SeriesPoint(DateTime.Now.Ticks, id_new));
SeriesV3.Points.Add(new SeriesPoint(DateTime.Now.Ticks, vsq));
SeriesV4.Points.Add(new SeriesPoint(DateTime.Now.Ticks, vsd));
Grafik1Indeks1++;
if (Grafik1Indeks1 > 1000)
{

    SeriesV1.Points.Clear();
    SeriesV2.Points.Clear();
    SeriesV3.Points.Clear();
    SeriesV4.Points.Clear();
    this.chartControl3.ClearCache();
    Grafik1Indeks1 = 0;

}

}
private void Grafik2()
{
    if (SeriesV1 == null || SeriesV2 == null || SeriesV3 == null)
        return;

    //(DateTime.Now.Year,DateTime.Now.Month,DateTime.Now.Date,DateTime.Now.Hour,DateTime.Now.
    Minute,DateTime.Now.Second,DateTime.Now.Millisecond);

    SeriesV11.Points.Add(new SeriesPoint(DateTime.Now.Ticks, P_el));
    SeriesV12.Points.Add(new SeriesPoint(DateTime.Now.Ticks, T_l));
    SeriesV13.Points.Add(new SeriesPoint(DateTime.Now.Ticks, m_guc));
    SeriesV14.Points.Add(new SeriesPoint(DateTime.Now.Ticks, mek_tork));
    Grafik1Indeks1++;
    if (Grafik1Indeks1 > 1000)
    {

        SeriesV11.Points.Clear();
        SeriesV12.Points.Clear();
        SeriesV13.Points.Clear();
        SeriesV14.Points.Clear();
        this.chartControl1.ClearCache();
        Grafik1Indeks2 = 0;

    }
}

private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
{
    byte[] _Text = new byte[5];
    if (this.textBox4.Text != String.Empty)
    {
        _Text[2] = 72;
        _Text[3] = Convert.ToByte(Convert.ToInt32(this.textBox4.Text));
    }

    if (_Text != null)
    {

```

```
        if (__EventMotoValistir != null)
            __EventMotoValistir(_Text);
    }
}

private void label65_Click(object sender, EventArgs e)
{

}

}

}
```

MİKRODENETLEYİCİ ÜZERİNDE ÇALIŞAN PROGRAMIN KODLARI

```
#include <18F452.h>
#device adc=10
#include <math.h>
#include <stdlib.h>

#FUSES WDT           //No Watch Dog Timer
#FUSES WDT128        //Watch Dog Timer uses 1:128 Postscale
#FUSES HS             //High speed Osc (> 4mhz)
#FUSES NOPROTECT     //Code not protected from reading
#FUSES NOOCSSEN      //Oscillator switching is disabled, main oscillator is source
#FUSES BROWNOUT      //Reset when brownout detected
#FUSES BORV20        //Brownout reset at 2.0V
#FUSES NOPUT         //No Power Up Timer
#FUSES STVREN        //Stack full/underflow will cause reset
#FUSES NODEBUG       //No Debug mode for ICD
#FUSES NOLVP         //Low Voltage Programming on B3(PIC16) or B5(PIC18)
#FUSES NOWRT         //Program memory not write protected
#FUSES NOWRTD        //Data EEPROM not write protected
#FUSES NOWRTB        //Boot block not write protected
#FUSES NOWRTC        //configuration not registers write protected
#FUSES NOCPD         //No EE protection
#FUSES NOCPB         //No Boot Block code protection
#FUSES NOEBTR        //Memory not protected from table reads
#FUSES NOEBTRB

#define r1 pin_b7
#define r2 pin_b6
#define r3 pin_b5
#define r4 pin_b4
#define m1_sag pin_b3
#define m1_sol pin_b2
#define m2_sag pin_b1
#define m2_sol pin_b0
```

```

#define m2_en pin_c1
#define m1_en pin_c0
#define inp1 pin_c5
#define inp2 pin_c4
#define inp3 pin_c2
#define inp4 pin_c3

#use delay(clock=20000000,restart_wdt)
#use
rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8,stream=pc,restart_wdt)
#include <lcd.c>

int32 ZamanAsimi;
int16 ruz_hiz=0, rotor_hiz=0,va=0,vb=0,vc=0,ia=0,ib=0,ic=0;
int8 bzs=0,adres=5,k,i,ck=0,syc=0,kanat_uzunlugu=5;
int1 gonder=false,sistem=false,kanat=false,
hesapla=true,alarm=false,fren=false;//pitch=false,
char dacs[15],sum[5];
float cpold,lamdaold,l_ara,vw,vr,vw_w,vr_r,vr_min, lamda_i=8.4;

#int_timer1
void kesme_isr()
{
    set_timer1(3032);
    syc+=1;
    gonder=true;
    hesapla=true;
    if (syc>=10)
    {
        syc=0;
        bzs++;ck++;
    }
}

#int_RDA
void RDA_isr()
{
    disable_interrupts(INT_RDA);
    disable_interrupts(GLOBAL);
    //!ZamanAsimi=0;
    for(i=0;i<5;i++)
    {
        while(!kbhit(pc))&(&ZamanAsimi<6000))
            delay_us(10);
        if(kbhit(pc))

```

```

        {
            sum[i]=fgetc(pc);
        }
        else
        {
            break;
        }
    }

clear_interrupt(int_RDA);
enable_interrupts(INT_RDA);
enable_interrupts(GLOBAL);
}

void main()
{
    set_tris_b(0); //port b tamamen output
    set_tris_c(0xBC);
    lcd_init();
    setup_adc_ports(ALL_ANALOG);
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
    setup_psp(PSP_DISABLED);
    setup_spi(SPI_SS_DISABLED);
    setup_wdt(WDT_ON);
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL);

    setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);
    setup_timer_3(T3_DISABLED|T3_DIV_BY_1);
    setup_timer_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_8);
    enable_interrupts(INT_TIMER1);
    enable_interrupts(INT_RDA);
    enable_interrupts(GLOBAL);
    output_c(0);
    output_b(0);
    lcd_putc("\f --DACS-4-- ");

    delay_ms(1500);
    lcd_putc("\f --DACS-23-- ");

    delay_ms(1500); restart_wdt(); set_timer1(3032);
    //-----LETS START-----//
    while(true)
    {
        restart_wdt();

        if(sum[2]==72)
        {

```



```

kanat_uzunlugu=sum[3];
}
set_adc_channel(3);delay_us(20);rotor_hiz=read_adc();delay_us(20);//rotor hizi
set_adc_channel(4);delay_us(20);ruz_hiz=read_adc();delay_us(20);//ruzgar hiz
ponatnsi

vw=(ruz_hiz/41);//ruzgar gizi
vr=rotor_hiz;//rotor hizi
vr_min=((vr/2)*(kanat_uzunlugu/143.3));//kanat uzunlugu 50 alinmistir

if(hesapla)
{
vr_r=rotor_hiz/4;
vw_w=ruz_hiz/4;
l_ara=(vr_r/vw_w);
lamdaold=(l_ara*10.7);
cpold=0.44*sin((lamdaold-2)/4.14);
hesapla=false;
}
if(ck>=1)
{
printf(lcd_putc,"\f%f,%lf,%ld\n%f,%f,%lf"
,cpold,lamdaold,ruz_hiz/41,vr_min,abs(lamda_i-lamdaold),l_ara);
restart_wdt();
ck=0;
}
if(ruz_hiz<475)
{
output_high(pin_c5);//ruz.hiz genel alarmi on
output_high(pin_c4);//mekanik fren devrede
output_low(pin_c1);
output_low(pin_c0);
kanat=false;
sistem=false;
alarm=true;fren=true;
}
if((ruz_hiz>476)&(ruz_hiz<725))//sistem calisiyor. guvenli calisma bolgesi
{
output_low(pin_c5);//ruz.hiz alarmi off
sistem=true;
output_low(pin_c4);//mekanik fren off
fren=false;alarm=false;

if(vw>=vr_min)
{
if(abs(lamda_i-lamdaold)>1)
{

```

```

output_low(pin_b3);
output_high(pin_b2);
output_high(pin_c0);
output_low(pin_b1);
output_high(pin_b0);
output_high(pin_c1);
kanat=true;
}
if(abs(lamda_i-lamdaold)<=1)
{
output_low(pin_c1);
output_low(pin_c0);
kanat=false;
}
}

}
if((ruz_hiz>726)&(ruz_hiz<900))//mekanik fren calistirma bolgesi
{
output_low(pin_c4);//ruzgar hiz alarmi off
output_high(pin_c5);//mekanik fren on
sistem=true;
fren=true;alarm=false;
output_low(pin_c1);
output_low(pin_c0);
kanat=false;
}

if(ruz_hiz>901)
{
output_high(pin_c4);//ruzgar hiz alarmi on
output_high(pin_c5);//mekanik fren on.
output_low(pin_c1);
output_low(pin_c0);
sistem=false;
kanat=false;//pitch=false;
alarm=true;fren=true;
}

if(gonder)
{
disable_interrupts(GLOBAL);
ia=0;//(ia/4);
ib=0;//(ib/4);

```

```

ic=0;//(ic/4);
va=0;//(va/4);
vb=0;//(vb/4);
vc=0;//(vc/4);
ruz_hiz=(ruz_hiz/4);
rotor_hiz=(rotor_hiz/4);
dacs[0]=15;
dacs[1]=ruz_hiz;
dacs[2]=rotor_hiz;
dacs[3]=sistem;
dacs[4]=kanat;//dm2;
dacs[5]=alarm;//50;//(pitch_hiz/4);
dacs[6]=fren;//0;//pitch;
dacs[7]=ia;
dacs[8]=ib;//input(pin_c5);
dacs[9]=ic;//input(pin_c4);
dacs[10]=va;//m1ig;
dacs[11]=va;//m2ig;
dacs[12]=va;//m3ig;
dacs[14]=adres;//device id.
dacs[13]=dacs[1]^dacs[2];
for(k=1;k<=10;k++)
{
dacs[13]^=dacs[k+2];//delay_us(50);
}
restart_wdt();
for(k=0;k<15;k++)
{
printf("%c"dacs[k]); delay_us(2);
}
gonder=false;
enable_interrupts(GLOBAL);
}
}
}

```

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Enver ŞİPAR
Doğum Tarihi ve Yeri : 06.12.1983- Konya
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : dacs@enversipar.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Müh. Bölümü, Elektrik Makineleri ve Güç Elektroniği A.B.D.	Yıldız Teknik Üniversitesi - Fen Bilimleri Enstitüsü	2011
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi- Elektrik Elektronik Fakültesi	2007
Lise	Fen Bilimleri	Selçuklu Cumhuriyet Lisesi	2002

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
03/2011 - ??	Teknoel Elektrik	Proje Yöneticisi Zorlu Center Metro Bağlantı Projesi
07/2010 –03/2011	Desat Elektrik	Saha Mühendisi Zorlu Center Projesi
11/2008 - 07/2010	DACS Mühendislik	Firma Sahibi
08/2008 - 02/2009	A6-Bernas İş Ortaklığı	Saha Mühendisi

YAYINLAR

Bildiri

1. Rüzgar Türbin Sistemlerinin Matematiksel Modellenmesi
4 - 5 Haziran 2009 tarihinde Elektrik Mühendisleri Odasının, 19 Mayıs Üniversitesinde düzenlemiş olduğu RÜGES 2009 sempozyumunda sunulmuştur.