

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞKEN HIZLI DEĞİŞKEN KANAT
AÇILI BİR RÜZGÂR TÜRBİNİNİN
MODELLENMESİ, SİMÜLASYONU VE
KONTROLÜ

Şevket Akdoğan
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2011

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞKEN HIZLI DEĞİŞKEN KANAT AÇILI
BİR RÜZGÂR TÜRBİNİNİN MODELLENMESİ,
SİMÜLASYONU VE KONTROLÜ

Şevket Akdoğan
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç.Dr. Serkan Aksoy

GEBZE
2011



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 13.01.2011. tarih ve 2011/02... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 11.02.2011... tarihinde tez savunma sınavı yapılan ...Şevket...AKDOĞAN'ın... tez çalışması ...ELEKTRONİK...MCA. Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Serkan AKSOY

ÜYE

: Prof. Dr. Muammer KALYON

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Abdülkadir BALIKÇI

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: DEĞİŞKEN HIZLI DEĞİŞKEN KANAT AÇILI BİR RÜZGÂR TÜRBİNİNİN MODELLENMESİ, SİMÜLASYONU VE KONTROLÜ

YAZAR ADI: ŞEVKET AKDOĞAN

Bu tez, değişken hızlı değişken kanat açılı bir rüzgâr türbininin modellenmesi, kontrolü ve simülasyonu ile ilgilidir. Tezin amacı, rüzgâr türbini modellenmesi, kontrolü ve simülasyonu konusunda var olan çalışmalara katkıda bulunmaktır. Rüzgâr türbinleri, rüzgâr hızına bağlı olarak üç çalışma bölgesine sahiptir: başlama-bitiş, kısmi yük ve tam yük bölgesi. Rüzgâr türbini modellenmesi, kontrolü ve simülasyonu üzerine literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Fakat bu çalışmaların çoğu rüzgâr türbininin belirli çalışma bölgeleri ve rüzgâr türbininin belirli kısımları ile ilgilidir. Ayrıca doğrulama için kullanılan rüzgâr türbin modeli genelde düşük serbestlik derecesindedir. Kullanılan rüzgâr verisi de gerçekçi olmaktan uzak, ya bir sinüs fonksiyonu ya da basamak fonksiyonudur. Bu tezde diğer çalışmalardan farklı olarak, rüzgâr türbininin çeşitli çalışma evreleri bir bütün olarak ele alınmıştır. Bütünleşik bir rüzgâr türbin modeli oluşturmak ve kontrol etmek amaçlanmıştır. Bu amaçla yola çıkılarak rüzgâr türbininin aerodinamik modeli, mekanik modeli, Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) modeli ve kanat açısı eyleyicisi modeli geliştirilmiştir. Rüzgâr türbininin çalışma evrelerinden kısmi yük bölgesi için generatör moment kontrolcüsü, tam yük bölgesi için ise generatör moment kontrolcüsü ile birlikte çalışan kanat açısı kontrolcüsü kullanılmıştır. Ayrıca generatör moment kontrolcüsünün ürettiği referans moment ve güç değerlerini izleyen ÇBAG güç kontrolcüsü kullanılmıştır. Bu tez kapsamında tasarlanan modeller ve kontrolcüler MATLAB-SIMULINK ortamında gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kontrolcülerin doğrulanması amacıyla NREL'nin (National Renewable Energy Laboratory) geliştirdiği yüksek serbestlik dereceli rüzgâr türbini simülatörü FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence) kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan rüzgâr verisinin gerçekçi olması için yine NREL'in geliştirdiği gerçekçi rüzgâr simülatörü TURBSIM (Turbulence Simulation) kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları FAST'nin kullandığı kontrolcü sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS: MODELLING SIMULATION AND CONTROL OF A VARIABLE SPEED VARIABLE PITCH WIND TURBINE

AUTHOR: ŞEVKET AKDOĞAN

This thesis is related to modelling, simulation and control of a variable-speed variable-pitch wind turbine. The aim of the thesis is to contribute to the literature on modelling, control and simulation of wind turbines. Wind turbines, depending on wind speed have three operating regions: start-finish region, the partial load region, and the full load region. There are lots of studies on modelling, control and simulation of wind turbines in literature. But most of these studies focus on specific operating regions and specific parts of wind turbines. In addition, wind turbine model used for verification usually has low degrees of freedom. Besides, wind models used in these studies are far from being realistic. Sine function and step function are frequently used as wind models. Unlike other studies, in this thesis, different operation regions of the wind turbine are considered as a whole. Developing an integrated wind turbine model and controlling it are aimed in this study. For this purpose, based on wind turbine, the aerodynamic model, mechanical model, Double-Fed Induction Generator (DFIG) model and blade angle actuator model are developed. Generator torque controller is used for partial load operation region of wind turbine. For full load operation region, blade pitch angle controller that works with generator torque controller is used. In addition, DFIG power controller is used to track reference torque and power values produced by generator torque controller. The models and controllers designed within the scope of this thesis are implemented in MATLAB-SIMULINK. In order to verify designed controllers, FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence) developed by NREL (National Renewable Energy Laboratory) is used. In addition, wind data used to be realistic is generated by means of TURBSIM (Turbulence Simulation) which is also developed by NREL. Results of this study are compared with the results of FAST's default controllers.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada üniversitedeki görevini bırakmasından dolayı resmi tez danışmanlığımı devretmiş olan fakat tez çalışmamın sonuna kadar bana destek olan Sayın Dr. Şeref Naci Engin hocama, iş yoğunluğuna rağmen tez danışmanlığım görevini devralmış Sayın Doç.Dr Serkan Aksoy hocama, sabırla bana itici güç oluşturan sevgili eşim Çiğdem Akdoğan'a ve biricik oğlum Burak Erdem Akdoğan'a teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	2
1.2. Rüzgâr Enerjisi Tarihçesi	6
1.3. Rüzgâr Türbinleri	7
2. RÜZGÂR MODELİ	10
2.1. Rüzgâr Hızı Modellenmesi	10
2.2. Etkin Rüzgâr Hızı Modeli	13
3. RÜZGÂR TÜRBİNİ MODELLEMESİ	17
3.1. Rüzgâr Türbini Aerodinamiği	17
3.1.1. Eyleyici Disk Modeli	17
3.1.2. Kanat Elemanı Teorisi	20
3.1.3. Aerodinamik Model	23
3.2. Rüzgâr Türbini Mekanik Modeli	25
3.2.1. Nonlinear Model	25
3.2.2. Linear Model	28
3.3. Generatör Modeli	29
3.3.1. Çift Beslemeli Asenkron Generatör Matematiksel Modeli	33
3.3.2. İndirgenmiş ÇBAG Matematiksel Modeli	36
4. RÜZGÂR TÜRBİNİ KONTROLÜ	39
4.1. Kontrol Amaçları	39
4.1.1. Maksimum Enerji Yakalama	39
4.1.2. Mekanik Yüklere Karşı Korunma	41
4.1.3. Güç Kalitesi	41

4.2. Kontrol Stratejileri	43
4.2.1. Sabit Hızlı Sabit Kanat Açılı Rüzgâr Türbini	43
4.2.2. Sabit Hızlı Değişken Kanat Açılı Rüzgâr Türbini	46
4.2.3. Değişken Hızlı Sabit Kanat Açılı Rüzgâr Türbini	48
4.2.4. Değişken Hızlı Değişken Kanat Açılı Rüzgâr Türbini	49
4.3. DH-DK Açılı Rüzgâr Türbini Kontrolü	51
4.3.1. Generatör Moment Kontrolcüsü	53
4.3.2. Kanat Açısı Kontrolcüsü	57
4.3.3. ÇBAG Kontrolcüsü	59
5. BENZETİM ÇALIŞMALARI ve SONUÇLARI	66
5.1. FAST ve TURBSIM	66
5.2. Kısmi Yük Bölgesi Sonuçları	70
5.3. Tam Yük Bölgesi Sonuçları	74
6. SONUÇLAR	78
KAYNAKLAR	80
ÖZGEÇMİŞ	82

ŞEKİLLER

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. VESTAS firması rüzgâr türbinleri sayısal gelişimi	7
1.2. a) Yatay eksenli ve b) Dikey eksenli rüzgâr türbinleri.	8
1.3. Yatay eksenli rüzgâr türbininin genel yapısı.	9
2.1. Van Der Hoven Spektrumu.	11
2.2. Weibull ortalama rüzgâr hızı olasılık dağılımı.	12
2.3. Etkin rüzgâr hızı modeli blok şeması.	14
3.1. Eyleyici diskten geçen hava akımı.	18
3.2. Bir kanaldan geçen basınç ve rüzgâr hızı.	19
3.3. Kanat elemanı şeması.	21
3.4. Kanat kesiti üzerindeki kuvvetler.	21
3.5. Tipik itme ve kaldırma kuvveti katsayıları değişim grafiği.	22
3.6. Rüzgâr türbini güç C_p ve moment C_q katsayıları.	24
3.7. Rüzgâr türbini dinamiği.	26
3.8. Tek kütleli mekanik model	28
3.9. Doğrudan bağlanmış Sincap Kafesli Asenkron Generatör.	29
3.10. Stator kontrollü Sincap Kafesli Asenkron Generatör	30
3.11. Stator kontrollü SKAG moment-hız değişimi.	31
3.12. Rotor kontrollü çift beslemeli asenkron generatör.	32
3.13. Senkron üstü ve senkron altı hızlarda ÇBAG çalışma prensibi.	32
3.14. Park dönüşüm vektörleri.	33
3.15. Asenkron generatörün $d-q$ eksenlerinde gösterimi.	34
4.1. Rüzgâr türbini ideal güç eğrisi	40
4.2. SH-SK açılı rüzgâr türbini moment-hız grafiği.	44
4.3. SH-SK açılı rüzgâr türbini: a) Çıkış gücü eğrisi, b) Güç katsayısı eğrisi.	45
4.4. “Pitch-to-feather” tekniği.	46
4.5. “Active Stall” tekniği.	47
4.6. SH-DK açılı rüzgâr türbini “pitch-to-feather” kontrol stratejisi.	48
4.7. DH-DK açılı rüzgâr türbini “pitch-to-feather” kontrol stratejisi.	50
4.8. Değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbini blok şeması.	51
4.9. Rüzgâr türbini kontrol seviyeleri.	52

4.10. İdeal güç - hız eğrisi.	53
4.11. Kullanılan generatör moment kontrolcüsü blok modeli.	54
4.12. Generatör moment kontrolcüsü SIMULINK gösterimi	57
4.13. Kanat açısı eyleyici modeli.	58
4.14. Kanat açısı kontrolcüsü SIMULINK gösterilimi.	59
4.15. Kanat açısı eyleyicisi SIMULIK gösterilimi.	59
4.16. İndirgenmiş ÇBAG modeli.	61
4.17. Rotor akımı kontrol şeması.	62
4.18. ÇBAG güç-moment kontrolcüsünün SIMULINK gösterimi.	64
5.1. FAST simülatörü SIMULINK bloğu.	67
5.2. Rüzgâr türbinine etkiyen rüzgâr yönünlüğü.	68
5.3. Bütünleşik rüzgâr türbin ve kontrol modelinin SIMULINK gösterimi.	69
5.4. FAST rüzgâr türbin ve kontrol modeli SIMULINK gösterimi.	70
5.5. Kısmi yük bölgesi rüzgâr verisi.	70
5.6. Kısmi yük bölgesi tepe hız oranları.	71
5.7. Kısmi yük bölgesi MPPT/Referans generatör gücü.	71
5.8. ÇBAG aktif gücü.	72
5.9. Kısmi yük bölgesi generatör güçleri.	73
5.10. Kısmi yük bölgesi rotor hızları.	73
5.11. Kısmi yük bölgesi generatör momentleri.	74
5.12. Tam yük bölgesi rüzgâr hızı.	74
5.13. Tam yük bölgesi tepe hız oranları.	75
5.14. Tam yük bölgesi MPPT/Referans generatör gücü.	75
5.15. Tam yük bölgesi rotor hızları.	76
5.16. Tam yük bölgesi generatör gücü.	76
5.17. Tam yük bölgesi rotor momenti.	77

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Yüzey tipine göre γ pürüzlülük katsayısının değışimi	12
4.1. Generatör Parametreleri	65
5.1. Rüzgâr Türbini Parametreleri.	69

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

v	: Rüzgâr hızı (m/sn)
ρ	: Havanın yoğunluğu (kg/m ³)
R	: Rotor yarıçapı (m)
P_a	: Aerodinamik güç (Watt).
T_a	: Aerodinamik moment (N-m)
λ	: Tepe hız oranı
β	: Kanat Açısı (derece)
C_p	: Güç katsayısı.
C_q	: Moment katsayısı.
ω_r	: Rotor hızı (rad/sn).
ω_g	: Generatör hızı (rad/sn).
T_g	: Generatör momenti (N-m).
T_{ls}	: Düşük hız şaft momenti (N-m).
T_{ls}	: Yüksek hız şaft momenti (N-m).
K_g	: Generatör sönümleme katsayısı (N-m/rad-sn).
K_r	: Rotor sönümleme katsayısı (N-m/rad-sn).
J_r	: Rotor eylemsizlik momenti (kg-m ²).
J_g	: Generatör eylemsizlik momenti (kg-m ²).
J_t	: Türbin toplam eylemsizlik momenti (kg-m ²).
K_t	: Türbin toplam sönümlemesi (N-m/rad-sn).
B_r	: Rotor burkulma katsayısı (N-m/rad).
B_g	: Generatör burkulma katsayısı (N-m/rad).
B_t	: Türbin toplam burkulma katsayısı (N-m/rad).
$V_{\min}$	: Minimum rüzgâr hızı (m/sn)
$V_{\max}$	: Maksimum veya kesme rüzgâr hızı (m/s)
V_n	: Nominal rüzgâr hızı (m/s)

P_n	: Rüzgâr türbini nominal gücü (Watt)
T_n	: Rüzgâr türbini nominal momenti (N-m)
<i>ÇBAG</i>	: Çift Beslemeli Asenkron Geneneratör
<i>DFIG</i>	: Double Fed Induction Generator (<i>ÇBAG</i>)
<i>SKAG</i>	: Sincap Kafes Asenkron Geneneratör
<i>SCIG</i>	: Squirrel Cage Induction Generator (<i>SKAG</i>)
<i>RTKS</i>	: Rüzgâr Türbini Kontrol Sistemleri
<i>SH – SK</i>	: Sabit Hızlı Sabit Kanat
<i>SH – DK</i>	: Sabit Hızlı Değişken Kanat
<i>DH – SK</i>	: Değişken Hızlı Sabit Kanat
<i>DH – DK</i>	: Değişken Hızlı Değişken Kanat
<i>MPPT</i>	: Maksimum Güç Noktası Takibi (Maximum Power Point Tracking)
<i>FAST</i>	: Yıpranma, Aerodinamik, Yapı ve Türbülans (Fatigue, Aerodynamics Structures and Turbulence)
<i>TURBSIM</i>	: Türbülans Simülatörü(Turbulance Simulation)
<i>NREL</i>	: Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory)

1. GİRİŞ

Rüzgâr enerjisi üretimi, diğer yeni gelişen enerji üretim yöntemleri arasında en hızlı büyüyendir. Geçen 10 yılda rüzgâr üretimi Amerika’da ve Avrupa’da yıl başına % 20 - % 30 arası artmıştır. Buna rağmen rüzgâr enerjisi kullanımı hak ettiği oranlara henüz ulaşamamıştır. Tükenen fosil temelli yakıtlar ve bu yakıtların çevreye etkileri düşünüldüğünde rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Ayrıca artan enerji maliyetleri, rüzgâr enerjisi üretimini çok pahalı olmaktan çıkarıp, ulaşılabilir bir enerji üretim yöntemine dönüştürmüştür. Son 20 yılda rüzgâr türbinlerinin boyutları 20kW’tan 5MW ve üzerine yükselmiştir.

Rüzgâr türbinlerinin kapasiteleri büyüdükçe elde edilen gücün optimizasyonu ve kalitesi de önem kazanmıştır. Rüzgâr türbinlerinin kapasiteleri arttıkça, maliyetleri ve büyüklükleri de artar. Bu durumda rüzgâr türbinlerinin aşırı yüklere karşı korunması ve işletme hatalarının önlenmesi önem kazanır. Rüzgâr türbinlerinin işletme aşamasında birçok kontrol problemi ile karşılaşılır. Rüzgâr değişken bir doğa olayı olduğundan, elde edilen gücün regülasyonu önem kazanmaktadır. Ayrıca türbine zarar verebilecek rüzgâr yüklerinden kaçınmak gerekir. Düşük rüzgârlarda rüzgârdan optimum güç elde etmek ayrıca bir kontrol problemidir. Bunun için rüzgâr türbininde kule yönü kontrolü (yaw control) ve generatör moment kontrolü kullanılır. Yüksek rüzgârlarda amaç, rüzgâr türbinini zarar görmekten korumak ve nominal güç elde etmektir. Bu amaçla rüzgârdan çekilen enerjiyi sınırlayan kontrol metotları kullanılır. Kanat açısı kontrolü (pitch control) bu metotlardan biridir.

Rüzgâr türbini modellenmesi, simülasyonu ve kontrolü konusunda literatürde oldukça fazla sayıda çalışma mevcuttur. Ülkemizde de bu konuda daha önceleri tezler hazırlanmıştır. Yapılan çalışmaların çoğunluğu, rüzgâr türbininden düşük rüzgârlarda maksimum güç elde etme problemi ile ilgilidir. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak düşük ve yüksek rüzgâr hızları için kontrolcüler önerilmiştir. Ayrıca rüzgâr türbininin generatör kanat açısı eyleyicisi gibi kısımları da modellenerek bütünsel bir rüzgâr türbin modeli oluşturulmuştur. Bu çalışmayı ülkemizde yayınlanan diğer çalışmalardan farklı kılan bir diğer özellik ise, doğrulama amacı ile gerçekçi rüzgâr similatörü TURBSIM ve yüksek serbestlik

derecesine sahip rüzgâr türbin simülatörü FAST'ın (Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence) kullanılmış olmasıdır. Bu simülatörler Amerikan Yenilenebilir Enerji Labaratuarları (NREL) tarafından geliştirilmiş olup, birçok çalışmada doğrulama aracı olarak kullanılmıştır.

Bu tezin giriş bölümünde tezin bu alandaki diğer çalışmalara göre farkı belirtilerek tezin motivasyonu vurgulanmıştır, konu ile ilgili bilgiler verilmiş, rüzgâr enerjisinin kısa tarihçesi ve türbin tipleri anlatılmıştır. Bölüm 2'de rüzgâr oluşumu ve rüzgâr modellenmesi anlatılmıştır. Bölüm 3'de rüzgâr türbini aerodinamik modeli, mekanik modeli ve generatör modeli anlatılmıştır. Bölüm 4'de rüzgâr türbini kontrol amaçları ve kontrol stratejileri anlatılmıştır. Bunun yanında Bölüm 4'de değişken hızlı değişken kanat açılı bir rüzgâr türbininin generatör moment kontrolcüsü, kanat açısı kontrolcüsü ve Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) güç kontrolcüsü tasarlanmıştır. Bölüm 5'te bu çalışmada modellenen rüzgâr türbini ve kontrolcüler MATLAB-SIMULINK ortamında doğrulanmıştır. Sonuç kısmında tezde yapılan çalışmaların sonuçları değerlendirilmiş ve bu çalışmadan sonra yapılabilecek yeni çalışmalar önerilmiştir.

1.1. Genel Bilgiler

Rüzgâr enerjisi, güneş ışınlarının yeryüzünün farklı bölgelerini farklı ısıtmasından kaynaklanır. Yeryüzü bölgelerinin farklı ısınması, havanın sıcaklığının, neminin ve basıncının farklı olmasına neden olur. Bu farklı basınç da havanın hareketine yol açar. Güneş ışınları olduğu sürece rüzgâr olacaktır. Rüzgâr güneş enerjisinin dolaylı bir ürünüdür. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin yaklaşık % 2 kadarı rüzgâr enerjisine çevrilir. Dünya yüzeyi düzensiz bir şekilde ısınır ve soğur. Bunun sonucunda atmosferik basınç alanları oluşur. Bu da yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru giden hava akışına sebep olur. Rüzgâr hızında, durgun bir havadan, bir fırtınaya kadar çok farklı değişimler vardır. Elektrik enerjisi kullanımı zamana bağlı olduğu için rüzgârdaki günlük ve mevsimsel değişimler önemli bir göstergedir. Rüzgârdaki değişim yeryüzü şekillerine doğrudan bağlıdır. Tepelerin, vadilerin, akarsu vadilerinin ve göllerin oluşturduğu coğrafi bir alanda değişken bir rüzgâr rejimi oluşur.

Tepeler, platolar ve uçurumlar bir rüzgâr türbini için, yüksek rüzgâr hızının bulunabileceği yerlerdir. Daha alçak ve kapalı olan vadilerde rüzgâr hızı düşük olur. Bununla beraber, rüzgâr hızının yüksek olduğu vadiler de vardır. Rüzgâr akışına paralel olduklarında, vadiler kanal görevi görür ve rüzgâr kaynağını artırabilir. Vadideki bir daralma, rüzgâr akışını daha da kuvvetlendirebilir. Bu genellikle rüzgâra bakan dar dağ geçitlerinde olur. Yüksek arazi özellikleri rüzgâr akışını hızlandırabilir. Yaklaşan bir hava kütlesi zirveyi aşarken genellikle ince bir tabaka içine sıkıştırılır. Bunun sonucu rüzgâr hızı artar. Bir sırt üzerinde, rüzgâr sırt hattına dik estiği zaman en büyük hız oluşur. İzole tepeler ve dağlar rüzgârları sırtlara göre daha az hızlandırırlar, çünkü daha fazla hava yanlara doğru akışa yönelir.

Büyük su kütlelerine yakın kara alanları iki nedenden dolayı iyi rüzgârlı alanlar olabilir. İlk olarak, bir su yüzeyi bir kara yüzeyine göre çok daha düzgündür, bu nedenle su üzerinde akan hava daha az sürtünmeye tabidir. Hakim rüzgâr yönünün sahile doğru olduğu sahil şeridi en iyi rüzgâr alanıdır. İkinci olarak, bölgesel rüzgârların hafif olduğu zaman, kara ve deniz ısınmalarının farklı olmasından kaynaklı deniz veya göl meltemi olarak bilinen yerel rüzgârlar oluşur. Karalar suya göre çok daha çabuk ısındığı için, kara üzerindeki ısınan ve yükselen havanın yerine su üzerindeki soğuk hava gelir. Bu şekilde denizden karaya yaklaşık 13 ile 19km/saat veya üzeri hızda meltem oluşur. Geceleri kara çok daha çabuk soğuduğu için meltem durur veya ters yönde eser.

Rüzgârın üzerinde estiği yüzey rüzgârın hızını etkileyen en önemli faktörlerdendir. Ağaçlar ve binalar ile kaplı pürüzlü yüzeyler göl veya açık tarlalar gibi düzgün yüzeylere göre daha fazla sürtünme ve türbülans oluşturacaktır. Sürtünme ne kadar büyükse yere yakın rüzgâr hızı da o kadar düşük olur.

Rüzgâr enerjisi sürdürülebilir, ekonomik, aynı zamanda temiz bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr enerjisinin kullanım alanları ve avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Elektrik üretme,
- Pilleri şarj etme,
- Su depolama,

- Taşımacılık,
- Su pompalama,
- Tahılların öğütülmesi,
- Soğutma.

Enerji üretiminde rüzgâr kaynağının üstünlükleri:

- Temizdir,
- Bedavadır,
- İklim değişikliği sorununun çözümüne katkı sağlar,
- Hava kirliliği sorununu azaltır,
- Enerji güvenliği sağlar,
- Enerji arzını çeşitlendirir,
- Yakıt ithalini azaltır,
- Yakıt maliyetleri yoktur,
- Ulusal kaynaklar için devletlerarası anlaşmazlıkları önler,
- Kırsalda elektrik ağını geliştirir,
- İstihdam ve bölgesel kalkınma sağlar,
- Fosil yakıtların fiyat değişkenliğinden kaynaklanan karmaşıklığı önler,
- Modülerdir ve çabuk kurulur,
- İthalat bağımlılığı azdır,
- Yakıt fiyatına bağımlı değildir,
- Karbon salınımı yoktur,
- Kaynak tükenmesi yoktur. Küresel rüzgâr kaynağı küresel enerji talebinden daha büyüktür,
- Arazi dostudur. Rüzgâr santrali içinde veya etrafında tarım/sanayi faaliyetleri yapılabilir,
- Uygulama esnekliği vardır. Büyük ölçekli ticari santraller veya ev tipi uygulamalar mümkündür,
- Ulusal yararı yüksektir. Geleneksel yakıtların aksine, enerji güvenliği açısından diğer ülkelere bağımlılığı azaltır.

Dünyada rüzgâr gücünde liderlik yapabilir ana piyasalar: Avustralya, Kanada, Çin, Fransa, Hindistan, İtalya, Filipinler, Polonya, Türkiye, İngiltere ve ABD'dir. Bu piyasalar gelişme aşamasındadır ve ana rüzgâr gücü büyümesi buralarda gerçekleşebilir.

Dünya genelinde 2020 yılında 1.245GW rüzgâr gücüne ulaşılması hedeflenmektedir. Bu süreç içerisinde rüzgârdan üretilen elektrik enerjisi birim maliyetlerinin de düşmesi beklenmektedir. Yine bu süre içinde dünya çapında rüzgâr endüstrisinde imalat, kurulum ve diğer iş kollarında 2.3 milyon kişilik iş imkânının oluşması hesaplanmaktadır. Rüzgâr enerjisi enerji geleceğimizde ve iklim değişikliğini önlemede büyük bir role sahip olabilir. Halen dünyada en hızlı büyüyen enerji sektörlerinden biridir. Gelişmiş ülkeler sera gazı salınımlarından korunmak için dünyada rüzgâr enerjisini teşvik etmek ve desteklemek zorundadır. Rüzgâr gücü küresel çapta kullanıma hazır ve gerekli olan güç teknolojilerinin en etkili olanlarından biridir ve diğer geleneksel güç santrallerinden çok daha çabuk kurulabilmektedir. Rüzgâr türbinlerinde küresel piyasanın 2020 yılına kadar, şimdiki 8milyar Avro'dan 80 milyar Avro'luk yıllık iş hacmine çıkması öngörülmektedir. Zamanımızın küresel enerji politikaları sadece iklim değişikliği ile değil, aynı zamanda enerji talebi artışları ve enerji güvenliği konuları ile de önemlidir. Bu üç konuda rüzgâr enerjisi liderliğe adaydır. Bir rüzgâr türbininden üretilen elektrik enerjisinin en verimli şekilde kullanılması için enerji tüketimi rüzgâr mevcudiyetine göre uyarlanmalıdır. Hava tahminleri yüksek ve düşük rüzgâr periyotlarının planlanmasında kullanılabilir.

Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir araştırmaya göre, sadece Kaliforniya'nın rüzgâr potansiyeli 1.2 milyon ton CO₂ ve 15 milyon ton diğer kirleticileri azaltabilecek kapasitededir. Bu miktar aynı hava kalitesini sağlamak için 90milyon ile 175 milyon ağaçlı bir ormana karşılık gelir. Dünya elektrik ihtiyacının %12'si rüzgârdan sağlanabilir. Rüzgâr enerjisi, enerji geleceğimizde ve iklim değişikliğini önlemede büyük bir role sahiptir. Halen dünyada en hızlı büyüyen enerji sektörlerinden biridir. Avrupa'daki kurulu rüzgâr gücü yılda 50 milyon tondan fazla CO₂ sakınması yapmaktadır. 2030 yılına kadar küresel karbon salınımının %45 kadarı güç sektöründen kaynaklanacaktır. CO₂ salınımının azaltılması Kyoto

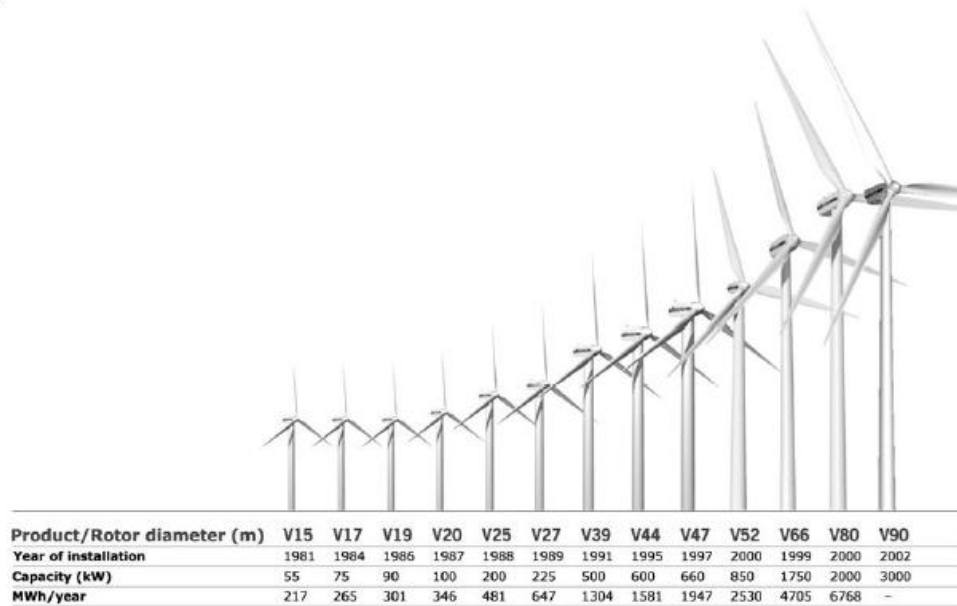
Protokolü iklim değişikliğine göre ülkelerin yerine getirmesi gereken g revlerdendir. Rüzgâr enerjisine yapılan yatırım, CO₂ salınımının azaltılmasına katkıda bulunmaktadır [WEB1].

1.2. Rüzgâr Enerjisi Tarihçesi

İnsanlık medeniyet tarihinde rüzgâr çok önemli bir rol oynamıştır. Rüzgâr ilk olarak 5000 yıl önce Mısır'da kayıkların bir sahilden diğerine y zd r lmesinde kullanılmıştır. Gerçek anlamda ilk rüzgâr değirmeni M. . 200'li yıllarda antik Bağdat'ta inşa edilmiştir. Bu değirmen bir eksene tutturulmuş pervaneler ile dönüş hareketi üreten bir makinedir. M.S. 10. yüzyıla kadar doğu İran ve Afganistan'da beş metrelik rüzgâr yakalama kanatları ve dokuz metrelik yüksekliği olan rüzgâr değirmenlerinde tahıl öğütüldüğü bilinmektedir. Batı dünyası rüzgâr değirmenlerini çok daha sonraları keşfetmiştir. Bu konudaki ilk yazılı kayıtlar 12.yüzyıla aittir. Çok pervaneli yel değirmenleri 19.yüzyılın ikinci yarısında ABD'de icat edilmiştir. 1889 yılında ABD'de 77 rüzgâr değirmeni fabrikası vardı ve yüzyılın sonunda rüzgâr değirmeni ihracatı ABD ekonomisi için en büyük ihracat kalemi olmuştu. Dizel motorlar icat edilene kadar, ABD'deki büyük demiryolları büyük çok pervaneli yel değirmenlerine bağlı kalmıştır (buhar lokomotifleri için su pompalama, yel değirmeni ile yapılmıştır). 1930 ve 1940'lı yıllarda ABD'de yüz binlerce elektrik üreten rüzgâr türbini imal edilmiştir. Bunlarda yüksek hızda dönen ve elektrik generat r n  çalıştıran iki veya üç ince pervane vardı. Bu türbinler çiftliklere elektrik sağladılar, depolama pillerini doldurmada, radyo alıcılarını çalıştırmada ve aydınlatma ampullerini çalıştırmada kullanıldılar. 1950'lerin başlarında ulusal şebekelerin her eve ulaşacak kadar yaygınlaşması ve elektrik düzenleme yasalarının çıkarılması ile rüzgâr türbini bir duraklama devresine girdi. 1973 OPEC (Petrol İhraç Eden  lkeler Topluluğu) petrol ambargosunu takiben enerji fiyatlarındaki artış ve geleneksel enerji kaynaklarının sınırlılığı, rüzgâr enerjisine olan ilgiyi tekrar artırmıştır. Teşvikler ve akademik araştırma çalışmaları sonucu birçok yeni türbin tasarımı yapılmıştır. Bazı modeller çok büyüktür. 90 metre pervane çaplı büyük bir türbin, 700 evin elektrik ihtiyacını karşılayabilir. Konutlarda ve çiftliklerde kullanılmak üzere birçok yeni küçük ölçekli model geliştirilmiştir. 1970'li yıllarda ABD'de 50'ye yakın yerli rüzgâr türbini imalatçısı vardı. Rüzgâr sistemleri için yeni

bir pazar olarak “rüzgâr tarlaları” 1980 yılı başlarında başladı. 1978 yılında ABD’de çıkarılan yasa ile rüzgâr enerjisine getirilen teşvikler sonucu elektrik dağıtım şirketleri rüzgâr enerjisinden üretilen elektriği almak zorundaydılar [WEB1].

Gelişmiş ülkelerdeki rüzgâr enerjisine uygulanan teşvikle her geçen yıl dünyada rüzgârın enerji pastasındaki payı artmaktadır. Rüzgâr enerjisine yapılan yatırımlar sayesinde üretilen rüzgâr türbinlerinin boyutları ve verimlilikleri her yıl biraz daha artmaktadır. Şekil 1.1’de VESTAS (Danimarka) firmasının ürettiği rüzgâr türbinlerinin kapasite ve büyüklüklerinin yıllara göre gelişimi gösterilmiştir [Munteanu et al,2008]. Bu şekilden de anlaşılabacağı gibi rüzgâr enerjisi ve rüzgâr türbini teknolojisi önemini arttırmaya devam edecektir.

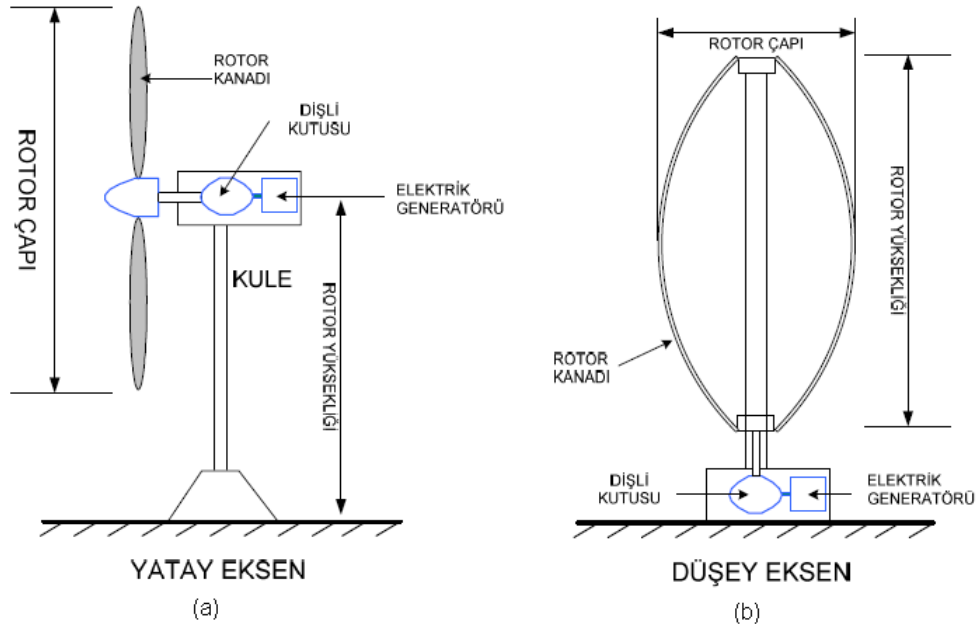


Şekil 1.1. VESTAS firması rüzgâr türbinleri sayısal gelişimi

1.3. Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinleri rotor tiplerine göre ikiye ayrılır. Bunlar yatay eksenli rüzgâr türbini ve dikey eksenli rüzgâr türbinleridir. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin en başarılı örneği Şekil 1.2.b’de görünen Darrieus tipi rüzgâr türbinidir [Tanrıöven, 2010]. Bu tip rüzgâr türbinlerinin en iyi özelliği generatör ve dişli aktarma elemanlarının yerde konuşlanmış olmasıdır. Bu rüzgâr türbinlerinin bakımı kolay değildir. Bu yüzden kullanımı son yıllarda oldukça düşmüştür. Yatay eksenli rüzgâr

türbinleri yüksek rüzgâr hızları ve düşük türbülansdan dolayı çok daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Yatay eksenli türbinler Şekil 1.2.a’da görüldüğü gibi bir kule üzerinde kanatlar, dişli kutusu ve elektrik generatöründen oluşmaktadır. Yatay eksenli ticari rüzgâr türbinleri genellikle iki kanatlı veya üç kanatlıdır. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde rotor eksenini rüzgâr yönünde değiştirilerek her yöndeki rüzgârla çalıştırılabilirler.

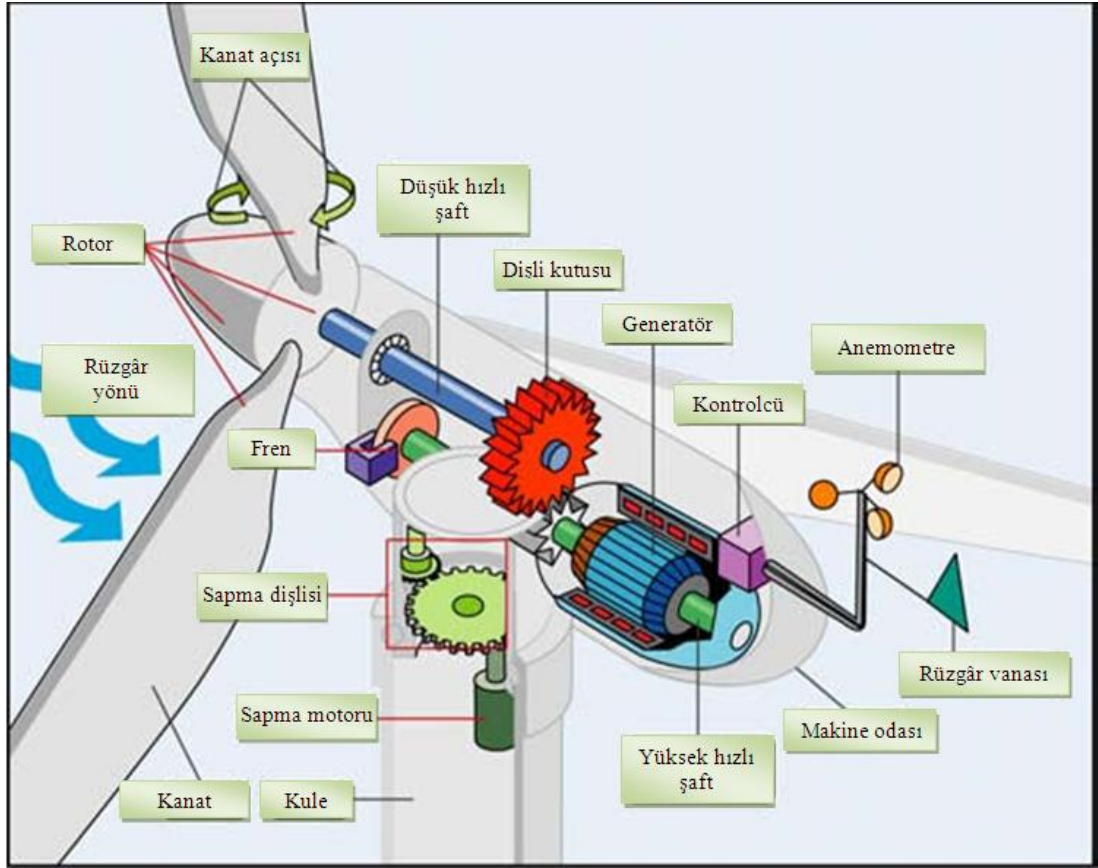


Şekil 1.2. a) Yatay eksenli ve b) Dikey eksenli rüzgâr türbinleri.

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri, aerodinamik alt sistemi, mekanik alt sistemi, generatör alt sistemi ve elektrik alt sisteminden oluşur. Şekil 1.3’de tipik yatay eksenli bir rüzgâr türbininin temel yapısı gösterilmiştir [Güneş,2006].

Aerodinamik alt sistem, türbin rotoruna karşılık gelir. Türbin rotoru kanatlar ve kanatların birleştiği göbekten (hub) oluşur. Mekanik alt sistem; düşük hızlı şaft, yüksek hızlı şaft, bunlar arasındaki dişli kutusu ve frenlerden oluşur. Rüzgâr türbinlerinde dişli kutusu zorunlu değildir. Türbin rotoru doğrudan generatör şaftına bağlanabilir. Generatör yüksek hızlı şafta bağlı, aerodinamik momenti elektrik enerjisine çeviren, elektrik makinesidir. Kule rüzgâr türbinini taşıyan direktir. Kule üzerinde, “nacelle/nasel” denen dişli kutusu ve generatörü içine alan makine odasını döndürmeye yarayan bir dişli mekanizması vardır. Türbini kendi etrafında döndürerek rüzgârı mümkün olduğunca tam karşıdan almaya yarayan bu

mekanizmaya sapma sistemi (yaw system) denir. Elektrik alt sistem generatör çıkışındaki elektriği şebekeye bağlayan dönüştürücü, transformatör ve kondansatör gibi elektriksel elemanlardan oluşur. Şebekeden bağımsız çalışan rüzgâr türbinlerinde enerji depolama birimi bulunur.



Şekil 1.3. Yatay eksenli rüzgâr türbininin genel yapısı.

2. RÜZGÂR MODELİ

Rüzgâr sıcaklık farklarından dolayı büyük hava kütlelerinin hareketlerinden oluşur. Ekvator çevresindeki ısınan hava atmosferin dış tabakasına yükselir ve kutuplara doğru hareket eder. Daha sonra kutuplardaki atmosferin alt tabakasında olan soğuk hava ile yer değiştirir. Kutuplardaki soğuk hava ise ekvatora doğru hareket eder. Bu hava hareketlerine dünyanın kendi etrafındaki dönüşü de etki eder. Bu büyük ölçekteki hava hareketleri geostropik rüzgârları oluşturur.

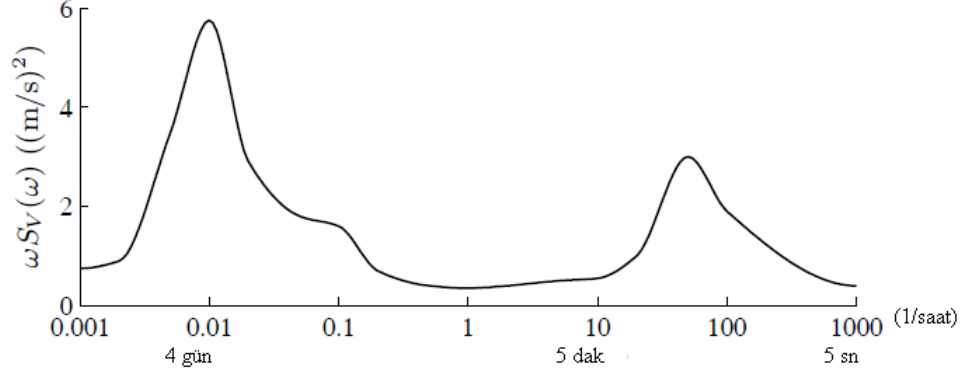
100 metreye kadar olan atmosferin alt tabakasındaki rüzgârların hızları ve yönleri sürtünme kuvvetleri ve engellerden kaynaklı (dağ, tepe, bina, vd.) olarak değişir. Bu durumda rüzgârda türbülans dediğimiz ani şiddet değişimleri oluşur. Göller ve denizlerden kaynaklı hava sıcaklık farkları ise bölgesel rüzgârların oluşmasına neden olur. Bölgesel rüzgârlar ve geostropik rüzgârlar dünyanın rüzgâr kaynağını oluşturur. Rüzgâr kaynağı coğrafi konuma, yüksekliğe, yüzey yapısına ve çevredeki engellere bağlı olarak farklılıklar gösterir.

Bu bölümde, rüzgâr karakteristiklerinin daha iyi anlaşılması, analitik olarak incelenmesi ve buna göre en uygun türbin kontrollerinin gerçekleştirilmesi için rüzgârın matematiksel modelinin nasıl elde edildiği anlatılacaktır.

2.1. Rüzgâr Hızı Modellenmesi

Yukarıda belirtildiği gibi rüzgâr gücünü oluşturan rüzgâr hız özellikleri çeşitli sebeplere bağlı olarak ciddi değişimler gösterir. Yüzey rüzgârlarının frekans uzayındaki kinetik enerji dağılımının ilginç bir karakteristiği vardır. Şekil 2.1’de uzun süreli rüzgâr hızı ölçümleri ile elde edilmiş Von Der Hoven rüzgâr hızı spektrumu gösterilmiştir [Bianchi et al,2007]. Burada dikey eksen $\omega S_v(\omega)$, rüzgâr hızının güç spektrum yoğunluğu ile açısal frekansın çarpımını ifade eder. Farklı bölgelerde ölçülen spektrum eğrileri detayda bazı farklılıklar gösterse de aynı zarfı oluşturmuşlardır. Bütün sahalardan alınan ölçümlerde 0.01/saat ve 50/saat frekanslarında rüzgâr kinetik enerjisi maksimum değerine ulaşılmıştır. 0.01/saat ’lık frekans 100 saatlik periyoda yani yaklaşık 4 güne karşılık gelir. Burada düşük

frekans bölgesindeki rüzgârlar geostropik rüzgârlara, yüksek frekans bölgesi ise yerel rüzgârlarla bağlantılı türbülansa karşılık gelmektedir.



Şekil 2.1. Van Der Hoven Spektrumu.

Bir bölgedeki rüzgâr hızı, o bölgedeki ortalama rüzgâr hızı ile türbülanslı rüzgâr hızının toplamı ile

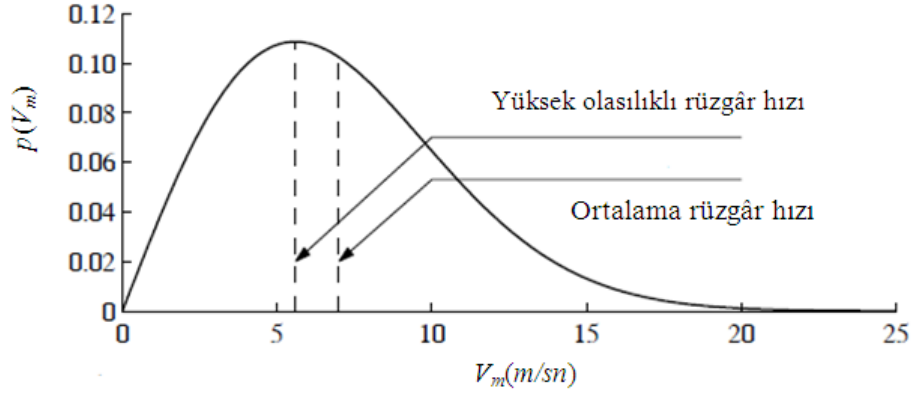
$$V = V_m + v \quad (2.1)$$

olarak bulunur. Burada V_m ortalama rüzgâr hızı v ise rüzgârın türbülanslı kısmıdır. Rüzgâr türbinlerinin kurulması planlanan bölgelerde ortalama rüzgâr hızının kestirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bir bölgede ortalama rüzgâr hızının olasılık dağılımı birkaç yıl süresince yapılan rüzgâr hızı ölçümlerin bir histogram üzerine yerleştirilmesi ile elde edilebilir. Deneysel olarak ölçülmüş ortalama rüzgâr hızları dağılımı Weibull olasılık dağılım fonksiyonuna benzetilebilir. Weibull olasılık dağılım fonksiyonu,

$$p(V_m) = \frac{k}{C} \left(\frac{V_m}{C} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V_m}{C} \right)^k} \quad (2.2)$$

olarak verilir [Bianchi et al,2007]. Burada V_m ortalama rüzgâr hızı, k ve C sırasıyla şekil ve ölçek katsayılarıdır. Bu katsayılar kullanılarak Weibull olasılık dağılım fonksiyonu, ölçüm yapılan bölgedeki rüzgâr hızı histogramına benzetilmeye çalışılır. Şekil 2.2’de Weibull ortalama rüzgâr hızı olasılık dağılım eğrisi gösterilmiştir.

Burada ortalama rüzgâr hızının 5.5-7m/sn civarında olduğu görülür. Çok düşük ve çok yüksek ortalama rüzgâr hızlarının düşük olasılıkta olduğu anlaşılır.



Şekil 2.2. Weibull ortalama rüzgâr hızı olasılık dağılımı.

Ortalama rüzgâr hızı yüksekliğe göre de farklılık gösterir. Ortalama rüzgâr hızının yüksekliğe göre gösterdiği farklılık

$$V_m(z) = V_m(z_{ref}) \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\gamma \quad (2.3)$$

olarak verilir. Burada z_{ref} referans yükseklik, γ yüzey pürüzlülük katsayısı, z ise ölçüm yapılmak istenen yüksekliktir. γ katsayısı ölçüm yapılmak istenen bölgenin yüzey yapısına göre farklılık gösterir. Tablo 2.1’de farklı yüzey özelliklerine göre γ pürüzlülük katsayısının aldığı değerler verilmiştir [Bianchi et al, 2007].

Tablo 2.1. Yüzey tipine göre γ pürüzlülük katsayısının değişimi.

Yüzey tipi	γ
Kum	0.10
Kısa çimen	0.13
Uzun çimen	0.19
Yerleşim alanı	0.32

Toplam rüzgâr eşitliğindeki (2.1 numaralı eşitlik) türbülans terimi, rüzgâr hızındaki anlık değişimleri belirtir. Aslında bu anlık hız değişimlerinin rüzgârdan elde edilen ortalama enerji üzerinde fazla bir etkisi yoktur. Fakat rüzgâr türbininin

üzerinde çok ciddi mekanik yükler oluşturabilmektedir. Dolayısıyla rüzgâr türbini kontrolünde türbülans etkisi ihmal edilemez. Rüzgâr hızındaki türbülans terimi Von Karman ve Kaimal güç spektrumları ile modellenenir.

Von Karman Modeli [Bianchi et al, 2007]:

$$\Phi(\omega) = \frac{K_v}{(1 + (\omega T_v)^2)^{5/6}} \quad (2.4)$$

Kaimal Modeli [Bianchi et al, 2007]:

$$\Phi(\omega) = \frac{K_v}{(1 + \omega T_v)^{5/3}} \quad (2.5)$$

Burada ω açısal frekanstır. Her iki modelde de T_v türbülans frekans bandı genişliğini ifade eder. K_v ise türbülans gücü ile alakalıdır. (2.5) numaralı eşitlikte Von Karman modeli için T_v ve K_v değerlerinin nasıl hesaplandığı verilmiştir.

$$\begin{aligned} K_v &= 0.475 \sigma_v^2 \frac{L_v}{V_m(z)} \\ T_v &= \frac{L_v}{V_m(z)} \end{aligned} \quad (2.6)$$

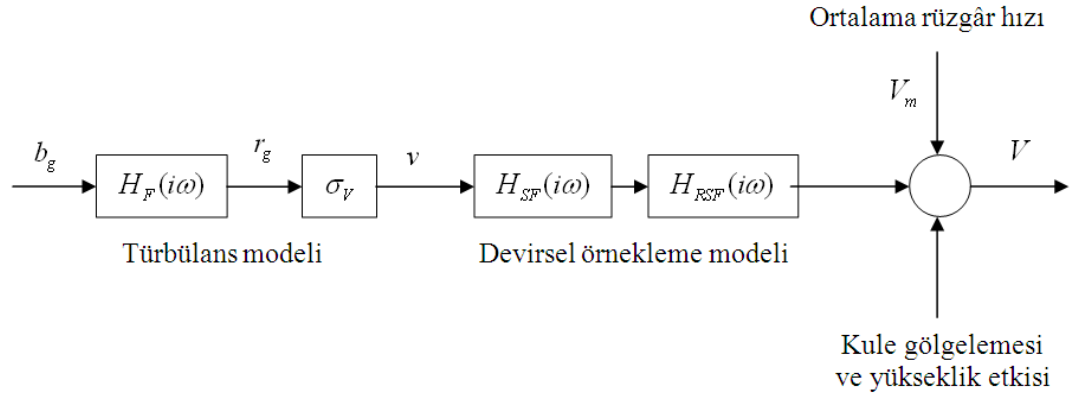
(2.5) numaralı eşitlikte L_v türbülans korelasyon uzunluğu, σ_v ise türbülans yoğunluğudur. Türbülans spektrumları alçak geçiren filtre özelliğindedirler. Gerçekçi rüzgâr verisi simülasyonlarında rüzgârın türbülanslı kısmını elde etmek için bu genel kabul görmüş türbülans spektrumlarından biri kullanılabilir.

2.2. Etkin Rüzgâr Hızı Modeli

Kontrolcü tasarım sürecinde nadiren önemsenen gerçekçi rüzgâr hızı verisi, rüzgâr türbini kontrolcüsünün performans değerlendirmesi için gereklidir. Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi bir noktadaki rüzgâr hızı iki bileşene ayrılabilir. Bunlar makro-meteorolojik durumlardan kaynaklı ortalama rüzgâr hızı ve sürekli değişen türbülans hızıdır. Rüzgâr hızı modellemesinde genelde iki zaman periyodu kullanılır. Bunlar ortalama rüzgâr hızı için t_{s1} ve türbülans rüzgâr hızı için $t_{s2} < t_{s1}$ olarak

seçilir. Ortalama rüzgâr hızı (2.3) numaralı eşitlikte verildiği gibi yükseklik ve yüzey pürüzlülüğü ile değişmektedir.

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin rotor alanının maruz kaldığı rüzgâr hızını etkileyen bir diğer etken ise rüzgâr türbini kulesidir. Bu durumda rotor hızına ve kanat sayısına bağlı olarak aerodinamik momentte düşüşler gözlenir. Aerodinamik momentin kule gölgelemesi sebebi ile düştüğü açısal frekanslar N kanat sayısı, P rotor açısal frekansı olmak üzere NP frekansı ve bu frekansın harmonikleri olarak ifade edilir. Rüzgâr türbini için etkin rüzgâr hızı modellenirken rotor alanında bir nokta referans alınır. Referans alınan noktada türbülans kaynaklı rüzgâr hızı sürekli değiştiğinden, kanatların dönme hızına bağlı olarak etkin rüzgâr hızı modelinin blok şeması Şekil 2.3’de gösterilmiştir [Bianchi et al, 2007]. Etkin rüzgâr modeli, ortalama rüzgâr hızı ve türbülans modelinden oluşur. Ayrıca türbülans modeline devirsel örnekleme modeli de eklenmiştir. Kule gölgelemesi ve yükseklik etkisi de toplam rüzgâr modeline etkir. Devirsel örnekleme etkisi, kanatların dönme hızı ile alakalıdır. Rotor dönme hızı temel frekansında ve bu frekansın harmoniklerinde etkin rüzgâr hızı güç spektrumunda yoğunlaşma olur. Bu etkiye devirsel örnekleme etkisi denir.



Şekil 2.3. Etkin rüzgâr hızı modeli blok şeması.

Ortalama rüzgâr hızı modeli Von der Hoven spektrumunun ayrıklaştırılması ile modellenebilir. Daha detayda Von der Hoven spektrumunda enerji boşluğu olan banttaki bir frekans üst frekans sınırı olarak belirlenir. 3/saat enerji boşluğuna denk gelen frekanslardandır. Bu frekans ortalama rüzgâr hızı modellemesinde üst frekans sınırı olarak seçilebilir. Seçilen üst frekans sınırının altındaki frekanslar “m” tane

parçaya örneklenecek bu frekanslardaki güç spektrum yoğunluğu, Von der Hoven spektrumu kullanılarak elde edilir. Bu durumda τ_{s1} periyotluk ortalama rüzgâr hızı

$$V_m = \sum_{i=1}^m A_i \cos(\omega_i t + \zeta_i) \quad (2.7)$$

olarak bulunur. Burada ω_i örnekleme frekansları, ζ_i rastgele faz değişkeni, t zaman değişkeni, A_i ise rüzgâr genliğidir. Rüzgâr genliği

$$A_i = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1}{2} (S_v(\omega_i) + S_v(\omega_{i+1})) (\omega_{i+1} - \omega_i)} \quad (2.8)$$

olarak bulunur [Nichita et al, 2002]. Burada $S_v(\omega_i)$, Von der Hoven spektrumundan elde edilen ω_i frekansındaki güç spektrum yoğunluğudur.

Türbülans, güç spektrum yoğunluğu ile tanımlanabilir. Türbülans güç spektrum yoğunluğu, korelasyon uzunluğu, türbülans yoğunluğu ve ortalama rüzgâr hızı ile ifade edilir. Dolayısıyla türbülans modeli, Şekil 2.3’de görüldüğü gibi beyaz gürültü b_g ’nin, frekans cevabı türbülans güç spektrumu olan alçak geçiren $H_F(i\omega)$ filtresinden geçirilmesi ile elde edilebilir. Von Karman türbülans spektrumu için, alçak geçiren filtre,

$$H_F(i\omega) = \frac{K_V}{(1 + i\omega T_V)^{5/6}} \quad (2.9)$$

olarak verilir [Nichita et al, 2002]. Burada $i\omega$ kompleks açısal frekans eksenini, T_V türbülans frekans bandı genişliğini ifade eder, K_V ise türbülans gücü ile alakalıdır ve (2.6) numaralı eşitlik yardımıyla hesaplanabilir. Alçak geçiren filtrenin çıktısı r_g Von Karman türbülans spektrumuna sahip renklendirilmiş gürültüdür. Renklendirilmiş r_g gürültüsü, türbülans standart sapması ile çarpılarak

$$v = \sigma_v r_g \quad (2.10)$$

türbülans rüzgâr hızı elde edilir. Burada türbülans standart sapması

$$\sigma_V = \sigma_v V_m \quad (2.11)$$

olarak verilir. Türbülans yoğunluğu σ_v , rüzgâr türbininin kurulacağı bölgede deneysel olarak elde edilir.

Şekil 2.3’de blok şeması verilen devirsel örnekleme modeli, rotor alanındaki yüksek seviyedeki noktasal rüzgâr hızlarını zayıflatan $H_{SF}(i\omega)$ uzamsal filtresi ve $H_{RSF}(i\omega)$ devirsel örnekleme filtresinden oluşur. Uzamsal filtre alçak geçiren filtre özelliğindedir ve

$$H_{SF}(i\omega) = \frac{\omega_{SF}}{i\omega + \omega_{SF}} \quad (2.12)$$

olarak verilir [Bianchi et al, 2007]. Burada ω_{SF} alçak geçiren filtre kesme frekansdır ve ortalama rüzgâr hızı ve türbülans yoğunluğuna göre belirlenir. Devirsel örnekleme filtresi ise türbülans güç spektrumunun, rotor dönme frekansları ve bu temel frekansın harmoniklerinde oluşan enerji yoğunlaşmasını modeller. Devirsel örnekleme filtresi,

$$H_{RSF}(i\omega) = \frac{(NP)^2 + d^2}{(NP)^2} \cdot \frac{(i\omega + NP)^2}{(d^2 + (NP)^2 - \omega^2) + i\omega 2d} \quad (2.13)$$

olarak verilir [Bianchi et al, 2007]. Burada N kanat sayısı, P rotor dönme frekansı, ω açısal frekans değişkeni, d ise sönümlendirme katsayısıdır. Sönümlendirme katsayısı, ortalama rüzgâr hızı, türbülans yoğunluğu ve rotor hızına bağlıdır.

3. RÜZGÂR TÜRBİNİ MODELLEMESİ

Bu bölümde rüzgâr türbini aerodinamik modeli, mekanik modeli ve generatör modeli anlatılmıştır. Rüzgâr türbininin her bir alt kısmı ayrı ayrı modellenmiştir. Bu bölümde modellenen rüzgâr türbini alt kısımları, Bölüm 4'te kontrolcü tasarımında kullanılmıştır.

3.1. Rüzgâr Türbini Aerodinamiği

Türbin aerodinamiği, rüzgâr türbini üzerinde rüzgârdan kaynaklı oluşan kuvvetler olarak tanımlanır. Rüzgâr türbini aerodinamiği iki ana yaklaşımla ele alınır. Bunlar Eyleyici Disk Modeli (Actuator Disc Theory) ve Kanat Elemanı Teorisi (Blade Element Theory) olarak adlandırılır [Bianchi et al, 2007]. Bunlardan ilki türbin aerodinamiğini, rüzgârdan elde edilen enerji ile açıklamaya çalışır. Eyleyici Disk Modeli ile rüzgâr türbininin rüzgârdan elde edebileceği maksimum enerji dönüşüm katsayısını elde edilir. İkincisi yaklaşım ise türbin kanatlarına etkiyen kuvvetlerle rüzgâr türbini aerodinamiğini açıklamaya çalışır.

3.1.1. Eyleyici Disk Modeli

Bu modelde moment teorisi kullanılır. Rüzgâr türbini bir çeşit eyleyici disk olarak kabul edilir. Bu disk bir hava akımının içine yerleştirilmiştir. Disk sıkıştırılmaz kabul edilir. Hava akımının içine yerleştirilen disk, rüzgârın bir miktar kinetik enerjisini alır. Bu durumda Şekil 3.1'deki diskin girişindeki rüzgâr hızı V , diskin çıkışındaki rüzgâr hızı V_{∞} 'dan daha büyüktür [Bianchi et al, 2007]. Kütle akım hızı eyleyici diskin önünde ve arkasında eşit olmalıdır. Bundan dolayı eyleyici disk alanı A_D , $A_{\infty} > A_D > A_{\infty}$ aralığındadır. Kütle akım hızı, eyleyici diskten geçen hava akımı için,

$$\rho A_{\infty} V = \rho A_D V_D = \rho A_{\infty} V_{\infty} \quad (3.1)$$

olarak bulunur. Burada ρ havanın yoğunluğu, A_{∞} eyleyici diskin arkasındaki hava kesit alanı, A_D eyleyici diskin önündeki hava kesit alanı, V_D ise eyleyici disk

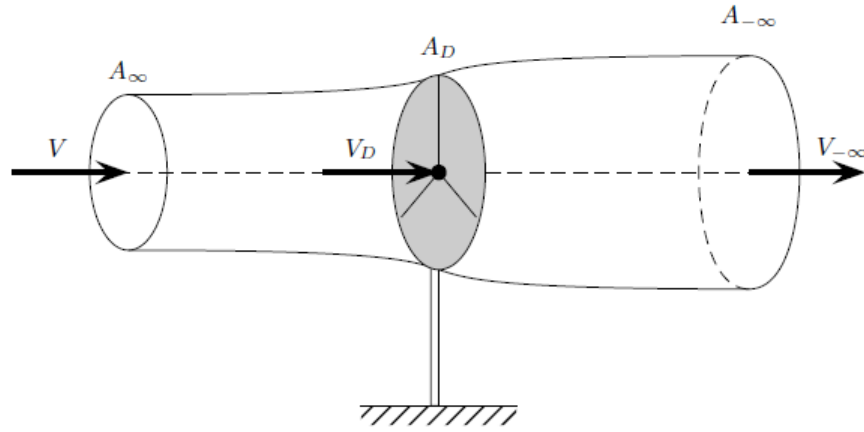
üzerindeki rüzgâr hızıdır. Eyleyici disk tarafından hava akımına karşı oluşturulan kuvvet F_D , toplam hız kaybının kütle akım hızına çarpımıyla

$$F_D = (V - V_{-\infty})\rho A_D V_D \quad (3.2)$$

olarak bulunur. Diskin üzerindeki rüzgâr hızı V_D , a sıfır ile bir arasında bir sayı olmak üzere

$$V_D = (1 - a)V \quad (3.3)$$

biçiminde verilir.

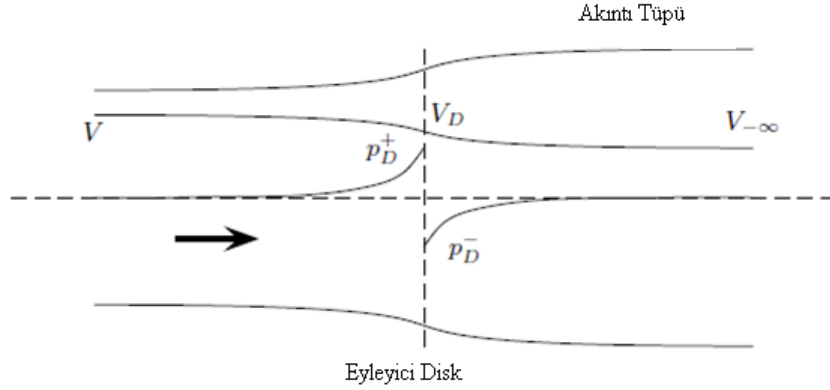


Şekil 3.1. Eyleyici diskten geçen hava akımı.

Eyleyici disk tarafından hava akımına karşı oluşturulan kuvvet F_D , Şekil 3.2’de [Bianchi et al, 2007] görülen eyleyici disk üzerindeki basınç kaybından kaynaklandığından,

$$F_D = (p_D^+ - p_D^-)A_D = (V - V_{-\infty})\rho A_D V(1 - a) \quad (3.4)$$

olarak da verilebilir. Burada p_D^+ değeri eyleyici diskin önündeki, p_D^- ise ardındaki anlık basınç değerleridir.



Şekil 3.2. Bir kanaldan geçen basınç ve rüzgâr hızı.

Eyleyici disk üzerindeki basınç değişimini bulmak için Bernoulli eşitliği kullanılır. Bernoulli eşitliği ideal koşullar altında bir akışkanın yaptığı toplam iş sıfır ise, o akışkanın enerjisinin değişmeyeceğini belirtir. Buna göre eyleyici disk üzerindeki basınçlar

$$\frac{1}{2}\rho V_D^2 + p_D^+ + pgz = \frac{1}{2}\rho V^2 + p_0 + pgz, \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{2}\rho V_D^2 + p_D^- + pgz = \frac{1}{2}\rho V_{-\infty}^2 + p_0 + pgz \quad (3.6)$$

olarak verilir. Burada p_0 rüzgârın bulunduğu yükseklikteki atmosfer basıncını, g yerçekimi ivmesini, z ise rüzgârın bulunduğu yüksekliği belirtir. (3.5) numaralı eşitlikten (3.6) numaralı eşitliği çıkardığımızda eyleyici disk üzerindeki basınç kaybı

$$(p_D^+ - p_D^-) = \frac{1}{2}\rho(V^2 - V_{-\infty}^2) \quad (3.7)$$

olarak bulunur. (3.7) numaralı eşitlik (3.4) numaralı eşitlikteki yerine yazıldığında

$$V_{-\infty} = (1 - 2a)V \quad (3.8)$$

bağıntısı elde edilir. (3.8) numaralı eşitlikten a değerinin 0.5'i aşamayacağı görülür. (3.4) numaralı eşitlikten eyleyici disk üzerindeki hava akımından kaynaklı kuvvetin

$$F_D = 2\rho A_D V^2 a(1 - a) \quad (3.9)$$

olduğu görülür. Eyleyici diskten elde edilen güç P_D ise

$$P_D = F_D V_D = 2\rho A_D V^3 a(1-a)^2 \quad (3.10)$$

olarak verilir. Rüzgâr türbininden elde edilebilecek güç, güç katsayısı ile karakterize edilir. Güç katsayısı rüzgâr türbininden elde edilen güç ile toplam rüzgâr gücünün oranı ile

$$C_p = \frac{P_D}{P_V} \quad (3.11)$$

$$C_p = \frac{2\rho A_D V^3 a(1-a)^2}{0.5\rho A_D V^3} = 4a(1-a)^2 \quad (3.12)$$

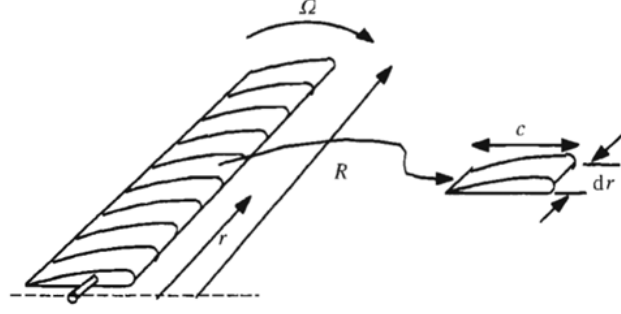
biçiminde elde edilir. Burada C_p 'nin alabileceği en büyük değer “Betz limiti” diye adlandırılır ve 0.593 olarak alınır. Bu oran toplam rüzgâr enerjisinden alınabilecek enerjinin maksimum teorik limitidir. Mevcut rüzgâr türbinlerindeki C_p katsayısı 0.45 civarlarındadır. C_p tepe hız oranı ve kanat açısının fonksiyonu şeklinde elde edilir ve türbin üreticileri tarafından verilir. Tepe hız oranı rüzgâr türbininin kanatlarının ucundaki çizgisel hızın rüzgâr hızına bölümüyle

$$\lambda = \frac{R\omega_r}{v} \quad (3.13)$$

olarak bulunur. Burada R rotor yarıçapı, ω_r rotor açısal hızı, v ise rüzgâr hızıdır.

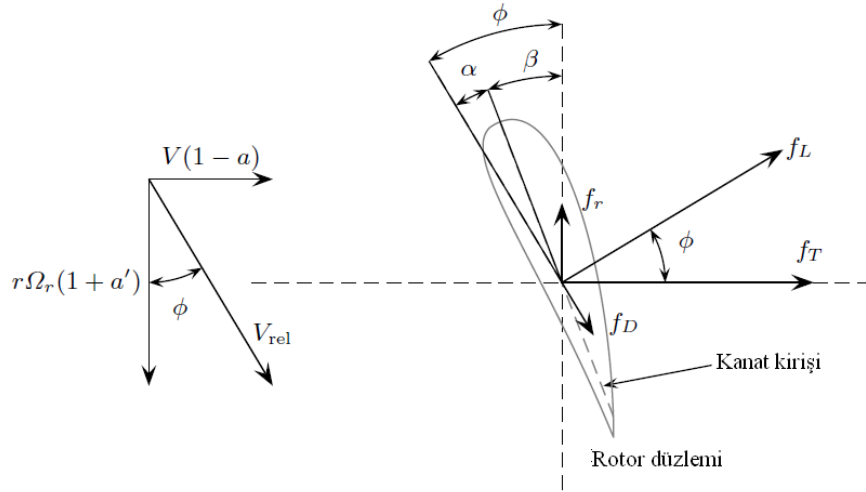
3.1.2. Kanat Elemanı Teorisi

Kanat Elemanı Teorisi rüzgâr türbininin ürettiği güç, moment ve kuvvetleri açıklamaya yarayan bir teodir. Kanat elemanı rüzgâr türbinlerinin birim kanat kesiti üzerinden tanımlanır. Şekil 3.3’de kanat üzerinden alınmış birim kanat kesiti gösterilmiştir [Manwell et al, 2002].



Şekil 3.3. Kanat elemanı şeması.

Şekil 3.4'te kanat kesiti üzerine etkiyen kuvvetler gösterilmiştir. Burada f_D itme kuvveti (drag force), f_L kaldırma kuvveti (lift force), f_T eksensel itme kuvveti, f_r ise rüzgâr türbininde iş yapan, rotoru döndüren, döndürme kuvvetidir [Bianchi et al, 2007]. Ayrıca V_{rel} etkin rüzgâr hızı, α hücum açısı, β kanat açısıdır. V_{rel} , kanat ucu çizgisel hızı ve bölgesel rüzgâr hızının birleşiminden bulunur.



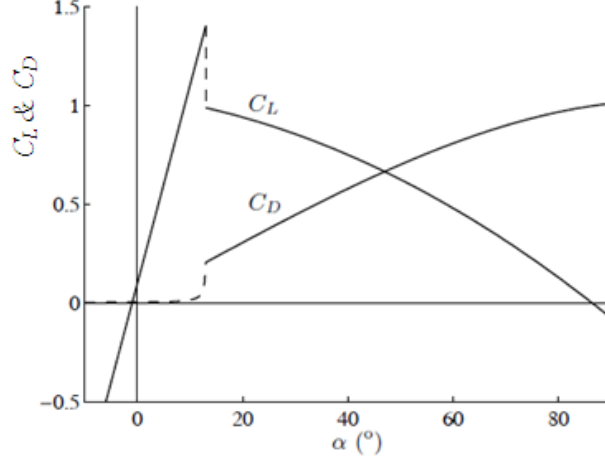
Şekil 3.4. Kanat kesiti üzerindeki kuvvetler.

Rüzgâr türbininin kanatları üzerindeki itme ve kaldırma kuvvetleri, kaldırma kuvveti katsayısı C_L ve itme kuvveti katsayısı C_D cinsinden

$$f_L = \frac{\rho c}{2} V_{rel} C_L(\alpha) \quad (3.14)$$

$$f_D = \frac{\rho c}{2} V_{rel} C_D(\alpha) \quad (3.15)$$

olarak verilir. C_L ve C_D , hücum açısı α ile değişir. Şekil 3.5’de tipik itme ve kaldırma kuvveti katsayılarının hücum açısına göre değişim grafiği verilmiştir [Bianchi et al, 2007].



Şekil 3.5. Tipik itme ve kaldırma kuvveti katsayıları değişim grafiği.

Kaldırma kuvveti katsayısı ve itme kuvveti katsayısı, hücum açısı $\alpha \approx 13$ derece civarında ani değişime uğramaktadır. Bu noktadan sonra C_L değeri düşerken, C_D değerleri artmaya başlar. İtme ve kaldırma kuvvetleri rotor üzerinde döndürme momenti oluşturur. Rotor üzerindeki döndürme momenti

$$\tau_r = \frac{\rho C}{2} V_{rel}^2 (C_L(\alpha) \sin(\phi) - C_D(\alpha) \cos(\phi)) \quad (3.16)$$

eşitliğinin integrali alınarak elde edilir. Yine rotor üzerindeki dönme momenti

$$T_r = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_q(\lambda, \beta) V^2 \quad (3.17)$$

olarak verilir. Bu eşitlikte C_q , güç katsayısı C_p ’nin tepe hız oranına bölümü ile

$$C_q = C_p / \lambda \quad (3.18)$$

olarak elde edilir. Sabit kanatlı rüzgâr türbinleri Şekil 3.5’de de görüldüğü gibi itme ve kaldırma kuvvetleri değişiminden kaynaklı belli bir rüzgâr hızından sonra

frenleme davranışı sergiler. Türbin üzerindeki itme kuvveti artar ve kanatların dönme hızı azalır. Bu durum literatürde “*Passive Stall Control*” adıyla ifade edilir.

3.1.3. Aerodinamik Model

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin rotorunda elde edilebilecek güç

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (3.19)$$

olarak verilir. Burada C_p güç katsayısını, R rotor yarıçapını, v ortalama rüzgâr hızını, ρ havanın yoğunluğunu, β kanat açısını, λ ise tepe hız oranını belirtmektedir. Havanın yoğunluğunu 1 atm (atmosfer) basıncında ve 15° C sıcaklıkta, $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$ olarak verilir. Güç katsayısı C_p daha önce belirtildiği gibi Betz kuralına göre en fazla 0.593 olabilir. Yani bir rüzgâr türbini, rüzgâr enerjisinin en fazla 0.593 katını yakalayabilir. Tepe hız oranı

$$\lambda = \frac{R\omega_r}{v} \quad (3.20)$$

olarak verilir. Bu eşitlikteki ω_r , rüzgâr türbini rotor açısal hızını belirtir. Rotor üzerindeki aerodinamik moment aerodinamik gücün rotor hızına bölünmesi ile

$$T_a = \frac{P_a}{\omega_r} \quad (3.21)$$

elde edilir. Buradan aerodinamik moment T_a

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_q(\lambda, \beta) v^2 \quad (3.22)$$

olarak bulunur. Bu eşitlikteki C_q moment katsayısıdır ve güç katsayısı C_p ’nin tepe hız oranına bölümü ile

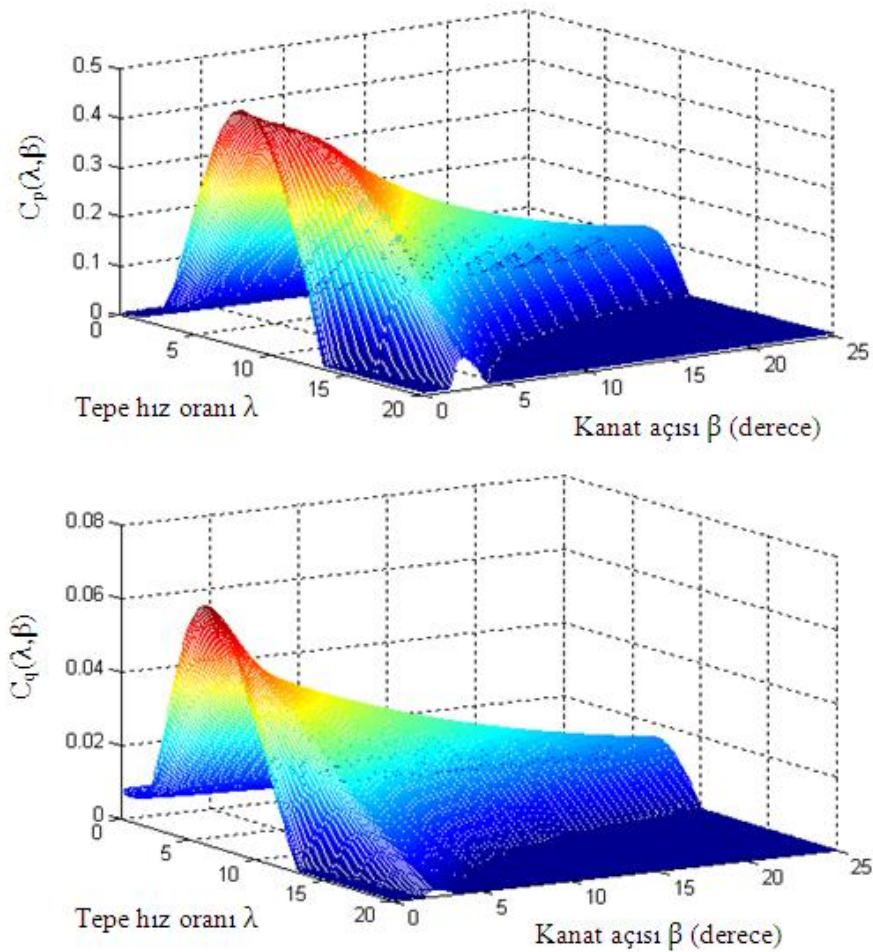
$$C_q = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (3.23)$$

olarak bulunur. MATLAB rüzgâr türbini modelinde bu katsayılar formülleştirilmiştir. C_p ve C_q eğrileri elde edilemediği takdirde bu formüller simülasyon amaçlı kullanılabilir. Simülasyon amaçlı C_p ve C_q katsayıları yatay eksenli rüzgâr türbinleri için

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$
(3.24)

eşitlikleri kullanılarak bulunabilir [The MathWorks, 2007]. Burada $c_1 = 0.5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$, $c_6 = 0.0068$ olarak alınır. (3.24) numaralı formül kullanılarak elde edilen tipik C_p ve C_q eğrileri Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Rüzgâr türbini güç C_p ve moment C_q katsayıları.

Bu eğriler rüzgâr türbininden rüzgâr türbinine sadece detayda farklılıklar gösterir. Belirli bir kanat açısı ve tepe hız oranında güç katsayısının maksimum değeri elde edilir. Rüzgâr türbinleri nominal gücün altında çalışırken rüzgârdan maksimum güç çekmeye çalışır. Bunun için güç katsayısı çalışma esnasında maksimum düzeyde tutmaya çalışır. Rüzgâr türbinleri tasarlanırken veya işletilme esnasında bu eğriler kullanılarak, kontrol amaçları ve stratejileri belirlenir.

3.2. Rüzgâr Türbini Mekanik Modeli

Rüzgâr türbininin rotorunda oluşan dairesel hareket generatör şaftına mekanik aktarım ile iletilir. Bu iletim mekanizması kullanılan generatöre göre farklılık gösterir. Örneğin çok kutuplu senkron generatör kullanıldığında rotor şaftı direk olarak generatör şaftına bağlanır (“direct drive” yöntemi). Fakat çoğu rüzgâr türbini rotordaki dönme hareketini generatör şaftına hız değiştirici dişli kutularından geçirerek iletir. Rotordaki dairesel hareket genellikle düşük hızda olur. Dişli kutusu ile bu hız artırılır. Böylelikle elektrik generatörü yüksek hızda ve düşük momentte çalıştırılmış olur.

Bu bölümde yatay eksenli ve dişli kutulu bir türbinin mekanik aktarım kısmı modelleneyecektir. Burada mekanik model denilerek rüzgâr türbininin rotor ile generatör arasındaki mekanik aktarım kısmının modellenmesini ifade edilmektedir.

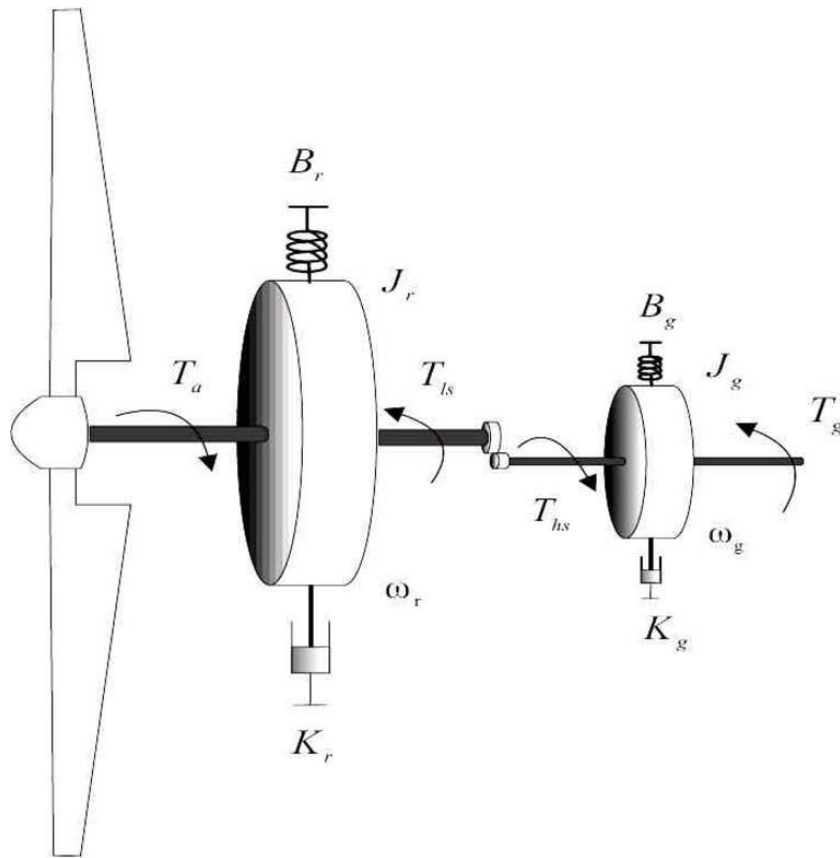
3.2.1. Nonlinear Model

Mekanik model düşük hızlı şaft, yüksek hızlı şaft, dişli oranı, rotor burkulma ve sönümlmeleri, generatör burkulma ve sönümlmeleri şeklinde kısımlara ayrılarak incelenebilir. Şekil 3.7’de iki kütleli mekanik model gösterilmiştir [Boukhezzar et al, 2007]. Şekilden de anlaşılacağı gibi aerodinamik moment T_a rüzgâr türbinini, ω_r rotor hızı ile sürer. Bu çalışmada türbin mekanik modeli dişli kutusunun kütlesi ihmal edilerek çıkarılmıştır. Dolayısıyla bu modele “iki kütleli model” (two-mass model) denilir. Düşük hızlı şaft momenti T_{ls} rotor üzerinde frenleme momenti olarak etkir. Generatör yüksek hızlı şaft momenti T_{hs} ile sürülür. Generatörün elektromanyetik momenti T_g burada frenleme momenti olarak etkir. Şaft eksenini

boyunca rotor hızı dişli kutusu oranı n_s oranında artar. Rotor dinamiği ve generatör momentleri birer diferansiyel denklem olarak

$$\begin{cases} J_r \dot{\omega}_r = T_a - K_r \omega_r - B_r \theta_r - T_{ls} \\ J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - K_g \omega_g - B_g \theta_g - T_g \end{cases} \quad (3.25)$$

biçiminde ifade edilir. Burada $\dot{\omega}_r$ ve $\dot{\omega}_g$ sıra ile rotor ve generatör açısal hızlarının türevleridir. K_r , K_g rotor ve generatör sönümlenme katsayılarıdır.



Şekil 3.7. Rüzgâr türbini dinamiği.

B_r , B_g ise rotor ve generatör burkulma katsayılarıdır. Dişli kutusu aktarma oranı, generatör hızının rotor hızına bölümü ile

$$n_s = \frac{\omega_g}{\omega_r} \quad (3.26)$$

bulunur. (3.20) numaralı eşitlikteki rüzgâr hızı terimi (3.22) numaralı eşitlikte yerine konursa aerodinamik moment

$$T_a = \frac{1}{2\lambda^2} \rho \pi R^5 C_q(\lambda, \beta) \omega_r^2 \quad (3.27)$$

rotor hızına bağlı olarak düzenlenebilir. Aerodinamik moment rotor hızının karesi ile orantılı olduğundan rüzgâr türbini dinamiği nonlinear karakterdedir. Sistem katı (rijit) kabul edilerek türbin dinamiği, düşük hızlı şaft kısmında tek kütleli model olarak düzenlenebilir. Bu durumda sistem denklemi:

$$J_t \dot{\omega}_r = T_a - K_t \omega_r - B_t \theta_r - T_g \quad (3.28)$$

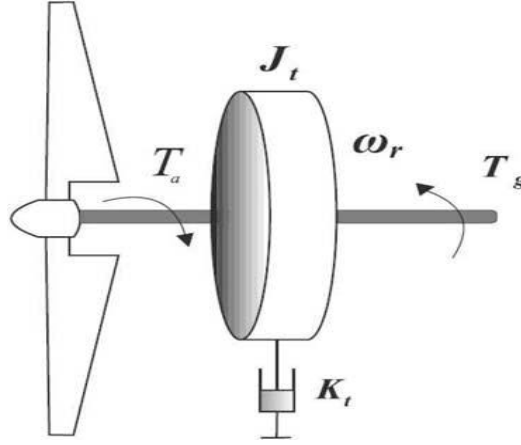
halini alır. Şekil 3.8’de tek kütleli model gösterilmiştir [Boukhezzar et al, 2007]. (3.28) numaralı eşitlikteki J_t , B_t ve K_t sırasıyla tek kütleli rüzgâr türbini modelinin eşdeğer momenti, burkulma ve sönümlleme katsayılarıdır. Bu değerler

$$\begin{cases} J_t = J_r + n_s^2 J_g \\ K_t = K_r + n_s^2 K_g \\ B_t = B_r + n_s^2 B_g \\ T_g = n_s T_{em} \end{cases} \quad (3.29)$$

eşitlikleri yardımı ile hesaplanabilir. Burada K_t ve B_t değerlerini sıfır kabul edip eşitliği tekrar düzenlersek

$$J_t \dot{\omega}_r = T_a - T_g \quad (3.30)$$

olmak üzere tek kütleli rüzgâr türbini dinamik modeli elde edilir. Bu çalışmada gürbüz (dayanıklı) generatör moment kontrolcüsü tasarlanırken tek kütleli model kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Tek kütleli mekanik model

3.2.2. Lineer Model

Rüzgâr türbini dinamik modelinin, istenilen çalışma aralığında lineerleştirilmiş modelini çıkarmak mümkündür. Bu amaçla (3.20), (3.22) ve (3.23) numaralı eşitlikler tekrar düzenlenerek aerodinamik moment

$$T_a = \frac{1}{2\omega_r} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (3.31)$$

olarak bulunur. Aerodinamik moment (3.31) numaralı eşitlikten de anlaşılabacağı gibi değişken rüzgâr hızına, güç katsayısına, rotor çapına ve havanın yoğunluğuna bağlıdır. Rüzgâr hızı ve güç katsayısı nonlineer terimlerdir. Dolayısıyla (3.30) numaralı eşitlikte verilen rüzgâr türbini dinamiği lineer değildir. Lineer model elde etmek için (3.31) numaralı aerodinamik moment eşitliğin, belirlenen kanat açısı, rotor hızı ve ortalama rüzgâr hızı etrafında lineerleştirilmesi gerekmektedir. Lineer model oluşturmak için, aerodinamik moment T_a lineerleştirme noktası etrafındaki birinci dereceden parametre değişimi

$$\Delta T_a = \frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} \Delta \omega_r + \frac{\partial T_a}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial T_a}{\partial \beta} \Delta \beta \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} \approx \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \bar{v}^3 \left(-\frac{1}{\bar{\omega}_r^2} C_p(\bar{\lambda}, \bar{\beta}) + \frac{1}{\bar{\omega}_r} \frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \omega_r} \right) \Big|_{\beta=\bar{\beta}, \omega_r=\bar{\omega}_r, v=\bar{v}} \quad (3.33)$$

$$\frac{\delta T_a}{\delta v} \approx \frac{1}{2\omega_r} \rho \pi R^2 (3\bar{v}^2 C_p(\bar{\lambda}, \bar{\beta}) + \bar{v}^3 \frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial v}) \Big|_{\beta=\bar{\beta}, \omega_r=\bar{\omega}_r, v=\bar{v}} \quad (3.34)$$

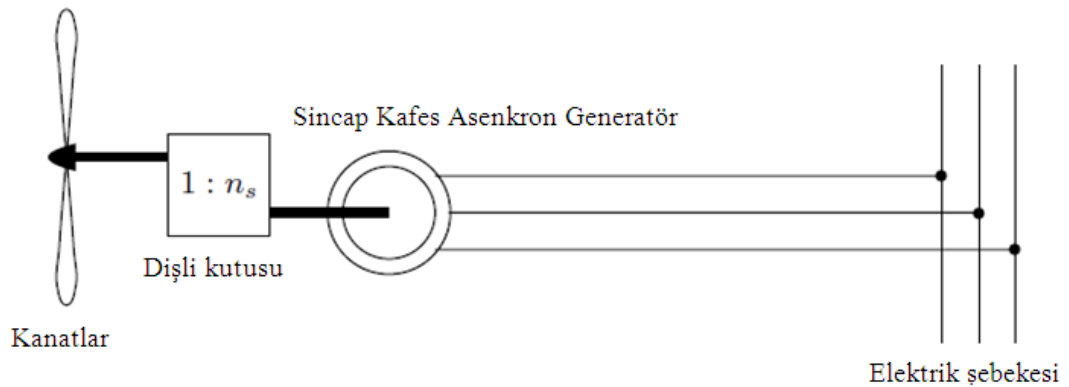
$$\frac{\delta T_a}{\delta \beta} \approx \frac{1}{2\omega_r} \rho \pi R^2 \bar{v}^3 \frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \beta} \Big|_{\beta=\bar{\beta}, \omega_r=\bar{\omega}_r, v=\bar{v}} \quad (3.35)$$

eşitlikleri yardımı ile bulunur [Esbensen et al, 2008]. (3.33), (3.34) ve (3.35) numaralı eşitliklerin sonuçlarını analitik hesaplama yöntemi ile bulmak oldukça zordur. Bu değerlerin bir başka hesaplama yöntemi de parametre tahmini yöntemidir [Esbensen et al, 2008]. Elde edilecek lineer modelde kanat açısı ve generatör momenti kontrol girdileridir. Rüzgâr hızı sistem bozucusu gibi davranır.

3.3. Generatör Modeli

Asenkron generatörleri, rüzgâr türbinlerinde en yaygın olarak kullanılan elektrik makineleridir. Rüzgâr türbinlerinde senkron generatörler de kullanılır, fakat özellikle otomatik ve elektrik şebekesine bağlı rüzgâr türbinlerinde asenkron generatörler kullanılır. Modern rüzgâr türbinleri generatör makinesi yanında gelişmiş güç elektroniği yapısına da sahiptir.

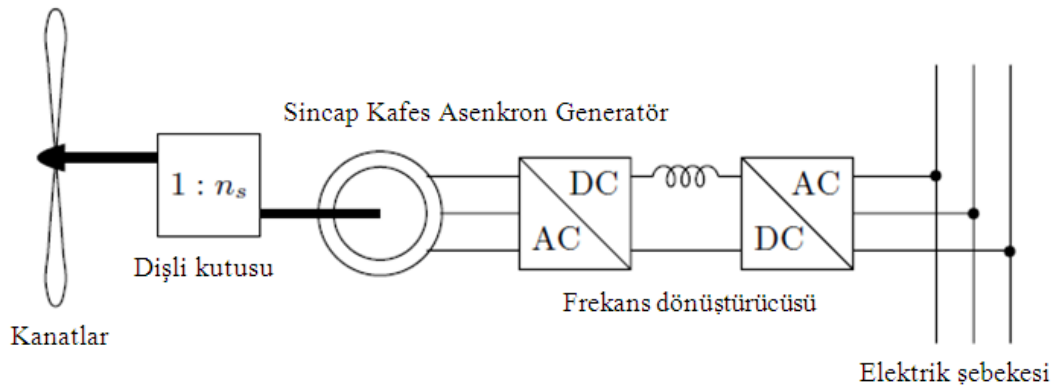
Rüzgâr türbinlerindeki asenkron makineler elektrik şebekesine bağlanma topolojilerine göre üç ana kategoriye ayrılır. Şekil 3.9’da en basit topoloji olan doğrudan bağlanmış Sincap Kafesli Asenkron Generatör(SKAG) gösterilmiştir [Bianchi et al, 2007].



Şekil 3.9. Doğrudan bağlanmış Sincap Kafesli Asenkron Generatör.

Buna göre Sincap Kafesli Asenkron Generatör (SKAG) doğrudan alternatif akımlı elektrik şebekesine bağlanmıştır. Bu topolojiler güç elektronik kısmının basit olması ve dayanıklı generatör yapısından dolayı oldukça güvenilirdir. Generatör transformatör üzerinden elektrik şebekesine bağlandığından generatör üzerinde herhangi bir moment kontrolü yapılmaz. Generatör senkron hızın üstünde, genelde %2 devir kayması (slip) ile sürülür. Generatörü senkron hızın üstünde %2 devir kayması ile sürmek için değişken rotor direnci kullanılır. Bu yüzden bu topoloji sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılır. Rotor hızının çok değişmesi durumunda güç kalitesi bozulacaktır.

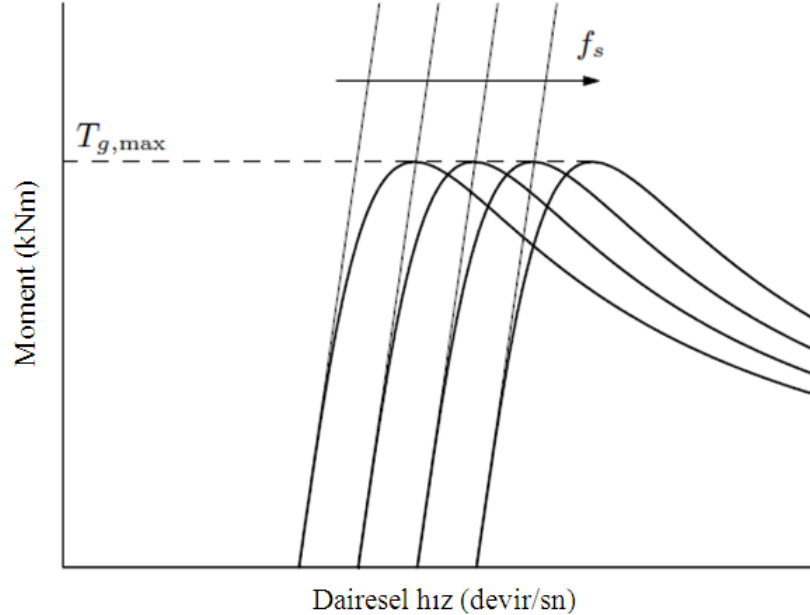
Şekil 3.10'da stator kontrollü asenkron generatör topolojisi gösterilmiştir [Bianchi et al, 2007]. Bu durumda SKAG, elektrik şebekesine tam frekans dönüştürücü ile bağlanmıştır. Güç elektroniğindeki gelişmeler yüksek güçlerde çalışmayı olanaklı ve ekonomik kılmıştır. Modern elektronik dönüştürücüler, rüzgâr türbininden elde edilen gücün kalitesini artırmaya yardımcıdır. Aynı zamanda elektronik dönüştürücüler nominal rüzgâr gücünün altındaki rüzgârdan elde edilen gücün maksimize edilmesi ve türbin mekaniğindeki titreşimlerin sönümlenmesinde kullanılır. Bundan dolayı modern rüzgâr türbinleri gelişmiş güç elektroniği devrelerine sahiptir.



Şekil 3.10. Stator kontrollü Sincap Kafesli Asenkron Generatör

Şekil 3.10'da elektronik frekans dönüştürücüleri sayesinde generatör tamamen elektrik şebekesinden ayrılmıştır. Dolayısıyla generatör şebeke frekansının dışındaki frekanslarda da güç üretebilir. Bu topoloji bize rüzgâr türbinini değişken hızlarda kullanabilme olanağı verir. Pratikte statora bağlı frekans dönüştürücüleri nominal

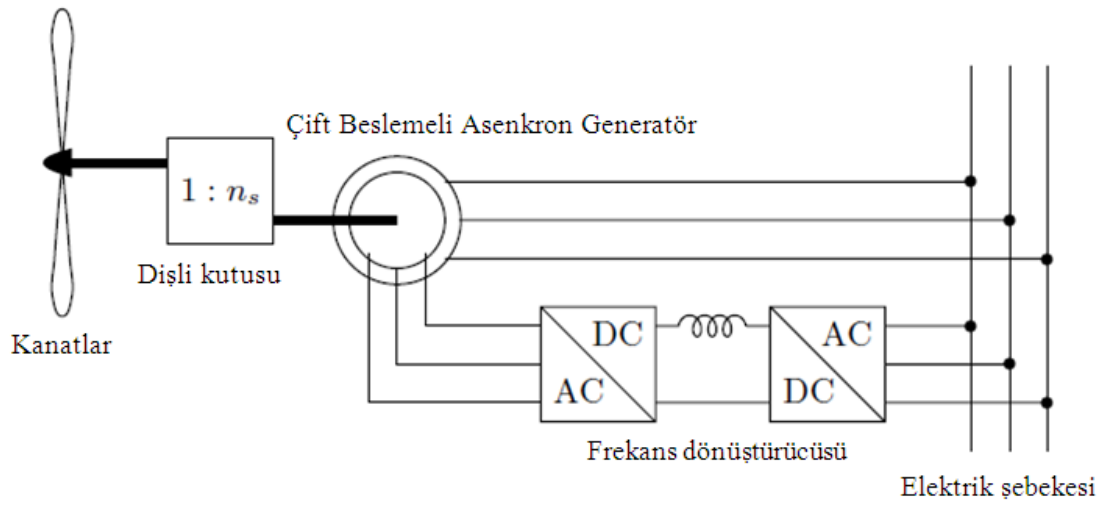
generator gücünün %120'sine kadar çalışabilir olmalıdır. Dönüştürücüler, generatorün sağladığı gücün tamamının üstesinden gelmelidir. Bu özellik bu topolojinin en önemli dezavantajıdır. Bu topolojideki frekans dönüştürücüleri DC olarak bağlanmış iki ayrı dönüştürücüden oluşur. Şebekeye bağlanmış dönüştürücüler AC şebeke gerilimini DC gerilime çevirir. Aynı zamanda bu dönüştürücüler reaktif gücün kullanımının kontrolünü de sağlar. Aktif gücün yüksek olduğu durumlarda dönüştürücü çalışma gücü kısıtlamasından kaynaklı olarak ancak düşük güçteki reaktif güçler kontrol edilebilir. Generator tarafındaki dönüştürücü şebekeden izole edilmiş üç fazlı f_s frekansında ve U_s geriliminde alternatif gerilim kaynağı görevini yapar. Bu dönüştürücü U_s / f_s oranını sabit tutmaya çalışır. U_s / f_s oranını sabit tutularak f_s kontrol edilir. Böylelikle generator farklı hızlarda çalıştırılabilir. Şekil 3.11'de Stator kontrollü sincap kafesli asenkron generator moment, hız değişimi gösterilmiştir [Bianchi et al, 2007]. Generator hızı arttıkça senkron frekans f_s değiştirilerek maksimum moment elde edilir. Böylelikle rüzgâr türbininden optimum güç elde edilir.



Şekil 3.11.Stator kontrollü SKAG moment-hız değişimi.

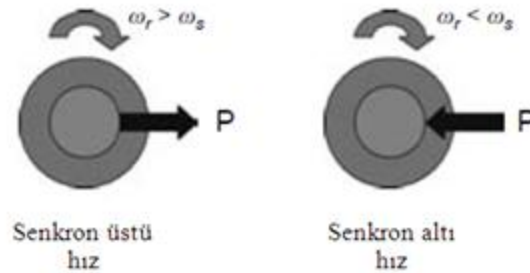
Şekil 3.12'de rotor kontrollü Çift Beslemeli Asenkron Generator (ÇBAG) gösterilmiştir [Bianchi et al, 2007]. Bu topolojide generator statoru doğrudan elektrik şebekesine bağlanmıştır. Generator rotoru ise dönüştürücüler aracılığı ile şebekeye

bağlanmıştır. Bu topolojinin bir önceki SKAG topolojisine göre en büyük avantajı, frekans dönüştürücüleri rotora bağlı olduğundan nominal generatör gücünün maksimum %30'u ile çalışıyor olmasıdır. Bu da düşük güçlü güç elektroniği elemanları ile çalışma kolaylığı sağlar. Bunun yanında bu topolojinin en büyük dezavantajı karmaşıklaşan ÇBAG yapısıdır. ÇBAG üzerinde, rotor sargıları, dönen bilezikler ve fırçalar olduğundan SKAG'ye göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Modern büyük ölçekteki rüzgâr türbinleri büyük oranda ÇBAG topolojisine sahiptir. Rotor akımının bileşenleri aktif ve reaktif gücü belirler. Rotor akımlarının bileşenleri kontrol edilerek, aktif ve reaktif güçler ayrı ayrı kontrol edilebilir.



Şekil 3.12. Rotor kontrollü çift beslemeli asenkron generatör.

Generatör hızı senkron hızın üstünde olduğu durumda rüzgâr türbini şebekeye rotor sargılarına bağlı dönüştürücüler üzerinden güç sağlar, senkron hızın altındaki durumlarda ise rotor şebekeden güç çeker. Bu durum Şekil 3.13'de gösterilmiştir [Krause et al, 2002].



Şekil 3.13. Senkron üstü ve senkron altı hızlarda ÇBAG çalışma prensibi.

ÇBAG topolojisi rotor, şebekeye dönüştürücüler aracılığı ile bağlı olduğundan, rotor gerilimi kontrol girişi olarak kullanılabilir. Dönüştürücüler ve kontrolcü yardımıyla rotor elektriksel frekansı, stator senkron frekansına veya şebeke frekansına ayarlanır. Böylelikle mekanik rotor hızı, şebeke frekansından bağımsız hale gelir. Değişken hızlarda çalışma olanağı doğar.

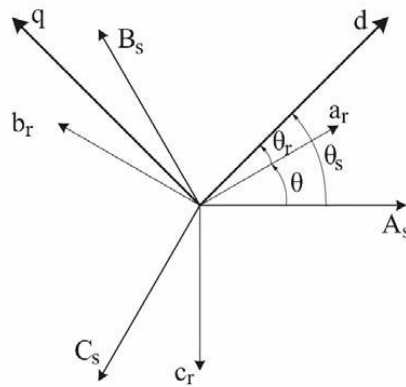
3.3.1. Çift Beslemeli Asenkron Generatör Matematiksel Modeli

Çift Beslemeli Asenkron Generatör matematiksel modeli ABC üç fazlı eşitliklerin Park dönüşümü ile $d-q$ eksenlerine dönüştürülmesi ile elde edilmiştir. (3.36) numaralı eşitlikteki $P(\theta)$ Park dönüşüm matrisi (3.37) numaralı eşitlikte verilmiştir. Park dönüşümü ile üç fazlı dönen rotor ve stator gerilim ve akıları sabit $d-q$ eksenlerine dönüştürülür. Burada θ elektriksel faz açısıdır.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

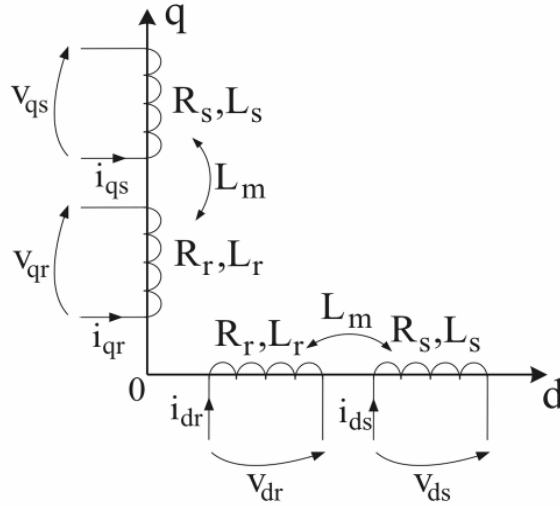
$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Şekil 3.14’de Park dönüşüm vektörleri gösterilmiştir [Mahi et al,2007].



Şekil 3.14. Park dönüşüm vektörleri.

Burada ABC eksenleri üç fazlı gerilim kaynağının faz eksenlerini ifade eder. $d-q$ eksenleri ise Park dönüşüm eksenleridir. Şekil 3.15'de asenkron generatörün $d-q$ eksenlerindeki devre şeması gösterilmiştir [Mahi et al, 2007].



Şekil 3.15. Asenkron generatörün $d-q$ eksenlerinde gösterimi.

Burada,

R_s, R_r	: Stator ve rotor dirençleri – ohm (W)
L_s, L_r	: Stator ve rotor indüktans – miliHenry (mH)
L_m	: Karşılıklı indüktans – miliHenry (mH)
v_{ds}, v_{qs}	: $d-q$ eksenleri stator gerilimleri – volt (V)
v_{dr}, v_{qr}	: $d-q$ eksenleri rotor gerilimleri – volt (V)
i_{ds}, i_{qs}	: $d-q$ eksenleri stator akımları – amper (A)
i_{dr}, i_{qr}	: $d-q$ eksenleri rotor akımları – amper (A)

olarak ifade edilir. ÇBAG modeli $d-q$ eksenlerinde stator gerilim ve manyetik akı denklemleri, rotor gerilim ve manyetik akı denklemleri, generatör moment ve güç denklemleri aşağıda verilmiştir (3.38)-(3.42) [Mahi et al, 2007].

Stator gerilim denklemleri:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= -R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} &= -R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Rotor gerilim denklemleri:

$$\begin{aligned} v_{dr} &= -R_r i_{dr} - \omega_r \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \\ v_{qr} &= -R_r i_{qr} + \omega_r \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \\ \omega_r &= \omega_s - p\omega_g \end{aligned} \quad (3.39)$$

Stator manyetik akı eşitlikleri:

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= -(L_s + L_m) i_{ds} - L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} &= -(L_s + L_m) i_{qs} - L_m i_{qr} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Rotor manyetik akı eşitlikleri:

$$\begin{aligned} \psi_{dr} &= -(L_r + L_m) i_{dr} - L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} &= -(L_r + L_m) i_{qr} - L_m i_{qs} \end{aligned} \quad (3.41)$$

Güç ve moment eşitlikleri:

$$\begin{aligned} T_e &= pL_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \\ P_s &= \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \\ Q_s &= \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} + v_{ds} i_{qs}) \end{aligned} \quad (3.42)$$

Burada,

ψ_{ds}, ψ_{qs} : $d-q$ eksenleri stator manyetik akıları – Weber (W)

ψ_{dr}, ψ_{qr} : $d-q$ eksenleri rotor manyetik akıları – Weber (W)

ω_s : generatör senkron hızı – radyan/saniye (rad/sn)

- ω_g : generatör rotor hızı – radyan/saniye (rad/sn)
 ω_R : elektriksel rotor hızı – radyan/saniye (rad/sn)
 p : generatör kutup sayısı
 T_e : generatör momenti – Newton-metre (N-m)
 P_s : generatör aktif gücü – Watt (W)
 Q_s : generatör reaktif gücü – Watt (W)

olarak ifade edilir. Stator ve rotor gerilimlerini, stator ve rotor akımları cinsinden yazılması için manyetik akı eşitlikleri, gerilim denklemlerinde yerine konur. Elde edilen gerilim eşitlikleri durum-uzay gösterimi ile

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s - L_{ss} d & \omega_s L_{ss} & -L_m d & \omega_s L_m \\ -\omega_s L_{ss} & -R_s - L_{ss} d & -\omega_s L_m & -L_m d \\ -L_m d & \omega_R L_m & -R_r - L_{rr} d & \omega_R L_{rr} \\ -\omega_R L_m & -L_m d & \omega_R L_{rr} & -R_r - L_{rr} d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

olarak elde edilir. Burada d harfi zamana göre türev operatörü olup L_{rr} ve L_{ss} değişkenleri sırasıyla, eş değer rotor indüktans ve eş değer stator indüktans değerleridir. L_{rr} ve L_{ss} değerleri

$$\begin{aligned} L_{ss} &= L_s + L_m \\ L_{rr} &= L_r + L_m \end{aligned} \quad (3.44)$$

eşitlikleri ile bulunur.

3.3.2. İndirgenmiş ÇBAG Matematiksel Modeli

Bir önceki bölümde ÇBAG stator ve rotor gerilim ve manyetik akı eşitlikleri $d-q$ ekseninde ifade edilmiştir. Bu eşitlikler kullanılarak (3.43) numaralı eşitlikte ÇBAG matematiksel modeli durum-uzay gösterimi elde edilmiştir. Generatör moment kontrolcüsü tasarımını kolaylaştırmak için indirgenmiş ÇBAG modeline ihtiyaç vardır. ÇBAG modeli kararlı durumlarda belirli varsayımlar altında basitleştirilebilir. Buna göre stator manyetik akısının, geçiş evresindeki etkileri

ihmal edildiğinde ve d – eksen gerilim ve akımları, stator akı vektörü ile eş fazlı hale getirildiğinde, stator manyetik akısının türevi sıfır olur. Bu durumda stator manyetik akısı sabit büyüklükte ve senkron hızda dairesel olarak hareket eder. İkinci varsayım olarak, indirgenmiş ÇBAG modelinde stator direnci R_s üzerindeki gerilim düşük olduğundan ihmal edilmiştir. İlk varsayımın sonucu olarak

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_{ds}}{dt} &= 0, \quad \psi_{ds} = \psi_s \\ \psi_{qs} &= 0\end{aligned}\tag{3.45}$$

denklemleri elde edilir. Burada ψ_s stator manyetik akısıdır, birimi Weber (W) dir.

Birinci ve ikinci varsayımlar birlikte ele alındığında $d-q$ eksenlerindeki gerilim eşitlikleri [Zhao et al, 2009]

$$\begin{aligned}v_{ds} &= 0 \\ v_{qs} &= \psi_s \omega_s = U_s \\ v_{dr} &= R_r i_{dr} + \sigma L_{rr} \frac{di_{dr}}{dt} - s \omega_s \sigma L_{rr} i_{qr} \\ v_{qr} &= R_r i_{qr} + \sigma L_{rr} \frac{di_{qr}}{dt} + s \omega_s \sigma L_{rr} i_{dr} + s L_m \frac{U_s}{L_s}\end{aligned}\tag{3.46}$$

olarak elde edilir. Burada U_s stator gerilimidir, devir kayması s ve denklem basitleştirme terimi σ

$$s = \frac{\omega_s - p\omega_g}{\omega_s}\tag{3.47}$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_{ss} L_{rr}}\tag{3.48}$$

olarak elde edilir. Devir kayması asenkron elektrik makineleri için çok önemli bir değişkendir. Devir kaymasının negatif olduğu durumda asenkron makine generatör olarak çalışır. Devir kaymasının pozitif olduğu durumda ise asenkron makine motor olarak çalışır. Devir kaymasının sıfır olduğu durum sıfır-yük durumudur. Bu durumda generatör momenti sıfır olur. (3.42) numaralı denklemde verilen güç denklemleri d – eksen stator gerilimi sıfır olduğundan

$$\begin{aligned}
P_s &= \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) = \frac{3}{2} U_s i_{qs} \\
Q_s &= \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} + v_{ds} i_{qs}) = \frac{3}{2} U_s i_{ds}
\end{aligned} \tag{3.49}$$

halini alır. Stator akımları ile rotor akımları arasında

$$\begin{aligned}
i_{ds} &= (|i_{ms}| - i_{dr}) \frac{L_m}{L_{ss}} \\
i_{qs} &= -i_{qr} \frac{L_m}{L_{ss}}
\end{aligned} \tag{3.50}$$

eşitlikleri yazılır. Burada i_{ms} stator tahrik akımıdır. (3.49) ve (3.50) numaralı denklemler birlikte ele alınırsa, aktif ve reaktif güç denklemleri [Zhang and Wang, 2009]

$$\begin{aligned}
P_s &= -\frac{3}{2} U_s i_{qr} \frac{L_m}{L_s} \\
Q_s &= \frac{3}{2} U_s (|i_{ms}| - i_{dr}) \frac{L_m}{L_s}
\end{aligned} \tag{3.51}$$

olarak elde edilir. Stator tahrik akımı i_{ms} , [Zhao et al, 2009]

$$i_{ms} = \frac{\psi_s}{L_m} = \frac{U_s}{\omega_s L_m} \tag{3.52}$$

olarak verilir. Stator tahrik akımı, generatör stator frekansı şebeke frekansına eşitlendiğinde yani kararlı hal durumunda sabittir. (3.51) numaralı aktif ve reaktif güç denklemleri rotor akımının $d-q$ eksenlerindeki bileşenleri ile değişir. Generatör rotor voltajları kontrol edilerek ÇBAG güç kontrolü gerçekleştirilir. Generatör moment denklemi, generatör gücünün generatör rotor hızına bölümü ile

$$T_g = \frac{P_s}{\omega_g} = -\frac{3}{2} U_s i_{qr} \frac{L_m}{\omega_g L_s} \tag{3.53}$$

olarak bulunabilir. İndirgenmiş ÇBAG matematiksel modeli ilerleyen bölümlerde ÇBAG güç kontrolcüsü tasarımında kullanılacaktır.

4. RÜZGÂR TÜRBİNİ KONTROLÜ

Rüzgâr türbinlerinin başlıca amacı rüzgârdan çekilen enerjiyi ve türbinin dairesel hızını belirli değerlerin altında tutarak türbinin aşırı rüzgârdan hasar görmesini engellemektir. En basit rüzgâr türbinlerinden en karmaşık olanına kadar bu kontrol amacı geçerlidir. Rüzgâr türbinleri karmaşıktıkça kontrol amaçları da çeşitlenmektedir. Modern rüzgâr türbinlerinde üretilen gücün kalitesi de en az enerji verimliliği kadar önemlidir.

Rüzgâr Türbini Kontrol Sistemi (RTKS) geliştirirken ilk olarak kontrol amaçları ortaya geliştirilmelidir. Daha sonra bu kontrol amacına uygun en verimli kontrol stratejisi kullanılmalıdır. Kullanılacak kontrol stratejisi, rüzgâr türbininin kurulacağı bölgedeki rüzgâr rejimi, türbinin elektrik şebekesine veya yerel bir şebekeye bağlanıp bağlanmayacağı, kapasitesi v.b. kriterlere göre değişebilir. Bu bölümde temel ve yaygın rüzgâr türbini kontrol amaçları ve kontrol stratejileri üzerinde durulmuştur.

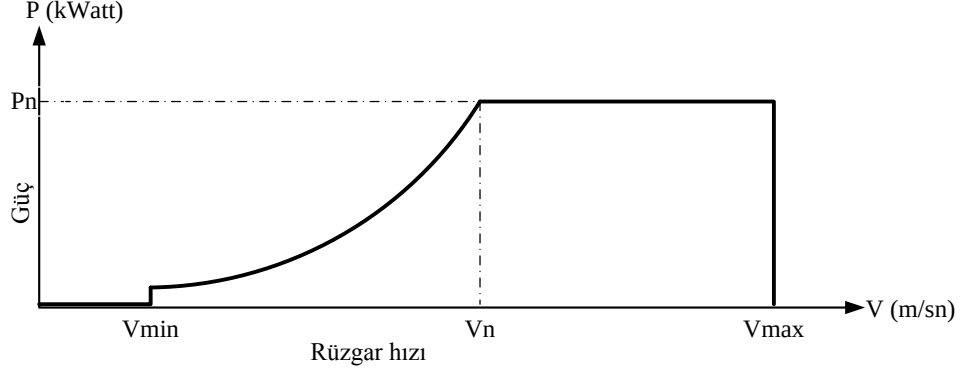
4.1. Kontrol Amaçları

Rüzgâr türbinleri rüzgâr enerjisinin bir kısmını elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. RTKS, rüzgâr türbininden elde edilen elektrik enerjisinin verimini arttırmayı ve maliyetini düşürmeyi amaçlar. Rüzgâr türbininin verimini arttırma amacı bazen birbirleriyle çelişen alt amaçlar içerir. Bunlar, rüzgârdan güvenilir çalışma sınırları içerisinde maksimum güç elde etmek, mekanik yüklere karşı rüzgâr türbinini korumak ve elde edilen gücün kalitesini sağlamak şeklinde sıralanır.

4.1.1. Maksimum Enerji Yakalama

Rüzgâr türbinlerinin kapasiteleri, rüzgârdan elde edebilecekleri maksimum güç ile ifade edilir. Rüzgâr hızına göre rüzgârdan tutulabilecek optimum enerjiyi gösteren grafiğe “ideal güç eğrisi” denilir. Tipik bir rüzgâr türbininin ideal güç eğrisi Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu grafikten de anlaşıldığı gibi rüzgâr türbinleri V_{min} ve V_{max}

rüzgâr hızları arasında çalışır. Rüzgâr türbini, V_{max} rüzgâr hızından yüksek rüzgâr hızlarında, yapısal zararlardan korunmak için kapatılır.



Şekil 4.1. Rüzgâr türbini ideal güç eğrisi

P_n nominal gücüne karşılık gelen rüzgâr hızı V_n nominal rüzgâr hızıdır. Rüzgâr türbinleri nominal güçlerine göre tasarlanırlar. Rüzgâr türbininin kurulacağı bölgedeki ortalama rüzgâr hızı kurulacak rüzgâr türbininin büyüklüğünü belirler. Dolayısıyla V_n kullanılan rüzgâr türbinine göre değişir. Çok güçlü bir rüzgâr türbinini ortalama rüzgâr hızlarının düşük olduğu bir bölgede kullanmak maliyet açısından verimli değildir. Bundan dolayı rüzgârdan elde edilen enerjiyi belli bir nominal güçte sınırlamak gerekir.

Rüzgâr türbini V_{min} ve V_n rüzgâr hızları arasında rüzgârdan maksimum güç tutacak şekilde çalıştırılır. V_n ve V_{max} rüzgâr hızları arasında rüzgârdan tutulan enerji aşırı yüklenmeleri önlemek için P_n değerinde sınırlandırılır. Rüzgâr hızının minimum rüzgâr hızından (V_{min}) küçük olduğu durumda rüzgâr türbini, verim çok küçük olduğundan çalıştırılmaz. Rüzgâr hızının kesme rüzgâr hızından (V_{max}) yüksek olduğu durumda rüzgâr türbini aşırı yüklerden korunmak amacı ile çalıştırılmaz.

4.1.2. Mekanik Yüklere Karşı Korunma

Rüzgâr türbinlerinden maksimum güç elde etmek amaçlanırken, rüzgâr türbini üzerindeki mekanik yükler de dikkate alınmalıdır. Sadece ideal güç eğrisini elde etme yönündeki bir kontrol, rüzgâr türbininin mekanik yüklerden kaynaklı zarar görüp işlevsiz kalmasına neden olabilir. Rüzgâr türbini üzerindeki mekanik yükler statik ve dinamik yükler olarak ikiye ayrılır. Statik yükler ortalama rüzgâr hızında rüzgâr türbini üzerinde oluşan yüklerdir. Asıl kontrol edilmesi gereken dinamik yükler kanatlar üzerine düşen ve rotor aerodinamik momentini oluşturan yüklerdir. Rüzgâr hızındaki ani yön ve hız değişimlerinden kaynaklanan yükler de dinamik yüklerdir ve kontrol edilmeleri gerekir. Bununla birlikte rotor hızının katlarında yüksek frekanslı periyodik yükler de rüzgâr türbini mekaniği üzerine etkir. Tasarlanan rüzgâr türbini kontrolcüsü mekanik titreşimlere karşı sönümleme sağlamalıdır. Ayrıca rüzgârdan elde edilen enerjiyi sınırlandırarak rüzgâr türbinindeki aşınmadan kaynaklı arızaları engellemelidir.

4.1.3. Güç Kalitesi

Rüzgâr türbinleri bağlandıkları elektrik şebekesinin güç kalitesini etkiler. Güç kalitesi çoğunlukla, reaktif güç talebi, gerilim seviyesi, gerilimdeki ani değişimler (flicker), harmonik ve frekans değişimleri vb. olayları kapsar. Rüzgâr türbinleri elektrik üretmelerine bağlı olarak, dağıtım sisteminin gerilim seviyesinde bazı etkilerin oluşmasına sebep olurlar. Gerilim seviyesinde meydana gelen bu etkiler rüzgâr türbinlerinin bağlı oldukları sistem noktasından başlayarak, dağıtım şebekesine kadar devam eder. Mega Volt Amper (MVA) büyüklüğündeki dağıtım istasyonları genellikle gerilim seviyesini düzenlerler. Bu durumda, rüzgâr türbinleri bağlandıkları hatların gerilim seviyesini dağıtım istasyonlarında herhangi bir gerilim düzenlemesi yoksa etkiler.

Rüzgâr türbinleri sisteme aktif güç verdikleri için sistemdeki gerilim seviyesini arttırırlar. Aynı zamanda sistemden reaktif güç çekmeleri nedeniyle gerilim seviyesinde düşüşler meydana gelir. Bu durumda, rüzgâr türbinlerinin gerilime bağlı şebekeden ayrılması sağlanabilir veya gerilime bağlı güç denetimi uygulaması yapılabilir. Böylece, türbindeki maksimum elektrik üretimi nedeniyle oluşan yüksek

gerilim seviyelerinin bulunduğu durumlarda, gerilim seviyesi aşağıya çekilebilecektir.

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

Rüzgâr hızındaki kısa süreli değişimler, rüzgâr türbininin çıkış gücünde dalgalanmalara sebep olmaktadır. Bu da gerilimde ani değişimlere (flicker) yol açmaktadır. Dağıtım sisteminde oluşan gerilim dalgalanmaları, gerilimin frekansına ve büyüklüğüne bağlı olarak, güç kalitesini etkiler ve gürültüye sebep olur. Ayrıca, her bir rüzgâr türbininin oluşturduğu ani değişimler, türbin büyüklüğü ile artmaktadır. Mesela, tek bir 1.5MW'lık rüzgâr türbininin gerilimde yaratacağı ani değişimler 10 adet 150kW'lık rüzgâr türbininkinden 2-3 kat daha fazladır.

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan çeviricilerdeki anahtarlanmalardan dolayı tipik harmonikler oluşacaktır. Yüksek anahtarlama frekansları düşük harmonikli dalgalar üretmektedir. IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor) gibi katı hal yarı iletken transistörler ile yüksek frekanslı anahtarlama yapılarak harmonik bileşenleri küçük olan iyi bir akım dalgası üretilebilir. Rüzgâr generatörünü servis şebekesine bağlayan yükseltici transformatörler ile gerilimin yükseltilmesi halinde düşük olan harmonikler daha da azaltılabilmektedir. Böylece ortak bağlantı noktasında rüzgâr türbinleri aracılığıyla harmoniklerin bozucu etkisi çok küçük olacaktır [WEB2].

Rüzgâr türbini için tasarlanan kontrolcüler yukarıda sıralanan güç kalitesi amaçlarını hesaba katmalıdır. Üretilen gücün şebeke ile regülasyonu ayrı bir kontrolcü gerektirir.

4.2. Kontrol Stratejileri

Rüzgâr türbinleri farklı çalışma özelliklerine sahiptir. Farklı çalışma özelliklerindeki türbinler farklı rüzgâr hızları için kontrol amaçlarını yerine getirecek şekilde tasarlanır ve kontrol edilirler. En yaygın rüzgâr türbini çalışma yöntemleri, sabit hız, değişken hız, sabit kanat açısı ve değişken kanat açısıdır. Bu çalışma yöntemlerine göre temelde dört tip rüzgâr türbini ön plana çıkar:

- Sabit Hızlı Sabit Kanat Açılı (SH-SK)
- Sabit Hızlı Değişken Kanat Açılı (SH-DK)
- Değişken Hızlı Sabit Kanat Açılı (DH-SK)
- Değişken Hızlı Değişken Kanat Açılı (DH-DK)

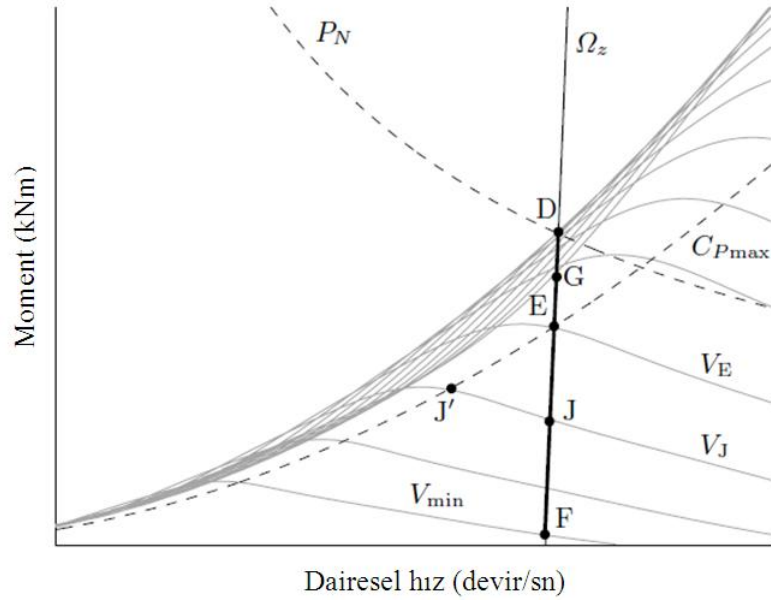
Rüzgâr türbininin istenilen kontrol amaçlarının tamamını yerine getirmesi rüzgâr türbininin çalışma esnekliği ile alakalıdır. Rüzgâr türbininin çalışma yöntemi belirlendikten sonra o rüzgâr türbini için ne tip bir kontrolcü kullanılacağı tespit edilebilir. Rüzgâr türbinlerinde ana amaç enerji verimliliğini maksimuma çıkarmak ve rüzgâr türbinini aşırı yüklenmeden korumaktır. Dolayısıyla sıralanan dört farklı rüzgâr türbini tipinde de amaç üretilen gücü ideal güç eğrisine benzetmektir. Generatörden üretilen gücün analizi generatör shaft hızı ve generatör moment eğrileri üzerinden yapılmaktadır. Bu bölümde sıra ile yukarıda anılan dört farklı çalışma yöntemine sahip rüzgâr türbinlerinin kontrolü üzerinde durulmuştur.

4.2.1. Sabit Hızlı Sabit Kanat Açılı Rüzgâr Türbini

Sabit Hızlı Sabit Kanat açılı rüzgâr türbinleri, yaygın olarak kullanılmışlardır. Fakat daha sonraları verimlilikleri düşük olduğundan dolayı önemlerini yitirmişlerdir. Bu tip rüzgâr türbinleri sabit hızda çalıştıklarından dolayı generatör shaft hızı, şebeke frekansına sabitlenir. Generatör hız kontrolü değişken rotor direnci kullanılarak yapılabilir. Herhangi bir moment kontrolü uygulanmaz. Generatör hızı asenkron generatör kullanıldığında senkron hızın sadece %2'si değişebilir. Senkron generatör kullanıldığı durumda generatör hızı senkron hıza sabitlenmelidir. Bu tip rüzgâr türbinleri doğrudan şebeke gücüne bağlı olduklarından ve herhangi bir aktif

kontrol gerektirmediklerinden düşük maliyetlidir. Buna karşın verimlilikleri oldukça düşüktür.

Şekil 4.2’de SH-SK açılı rüzgâr türbininin moment-generatör hızı düzleminde kontrol stratejisi gösterilmiştir [Bianchi et al, 2007]. Koyu siyah çizgi generatör moment değişimini, gri soluk çizgiler ise farklı rüzgâr hızlarındaki aerodinamik moment değişimini belirtir. Rüzgâr türbini koyu çizgi üzerindeki noktalarda karalı halde çalışır. Onun dışındaki moment değerleri geçiş bölgelerinde elde edilir. Şekil 4.2’de kullanılan DEFGJ harfleri farklı rüzgâr hızlarında sabit generatör hızında elde edilen moment noktalarıdır.

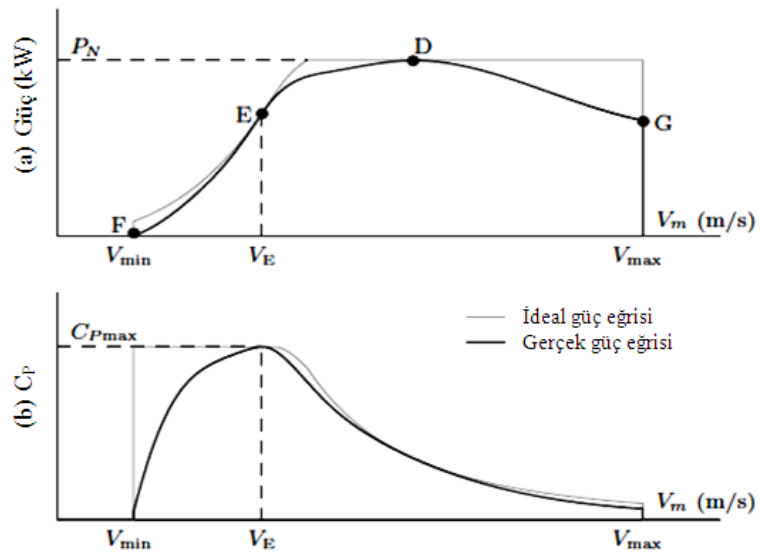


Şekil 4.2. SH-SK açılı rüzgâr türbini moment-hız grafiği.

SH-SK açılı rüzgâr türbini rüzgâr hızı arttıkça sırayla FJEDG noktalarında çalışır. Burada V_E , V_J farklı rüzgâr hızlarını, C_{pmax} maksimum güç katsayısı eğrisini, P_n nominal güç eğrisini Ω_z ise sabit generatör hızını ifade eder. Moment çizgisi üzerindeki “D” noktası nominal güç eğrisi üzerindedir. Bu noktadan sonra rüzgâr türbini kanatları üzerindeki itme kuvveti artar, kaldırma kuvveti azalır. İtme ve kaldırma kuvvetlerinin rüzgâr hızı ile değişiminden bölüm 3.1.2’de bahsedilmiştir. Dolayısıyla aerodinamik moment rüzgâr artmasına karşın azalır ve rüzgâr türbini “G” noktasında çalıştırılır. Bu tip kontrole ise “*Passive Stall Control*” denir. Bu tip kontrolde rüzgâr türbini hiçbir zaman nominal gücü üretmez. Bu

durum rüzgâr türbininin “*Stall*” durumuna geçmesi diye adlandırılır. Bundan dolayı sabit hızlı sabit kanat açılı rüzgâr türbinleri düşük verimlidir. “G” noktası rüzgâr türbini kesme hızında elde edilen moment, generatör hız kesişim noktasıdır. Şekil 4.2’de “E” noktası C_{pmax} eğrisi üzerindedir. Dolayısıyla V_E rüzgâr hızında, nominal rüzgâr hızının altında iken maksimum verimlilik sağlanmıştır. Rüzgâr hızı V_E ’den V_J ’ye düştüğünde generatör moment, sabit generatör hızı üzerinde “J” noktasına hareket eder. “J” noktası C_{pmax} eğrisi üzerinde olmadığından rüzgâr türbin verimi düşer. V_J rüzgâr hızında “J” noktası maksimum verimin sağlanacağı noktadır, fakat SH-SK açılı rüzgâr türbinlerinin generatör hızı sabit olduğundan türbin verimi V_J rüzgâr hızında düşer.

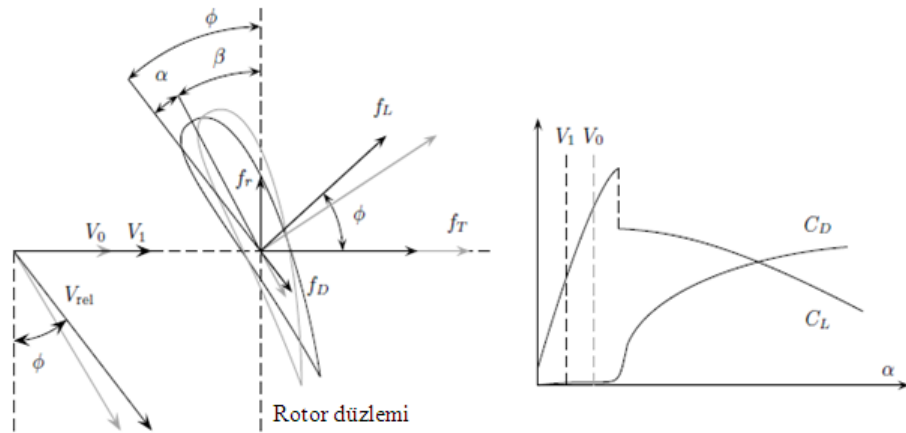
Şekil 4.3’de SH-SK açılı rüzgâr türbini çıkış gücü eğrisi ve güç katsayısı eğrisi gösterilmiştir [Bianchi et al, 2007]. Nominal rüzgâr gücünün altında sadece “E” noktasında maksimum verimlilik sağlanmıştır. Nominal rüzgâr hızının üstünde ise sadece “D” noktasında maksimum verimlilik sağlanmıştır. “G” noktası kesme hızı gücüdür. SH-SK açılı rüzgâr türbinlerinin verimleri düşüktür. Şekil 4.3’de görüldüğü gibi çıkış gücü ve güç katsayısı eğrileri ideal değerlerin altındadır. SH-SK rüzgâr türbinlerinin esnek olmayan yapısından kaynaklı olarak güç kalitesi oldukça düşüktür. Çıkış aktif ve reaktif çıkış güçlerinde dalgalanmalar oluşur. Bu tip rüzgâr türbinlerinin önemlerini yitirmelerinin en büyük sebebi düşük çıkış gücü kalitesidir.



Şekil 4.3. SH-SK açılı rüzgâr türbini: a) Çıkış gücü eğrisi, b) Güç katsayısı eğrisi.

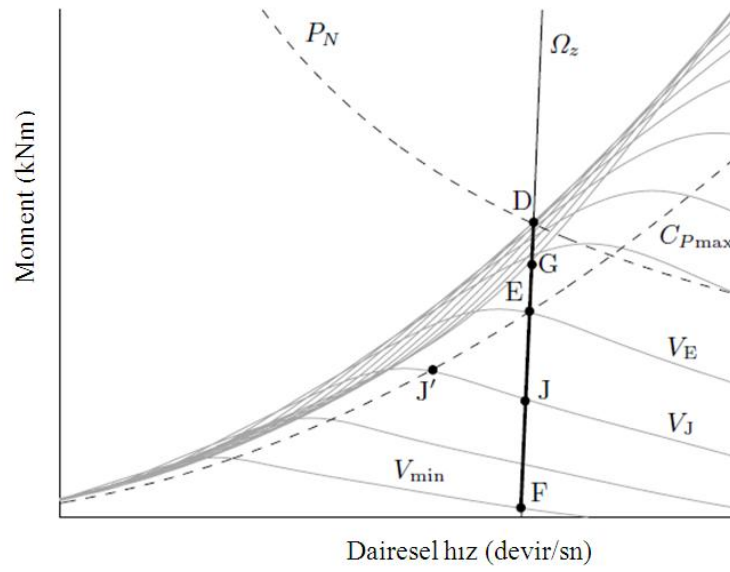
4.2.2. Sabit Hızlı Değişken Kanat Açılı Rüzgâr Türbini

Sabit Hızlı Değişken Kanat açılı rüzgâr türbinleri ticari olarak kullanılmış olup orta ve yüksek güçte türbinler imal edilmiştir. Bu tip rüzgâr türbinlerinde maksimum güç dönüştürme katsayısı sadece nominal rüzgâr hızının üstündeki değerlerde elde edilebilir. Nominal rüzgâr hızının altındaki rüzgâr hızlarında kanat açısı sabit seçilir. Nominal rüzgâr hızının üstündeki rüzgâr hızlarında nominal güç elde etmek ve rüzgâr türbini üzerindeki kuvvetleri azaltmak için kanat açısı artırılır. Kanat açısı artırıldığında ve rüzgâr hızı arttığında hücum açısı azalır. Böylelikle rüzgârdan çekilen güç sınırlandırılmış olur. Kanat açısının artırılması işlemine “*pitch-to-feather*” kontrol tekniği denir. Şekil 4.4’de ve devamında “*pitch-to-feather*” tekniği kısaca anlatılmıştır [Bianchi et al, 2007]. Buna göre f_L kanatlar üzerindeki kaldırma kuvveti, f_D kanatlar üzerindeki itme kuvveti, f_T eksensel itme kuvveti, f_r ise rüzgâr türbininde iş yapan, rotoru döndüren, döndürme kuvvetidir. Burada V_0 ve V_1 eksensel rüzgâr hızlarıdır ve $V_1 > V_0$ dir. Rüzgâr hızı V_0 dan V_1 ’e yükseldiğinde ϕ açısı (kanat kesitinin rotor eksenine ile yaptığı açı) artar. Buna karşılık kanat açısı β artırılır. Kanat açısı artırıldığında hücum açısı α azalır. Hücum açısı azaldığında Şekil 4.4’de görüldüğü gibi kaldırma katsayısı C_L düşer ve buna karşın itme katsayısı C_D ’de ciddi bir artış olmaz. Bu tekniğin en iyi yönü rüzgârdan tutulan enerjinin azaltılmasıdır. Bu teknikle türbin üzerindeki aerodinamik yükler, rüzgâr hızı arttığında artmaz.



Şekil 4.4. “Pitch-to-feather” tekniği.

kesme rüzgâr hızına kadar “D” noktasında kalır. Kesme rüzgâr hızında türbin “G” noktasında çalışır. Burada “G” ve “D” noktaları birbirine denktir. Bu tip rüzgâr türbinlerinin nominal hızın altındaki verimlilikleri düşüktür. Nominal hızın üstünde ise verimleri yüksektir. SH-DK açılı rüzgâr türbini rüzgâr hızı arttıkça sırayla FED noktalarında çalışır. Nominal rüzgâr hızında ve nominal rüzgâr hızının üstünde nominal güç elde edilir. Nominal rüzgâr hızının altında ise generatör hızı sabit hızda döndüğünden (senkron hızın % 2’si kadar değişebilir) sadece “E” noktasında maksimum verim sağlanır onun dışındaki rüzgâr hızlarında verim düşüktür.



Şekil 4.6. SH-DK açılı rüzgâr türbini “pitch-to-feather” kontrol stratejisi.

4.2.3. Değişken Hızlı Sabit Kanat Açılı Rüzgâr Türbini

Değişken hızlı rüzgâr türbinleri nominal hızın altında, sabit hızlı rüzgâr türbinlerine göre çok daha fazla tercih edilir olmuştur. Rüzgâr türbinlerini değişken hızlarda çalıştırmanın, rüzgârdan çekilen enerjinin artırılması, türbin üzerindeki mekanik yüklerin azaltılması ve güç kalitesinin artırılması gibi faydaları vardır.

Bu tip rüzgâr türbinlerinde, nominal rüzgâr hızının altındaki rüzgâr hızları için maksimum güç dönüşüm katsayısı C_{Pmax} elde edilmeye çalışılır. Bunun için uygun kanat açısı ve tepe hız oranı Şekil 3.6’ da örneği verilmiş C_p ’nin kanat açısı ve tepe hız oranına göre değişim grafiğinden faydalanılarak bulunur. Maksimum güç

dönüşüm katsayısı belirli bir kanat açısı (β_o) ve tepe hız oranında (λ_o) elde edilir. Nominal rüzgâr hızının altında generatör momentini kontrol edilerek tepe hız oranı sabit tutulmaya çalışılır. (3.20) numaralı eşitlikte tepe hız oranının rotor açısal hızı ve rüzgâr hızına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Rüzgâr hızı arttığında aerodinamik moment artacaktır. Generatör momentini kontrol edilerek rotor dönüş hızı kontrol edilir. DH-SK açılı rüzgâr türbinleri, nominal rüzgâr hızının üstünde SH-SK açılı rüzgâr türbinleri gibi davranır. Rüzgâr hızı arttıkça kanatlar üzerindeki hücum açısı artar ve türbin “*Stall*” durumuna geçer. Rotor üzerindeki aerodinamik moment sınırlandırılır.

DH-SK açılı rüzgâr türbinlerinin enerji verimliliği düşük rüzgâr hızlarında yüksektir. Fakat yüksek rüzgâr hızlarında kanat açılarının sabit olmasından dolayı enerji verimi düşüktür. Yüksek hızlarda aerodinamik momentin kontrolü “*Passive Stall*” tekniği ile yapılmaktadır. “*Passive Stall*” bölüm 3.1.2’de anlatıldığı gibi türbin üzerindeki aerodinamik yükleri arttırır. Bu da yıpranma kaynaklı hasarlara yol açabilir. Ayrıca “*Passive Stall*” yönteminin enerji verimliliği de oldukça düşüktür.

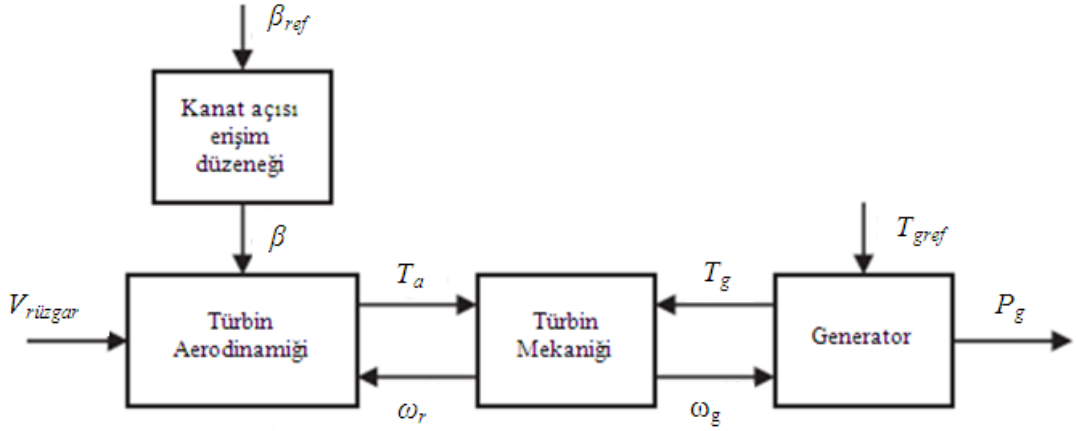
4.2.4. Değişken Hızlı Değişken Kanat Açılı Rüzgâr Türbini

Değişken Hızlı Değişken Kanat açılı rüzgâr türbinleri, sağladıkları kontrol esnekliği sayesinde her geçen gün biraz daha yaygın hale gelmektedir. Bu kontrol stratejisinde rüzgâr türbini, nominal rüzgâr hızının altında sabit kanat açısı ve değişken rotor hızında çalıştırılır. Nominal rüzgâr hızının üstünde ise rüzgâr türbini, değişken kanat açısı ve sabit hızda çalıştırılır. Rüzgâr türbinlerinin çalışma bölgelerini rüzgâr hızına göre sınıflandırırsak, nominal rüzgâr hızının altındaki çalışma bölgesine “kısmi yük bölgesi”, nominal rüzgâr hızının üstündeki çalışma bölgesine “tam yük bölgesi” denir. Kısmi yük bölgesinde kanat açısı sabit tutulur, generatör momentini kontrol edilerek rüzgâr türbini maksimum güç dönüşüm katsayısı ile çalıştırılır. Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi kısmi yük bölgesinde tepe hız oranı sabit tutularak C_{pmax} korunur. Böylelikle kısmi yük bölgesinde ideal güç eğrisi sağlanmış olur.

kontrol edilerek, rüzgâr çekilen güç nominal güçte sınırlandırılır. Kanat açısı kontrolü, generatör momenti kontrolcüsüne oranla daha yavaştır. Bu nedenle değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbinlerinde tam yük bölgesinde kanat açısı kontrolcüsüne yardımcı olarak generatör moment kontrolcüsü de kullanılabilir [Boukhezzar et al, 2007]. Bu çalışmada da tam yük bölgesinde kanat açısı kontrolcü, generatör momenti kontrolcüsü ile birlikte kullanılmıştır.

4.3. DH-DK Açılı Rüzgâr Türbini Kontrolü

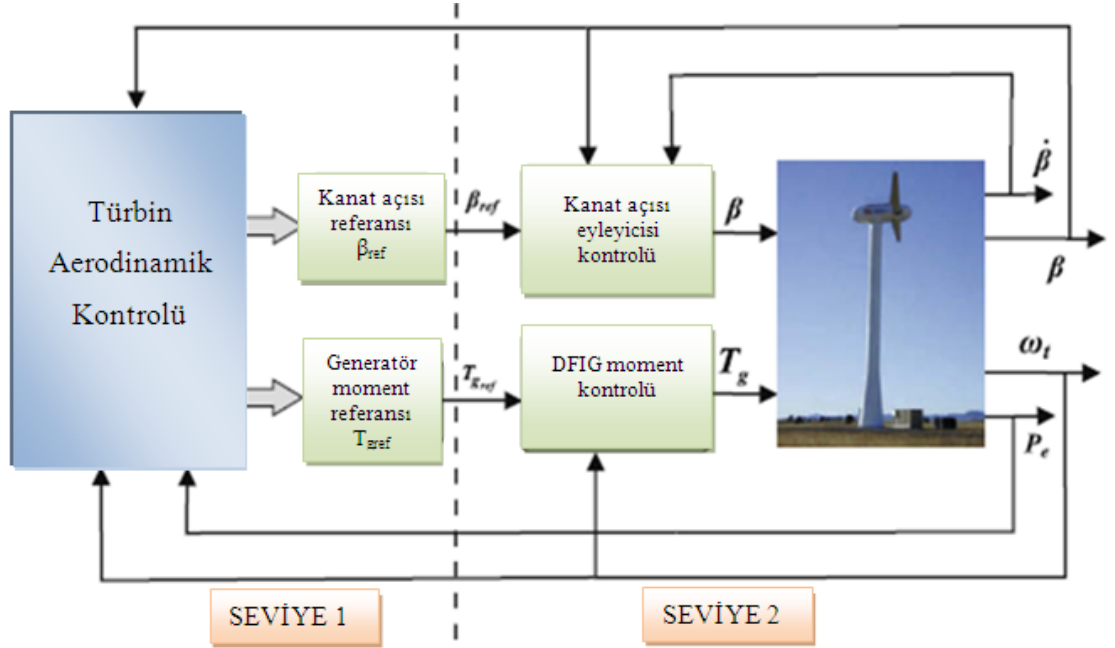
DH-DK açılı rüzgâr türbininin blok şeması Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Burada T_{gref} referans generatör momenti, β_{ref} referans kanat açısı kontrol girişleridir. Bloklar arasındaki ω_r rotor hızı ω_g generatör hızı, T_a aerodinamik moment, T_g generatör momenti, P_g ise generatör gücüdür. DH-DK açılı rüzgâr türbinlerinin çalışma bölgeleri kısmi yük bölgesi ve tam yük bölgesi olarak ikiye ayrılır.



Şekil 4.8. Değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbini blok şeması.

Rüzgâr türbini dinamiği bölüm 3.2.1’de anlatıldığı gibi nonlinear özelliktedir. Rüzgâr türbinleri belirli çalışma noktaları arasında lineerleştirilebilir. Fakat sistem dinamiğinin rüzgâr gibi değişken bir girdiye bağlı olmasından ve rüzgâr türbininin dinamiğinin serbestlik derecesinin yüksek olmasından lineer kontrolcüler başarılı sonuçlar verememektedir. Nonlinear kontrolcüler rüzgâr türbini dinamiğine daha uygundur. Bu çalışmada kısmi yük bölgesinde maksimum güç eğrisini izleyen kayan kipli generatör moment kontrolcüsü kullanılmıştır. Kayan kipli kontrolcü dayanıklı

yapısından dolayı, değişen rüzgâr hızına ve sistem bilinmeyenlerine rağmen sistemi kararlı tutar. Tam yük bölgesinde generatör moment kontrolcüsüne yardımcı olarak oransal kanat açısı kontrolcüsü kullanılmıştır. Oransal kontrolcü çok daha karmaşık PI (Proportional Integral) ve PID (Proportional Integral Derivative) kontrolcülerden daha iyi sonuç vermiştir [Boukhezzar et al, 2007]. Tam yük bölgesinde rotor hızı nominal rotor hızında sabitlenerek nominal güç elde edilir. Tasarlanan generatör moment ve kanat açısı kontrolcüleri referans değerler üretir. Şekil 4.9’da DH-DK açılı rüzgâr türbininin kontrol aşamaları verilmiştir [Boukhezzar and Siguerdidjane, 2009]. Burada T_{gref} referans generatör moment, β_{ref} referans kanat açısı kontrol girişleri, β kanat açısı ω_g generatör hızı, T_g generatör moment, P_g ise generatör gücüdür. Buna göre generatör moment kontrolcüsü ve kanat açısı kontrolcüsü birinci seviye kontrolcülerdir. Birinci seviye kontrolcülerin ürettiği referans moment ve kanat açısı değerleri ikinci seviye kontrolcülerine giriş oluşturur.



Şekil 4.9. Rüzgâr türbini kontrol seviyeleri.

Kanat açısı eyleyici kontrol ve ÇBAG moment kontrol ikinci seviye kontrolcülerdir. Bu çalışmada her iki kontrol seviyesi de tasarlanmış ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Kanat açısı eyleyici kontrolü için herhangi bir kontrolcü kullanılmamıştır. Sadece referans kanat açısı değişimleri sınırlandırılmıştır. ÇBAG

moment kontrolünde ise rotor akımları PI (Proportional Integral) kontrolcüsüyle kontrol edilerek istenilen moment değerleri elde edilmiştir.

4.3.1. Generatör Moment Kontrolcüsü

Rüzgâr türbininin çalışma bölgeleri ve ideal güç eğrisi Şekil 4.10’da verilmiştir [Esbensen et al, 2008]. Burada V_{max} kesme rüzgâr hızı, V_{min} başlama rüzgâr hızı, P_n ise nominal türbin gücüdür. Kısmi yük bölgesinde kanat açısı β_o ’da tepe hız oranı λ_o ’da sabitlenir. Maksimum güç dönüşüm katsayısı Şekil 3.6’da görüldüğü gibi kanat açısı ve tepe hız oranının fonksiyonudur. Maksimum güç dönüşüm katsayısı optimum kanat açısı β_o ve tepe hız oranı λ_o ’da

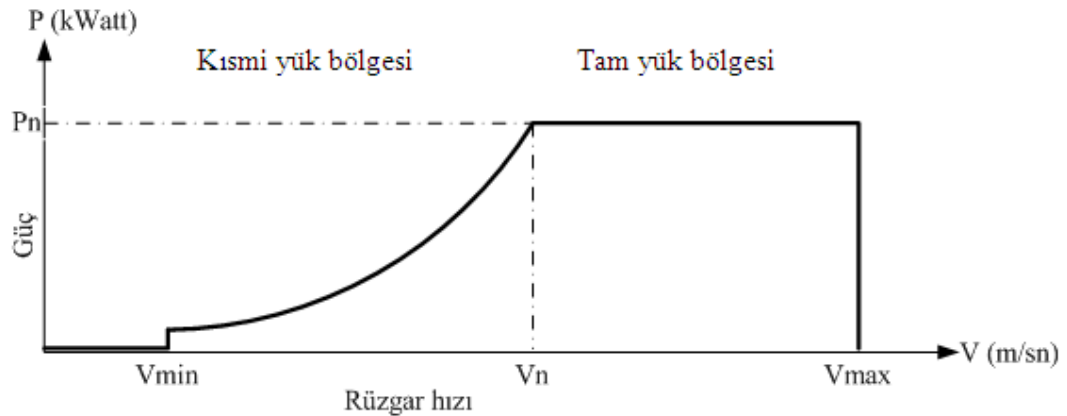
$$C_{pmax} = C_p(\lambda_o, \beta_o) \quad (4.1)$$

olarak elde edilir. Bölüm 3.1.3’de rotor üzerindeki aerodinamik moment

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_q(\lambda, \beta) v^2 \quad (4.2)$$

$$C_q = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (4.3)$$

olarak verilmişti.



Şekil 4.10. İdeal güç - hız eğrisi.

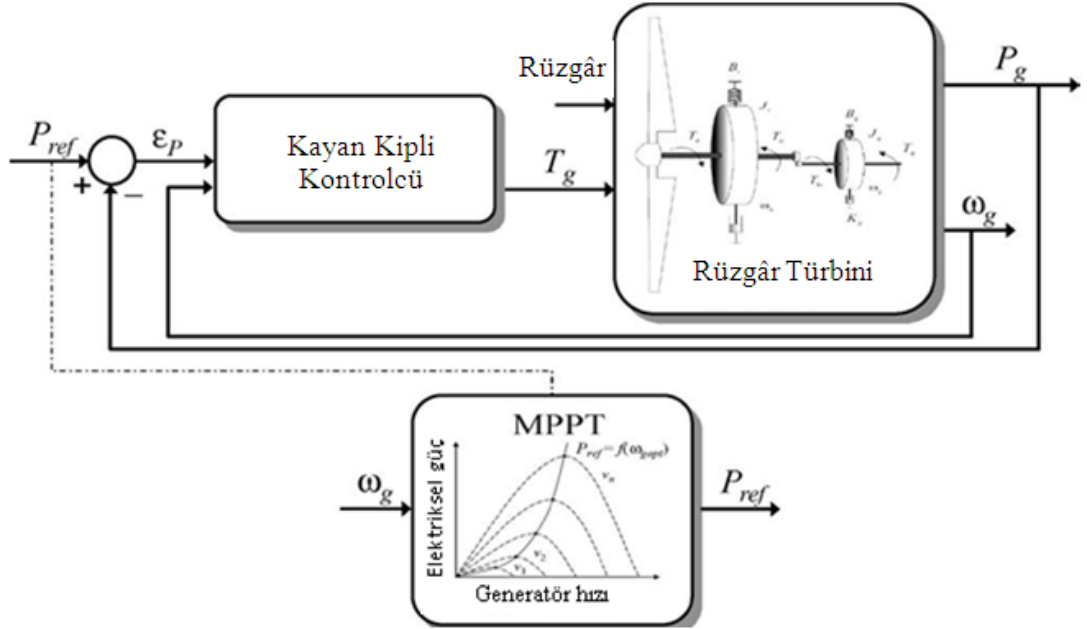
Aerodinamik momentin optimum değeri (4.2) numaralı eşitlikte C_q yerine C_{qmax} konularak bulunur. C_{qmax} (4.4) numaralı eşitlik kullanılarak

$$C_{qmax} = \frac{C_{pmax}}{\lambda_o} \quad (4.4)$$

olarak bulunur. Bu durumda optimum aerodinamik moment

$$T_{opt} = k_{opt} \omega_r^2, \quad k_{opt} = \frac{1}{2\lambda_{opt}^2} \rho \pi R^5 C_{qmax} \quad (4.5)$$

olarak bulunur. Burada, kısmi yük bölgesinde bu eşitlikteki k_{opt} değeri korunarak rüzgâr türbininden maksimum güç alınmaya çalışılır. Aslında k_{opt} değerini optimum seviyede tutmak rüzgâr türbininin değişen kanat aerodinamiği yüzünden güçtür. Bu çalışmada, kayan kip (sliding mode) generatör kontrolcüsü kullanarak kısmi yük bölgesinde maksimum güç üretmek ve rüzgâr türbini üzerindeki ani türbülans etkilerini minimize etmek amaçlanmıştır.



Şekil 4.11. Kullanılan generatör moment kontrolcüsü blok modeli.

Rüzgâr türbini kontrolünde genellikle kullanılan yöntem, rüzgâr türbini çalışma bölgelerinde lineerleştirme yaklaşımıdır. Lineerleştirme yapılarak elde edilen

kontrolcüler rüzgâr türbininin hesaba dayalı çalışma aralıkları ve sistem bilinmeyenleri yüzünden düşük performanslıdırlar. Bundan dolayı nonlinear ve dayanıklı kontrolcülere ihtiyaç vardır. Bundan dolayı, bu çalışmada generatör moment kontrolü için Maksimum Güç Noktası Takipi (MPPT-Maximum Power Point Tracking) yapan kayan kipli kontrolcü kullanılmıştır. Şekil 4.11’de kullanılan generatör moment kontrolcüsünün blok modeli gösterilmiştir [Beltran et al, 2008]. Burada P_{ref} , (4.6) numaralı eşitlikteki T_{opt} optimum aerodinamik momentin rotor açısal hızına çarpımıyla

$$P_{ref} = T_{opt} \omega_r \quad (4.6)$$

olarak bulunur. Kullanılan kayan kipli kontrolcü referans güç ile üretilen güç arasındaki farkı sıfırlamaya çalışır. Bunun için generatör güç değerini, MPPT algoritmasının ürettiği optimum güç seviyesine çekmeye çalışır. Maksimum güç izleme hatasına ε_p dersek,

$$\varepsilon_p = P_{ref} - P_g \quad (4.7)$$

şeklinde ifade edilir. Maksimum güç izleme hatasının türevi $\dot{\varepsilon}_p$

$$\dot{\varepsilon}_p = \dot{P}_{ref} - T_g \dot{\omega}_r - \dot{T}_g \omega_r \quad (4.8)$$

olur. Burada amaç maksimum güç izleme hatasını sonlu bir zamanda sıfıra yakınsatmaktır. Bunun için generatör momentinin türevi

$$\begin{aligned} \dot{T}_g &= \frac{(B + \psi) \text{sgn}(\varepsilon_p)}{\omega_r} \\ \dot{B} &= |\varepsilon_p| \quad \text{ve} \quad \psi > 0 \end{aligned} \quad (4.9)$$

olarak seçilir [Beltran et al,2008]. Burada ψ pozitif bir sayı, ω_r rotor hızı, B ise türevi referans güç izleme hatasının mutlak değeri olan bir değişkendir. Generatör momentini (4.9) nolu eşitliğin integrali alınarak elde edilir. Tasarlanan kontrolcü, güç izleme hatasını sonlu bir zamanda sıfıra yakınsatır.

İspat: (4.10) numaralı eşitlik (4.9) numaralı eşitlikte yerine yazılırsa,

$$\dot{\varepsilon}_p = \dot{P}_{ref} - T_g \dot{\omega}_r - (B + \psi) \text{sgn}(\varepsilon_p) \quad (4.10)$$

$$d = \dot{P}_{ref} - T_g \dot{\omega}_r \quad (4.11)$$

$$|d| < B_1 \quad (4.12)$$

$$\dot{\varepsilon}_p = -(B + \psi) \text{sgn}(\varepsilon_p) + d \quad (4.13)$$

(4.14) numaralı eşitlik elde edilir. (4.12) numaralı eşitlikteki d ara değişkendir. (4.13) numaralı eşitlikteki B_1 ise her zaman d 'den büyük pozitif bir sayıdır.

Sistemin maksimum güç izleme hatasının sıfıra yakınsayıp yakınsamadığını test etmek için

$$V = \frac{1}{2} \varepsilon_p^2 + \frac{1}{2} (B - B_1)^2 \quad (4.14)$$

Lyapunov aday fonksiyonu kullanılır. Lyapunov kararlılık testine göre, eğer pozitif tanımlı Lyapunov aday fonksiyonunun türevi negatif veya sıfırsa, test edilen sistem kararlıdır. Lyapunov aday fonksiyonunun türevi

$$\dot{V} = \varepsilon_p \dot{\varepsilon}_p + (B - B_1) \dot{B} \quad (4.15)$$

$$\dot{V} = \varepsilon_p (-(B + \psi) \text{sgn}(\varepsilon_p) + d) + (B - B_1) |\varepsilon_p| \quad (4.16)$$

$$\dot{V} \leq -\psi |\varepsilon_p| \quad (4.17)$$

olarak bulunur. Lyapunov fonksiyonunun türevi sıfır veya negatiftir. La Salle teoremine göre maksimum güç izleme hatası asimptotik olarak sıfıra gider [Khalil,2001]. Kontrolcü denklemindeki $\text{sgn}(\varepsilon_p)$ fonksiyonu, kontrolcü çıkışındaki salınımları azaltmak için

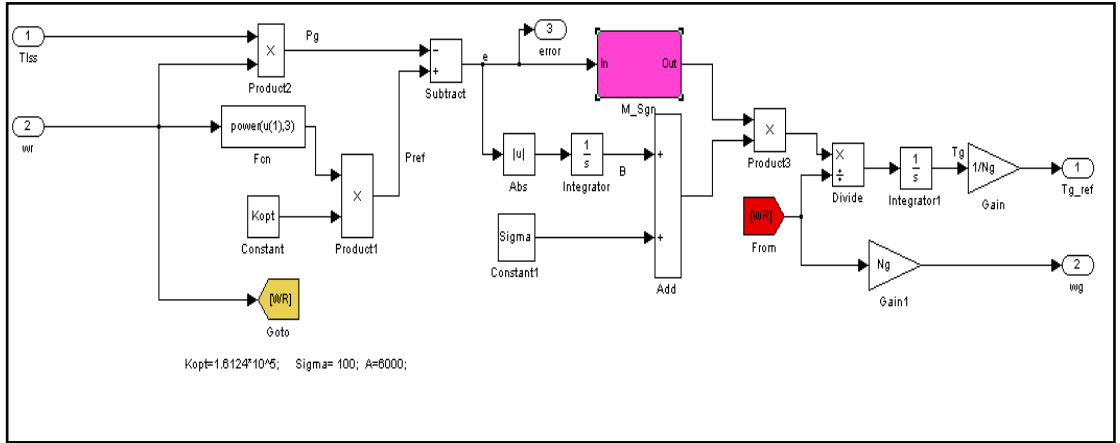
$$\text{sgn}(\varepsilon_p) = \frac{\varepsilon_p}{|\varepsilon_p| + a_1} \quad (4.18)$$

olarak düzenlenebilir. Burada a_1 pozitif bir sayıdır, hata büyüklüğüne göre seçilir.

Düşük rüzgâr hızlarında tepe hız oranı optimum değerde tutularak P_{ref} değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir. k_{opt} değeri bu çalışmada kullanılan rüzgâr türbini için 1.6124×10^5 'dir [Beltran et al, 2008]. Generatör moment kontrolcüsünün izlediği P_{ref} ve T_{opt} eşitlikleri

$$\begin{cases} P_{ref} = T_{opt} \omega_r \\ T_{opt} = k_{opt} \omega_r^2 \end{cases} \quad (4.19)$$

olarak verilmişti. Şekil 4.12'de bu bölümde tasarlanan generatör moment kontrolcüsünün SIMULINK blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.12. Generatör moment kontrolcüsü SIMULINK gösterimi

4.3.2. Kanat Açısı Kontrolcüsü

Tam yük bölgesinde kayan kipli generatör kontrolcüsüne P_{ref} girdisi olarak kısmi yük bölgesinde kullanılan MPPT algoritmasının ürettiği güç değeri kullanılır. MPPT algoritmasının hesapladığı referans güç değeri, nominal türbin gücünde sınırlandırılır. Generatör kontrolcüsüne yardımcı olması amacıyla oransal kanat açısı kontrolcüsü eklenir. Böylelikle kanatlar ve rotor üzerindeki aşırı ve ani yükler azaltılmış olur [Akdoğan ve Engin, 2010]. Kanat açısının değişimi rüzgâr türbininde bir çeşit frenleme mekanizması gibi çalışır. Kanat açısı değiştikçe Şekil 3.6'daki C_p eğrisinden de anlaşılacağı gibi aerodinamik güç katsayısı değişir. Böylelikle (3.18)

numaralı denkleme göre rüzgârdan elde edilen güç azaltılır veya arttırılır. Nominal rotor hızını ω_{nom} , rotor hızı hatasını da ε_ω diye adlandırırsak, rotor hızı hatası

$$\varepsilon_\omega = \omega_{nom} - \omega_r \quad (4.20)$$

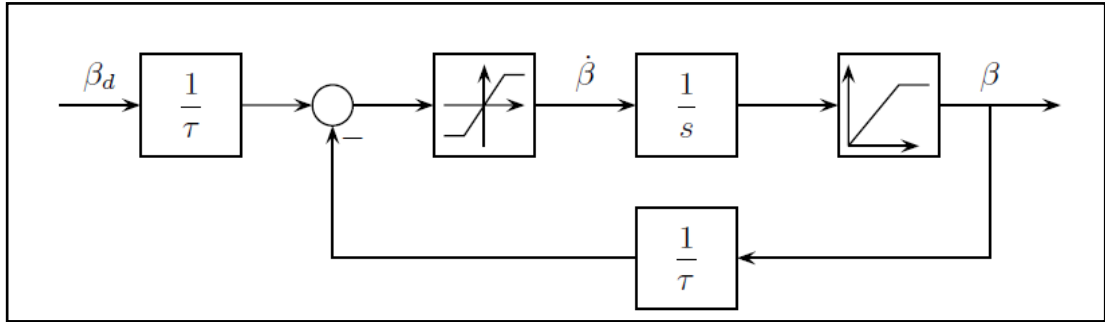
olarak bulunur. Kanat açısı değişimi ve yeni kanat açısı referans değeri

$$\Delta\beta = K\varepsilon_\omega \quad \beta_d = \beta + \Delta\beta \quad (4.21)$$

olarak ifade edilir [Boukhezzar et al,2007]. Rüzgâr türbinlerinde kanat açısı, kanat açısı eyleyicisi olarak çalışan servo motor vasıtasıyla değiştirilir. Kanat açısı eyleyicisinin lineer çalışma bölgesinde dinamik modeli

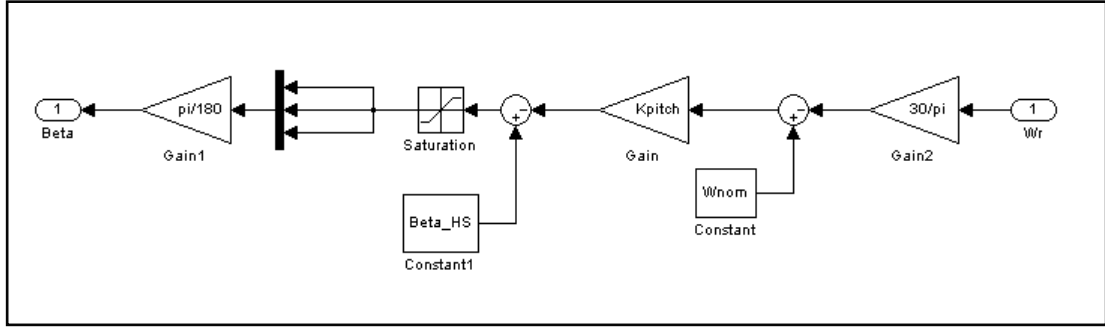
$$\dot{\beta} = -\frac{\beta}{\tau} + \frac{\beta_d}{\tau} \quad (4.22)$$

olarak ifade edilir [Bianchi et al,2007]. Burada τ , kanat açısı eyleyicisi zaman sabitidir, β_d istenilen veya referans kanat açısı, β ise gerçekleşen kanat açısıdır. Şekil 4.13’de kanat açısı eyleyici modeli gösterilmiştir [Bianchi et al, 2007].



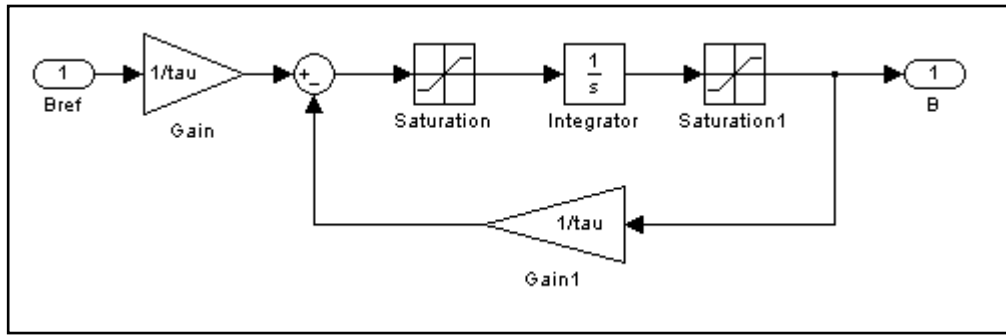
Şekil 4.13. Kanat açısı eyleyici modeli.

Burada kanat açısı değişimi ve kanat açısı belirli aralıklarda sınırlandırılmıştır. (4.21) numaralı eşitlikteki kanat açısı kontrolcüsünün hesapladığı kanat açısı değişimi sınırlandırıldığından kanat açısı eyleyici dinamiği için herhangi bir kontrolcüye gereksinim yoktur. Şekil 4.14’de oransal kanat açısı kontrolcüsü SIMULINK gösterilimi verilmiştir. Kanat açısı kontrolcüsü SIMULINK modeli (4.20) ve (4.21) numaralı eşitliklerin temel SIMULINK blokları ile ifade edilerek oluşturulur.



Şekil 4.14. Kanat açısı kontrolcüsü SIMULINK gösterilimi.

Şekil 4.15’de ise kanat açısı eyleyicisi, dinamik modeli SIMULINK gösterilimi verilmiştir. Bu model (4.22) numaralı eşitlik kullanılarak elde edilmiştir. Burada τ kanat açısı eyleyicisi zaman sabiti, $\frac{1}{s}$ SIMULINK integral operatörüdür.



Şekil 4.15. Kanat açısı eyleyicisi SIMULIK gösterilimi.

4.3.3. ÇBAG Kontrolcüsü

Bölüm 4.2.1’de rüzgâr türbininden maksimum güç elde etmek için tasarlanan generatör moment kontrolcüsü anlatılmıştı. Bu kontrolcünün çıktısı, maksimum güç için gerekli referans generatör moment değerlerini verir. Generatörün bu moment değerlerini vermesi için kontrol edilmesi gerekir. Şekil 4.9’da referans generatör momentini ile generatör momentini ve generatör güç kontrolü arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekil 3.12’de rotor kontrollü ÇBAG asenkron generatör bağlantıları gösterilmiştir. Generatör stator sargıları doğrudan şebekeye bağlanır, rotor sargıları ise konverterler aracılığı ile şebekeye bağlanır. ÇBAG generatörü farklı amaçlar doğrultusunda farklı şekillerde kontrol edilebilir. Bu çalışmadaki ÇBAG kontrol

amacı, maksimum enerjiye karşılık gelen referans generatör momentini takip edecek ÇBAG moment kontrolcüsü tasarlamak ve reaktif gücü sınırlamaktır.

Kontrol edilecek indirgenmiş ÇBAG modeli belirli varsayımlar altında bölüm 3.3.2’de elde edilmiştir. Burada elde edilen $d-q$ eksenlerindeki gerilim, generatör aktif- reaktif güç ve moment eşitlikleri

$$s = \frac{\omega_s - p\omega_g}{\omega_s} \quad (4.23)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_{ss}L_{rr}} \quad (4.24)$$

olmak üzere, indirgenmiş ÇBAG modeli gerilim eşitlikleri:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= 0 \\ v_{qs} &= \psi_s \omega_s = U_s \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} v_{dr} &= R_r i_{dr} + \sigma L_{rr} \frac{di_{dr}}{dt} - s\omega_s \sigma L_{rr} i_{qr} \\ v_{qr} &= R_r i_{qr} + \sigma L_{rr} \frac{di_{qr}}{dt} + s\omega_s \sigma L_{rr} i_{dr} + sL_m \frac{U_s}{L_s} \end{aligned} \quad (4.26)$$

olarak, indirgenmiş ÇBAG modeli aktif-reaktif güç eşitlikleri:

$$\begin{aligned} P_s &= -\frac{3}{2} U_s i_{qr} \frac{L_m}{L_s} \\ Q_s &= \frac{3}{2} U_s (|i_{ms}| - i_{dr}) \frac{L_m}{L_s} \end{aligned} \quad (4.27)$$

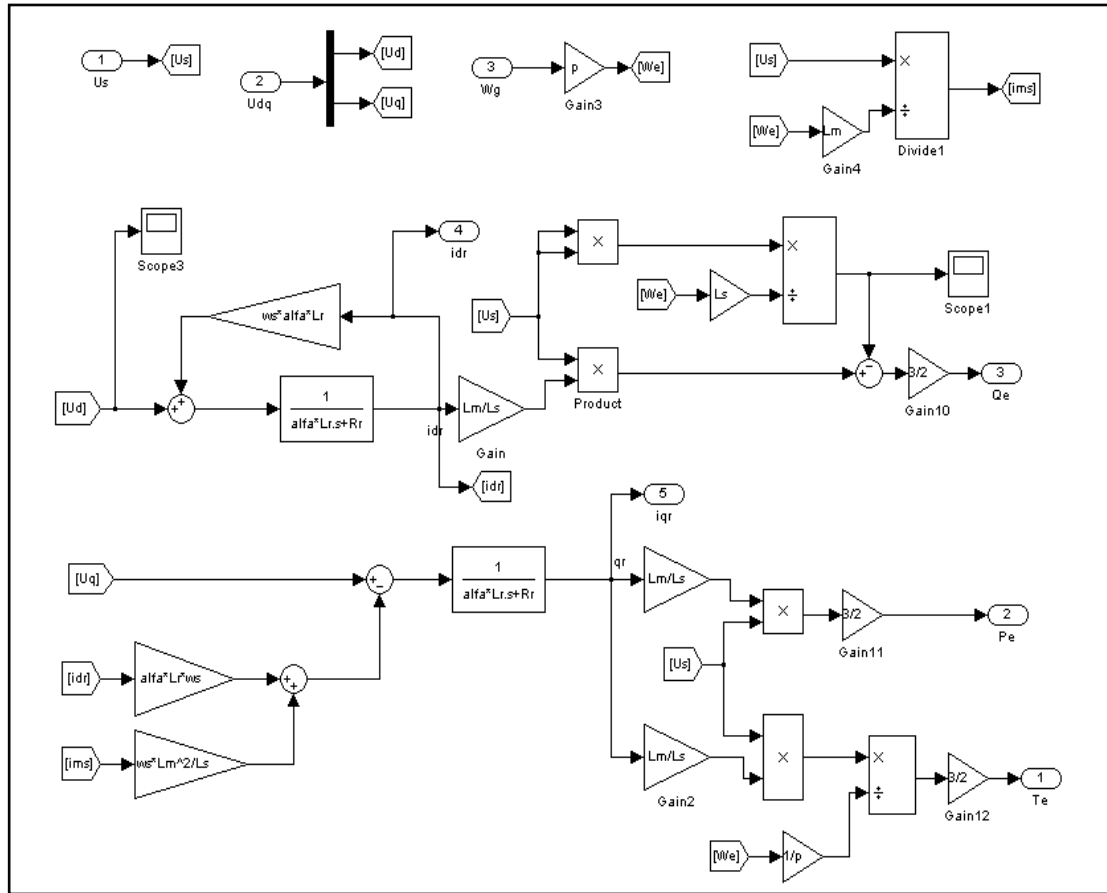
ve indirgenmiş ÇBAG modeli moment eşitliği:

$$T_g = \frac{P_s}{\omega_g} = -\frac{3}{2} U_s i_{qr} \frac{L_m}{\omega_g L_s} \quad (4.28)$$

olarak tekrar ele alınsın. Generatör gücü (4.27) numaralı eşitlikten de anlaşılacağı gibi sabit stator gerilimine ve rotor akımına bağlıdır. Rotor akımı kontrol edilerek aktif ve reaktif güçler kontrol edilebilir. Rotor gerilimleri şebeke geriliminden

tamamen bağımsızdır. Dolayısıyla kontrol girdisi olarak kullanılabilir. Rotor akımları, rotor gerilimleri değiştirilerek kontrol edilir. (4.27) numaralı rotor gerilimi eşitliklerinin her biri, rotor akımının d ve q eksenlerindeki bileşenlerine bağlıdır. Eğer rotor gerilim eşitlikleri sadece d eksenindeki ve q eksenindeki rotor akımlarına bağlı hale getirilirse, rotor gerilimleri ile rotor akımları arasında birinci dereceden lineer bir diferansiyel denklem kurulur. Rotor akımları, dolayısıyla aktif ve reaktif güç, basit bir lineer kontrolcü ile kontrol edilebilir.

Bu çalışmada PI (Proportional Integral) lineer kontrolcüsü kullanılmıştır. Şekil 4.16'da bölüm 3.3.2'de anlatılan aktif reaktif güç kontrolü için indirgenmiş ÇBAG modelinin SIMULINK gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.16. İndirgenmiş ÇBAG modeli.

Rotor gerilimi eşitliklerini, tek bir rotor akımı bileşenine bağlı hale getirmek için İleri Beslemeli Dengeleme (Feed Forward Compansation) yöntemi kullanılır. $d-q$ eksenleri için dengeleme terimleri [Zhao et al, 2009]

$$\begin{aligned} e_{dr} &= +s\omega_s \sigma L_{rr} i_{qr} \\ e_{qr} &= -s\omega_s \sigma L_{rr} i_{dr} - sL_m \frac{U_s}{L_s} \end{aligned} \quad (4.29)$$

olarak yazılır. Burada e_{dr} ve e_{qr} dengeleme terimleridir. Bu dengeleme terimleri (4.26) numaralı rotor gerilimi eşitliklerine eklenirse yeni rotor gerilimi eşitlikleri

$$\begin{aligned} \bar{v}_{dr} &= v_{dr} + e_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_{rr} \frac{di_{dr}}{dt} \\ \bar{v}_{qr} &= v_{dr} + e_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_{rr} \frac{di_{qr}}{dt} \end{aligned} \quad (4.30)$$

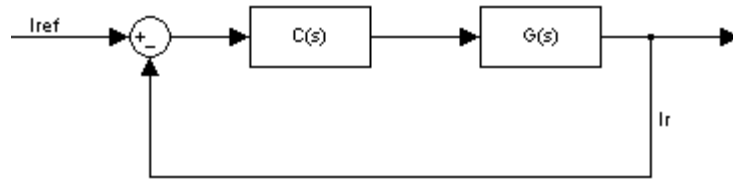
olur. Rotor akımları transfer fonksiyonu:

$$G(s) = \frac{i_{dr}(s)}{\bar{v}_{dr}(s)} = \frac{i_{qr}(s)}{\bar{v}_{qr}(s)} = \frac{1}{R_r + \sigma L_{rr} s} \quad (4.31)$$

biçiminde ifade edilir. PI kontrolcüsünün transfer fonksiyonu [Zhao et al, 2009]

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (4.32)$$

olarak ifade edilir. Şekil 4.17'deki I_{ref} rotor referans akım değerinin $d-q$ eksenindeki bileşenleri, referans aktif ve reaktif generatör güç değerlerinden bulunur.



Şekil 4.17. Rotor akımı kontrol şeması.

Rotor akımlarının kontrolü için oluşturulan kapalı çevrim kontrol döngüsünün transfer fonksiyonu

$$T(s) = \frac{i_r(s)}{i_{ref}(s)} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} \quad (4.33)$$

olarak elde edilir. Burada $T(s)$ rotor akımı kapalı çevrim transfer fonksiyonu, $C(s)$ rotor akımının referans rotor akımını takip etmesini sağlayan PI kontrolcüsü, $G(s)$ ise kontrol edilen rotor akımının transfer fonksiyonudur. Şekil 4.17’de gösterilen PI kontrol, rotor akımının d ve q eksenlerindeki bileşenleri için ayrı ayrı uygulanır. (4.33) numaralı eşitlik $C(s)$ ve $G(s)$ transfer fonksiyonlarının açık halleri kullanılarak düzenlenirse, rotor akımı kapalı çevrim transfer fonksiyonu $T(s)$,

$$T(s) = \frac{\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \left(\frac{1}{R_r + \sigma L_{rr} s}\right)}{1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \left(\frac{1}{R_r + \sigma L_{rr} s}\right)} \quad (4.34)$$

olarak elde edilir. Bu eşitlik düzenlenirse transfer fonksiyonu

$$T(s) = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + \frac{K_p + R_r}{\sigma L_{rr}} s + \frac{K_i}{\sigma L_{rr}}} \quad (4.35)$$

olarak bulunur. Burada kapalı çevrim transfer fonksiyonun iki tane kutbu bir tane de sıfırı olduğu görülür. Sistemin kararlı olabilmesi ve referans rotor akımlarını takip edebilmesi için, transfer fonksiyonunun her iki kutbun da negatif olması gerekmektedir. (4.32) numaralı eşitlikteki PI kontrolcüsünün katsayıları

$$K_p = \frac{\sigma L_{rr}}{\tau}, \quad K_i = \frac{R_r}{\tau} \quad (4.36)$$

olarak seçilirse ve (4.35) numaralı eşitlik PI kontrolcüsü katsayıları ile tekrar düzenlenirse, kapalı çevrim transfer fonksiyonu

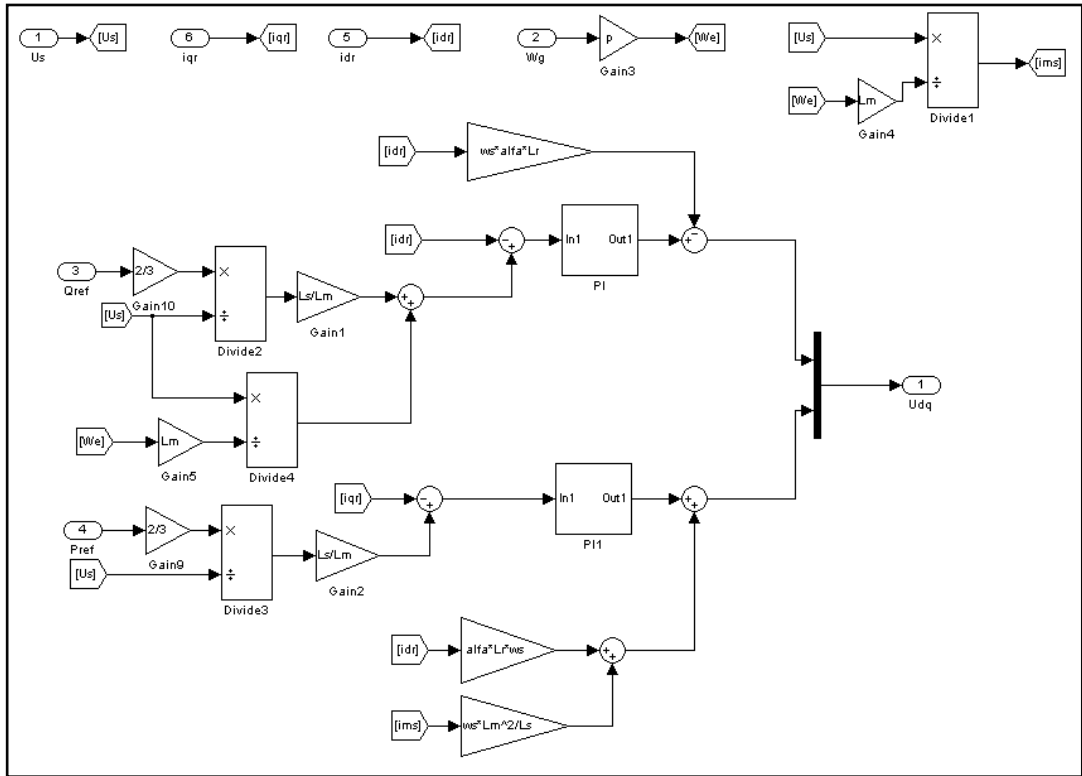
$$T(s) = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + \left(\frac{1}{\tau} + \frac{R_r}{\sigma L_{rr}}\right) s + \frac{R_r}{\tau \sigma L_{rr}}} \quad (4.37)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim transfer fonksiyonunun kutupları

$$s_1 = -\frac{1}{\tau}, \quad s_2 = -\frac{R_r}{\sigma L_{rr}}, \quad \text{eğer } \tau > 0, \quad s_1, s_2 < 0 \quad (4.38)$$

olarak seçilir. Burada τ değeri pozitif seçildiğinde transfer fonksiyonunun kutuplarının her ikisi de negatiftir olur. Böylelikle sistem kararlı olur ve PI kontrolcüsü referans rotor akımını izleme görevini yerine getirir.

Şekil 4.18’de bu bölümde tasarlanan İleri Beslemeli Dengeleme ve PI kontrolcüsünden oluşan ÇBAG güç-moment kontrolcüsünün SIMULINK gösterimi verilmiştir. Bu kontrol modelindeki referans aktif güç değeri, generatör moment kontrolcüsünden gelen referans ÇBAG moment değerinden bulunur. Referans reaktif güç sıfır seçilmiştir.



Şekil 4.18. ÇBAG güç-moment kontrolcüsünün SIMULINK gösterimi.

Tablo 4.1’de simülasyon için kullanılan ÇBAG parametreleri sıralanmıştır [Beltran et al, 2009].

Tablo 4.1. Generatör Parametreleri.

Stator Direnci-Rs	0.005 Ω
Rotor Direnci- Rr	0.0089 Ω
Stator İndüktans-Ls	0.407 mH
Rotor İndüktans-Lr	0.299 mH
Karşılıklı İndüktans-M	0.0016 mH
Kutup Sayısı-p	2
Senkron Frekans -fs	60 Hz
Nominal Güç- Pnom	1.5 MW

5. BENZETİM ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI

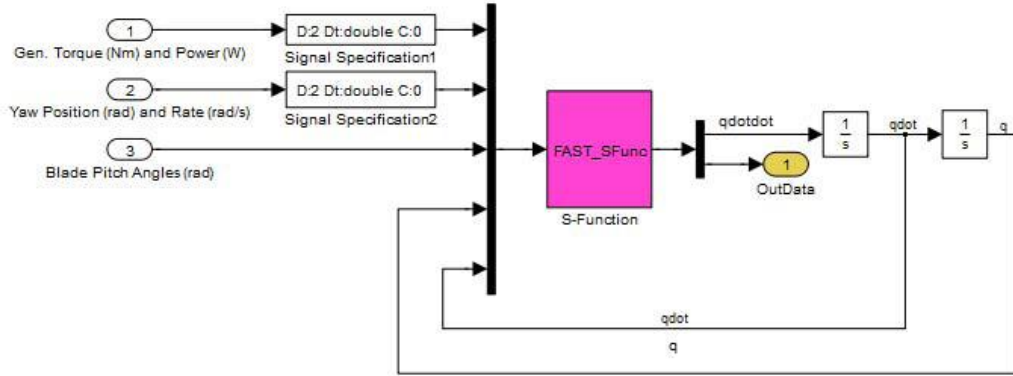
Bu bölümde, bu çalışmada geliştirilen modeller ve kontrolcüler MATLAB-SIMULINK ortamında modellenmiştir. Geliştirilen SIMULINK modeli, Amerikan Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nın (NREL) geliştirdiği WindPact-1.5MW [Manjock, 2005] rüzgâr türbin modeli kullanılarak doğrulanmıştır. Simülasyon rüzgâr türbininin iki farklı çalışma evresi için çalıştırılmıştır.

5.1. FAST ve TURBSIM

FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence) simülatörü Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından, karaya konuşlu yatay eksenli rüzgâr türbinleri için geliştirilmiş sertifikalı bir rüzgâr türbini simülatörüdür. Bu simülatörün açık kaynak kodları açık literatürde mevcuttur [WEB3]. FAST birçok durumun modellenmesini ve kontrolünü mümkün kılmaktadır. FAST sayesinde rüzgâr türbininin kanat açısı kontrolü, generatör moment kontrolü, yüksek hızlı şaft frenleme ve makine dairesi (nacelle/nasel) yönü (sapma açısı) kontrolü yapılabilir. Türbin parametreleri ve kontrol seçenekleri birincil giriş dosyasından girilerek, bir rüzgâr türbini yapılandırılarak kontrol edilebilir. FAST kendi gömülü kontrolcülerini kullanabildiği gibi kullanıcıların tasarladığı kontrolcülerini de kullanabilir. Bunun iki yolu vardır. Birincisi kontrol kodlarının FORTRAN diliyle yazılarak derlenip mevcut MATLAB s-fonksiyonu ile değiştirilmesi, ikincisi ise kontrolcülerin MATLAB-SIMULINK'te tasarlanıp FAST SIMULINK arayüzü yardımıyla modele bağlanmasıdır. FAST SIMULINK arayüzü kullanımı ilk yöntemle göre çok daha kolay ve hızlı bir yöntemdir [Jonkman and Buhl, 2005].

Şekil 5.1'de FAST simülatörü SIMULINK bloğu verilmiştir [Jonkman and Buhl,2005]. FAST SIMULINK türbin modeline kanat açısı, yaw açısı ve değişim hızı, generatör moment ve gücü dışarıdan girdi olarak girilebilir. Bu durumda '.fst' uzantılı kaynak dosyada hangi kontrolün dışarıda kullanıcı tarafından yapılacağı belirtilmelidir. ".fst" uzantılı kaynak dosya ile türbin kontrolü, ilk değerler, generatör modeli, türbin konfigürasyonu, dişli kutusu parametreleri, rüzgâr verisi, kanat verisi, sonuçlar gibi başlıklarda değişiklik ve seçim yapılabilmektedir. FAST ve kullanımı

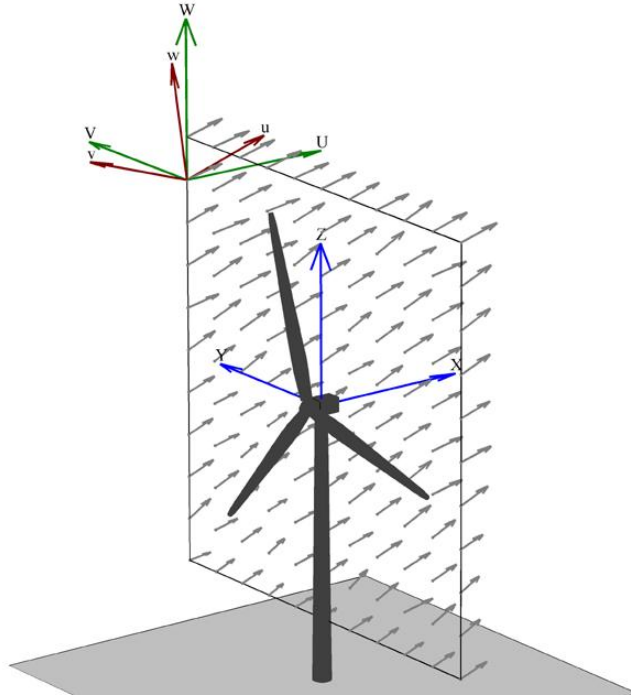
ile ilgili detaylı bilgi kaynakta verilen “FAST user guide” adlı dokümanda bulunabilir [Jonkman and Buhl, 2005].



Şekil 5.1. FAST simülatorü SIMULINK bloğu.

FAST simülatoründe kullanılan rüzgâr verisi yine NREL’in geliştirdiği gerçekçi rüzgâr simülatorü TURBSIM tarafından üretilmiştir. TURBSIM yardımıyla istenilen türbülans yoğunluğunda ve istenilen rüzgâr türbini için gerçekçi rüzgâr verisi oluşturulabilir. TURBSIM tarafından üretilen rüzgâr verisi türbin kanatları üzerindeki etkin rüzgâr verisidir. TURBSIM “.inp” uzantılı bir kaynak dosya kullanır. TURBSIM bu kaynak dosya ile kullanılan rüzgâr türbininin kanat açıklığı, kaç kanatlı olduğu, kule yüksekliği, ortalama rüzgâr hızı, kullanılacak türbülans spektrum modeli gibi bilgiler doğrultusunda istenilen uzunlukta rüzgâr verisi üretir. Bu çalışmada TURBSIM tarafından 1.5 MW’lık FAST Baseline rüzgâr türbin modeli için, 40 saniyelik, 7 ve 15 m/sn hızlarında “Kaimal” türbülans spektrum modeline sahip rüzgâr verileri üretilmiştir. 7 m/sn’lik ortalama hıza sahip rüzgâr verisi, kısmi yük bölgesi simülasyonlarında kullanılmıştır. 15 m/sn’lik ortalama hıza sahip rüzgâr verisi ise tam yük bölgesi simülasyonlarında kullanılmıştır. TURBSIM ve kullanımı ile ilgili detaylı bilgi kaynakta verilen “TURBSIM User’s Guide” adlı dokümandan bulunabilir [Jonkman, 2009]. Şekil 5.2’de rüzgâr türbinine etkiyen rüzgârın türbin kanat düzlemindeki yönlülüğü gösterilmiştir. Burada X,Y,Z rotor düzlemi koordinatları, U,V,W rotor düzlemini referans alan TURBSIM koordinatları, u,v,w ise istenilen rüzgâr yönünü referans alan düzenlenmiş TURBSIM koordinatlarıdır. TURBSIM kullanılarak, belirli bir ortalama rüzgâr hızında, yatay ve

dikey bileşenlere sahip rüzgâr verisi üretmek mümkündür. Bu çalışmada kullanılan rüzgâr verisi türbin kanat düzlemine diktir.



Şekil 5.2. Rüzgâr türbinine etkiyen rüzgâr yönlülüğü.

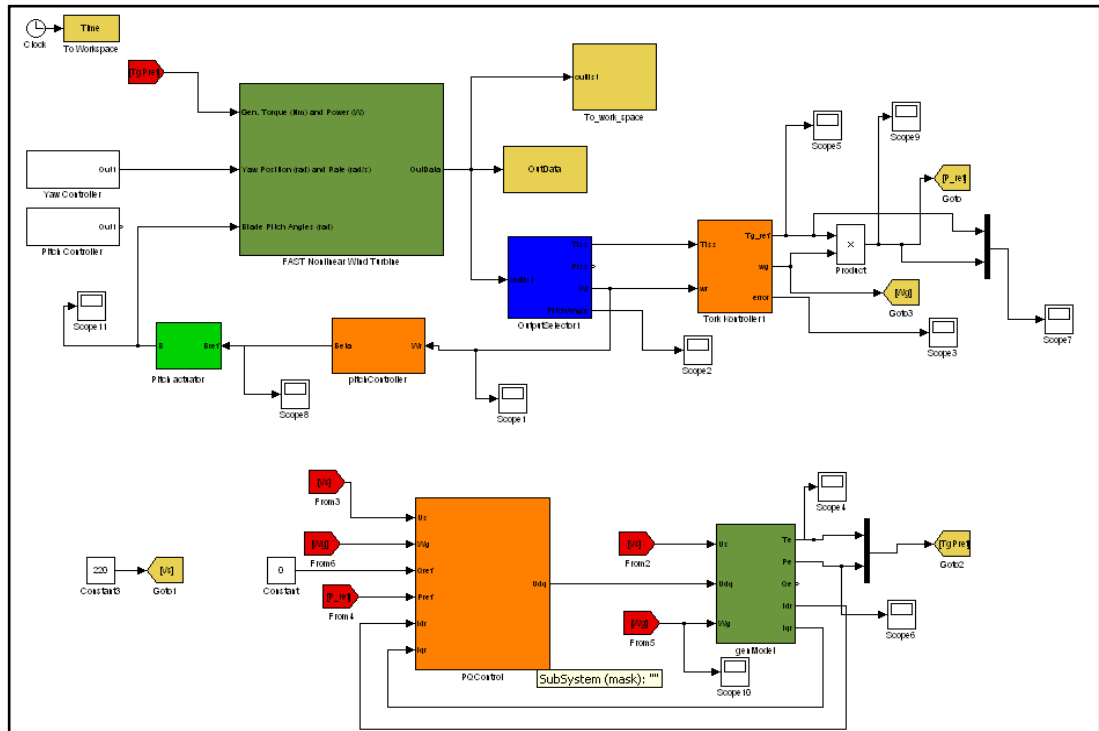
Bu çalışmada tasarlanan kontrolcüler ve geliştirilen modeller 1.5 MW'lık FAST WindPact rüzgâr türbin modeli kullanılarak doğrulanmıştır. Tasarlanan kontrolcüler FAST simülatöründe gömülü olan kontrolcülerle karşılaştırılmıştır. FAST simülatöründe, kanat açısı kontrolcüsü olarak PID (Proportional Integral Differential) kontrolcü kullanılmıştır. Generatör moment kontrolcüsü olarak, rotor hızına karşılık gelen ideal rotor momentini, daha önceden hazırlanmış bir tablodan bulan (*look-up table*) kontrolcü kullanılmıştır.

Tablo 5.1'de kullanılan rüzgâr türbini modelinin parametreleri sıralanmıştır [Beltran et al, 2008]. Türbin kontrol modeli tek kütleli kullanıldığından, Tablo 5.1'de verilen toplam türbin ataleti kullanılmıştır.

Tablo 5.1. Rüzgâr Türbini Parametreleri.

Kanat Sayısı	3
Rotor Çapı	70m
Hub Yüksekliği	84.3m
Nominal Güç	1.5 MW
Türbin Toplam Ataleti	4.4532x10 ⁵ kg m ²
Nominal Generatör Hızı	1800 rpm
Nominal Generatör Momenti	8370 N-m
Dişli Oranı	87.9

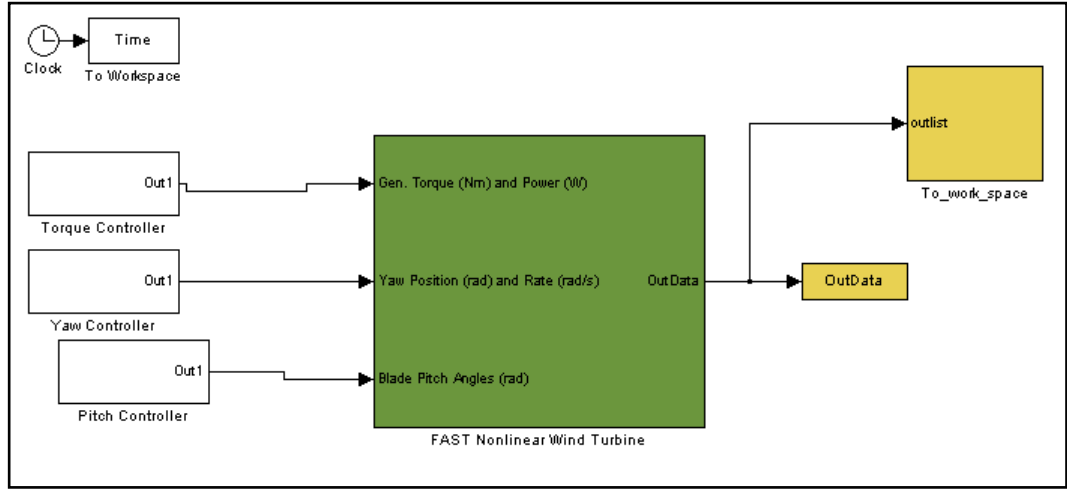
Şekil 5.3’de FAST türbin modeli, generatör moment kontrolcüsü, ÇBAG modeli, ÇBAG kontrolcüsü, oransal kanat açısı kontrolcüsü ve kanat açısı eyleyici modeli kullanılarak oluşturulan bütünleşik rüzgâr türbin ve kontrol modelinin SIMULINK gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.3. Bütünleşik rüzgâr türbin ve kontrol modelinin SIMULINK gösterimi.

Şekil 5.4’de bu çalışmada geliştirilen kontrolcülerin sonuçlarının karşılaştırılacağı FAST modelinin SIMULINK gösterimi verilmiştir. Bu model

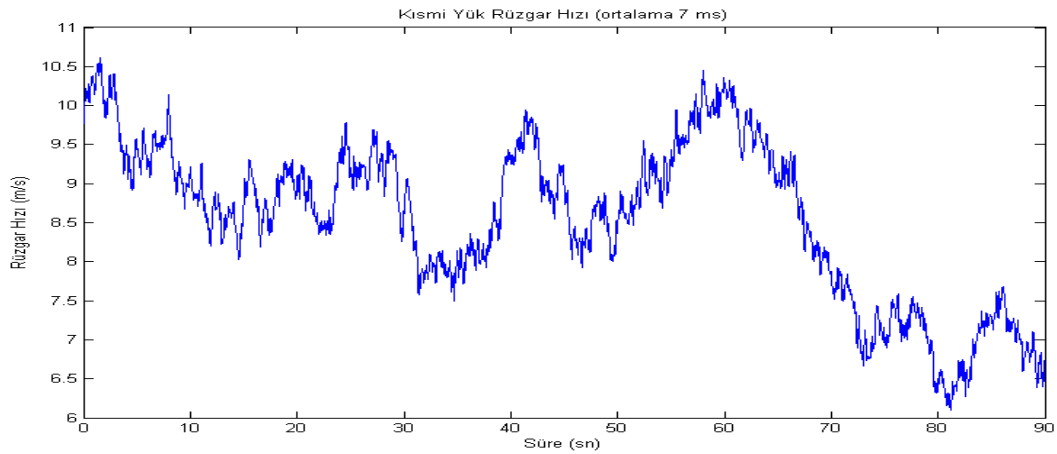
SIMULINK “s-function” özelliği kullanılarak hazırlanmış kanat açısı kontrolcüsü ve generatör moment kontrolcüsünü kullanır.



Şekil 5.4. FAST rüzgâr türbin ve kontrol modeli SIMULINK gösterimi.

5.2. Kısmi Yük Bölgesi Sonuçları

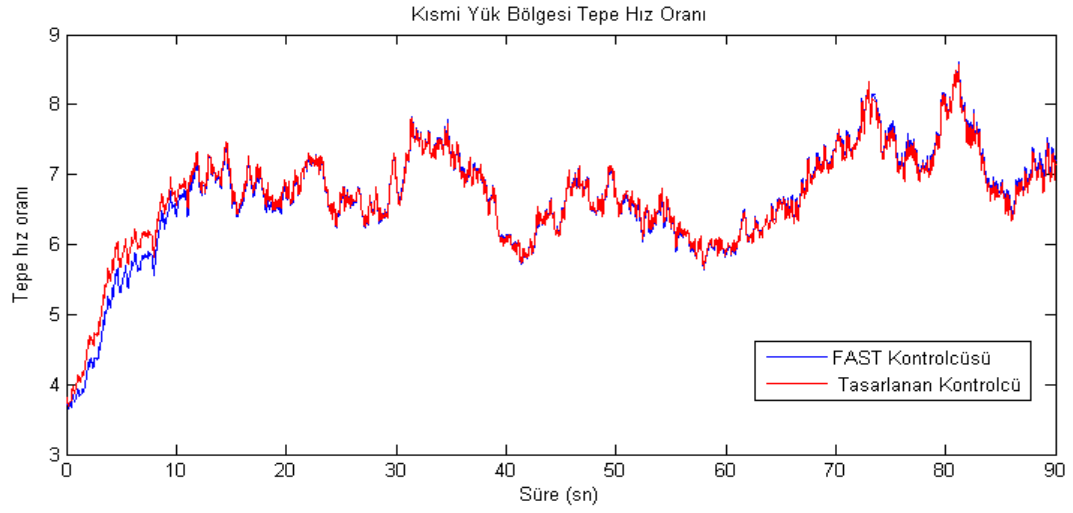
Kısmi yük bölgesinde TURBSIM kullanılarak üretilmiş, Şekil 5.5’deki rüzgâr verisi kullanılmıştır. Kullanılan rüzgârın 10 dakikalık ortalaması 7 m/sn’dir. Bu çalışmada 90 saniyelik rüzgâr verisi kullanılmıştır.



Şekil 5.5. Kısmi yük bölgesi rüzgâr verisi.

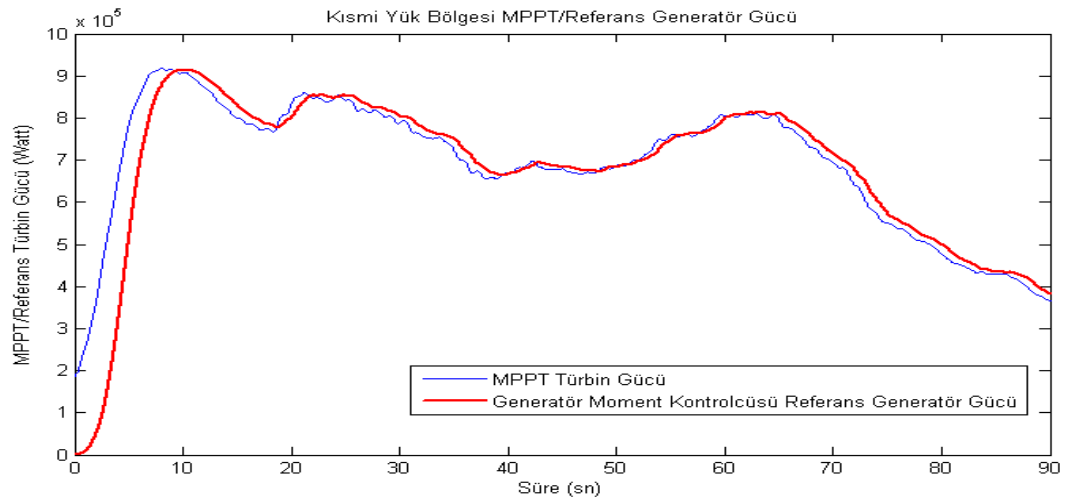
Şekil 5.6’da kısmi yük bölgesindeki tepe hız oranı değişimleri verilmiştir. WindPact 1.5 MW rüzgâr türbini için optimal tepe hız oranı kanat açısı sıfırken

6.5-7 arasındadır. Bu şekilden değişen rüzgâr hızına rağmen tepe hız oranının optimum seviyenin etrafında değiştiği görülür.



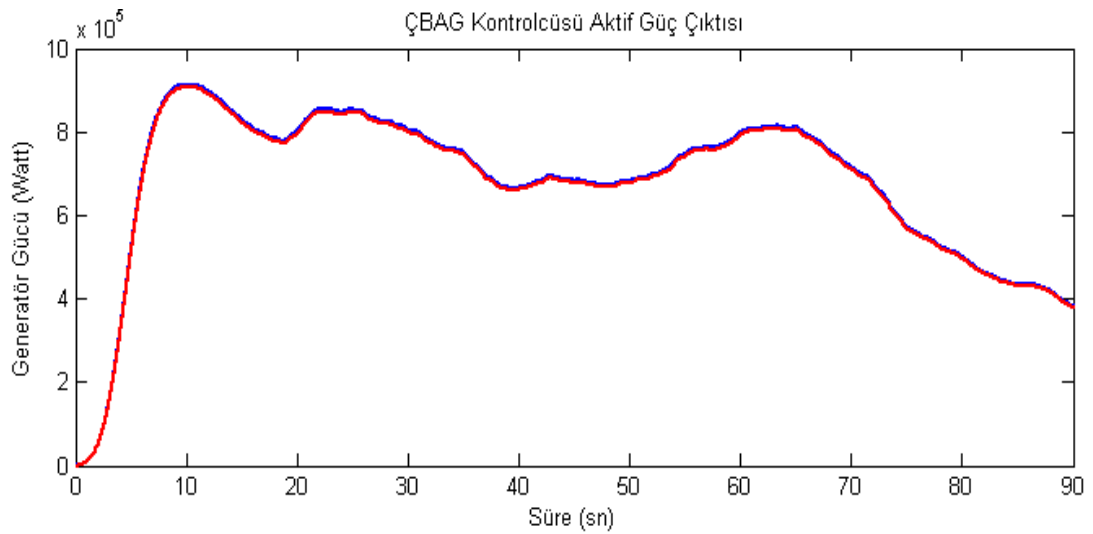
Şekil 5.6. Kısmi yük bölgesi tepe hız oranları.

Şekil 5.7'de generatör moment kontrolcüsünün, Şekil 4.11' deki Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) bloğunun ürettiği optimal türbin gücüne karşılık ürettiği referans ÇBAG gücü verilmiştir. Generatör moment kontrolcüsünün amacı optimal türbin gücünü takip etmek ve buna karşılık gelen referans generatör momentini bulmaktır. Kullanılan generatör moment kontrolcüsünün, performansı ve izleme hatası Şekil 5.7' de görüldüğü gibi oldukça başarılıdır. Generatör moment kontrolcüsü, MPPT optimum güç eğrisini, ani değişimleri sönümlendirerek başarılı bir şekilde izlemiştir



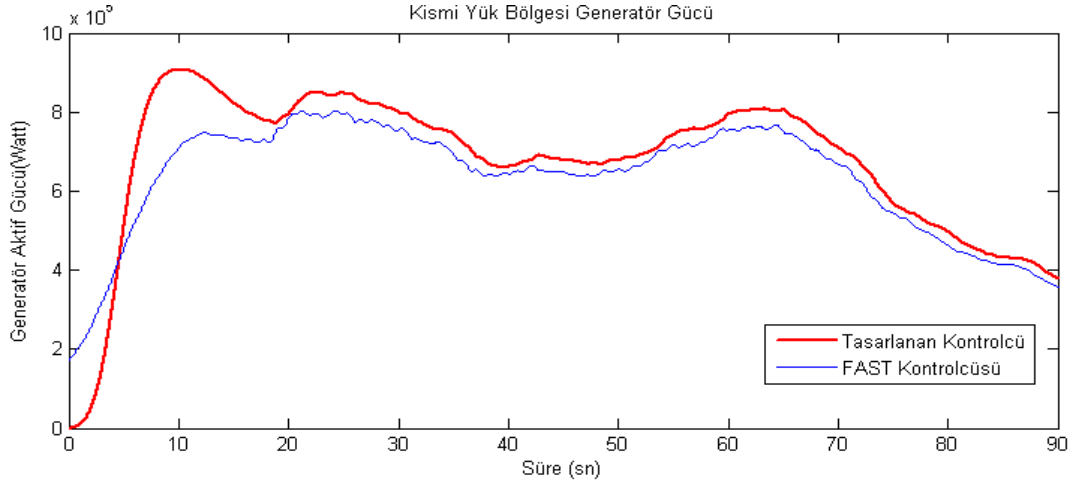
Şekil 5.7. Kısmi yük bölgesi MPPT/Referans generatör gücü.

Şekil 5.8’de generatör moment kontrolcüsünün ürettiği referans moment ve güç değerlerine karşılık ÇBAG ve ÇBAG kontrolcüsü model bloğunun ürettiği güç verileri birlikte verilmiştir. Buna göre ÇBAG aktif güç izleme hatası neredeyse sıfırdır. Tasarlanan ÇBAG kontrolcüsü, indirgenmiş ÇBAG modelini kullanır. Dolayısıyla kontrol problemi lineer bir probleme dönüşür. Tasarlanan PI (Proportional Integral) kontrolcüsü ile referans güç izleme hatası sıfıra yakın bulunur. Tam yük bölgesi için de bu durum değişmeyecektir.



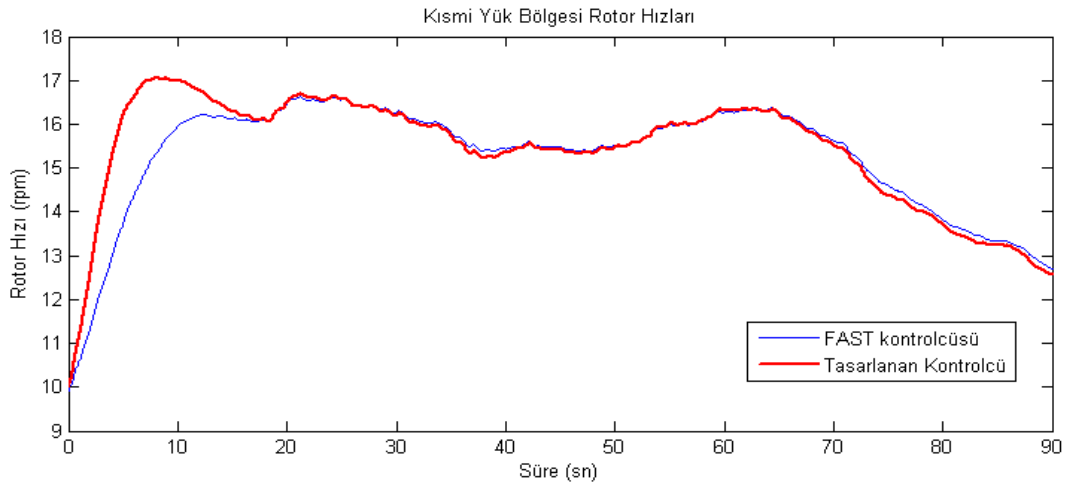
Şekil 5.8. ÇBAG aktif gücü.

Bu simülasyonda üretilen kontrol çıktıları FAST modeli üzerinde tanımlanmış kontrolcülerle karşılaştırılmıştır. FAST modeli üzerinde, WindPact 1.5 MW modeli için tanımlanmış optimum moment-rotor hızı tablosunu kullanılan bir generatör moment kontrolcüsü vardır. Kanat açısı kontrolcüsü olarak da FAST klasöründe bulunan “Pitch.ipt” dosyasında tanımlanmış PID kontrolcüsü kullanılmıştır. FAST üzerinde tanımlanan kontrolcüler NREL tarafından, NREL’in geliştirdiği rüzgâr türbin modeli için sunulduğundan referans kabul edebiliriz. Şekil 5.9’da kısmi yük bölgesi için, tasarlanan kontrolcünün ürettiği generatör gücünün, FAST kontrolcüsünün ürettiğinin üstünde olduğu görülür. Tasarlanan kontrolcünün kısa süreli cevabı, FAST kontrolcüsünden daha iyidir.



Şekil 5.9. Kısmi yük bölgesi generatör güçleri.

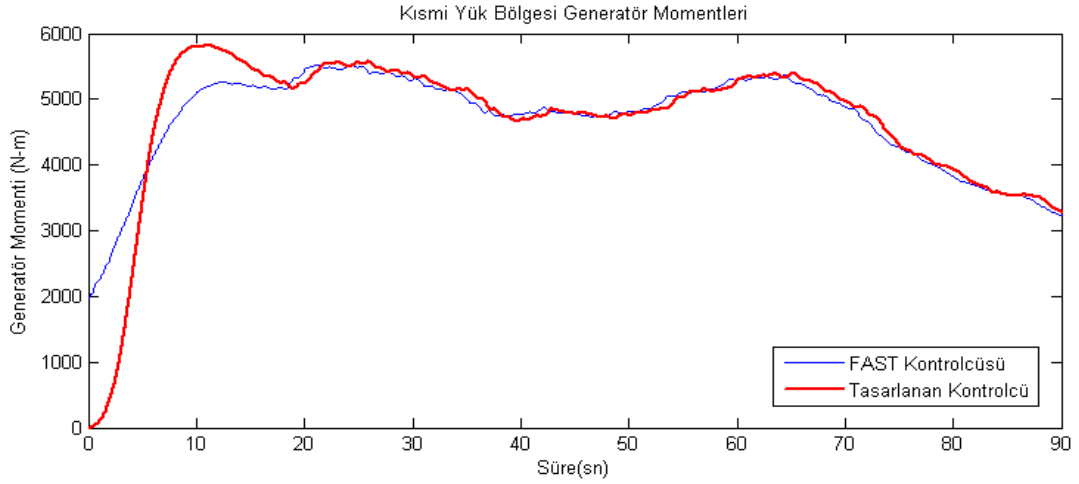
Şekil 5.10’da her iki kontrolcünün ürettiği rotor hızları birlikte gösterilmiştir. Buna göre kontrolcü cevapları bir birine çok yakındır. Rotor hızında ani değişimler gözlenmez. Generatör moment kontrolcüsü rotor hızını optimum güç elde edecek şekilde değiştirir.



Şekil 5.10. Kısmi yük bölgesi rotor hızları.

Şekil 5.11’de her iki kontrolcünün ürettiği generatör momentleri birbirine yakındır. FAST kontrolcüsü optimum moment değerlerini tablodan okumaktadır. Bu çalışmada tasarlanan kayan kipli kontrolcü sistem bilinmezlerine rağmen, referans generatör momentini ve rotor hızını optimum güç elde edecek şekilde kontrol eder. Kısmi yük bölgesi sonuçları FAST kontrolcüsü sonuçlarına oldukça yakındır. FAST kontrolcüsü WindPact 1.5 MW türbininin optimum moment-rotor hızı tablosunu kullandığından, tasarlanan kontrolcünün sonuçları sistem bilinmezlerine rağmen

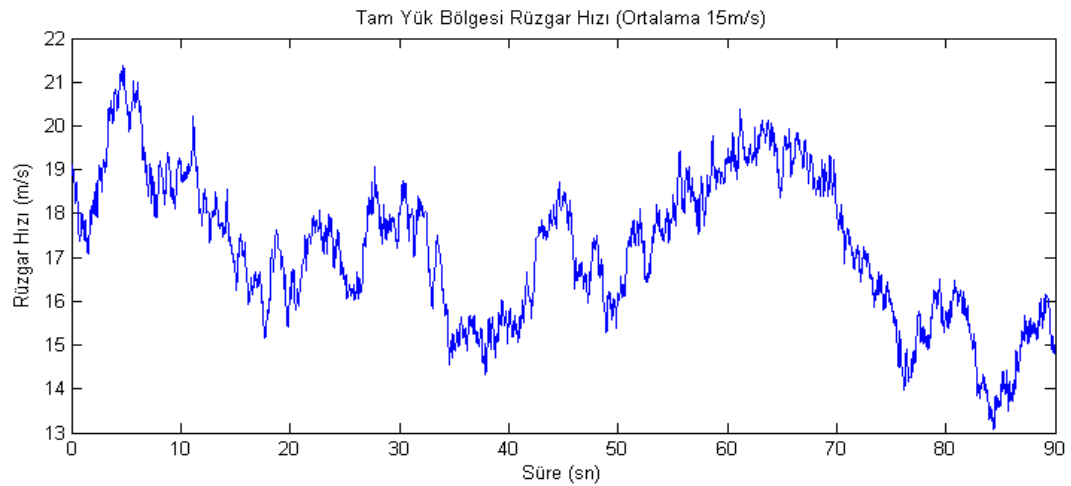
başarılıdır. Ayrıca kayan kipli kontrolcünün kullandığı işaret fonksiyonu değiştirilerek, kontrolcü çıktısının aşırı salınım yapması engellenmiştir.



Şekil 5.11. Kısmi yük bölgesi generatör momentleri.

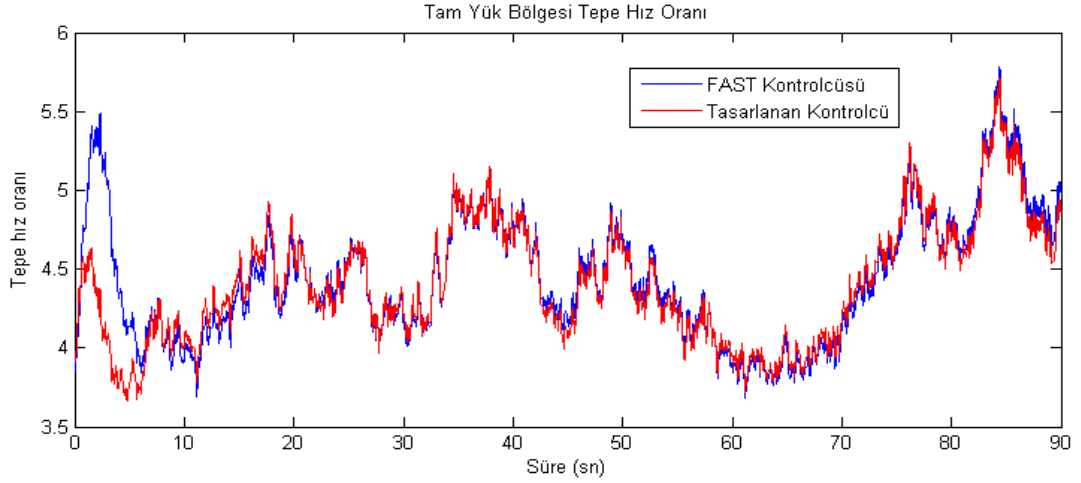
5.3. Tam Yük Bölgesi Sonuçları

Tam yük bölgesinde TURBSIM kullanılarak üretilen Şekil 5.12'deki rüzgâr verisi kullanılmıştır. Kullanılan rüzgârın 10 dakikalık ortalaması 15 m/sn 'dir. Tam yük bölgesi simülasyonunda 90 saniyelik rüzgâr verisi kullanılmıştır.



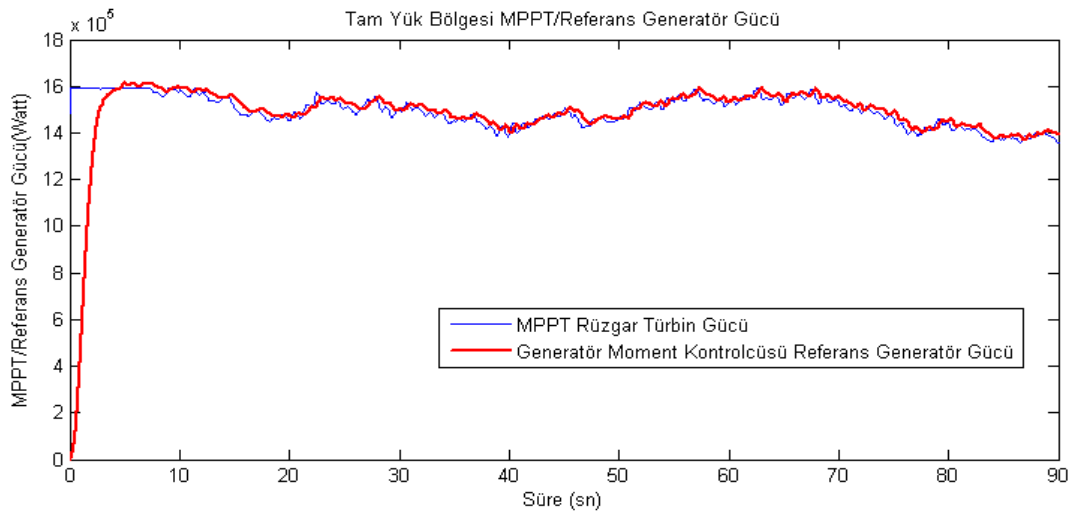
Şekil 5.12. Tam yük bölgesi rüzgâr hızı.

Şekil 5.13'de tam yük bölgesindeki tepe hız oranı değişimleri verilmiştir. Tam yük bölgesinde rüzgârdan alınan enerjinin sınırlandırılması için tepe oranı optimal seviyenin altında tutulur. Türbin güç katsayısı düşürülür.



Şekil 5.13. Tam yük bölgesi tepe hız oranları.

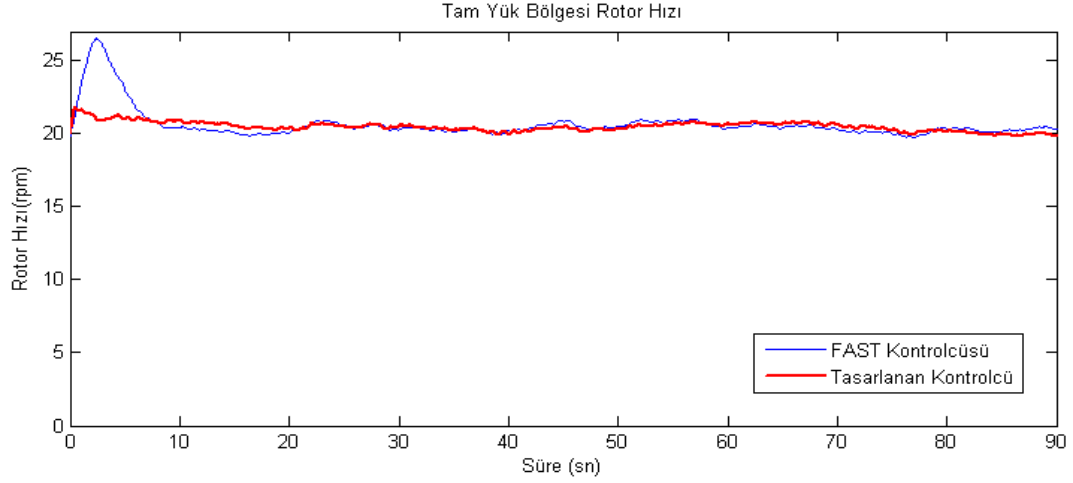
Şekil 5.14’de tam yük bölgesi için Şekil 4.11’deki MPPT bloğunun ürettiği optimal türbin gücüne karşılık, generatör moment kontrolcüsünün ürettiği referans ÇBAG gücü verilmiştir. Generatör moment kontrolcüsünün amacı optimal türbin gücünü takip etmek ve buna karşılık gelen referans generatör momentini bulmaktır. Kullanılan generatör moment kontrolcüsü, kanat açısı kontrolcüsü yardımıyla, tam yük bölgesinde de başarılıdır.



Şekil 5.14. Tam yük bölgesi MPPT/Referans generatör gücü.

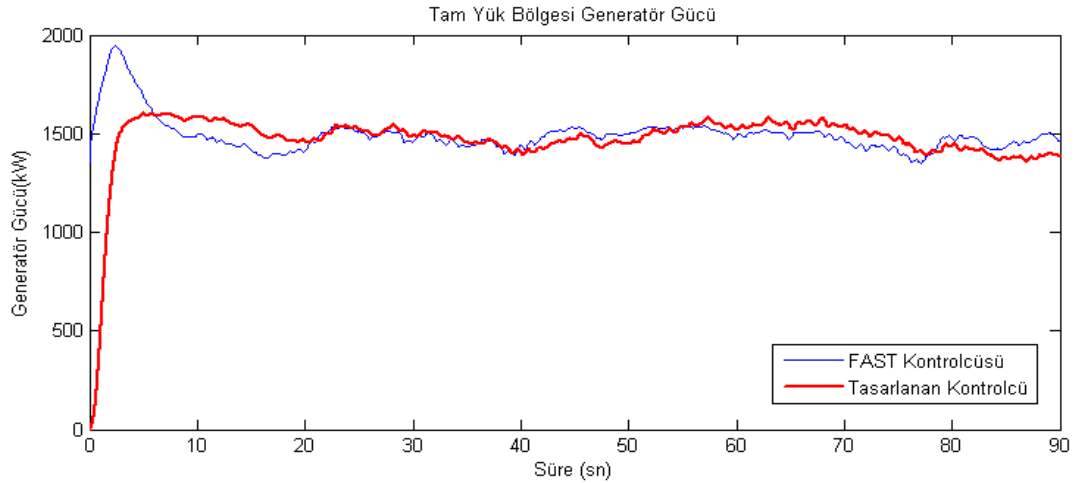
Şekil 5.15’de tam yük bölgesi için FAST kontrolcüsünün ve tasarlanan kontrolcünün ürettiği rotor hızları gösterilmiştir. Tam yük bölgesinde tasarlanan kontrolcüsün rotor hızı kontrol başarımı FAST kontrolcüsünden daha iyidir. Tasarlanan kontrolcü çok daha hızlı bir şekilde kararlı hale gelmiştir. Rüzgâr

hızındaki ani değişimlere karşı tasarlanan kontrolcü oldukça başarılıdır. Simülasyon boyunca rotor hızı nominal hızın altında kalmıştır. Böylelikle türbin rotordan kaynaklı aşırı yüklerden korunmuştur.



Şekil 5.15. Tam yük bölgesi rotor hızları.

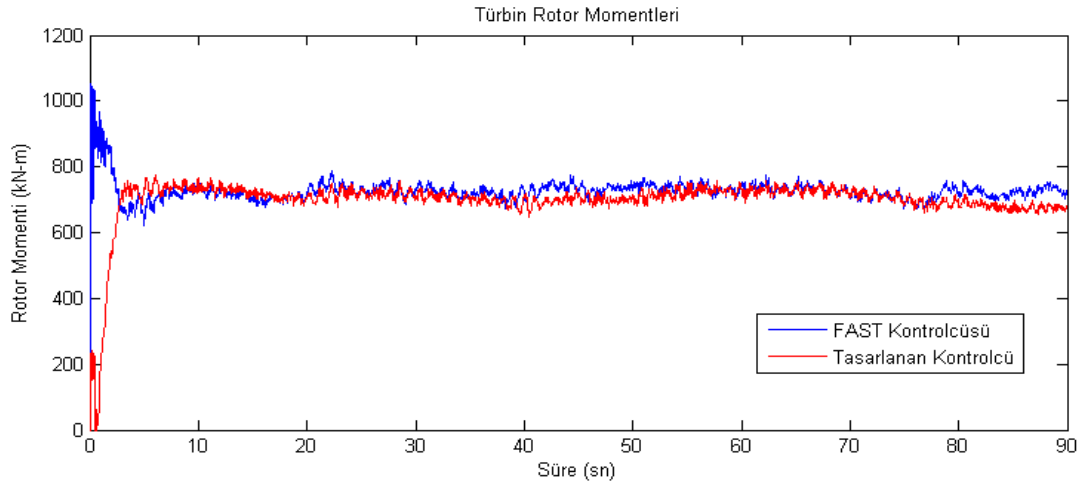
Şekil 5.16'da tam yük bölgesi için FAST kontrolcüsünün ve tasarlanan kontrolcünün ürettiği generatör güçleri verilmiştir. Dolayısıyla bu iki kontrolcü kararlı durum için karşılaştırılmalıdır. Kararlı durumda her iki kontrolcünün generatör gücü çıktılarının, nominal türbin gücü seviyesinde kaldığı görülür.



Şekil 5.16. Tam yük bölgesi generatör gücü.

Şekil 5.17'de tam yük bölgesi için FAST kontrolcüsünün ve tasarlanan kontrolcünün ürettiği rotor momentleri verilmiştir. Tasarlanan kontrolcünün kısa süreli (transient) cevabının FAST kontrolcüsünden daha iyi olduğu görülür.

Tasarlanan kontrolcü rotor momentini dolayısıyla generatör şaftına aktarılan momenti nominal değerinde tutmayı başarmıştır.



Şekil 5.17. Tam yük bölgesi rotor momentini.

Tasarlanan kontrolcü rüzgârdaki değişimlere göre daha hızlı ve dayanıklıdır. Sistem bilinmeyenlerine rağmen tasarlanan kontrolcü tam yük bölgesinde, kararlı durumlarda FAST kontrolcüsü yakın sonuçlar vermiştir. Tasarlanan kontrolcünün kısa süreli cevabı FAST kontrolcüsünden daha iyidir. Tam yük bölgesinde kayan kipli kontrolcü ile kanat açısı kontrolcüsü başarılı sonuçlar vermiştir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, rüzgâr türbinleri ve rüzgâr enerjisi, rüzgâr türbini ve rüzgâr modellenmesi, rüzgâr türbini kontrol stratejileri ve kontrolü, rüzgâr türbini simülasyon araçları konularına değinilmiştir. Rüzgâr türbini ve bileşenleri modellenmiş farklı çalışma bölgeleri için generatör moment, kanat açısı ve ÇBAG güç kontrolcülerini önerilmiştir. Ayrıca kanat açısı eyleyici dinamik modeli kullanılmıştır. Tasarlanan modeller ve kontrolcüler NREL'in geliştirmiş olduğu açık kodlu FAST rüzgâr türbin simülasyon modeli kullanılarak test edilip doğrulanmıştır. Simülasyonlar, rüzgâr türbininin çalışma evreleri olan kısmi yük bölgesinde ve tam yük bölgesinde çalıştırılmıştır. Kısmi yük bölgesinde kayan kipli moment kontrolcüsü, tam yük bölgesinde ise kayan kipli kontrolcü ile birlikte çalışan oransal kanat açısı kontrolcüsü önerilmiştir. Bu çalışmada tam yük bölgesinde kanat açısı kontrolcüsü yanında generatör moment kontrolcüsü kullanılmıştır. Bu iki kontrolcüyü birlikte kullanarak, kanat açısı için basit bir oransal kontrolcü ile başarılı sonuçlar alınmıştır. FAST'ın kendi kontrolcüsü, tam yük bölgesinde lineerleştirilmiş türbin modelini kullanarak geliştirilmiş olan PID kanat açısı kontrolcüsü kullanılmaktadır. Bu çalışmadaki yaklaşımla kanat açısı kontrolcüsü basitleştirilmiştir. Tam yük bölgesinde ayrı bir generatör moment kontrolcüsüne gerek kalmadığından, yük bölgeleri aralarındaki geçişlerde yaşanan anahtarlama sorunu minimuma indirilmiştir. Simülasyon sonuçlarından anlaşıacağı gibi her iki bölgede de önerilen kontrolcüler FAST kontrolcüsü ile benzer veya daha iyi sonuçlar vermiştir. Tasarlanan generatör moment kontrolcüsünün gürbüz (dayanıklı) olma özelliğinden dolayı, sistem bilinmeyenlerine ve değişken rüzgâr hızına rağmen, rüzgâr türbini kararlılığını yitirmemiştir. Ayrıca tasarlanan kontrolcü tam yük bölgesinde rotor momentini nominal değerin altında tutarak türbini aşırı yüklenmelerden korumuştur. Tasarlanan kontrolcünün güç verimi de her iki çalışma bölgesinde başarılıdır. Kısmi yük bölgesinde ise üretilen güç, referans optimum gücü takip etmektedir. Tam yük bölgesinde üretilen güç nominal güce yakındır. Sonuç olarak önerilen kontrolcünün, rüzgâr türbini güç verimliliği ve elde edilen gücün regülasyonu konularında başarılı olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada ayrıca ÇBAG aktif-reaktif güç kontrolü amaçlı belirli varsayımlar altında modellenmiştir. ÇBAG kontrolü ile referans generatör momentini izleyen aktif-reaktif güç kontrolü gerçekleştirilmiştir. ÇBAG kontrolcüsünde İleri Beslemeli Dengeleme (Feed Forward Compensation) yöntemi kullanılarak $d-q$ eksenlerindeki rotor gerilimleri, birinci dereceden rotor akımlarına bağlı lineer diferansiyel denklemlere dönüştürülmüşlerdir (decoupling). Elde edilen birinci dereceden lineer diferansiyel denklemler PI kontrol metodu kullanılarak kontrol edilmiştir. Sistem tamamen lineerleştirildiğinden ÇBAG kontrolcüsünün referans moment izleme hatası sıfıra yakındır. Sistem bilinmeyenleri bu hatanın artmasına sebep olabilir. Bundan dolayı ÇBAG parametreleri doğru bir şekilde ölçülmelidir.

Bu çalışma ile rüzgâr türbini, kontrolü ve simülasyon araçları konusunda bilgi ve tecrübe edinmek, edinilen bilgi ve tecrübeyi konunun ilgilileri ile paylaşmak amaçlanmıştır. Bundan sonraki çalışma olarak geliştirilen simülasyon ortamını kullanarak farklı, kontrolcü grupları tasarlanıp performansları test edilebilir. Ayrıca tasarlanan kontrolcüler Döngüde Donanım (Hardware in Loop) simülasyon tekniği kullanılarak gerçek zamanlı denenebilir.

Bu tez kapsamında geliştirilen simülasyon ortamı oldukça esnektir. Farklı kontrol yöntemlerinin denenmesine ve performans karşılaştırmalarına kolaylıkla imkân verir. Ayrıca farklı güç ve tipteki generatör modellerinin de denenmesi mümkündür.

KAYNAKLAR

- Ş. Akdoğan, Ş. N. Engin, (2010), “*Değişken Hızlı Değişken Kanat Açılı Rüzgâr Türbin Kontrolü*”, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Eylül, pp. 128-132, Gebze, Türkiye
- B. Beltran, T. Ahmed-Ali, M. H. Benbouzid, (2008), “*Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion systems*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 2, pp. 551 - 558
- B. Beltran, T. Ahmed-Ali, M. H. Benbouzid, (2009), “*High-order sliding mode control of a DFIG-based wind turbine for power maximization and grid fault tolerance*”, Electric Machines and Drivers Conference, Mayıs, pp. 183-189 Miami, Florida, United States of America.
- F.D. Bianchi, H. De Battista, R. J. Mantz, (2007), “*Wind Turbine Control Systems*”, Springer-Verlag London Limited, Germany
- B. Boukhezzar, L. Lupu, H. Siguerdidjane, M. Hand, (2007), “*Multivariable control strategy for variable speed variable pitch wind turbine*”, Renewable Energy, vol. 32, no. 8, pp. 1273-1287.
- B. Boukhezzar, H. Siguerdidjane, (2009), “*Nonlinear control with wind estimation of a DFIG variable speed wind turbine for power capture optimization*”, Energy Conversion and Management, vol. 50, no. 4, pp. 885-892.
- T. Esbensen, B.T. Jensen, M.O. Niss, C. Sloth , (2008), “*Joint power and speed control of wind turbines*”, Technical Report, No:120, Aalborg University.
- İ. İ. Güneş, (2006), “*Bir Rüzgâr Türbininin Modellenmesi, Simülasyonu ve Kontrolü*”, Enerji Sistemleri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze.
- J. M. Jonkman, M. L. Buhl, (2005), “*FAST User's Guide*”, National Renewable Energy Lab. NREL/EL-500-29798 Golden, Colorado, United States of America.
- B. J. Jonkman, (2009), “*TURBSIM User's Guide: Version 1.50*”, Technical Report NREL/TP-500-46198, Golden, Colorado, United States of America.
- H. K. Khalil, (2001), “*Nonlinear Systems*”, MacMillan, New York, United States of America.
- P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, (2002), “*Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*”, John Wiley & Sons Limited. New Jersey, United States of America.
- Z. Mahi, C. Serban, H. Siguerdidjane, (2007), “*Direct torque control of a doubly-fed induction generator of a variable speed wind turbine power regulation*”, European Wind Energy Conference and Exhibition, Mayıs, pp. 1-7, Milan, Italy.

A. Manjock, (2005), “*Design Codes FAST and ADAMS for load calculations of onshore wind turbines*”, Germanischer LloydWindEnergie GmbH, Hamburg, Germany.

J. F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers, (2002), “*Wind Energy Explained*”, John Wiley & Sons Limited, West Sussex, England.

I. Munteanu, A. I. B. Nicolaos, A. Cutululis, E. Ceang ,(2008),“*Optimal Control of Wind Energy Systems*”, Springer-Verlag London Limited, Girona, Spain.

C. Nichita, D. Luca, B. Dakyo, and E. Ceanga, (2002), “*Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, no. 4, pp. 523-529

M. Tanrıöven, (2010), “*Rüzgâr ve Güneş Enerjili Güç Sistemleri- Ders Notları*”, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi.

H. Zhang, Z. Wang, (2009), “*Study on modeling and simulation of double-fed induction wind power generator control system*”, Sustainable Power Generation and Supply, Nisan, pp. 1-5, Nanjing, China.

Y. Zhao, X.D. Zou, Y.N. Xu, Y. Kang, J.Chen, (2006), “*Maximal power point tracking under speed-mode control for wind energy generation system with doubly fed induction generator*”, The International Power Electronics and Motion Control Conference, Agustos, pp 1-5,Beijing, China.

The MathWorks, (2007), MATLAB 7.4.0 and Simulink for Technical Computing, Simpower Toolbox Help Files, Wind Turbines.

[WEB1] Elektrik İşleri Etüt İdaresi:

http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_index.html

[WEB2] <http://www.teknikhayat.com/enerji/ruzgar-enerjisi2/>

[WEB3] FAST dizayn kodları linki:

<http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/fast/>

ÖZGEÇMİŞ

Şevket Akdoğan, 1978 yılında İstanbul Bakırköy’de doğdu. İlk orta ve lise öğrenimini İstanbul Güneşli’de tamamladı. Üniversite öğrenimini Orta Doğu Teknik Üniversitesi(ODTÜ) Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamladı. 2006 yılında bir buçuk yıl çalıştığı NORTEL NETWORKS NETAŞ tan ayrılarak TÜBİTAK Gebze yerleşkesinde bulunan TÜBİTAK-Bilişim Teknolojileri Enstitüsünde çalışmaya başladı. Halen TÜBİTAK-Bilişim Teknolojileri Enstitüsünde uzman araştırmacı olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.