

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

**RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN KANAT AÇISI VE ROTOR HIZ KONTROLÜ
YAPARAK VERİMLİLİĞİN SAĞLANMASI**

AYYÜCE VURAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONTROL VE OTOMASYON PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. GALİP CANSEVER**

İSTANBUL, 2011

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN KANAT AÇISI VE ROTOR HIZ KONTROLÜ
YAPARAK VERİMLİLİĞİN SAĞLANMASI

Ayyüce VURAL tarafından hazırlanan tez çalışması 22.11.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof Dr Galip CANSEVER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Galip CANSEVER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Kayhan GÜLEZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Semih SEZER
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasındaki yardımlarını benden esirgemeyen danışmanım Sn. Prof. Dr. Galip Cansever'e teşekkürü borç bilirim.

Hayatımın her evresinde yanımda olan, manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim. İyi ki varsınız.

Ağustos, 2011

Ayyüce VURAL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT.....	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2	
RÜZGAR ENERJİSİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ	4
2.1 Rüzgar Enerjisinin Mevcut Durumu	6
2.2 Türkiye'nin Rüzgar Enerji Potansiyeli	7
BÖLÜM 3	
RÜZGAR SANTRALLERİ	11
3.1 Rüzgar Enerjisinin Dönüşümü	11
3.2 Rüzgar Santralleri Bileşenleri	11
3.2.1 Generatör.....	12
3.2.1.1 DC Generatörler	12
3.2.1.2 AC Senkron Generatörler	12
3.2.1.3 AC Asenkron Generatörler	13
3.2.2 Kule	14

3.2.3	Rüzgar Türbini	15
3.2.3.1	Tasarımlarına Göre Rüzgar Türbinleri	15
3.2.3.1.1	Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	15
3.2.3.1.2	Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	16
3.2.3.2	Güç Üretim Sistemlerine Göre Rüzgar Türbinleri.....	17
3.2.3.2.1	Sabit Hızlı Rüzgar Türbinleri	17
3.2.3.2.1	Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri	18
3.2.4	Makina Bileşenleri	20
3.2.4.1	Düşük Hız Mili.....	20
3.2.4.2	Dişli Kutusu.....	20
3.2.4.3	Yüksek Hız Mili	21
3.2.4.4	Kontrol Ünitesi	21
3.2.4.5	Kanat Açma Mekanizması	21
3.2.4.6	Anemometre ve Yelkovan	21
3.2.5	Yerel Elektrik Şebekesi Bağlantı Elemanları	21

BÖLÜM 4

RÜZGAR TÜRBİNİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ	22
4.1 Rüzgar Türbini Aerodinamikleri	22
4.2 Rüzgar Türbini Performansı	24
4.3 Rüzgar Türbini Modelleri	25
4.3.1 Altı Kütle Yay Damper Sistemi	26
4.3.2 Üç Kütle Yay Damper Sistemi.....	26
4.3.3 İki Kütle Yay Damper Sistemi	27
4.3.4 Tek Kütle Yay Damper Sistemi	27

BÖLÜM 5

DURUM UZAYI MODELİ VE KONTROL YÖNTEMLERİ.....	28
5.1 Durum Uzayı Modeli	28
5.1.1 Bir Sistemin Çözümü	29
5.1.1.1 Transfer Fonksiyonunun Çıkarılması	30
5.1.1.2 Durum Geçiş Matrisi.....	30
5.1.1.3 Bir Sistemin Tam Çözümü	30
5.1.2 Benzerlik Dönüşümleri.....	30
5.1.3 Özdeğerler ve Özvektörler	30
5.1.4 T dönüşüm Matrisinin Elde Edilmesi	31
5.2 Kontrol Edilebilirlik Gözlenebilirlik ve Kararlılık	31
5.2.1 Kontrol Edilebilirlik.....	31
5.2.1.1 Kontrol Edilebilirlik Testi	32
5.2.2 Kararlılık	32
5.2.1.1 Kararlı Kılınabilirlik.....	33
5.2.3 Gözlenebilirlik	33
5.2.3.1 Gözlenebilirlik Testi	34
5.3 Rüzgar Türbini Kontrol Yöntemleri	34

5.3.1	Kanat Açısı Kontrol Yöntemleri	35
5.3.1.1	Aktif Kanat Açısı Kontrolü.....	35
5.3.1.2	Pasif Kanat Açısı Kontrolü.....	36
5.3.2	Rotor Hız Kontrol Yöntemleri.....	36
5.3.3	Durdurma Kontrolü.....	37
5.3.3.1	Aktif Durdurma Kontrolü.....	37
5.3.3.2	Pasif Durdurma Kontrolü.....	37
5.3.4	Kutup Atama Tasarımı	37
5.3.4.1	Durum Geri Beslemesi Yöntemiyle Kutup Atama	38
5.3.4.2	Çıkış Geri Beslemesi Yöntemiyle Kutup Atama	39
5.3.5	Sinirsel Bulanık Mantık Denetimi.....	40
5.3.5.1	ANFIS (Adaptif Ağ Yapısına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi Mimarisi.....	41
 BÖLÜM 6		
SİMULASYON ÇALIŞMASI		44
6.1	Türbinin Modellenmesi.....	44
6.2	Sistemin Kararlılık Kontrol Edilebilirlik ve Gözlenebilirlik İncelemesi	48
6.2.1	Sistemin Kararlılık Açısından İncelenmesi	48
6.2.2	Sistemin Kontrol Edilebilirlik Açısından İncelenmesi	49
6.2.3	Sistemin Gözlenebilirlik Açısından İncelenmesi.....	49
6.3	Kontrolcü Tasarımı.....	49
6.3.1	Rotorun Hız Kontrolü	49
6.3.2	Kanat Açısının Ayarlanması.....	55
 BÖLÜM 7		
SONUÇ VE ÖNERİLER		61
KAYNAKLAR		Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
 EK-A		
MATLAB M-FILE KODU		65
ÖZGEÇMİŞ		71

SİMGE LİSTESİ

A	Dönüştürülmüş durum matrisi
B	Dönüştürülmüş giriş matrisi
B_g	Generatörün damper katsayısı
B_r	Rotorun damper katsayısı
C	Dönüştürülmüş çıkış matrisi
C_T	Rüzgar türbini tork katsayısı
D	Dönüştürülmüş geçiş besleme matrisi
E_k	Kinetik enerji
I_2	Rotor akımı
J_{Bn}	Kanatların eylemsizlik momenti
J_{GB}	Dişli kutusu eylemsizlik momenti
J_H	Merkezin eylemsizlik momenti
J_g	Generatörün eylemsizlik momenti
J_r	Rotorun eylemsizlik momenti
K_{ls}	Düşük hızlı şaftın yay katsayısı
N_s	Senkron hız
Q_C	Kontrol edilebilirlik matrisi
Q_O	Gözlenebilirlik matrisi
R_2	Direnç
T_{hs}	Yüksek hız şaftı (mili) tarafındaki tork
T_{ls}	Düşük hız şaftının (milinin) torku
$v_{\ddot{o}}$	Özvektör
w_g	Generatörün açısal hızı
w_{ls}	Düşük hız şaftı (mili) tarafındaki açısal hız
w_r	Rotorun açısal hızı
w_r	Rotorun açısal hızı
$x \ t$	Dönüştürülmüş durum vektörü
γ_{reel}	Özdeğerlerin reel kısmı
θ_{ls}	Düşük hız şaftı (mili) tarafındaki açısal yer değiştirme
θ_r	Rotorun açısal yer değiştirmesi
ϕ_2	Rotor akım ve gerilimi arasındaki faz açısı

A	Alan
A	Durum matrisi
A_i	Üyelik fonksiyonları
B	Giriş matrisi
B_i	Üyelik fonksiyonları
C	Çıkış matrisi
C_p	Rüzgar türbini güç katsayısı
D	Geçiş besleme matrisi
D	Tork kayıpları
dH_n	İki kütle arası damper sabitleri
e	İndüklenen gerilim
f	Frekans
F	Hava akışının oluşturduğu kuvvet
$G(s)$	Transfer fonksiyonu
K	Geri besleme katsayı matrisi
k	Oransallık katsayısı
K_n	Yay sabiti
m	Havanın kütlesi
M	Moment
n	Dişli kutusu oranı
N_r	Rotorun hızı
O	ANFIS katman çıkışı
p	Kutup sayısı
P	Rüzgar türbini çıkış gücü
p_0	Aktüatör disk üzerindeki rüzgar basıncı
P_{em}	Asenkron makinadan elde edilebilecek güç
p_u	Aktüatör disk önündeki rüzgar basıncı
p_w	Aktüatör disk arkasındaki rüzgar basıncı
R	Rotor çapı
T	Dönüşüm matrisi
T	Tork
T_a	Rotorun torku
T_{em}	Asenkron makinadan elde edilebilecek tork
T_{WT}	Türbinin toplam torku
$u(t)$	Giriş vektörü
v	Rüzgarın çizgisel hızı
v_0	Aktüatör disk üzerindeki rüzgar hızı
v_u	Aktüatör disk önündeki rüzgar hızı
v_w	Aktüatör disk arkasındaki rüzgar hızı
$x(t)$	Durum vektörü
$y(t)$	Sistem çıkışı
λ	Kanat uç hız oranı
Φ	Durum geçiş matrisi
w	Açısal hız
β	Kanat açısı
γ	Özdeğerler

θ	Açısal pozisyon
ρ	Havanın yoğunluğu
ϕ	Statorda oluşan akı
$\phi \ A$	Cayley Hamilton karakteristik matrisi

KISALTMA LİSTESİ

DHM	Düşük Hız Mili
RES	Rüzgar Enerjisi Santrali
SKAG	Sincap Kafesli Asenkron Generatör
TSR	Kanat Uç Hız Oranı
YHM	Yüksek Hız Mili

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	1995-2006 yılları Arası Küresel Rüzgar Enerjisi Kurulu Güç Kapasitesi..... 6
Şekil 2.2	Türkiye’deki RES’lerin coğrafi olarak dağılımı (EPDK, TUREB) 9
Şekil 3.1	Rüzgar enerjisi dönüşüm aşamaları 11
Şekil 3.2	Dikey eksenli rüzgar türbini 16
Şekil 3.3	Yatay eksenli rüzgar türbini 16
Şekil 3.4	Sabit hızlı rüzgar enerji sistemi 18
Şekil 3.5	Değişken hızlı çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar enerji sistemi .. 19
Şekil 3.6	Değişken hızlı sincap kafesli asenkron generatörlü rüzgar enerji sistemi .. 20
Şekil 4.1	Aktüatör disk üzerinde hava akışı 22
Şekil 4.2	$C_p - \lambda(TSR)$ eğrileri 25
Şekil 4.3	Altı kütle-yay-damper sistemi 26
Şekil 4.4	Üç kütle-yay-damper sistemi 27
Şekil 4.5	İki kütle-yay-damper sistemi 27
Şekil 4.6	Tek kütle-yay-damper sistemi 27
Şekil 5.1	Sistemin kutuplarının kök yer eğrisi üzerindeki yerlerine göre sistemin darbe cevabı..... 33
Şekil 5.2	Rüzgar türbini kontrol sistemi ana şeması 35
Şekil 5.3	Aktif kanat açısı kontrol sistemi 36
Şekil 5.4	Durum Geri Beslemesi Yöntemiyle Kutup Atama 38
Şekil 5.5	Çıkış geri beslemesi yöntemiyle kutup atama 40
Şekil 5.6	(a) Birinci dereceden iki girişli ve iki kurallı “Sugeno Bulanık Modeli” (b)Eşdeğer ANFIS yapısı. 42
Şekil 6.1	İki kütle-yay-damper sistemi ile yapılmış model 44
Şekil 6.2	Sistemin kök yer eğrisi 48
Şekil 6.3	Rotor hız kontrolü için kutup atama tasarımı 51
Şekil 6.4	Kapalı çevrim sisteminin kök yer eğrisi 52
Şekil 6.5	Rüzgarın hızı ve rotorun hızının karşılaştırılması (Rüzgar sinüs sinyali olarak modellenmiştir)..... 53
Şekil 6.6	Rüzgarın hızı ve rotorun hızının karşılaştırılması (Rüzgar beyaz gürültü olarak modellenmiştir)..... 53
Şekil 6.7	Rüzgarın hızı ve rotorun hızının karşılaştırılması (Rüzgar=15 m/s sabit olarak modellenmiştir)..... 54
Şekil 6.8	Sistemin darbe cevabı 55

Şekil 6.9	Sisteme ANFIS kontrolcü eklendikten sonra oluşan blok şeması	56
Şekil 6.10	ANFIS denetleyicinin üyelik fonksiyonları	57
Şekil 6.11	ANFIS denetleyici çıkış yüzeyi	57
Şekil 6.12	ANFIS denetleyici hata eğrisi	58
Şekil 6.13	Rotor hız ve referans hız eğrisi -1	59
Şekil 6.14	ANFIS denetleyicinin çıkışı -1	59
Şekil 6.15	Rotor hız ve referans hız eğrisi -2	60
Şekil 6.16	ANFIS denetleyicinin çıkışı -2	60

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Rüzgar türbinlerinin kapasite ve rotor çapı bazında gelişimi..... 5
Çizelge 2.2	Türkiye’de Rüzgar Enerjisi’nin Durumu (2007 yılı itibariyle) 7
Çizelge 3.1	Tasarımına göre rüzgar türbinlerinin karşılaştırılması 17

RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN KANAT AÇISI VE ROTOR HIZ KONTROLÜ YAPARAK VERİMLİLİĞİN SAĞLANMASI

Ayyüce VURAL

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Galip CANSEVER

Rüzgar enerjisi sistemleri son yıllarda alternatif enerji kaynaklarına eğilimin artmasıyla önem kazanmış yenilenebilir enerji kaynaklarından bir tanesidir. Rüzgar, yenilenebilir bir enerji kaynağı olmasına rağmen sürekli bir enerji kaynağı değildir ve rüzgardan elde edilebilecek enerji her zaman aynı seviyede olmamaktadır. Bu da rüzgardan enerji elde edilmesi aşamasında verimlilik problemini ortaya çıkarmaktadır.

Rüzgar türbin sistemlerinde kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi de verimlilik problemine çözüm getirme arayışından ortaya çıkmıştır. Genel olarak rüzgar türbin sistemlerinde rotorun hız kontrolü ve kanat açısı kontrolü yapılmaktadır.

Değişken hızlı rüzgar türbinleri optimal kanat uç hız oranı değerinde çalıştırılabildikleri ve dolayısıyla rüzgardan maksimum enerjiyi yakalayabildikleri için sabit hızlı türbin sistemlerine göre daha verimli sistemlerdir.

Yapılan tez çalışmasında, rüzgar türbini sistemleri kütle-yay-damper sistemiyle modellendikten sonra iki adet kontrolcü tasarlanmıştır. İlk olarak, değişken hızlı rüzgar türbin sistemleri için sabit kanat uç hız oranı prensibine dayalı hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu kontrolcü tasarımında kutup atama yöntemi kullanılmıştır.

Tasarlanan ikinci kontrolcü, kanat uç hız oranı ve kanat açısının bir fonksiyonu olan güç katsayısı eğrisini kullanarak, sistemin çalıştırıldığı kanat uç hız oranı ve güç katsayısı

değeri için kanat açısının hesaplanmasında kullanılmıştır. Kanat açısı kontrolünde ANFIS denetleyici kullanılmıştır.

Sistem MATLAB altında modellenerek simulasyonu yapılmıştır. ıkan sonuçlardan rotor hız kontrolünün ve kanat açısı kontrolünün düzgün bir şekilde gerçekleştirildiği grlmştr.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar türbini kontrolü, ktle-yay-damper modellemesi, kutup atama tasarımı, ANFIS

**ENSURING EFFICIENCY FOR WIND TURBINES USING PITCH ANGLE AND
ROTOR SPEED CONTROL STRATEGIES**

Ayyüce VURAL

Department of Electrical Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Galip CANSEVER

Wind energy systems are one of the renewable energy systems which gain importance since alternative energy systems become popular in recent years. Though wind energy is renewable, it is not a continual energy and the energy captured from wind is not always at the same level. So, efficiency is a problem of wind energy systems.

Building new control strategies for wind turbine systems comes up with the searching solutions for efficiency problem. In general, there are two control systems which are used in wind energy systems. These control systems are rotor speed control and pitch control.

Variable-speed wind turbines are more efficient systems than fixed-speed wind turbines. Because they can be run at optimal tip speed ratio and as a result of this, they can capture the maximum energy from wind.

In this thesis work, a wind turbine system is modeled by two-mass model. After that two controller systems are designed. First of all, wind turbine speed controller based on tip speed ratio tracking is designed. Pole placement control strategy is used in this control method.

The second controller is used for blade pitch angle calculation using power coefficient of wind turbine. Power coefficient is a function of blade pitch angle and tip speed ratio. ANFIS controller is used for pitch control of wind turbine.

Wind energy system is modeled under MATLAB and simulated. Simulation results show that rotor speed controller and pitch controller work in the correct way

Key words: Wind turbine control, two-mass modelling, pole placement, ANFIS

GİRİŞ

Enerji sistemleri, temel insan ihtiyaçlarının karşılanması ve ekonomik büyümenin desteklenmesi açısından önem teşkil etmektedir. Enerjinin üretilmesi, dönüştürülmesi ve kullanılması noktasında verimlilik ile birlikte çevre faktörünün de değerlendirilmesi gerekmektedir. Fosil yakıtların yakın gelecekte tükeneceği gerçeği de göz önüne alınırsa alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi gün geçtikçe artmaktadır.

Bu tez çalışmasında yenilenebilir enerji kaynaklarından Rüzgar Enerji Sistemleri incelenmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Rüzgar enerji sistemlerinin modellenmesinde pek çok yaklaşım ortaya atılmıştır. Bunlardan çoğunlukla kullanılan, kütle yay damper sistemiyle yapılan modellemedir. Özellikle iki kütle-yay-damper sistemi, farklı büyüklüklerde ve kanat sayılarındaki rüzgar türbinlerine hemen adapte edilebildiği için tercih edilmektedir [14].

Rüzgar türbinlerinin kontrolünde iki farklı kontrolcünün varlığından bahsedebiliriz. Bunlardan ilki rotorun hız kontrolünün yapıldığı kontrolcü diğeri ise kanat açısının ayarlandığı kontrolcüdür.

Rotor hız kontrolü, sabit hızlı ve değişken hızlı kontrol yöntemleri olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilir. Değişken hızlı kontrol yöntemleri, rüzgardan maksimum gücü yakalayabildiği için daha verimli bir kontrol ortaya koymaktadır. Değişken hızlı kontrol yöntemleri ise kendi içinde iki ana başlığa ayrılabilir. Maksimum güç katsayısının sağlandığı bir kontrol için kanat uç hız oranının optimal değere ayarlandığı

güç katsayısı takip yöntemi kullanılır. Bir diğer kontrol yöntemi ise kanat uç hız oranının sabit tutulduğu kanat uç hız oranı takip yöntemidir [4].

Hız kontrolünde belirtilen yöntemlerin gerçekleştirilmesinde lineer ve lineer olmayan kontrolcü tasarımları kullanılır. Lineer olmayan kontrolcü tasarımında bulanık mantık denetimi, kayan kipli denetimi, geri besleme lineerleştirme yöntemi kullanılırken, lineer kontrolcü tasarımında ise geleneksel PI, PD ve PID kontrolcülerle birlikte kutup atama tasarımı ve anahtarlama kontrol stratejileri kullanılmaktadır [4].

1.2 Tezin Amacı

Rüzgar türbin modellemesi ve kontrolü kontrol mühendisliği alanında önemli bir araştırma konusudur. Literatürde rüzgar türbinlerinin lineer ve lineer olmayan pek çok modeli mevcuttur. Bu modellere göre lineer ve lineer olmayan kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında da çok girişli tek çıkışlı durum uzayı formunda rüzgar türbini modellemesi ve kontrolcü tasarımı yapılmıştır.

Rüzgar türbininin modellenmesi bölümünde, rüzgar türbinlerinin aerodinamik yapısı esas alınarak kütle yay damper sistemlerine dayalı modelleme gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan model durum uzayı formuna aktarılarak MATLAB simulink üzerinde simülasyonu yapılmıştır.

Kontrolcü tasarımı bölümünde, sistem için iki ayrı kontrolcü tasarlanmıştır. İlk olarak, kutup atama tasarımı yöntemiyle rüzgar türbin rotorunun hız kontrolü sağlanmıştır. İkinci kontrolcü ise ayarlanan hız değerini sağlayacak kanat açısının tespit edilmesinde kullanılmıştır. Kanat açısının hesaplanmasında kanat uç hız oranı ve güç katsayısı bilgileri kullanılarak ANFIS denetim sistemi tasarlanmıştır.

1.3 Hipotez

Rüzgar türbin sistemlerinde rotor hız kontrolcüsü ve kanat açısı kontrolcüsü olmak üzere iki kontrol sistemi kullanılmaktadır. Yapılan tez çalışmasındaki kontrol sistemleri tasarlanırken rüzgardan yakalanan en yüksek enerjiyi ifade eden güç katsayısına göre tasarım yapılmıştır. Buna göre optimum kanat uç hız oranına göre rotorun hızı kontrol

edilmiş ve güç katsayısını en yüksek tutacak şekilde açıyı ayarlayan bir sinirsel bulanık mantık denetleyicisi tasarlanmıştır.

Rotor hız kontrolü sağlanırken sistem kutuplarının kararlı bölgeye taşınması prensibi kullanılırken, kanat uç hız oranı ayarlanırken güç katsayısını en yüksek tutacak açıyı hesaplayan bir ANFIS denetleyicisi tasarlanmıştır.

BÖLÜM 2

RÜZGAR ENERJİSİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Rüzgar gücü yaklaşık üçbin yıldan beri kullanılmaktadır. Bu enerji türü, modern endüstrileşmenin öncesinde, mekanik güç sağlamak amaçlı kullanılmaktaydı. Bu yıllarda daha çok su pompalamak ve ya tahıl öğütmek gibi amaçlarla kullanılan rüzgar gücü, endüstrileşmenin ve elektrik şebekesine geçişin başlamasıyla beraber fosil yakıtlara ilginin artması sebebiyle ikinci planda kalmıştır.

Elektrik üretiminde rekabetin artması, fosil yakıtların pahalı olması ve bir süre sonra tükenecekleri gerçeği göz önüne alındığında rüzgar enerjisinin önemi ortaya çıkmaktadır. Rüzgar enerjisi doğada bedelsiz ve yenilenebilir bir enerjidir. Bu sebeple güneş enerjisinin dönüşümü gibi doğaya zararı olmayan ve tükenmeyecek bir enerji kaynağıdır.

İlk olarak 1891 yılında Dane Poul LaCour elektrik üreten rüzgar türbinini yapmıştır. Danimarkalı mühendisler 1. ve 2. Dünya savaşı sırasında elektrik kesintilerinin önüne geçebilmek için bu teknolojiyi geliştirmişlerdir. Özellikle 1941 yılında kurulan Danimarkalı F.L. Smidth firması tarafından geliştirilen sistemler modern rüzgar türbinlerinin öncüleri olarak değerlendirilir [1].

2. Dünya Savaşı'ndan sonra Danimarka'daki Johannes Juul, bu tasarım felsefesini daha da ilerletti. Danimarka Gedser'de kurulmuş olan türbin ile 1956 ile 1967 yılları arasında 2.2 milyon kWsaat üretti. Aynı zamanda Alman Ulrich Hütter yeni bir yaklaşım geliştirdi. Rüzgar türbini iki yana sallanan bir göbek üzerindeki kuleye rüzgarı arkadan

alacak şekilde monte edilen iki ince fiberglas kanattan oluşmaktaydı. Hütter'in türbini yüksek verime sahip olmasıyla tanınmaktaydı [1].

1970'li yılların başında petrol fiyatlarındaki yükselme sebebiyle daha önce mekanik enerji üretiminde kullanılan rüzgar enerjisinin elektrik enerjisi üretiminde kullanılması fikri önem kazandı. Belirli ülkelerde hükümetlerin desteği ile ilave gelişimler yaşanmıştır. Kamu Kurumu Düzenleyici Politikaları (PURPA) yenilenebilir enerji sistemleri için vergi kredileriyle birleştirildiğinde rüzgar enerjisinin patlamasına neden oldu [1], [2]. Özellikle Amerika'da pek çok rüzgar çiftliği kuruldu. Danimarkalı firmaların rüzgarı ön cepheden karışayabilen rüzgar türbini tasarımıyla türbinlerin enerji kapasitelerini neredeyse 30 katına çıkı. Adım adım geliştirilen teknoloji, 1990'ların sonunda en önemli yenilenebilir enerji kaynağı halini aldı.

Rüzgar enerjisi teknolojisi çok hızlı ilerlemiştir. 1985 yılında 50 kW kapasiteli rüzgar türbinleri kullanılırken, on sene içerisinde 600 kWlık rüzgar türbinleri üretilmeye başlanmıştır. Çizelge 2.1'de 1985 yılından günümüze rüzgar türbinlerindeki gelişme kapasite ve rotor çapı bazında verilmiştir [1].

Çizelge 2.1 Rüzgar türbinlerinin kapasite ve rotor çapı bazında gelişimi

Yıl	Kapasite (kW)	Rotor Çapı (m)
1985	50	15
1989	300	30
1992	500	37
1994	600	46
1998	1500	70
2003	3000-3600	90-104
2004	4500-5000	112-128

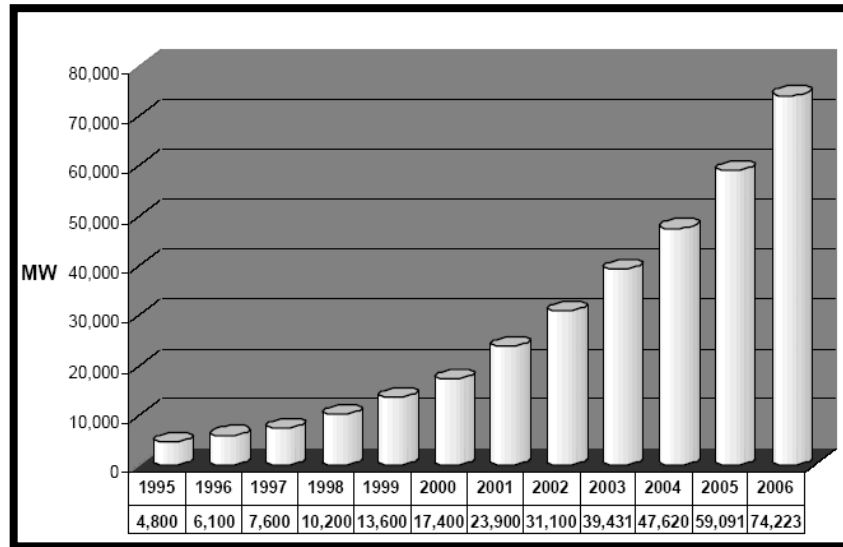
Modern rüzgar türbinleri modüler bir yapıya sahiptir ve hızlı bir şekilde kurulabilmektedirler. İnşaat işlemleri aylarla sınırlı sürelerde tamamlanmaktadır. Rüzgar türbinlerinin bu özelliği elektrik enerjisine acil ihtiyaç duyan ülkeler için çözüm teşkil edebilmektedir. Rüzgar santrallerinin kurulu güç büyüklüğü birkaç MW ile birkaç

yüz MW arasında değişmektedir. Dünya'daki en büyük rüzgar çiftliği ABD'de Oregon ve Washington eyaletleri arasında bulunan ve 300 MW kapasiteye sahip Stateline Gelişim Projesi'dir [2].

Ekonomik cazibesi arttıkça, rüzgar enerjisi büyük bir iş sektörü haline gelmektedir. Büyük rüzgar türbini imalatçıları şimdilerde talebi karşılamak üzere multi-milyon dolarlık fabrikalar işletmektedir.

2.1 Rüzgar Enerjisinin Mevcut Durumu

Dünya genelinde rüzgar enerji santralleri son 10 senede yıllık ortalama %30'luk bir artış göstermiştir. Bu artış, rüzgar enerjisinin 1990'lardan beri en hızlı şekilde büyüyen enerji teknolojisi olduğunu göstermektedir. Rüzgar enerjisi kurulu güç kapasitesi Şekil 2.1 'de verilmiştir. Rüzgar teknolojisi dünya genelinde eşit olarak dağılmamıştır. 2003 yılı sonu itibarıyla, rüzgar enerji kapasitesinin %74'ü Avrupa'da, %18'i Kuzey Amerika'da ve %8'i Asya ve Pasifik'tedir [1].



Şekil 2.1 1995-2006 yılları Arası Küresel Rüzgar Enerjisi Kurulu Güç Kapasitesi

Bir çok ülkede rüzgar gücüne dayalı olarak üretilen elektriğin oranı şimdiden geleneksel yakıtlarla üretilmekte olan elektrik oranlarıyla başa baş gelmeye başlamıştır. Danimarka'da ülke elektriğinin şu anda %20'si rüzgar enerjisinden temin edilmektedir. İspanya'da rüzgar enerjisinin katkısı %8 mertebesine ulaşmıştır ve 2010 yılına kadar bu oranın %15'e çıkarılacağı planlanmaktadır.

Rüzgar enerjisi gelişiminde yeni bir cephe de deniz üstü potansiyelleri değerlendirme konusunda açılmıştır. Rüzgar karakteristiklerinin karalardan daha kararlı, karalara kıyasla enerji üretim miktarlarının yaklaşık %30 fazla ve gelişen teknolojinin bu potansiyeli değerlendirmeye ekonomik olarak imkan tanınması deniz üstü rüzgar enerjisi uygulamalarını özellikle son birkaç yılda ilgi çekici hale getirmiştir [3].

2.2 Türkiye'nin Rüzgar Enerji Potansiyeli

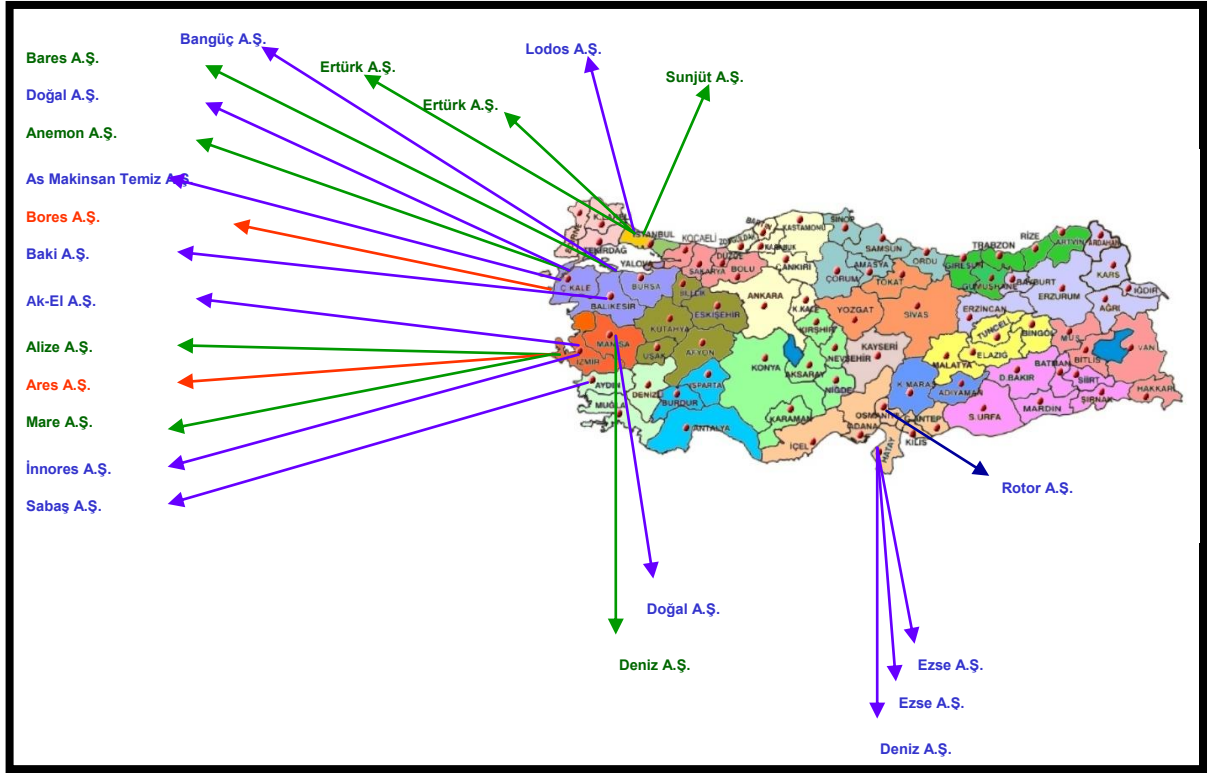
Ülkemizin rüzgarla elektrik enerjisi üretmeye başlaması büyük ölçüde 1990'lı yılların ortalarında olmuştur. Çizelge 2.2'den de görüldüğü gibi, halihazırda ülkemizde 131,35 MW işletmede olup 2007 yılı içerisinde 156,00 MW, 2008 yılında 405,16 MW ve 2009 yılında 130 MW devreye alınarak toplamda 742.11 MW kurulu güce erişilecektir. Çizelge 2.2'de verilen değerler ülkemizdeki 2007 yılı itibariyle son durumu göstermektedir. Çizelge 2.2'de italik olarak gösterilen rüzgar enerjisi santralleri (RES) işletmede olup; 2007, 2008 ve 2009'da devreye girecek olan RES'ler gösterilmiştir. 2007, 2008 ve 2009'da devreye girecek olan RES'ler rüzgar türbin üreticisi ile satış anlaşması imzalamış projeleri göstermektedir [3].

Çizelge 2.2 Türkiye'de Rüzgar Enerjisi'nin Durumu (2007 yılı itibariyle)

Mevkii	Şirket	Üretime Geçiş Tarihi	Kurulu Güç (MW)	Yıllık Devreye Alınan Kapasite Toplamı (MW)	Türkiye Kurulu Gücü (MW)
<i>İzmir-Çeşme</i>	<i>Demirer A.Ş.</i>	<i>1998</i>	<i>1,50</i>	8,70	131,35
<i>İzmir-Çeşme</i>	<i>Güçbirliği A.Ş.</i>	<i>1998</i>	<i>7,20</i>		
<i>Çanakkale-Bozcaada</i>	<i>Demirer-Enercon</i>	<i>2000</i>	<i>10,20</i>	10,20	
<i>İstanbul-Hadımköy</i>	<i>Sunjüt A.Ş.</i>	<i>2003</i>	<i>1,20</i>	1,20	
<i>Balıkesir-Bandırma</i>	<i>Bares A.Ş.</i>	<i>I/2006</i>	<i>30,00</i>	30,85	
<i>İstanbul-Silivri</i>	<i>Ertürk A.Ş.</i>	<i>II/2006</i>	<i>0,85</i>		
<i>İzmir-Çeşme</i>	<i>Mare A.Ş.</i>	<i>I/2007</i>	<i>39,20</i>	156,00	
<i>Manisa-Akhisar</i>	<i>Deniz A.Ş.</i>	<i>I/2007</i>	<i>10,80</i>		

Çanakkale-İntepe	Anemon A.Ş.	I/2007	30,40		
Çanakkale-Gelibolu	Doğal A.Ş.	II/2007	15,20		
Manisa-Sayalar	Doğal A.Ş.	II/2007	30,40		
Hatay-Samandağ	Deniz A.Ş.	II/2007	30,00		
İstanbul-G.paşa	Lodos A.Ş.	I/2008	24,00	405,16	
İzmir-Aliaga	İnnores A.Ş.	I/2008	42,50		
Aydın-Çine	Sabaş A.Ş.	I/2008	19,50		
İstanbul-Çatalca	Ertürk A.Ş.	I/2008	60,00		
Çanakkale	As Makinsan Temiz A.Ş.	II/2008	30,00		
İzmir-Kemalpaşa	Ak-El A.Ş.	II/2008	66,66		
Hatay-Samandağ	Ezse Ltd. Şti.	II/2008	35,00		
Hatay-Samandağ	Ezse Ltd. Şti.	II/2008	22,50		
Balıkesir-Şamlı	Baki A.Ş.	II/2008	90,00		
Balıkesir-Bandırma	Bangüç A.Ş.	II/2008	15,00		
Osmaniye-Bahçe	Rotor A.Ş.	I/2009	130,00	130,00	
TOPLAM				742,11	

Şekil 2.2’de ülkemiz coğrafyasında rüzgar enerji santrallerinin dağılımı görülmektedir. Şekil 2.2’den de görüleceği üzere, RES’ler daha çok nüfusun yoğun olduğu Ege, Marmara ve Akdeniz bölgelerinde yoğunlaşmaktadır. Bu durum nüfus sebebiyle zaten enerji tüketiminin fazla olduğu bölgeler için avantaj teşkil etmektedir.



Şekil 2.2 Türkiye’deki RES’lerin coğrafi olarak dağılımı (EPDK, TUREB)

Yıllık ortalama değerler esas alındığında, Türkiye’nin en iyi rüzgar kaynağı alanları kıyı şeritleri, yüksek bayırlar ve dağların tepesinde ya da açık alanların yakınında bulunmaktadır. Açık alan yakınındaki en şiddetli yıllık ortalama rüzgar hızları Türkiye’nin batı kıyıları boyunca, Marmara Denizi çevresinde ve Antakya yakınında küçük bir bölgede meydana gelmektedir. Orta şiddeteki rüzgar hızına sahip geniş bölgeler ve rüzgar gücü yoğunluğu Türkiye’nin orta kesimleri boyunca mevcuttur. Mevsimlik ortalama değerlere göre ise Türkiye çapında rüzgar kaynağı karmaşık topoğrafya ya bağlıdır. Birçok yerde, özellikle sahil boyunca ve doğudaki dağlarda kışları daha güçlü rüzgar hızları görülmektedir. Türkiye’nin orta kesimleri boyunca çoğu yerde rüzgar hızı değerleri mevsimden mevsime nispeten sabittir. Aylık ortalama değerlere göre ise Türkiye’nin batı sahil bölgesi yanında Marmara Denizi’ni çevreleyen bölgede kış mevsimi süresince en şiddetli rüzgar hızına sahiptir. Rüzgar hızı haritaları asgari değerleri Haziran ayı süresince gösterir. Rüzgar hızları Eylül ve Ekim’de artmaya başlar ve bölgedeki azami değerler Ocak ve Şubat aylarında meydana gelir. Antakya yakınındaki güçlü rüzgar kaynağının da en kuvvetli zamanı kış aylarında, özellikle kasımdan şubata kadar olan zamandır. Bu bölgedeki rüzgar hızları ilkbahar ve

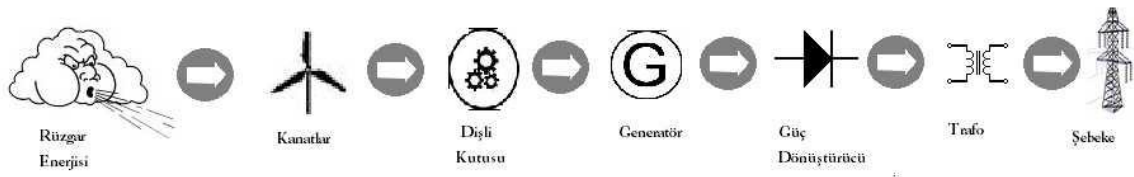
Sonbaharda azalma eğilimi gösterirken yaz aylarında biraz daha yüksek değerlere sahip olurlar. Türkiye'nin doğusundaki dağlık bölgelerdeki rüzgar hızları Şubat ayında zirveye ulaşırken Kasım'dan Mart'a kadar nispeten yüksek değerler mevcuttur [3].

Türkiye iyi-sıradışı rüzgar sınıfına giren aralıkta rüzgarlı alanların potansiyeli yaklaşık 48000 MW'lık rüzgar kurulu gücü destekleyebileceği hesaplanmıştır. Rüzgar enerjisi potansiyelini ortaya koyarken daha önce belirtilen bir çok parametre kullanılmıştır. Fakat bu hesaplamada elektriksel altyapı dikkate alınmamıştır. Eğer elektriksel altyapı ve uygulamalar bu miktarda rüzgar enerjisini kaldırabilecek şekilde düzenlenirse Türkiye çapında böylesine büyük bir yerli potansiyelden yararlanma imkanı doğacaktır [3].

RÜZGAR SANTRALLERİ

3.1 Rüzgar Enerjisinin Dönüşümü

Rüzgar enerjisi dönüşümünü basitçe anlatılmak gerekirse, rüzgar türbini kanatları vasıtasıyla maruz kaldığı rüzgar dalga enerjisinin bir kısmını mekanik enerjiye çeviren bir sistemdir. Düşük hızlı bu mekanik enerji, bir dişli kutusu yardımıyla yüksek generatör hızı seviyesine çıkartılır. Bu dişli kutusu genaratörün yüksek kutuplu olması durumunda kullanılmayabilir. Frekans konvertörleri vasıtası ile şebeke frekansı yakalanabildiğinde ilave bir dişli kutusuna ihtiyaç duyulmaz. Generatör, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Güç elektroniği üniteleri yardımıyla aradaki enerji iletimi AC ve ya DC olarak yapılabilir. İletilen enerji trasformatör yardımıyla uygun gerilime çekilerek şebekeye verilir.



Şekil 3.1 Rüzgar enerjisi dönüşüm aşamaları

3.2 Rüzgar Santralleri Bileşenleri

Bir rüzgar santrali aşağıda verilen temel bileşenlerden oluşmaktadır.

- Generatör

- Kule
- Rüzgar türbini
- Makina bileşenleri
- Yerel elektrik şebekesine bağlantı elemanları

3.2.1 Generatör

Kanatlar, rüzgar kinetik enerjisini dönen mil gücüne çevirerek generatörün dönmesini sağlamakta ve böylece elektrik gücünü üretmektedir. Akü şarjı yapan küçük rüzgar türbinleri DC generatörleri kullanırken, şebekeye paralel çalışan rüzgar türbinlerinde ise AC generatörler (asenkon ve senkon) kullanırlar [5].

Rüzgar türbinlerinde elektrik üretiminin gerçekleştiği generatör DC, AC senkon ve ya AC asenkon generatör olabilir.

3.2.1.1 DC Generatörler

DC Generatörler seri bobin ile kendiliğinden uyarmalı makinalardır. Modern DC Generatörlerde manyetik alan, sabit mıknatıs yardımıyla elde edilmektedir. Rotorda sabit mıknatıslar bulunurken statorda alternatif akım üreten sargılar bulunmaktadır. Burada üretilen alternatif akım güç elektroniği devreleri yardımıyla doğru akıma çevrilir.

DC generatörler, küçük boyutlu rüzgar türbinlerinde tercih edilirler. Bunun sebebi magnet kapasitesindeki sınırlamalardır. Fırçasız DC makinalarının 100 kW altında anma gücünde enerji üretilebilir [9].

3.2.1.2 AC Senkon Generatörler

Senkon generatörler, mıknatısın manyetik alan ile senkronize olması sonucu sabit hızda dönmesi sebebiyle sabit hızda çalışan makinalardır.

Senkon generatörler rüzgar santrallerinde değişken hızda işleme uygun değildirler. Buna ilave olarak, senkon makine rotor alanını uyarabilmek için doğru akım gereksinim duyar. Bu da karbon fırçalarına ihtiyaç duyulması demektir. Doğru akım ve

fırça gereksinimi reluktans motorunun kullanımı ile elimine edilebilir ve böylece güvenilirlik artırılırken maliyet azaltılır. Fakat bu tip makineler sadece 10 kW'lı güçlere sahiptirler [9].

Senkron generatörlerin rüzgar türbininde kullanılması açısından avantajlı tarafı ise reaktif güce ihtiyaç duymadığı için daha kaliteli bir güç elde edilmesini sağlamasıdır.

3.2.1.3 AC Asenkron Generatörler

Yeryüzündeki rüzgar türbinlerinin çoğunluğu alternatif akım üretebilmek için 3 fazlı asenkron generatörleri kullanırlar. Asenkron genetörler hem ucuz maliyetli hem de güvenilir olduğu için tercih edilirler.

Asenkron makinalarda sargılar statorda bulunur. Stator sargılarından geçen akım rotor etrafında döner bir manyetik alan oluşturur. Döner manyetik alanın hızı makinanın senkron hızını oluşturur.

Frekansı f olan p sayılı kutup çiftine sahip asenkron makinanın senkron hızının formülü (3.1)'de verilmiştir.

$$N_s = \frac{60f}{p} \quad (3.1)$$

Statorda oluşan akının (ϕ) rotor tarafından kesilmesiyle indüklenen gerilimin (e) formülü (3.2)'de verilmiştir.

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (3.2)$$

İndüklenen gerilimle oluşan sirkülasyon akımı stator akısıyla etkileşime girerek momente sebep olacaktır.

Bu indüklenen gerilim rotorda bir sirkülasyon akımı oluşturur. Rotor akımı ile stator akısı arasındaki etkileşim torka (T) neden olur.

$$T = k\phi I_2 \cos\phi_2 \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'te, k oransallık katsayısı, ϕ statordaki akı, ϕ_2 rotor akımı ve gerilimi arası faz açısı, I_2 ise rotor akımını göstermektedir.

Asenkron makinanın rotorunu rüzgar türbinine bağlayıp senkron hızdan daha hızlı döndürdüğümüz zaman indüklenen akım ve gerilimin yönü motor çalışmanın tam tersi yönde olacağı için generatör çalışmaya geçecektir.

Asenkron makinelerde stator ile rotor arasında elektriksel bir bağlantı olmayıp, tamamen elektromanyetik indüksiyon prensibine göre çalışır. Asenkron makinenin çalışma prensibini transformatöre benzetebiliriz. Statordaki yüksek gerilim sargıları kendisi üzerinde kısa devre edilmiştir. Güç her iki sargı yönünde de akabilir. Rotor ile stator döner alanı arasındaki bağıl hız da transformatör prensibine göre açıklanabilir. Bu hız kayma indisi ile ifade edilir ve s ile gösterilir. Motor çalışmada pozitif generatör çalışmada negatiftir [5].

$$s = (N_s - N_r) / N_s = 1 - N_r / N_s \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)'te N_r olarak rotorun hızı, N_s olarak senkron hız ifade edilmiştir. Asenkron makinadan elde edilebilecek elektromanyetik güç (P_{em}) ve tork (T_{em}) ifadeleri denklem (3.5) ve (3.6)'da verilmiştir. w rotorun açısal hızını temsil etmektedir.

$$P_{em} = 3I^2 R_2 \frac{1-s}{s} \quad (3.5)$$

$$T_{em} = P_{em} / w \quad (3.6)$$

3.2.2 Kule

Kule, rüzgardan yakalanan kinetik enerjiyi arttırmak amaçlı kullanılır. Çünkü türbin zeminden ne kadar yukarıya monte edilirse rüzgarı yakalama kapasitesi o kadar artar. Kule, makina elemanlarını ve kanatları taşımaktadır. Dairesel ve ya kafes biçiminde olabilir. Dairesel kuleler maliyet açısından dezavantajlı olsa bile içerisinde merdiven bulundurması ve türbine ulaşım kolaylığı açısından daha fazla tercih edilir.

Rüzgar gücü, rüzgar hızının küpü ile doğru orantılı olduğundan, rüzgar hızındaki ufak bir artış bile ekonomik açıdan oldukça önemlidir. Türbini yüksek hızlı rüzgarlara maruz bırakmanın bir yolu da, türbinleri daha uzun kulelere monte etmektir. Yer seviyesinin ilk birkaç yüz metre yüksekliklerinde, rüzgar hızı yeryüzü ile olan sürtünme ve etkileşiminden dolayı oldukça fazla etkilenir. Pürüzsüz yüzeyler örneğin; durgun deniz yüzeyi rüzgara karşı oldukça düşük bir direnç gösterir. Rüzgar ısısındaki değişim oranı

yüksekliğin artmasıyla birlikte daha düşük seviyelerde kalacaktır. Diğer yandan yüzey rüzgarları oldukça tümsekli arazilerde, orman ve bina alanlarında oldukça düşük olacaktır [5].

Minimum kule yüksekliği süpürülmesi istenen alan olarak tanımlanır. Yüksek kuleler rüzgardan daha fazla enerji yakalamalarına rağmen maliyetleri yüksek olduğundan, proje aşamasında optimum yükseklik belirlenmelidir.

3.2.3 Rüzgar Türbini

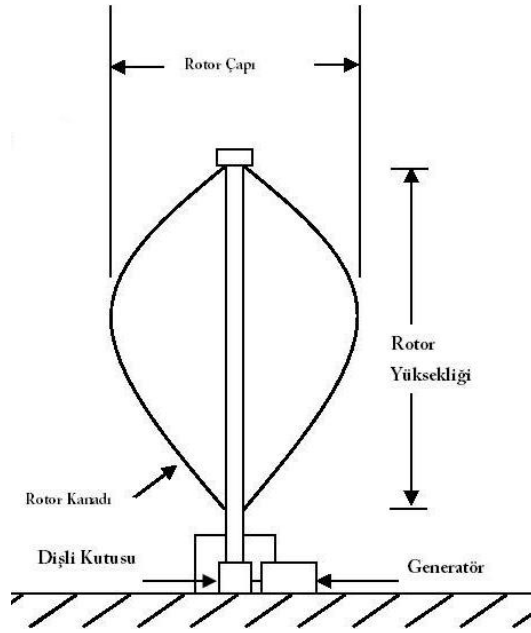
Rüzgar türbinleri rotoruna bağlı kanatlar vasıtasıyla rüzgarın kinetik enerjisini yakalayarak generatöre iletir. Rüzgar türbinleri tasarımlarına göre ve güç üretim sistemlerine göre gruplandırılabilirler.

3.2.3.1 Tasarımlarına Göre Rüzgar Türbinleri

Türbinler iki farklı şekilde tasarlanır. Bunlar yatay eksenli rüzgar türbinleri ve dikey eksenli rüzgar türbinleridir.

3.2.3.1.1 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri

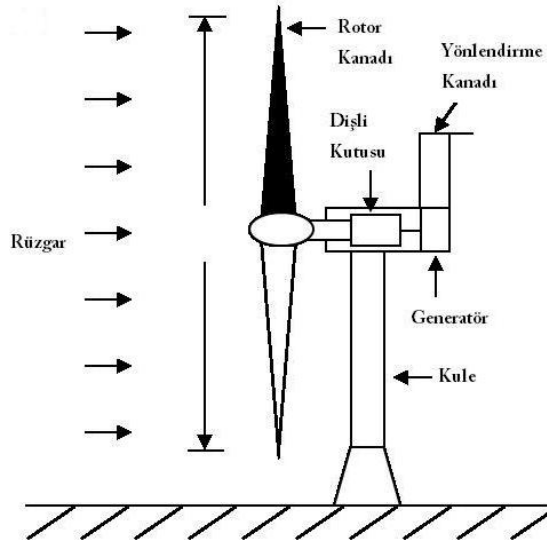
Dikey eksenli rüzgar türbinleri kanatlarının yerleştirilme biçimi açısından bir mikseri andırırlar. Yapısı kanatların yerleştirilme şekli dışında yatay eksenli rüzgar türbinleri ile aynıdır. Rüzgarı her yönde kabul edebilirler. Günümüzde tercih edilmemektedir.



Şekil 3.2 Dikey eksenli rüzgar türbini

3.2.3.1.2 Yatay Eksenli Rüzgar Türbini

Yatay Eksenli rüzgar türbinlerinde kanatlar yere dik şekilde monte edilmektedir. Bu montaj kanatların rüzgar yönünde ve rüzgarın tersi yönde dönebilmelerini sağlar. Günümüzdeki modern rüzgar türbinleri bu şekilde tasarlanmaktadır.



Şekil 3.3 Yatay eksenli rüzgar türbini

Bu iki tasarımın avantaj ve dezavantaj yönünden karşılaştırması Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Tasarımına göre rüzgar türbinlerinin karşılaştırılması

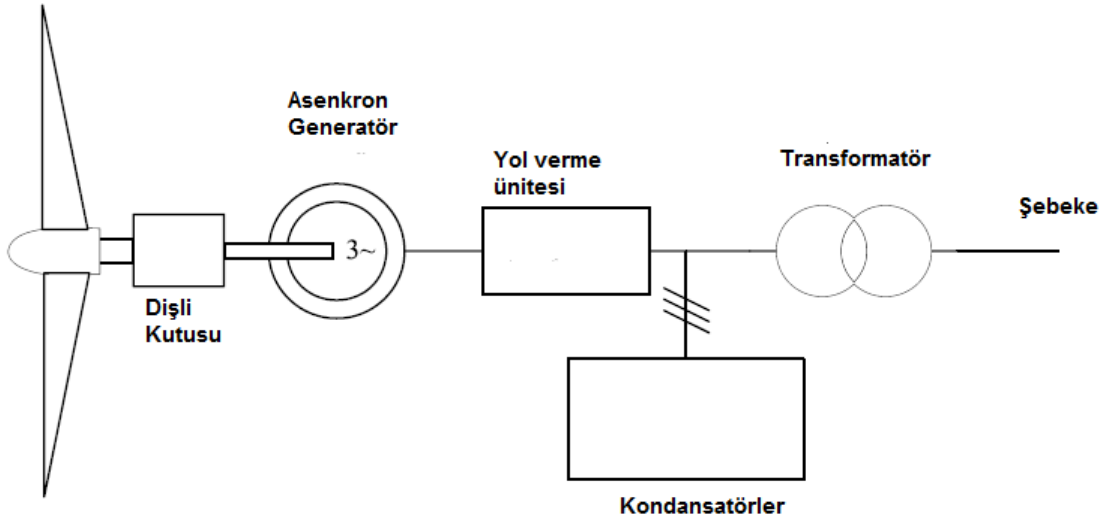
Yatay Eksenli Rüzgar Türbini	Dikey Eksenli Rüzgar Türbini
✓ Rüzgarın hızına ve yönüne göre kanatların açısı ve yönü ayarlanır. Böylece rüzgardan maksimum seviyede faydalanılır. ✓ Verimi yüksektir ✓ Kule sayesinde daha fazla rüzgar gücü elde edilir. ✓ Bölgenin yapısına göre tek kanatlı ve ya çok kanatlı tasarlanabilir. • Kule ve kanatların maliyeti daha yüksektir. Montajı daha zordur. • Çevre radar cihazlarında sinyal karışıklığı yaratabilir. • Görüntü ve ses kirliliği yaratır. • Ekstra kontrol mekanizmaları gerektirir.	✓ Generatör ve dişli kutusu yere yerleştirildiği için bu elemanların bakımı kolaydır. ✓ Kuleye monte edilmesi gerekmez. ✓ Rüzgarı her yönden aldığı için türbini rüzgar yönüne çevirmeye gerek yoktur. ✓ Enerji toprak seviyesinde elde edildiğinden nakli daha kolaydır • Yere yakın olduklarından rüzgar hızı düşüktür. • Verimi düşük. • Bir motor vasıtasıyla ilk hareketin verilmesi gerekir. • Ayakta durabilmesi için tel desteği gerekir. Bu da maliyeti arttırır. • Türbin miline müdahale zordur.

3.2.3.2 Güç Üretim Sistemlerine Göre Rüzgar Türbinleri

Güç Üretim sistemine göre rüzgar türbinleri sabit hızlı ve değişken hızlı olmak üzere iki başlık altında incelenebilir.

3.2.3.2.1 Sabit Hızlı Rüzgar Türbinleri

Sabit hızlı rüzgar türbinleri adından da anlaşılacağı gibi sabit hızda çalıştırılan rüzgar türbinleridir. Rotor hızı şebeke frekansına göre belirlenen bir hıza sabitlenmiştir. Bu tip rüzgar türbinleri şebekeye doğrudan bağlanabilmektedirler. Şekil 3.4'te sabit hızlı rüzgar enerji sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Sabit hızlı rüzgar enerji sistemi

Bu sistemin yapısı, Danimarka’da geliştirildiği ve uygulandığı için “Danimarka konsepti” olarak da bilinir [4].

Asenkron makina, rüzgarın oluşturduğu torkla aynı yönde bir elektromanyetik tork üretir. Kararlı halde, rotorun döner hızı senkron hıza ulaşır ve elektromanyetik tork negatif olur. Bu durumda makina generatör çalışmaya geçer. Generatör, şebekeye doğrudan bağlandığı ve şebeke frekansından etkilendiği için doğal mekanik karakteristiğine göre çalışacaktır. Dolayısıyla rotorun dönüş hızı senkron hıza çok yakın olur. Hatta rüzgardaki dalgalanmalar bile hız üzerinde çok küçük dalgalanmalar yapar.

Sabit hızlı rüzgar türbin sistemlerinde daha çok, basit yapılı, verimli ve düşük maliyetli Sincap kafesli asenkron motorlar tercih edilir. Bu makineler aynı zamanda çok dayanıklı ve stabildir.

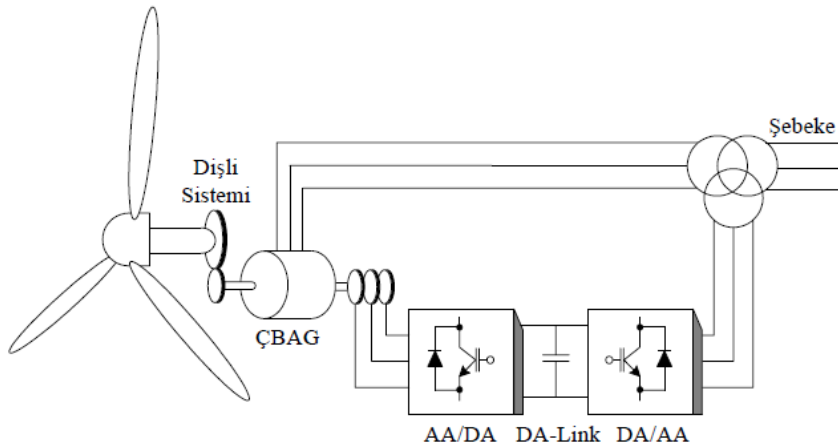
Sincap kafesli asenkron makinelerde, aktif güç üretimini arttırmak için reaktif güç tüketimini arttırmak gerekir. Şebekeden reaktif güç çekişini sınırlamak için sisteme kapasiteler entegre edilmiştir. Yol verme ünitesi ise akımın şebekeye dengeli ve yumuşak biçimde verilmesini sağlar [4].

3.2.3.2.2 Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri

Rüzgar hızı sabit değildir ve geniş bir skalaya sahiptir. Rüzgar türbininin de değişik rüzgar hızlarında ekstra bir modifikasyona ihtiyaç duyulmadan çalışması beklenir. Aynı

zamanda büyük güçlü rüzgar türbinlerini sabit hızda çalıştırmak ekonomik değildir. Bu sebeple değişken hızlı rüzgar türbin sistemleri sabit hızlı sistemlere göre daha fazla uygulama alanına sahiptir. Değişken hızlı rüzgar türbin sistemlerinde çift beslemeli asenkron generatör kullanımı oldukça yaygındır.

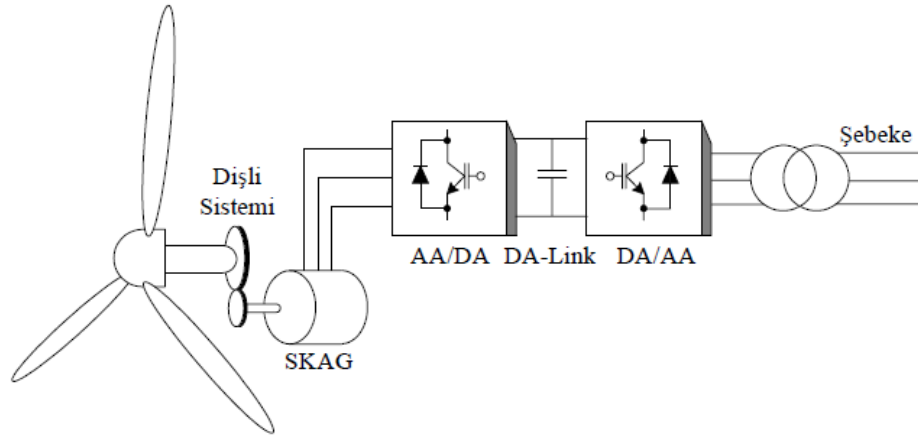
Şekil 3.5'te verilen sistemde, stator sargısı şebekeye doğrudan bağlanmıştır. Rotor sargısı ise iki adet art arda bağlanmış gerilim kaynaklı darbe genişlik modülasyon tekniğini kullanan inverterden oluşan, dört bölgeli güç konverteri üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Genellikle, rotor tarafındaki konverter kontrol sistemi, elektromanyetik torku regüle eder ve makinanın manyetizasyonunu sürdürebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki konverter kontrol sistemi ise, doğru akım hattını regüle eder [10].



Şekil 3.5 Değişken hızlı çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar enerji sistemi

Değişken hızlı rüzgar türbin sistemlerinde kullanılan bir başka generatör ise, sincap kafesli asenkron generatör (SKAG) 'dür

Bu sistemde stator sargısı, doğru akım hattının iki tarafına art arda bağlı gerilim kaynaklı iki darbe genlik modülasyonlu inverterden meydana gelen, dört bölgeli güç konverteri üzerinden şebekeye bağlanır. Stator tarafındaki konverterin kontrol sistemi, elektromanyetik torku regüle eder ve makinanın manyetik alan üretebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki konverter, sistemden şebekeye aktarılan aktif ve reaktif gücü ve aynı zamanda doğru akım hattını regüle eder [10]. Sistem Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6 Değişken hızlı sincap kafesli asenkron generatörlü rüzgar enerji sistemi

3.2.4 Makina Bileşenleri

Rotordan alınan mekanik gücün generatörde elektrik enerjisine çevrilmeden önce mekanik olarak aktarıldığı yer makina bileşenleri olarak geçmektedir.

Örnek olarak, aynı şaft üzerinde kuple edilmiş rotor ve generatörün bulunduğu sistemler olduğu gibi, rotordan generatöre aktarılan hızı dişli kutusu ile arttıran sistemler de bulunmaktadır.

Dişli kutusu kullanan sistemler iki parça olarak incelenebilirler. Bu parçalar düşük hız mili tarafı (DHM) ve yüksek hız mili (YHM) tarafıdır. DHM ve YHM farklı döner hızlara sahiptir. Bu tip sistemler mekanik kırılmalardan tork değişiminden ve yük dalgalanmalarından daha az etkilenmektedirler [4].

3.2.4.1 Düşük Hız Mili

Pervane göbeğini dişli kutusuna bağlar. Bu sistem aerodinamik frenlerin çalışması için hidrolik sisteme ait yapılar içermektedir.

3.2.4.2 Dişli Kutusu

Dişli kutusu vasıtasıyla düşük hız milinden alınan hız arttırılarak yüksek hız miline yansıtılır.

3.2.4.3 Yüksek Hız Mili

Elektrik genaratörünü çalıştıran mildir. Dakikada yaklaşık 1500 devirlik bir hızla döner. Acil durum mekanik freni vardır. Bu fren sistemi, türbin bakımdayken ve ya aerodinamik frenler çalışmadığı zaman kullanılır.

3.2.4.4 Kontrol Ünitesi

Rüzgar türbinini sürekli izleyen, kanatların alacağı açıyı kontrol eden bir arıza anında türbini durduran sistemdir. Bu sistem aynı zamanda rüzgar türbininin verimli çalışmasını sağlamaktadır.

3.2.4.5 Kanat Açı Mekanizması

Kanat ile makinanın rüzgarın yönüne göre döndürüldüğü yerdir. Bu işlem için elektrik motorlarından faydalanılır. Yelkovan adı verilen bir mekanizma ile rüzgar yönünü tayin eden elektronik kontrol ünitesi maksimum enerji elde etmek için uygun olan kanat açısını ayarlar.

3.2.4.6 Anemometre ve Yelkovan

Anemometre rüzgar hızını ölçmede yelkovan ise rüzgarın yönünü tayin etmede kullanılmaktadır. Bu ünitelerden gelen sinyaller elektronik kontrol ünitesi tarafından algılanır. Buna göre rüzgar türbini çalıştırılır. Örneğin rüzgar hızı 5m/s olduğunda kanatlar döndürülürken 25m/s olunca koruma amaçlı durdurulabilir.

3.2.5 Yerel Elektrik Şebekesine Bağlantı Elemanları

Rüzgar enerjisi türbinde üretildikten sonra kullanılan sisteme göre doğrudan veya ara elemanlar vasıtasıyla elektrik şebekesine aktarılır.

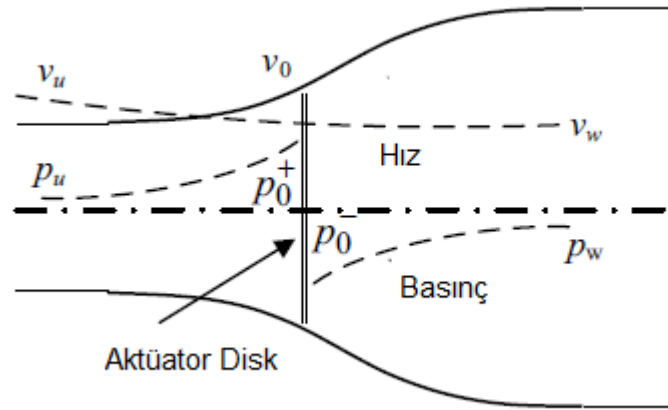
Sabit hızlı sistemler direk olarak şebekeye bağlanabilmektedirler. Değişken hızlı sistemler ise şebekeye doğrudan bağlanmazlar. Çeşitli güç elektroniği elemanları ile şebekeye entegre edilirler.

RÜZGAR TÜRBİNİNİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

4.1 Rüzgar Türbin Aerodinamikleri

Rüzgar türbini rotorunun yaptığı hareket, havanın türbin kanatlarından akışına göre şekillenmektedir. Dolayısıyla rotorun hareketinde kanat profili belirleyici olmaktadır [2].

Rüzgar türbininin aerodinamik hareketi, hava akışına maruz kalmış bir aktüatör disk ile açıklanabilir.



Şekil 4.1 Aktüatör disk üzerinde hava akışı

Disk önündeki hız ve basınç v_u ve p_u olarak, disk üzerindeki hız ve basınç v_0 ve p_0 olarak diskin arkasındaki hız ve basınç v_w ve p_w olarak gösterilmiştir.

A alanından m kütleli bir havanın akışı sırasında oluşacak momentum denklem (4.1)'de verilmiştir.

$$M = m(v_u - v_w) \quad (4.1)$$

Hava akışının oluşturduğu kuvvet ise momentin zamana oranından bulunmaktadır. Denklik (4.2)'de bu denklem türbine uygulanmıştır.

$$F = \frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{\Delta m(v_u - v_w)}{\Delta t} = \frac{\rho A v_0 \Delta t (v_u - v_w)}{\Delta t} = \rho A v_0 (v_u - v_w)$$

$$F = A(p_0^+ - p_0^-) \quad (4.2)$$

Bernoulli eşitliğine göre basınç farkı (4.3)'te verilmiştir [4].

$$p_0^+ - p_0^- = \frac{1}{2} \rho (v_u^2 - v_w^2) \quad (4.3)$$

Bu durumda eşitlik (4.2)'yi de kullanarak kuvveti bulabiliriz.

$$F = \frac{1}{2} \rho A (v_u^2 - v_w^2) \quad (4.4)$$

v hızıyla hareket eden ve m kütlesine sahip havanın oluşturduğu kinetik enerji (E_k) denklem (4.5)'te verilmiştir.

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (4.5)$$

Diskten geçen havanın kütlesinin (m), havanın yoğunluğu (ρ) ve akış hızının (v_0) çarpımı olduğu kabul edilirse diskte oluşan güç ifadesi denklem (4.6)'da verildiği gibi olur.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v_0 (v_u^2 - v_w^2) \quad (4.6)$$

Denklemin tekrar düzenlenmesi için (4.7)'deki eşitlikler göz önüne alınsın.

$$v_0 = \frac{1}{2} (v_u + v_w) \rightarrow v_u - v_w = 2 (v_u - v_0)$$

$$a = 1 - \frac{v_0}{v_u} \quad (4.7)$$

(4.7)'deki denklemlere göre (4.6)'daki denklem tekrar düzenlenerek diskin yakaladığı havanın gücü (4.8)'de verildiği gibi hesaplanır.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 4a (1 - a)^2 \quad (4.8)$$

Rüzgar türbini güç katsayısı rüzgardan yakalanan gücün, toplam rüzgar gücüne oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$C_p = \frac{P}{P_t} = \frac{0.5 \rho A v^3 4a (1 - a)^2}{0.5 \rho A v^3} = 4a (1 - a)^2 \quad (4.9)$$

C_p rüzgar türbini güç katsayısı $a = 1/3$ için $C_p = 0.59$ maksimum değerini alır. Bu değer Betz faktörü olarak adlandırılmaktadır [5].

4.2 Rüzgar Türbini Performansı

Rüzgar türbini rüzgarın mekanik enerjisinin elektrik enerjisine aktarıldığı sistemler olması sebebiyle rüzgar türbin performansı rüzgarın hızıyla doğrudan bağlantılıdır.

Performansı karakterize etmek için genelde kabul gören yöntem boyutu olmayan karakteristik eğriler kullanmaktır [6].

Kanat uç hız oranı (tip speed ratio) λ ile gösterilir ve rotorun çizgisel hızının, yani kanat uç hızının rüzgar hızına oranı olarak tanımlanır.

$$\lambda = \frac{R \omega_r}{v} \quad (4.10)$$

Denklem (4.10)'da "R" rotor çapı, " ω_r " rotorun hızı ve "v" rüzgarın hızı olarak tanımlanmıştır.

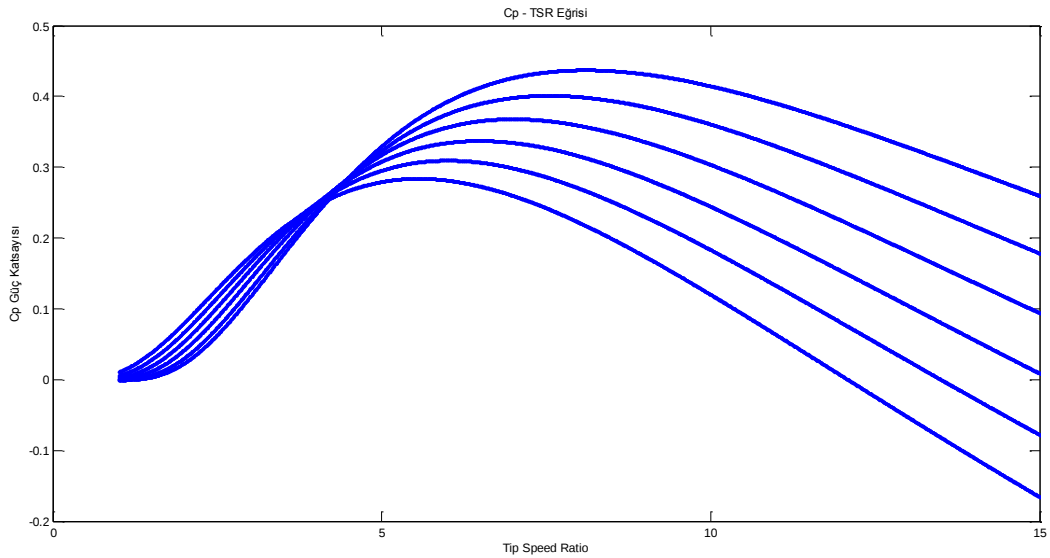
Güç katsayısı (C_p) rüzgar türbininin rüzgar gücünün ne kadarını tutabildiğini belirleyen bir katsayıdır. Rüzgar türbininin aerodinamik performansını ise $C_p - \lambda$ eğrisi belirlemektedir.

Rüzgarın güç katsayısı (λ) ile kanat açısı (β) arasındaki ilişki rüzgar kanat bileşenleri teorisi ve aerodinamik hesaplar yoluyla kestirilebilmektedir. Bu konuda pek çok yaklaşım bulunmakla beraber en fazla kabul gören formül denklem (4.11)'te verilmiştir.

$$c_p(\lambda, \beta) = 0.22 \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4.11)$$

Şekil 4.2 'de üç kanatlı bir rüzgar türbini için, kanat açısı 0,2,4,6,8 ve 10° olarak değişen $C_p - \lambda(\text{TSR})$ eğrileri görülmektedir.



Şekil 4.2 $C_p - \lambda(\text{TSR})$ eğrileri

Rüzgar türbin kontrolünde önemli olan nokta türbinden maksimum verimi almaktır.

Verim konusu da şekil 4.2'de belirtilen $C_p - \lambda$ eğrisi ile ilişkilidir. Genelde rüzgar türbini kontrolündeki eğilim optimum kanat uç hız oranını yakalamaktır.

Tork katsayısı C_T , rotorun çıkış torkunu karakterize etmektedir. Güç katsayısının kanat uç hız oranına oranından hesaplanmaktadır.

$$C_T = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \quad (4.12)$$

$C_T - \lambda$ eğrisi $C_p - \lambda$ eğrisinden ekstra bir bilgi içermemektedir. Dolayısıyla modelleme ve kontrolcü tasarımı daha çok $C_p - \lambda$ eğrisinden faydalanılmaktadır [4].

4.3 Rüzgar Türbini Modelleri

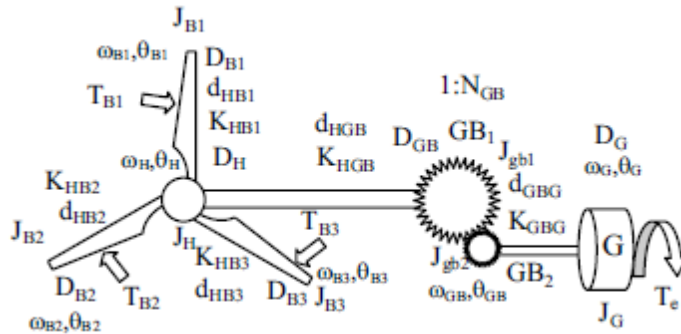
Rüzgar türbin modellenmesinde aşağıda verilen dört model özellikle güç sistemleri analizi ve kontrolcü tasarımı alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [13].

- Altı Kütle-Yay-Damper Sistemi
- Üç Kütle-Yay-Damper Sistemi
- İki Kütle-Yay-Damper Sistemi

- Tek Kütle-Yay-Damper Sistemi

4.3.1 Altı Kütle-Yay-Damper Sistemi

Altı kütle-yay-damper sisteminin yapısı şekil 4.3'te gösterilmiştir. Bu model üç kanat eylemsizlik momenti (J_{B1}, J_{B2}, J_{B3}), merkez eylemsizlik momenti (J_H), dişli kutusu eylemsizlik momenti (J_{GB}) ve generatörün eylemsizlik momenti (J_G) olmak üzere altı adet eylemsizlik momentinden oluşur. θ açısal pozisyonu, ω ise açısal hızı ifade eder. Bitişik kütleler arasındaki oluşmuş esneklik yay sabiti ile belirlenir. Yay sabitleri K ile gösterilmiştir [13].



Şekil 4.3 Altı kütle-yay-damper sistemi

Bitişik kütleler arası ortak damper sabitleri d_{HB1} , d_{HB2} , d_{HB3} , d_{HGB} , ve d_{GBG} ile gösterilmiştir. Kütlelerin ayrı olarak sahip oldukları sönümlendirme elemanları, tork kayıplarına sebep olur. Bu tork kayıpları D_{B1} , D_{B2} , D_{B3} , D_H , D_{GB} , and D_G olarak gösterilmiştir.

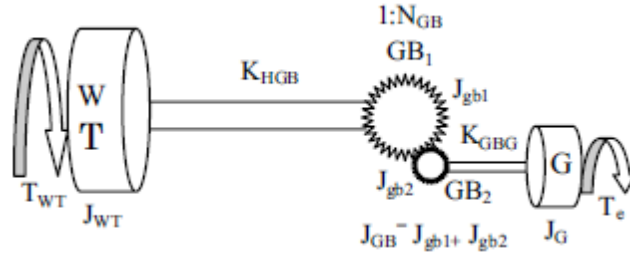
Modelin gerek duyduğu generatör torku T_E ile kanatların aerodinamik torku T_{B1} , T_{B2} ve T_{B3} ile türbinin toplam torku T_{WT} ile gösterilmiştir. Modelde merkez ve dişli üzerindeki tork ihmal edilmiştir.

4.3.2 Üç Kütle-Yay-Damper Sistemi

Üç kütle yay damper sisteminde, üç kanat ve merkezin toplam ağırlığı, generatörün ağırlığı ve dişli kutusunun ağırlığı üç ayrı kütle olarak düşünülür. Üç kanat ve merkez kendi içerisinde tek bir kütle olarak değerlendirildiği için; merkez ile kanatlar arası olan

damper sabiti ihmal edilir. Türbin torku, T_{WT} kanat torklarının toplamı olarak kabul edilir [13].

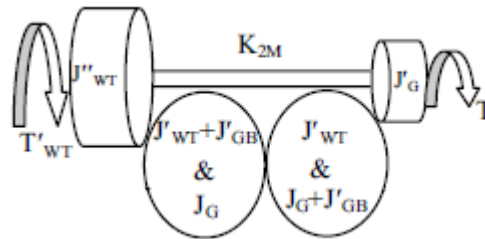
Sistem Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Üç kütle-yay-damper sistemi

4.3.3 İki Kütle-Yay-Damper Sistemi

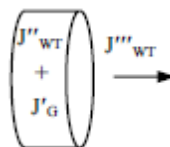
İki kütle-yay-damper sisteminde; kanat ve merkez bir kütle generatör ve mekanik elemanların bulunduğu taraf ayrı bir kütle olarak modellenir [13]. Kanatların bulunduğu kısım ile makina tarafı bir mil ile bağlanarak model oluşturulur. Sistem kullanılırken dişli kutusunun iki tarafındaki düşük hız mili ve yüksek hız mili dikkate alınmalıdır.



Şekil 4.5 İki kütle-yay-damper sistemi

4.3.4 Tek Kütle-Yay-Damper Sistemi

Tek kütle-yay damper sisteminde tüm sistem tek bir kütle olarak düşünülür. Bu sistem normal dönen bir disk sistemi gibi çalışır [13]. Sistem Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Tek kütle-yay-damper sistemi

DURUM UZAYI MODELİ VE KONTROL YÖNTEMLERİ

Yapılan tez çalışmasında rüzgar türbini durum uzayı formunda modellenmiştir. Bu bölümde durum uzayı modeli ve tez çalışmasında kullanılan kontrol yöntemlerinden bahsedilmiştir.

5.1 Durum Uzayı Modeli

Kontrol teorisinde transfer fonksiyonu giriş ve çıkış arasındaki ilişkiyi ifade ettiği için kullanılır. Ancak çok giriş-çıkışlı, lineer olmayan veya zamanla değişen sistemlerde sadece transfer fonksiyonu ile sistemin kontrol edilmesi zor ve bazen imkansızdır. Durum uzayında modelinde sistemin modelini oluşturan diferansiyel denklemler sistemin durum değişkenleri giriş ve çıkışına göre düzenlenerek matris formunda ifade edilirler.

Bir sistemin durumları sistem içerisinde türevi alınabilen ve sistemin dinamik davranışını belirleyen büyüklüklerdir. Durum uzayı gösterimi (5.1)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax(t) + Bu(t) \\ y &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \tag{5.1}$$

Durum uzayı gösteriminde, durum değişkenleri x ile girişler u ile çıkış ise y ile ifade edilmiştir.

5.1.1 Bir Sistemin Çözümü

Bir sistemin davranışını belirlemek için sistem çözümüne ihtiyaç duyulur. Sistemin davranışının bulunması için transfer fonksiyonunun ve durum geçiş matrisinin belirlenmesi gerekmektedir.

5.1.1.1 Transfer Fonksiyonunun Çıkarılması

Bir sistemin girişi ile çıkışı arasındaki ilişki transfer fonksiyonu ile belirlenmektedir. Daha önce (5.1) denkleminde verilen durum uzayı gösteriminden transfer fonksiyonu çıkarılmasında (5.2)'de verilen adımlar uygulanmaktadır.

$$\begin{aligned} sX(s) - X(0) &= AX(s) + BU(s) \\ Y(s) &= CX(s) + Du(s) \\ X(s) &= [sI - A]^{-1}X(0) + [sI - A]^{-1}BU(s) \\ Y(s) &= C[sI - A]^{-1}X(0) + BU(s) + DU(s) \end{aligned} \quad (5.2)$$

Başlangıç koşullarının $x(0) = 0$ alınması durumunda transfer fonksiyonu (5.3)'teki gibi olacaktır.

$$\begin{aligned} Y(s) &= C[sI - A]^{-1}BU(s) + DU(s) \\ G(s) &= \frac{Y(s)}{U(s)} = C[sI - A]^{-1}B + D \end{aligned} \quad (5.3)$$

5.1.1.2 Durum Geçiş Matrisi

$u(t)=0$ için $x(0)$ 'ı $x(t)$ 'ye taşıyan matrise durum geçiş matrisi denir ve $\Phi(t)$ ile gösterilir.

$$\Phi(t) = \mathcal{L}^{-1}[sI - A]^{-1} \quad (5.4)$$

5.1.1.3 Bir Sistemin Tam Çözümü

Durum uzayı formunda verilmiş bir sistemin tam çözüm denklemi denklem (1.5)'te verilmiştir.

$$y(t) = Ce^{At}x_0 + C \int_0^t e^{A(t-\tau)} Bu(\tau) d\tau + Du(t) \quad (5.5)$$

Bu denklemde, " $Ce^{At}x_0$ " terimi sistemin öz çözümünü " $C \int_0^t e^{A(t-\tau)} Bu(\tau) d\tau + Du(t)$ " terimi zorlanmış çözümü belirtmektedir.

5.1.2 Benzerlik Dönüşümleri

T , tekil olmayan matrisin üzerinden yapılan $A = T^{-1}AT$ dönüşümüne benzerlik dönüşümü adı verilir. Daha önce (5.1)'de durum uzayında ifade edilmiş sistem için bu dönüşüm, $x = Tx$ şeklinde uygulandığında sistem (5.6)'daki gibi olacaktır.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A\dot{x}(t) + Bu(t) \\ y(t) &= C\dot{x}(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (5.6)$$

Denklem (5.6) düzenlendiğinde (5.7)'deki hali alacaktır.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= T^{-1}A\dot{x}(t) + T^{-1}Bu(t) \\ y(t) &= C\dot{x}(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (5.7)$$

Bu noktada $A = T^{-1}AT$, $B = T^{-1}B$, $C = CT$ ve $D = D$ olarak ifade edildiğinde sistemin benzerlik dönüşümü tamamlanmış olur.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A\dot{x}(t) + Bu(t) \\ y(t) &= C\dot{x}(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Sisteme uygulanan benzerlik dönüşümü sistemin boyutunu değiştirmez. A matrisi ve A matrisleri benzer matrislerdir. Aynı zamanda sistemin kutupları (kökleri) bu dönüşümden etkilenmeyecektir.

5.1.3 Özdeğerler ve Özvektörler

$A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ve $\mathbb{C}^n$ için $Av_0 = \gamma v_0$ sağlayan $v_0 \neq 0$ vektörleri o sistemin öz vektörleri γ değerleri ise sistemin öz değerleridir. Sistemin özdeğerleri denklem (5.9)'da olduğu gibi hesaplanabilir.

$$\det(\gamma I - A) = 0 \quad (5.9)$$

Aynı şekilde özvektörleri de (5.10)'daki gibi hesaplayabiliriz.

$$A - \gamma I \quad v_{\hat{o}} = 0 \quad (5.10)$$

Buradaki γ değerleri sistemin karakteristik polinomunun kökleridir yani sistemin kutuplarıdır. Sistemin davranışını kökleri belirlemektedir.

5.1.4 T Dönüşüm Matrisinin Elde Edilmesi

Özdeğerleri ve özvektörleri bilinen bir sistemde A matrisini köşegen kılacak T dönüşüm matrisi n adet özvektörü olan bir sistem için, (5.11)'deki gibi ifade edilebilir.

$$T = \begin{bmatrix} | & | & \dots & | \\ v_{\hat{o}_1} & v_{\hat{o}_2} & \dots & v_{\hat{o}_n} \\ | & | & \dots & | \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

5.2 Kontrol Edilebilirlik Gözlenebilirlik ve Kararlılık

Bir sistemi bütünüyle anlayabilmek ve o sisteme dair kontrolcü ve ya gözlemci tasarlayabilmek için sistemin belli başlı özelliklerinden, kontrol edilebilirlik, gözlenebilirlik ve kararlılık durumunun incelenmesi gerekir.

5.2.1 Kontrol Edilebilirlik

Bir sistemde yer alan tüm durumlar kontrol sinyali ile kontrol edilebiliyorsa bu sistemin kontrol edilebilir olduğunu gösterir. Bir başka deyişle, her $x^*(t)$ ve $T>0$ için $0<t<T$ aralığındaki durumları $x(0)=0$ ilk halden $x(T)=x^*$ 'a götüren bir $u(t)$ kontrol sinyali varsa o sistem kontrol edilebilirdir.

Durum uzayı formunda verilmiş bir sistemde, özdeğerler katlı değilse, A matrisini köşegen kılan T dönüşüm matrisi (5.11)'de verilmişti.

T^{-1} matrisi ise bu durumda (5.12)'deki gibi ifade edilir.

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} -w_1- \\ : \\ -w_n- \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Daha önce (5.7)'de verilen benzerlik dönüşümü yapılmış sistemi de göz önünde bulundurarak kontrol sinyali $u(t)$ 'nin sisteme müdahale edemeyeceği durumun

sistemin kontrol edilemeyeceği durum olduğunu söyleyebiliriz. Bu da $B=0$ olması durumudur.

$$T^{-1}B = \begin{matrix} -w_1- \\ \vdots \\ -w_n- \end{matrix} B = 0 \quad (5.13)$$

Tersi durumda da $T^{-1}B$ matrisinin hiçbir satırı tamamen 0 değilse yani tam ranklıysa sistem bütünüyle kontrol edilebilirdir.

5.2.1.1 Kontrol Edilebilirlik Testi

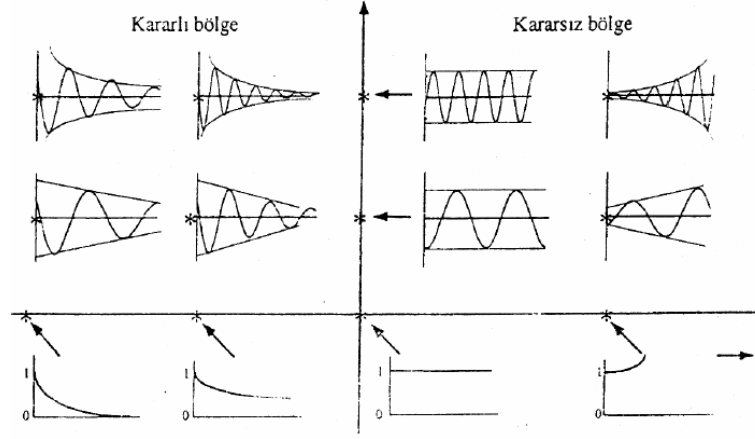
Durum uzayı formunda verilmiş bir sistemde $A = nxn$ boyutlu bir matris olmak üzere kontrol edilebilirlik matrisinin rankı “n” olması durumunda o sistem kontrol edilebilirdir. Kontrol edilebilirlik matrisi (5.14)’te verilmiştir.

$$Q_C = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & \dots & A^{n-1}B \end{bmatrix} = n \quad (5.14)$$

5.2.2 Kararlılık

Lineer bir sistemin özdeğerlerinin yani kutuplarının kök yer eğrisinde sol yarı düzlemde olması o sistemin kararlı olduğunu gösterir. Yani $\gamma_{reel} > 0$ olması durumunda sistem kararlıdır. Bu durumda kontrol sinyali $u(t)=0$ olduğunda bile $t \rightarrow \infty$ ‘a giderken durum değişkenleri $x(t) = 0$ olacaktır.

Kararlı bir sistem bozucu bir giriş karşısındageçici durum davranışı gösterdikten sonra tekrar denge konumuna dönen sistemdir.



Şekil 5.1 Sistemin kutuplarının kök yer eğrisi üzerindeki yerlerine göre sistemin darbe cevabı

Sistemler lineer zamanla değişen ve değişmeyen sistemler olarak ikiye ayrılabilir. Lineer zamanla değişmeyen sistemlerde kararlılık incelenmesinde, sistemin doğal cevabına bakılır. Doğal cevap zamanla sonsuza gidiyorsa sistem kararsız, zamanla sabit kalıyorsa sistem marjinal kararlıdır. Örnek olarak imajiner ekseninde kutbu olan sistemlerin cevapları osilasyonlu olur ve marjinal kararlı olarak değerlendirilir.

5.2.2.1 Kararlı Kılınabilirlik

Bir sistemde özdeğerlerin tümü kararlı olmayabilir. Kararlı olmayan özdeğerler $u = Fx$ şeklinde bir geri beslemeyle kararlı düzleme çekilebiliyorsa yani $A+BF$ kararlılık matrisi oluşturulabiliyorsa sistem kararlı kılınabilir bir sistemdir. Bu durumda kararsız kutuplar yönetilebiliyordur.

Bir başka deyişle, her $\gamma_{reel} \geq 0$ ve $A = nxn$ boyutlu bir matris olmak üzere

$$\text{rank } A - \gamma I = n \quad (5.15)$$

sağlayan sistemler kararlı kılınabilir sistemlerdir [11].

5.2.3 Gözlenebilirlik

Bir sistemde $x(t_0)$ ilk hali $y(t)$ ve $u(t)$ giriş çıkış ölçümleri ile $T > 0$ için $0 < t < T$ zaman aralığında belirlenebiliyorsa $x(t)$ durumu gözlenebilirdir. Sistemde tüm durumlar gözlenebiliyorsa o sistem gözlenebilirdir.

Bir başka deyişle, özdeğerleri katlı olmayan bir sistemde T matrisi (5.11)'de verildiği gibiydi. (5.16)'da verilen koşulu sağlayan sistemler gözlenebilirdir

$$CT = C \begin{bmatrix} | & | & \dots & | \\ v_{\delta 1} & v_{\delta 2} & \dots & v_{\delta n} \\ | & | & \dots & | \end{bmatrix} = 0 \quad (5.16)$$

Tersi durumda, CT matrisinin hiçbir satırı tümüyle sıfır değilse sistem gözlenemez.

5.2.3.1 Gözlenebilirlik Testi

Bir sistemin gözlenebilir bir sistem olup olmadığı gözlenebilirlik testiyle anlaşılır. Durum uzayı formunda verilmiş bir sistemde $A = nxn$ boyutlu bir matris olmak üzere:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} = n \quad (5.17)$$

sağlayan sistemler gözlenebilir sistemlerdir.

5.3 Rüzgar Türbini Kontrol Yöntemleri

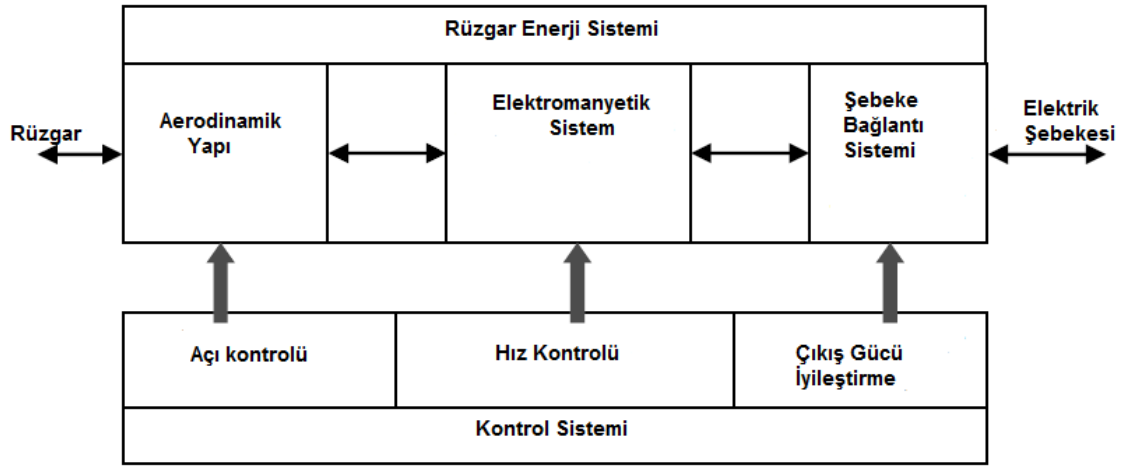
Rüzgar türbini kontrolü kontrol mühendisliğinde önemli bir araştırma alanıdır. Rüzgar türbini ölçüm gürültüsü, rüzgar ve bozucu girişten oluşan dinamik bir sistem olarak tanımlanmaktadır [7].

Rüzgar türbini çalışma aralığı rüzgar hızına göre devreye girme rüzgar hızı ve devreden çıkma rüzgar hızıyla sınırlandırılmıştır. Rüzgarın hızı çok düşük olduğu türbinin üreteceği enerji harcayacağı enerjiyi kompanze etmeye yetmez. Bir başka deyişle, rüzgarın hızı türbini kaldırmaya ve ya çevirmeye yetmeyecektir. Rüzgarın hızı çok yüksek olduğunda ise, türbini çevirmek rüzgar türbininin mekanik yapısına zarar verebileceği, elektriksel fazla yükleme yapabileceği ve sonuç olarak güvenli bir çalışma sağlayamayacağı için tercih edilmemektedir. Devreye girme ve devreden çıkma rüzgar hızları türbin yapısına göre değişiklik göstermekle beraber, genel olarak devreye girme rüzgar hızı 3-4 m/s devreden çıkma rüzgar hızı ise 20-25 m/s olarak tercih edilmektedir.

Rüzgar türbini kontrol sistemleri temel olarak aşağıdaki maddelerin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır.

- Devreye girme ve devreden çıkma rüzgar hızına göre türbinin çalışma aralığının kontrolü
- Rüzgar türbininin rüzgardan maksimum enerjiyi yakalayabilmesi için türbinin hızının kontrolü
- Kanat kanat açısının kontrolü
- Üretilen elektrik enerjisinin şebekeye entegre edilmesi

Kontrol sisteminin ana kontrol şeması şekil 5.2’de verilmiştir [7].



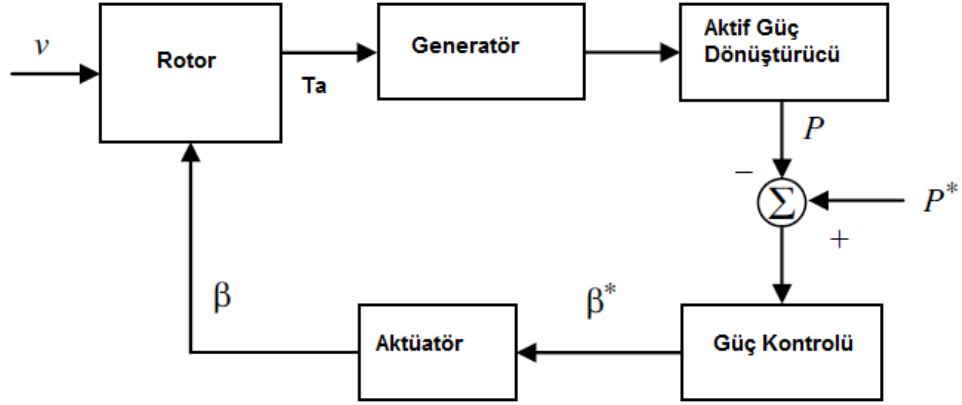
Şekil 5.2 Rüzgar türbini kontrol sistemi ana şeması

5.3.1 Kanat Açısı Kontrol Yöntemleri

Rüzgar türbininde kanat açısının ayarlanması rüzgardan yakalanan gücü arttıracığı için önem teşkil etmektedir. Kanat açısı kontrol yöntemi olarak aktif kanat açısı kontrolü ve pasif kanat açısı kontrolü incelenmiştir.

5.3.1.1 Aktif Kanat Açısı Kontrolü

Bu kontrol yönteminde kanat açısı değiştirilerek, türbin rotorunun dönüş hızı dolayısıyla rüzgardan yakalanabilecek enerji ayarlanır. Aktif kanat açısı kontrol sisteminin genel şeması Şekil 5.3’te verilmiştir [4].



Şekil 5.3 Aktif kanat açısı kontrol sistemi

5.3.1.2 Pasif Kanat Açısı Kontrolü

Bu kontrol yönteminde kendi kendine çalışan kontrolcüler kullanılmaktadır. Pasif kanat açısı değişimi kontrolünde temel düşünce kanatı yüksek hızlarda burularak istenen kanat açısı değişimi açısına ulaşacak şekilde tasarlamak, bu şekilde güç kontrolü sağlamaktır. Prensip mantıklı ve basit gözükse de uygulamada bunu başarmak zordur. Çünkü güç kontrolü için gerekli burulma ile kanat üzerine gelen yüklerin oluşturduğu burulma birbiriyle uyumlu olmadığı için sorun teşkil edebilir [8].

5.3.2 Rotor Hız Kontrol Yöntemleri

Rotor hızı kontrolünde sabit kanat uç hız oranına bağlı kontrol çoğunlukla tercih edilmektedir.

Daha önce de değinildiği gibi, rüzgar enerjisi sistemlerinin büyük çoğunluğu daha verimli ve ekonomik olan değişken hızlı sistemler olarak tasarlanırlar. Bu kontrol yönteminde, değişken rotor hızı sayesinde kanat uç hız oranını en verimli işletilen aralıkta sabit tutarak sistemin verimini arttırabiliriz.

İdealde maksimum verim türbin kanat hızının rüzgâr hızı değişimi ile sürekli olarak ayarlanması durumunda elde edilir. Ancak belli hızlar için güç katsayısı incelendiğinde güç katsayılarının yani rüzgardan yakalanan gücün veriminin birbirine çok yakın olduğunu görürüz pratikte türbin hızını sürekli değiştiren bir kontrolcü tasarımı zor ve sistem için yorucu olabilir. Bu durumda belli kademeler seçilip ona göre kontrol gerçekleştirilebilir.

5.3.3 Durdurma Kontrolü

Rüzgar türbininin istenen rüzgar hızı aralığında çalışması ve istenildiğinde durdurulması gerekmektedir. Bu sebeple sistemde durdurmayı gerçekleştirecek bir kontrolcü gerekmektedir.

5.3.3.1 Aktif Durdurma Kontrolü

Aktif durdurma kontrolü aerodinamik gücü kanat açısını değiştirerek düşürmeyi sağlar. Kanat açısındaki küçük değişimler çıkış gücünü istenen seviyede muhafaza etmek için yeterlidir [4].

5.3.3.2 Pasif Durdurma Kontrolü

Bu yöntem güç kontrolünde kullanılan en basit yöntemdir. Rüzgar hızı arttığı zaman sabit kanat açısında ve hızda bile pasif durdurma gerçekleştirilebilir.

Bu yöntemde özel olarak dizayn edilmiş kanatlar, maksimum güçte durdurma kontrolünü yapar. Rüzgarın hızı belirlenen maksimum hızı geçtiği zaman, çıkış gücü belirli bir üst değere ulaşır ve türbini durdurmaya başlar. Bu yöntem bazı rüzgar profillerinde, durdurmayı gerçekleştiremeyebilir. Bu durumda, türbin güvenliği sağlanamadığı ve kanatlarda kırılmalar yaşandığı için tercih edilmemektedir [4].

5.3.4 Kutup Atama Tasarımı

İncelenen sistemde rotorun hız kontrolü kutup atama tasarımıyla yapılmıştır. Bu bölümde kutup atama tasarımından bahsedilecektir.

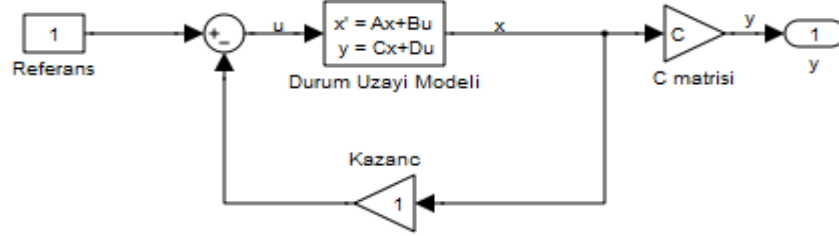
Kutup atama tasarımı yöntemi özellikle durum uzayında modellenen sistemlerin kontrolünde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Kutup atama; kararlılığın sağlanmasında, sistemin basitleştirilmesinde ve kontrolcü tasarımında kullanılmaktadır.

Kutup atama mantık olarak, sistemin kutuplarının çıkış geri besleme ve ya durum geri besleme yöntemlerinden biriyle istenen değerlere atanmasıdır. Bu yöntem ile kapalı çevrim kutuplarının yerleştirildiği noktalara bağlı olarak sistemin kararlılığı ve çıkışı konusunda istenilen sonuçlar elde edilebilir. Yani sistem istenilen doğrultuda kontrol edilebilir. Kutup atama yöntemiyle kutupların yerleştirileceği noktalar çalışılan sistemin

yapısına göre üst aşım, yükselme zamanı gibi değerlerin belirlenmesiyle ortaya çıkabileceği gibi daha karmaşık sistemlerde deneme yanılma yöntemiyle de belirlenebilmektedir. Kutup atama yöntemi temel olarak iki ana başlık altında incelenebilir.

5.3.4.1 Durum Geri Beslemesi Yöntemiyle Kutup Atama

Durum geri beslemesi yöntemiyle kutup atamada sistemin durumları sabit bir kazanç ile kuvvetlendirilip sisteme verilir. Yöntemin blok şeması Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4 Durum Geri Beslemesi Yöntemiyle Kutup Atama

Bu yöntemde sistemin durumları kazanç matrisiyle sisteme kontrol sinyali olarak verilmektedir. Sistem (5.1)'deki gibi durum uzayı formunda verilmiş olsun.

Kontrol sinyali geri besleme kazanç matrisi ve durumların çarpımı olarak verilir.

$$u = -Kx \quad (5.18)$$

Bu durumda sistemin yeni durum uzayı formu (5.19)'deki gibi olacaktır.

$$\begin{aligned} x &= (A - BK)x(t) + Bu(t) \\ y &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (5.19)$$

Burada durum geri beslemesi kazanç matrisinin belirlenmesi problemi ortaya çıkar. K matrisinin belirlenmesinde sistemin karakteristik polinomundan faydalanılır. Sistemin karakteristik polinomu (5.20)'de verildiği gibi kabul edilsin:

$$sI - A = s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n \quad (5.20)$$

Sistemin kutuplarının atanmak istediği polinom ise (5.21)'deki gibi elde edilebilir.

$$s - p_1 \quad s - p_2 \quad \dots \quad s - p_n = s^n + \beta_1 s^{n-1} + \dots + \beta_{n-1} s^{n-1} + \beta_n \quad (5.21)$$

Bu iki karakteristik denklem birbirlerine eşitlenerek K matrisi oluşturulabilir. T^{-1} olarak verilen matris dönüşüm matrisidir.

$$K = [\beta_n - a_n \quad \beta_{n-1} - a_{n-1} \quad \dots \quad \beta_1 - a_1] T^{-1} \quad (5.22)$$

K matrisinin hesaplanmasında sıklıkla kullanılan yöntem ackermann formülüdür. Kapalı çevrim sisteminin karakteristik matrisi A olarak tanımlansın.

$$A = A - BK \quad (5.23)$$

Kapalı çevrim sisteminin karakteristik denklemi ise (5.26)'daki gibi tanımlanır.

$$sI - A + BK = sI - A = s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s^{n-1} + a_n \quad (5.24)$$

Ackermann formülü Cayley-Hamilton teoreminden de faydalanarak K matrisini (5.25)'de verildiği gibi hesaplayabilir.

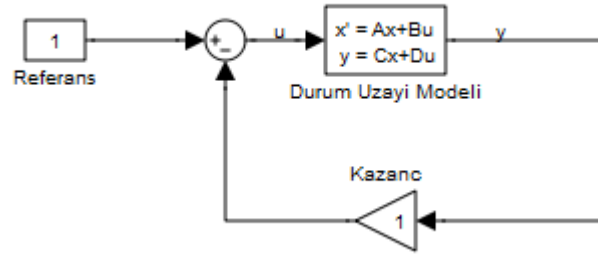
$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} Q_C^{-1} \phi(A) \quad (5.25)$$

Denklemden verilen ifadeler Q_C kontrol edilebilirlik matrisi, ϕ A ise Cayley Hamilton teoreminden faydalanarak oluşturulmuş karakteristik matristir.

5.3.4.2 Çıkış Geri Beslemesi Yöntemiyle Kutup Atama

Kapalı çevrimli sistem bir kez tasarlandıktan sonra durum değişkenlerinin nasıl geri besleneceği gibi gerçeklemeye yönelik iki sorunla karşı karşıya kalınır. İlk olarak durum değişkenlerinin sayısı çok fazla olabilir ve geribeslemek için bu değişkenlerin ölçülmesi yüksek masraf nedeniyle tasarımı engeller. İkinci sorun tüm durum değişkenlerinin fiziksel olarak erişilemez olmasından kaynaklanır. Bundan dolayı çıkış geri beslemeli kutup yerleştirme pratikte daha çok tercih edilmektedir [16].

Bu yöntemin blok şeması Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Çıkış geri beslemesi yöntemiyle kutup atama

Çıkış geri beslemesi ile kutup atama yönteminde kontrol sinyali (5.28)'de verildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$u = -Ky = -KCx \quad (5.26)$$

Bu durumda kapalı çevrim sistem için durum uzayı formu tekrar düzenlenerek (5.27)'daki form elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A - BKC)x(t) + Bu(t) \\ y &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (5.27)$$

Daha önce durum geri beslemeli kutup atama tasarımında olduğu gibi amacımız kapalı çevrim kutuplarının istenen kutup değerlerine atanmasını sağlamaktır. Kapalı çevrim sisteminin karakteristik polinomu (5.28)'da verildiği gibi bulunabilir.

$$sI - A + BKC = s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n \quad (5.28)$$

Bu karakteristik polinom ile istenen kutupların olduğu karakteristik polinomu birbirine eşitleyerek K matrisinin değerlerini bulabiliriz.

5.3.5 Sinirsel Bulanık Mantık Denetimi

Sinirsel bulanık mantık yaklaşımı, yapay sinir ağlarının öğrenme yeteneği, en uygunu bulma ve bağlantılı yapılar gibi bulanık mantığın insan gibi karar verme ve uzman bilgisi sağlama kolaylığı gibi üstünlüklerinin birleştirilmesi fikrine dayanmaktadır. Böylece bulanık mantık sistemlerine sinir ağlarının öğrenme ve hesaplama gücü verilebilmektedir.

Sinirsel bulanık denetiminde asıl amaç, sinirsel bulanık denetim sistemlerinin yapısını, değişkenlerini ayarlamak ve bulmak için sinirsel öğrenme teknikleri uygulamaktır.

Modern sinirsel bulanık sistemler genellikle ileri beslemeli ve çok katmanlıdırlar. Son yıllarda bir çok araştırmacı tarafından ANFIS, FALCON, FuNe, GARIC, NEFCON diye adlandırılan sinirsel bulanık sistemleri kullanılmaktadır.

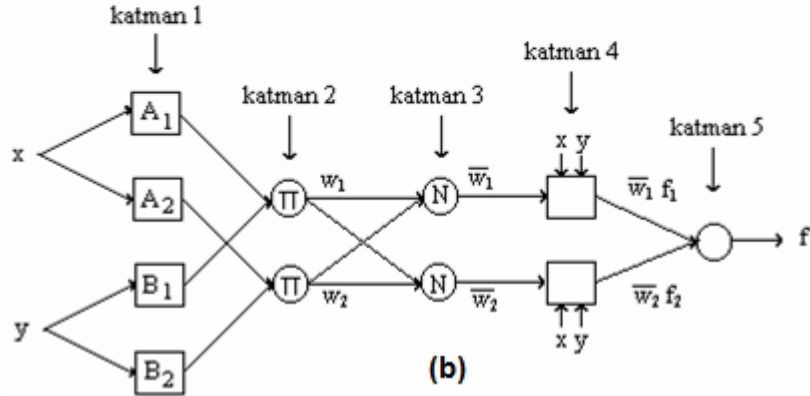
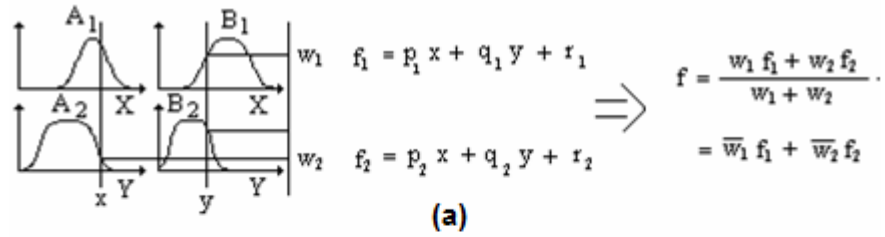
5.3.5.1 ANFIS (Adaptif Ağ Yapısına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi) Mimarisi

Esasen ANFIS yapısı, Sugeno tipi bulanık sistemlerin, sinirsel öğrenme kabiliyetine sahip bir ağ yapısı olarak temsilinden ibarettir. Bu ağ, her biri belli bir fonksiyonu gerçekleştirmek üzere, katmanlar halinde yerleştirilmiş düğümlerin birleşiminden oluşmuştur. Basit olması açısından, bulanık çıkarım sistemini, x ve y gibi iki girişi ve z gibi bir çıkışı olduğunu farz ederek ele alalım. İki tane bulanık Eğer-O Halde kuralı bulunan, birinci dereceden Sugeno bulanık modeli için tipik kural kümesi (5.29)'de gösterilmiştir. [17]

Kural-1: Eğer x A1 ise ve y B1 ise O Halde $f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1$

Kural-2: Eğer x A2 ise ve y B2 ise O Halde $f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2$ (5.29)

Şekil 5.6 a'da bu Sugeno bulanık modeli için bulanık akıl yürütme mekanizmasını göstermektedir. Bu yapıya karşılık gelen, eşdeğer ANFIS mimarisi Şekil 5.6 b'de gösterildiği gibidir. Söz konusu bu ANFIS mimarisi için aynı katmanda bulunan düğümler, aşağıda da gösterildiği üzere aynı düğüm fonksiyonlarına sahiptirler. Burada I. Katmandaki i . Düğümün çıkışı O_i şeklinde belirtilmiştir.



Şekil 5.6 (a) Birinci dereceden iki girişli ve iki kurallı “Sugeno Bulanık Modeli”
(b)Eşdeğer ANFIS yapısı.

Katman-1’de yer alan her bir i düğümü, çıkışı aşağıdaki gibi tanımlanan, adaptif bir düğümdür.

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), \quad i=1,2, \text{ yada}$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y), \quad i=3,4, \text{ için} \quad (5.30)$$

Burada x yada y düğümün girişini; A_i yada B_i ise söz konusu düğüme ait bulanık kümeyi ifade etmektedir.

Bir başka ifadeyle, bu katmanın çıkışları, kuralların şart yada öncül kısımlarına ait üyelik değerlerini oluştururlar. Burada A_i ve B_i için söz konusu üyelik fonksiyonları, uygun bir biçimde parametrelendirilmiş herhangi bir üyelik fonksiyonu olabilir.

Katman-2’deki her bir düğüm, kendisine gelen sinyallerin çarpımını çıkış olarak üreten, Π ile etiketlenmiş sabit bir düğümdür. Örnek olarak;

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), \quad i = 1,2 \quad (5.31)$$

Her bir düğümün çıkışı, her bir kural için gerçekleştirme derecesini oluşturur. (5.31) no'lu bağlantıda çarpma işlemi yerine bulanık (VE) işlemini icra eden, başka T-norm işlemleri de düğüm fonksiyonu gibi kullanılabilirler.

Katman-3'te yer alan her bir düğüm, N ile etiketlenmiş, sabit bir düğümdür. Katmandaki i . düğüm, i . kuralın gerçekleştirme derecesinin, bütün kuralların gerçekleştirme dereceleri toplamına oranını hesaplar.

$$Q_{3,i} = w_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (5.32)$$

Bu katmanda yer alan düğümlerin çıkışları, hesaplanışlarına uygun olarak, normalize edilmiş gerçekleştirme dereceleri olarak adlandırılırlar.

Katman-4'e ait her i düğümü, düğüm fonksiyonu (5.35)'teki gibi olan, adaptif bir düğümdür.

$$O_{4,i} = w_i f_i = w_i(p_i x + q_i y) + r_i \quad (5.33)$$

Burada w_i , katman 3'ün çıkışı olup; p_i , q_i , r_i ise bu katmanda bulunan düğümlerin parametrelerinden oluşan, parametre kümesidir. Bu katmanın parametreleri, sonuç yada çıkış parametreleri olarak ifade edilecektir.

Katman-5'te, Σ ile etiketlenmiş olan ve toplam çıkışı hesaplamak üzere, kendisine gelen sinyallerin tümünü toplayan, sabit, tek bir düğüm yer alır.

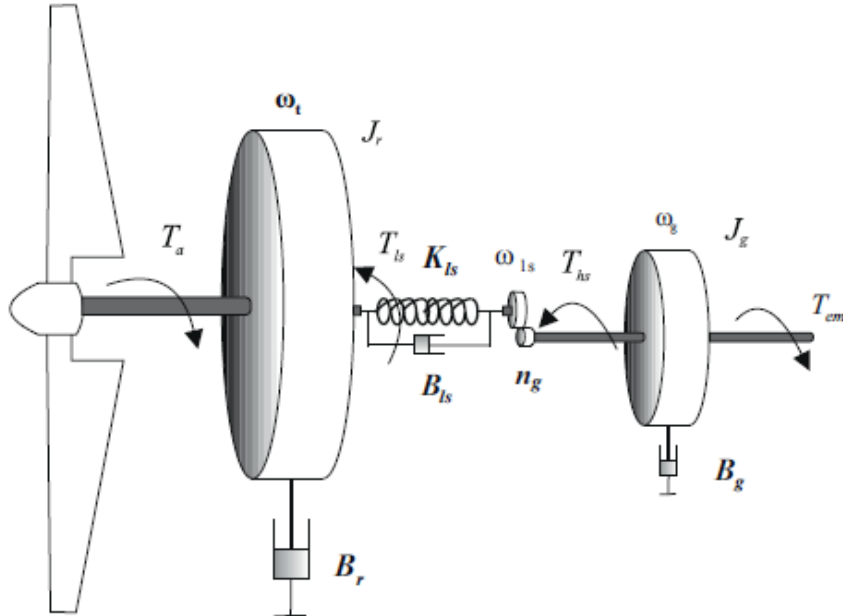
$$O_{5,1} = \text{toplam çıkış} = \sum_i w_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (5.34)$$

Böylece, tamamıyla Sugeno bulanık modelinin işleyişine sahip, adaptif bir ağ yapısı inşa edilmiş olur

SİMULASYON ÇALIŞMASI

6.1 Türbinin Modellenmesi

Daha önce Bölüm 4'te de bahsedildiği üzere, rüzgar tribünü modellenmesinde en yaygın olarak kullanılan yöntem, kütle-yay-damper sistemi ile yapılan modellemedir. Bu model komplike yapıdaki rüzgar türbinlerini bile kolaylıkla modelleyebildiği için tercih edilmektedir [13]. Yapılan çalışmada iki kütle-yay-damper sistemi ile modelleme yapılmıştır. Kullanılan model Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1 İki kütle-yay-damper sistemi ile yapılmış model

Rüzgar türbininden yani rotordan elde edilecek güç ifadesi daha önce denklem (4.7) ve (4.8)'in de yardımıyla (6.1)'de verildiği şekilde düzenlenebilir.

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (6.1)$$

Rotorun tork ifadesi (T_a) gücün açısal hıza bölümünden hesaplanır. Denklem (6.2)'de rotorun tork ifadesi verilmiştir.

$$T_a = \frac{P}{\omega_r} = \frac{P}{\frac{\lambda v}{R}} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} v^2 \quad (6.2)$$

Daha önce rüzgarın güç katsayısının kanat uç hız oranına bölümü tork katsayısı (C_q) olarak (4.12)'de verilmişti. Denklem (6.2)'de yerine konularak düzenlenirse denklem (6.3)'te verilen ifade elde edilir.

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_q(\lambda, \beta) v^2 \quad (6.3)$$

Rotor tarafındaki eylemsizlik momenti J_r olarak verilsin. Sistem dinamiklerinden oluşan aşağıdaki eşitlik ile rotor tarafındaki eylemsizlik momenti hesaplanabilir.

$$J_r \omega_r = T_a - T_{ls} - B_r \omega_r \quad (6.4)$$

Burada; J_r rotordaki eylemsizlik momenti, T_a aerodinamik tork, T_{ls} düşük hızlı şaftın torku, B_r rotorun damper katsayısıdır.

Düşük hızlı şaftın torku rotorun frenleme torku olarak görev yapar denklem (6.5)'te matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$T_{ls} = K_{ls} \theta_r - \theta_{ls} + B_{ls}(\omega_r - \omega_{ls}) \quad (6.5)$$

Burada; B_{ls} düşük hızlı şaftın damper katsayısı, K_{ls} düşük hızlı damperin yay katsayısı, θ_r rotor tarafındaki açısal yer değiştirme, θ_{ls} düşük hızlı şaftın tarafındaki (dişli kutusu tarafı) yer değiştirme ve ω_{ls} düşük hızlı şaftın açısal hızı olarak tanımlanmıştır.

Generatörün eylemsizlik momenti hesaplanırken generatörün yüksek hızlı şaft tarafından çevrildiği ve generatörün elektromanyetik torku tarafından frenlendiği göz önüne alınmalıdır. Bu durumda (6.6)'da verilen eşitlik elde edilir.

$$J_g \omega_g = T_{hs} - T_{em} - B_g \omega_g \quad (6.6)$$

Denklem (6.6)'da verilen; J_g generatörün eylemsizlik momenti, w_g generatörün açısal hızı, T_{hs} yüksek hızlı şaftın torku, T_{em} generatörün elektromanyetik torku, B_g generatörün damper katsayısıdır.

Dişli oranı n olan ideal bir dişli kutusunun (6.7)'de verilen eşitlikleri sağladığı kabul edilsin.

$$n = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{w_g}{w_{ls}} = \frac{\theta_g}{\theta_{ls}} \quad (6.7)$$

Bu durumda rotorun hızı için denklem (6.4)'ten de faydalanılarak (6.8)'deki denklem elde edilecektir.

$$w_r = \frac{1}{J_r} T_a - \frac{1}{J_r} T_{ls} - \frac{B_r}{J_r} w_r \quad (6.8)$$

Generatörün hız denklemi (6.6) düşünüldüğünde, $T_{hs} = \frac{T_{ls}}{n}$ olduğu için (6.9)'da verilen denklem elde edilir.

$$w_g = -\frac{B_g}{J_g} w_g + \frac{1}{nJ_g} T_{ls} - \frac{1}{J_g} T_{em} \quad (6.9)$$

Düşük hızlı şaftın denklemi (6.5)'te verilmişti. Bu ifadenin türevi alındığında (6.10)'da verilen denklem elde edilir.

$$T_{ls} = K_{ls} w_r - K_{ls} w_{ls} + B_{ls} w_r - B_{ls} w_g \quad (6.10)$$

Denklemden, w_{ls} , w_r ve w_g ifadeleri denklem (6.7), (6.8) ve (6.9) kullanılarak yerlerine yazıldığında (6.10)'da verilmiş denklem (6.11)'deki formu alır.

$$T_{ls} = K_{ls} - \frac{B_{ls} B_r}{J_r} w_r - \frac{1}{n} \frac{B_{ls} B_r}{J_g} - K_{ls} w_g - B_{ls} \frac{J_r + n^2 J_g}{n^2 J_g J_r} T_{ls} + \frac{B_{ls}}{J_r} T_a + \frac{B_{ls}}{J_g n} T_{em} \quad (6.11)$$

(6.8), (6.9) ve (6.11)'de verilen durum denklemlerinden faydalanarak sistem durum uzayı formunda modellenenebilir [13]. Oluşan durum uzayı ifadesi (6.12)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\begin{matrix} w_r \\ w_g \\ T_{ls} \end{matrix} &= \begin{matrix} -\frac{B_r}{J_r} & 0 & -\frac{1}{J_r} \\ 0 & -\frac{B_g}{J_g} & \frac{1}{nJ_g} \\ K_{ls} - \frac{B_{ls}B_r}{J_r} & \frac{1}{n} \frac{B_{ls}B_r}{J_g} - K_{ls} & -B_{ls} \frac{J_r + n^2J_g}{n^2J_gJ_r} \end{matrix} \begin{matrix} w_r \\ w_g \\ T_{ls} \end{matrix} + \begin{matrix} \frac{1}{J_r} \\ 0 \\ \frac{B_{ls}}{J_r} \end{matrix} T_a \\
&\quad + \begin{matrix} 0 \\ -\frac{1}{J_g} \\ \frac{B_{ls}}{J_g n} \end{matrix} T_{em} \\
y &= \begin{matrix} 1 & 0 & 0 \end{matrix} \begin{matrix} w_r \\ w_g \\ T_{ls} \end{matrix} \tag{6.12}
\end{aligned}$$

Yapılan simulasyon çalışmasında kullanılan sistemin parametreleri aşağıda verildiği gibi seçilmiştir [14].

Rotorun çapı (R) = 21,65 m

Havanın yoğunluğu(ρ) = 1,2041 kg/m³

Rotorun eylemsizlik momenti (J_r) = 3,25 × 10⁵ kg.m²

Genaratörün eylemsizlik momenti (J_g) = 34,4 kg.m²

Damper sabiti (B_{ls}) = 9500 N.m/rad/s

Rotorun bükülmezlik (yay) sabiti (K_{ls}) = 2,691 × 10⁵ N.m/rad

Rotorun sürtünme sabiti (B_r) = 27,36 N.M/rad/s

Generatörün sürtünme sabiti (B_g) = 0,2 Nm/rad/s

Dışli oranı (n) = 43,165

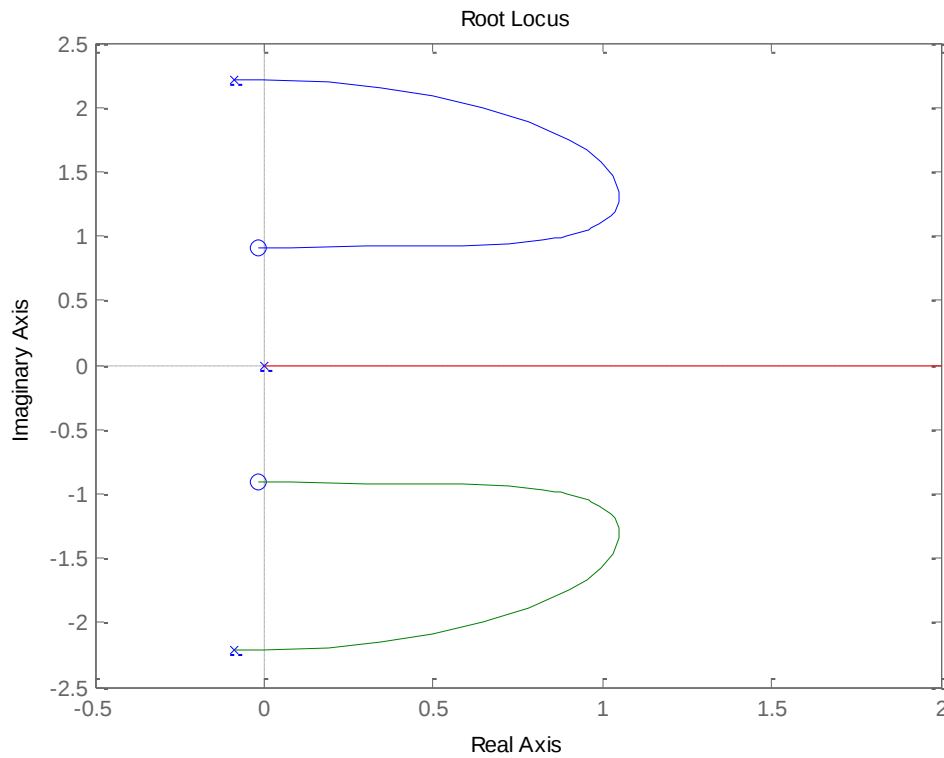
Bu parametreler doğrultusunda, sistemin durum uzayı formu tekrar düzenlenirse (6.13)'teki denklem elde edilir.

$$\begin{aligned}
& \begin{matrix} w_r & -8,42 \cdot 10^{-5} & 0 & -0,3 \cdot 10^{-5} \\ w_g & 0 & -0,0058 & 67,84 \cdot 10^{-5} \\ T_{ls} & 269099 & -6059 & -0,177 \end{matrix} \begin{matrix} w_r & 3,07 \cdot 10^{-6} & 0 \\ w_g & 0 & -0,0292 \\ T_{ls} & 0,0292 & 6,397 \end{matrix} \begin{matrix} T_a \\ T_{em} \end{matrix} \\
& y = \begin{matrix} 1 & 0 & 0 \end{matrix} \begin{matrix} w_r \\ w_g \\ T_{ls} \end{matrix} \quad (6.13)
\end{aligned}$$

6.2 Sistemin Kararlılık Kontrol Edilebilirlik ve Gözlenebilirlik İncelemesi

6.2.1 Sistemin Kararlılık Açısından İncelenmesi

Bölüm 5'te de değinildiği gibi bir sistemin kararlı olabilmesi için özdeğerlerinin sol yarı düzlemde olması gerekmektedir. İncelenen sistemin kök yer eğrisi Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.2 Sistemin kök yer eğrisi

Sistemin kökleri $[-0,001; -0,09 + 2,21j; -0,09 - 2,21j]$ noktalarında olduğu için sistem kararlı bir sistemdir.

6.2.2 Sistemin Kontrol Edilebilirlik Açısından İncelenmesi

Sistemin kontrol edilebilirlik açısından incelenebilmesi için kontrol edilebilirlik matrisinin bulunması gerekmektedir. Kullanılan sistem için kontrol edilebilirlik matrisi (6.14)'te verilmiştir.

$$Q_c = \begin{bmatrix} 3.07 \cdot 10^{-6} & 0 & -9.01 & -0.023 & 277,69 & 71.92 \cdot 10^6 \\ 0 & 0.029 & 0.023 & 6033.606 & 71.92 \cdot 10^6 & -18.6210^{12} \\ 0.029 & 7570.94 & -9.025 \cdot 10^6 & -23.375 \cdot 10^{12} & 2.78 \cdot 10^{17} & 7.21 \cdot 10^{22} \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

Bölüm 5'te belirtildiği gibi, kontrol edilebilirlik matrisinin rankının A matrisinin boyutuna eşit olduğu yani *full rank* olduğu durumda sistem kontrol edilebilirdir. İncelenen sistem için $\text{rank}(Q_c) = 3$ olduğundan sistem kontrol edilebilirdir.

6.2.3 Sistemin Gözlenebilirlik Açısından İncelenmesi

Sistemin gözlenebilirlik matrisinin rankı A matrisinin boyutuna eşit ise sistem gözlenebilirdir. Gözlenebilirlik matrisi (6.15)'te verilmiştir.

$$Q_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -0,0000841 & 0 & -0,000003 \\ -0,828 & 0,0186 & 0,0000005 \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

Gözlenebilirlik matrisinin rankı $\text{rank}(Q_o) = 3$ olduğu için sistem gözlenebilirdir.

6.3 Kontrolcü Tasarımı

Yapılan çalışmada, durum uzayı formunda modellenen rüzgar türbini için iki ayrı kontrolcü tasarlanmıştır. Tasarlanan ilk kontrolcüde, kanat uç hız oranına göre rotorun hızı kontrol edilmiş, ikinci kontrolcüde ise istenen hızı elde etmek için gereken kanat açısı hesaplanmıştır.

6.3.1 Rotorun Hız Kontrolü

Rotorun hız kontrolü yapılırken kutup atama yöntemi kullanılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi sistemin kutupları $[-0,001; -0,09 + 2,21j; -0,09 - 2,21j]$ noktalarında. Sistemdeki imajiner bileşene sahip kökler çıkış üzerinde bozucu etki yapmaktadır. Aynı

zamanda kutupların orijine yakın olması sistemin küçük bir bozucu etkenle bile kararsızlığa gitmesine sebep olabilir.

Sistemdeki imajiner bileşene sahip kökler sönümlü bir osilasyon hareketi yaparlar. Rüzgar türbin sisteminde daha sonra belirlenen değere otursa bile başlangıçta geniş aralıklarda hız değişimi istenen bir durum değildir. Bu sebeple imajiner bileşene sahip köklerin reel eksen üzerinde belirlenen noktalara atanması daha dengeli ve performanslı bir sistem meydana getirir.

Bu sebeplerle imajiner bileşeni olan ve sıfıra çok yakın açık çevrim kutuplarının sıfırdan daha uzak reel eksen üzerindeki noktalara yerleştirilmesi hedeflenmiştir.

Kutup atama yönetiminden Bölüm 5'te bahsedilmişti. Bu çalışmada durumların ölçülebildiği varsayılarak durum geri beslemesi yöntemiyle kutup atama tasarımı yapılmıştır.

Durum geri beslemesi kazanç matrisi (K) hesaplanırken kapalı çevrim sisteminin determinantının kutupların yeni lokasyonu ile oluşturulan karakteristik polinoma eşit olmalıdır. İncelenen sistemde, yapılan denemeler sonucu kutupların [-1;-3;-5] noktalarına atanması kararlaştırılmıştır.

K matrisi (6.16)'da verildiği gibi kabul edilsin:

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

Sistemin karakteristik polinomu $\det sI - A$ ifadesiyle kolayca hesaplanabilir.

$$\det sI - A = s^3 + 0,1833s^2 + 4,91s + 0,005158 \quad (6.17)$$

Kutupları [-1;-3;-5] noktalarına attığımızda oluşacak karakteristik polinom ise (6.18)'de verilmiştir.

$$(s + 1)(s + 3)(s + 5) = s^3 + 9s^2 + 23s + 15 \quad (6.18)$$

Kapalı çevrim sisteminin karakteristik polinomu (6.19)'da verildiği gibi oluşturulabilir.

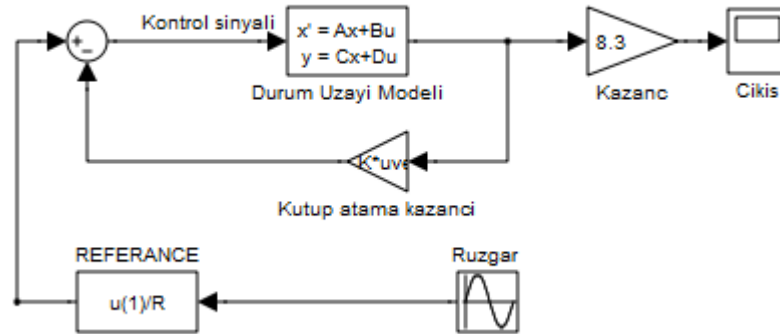
$$\det sI - A - BK = \det sI - \begin{bmatrix} -8,42 \cdot 10^{-5} & 0 & -0,3 \cdot 10^{-5} \\ 0 & -0,0058 & 67,84 \cdot 10^{-5} \\ 269099 & -6059 & -0,177 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 3,07 \cdot 10^{-6}k_{11} & 3,07 \cdot 10^{-6}k_{12} & 3,07 \cdot 10^{-6}k_{13} \\ -0,0292k_{21} & -0,0292k_{22} & -0,0292k_{23} \\ 0,0292k_{11} + 6,397k_{21} & 0,0292k_{12} + 6,397k_{22} & 0,0292k_{13} + 6,397k_{23} \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

Kapalı çevrim karakteristik polinomu istenen karakteristik polinoma eşitlendiğinde K matrisi ortaya çıkacaktır.

$$\det sI - A - BK = s^3 + 9s^2 + 23s + 15$$

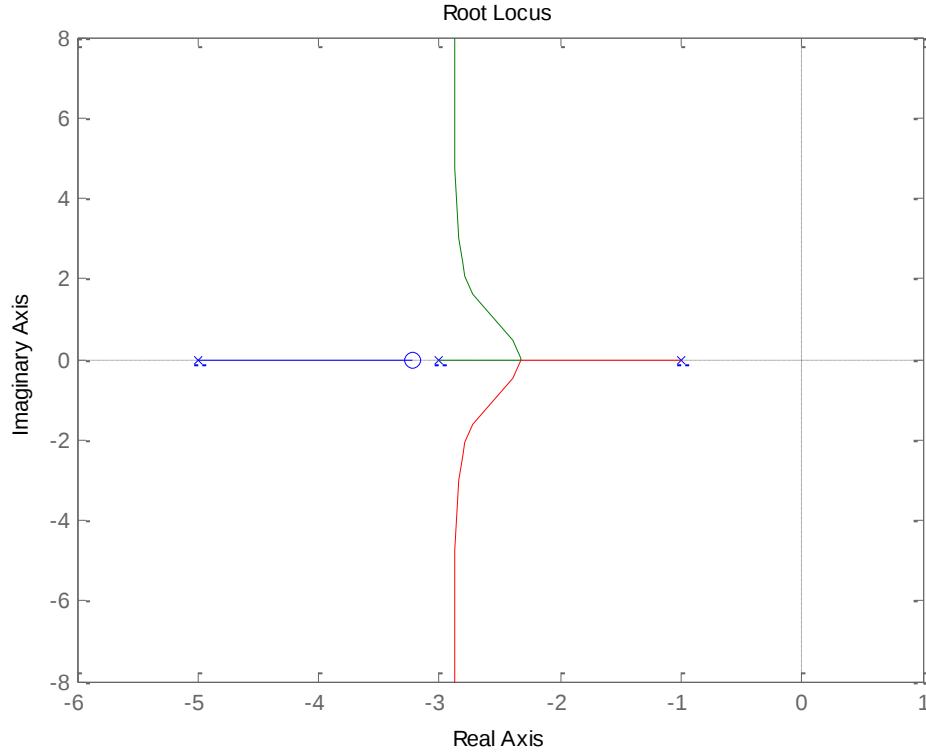
$$K = \begin{bmatrix} -2,44 \cdot 10^8 & 54982 & -3320 \\ 155856 & -26040 & 15,59 \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

Simulasyon çalışmasında kutup atama yönteminin uygulanması için *place* komutu kullanılmıştır. Rotor hız kontrolünün yapıldığı kısmın simulink modeli Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3 Rotor hız kontrolü için kutup atama tasarımı

Kapalı çevrim sisteminin kök yer eğrisi Şekil 6.4'te gösterilmiştir.

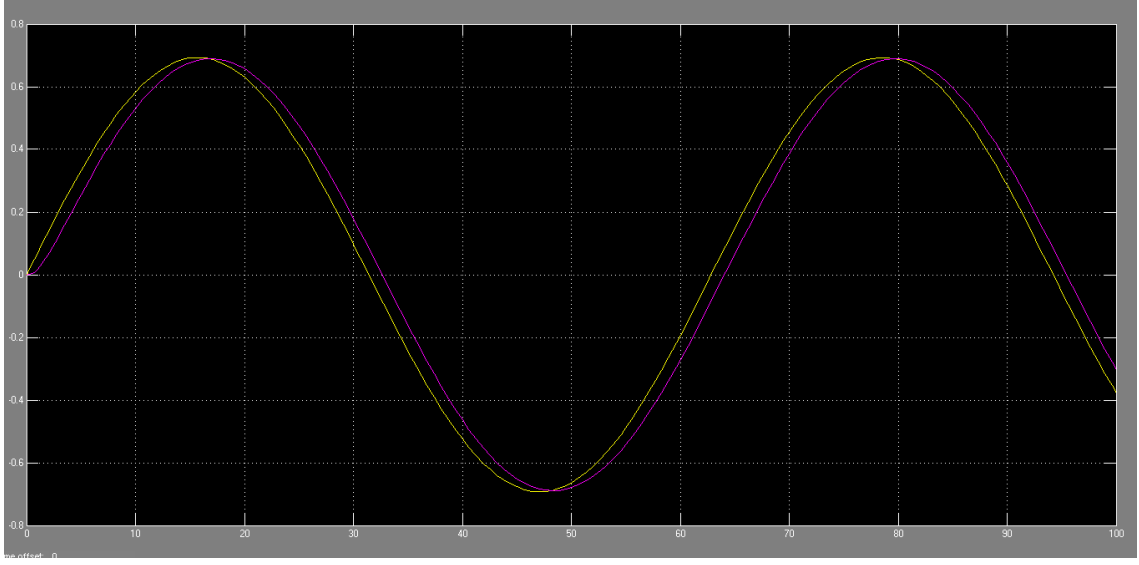


Şekil 6.4 Kapalı çevrim sisteminin kök yer eğrisi

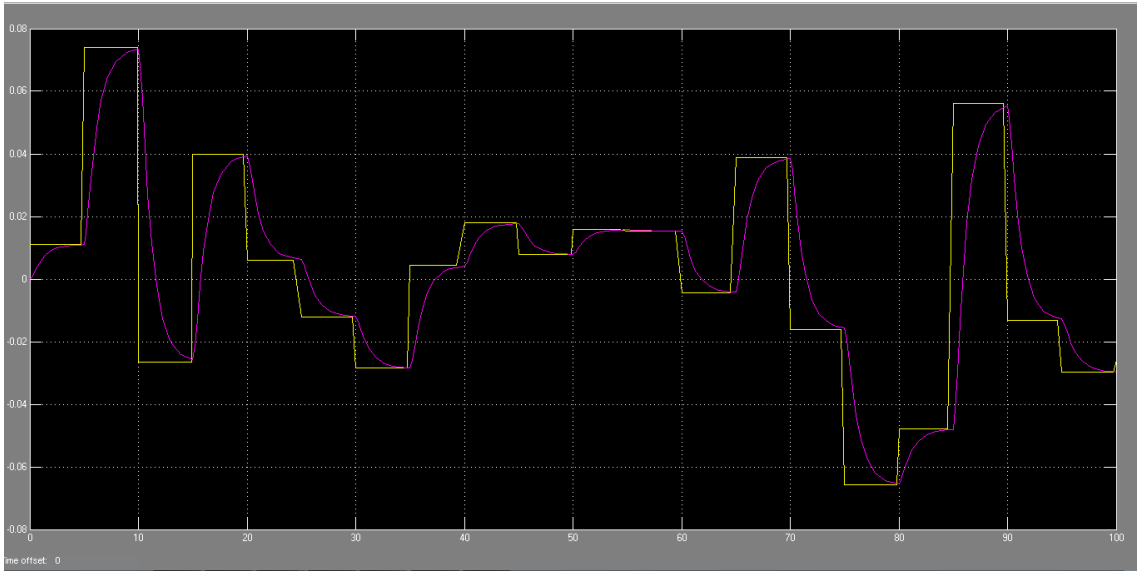
Şekil 6.4'ten de anlaşılacağı gibi kutuplar istenen noktalara atanabilmektedir.

Rüzgar türbin rotorunun hızı belirlenirken kanat uç hız oranı baz alınmıştır. Daha önce (4.10)'da verildiği gibi kanat uç hız oranı rotorun çizgisel hızının rüzgarın hızına oranından hesaplanmaktadır. Rotorun çizgisel hızının açısal hız ve rotorun çapının çarpımı olduğu düşünülürse rotorun hızını; rüzgar hızının rotorun çapına bölümüne ayarlayabilir yani kanat uç hız oranını 1 yapabiliriz. Bununla birlikte, sistemin kararlı hal hatasını azaltmak için çıkışa bir kazanç bloğu eklenmiştir.

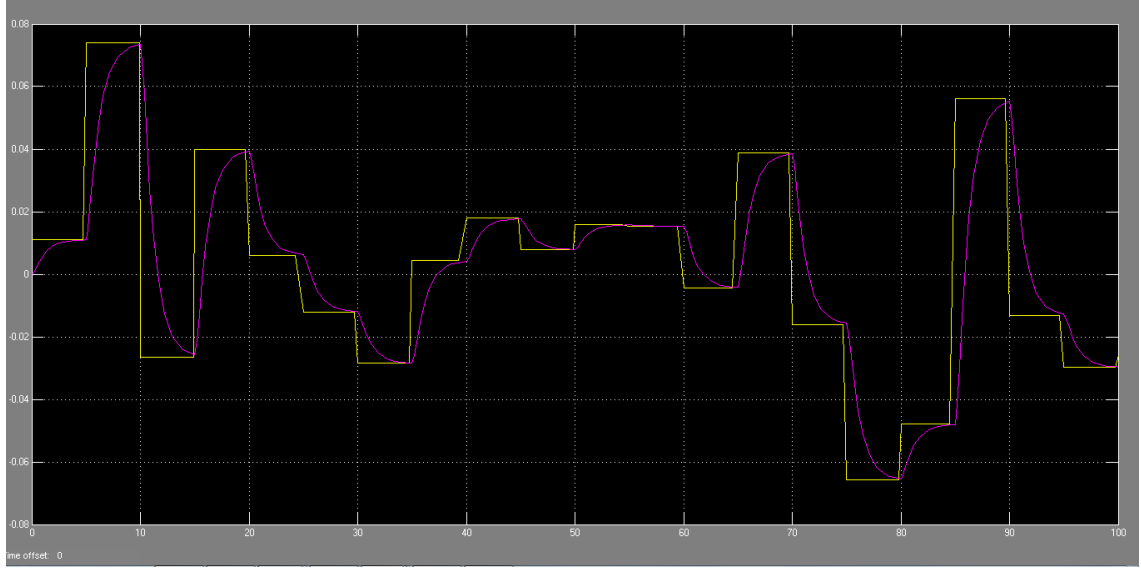
Rüzgarın modellenmesinde pek çok yaklaşım bulunmaktadır. Bu çalışmada rüzgar sinüs sinyali ve beyaz gürültü olarak iki farklı şekilde modellenmiştir. $\lambda = 1$ için simulasyon sonuçları Şekil 6.5'te, Şekil 6.6'da ve Şekil 6.7'de verilmiştir. Rüzgarın hızı yani referans sarı renkle rotorun hızı ise pembe renkle gösterilmiştir.



Şekil 6.5 Rüzgarın hızı ve rotorun hızının karşılaştırılması (Rüzgar sinüs sinyali olarak modellenmiştir)

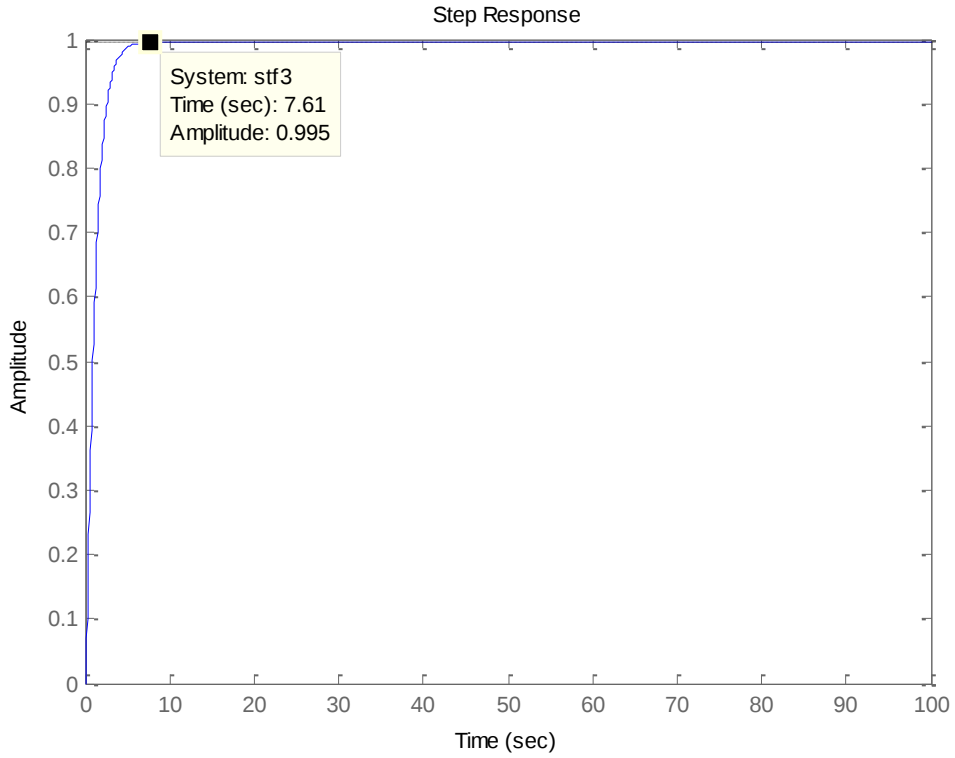


Şekil 6.6 Rüzgarın hızı ve rotorun hızının karşılaştırılması (Rüzgar beyaz gürültü olarak modellenmiştir)



Şekil 6.7 Rüzgarın hızı ve rotorun hızının karşılaştırılması (Rüzgar=15 m/s sabit olarak modellenmiştir)

Simülasyon sonuçlarından da anlaşılacağı üzere sistem çıkışı referans sinyalini doğru bir şekilde takip etmektedir. Aynı zamanda MATLAB kullanılarak sistem cevabının kalıcı hal hatası hesaplanabilmektedir. İşlem yapıldığında kutup atama tasarımı sonrası sistemin kalıcı hal hatası 0.005 olarak bulunmuştur. Sistemin darbe cevabı Şekil 6.8’de verilmiştir.



Şekil 6.8 Sistemin darbe cevabı

6.3.2 Kanat Açısının Ayarlanması

Bu çalışmada önce rotorun hızının istenen değere ayarlanması daha sonra da bu değeri verecek kanat açısının hesaplanması hedeflenmişti.

Rüzgar türbininin verimliliği güç katsayısı (C_p) ile belirlenmektedir. Güç katsayısı daha önce (4.11)'de de verildiği gibi kanat uç hız oranı (λ) ve kanat açısı (β)'na bağlıdır. Burada en yüksek güç katsayısını sağlayacak kanat uç hız oranı ve kanat açısının bulunması problemi doğmaktadır.

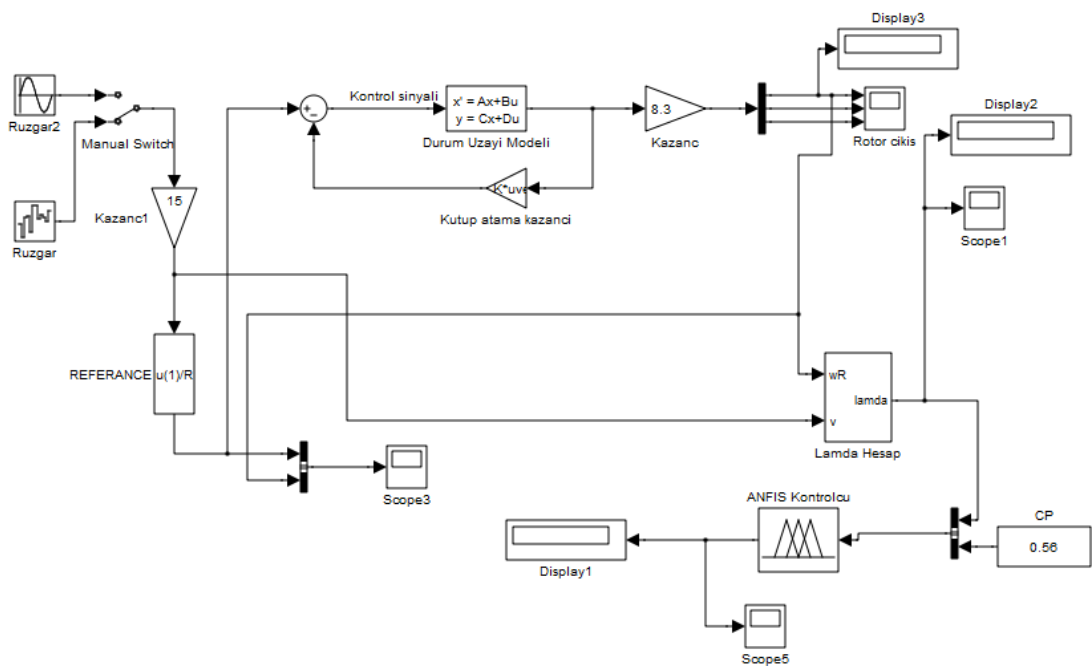
Kanat açısının hesaplanmasında ANFIS denetleyicisinden faydalanılmıştır. (4.11)'deki denklem baz alınarak kanat uç hız oranı 0-10 arası, kanat açısı 0-60 arası değiştirilmiştir. Bu değerlere denk gelen güç katsayısı hesaplanmıştır.

Kanat açısının hesaplanması için bu işlemin tersten yapılması gerekmektedir. Matematiksel olarak bu işlemi tersten gerçekleştirip kanat açısını hesaplamak zordur.

Bu noktada lineer olmayan bir kontrolcünün tasarlanması gerekir. Belirtilen değer skalasında ANFIS denetleyicisi eğitilerek çıkış vermesi sağlanmıştır. Bu işlem yapılırken güç katsayısı ve kanat uç hız oranı giriş olarak kanat açısı ise çıkış olarak tanımlanmıştır.

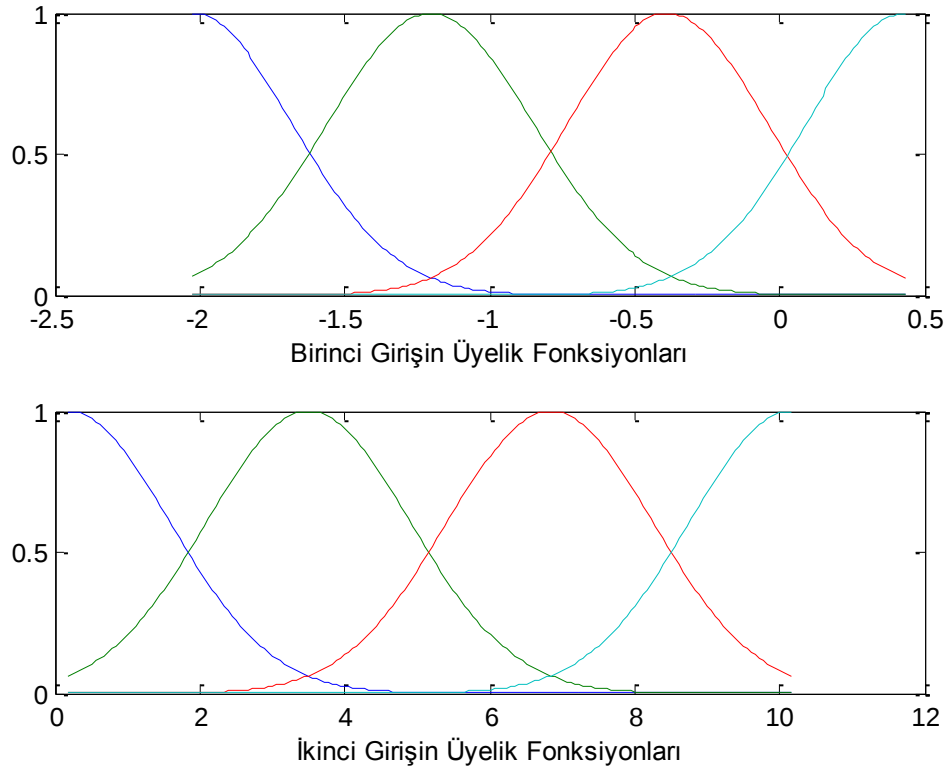
ANFIS denetleyicisi tasarlanırken Sugeno tip bulanık mantık denetleyici kullanılır. ANFIS denetleyicisi bulanık mantık denetleyicilerle entegre çalışabildiği ve simulink ortamında daha kolay kullanılabildiği için tercih edilmiştir.

Sisteme ANFIS kontrolcünün de eklenmesiyle oluşan blok şeması Şekil 6.9'da verilmiştir.



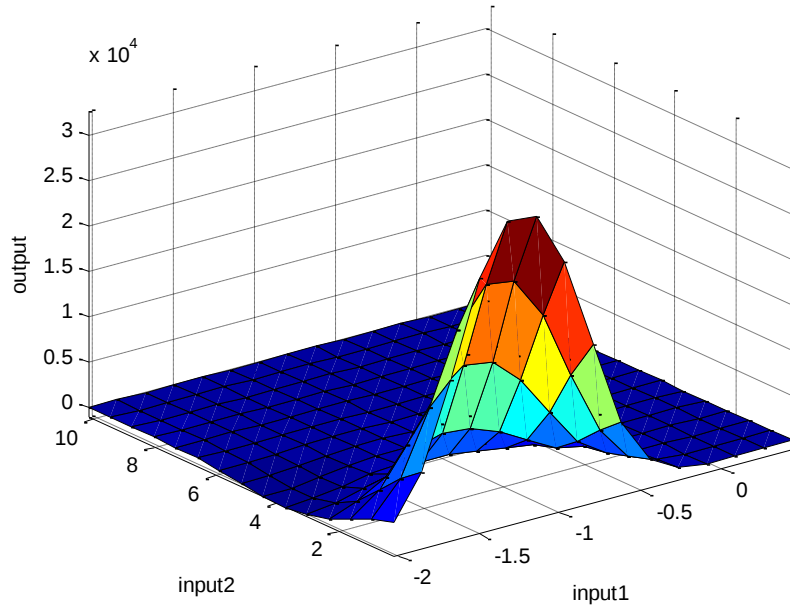
Şekil 6.9 Sisteme ANFIS kontrolcü eklendikten sonra oluşan blok şeması

Sistemde kullanılan ANFIS denetleyicisinin üyelik fonksiyonları Şekil 6.10'da verilmiştir.



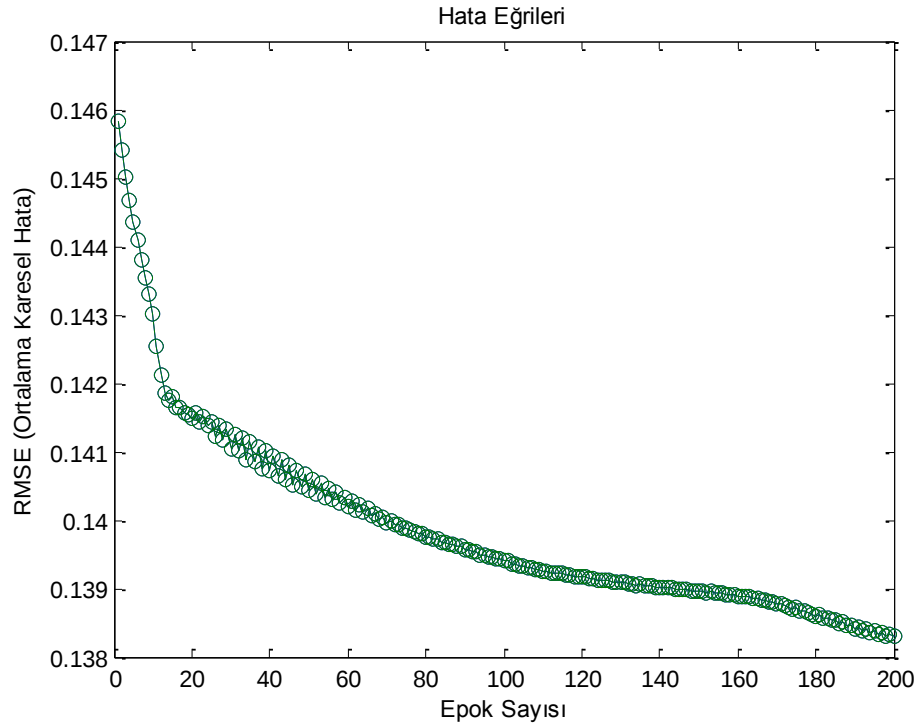
Şekil 6.10 ANFIS denetleyicinin üyelik fonksiyonları

ANFIS denetleyicisinin girişleri ve çıkışları üç boyutlu bulanık mantık çıkış yüzeyinde ifade edilebilmektedir. Şekil 6.11’de ANFIS denetleyici çıkış yüzeyi gösterilmiştir.



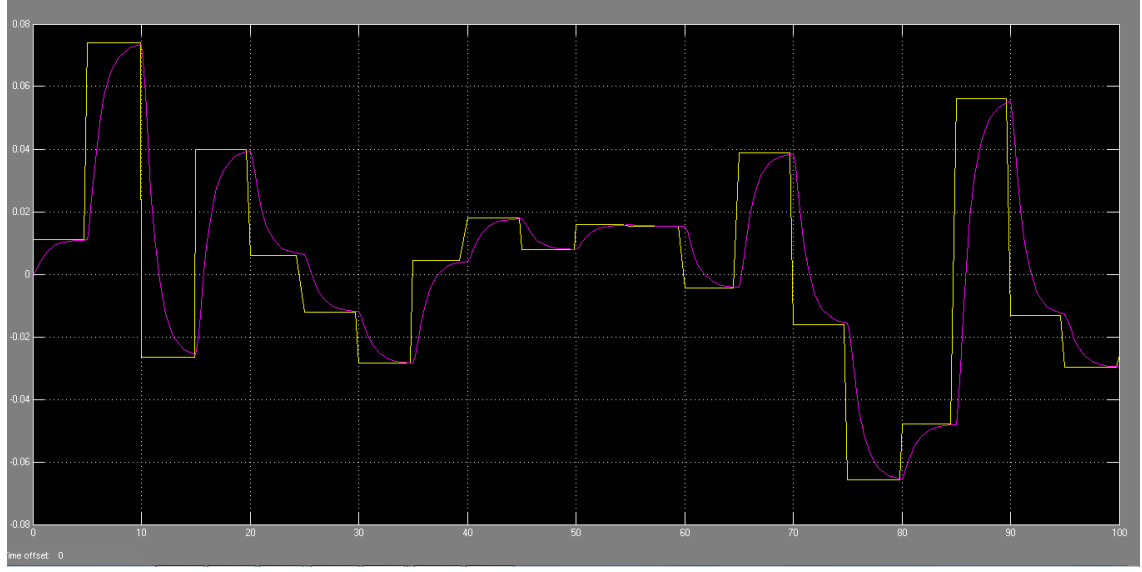
Şekil 6.11 ANFIS denetleyici çıkış yüzeyi

ANFIS denetleyicinin hatası epok sayısına göre çizdirilebilir. Hata grafiği şekil 6.12’de gösterilmiştir.

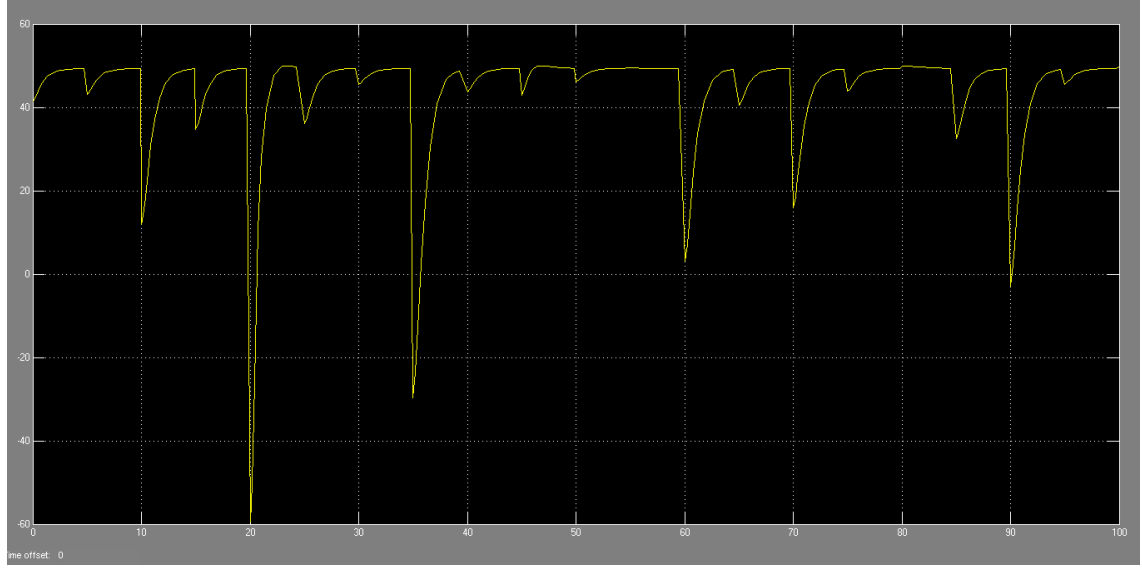


Şekil 6.12 ANFIS denetleyici hata eğrisi

Hata grafiğinden de anlaşılacağı üzere ANFIS denetleyici belli bir hata oranı dahilinde kanat açısını hesaplamaktadır. Rüzgarın beyaz gürültü olarak verildiği sisteme, ANFIS denetleyici de entegre edilerek simulasyon yapıldığında alınan sonuçlar Şekil 6.13 ve Şekil 6.14’te gösterilmiştir. Şekil 6.13’te rotor hızının referansı takibi görülmektedir. Şekil 6.14’te ise ANFIS denetleyicinin çıkış olan kanat açısındaki değişimler görülmektedir.



Şekil 6.13 Rotor hız ve referans hız eğrisi -1

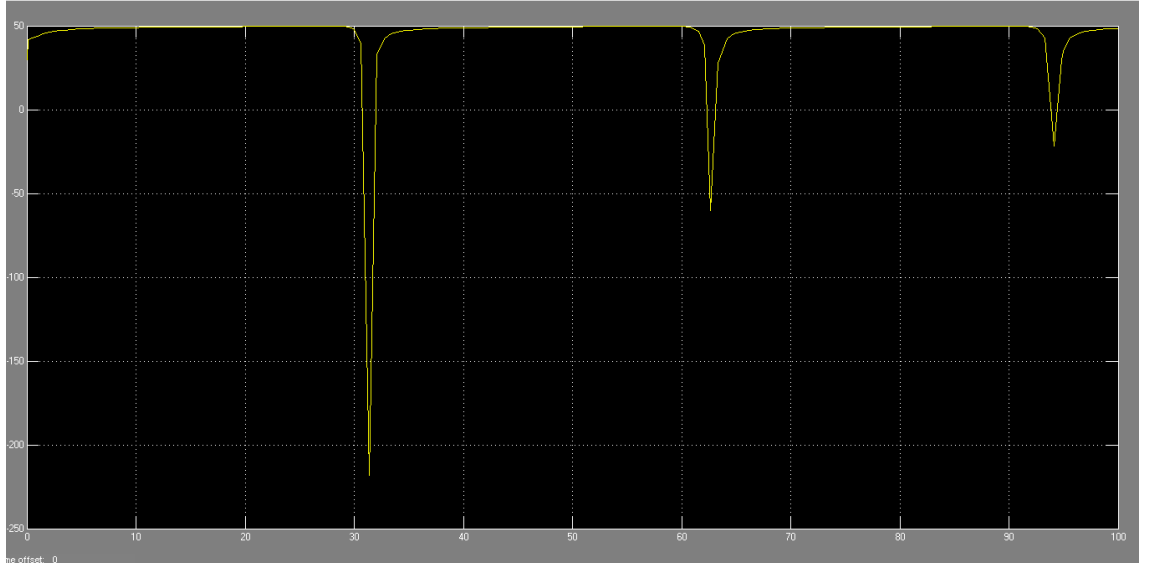


Şekil 6.14 ANFIS denetleyicinin çıkışı -1

Rüzgar sinüs sinyali olarak modellendiğinde alınan sonuçlar Şekil 6.15 ve şekil 6.16’da gösterilmiştir.



Şekil 6.15 Rotor hız ve referans hız eğrisi -2



Şekil 6.16 ANFIS denetleyicinin çıkışı -2

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, rüzgar türbininin modellenmesi ve kontrolü gerçekleştirilmiş; oluşturulan sistemin MATLAB ortamında simülasyonu yapılmıştır.

Modelleme kısmında kütle-yay-damper sistemi tercih edilmiştir. Bu sistem, karışık yapıda olan rüzgar türbinleri için basit bir model olduğundan hali hazırda pek çok araştırmada da kullanılmaktadır. Aynı zamanda kütle-yay-damper sisteminin durum uzayı formuna aktarılması kontrolcü tasarımı açısından kolaylık sağlamıştır.

Kütle-yay-damper sisteminde rüzgar türbinine ait bazı değişkenler ihmal edilmektedir. Sistemin tüm parçalarının dahil edildiği modellerin kullanılması sistemin bütünüyle ortaya koyulabilmesini sağladığı için daha gerçekçi bir yaklaşım olabilir. Ancak bu şekilde yapılan modellemeler karmaşık sistemler meydana getirmektedir. Parametre sayısının artması kontrolcü tasarımı daha da zorlaştırmaktadır.

Kontrolcü tasarımı kısmında, rotor için hız kontrolü ve kanat açısı kontrolü yapılmıştır. Rüzgardan maksimum seviyede güç yakalanması için değişken hızlı bir kontrol sisteminin tasarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada da sabit kanat uç hız oranı dizaynı esas alınmıştır. Buna göre, sistemdeki kanat uç hız oranı sabit tutularak rotorun hızı belirlenmiştir. Değişken hızlı bir tasarımın yapılması daha verimli bir sistem ortaya koyduğu için tercih edilmiştir.

Rotorun hız kontrolünde kutup atama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem gerçekleştirirken, durumların okunabildiği varsayılmıştır. Durum geri beslemesi yardımıyla orijine çok yakın olan sistem kutupları reel eksen üzerinde belirlenen

noktalara taşınmıştır. Sistemin çıkışına yerleştirilen kazanç bloğunun da yardımıyla sistemdeki kalıcı hal hatası giderilmiştir.

İleriki çalışmalarda, kutup atama tasarımı, çıkış geri beslemesi yöntemiyle gerçekleştirilebilir. Sistemin durumların gözlenmesi için Kalman filtresi yaklaşımı kullanılabilir. Rüzgar türbinlerinin çok girişli çok çıkışlı sistemler olması ve yapılan modellemeye göre lineer olmayan bileşenler içerebilmesi sebebiyle lineer olmayan kontrol yöntemleri de kullanılabilir. Lineer olmayan kontrol yöntemleri literatürde lineer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar vermişlerdir. Eğer sistemde çok hassas bir kontrol tercih edilmiyorsa lineer kontrol yöntemleri daha basit olması ve kolay gerçekleştirilebilmesi açısından daha avantajlı olacaktır. Bu sisteme çok düşük ve çok yüksek rüzgar hızlarında türbininin dönmemesini sağlayan fren kontrolü de eklenebilir.

Sistemdeki ikinci kontrolcü kanat açısı kontrolü için kullanılmıştır. Bu kontrolcünün tasarlanmasındaki amaç rüzgar hızını referans alan rotorun hız kontrolcüsünün belirlediği hızı sağlayacak kanat açısını hesaplamaktır.

Sistemin güç katsayısı; kanat açısı ve kanat uç hız oranının bir fonksiyonudur. Sistemin kanat açısını bu fonksiyondan geri hesaplamak lineer olmayan bir işlemdir. Bu işlemin zor olması sebebiyle ANFIS denetleyiciden faydalanılmıştır. Belirlenen aralıkta kanat uç hız oranı ve kanat açısı kullanılarak güç katsayısı hesaplanmıştır. Güç katsayısı ve kanat uç hız oranı giriş kanat açısı çıkış olacak şekilde bir data oluşturularak ANFIS denetleyici eğitilmiştir.

Elde edilen sonuçlardan ANFIS denetleyicinin iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Yine de ANFIS denetleyicisinin kalıcı hal hatası mevcuttur. Bu hatanın giderilmesi için ANFIS denetleyicisinin eğitim ve kontrol data sayısı arttırılabilir. Kanat açısı kontrolünde diğer lineer olmayan kontrol yöntemlerinden faydalanılabilir.

Sonuç olarak rüzgar türbini sisteminin hem rotor hızı hem de kanat açısı kontrolü sağlanmıştır. Rotorun hız kontrolünde amaç, rotorun sabit kanat uç hız oranı için referans verilen hızda dönmesiydi. Simülasyon sonuçlarından da görüleceği üzere rotorun hızı referans hızı yakalamakta ve kanat açısı kontrolcüsü sayesinde bu hızı sağlayacak kanat açısı hesaplanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Ackermann, T., (2009). Güç Sistemlerinde Rüzgar, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Yayınları, 1, Ankara.
- [2] Hau, E., (2006). Wind Turbines, Springer-Verlag, 2, London.
- [3] Malkoç, Y., (2007). “Türkiye Elektrik Enerjisinin Karşılmasında Rüzgar Enerjiisinin Yeri”, TUREB, 2:8.
- [4] Munteanu, I., Cutululis, A. ve Ceanga, E., (2008). Optimal Control of Wind Energy Systems, Springer-Verlag, 1, London.
- [5] Tanrıöven, M., (2011), “Rüzgar ve Güneş Enerjili Sistemler Ders Notları”, İstanbul.
- [6] Burton T., Sharpe D., Jenkins N. ve Bossanyi E., (2001). Wind Energy Handbook. John Wiley & Sons, New York.
- [7] Ma, X., (1997), Adaptive Extremum Control and Wind Turbine Control, Doktora Tezi, The Technical University of Denmark, Lyngby.
- [8] Söylemez, O., (2005), Rüzgar Türbinlerinde Kontrol Sistemlerinin Etüdü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] Ergür, Ö., (2006), Rüzgar Türbinleri ile Enerji Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [10] Uyar, M., Gençoğlu, M.T., ve Yıldırım, S., Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri İçin Generatör Sistemleri, Ekim, 2005, YEKSEM 2005 III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 173-178.
- [11] How, J., (2001), “Feedback Control Systems”, MIT Open Course Lecture Notes, Massachusetts.
- [12] Vihriala, H., (2002), Control of Variable Speed Wind Turbines, Doktora Tezi, Tampere University of Technology.
- [13] Mueen, S. M., Tamura J. Ve Murata, T., (2009). Stability Augmentation of a Grid-Connected Wind Farm, Springer-Verlag, 1, London.

- [14] Boukhezzer, B. ve Siguerdidjane, H., (2010). "Comparison Between Linear and Nonlinear Control Strategies for Variable Speed Wind Turbines", 2:3,12.
- [15] Ragheb, M., (2011). "Optimal Rotor Tip Speed Ratio", 1:3.
- [16] Güney, S., (2007). Kutup Yerleştirme Yönteminin Farklı Algoritmalarla İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [17] Cruz, A., Adaptive Neuro Fuzzy Inference System,
<http://equipe.nce.ufrrj.br/adriano/fuzzy/transparencias/anfis/anfis.pdf>,19
Mart 2011.

MATLAB M-FILE KODU

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
%% Ruzgar Turbini Durum Uzayı Modeli, Kutup Atama ve ANFIS Kontrolcüsü
%% Yıldız Teknik Üniversitesi
%% Fen Bilimleri Enstitüsü
%% Yüksek Lisans Tezi
%% Gelistiren: Ayyuce Vural, 2011
%% Açıklama: İlk olarak ruzgar turbininin parametreleri sisteme
%% tanıtılmıştır. Ardından sistemin durum uzayı matrisi oluşturulmuş
ve
%% kutup atama yöntemi uygulanmıştır. Sistemin kanat açısı ile
kontrolü
%% için ANFIS kullanılmıştır. Burada ANFIS için eğitim verisi
%% hazırlanmıştır. genfis1 komutu ile FIS oluşturulmuştur. anfis
%% komutu ile FIS eğitilmiştir. Oluşturulan FIS'in üyelik fonksiyonu
%% grafiği, FIS yüzeyi ve hata grafiği çizdirilmiştir. En sonunda
kutup
%% atama sonucu yeniden elde edilen sistem ve sistemin kök yer eğrisi
%% çizdirilmiştir. Bu m-file ile elde edilen sistem verileri simulink
%% modelinde kullanılmıştır.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

%% Matlab'in hazırlanması ve eski verilerin silinmesi

clear all
clc
close all

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

%% Ruzgar turbini için gerekli parametreler
```

```

R=21.65; %(metre) Rotorun çapı
Ro=1.2041; % (kg/m^3) havanın yoğunluğu
Jr=3.25*(10^5); %(kg.m^2) Rotorun eylemsizlik momenti
Jg=34.4; %(kg.m^2) Generatörün eylemsizlik momenti
Bls=9500; %(N.m.s/rad) damper sabiti
Kls=2.691*(10^5); %(N.m/rad) rotorun bükülmezlik sabiti
Br=27.36; %(N.m.s/rad) Rotorun sürtünme sabiti
Bg=0.2; %(N.m.s/rad) Generatörün sürtünme sabiti
n=43.165; %dişli oranı

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

%% Durum Uzayi Matrisi

a11=-Br/Jr;
a12=0;
a13= -1/Jr;
a21=0;
a22=-Bg/Jg;
a23=1/(n*Jg);
a31=Kls-((Bls*Br)/Jr);
a32=((Bls*Br)/Jg-Kls)/n;
a33=-Bls*((Jr+((n^2)*Jg))/((n^2)*Jg*Jr));
b11=1/Jr;
b12=0;
b21=0;
b22=-1/Jg;
b31=Bls/Jr;
b32=Bls/(n*Jg);
A=[a11 a12 a13;a21 a22 a23;a31 a32 a33];
B=[b11 b12;b21 b22; b31 b32];
C=[1 0 0;0 1 0;0 0 1];
D=[0 0;0 0;0 0];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%,

%% Sistemin kok yer egrisinin cizdirilmesi

[NUM,DEN] = ss2tf(A,B,[0 1 0],[0 0],2);
stf=tf(NUM,DEN);
figure(1)
rlocus(stf);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

%% Kutup Atama

K=place(A,B,[-1 -3 -5]);
Co=ctrb(A,B)
Cot=Co'

format long

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

```

```

%% anfis icin veri matrisinin olusturulmasi

for lamda=1:61
lamdaj(lamda,:)=(lamda/6)*ones(61,1)
lamdajt=lamdaj'
for beta=0:1:60
lamdai=1/(1/((lamda/6)+(0.08*beta))-(0.035/((beta^3)-1)));
Cp(beta+1,:)=0.22*((116/lamdai)-(0.4*beta)-5)*exp(-12.5/lamdai);
betai(beta+1,:)=(beta*ones(1,61))';
end
Cp2(lamda,:)=Cp
end
son1=[lamdajt(:,1) betai(:,1) Cp2(:,1)];
son2=[lamdajt(:,2) betai(:,2) Cp2(:,2)];
son3=[lamdajt(:,3) betai(:,3) Cp2(:,3)];
son4=[lamdajt(:,4) betai(:,4) Cp2(:,4)];
son5=[lamdajt(:,5) betai(:,5) Cp2(:,5)];
son6=[lamdajt(:,6) betai(:,6) Cp2(:,6)];
son7=[lamdajt(:,7) betai(:,7) Cp2(:,7)];
son8=[lamdajt(:,8) betai(:,8) Cp2(:,8)];
son9=[lamdajt(:,9) betai(:,9) Cp2(:,9)];
son10=[lamdajt(:,10) betai(:,10) Cp2(:,10)];
son11=[lamdajt(:,11) betai(:,11) Cp2(:,11)];
son12=[lamdajt(:,12) betai(:,12) Cp2(:,12)];
son13=[lamdajt(:,13) betai(:,13) Cp2(:,13)];
son14=[lamdajt(:,14) betai(:,14) Cp2(:,14)];
son15=[lamdajt(:,15) betai(:,15) Cp2(:,15)];
son16=[lamdajt(:,16) betai(:,16) Cp2(:,16)];
son17=[lamdajt(:,17) betai(:,17) Cp2(:,17)];
son18=[lamdajt(:,18) betai(:,18) Cp2(:,18)];
son19=[lamdajt(:,19) betai(:,19) Cp2(:,19)];
son20=[lamdajt(:,20) betai(:,20) Cp2(:,20)];
son21=[lamdajt(:,21) betai(:,21) Cp2(:,21)];
son22=[lamdajt(:,22) betai(:,22) Cp2(:,22)];
son23=[lamdajt(:,23) betai(:,23) Cp2(:,23)];
son24=[lamdajt(:,24) betai(:,24) Cp2(:,24)];
son25=[lamdajt(:,25) betai(:,25) Cp2(:,25)];
son26=[lamdajt(:,26) betai(:,26) Cp2(:,26)];
son27=[lamdajt(:,27) betai(:,27) Cp2(:,27)];
son28=[lamdajt(:,28) betai(:,28) Cp2(:,28)];
son29=[lamdajt(:,29) betai(:,29) Cp2(:,29)];
son30=[lamdajt(:,30) betai(:,30) Cp2(:,30)];
son31=[lamdajt(:,31) betai(:,31) Cp2(:,31)];
son32=[lamdajt(:,32) betai(:,32) Cp2(:,32)];
son33=[lamdajt(:,33) betai(:,33) Cp2(:,33)];
son34=[lamdajt(:,34) betai(:,34) Cp2(:,34)];
son35=[lamdajt(:,35) betai(:,35) Cp2(:,35)];
son36=[lamdajt(:,36) betai(:,36) Cp2(:,36)];
son37=[lamdajt(:,37) betai(:,37) Cp2(:,37)];
son38=[lamdajt(:,38) betai(:,38) Cp2(:,38)];
son39=[lamdajt(:,39) betai(:,39) Cp2(:,39)];
son40=[lamdajt(:,40) betai(:,40) Cp2(:,40)];
son41=[lamdajt(:,41) betai(:,41) Cp2(:,41)];
son42=[lamdajt(:,42) betai(:,42) Cp2(:,42)];
son43=[lamdajt(:,43) betai(:,43) Cp2(:,43)];
son44=[lamdajt(:,44) betai(:,44) Cp2(:,44)];
son45=[lamdajt(:,45) betai(:,45) Cp2(:,45)];
son46=[lamdajt(:,46) betai(:,46) Cp2(:,46)];
son47=[lamdajt(:,47) betai(:,47) Cp2(:,47)];

```

```

son48=[lamdajt(:,48) betai(:,48) Cp2(:,48)];
son49=[lamdajt(:,49) betai(:,49) Cp2(:,49)];
son50=[lamdajt(:,50) betai(:,50) Cp2(:,50)];
son51=[lamdajt(:,51) betai(:,51) Cp2(:,51)];
son52=[lamdajt(:,52) betai(:,52) Cp2(:,52)];
son53=[lamdajt(:,53) betai(:,53) Cp2(:,53)];
son54=[lamdajt(:,54) betai(:,54) Cp2(:,54)];
son55=[lamdajt(:,55) betai(:,55) Cp2(:,55)];
son56=[lamdajt(:,56) betai(:,56) Cp2(:,56)];
son57=[lamdajt(:,57) betai(:,57) Cp2(:,57)];
son58=[lamdajt(:,58) betai(:,58) Cp2(:,58)];
son59=[lamdajt(:,59) betai(:,59) Cp2(:,59)];
son60=[lamdajt(:,60) betai(:,60) Cp2(:,60)];
son61=[lamdajt(:,61) betai(:,61) Cp2(:,61)];

son=[son1;son3;son4;son5;son6;son7;son8;son9;son10;...
      son11;son12;son13;son14;son15;son16;son17;son18;...
      son19;son20;son21;son22;son23;son24;son25;son26;...
      son27;son28;son29;son30;son31;son32;son33;son34;...
      son35;son36;son37;son38;son39;son40;son41;son42;...
      son43;son44;son45;son46;son47;son48;son49;son50;...
      son51;son52;son53;son54;son55;son56;son57;son58;...
      son59;son60;son61];

giris1=(son(:,3));
giris2=(son(:,1));
cikis=(son(:,2));

Data=[giris1 giris2 cikis];% Veri matrisinin boyu (3660,3)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

%% genfis1 icin giris verileri ve konfigurasyon parametreleri

numMFs = 3;
trn_data = Data;
chk_data = Data;
mfType = 'gaussmf';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

%% Baslangic FIS'inin olusturulmasi

anfisruzgar = genfis1(trn_data,numMFs,mfType);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

%% ANFIS egitim parametreleri

epoch_n = 200;
trn_err_goal = exp(-5);
ss = 0.01;
ss_dec_rate = 0.9;
ss_inc_rate = 1.1;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

%% ANFIS ile FIS'in egitilerek yeniden uretilmesi

[trn_fismat,t_error,STEP_SIZE,CHKFIS,c_error] = ...
    anfis(trn_data, anfisruzgar, ...
    [epoch_n trn_err_goal ss ss_dec_rate ss_inc_rate], ...
    [1 1 1 1], chk_data, 1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

%% Hata degerlerinin en kucuk degerleri

trn_error = min(t_error);
chk_error = min(c_error);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

%% Uyelik fonksiyonlari girislere gore cizdirilmesi

figure
[x,mf] = plotmf(trn_fismat,'input',1);
subplot(2,1,1), plot(x,mf);
xlabel('Membership Functions for input 1');
[x,mf] = plotmf(trn_fismat,'input',2);
subplot(2,1,2), plot(x,mf);
xlabel('Membership Functions for input 2');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

%% Hata egrilerinin cizdirilmesi

figure
plot([t_error c_error]);
hold on; plot([t_error c_error], 'o');
xlabel('Epochs');
ylabel('RMSE (Root Mean Squared Error)');
title('Error Curves');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

%% Cikis FIS yüzeyinin cizdirilmesi

CHKFIS = setfis(CHKFIS, 'input', 1, 'name', 'Input-1');
CHKFIS = setfis(CHKFIS, 'input', 2, 'name', 'Input-2');
CHKFIS = setfis(CHKFIS, 'output', 1, 'name', 'Target');
figure
gensurf(CHKFIS);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

```

```

%% Kutup atamadan sonraki sistem ve kok yer egrisi

[NUM,DEN] = ss2tf(A-B*K,B,[1 0 0],[0 0],2)
stf2=tf(NUM,DEN)
figure
rlocus(stf2)
sis2=zpk(stf2)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%

```

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ayyüce VURAL
Doğum Tarihi ve Yeri : 06.03.1986 Tekirdağ
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ayyucevural@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniv.	2008
Lise	Fen Bilimleri	Tekirdağ Fen Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011	Arçelik Elektronik İşletmesi	Ar-Ge Mühendisi