İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞKEN HIZLI DEĞİŞKEN AÇILI RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Handan NAK

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

OCAK 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞKEN HIZLI DEĞİŞKEN AÇILI RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Handan NAK
(504101114)

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ali Fuat ERGENÇ

OCAK 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504101114 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Handan NAK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"DEĞİŞKEN HIZLI DEĞİŞKEN AÇILI RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN KONTROLÜ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Yrd. Doç. Dr. Ali Fuat ERGENÇ** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Ata MUĞAN İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **17 Aralık 2012**
Savunma Tarihi : **21 Ocak 2013**

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimi yöneten, tüm tecrübesi ve deneyimlerini benimle paylaşmaktan çekinmeyen, olumlu eleştirileri ve önerileri ile çalışmalarımda büyük emeği olan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ali Fuat ERGENÇ'e ve destek ve anlayışlarıyla çalışmam boyunca yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.
Son olarak yüksek lisans eğitimim boyunca sağladıkları maddi destek nedeniyle Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na çok teşekkür ediyorum.

Aralık 2012

Handan Nak
(Kontrol Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Rüzgâr Enerjisi 2
1.2 Dünyada ve Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi 4
2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ **9**
2.1 Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması 9
2.2 Rüzgâr Türbini Elemanları 10
3. RÜZGÂR TÜRBİNİ AERODİNAMİĞİ **13**
3.1 Eyleyici Disk Modeli 13
3.2 Kanat Elemanı Teorisi 16
3.3 Rüzgâr Türbininin Verimi 18
4. RÜZGÂR TÜRBİNİ KONTROL SİSTEMLERİ **21**
4.1 Kontrol Amaçları 21
4.2 Sistem Genel Kontrolü 21
4.3 Aerodinamik Güç Kontrolü 22
4.3.1 Pasif durdurma kontrolü (Passive stall control) 23
4.3.2 Pasif kanat açısı kontrolü (Passive pitch control) 24
4.3.3 Aktif kanat açısı kontrolü (Active pitch control) 24
4.3.4 Aktif durdurma kontrolü (Active stall control) 24
4.3.5 Yön açısı kontrolü (Yaw control) 25
4.4 Kontrol Stratejileri 26
4.4.1 Sabit hızlı sabit kanat açılı rüzgâr türbini 26
4.4.2 Sabit hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbini 28
4.4.3 Değişken hızlı sabit kanat açılı rüzgâr türbini 29
4.4.4 Değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbini 31
5. DEĞİŞKEN HIZLI DEĞİŞKEN KANAT AÇILI BİR RÜZGÂR TÜRBİNİNİN MODELLENMESİ VE KONTROLÜ **33**
5.1 Rüzgâr Türbininin Modellenmesi 33
5.1.1 Aerodinamik model 34
5.1.2 Mekanik model 36
5.1.3 Elektriksel model 39
5.1.3.1 Çift beslemeli asenkron generatörün matematiksel modeli 40
5.1.3.2 dq eksen takımı dönüşümü 44
5.1.3.3 dq eksen takımı modeli 45
5.1.4 Kanat açısı eyleyicisi modeli 49

5.1.5 Kontrol sistemi 50
5.2 Rüzgâr Türbininin Kontrolü 50
5.2.1 Kanat açısı kontrolü 53
5.2.2 Generatör güç kontrolü 54
6. BENZETİM ÇALIŞMALARI 57
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 69
KAYNAKLAR 71
ÖZGEÇMİŞ 75

KISALTMALAR

ÇBAG **:** Çift Beslemeli Asenkron Generatör
DHDK **:** Değişken Hız Değişken Kanat
DHSK **:** Değişken Hız Sabit Kanat
SHDK **:** Sabit Hız Değişken Kanat
SHSK **:** Sabit Hız Sabit Kanat

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : Mekanik model parametreleri. 39
Çizelge 5.2 : Generatör parametreleri. 48
Çizelge 5.3 : Rüzgâr türbini parametreleri. 53

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Küresel kümülatif rüzgâr kurulu gücü (1996-2012 Haziran) [7]. 4
Şekil 1.2 : Ülkeler bazında toplam rüzgâr kurulu gücü (2012 Haziran) [7]. 5
Şekil 1.3 : Türkiye'deki rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre dağılımı (1988-2011) [10]..... 6
Şekil 1.4 : İşletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından illere göre dağılımı (2012 Şubat) [10]. 6
Şekil 1.5 : İşletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre dağılımı (2012 Şubat) [10]. 7
Şekil 2.1 : Rüzgâr türbininin basitleştirilmiş gösterimi. 9
Şekil 2.2 : Yatay ve düşey eksenli rüzgâr türbinleri. 9
Şekil 2.3 : Yatay eksenli rüzgâr türbininin temel parçaları [12]..... 11
Şekil 3.1 : Eyleyici disk modeli [13]. 14
Şekil 3.2 : Kanat kesiti üzerindeki kuvvetler [13]. 17
Şekil 3.3 : Üç kanatlı sabit kanat açılı modern bir türbinin $C_p - \lambda$ eğrisi [13]. 19
Şekil 3.4 : Üç kanatlı değişken kanat açılı modern bir türbinin C_p katsayısının λ ve β'ya göre değişimi [13]. 19
Şekil 4.1 : Sistem genel kontrolü. 22
Şekil 4.2 : Rüzgâr türbini ideal güç eğrisi. 23
Şekil 4.3 : Aktif kanat açısı kontrollü ve aktif durdurma (stall) kontrollü rüzgâr türbinlerinde güç kontrolü için gerekli kanat açıları. 25
Şekil 4.4 : Doğrudan şebekeye bağlı sincap kafesli asenkron generatör. 26
Şekil 4.5 : SH-SK açılı rüzgâr türbini moment-hız grafiği [14]. 27
Şekil 4.6 : SH-SK açılı türbinin (a) çıkış gücü (b) maksimum güç katsayısı [14]. ... 27
Şekil 4.7 : SH-DK açılı rüzgâr türbini moment-hız grafiği [14]. 28
Şekil 4.8 : SH-DK açılı türbinin (a) çıkış gücü (b) maksimum güç katsayısı [14]. .. 29
Şekil 4.9 : Farklı rüzgâr türbini konfigürasyonları (a) stator kontrollü sincap kafesli asenkron generatör (b) rotor kontrollü asenkron generatör (ÇBAG). 30
Şekil 4.10 : DH-SK açılı rüzgâr türbini moment-hız grafiği [14]. 30
Şekil 4.11 : DH-SK açılı türbinin (a) çıkış gücü (b) maksimum güç katsayısı [14].. 31
Şekil 4.12 : DH-DK açılı rüzgâr türbini hız-moment grafiği [14]..... 32
Şekil 5.1 : Değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbininin blok şeması [12]. . 33
Şekil 5.2 : 10 dev/dk açısal hız için C_p yüzeyi. 35
Şekil 5.3 : 20 dev/dk açısal hız için C_p yüzeyi. 35
Şekil 5.4 : 27.8 dev/dk açısal hız için C_p yüzeyi. 35
Şekil 5.5 : 35 dev/dk açısal hız için C_p yüzeyi. 36
Şekil 5.6 : 40 dev/dk açısal hız için C_p yüzeyi. 36
Şekil 5.7 : Rüzgâr türbini iki kütleli mekanik modeli. 37
Şekil 5.8 : Rüzgâr türbini mekanik modeli. 38
Şekil 5.9 : Çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) sistemi. 39
Şekil 5.10 : dq eksen takımı. 44

Şekil 5.11 : ÇBAG'ün dq eksen takımındaki eşdeğer devre şeması. 45
Şekil 5.12 : Kanat eyleyicisi modeli. 49
Şekil 5.13 : Rüzgâr türbini kontrol sistemi [12]. 50
Şekil 5.14 : Rüzgâr türbini aerodinamik güç grafiği. 51
Şekil 5.15 : Rüzgâr türbini aerodinamik moment grafiği. 52
Şekil 5.16 : Rüzgâr türbini kanat açısı grafiği. 52
Şekil 5.17 : Rüzgâr türbini rotor açısal hız grafiği. 52
Şekil 5.18 : Kanat açısı referansı üreteci. 54
Şekil 5.19 : Generatör moment referansı üreteci. 55
Şekil 5.20 : Generatör moment ve reaktif güç kontrolü. 56
Şekil 6.1 : Değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbini Simulink blok diyagramı. 58
Şekil 6.2 : Rüzgâr türbini aerodinamik modeli Simulink blok diyagramı. 59
Şekil 6.3 : Rüzgâr türbini mekanik modeli Simulink blok diyagramı. 59
Şekil 6.4 : Rüzgâr türbini generatör modeli Simulink blok diyagramı. 60
Şekil 6.5 : Rüzgâr türbini kanat açısı eyleyicisi Simulink blok diyagramı. 60
Şekil 6.6 : Rüzgâr türbini generatör kontrolü Simulink blok diyagramı. 61
Şekil 6.7 : Rüzgâr türbini kanat açısı kontrolü Simulink blok diyagramı. 61
Şekil 6.8 : Kısmi yük bölgesi rüzgâr hızı. 62
Şekil 6.9 : Kısmi yük bölgesi generatör gücü. 62
Şekil 6.10 : Kısmi yük bölgesi rotor açısal hızı. 63
Şekil 6.11 : Kısmi yük bölgesi generatör momenti. 63
Şekil 6.12 : Kısmi yük bölgesi kanat açısı. 63
Şekil 6.13 : Tam yük bölgesi rüzgâr hızı. 64
Şekil 6.14 : Tam yük bölgesi generatör gücü. 64
Şekil 6.15 : Tam yük bölgesi rotor açısal hızı. 65
Şekil 6.16 : Tam yük bölgesi generatör momenti. 65
Şekil 6.17 : Tam yük bölgesi kanat açısı. 65
Şekil 6.18 : Rüzgâr hızı. 66
Şekil 6.19 : Generatör gücü. 66
Şekil 6.20 : Rotor açısal hızı. 67
Şekil 6.21 : Kanat açısı. 67

DEĞİŞKEN HIZLI DEĞİŞKEN AÇILI RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN KONTROLÜ

ÖZET

Dünyada özellikle de nüfusun yoğun ve artmakta olduğu ülkelerde enerji ihtiyacı da her geçen gün hızla artmakta, bu enerji talebini karşılamak ve fosil yakıtların tüketimini azaltmak için ülkeler, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedirler. Rüzgâr enerjisi, son yıllarda yenilenebilir kaynaklar arasında en önemli yeri teşkil eden ve teknolojik gelişmeleri açısından da oldukça önemli adımlar atılmış bir kaynak durumundadır. Bunun en önemli sebepleri temiz, sınırsız ve doğal olması ile dış ülkere bağımlılığı azaltmasıdır.

Bu çalışmada değişken hızlı değişken kanat açılı bir rüzgâr türbininin modellenmesi, kontrolü ve benzetimi yapılmıştır. Tezin ana amacı yerli rüzgâr türbini üretmeyi hedefleyen "Milli Rüzgâr Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi - MİLRES" başlıklı Ar-Ge ve uygulama projesine katkıda bulunmaktır.

Tezde ilk olarak rüzgâr enerjisi ve rüzgâr türbinleri hakkında gerekli bilgiler verilmiştir. Rüzgâr türbinlerinin aerodinamiğini açıklayan teorilere yer verilmiş ve rüzgâr türbinlerinin karakteristikleri açıklanmıştır. Sonrasında rüzgâr türbinlerindeki kontrol sistemlerine yer verilmiştir. Kontrol sisteminin amaçları, aerodinamik güç kontrolü ve farklı kontrol stratejileri anlatılmıştır.

Rüzgâr türbinleri ve kontrolü ile ilgili gerekli bilgiler verildikten sonra değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbinlerinin modellenmesi ve kontrolü anlatılmıştır. Rüzgâr türbinleri; aeordinamik model, mekanik model, elektriksel model, kanat açısı eyleyicisi ve kontrol sistemi olmak üzere 5 alt sistem olarak modellenmiş ve kanat açısı kontrolü ile generatör moment kontrolü üzerinde durulmuştur. Modelleme büyük ölçüde gerçek verilere dayandırılarak yapılmış olup; kontrol stratejisinde, düşük rüzgâr hızlarında (kısmi yük bölgesi) rüzgârdan kazanılabilecek maksimum gücü elde etme, yüksek rüzgâr hızlarında (tam yük bölgesi) ise türbin gücünü ve rotor açısal hızını sabit tutarak rüzgâr türbinini aşırı yüklerden korumak esas alınmıştır. Bu amaçla kısmi yük bölgesinde sadece generatör moment kontrolü yapılırken; tam yük bölgesinde rotorun fazla hızlanmasını önlemek için generatör moment kontrolüne ek olarak kanat açısı kontrolü yapılmıştır.

Son olarak Matlab Simulink yardımıyla değişken hızlı değişken kanat açılı bir rüzgâr türbininin benzetimi yapılmıştır. Rüzgâr türbininin kısmi yük bölgesi ve tam yük bölgesinde performansı ayrı ayrı değerlendirilmiş, kanat açısı ve generatör moment kontrolünün etkileri incelenmiştir. Benzetim için MİLRES projesinin verileri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların projede kullanılacak olan kontrol stratejisini belirlemeye büyük ölçüde yardımcı olması beklenmektedir.

CONTROL OF VARIABLE SPEED VARIABLE PITCH WIND TURBINES

SUMMARY

Throughout last few decades, the share of renewable energy share in overall electricity production has rapidly increased. Due to high community concern about global warming, climate change and adopting green energy agenda, countries are deviating more from the previous electricity generation sources to renewable energy sources.

Fossil fuels are non-renewable, that is, they draw on finite resources that will eventually dwindle, becoming too expensive or too environmentally damaging to retrieve. In contrast, the many types of renewable energy resources-such as wind and solar energy-are constantly replenished and will never run out.

Renewable energy is energy that comes from natural resources such as sunlight, wind, rain, tides, waves and geothermal heat. Wind power generation has experienced a tremendous growth in the past decade and is experiencing top class priority. It has been recognized as an environmentally friendly and economically competitive means of electric power generation.

In recent years, a fast growing in wind energy has been experienced in the whole world, and wind power is growing at an annual rate in excess of 30% and a foreseeable penetration equal to 12% of global electricity demand by 2020. Turkey's wind sector has made rapid progress, with installed capacity increasing from 30 MW in 2007 to 1,800 MW at the end of 2011. This represents an annual growth rate of around 35%.

Wind energy conversion systems convert the kinetic energy of the wind into electricity. A wind turbine is a revolving machine that converts kinetic energy from the wind into mechanical energy. This mechanical energy is then converted into electricity that is sent to a power grid.

Wind turbines can be variable speed or fixed speed turbines. Nowadays, variable speed wind turbines are becoming more common than constant speed turbines. This is mainly due to a better power quality impact, reduction of stresses in the turbine and the reduction of the weight and cost of the main components.

Variable-speed turbines tend to operate closer to their maximum aerodynamic efficiency for a higher percentage of the time, but require electrical power processing so that the generated electricity can be fed into the electrical grid at the proper frequency. As generator and power electronics technologies improve and costs decrease, variable-speed turbines are becoming more popular than fixed-speed turbines.

Main components of a wind turbine are blades, tower, nacelle, hub, gearbox, low speed shaft, high-speed shaft, generator, power electronics, yaw mechanism, blade pitch mechanism, anemometer and wind vane.

Blades collect energy from wind, and they are attached to the hub. The tower carries the nacelle and the rotor. The nacelle is placed on the top of the tower, and contains the essential parts of turbine such as gearbox, low and high speed shafts and generator. The rotor turns the low speed shaft; the gearbox drives the high speed shaft of the generator, converting low speed rotation from the input shaft. Generator transforms the mechanical energy into electrical energy. Pitch mechanism controls the angle of the blades, and yaw mechanism turns the nacelle so that the rotor faces the wind. Anemometer is an instrument that measures wind speed, while wind vane indicates the wind direction.

A wind turbine consists of aerodynamic, mechanical and electrical parts.

Aerodynamic part explains the power captured by the turbine blades. A wind turbine obtains its power input by converting some of the kinetic energy in the wind into torque acting on the rotor blades. The amount of energy, which the wind transfers to the rotor, depends on the wind speed, the rotor area, blade design (turbine characteristics and pitch angle) and the density of the air. There are two main approaches for wind turbine aerodynamics: actuator disc model and blade element theory. Actuator disc model is based on the momentum theory while the blade element model is based on the analysis of the aerodynamic forces applied to a radial blade element of unit length.

The mechanical model of a wind turbine is essentially a two-mass model of rotor dynamics, consisting of a large mass and a small mass, corresponding to the wind turbine rotor inertia J_t and generator rotor inertia J_g, respectively.

Electrical part consists of generator and power electronics. Induction generators are the most popular electric machines in wind energy conversion systems; and double fed induction generators are widely used in variable speed variable fixed wind turbines. In these types of turbines, a frequency converter decouples the generator from the grid, allowing the rotor speed to be varied by controlling the generator electromagnetic torque.

The prime control objectives of the variable speed wind energy conversion systems are power efficiency maximization, improved dynamic characteristics, resulting in the reduction of the drive train mechanical stresses and output power fluctuations.

Variable speed variable pitch turbines have three main active control actuation systems: yaw system, generator torque control and pitch control. The control variables are the yaw angle, the generator electromagnetic torque and the blade pitch angle.

Yaw control system turns the nacelle and rotor so that the wind is normal to the rotor plane. The yaw drive is intentionally very slow for large turbines in order to reduce gyroscopic loading.

Generator torque control is responsible for determining the reference generator torque and providing generator to produce that torque value.

Pitch control changes the aerodynamic loading by changing the angle of attack. It can be either independent or collective. Both generator torque control and pitch control can be relatively fast in modern wind turbines.

Variable speed wind turbines have three main regions of operation.

Region 1, below the cut in wind speed, includes the times when the turbine is not operating and when it is starting up. The only control strategy is monitoring the wind and turbine speed.

Region 2, between the cut in wind speed and rated wind speed, is an operational mode in which it is desirable to capture as much power as possible from the wind. To achieve power efficiency maximization, the turbine tip-speed ratio (λ) should be maintained at its optimum value despite wind variations. Yaw control and generator torque control strategies are used in this region while the blade pitch is kept constant at an optimal value for maximum wind energy. The rotor rotational speed and generator power increase until their rated values as the wind speed increases and they reach their rated values at rated wind speed.

Region 3, in above-rated wind speed, the captured power needs to be limited because of the both mechanical and electrical constraints. In this region yaw control, generator torque control and blade pitch control are used together. By using blade pitch control the excess turbine power is shaded, and rotor rotational speed and turbine power are kept their rated value.

Yaw control is active all of the regions.

In this thesis, the modeling and the control of variable speed variable pitch wind turbines are explained. The aim of this thesis is to contribute to the research and development project "Milli Rüzgâr Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi - MİLRES".

In Chapter 1 firstly, the general information about wind energy is given and then the history and the importance of wind energy are explained; advantages and disadvantages of wind energy are discussed. After that, the statistics of worldwide installed wind energy capacity according to years and countries are given. Finally, Turkish wind energy statistics including capacity, installed capacity, operational wind power plants are comprehensively presented with graphical representations according to years, cities and regions.

In Chapter 2, wind turbines are introduced and classified. The main parts of a wind turbine are presented in detail.

In Chapter 3, the aerodynamics of wind turbines are explained. Two approaches that are expressed the wind turbine aerodynamics, are mentioned: actuator disc model and blade element theory. After that, the performance and efficiency of a wind turbine are explained with equations and graphical representations.

Chapter 4 is about the control of wind turbines. The control purposes, the supervisory control, aerodynamic power control and different control strategies are main topics of this chapter. Five control techniques, passive stall control, passive pitch control, active stall control, active pitch control and yaw control are explained in detail. Using these control techniques, four different control strategies for wind turbines fixed-speed fixed-pitch, fixed-speed variable-pitch, variable-speed fixed pitch and variable-speed variable-pitch are comprehensively introduced.

In Chapter 5, the modeling and control of a variable speed variable pitch wind turbine are explained. For this purpose, the aerodynamic model, mechanical model, electrical model and blade pitch actuator model of the wind turbine are explained. After that, whole turbine control strategy, pitch angle control and generator torque

control are mentioned in detail. The turbine data and the control structures that are used in this study are given in Chapter 5.

Chapter 6 is the conclusion and recommendation part of this thesis. In this chapter, the results of the simulation studies are commented.

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun, kentleşmenin ve sosyal hayattaki refah düzeyinin artması, sanayileşmenin hızlı bir gelişme göstermesi ve yeni teknolojilerin kullanıma sunduğu makine-araç çeşitlenmesi gibi faktörler, enerji sektörünü günümüzün en önemli sektörlerinden biri haline getirmiştir. Ayrıca enerji üretimi ve tüketimi toplumların gelişmişlik düzeyinin ve yaşam kalitesinin en önemli göstergesi olarak kabul edilmekte ve enerji arzı bir ülkenin milli güvenliği ve geleceği açısından önemli faktör olarak değerlendirilmektedir.

Dünyada enerji ihtiyacı uzun yıllar fosil yakıtlardan karşılanmıştır ve karşılanmaya devam etmektedir. Fosil yakıtların çevre ve doğal kaynaklar üzerinde yerel, bölgesel ve küresel seviyede olumsuz etkilere neden olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla maliyeti daha az olan, dışa bağımlılığı azaltan, çevreye zarar vermeyen enerji kaynaklarının gerekliliği anlaşılmıştır. Bu nedenle ülkeler özellikle sıfır emisyon salımı olan yenilenebilir enerji kaynaklarını serbest piyasa mekanizması ile şartlarını zorlamadan ekonomiye kazandırılmasına, enerji üretim teknolojilerini bu yönde geliştirmeye, üretimi ile tüketimini teşvik edici çeşitli politikaların oluşturulmasına hız vermişlerdir.

Rüzgâr enerjisi, çevreye vermiş olduğu zararın çok az olması, sürekli bir enerji kaynağı olması nedeniyle, alternatif enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutar. Enerji talebinin yaklaşık %72'sini ithal kaynaklardan karşılayan ülkemizde de son yıllarda rüzgâr enerjisine büyük önem verilmekte; özellikle son bir iki yılda yerli rüzgâr türbini sistemlerinin üretilmesi desteklenmektedir. Dolayısıyla aerodinamik, mekanik, elektrik gibi birçok konuyu içinde barındıran rüzgâr türbini sistemleri ile ilgili çalışmalara ağırlık verilmiştir.

Rüzgâr enerjisini önce mekanik sonra da elektik enerjisine dönüştüren rüzgâr türbinlerinde, rüzgârdan optimum gücü elde etmek ve elde edilen enerji kalitesini arttırmak birincil amaçlardır. Rüzgâr değişken ve tahmin edilemeyen bir doğa olayı olduğundan elde edilen gücün regülasyonunu sağlamak, aşırı rüzgâr yüklerinden

kaçınmak, düşük rüzgâr hızlarında optimum gücü elde etmek bir rüzgâr enerjisi sisteminin en önemli problemleridir. Bu nedenle rüzgâr türbinlerinin kontrol sistemlerine ayrıca önem verilmelidir. Genel olarak aerodinamik güç kontrolü (kanat açısı kontrolü) ile generatör moment kontrolünden oluşan kontrol sistemleri farklı kontrol stratejileri için değişik şekillerde yapılandırılabilirler.

Bu çalışmada MİLRES – Milli Rüzgâr Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi projesinde faydalanılacak olan değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbininin bütünleşik bir modeli oluşturulmuş ve kontrolü ile ilgili gerekli çalışmalar yapılmıştır.

Çalışmanın giriş bölümünde rüzgâr enerjisi ile ilgili genel bilgiler verilmiş, tarihçesinden ve öneminden bahsedilmiş; dünyada ve Türkiye'deki rüzgâr enerjisinin yeri anlatılmıştır. 2. Bölümde rüzgâr türbininin tanımı verilmiş, sınıflandırılması yapılmış ve bir türbinin temel parçaları tanıtılmıştır. 3. Bölümde rüzgâr türbinlerinin aerodinamiği ayrıntılı olarak incelenmiştir. 4. Bölümde rüzgâr türbinlerinin kontrolü anlatılmıştır. Kontrol amaçlarından, aerodinamik güç kontrolünden ve farklı kontrol stratejilerinden bahsedilmiştir. 5. Bölümde değişken hızlı değişken kanat açılı bir rüzgâr türbininin modellenmesi ve kontrolü anlatılmıştır. Bu amaçla rüzgâr türbininin aerodinamik modeli, mekanik modeli, elektriksel modeli ve kanat açısı eyleyicisi modeli ile kanat açısı kontrolü ve generatör moment kontrolü anlatılmıştır. 6. Bölümde bu çalışmada modellenen rüzgâr türbini ve tasarlanan kontrolörlerin MATLAB-SIMULINK ortamında benzetimi yapılmıştır. Sonuçlar kısmında ise tezde yapılan çalışmalar kısıca özetlenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

1.1 Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr, atmosferdeki havanın dünya yüzeyine yakın, doğal yatay hareketleridir. Hava hareketlerinin temelinde atmosfer basıncı arasındaki farklar yatmaktadır. Rüzgâr, alçak basınçla yüksek basınç bölgesi arasında yer değiştiren hava akımıdır.

Rüzgâr enerjisi ise rüzgârı oluşturan hava akımının sahip olduğu kinetik enerjidir. Bu enerjinin bir kısmı mekanik veya elektrik enerjisine dönüştürülebilir.

Rüzgâr enerjisinin kullanımı çok eski dönemlere dayanır. Rüzgâr gücü kullanımının bundan en az 5500 yıl önce yelkenli gemiler aracılığıyla olduğu söylenebilir [1]. Daha sonra başta yel değirmenleri olmak üzere tahıl öğütme, su pompalama, ağaç

kesme işleri için de rüzgâr gücünden yararlanılmaya başlanmıştır. Günümüzde ise rüzgâr enerjisi daha çok elektrik üretmek amacıyla kullanılmaktadır [1].

1887 Haziran ayında İskoç akademisyen Profesör James Blyth rüzgâr gücü deneylerine başlamış ve 1891'de İngiltere'de patent almıştır. Rüzgâr türbinlerinin geniş çaplı elektrik üretimi için kullanımı ilk defa Cleveland Ohio'da 1888'de Charles F. Brush tarafından yapılmıştır. Brush değirmeni 20 yılı aşan ömrü ile başarısını kanıtlasa da düşük devirin dezavantajını ve sağlam rotor gerekliliğini ortaya koymuştur. 1891'de Danimarkalı Poul La Cour aerodinamik dizayn şartlarını sağlayan ilk elektrik üreten rüzgâr türbinini üretmiştir. Modern rüzgâr güç endüstrisi ise 1979'da, Danimarkalı Kuriant, Vestas, Nordtank ve Bonus şirketlerinin rüzgâr türbinlerini seri üretmesiyle başlamıştır. Rüzgâr türbinlerinin gelişimi günümüzde de hızla devam etmektedir [1-3].

Rüzgâr enerjisinin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Rüzgâr enerjisi, fosil yakıtlarla, kömür ve doğal gazla yanmaya dayanan işletmeler gibi havayı kirletmez.
- Rüzgâr türbinleri asit yağmurlarına sebep olan atmosferik emisyonlar üretmez [4].
- Emisyon olmadığı için sera gazı oluşturmaz ve küresel ısınmaya katkı yapmaz.
- Radyoaktif ışınım ya da radyasyon tehlikesi yoktur.
- Fosil yakıtların fiyat değişkenliğinden kaynaklanan karmaşıklık yoktur [5].
- Ulusal kaynaklar için devletlerarası anlaşmazlıkları önler.
- Rüzgâr türbinlerinde enerji üretimi sırasında hammadde maliyeti yoktur.
- Uygulama esnekliği vardır. Büyük ölçekli ticari santraller veya ev tipi uygulamalar mümkündür. Kişiler kendi elektriğini üretebilir [5].
- Rüzgâr tesislerinin kurulumu ve işletilmesi diğer tesislere göre daha kolaydır.
- Bakım maliyeti yok denecek kadar azdır.
- Rüzgâr türbinleri çiftliklere inşa edilebilir, böylece en iyi rüzgâr potansiyelinin bulunduğu kırsal bölgeler de ekonomiden faydalanır. Çiftçiler arazilerinde çalışmaya devam edebilir [4].
- Bu çiftliklerin ömürlerini tamamlamasından sonra türbinlerin kullanıldığı alan eski haline kolayca getirilmektedir.
- Geleneksel yakıtların aksine, diğer ülkelere bağımlılığı azaltır.

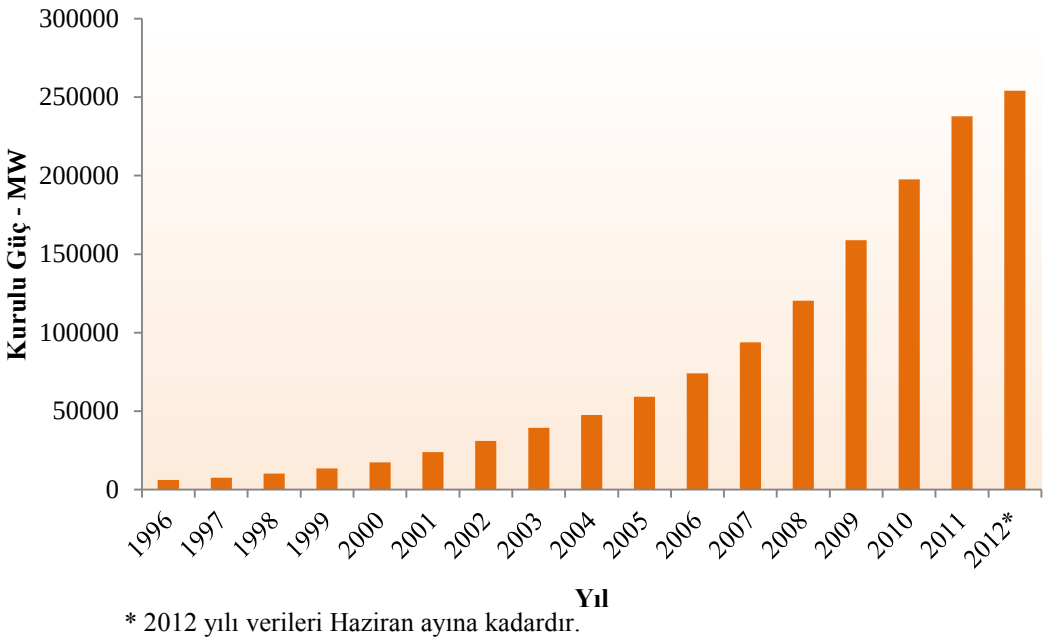
- Tükenmeyen sonsuz bir enerji kaynağıdır.

Rüzgâr enerjisinin dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Rüzgârların düzenli olmaması sebebiyle, enerji üretiminde kesikli bir düzen görülür. Çok yüksek ve çok düşük rüzgâr hızlarında çalışamazlar [6].
- İlk kurulum maliyeti yüksektir.
- Türbinlerin sesli çalışmaları, yakın çevrelerinde yaşayan insanlar için rahatsız edici olabilir (Son jenerasyon türbinlerde bu sorun büyük oranda çözülmüştür.) [5].
- Rüzgâr santralinin büyüklüğüne göre değişmekle beraber, 2-3 km çapındaki bir alan içinde, radyo, televizyon ve diğer haberleşme dalgalarını olumsuz etkilemektedir [6].
- Yüksek hızla dönen rotorları (pervaneleri) ile kuşların ölümlerine sebep olabilmektedirler.

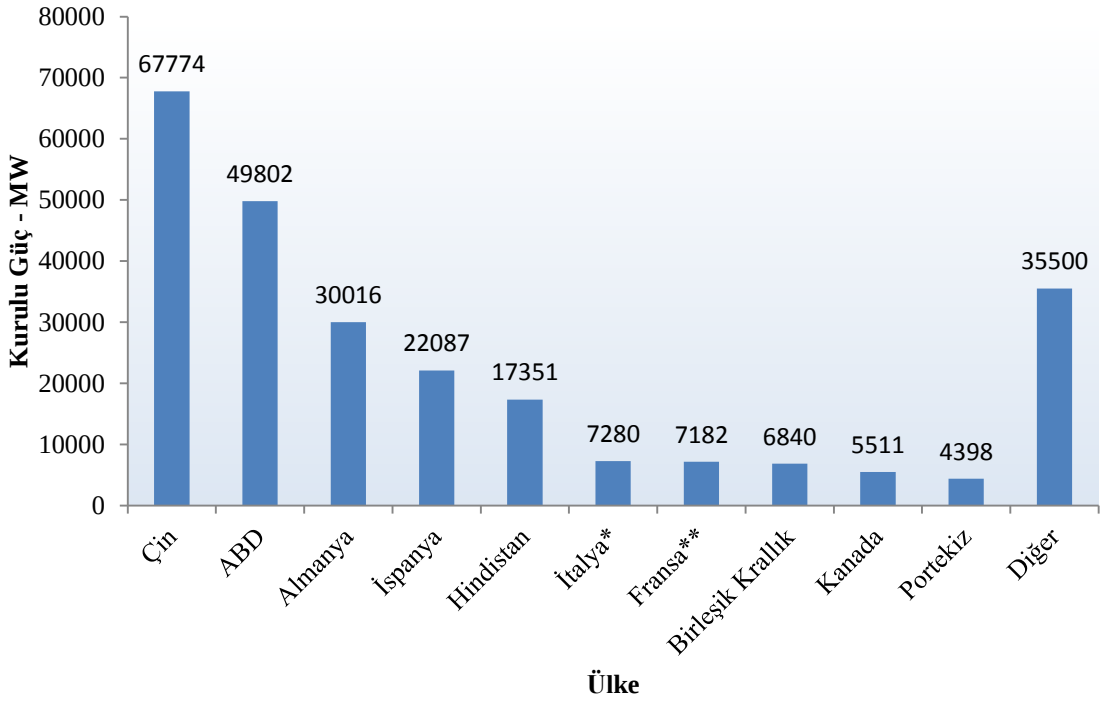
1.2 Dünyada ve Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr gücü, dünyada kullanımı en çok artan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir. 1996 yılından beri logaritmik olarak artan dünya genelindeki rüzgâr enerjisi kurulu gücü, 2012 yılının ilk yarısında 254 GW'ı aşmış olup 2012 yılı sonu itibariyle bu değerin 273 GW olması beklenmektedir [7].



Şekil 1.1 : Küresel kümülatif rüzgâr kurulu gücü (1996-2012 Haziran) [7].

Ülkelerin rüzgâr güçleri incelendiğinde ise Çin ve ABD'nin ilk sıraları aldıkları ve dünya genelindeki toplam kurulu gücün %50'sinden fazlasını oluşturdukları görülmektedir.



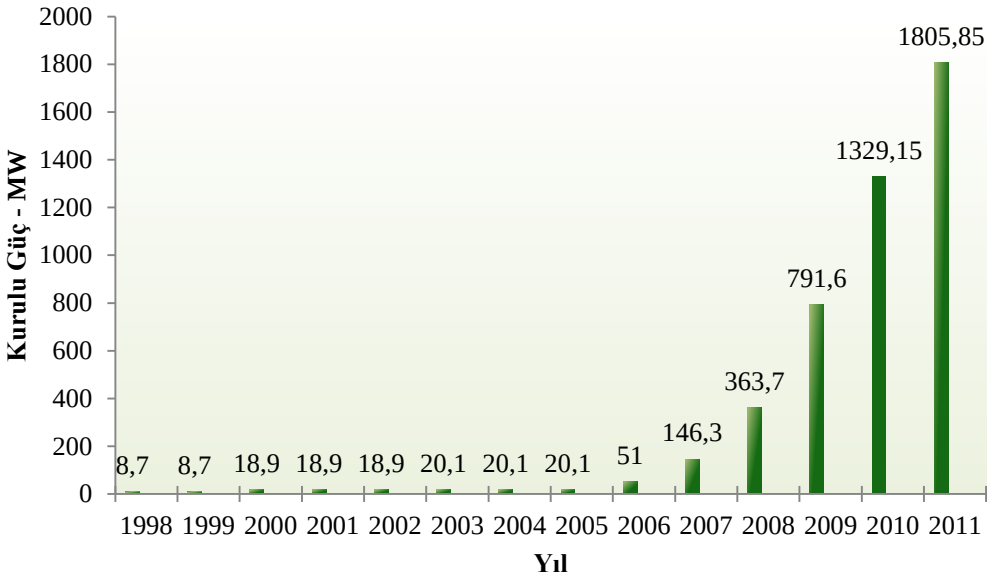
* 2012 Mayıs sonu ** 2012 Nisan sonu

Şekil 1.2 : Ülkeler bazında toplam rüzgâr kurulu gücü (2012 Haziran) [7].

Hızla gelişen ekonomi, artan nüfus ve artan güç talebiyle Türkiye, son 20 yılda dünyanın en hızlı gelişen enerji marketlerinden biridir. Fosil yakıtlara ve dışa olan bağımlılığından kurtulmak isteyen Türkiye hızla yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelerek enerji güvenliğini geliştirmeye çalışmaktadır [8].

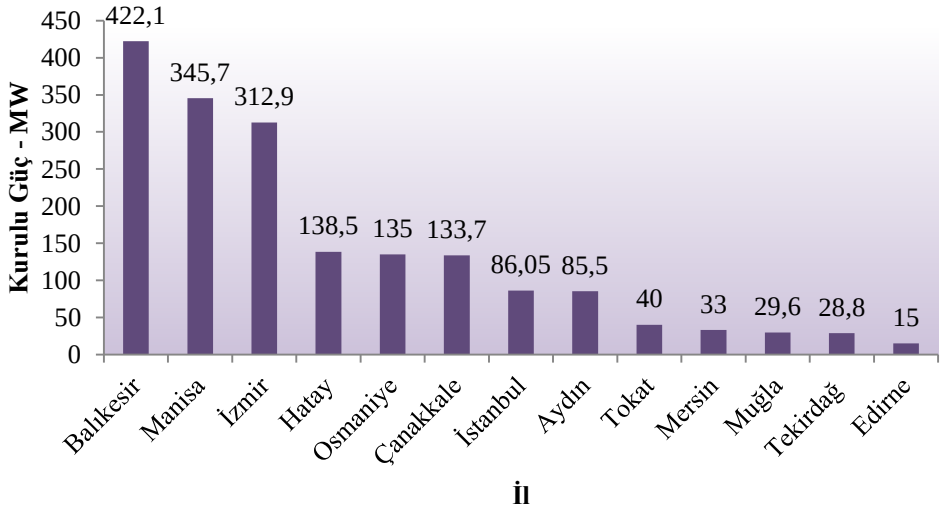
Türkiye, Avrupa'da rüzgâr enerjisi potansiyeli bakımından zengin ülkelerden birisidir. Üç tarafı denizlerle çevrili olan ve yaklaşık 3500 km kıyı şeridi olan Türkiye'de özellikle Çanakkale-İzmir, Balıkesir ve Hatay çevreleri sürekli ve düzenli rüzgâr almaktadır. Ülkenin toplam potansiyel rüzgâr enerjisi kapasitesinin ise 47 GW olduğu tahmin edilmektedir [8,9].

Türkiye'de şebekeye bağlı rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimi 1998 yılında başlamış ve özellikle 2005 yılından itibaren 5346 sayılı Yenilenebilir Elektrik Kanunu'nun çıkmasından sonra kurulu güç ve enerji üretiminde her yıl % 100'ün üzerinde artış göstererek 2011 yılı sonunda 1805,85 MW'a ulaşmıştır [9].

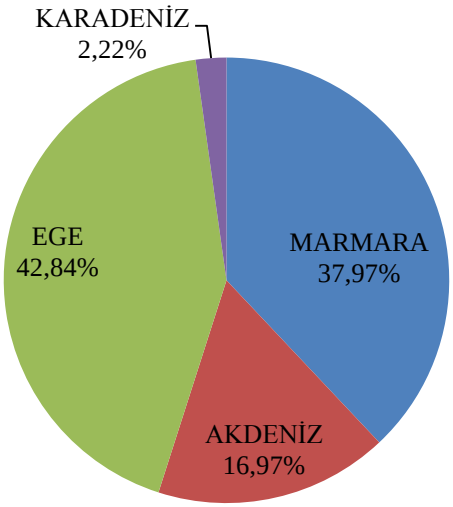


Şekil 1.3 : Türkiye'deki rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre dağılımı (1988-2011) [10].

Rüzgâr kurulu gücü Türkiye 2011 toplam kurulu gücünün (53050,8 MW) % 3,19'unu oluşturmaktadır. 2011 yılında rüzgâr santrallerinden üretilen elektrik enerjisi 4726 Milyar kWh olarak gerçekleşmiş olup toplam elektrik üretiminin % 2,07'sine karşılık gelmektedir. Marmara bölgesinde Balıkesir, İstanbul, Çanakkale, Ege bölgesinde İzmir, Manisa, Doğu Akdeniz çevresinde Hatay rüzgâr santrallerinin yoğun olarak yer aldığı illerdir [10].



Şekil 1.4 : İşletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından illere göre dağılımı (2012 Şubat) [10].



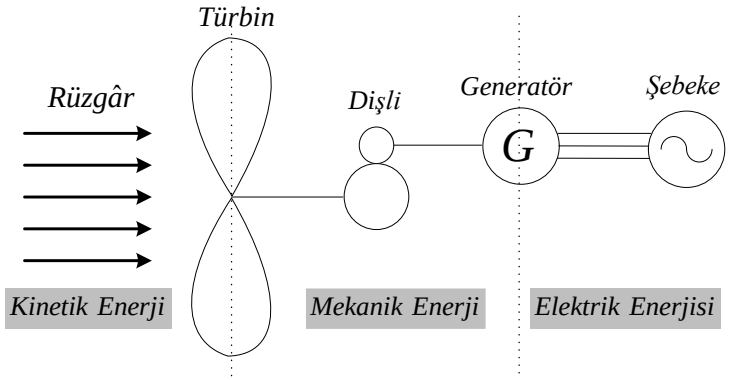
Şekil 1.5 : İşletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre dağılımı (2012 Şubat) [10].

İşletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin yanı sıra 2012 Şubat ayı verilerine göre henüz inşa halinde kurulu güçleri toplamı 517,55 MW olan 13 rüzgâr enerji santrali ile toplam 5499,20 MW kurulu güce sahip olan lisanslı çok sayıda rüzgâr enerji santrali mevcuttur. Bu santrallerin büyük bir çoğunluğu da yine Marmara ve Ege bölgelerinde yer almaktadır [10].

Türkiye'deki rüzgâr santrallerini oluşturan türbinler dünya piyasasına hakim olan türbin markalarıdır ve rüzgâr türbin ve bileşenlerinin büyük bir kısmı (türbin, generatör, göbek (hub), dişli kutusu vb.) ithal edilmektedir. Türbin bileşenlerinin yerli üretiminde, kurulu güç gelişimine paralel bir gelişme sağlanamamıştır. Ancak 2011 yılı başında yürürlüğe giren 6094 sayılı kanun ile 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanunda bazı değişiklikler yapılmış ve yenilenebilir enerji yatırımlarında yerli malzeme ve teknolojilerin kullanılması halinde ilave teşvik uygulanacağı açıklanmıştır. Yerli üretime verilen önem doğrultusunda çeşitli üniversiteler, araştırma kurumları ve özel sektörden firmaların yer aldığı "Milli Rüzgâr Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi - MİLRES" başlıklı Ar-Ge ve uygulama projesi çalışmaları devam etmektedir [9].

2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ

Rüzgâr türbinleri, rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemler olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.1 : Rüzgâr türbininin basitleştirilmiş gösterimi.

2.1 Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgâr türbinleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler.

Dönme eksenine göre rüzgâr türbinleri "Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri" (YERT) ve "Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri" (DERT) olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Yatay eksenli türbinlerde dönme ekseni rüzgâr yönüne paraleldir. Kanatları ise rüzgâr yönüyle dik açı yaparlar. Ticari türbinler genellikle yatay eksenlidir. Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde türbin mili düşeydir ve rüzgârın geliş yönüne diktir. Savonius tipi, Darrieus tipi gibi çeşitleri vardır. Daha çok deney amaçlı üretilmiştir. Ticari kullanımı çok azdır [11].



Şekil 2.2 : Yatay ve düşey eksenli rüzgâr türbinleri.

Rüzgâr türbinleri kanat sayılarına göre tek kanatlı, iki kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı olarak sınıflandırılırlar. Modern rüzgâr türbinlerinde en çok kullanılan model, pervanesi tüm hızlarda sabit atalet momentine sahip olan üç kanatlı modellerdir.

2.2 Rüzgâr Türbini Elemanları

Yatay eksenli bir rüzgâr türbininin genel yapısı Şekil 2.3'te verilmektedir.

Kanatlar (Blade) rüzgârı yakalayan ve rüzgârın gücünü türbin göbeğine aktaran parçalardır. Alüminyum, titan, çelik, elyaf ile güçlendirilmiş plastik ve ağaçtan imal edilmektedir. Modern kanatların büyük çoğunluğunda, cam elyafı ile güçlendirilmiş polyester veya epoksi kullanılır.

Kule (Tower) rüzgâr türbinlerinde gövdeyi ve rotoru taşıyan kısımdır. Farklı kule şekilleri mevcut olup en çok tüp şeklindeki kuleler tercih edilmektedir.

Gövde (Nacelle) kule üzerinde yer alan gövde dişili kutusu, generatör gibi türbinin ana parçalarını taşır.

Rotor göbeği (Hub) kanatları rotor şaftına bağlayan yapıdır. Genellikle dökme demirden yapılır.

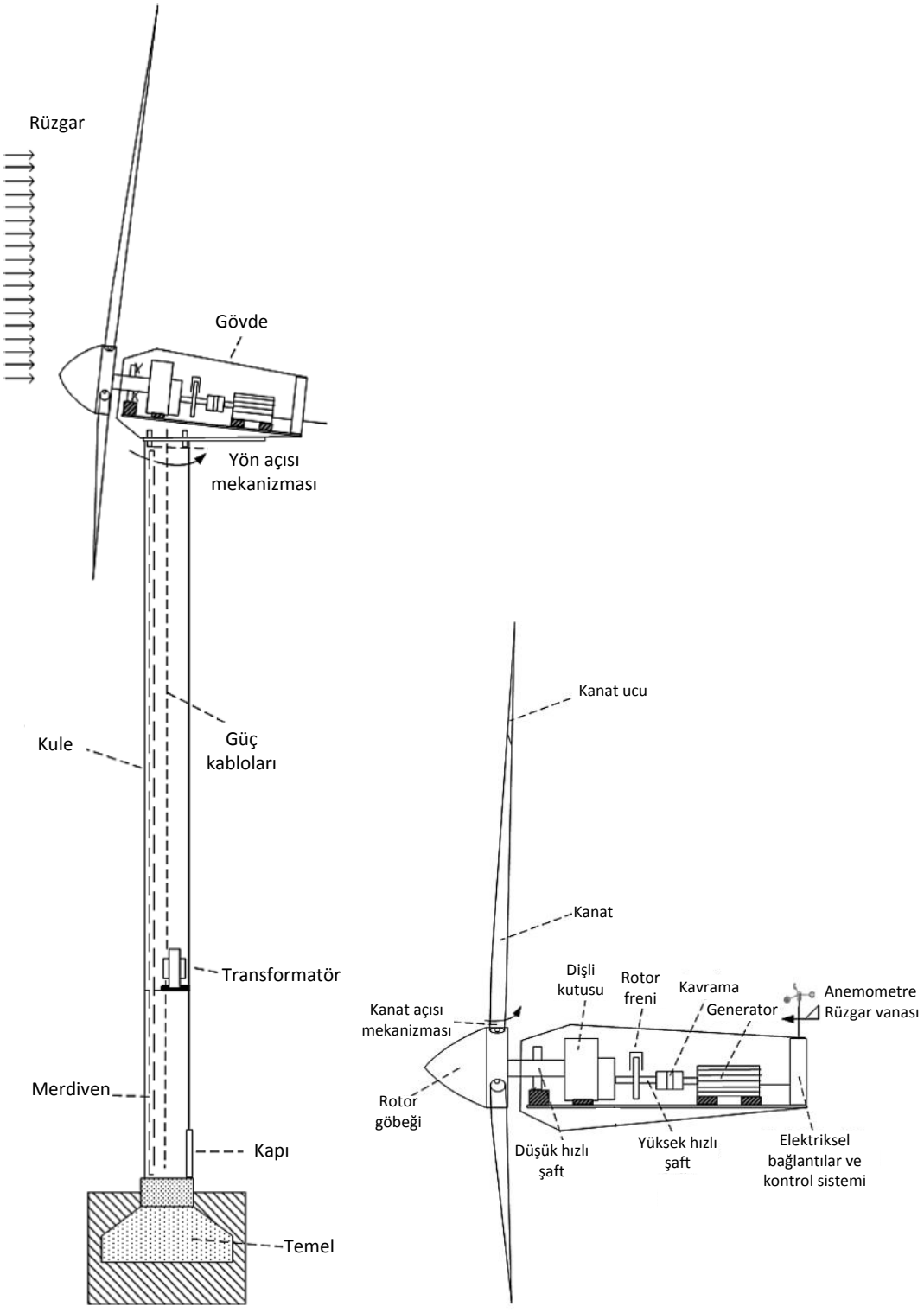
Dişli kutusu (Gear box), pervane milinin devir sayısını generatörün gerek duyduğu devir sayısına çıkarmak için kullanılır.

Düşük hızlı şaft (Low speed shaft) kanatları dişli kutusuna bağlayan yapıdır.

Yüksek hızlı şaft (High speed shaft) generatör ile dişli kutusu arasındaki mekanik bağlantıyı sağlar.

Generatör (Generator) mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren yapıdır. Rüzgâr türbinlerinde asenkron, senkron ve doğru akım generatörleri kullanılabilir. En yaygın kullanılan generatörler asenkron generatörlerdir.

Asenkron generatörler sincap kafesli ve rotoru sargılı asenkron generatörler olarak iki grupta incelenirler. Sincap kafesli asenkron generatörlerin statoru şebekeye doğrudan bağlanabildiği gibi iki adet konverter üzerinden bağlanarak kontrol de sağlanabilir. Rotoru sargılı asenkron generatörlerin ise statoru doğrudan rotoru sargıları ise iki adet "back-to-back" konverter aracılığıyla şebekeye bağlanır. Çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) olarak bilinen bu makine ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak incelenecektir.



Şekil 2.3 : Yatay eksenli rüzgâr türbininin temel parçaları [12].

Yön açısı mekanizması (Yaw mechanism) rotorun sürekli rüzgâra yönelmesini sağlayan sistemdir. Mekanizma, rüzgâr vanasını kullanarak rüzgâr yönünü belirleyen kontrol yapısı tarafından işletilir.

Kanat açısı mekanizması (Blade pitch mechanism) kanatların, aşırı yüksek veya düşük hızlarda dönüşünü kontrol eden döndürme mekanizmasıdır. Kanat açısı kontrol edilerek, güç katsayısı ayarlanır ve aerodinamik güç kontrolü yapılır.

Anemometre ve rüzgâr vanası (Anemometer - wind vane) rüzgârın hızını ve yönünü ölçen cihazlardır. Ölçülen rüzgâr değerleri, rüzgâr türbininin çalışmasını başlatmak, durdurmak, kanat ve yön açısı kontrolünü yapmak için kullanılırlar.

3. RÜZGÂR TÜRBİNİ AERODİNAMİĞİ

Bir rüzgâr türbininin güç üretimi rüzgâr ile rotor arasındaki etkileşime bağlıdır. Rüzgâr türbininin performansı rüzgârdan kaynaklı kanat üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetler tarafından belirlenir. Bu kuvvetler kanat kesitine bağlı olup türbin tasarımında kanat profillerine büyük önem kazandırmaktadır. Modern rüzgâr türbinlerinin kanat kesitleri, kanattan optimum gücü elde edebilmek amacıyla geliştirilmiş olan özel profillerden (airfoil) seçilmektedir. Bu durum rüzgâr türbininin aerodinamik incelemesinin yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır [13].

Rüzgâr türbininin sürekli haldeki performansının ve aerodinamik yapısının incelenmesi için çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Rüzgâr türbini aerodinamiğini açıklayan iki temel yaklaşım vardır: Eyleyici Disk Modeli (Actuator Disc Theory) ve Kanat Elemanı Teorisi (Blade Element Theory). Bunlardan Eyleyici Disk Modeli rüzgâr gücünü esas alarak aerodinamik yapıyı incelerken, Kanat Elemanı Teorisi kuvvetler üzerinden yola çıkar [14].

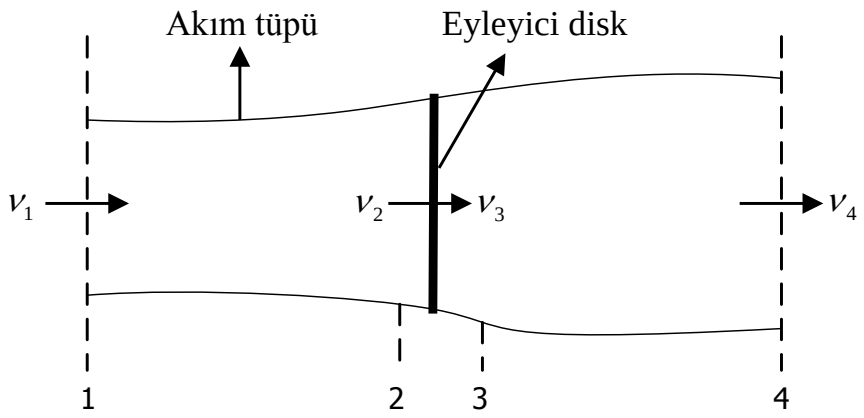
3.1 Eyleyici Disk Modeli

Bu model lineer momentum teorisine dayanır. Rüzgâr türbini bir akım tüpü içindeki üniform bir eyleyici disk ile modellenir. Bu eyleyici disk tüp içinden geçen havanın basıncında bir süreksizlik yaratır ve rüzgârın kinetik enerjisinin bir kısmını alır. Bu analiz yapılırken birtakım kabuller yapılmıştır [13]:

- Hava akımının homojen, sıkıştırılamaz, dengeli olduğu,
- Sürtünme olmadığı,
- Sonsuz sayıda kanat olduğu,
- Disk yüzeyi üzerinde itme kuvvetinin düzgün dağıldığı,
- Dönmeyen “wake” etkisi olduğu

kabul edilmiştir.

Şekil 3.1’de eyleyici disk modeli sistemi verilmiştir.



Şekil 3.1 : Eyleyici disk modeli [13].

Şekil 3.1'de gösterilen sisteme lineer momentumun korunumu ilkesi uygulanırsa türbin üzerindeki net kuvvetin ifadesi elde edilebilir. Hava akımının momentumunun değişim hızına eşit olan bu itme kuvveti, T ,

$$T = v_1 \left(\rho A v\right)_1 - v_4 \left(\rho A v\right)_4 \qquad \textbf{(3.1)}$$

Burada ρ hava yoğunluğu, A hava kesit alanı, v rüzgâr hızı ve indisler ise Şekil 3.1' de üzerindeki numaralanmış kesitlere ilişkin değerleri göstermektedir.

Sürekli haldeki hava akımında, $\dot{m}$ kütle akım hızını göstermek üzere $\left(\rho A v\right)_1 - \left(\rho A v\right)_4 = \dot{m}$ eşitliği sağlanacaktır. Bu durumda

$$T = \dot{m}\left(v_1 - v_4\right) \qquad \textbf{(3.2)}$$

olacaktır.

Eyleyici disk üzerindeki basınç değişimini bulmak için Bernoulli eşitliği kullanılır.

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho {v_1}^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho {v_2}^2 \qquad \textbf{(3.3)}$$

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho {v_3}^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho {v_4}^2 \qquad \textbf{(3.4)}$$

Burada p_1 ve p_4 basınçlarının o yükseklikteki atmosfer basıncına eşit olduğu $(p_1 = p_4 = p_0)$ ve disk boyunca rüzgâr hızının değişmediği $(v_2 = v_3)$ kabul edilmiştir.

İtme kuvveti T ayrıca eyleyici diskin iki yanındaki net kuvvetlerin toplamı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$T = A_2 \left(p_2 - p_3 \right) \tag{3.5}$$

(3.3) ve **(3.4)** numaralı eşitlikler **(3.5)** numaralı eşitlikte yerine konulursa

$$T = \frac{1}{2} \rho A_2 \left(v_1^{\,2} - v_4^{\,2} \right) \tag{3.6}$$

ifadesi elde edilir. **(3.2)** ve **(3.3)** numaralı denklemler eşitlenirse ve kütle akım hızının aynı zamanda $\rho A_2 v_2$ ifadesine eşit olduğu göz önüne alınırsa

$$v_2 = \frac{v_1 + v_4}{2} \tag{3.7}$$

eşitliği elde edilir.

Rüzgâr hızları arasındaki ilişki eksenel indüksiyon faktörü, a ,

$$a = \frac{v_1 - v_2}{v_1} \tag{3.8}$$

yardımıyla ifade edilir. 8 numaralı eşitlikten değerinin a 0.5'i aşamayacağı görülür. Buna göre

$$v_2 = v_1 \left(1 - a \right) \tag{3.9}$$

$$v_4 = v_1 \left(1 - 2a \right) \tag{3.10}$$

ilişkileri mevcuttur. Ayrıca **(3.8)** numaralı eşitlikten değerinin a 0.5'i aşamayacağı da görülmektedir.

Çıkış gücü P ise, itme kuvveti T ile disk üzerindeki rüzgâr hızının çarpılmasıyla elde edilir.

$$P = \frac{1}{2} \rho A_2 v_2 \left(v_1^{\,2} - v_4^{\,2} \right) v_2 = \frac{1}{2} \rho A_2 v_2 \left(v_1 + v_4 \right) \left(v_1 - v_4 \right) \tag{3.11}$$

Güç ifadesi aynı zamanda

$$P = \frac{1}{2}\rho A v^3 4a(1-a)^2 \qquad \textbf{(3.12)}$$

biçiminde elde edilir. Burada rotor alanı A_2 A ile rüzgâr hızı v_1 v ile değiştirilmiştir.

Rüzgâr türbininin performansı genellikle güç katsayısı C_p ile karakterize edilir. Rüzgâr türbininden elde edilen gücün toplam rüzgâr gücüne oranı olarak tanımlanan C_p,

$$C_p = \frac{\text{Rotor gücü}}{\text{Rüzgar gücü}} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A v^3} \qquad \textbf{(3.13)}$$

$$C_p = 4a(1-a)^2 \qquad \textbf{(3.14)}$$

biçiminde ifade edilir. C_p güç katsayısının alabileceği en büyük değer **(3.14)** numaralı eşitliğin a'ya göre türevinin alınıp sıfıra eşitlenmesiyle bulunur. $a = 1/3$ iken elde edilen bu limit değer Betz limiti olarak adlandırılır ve

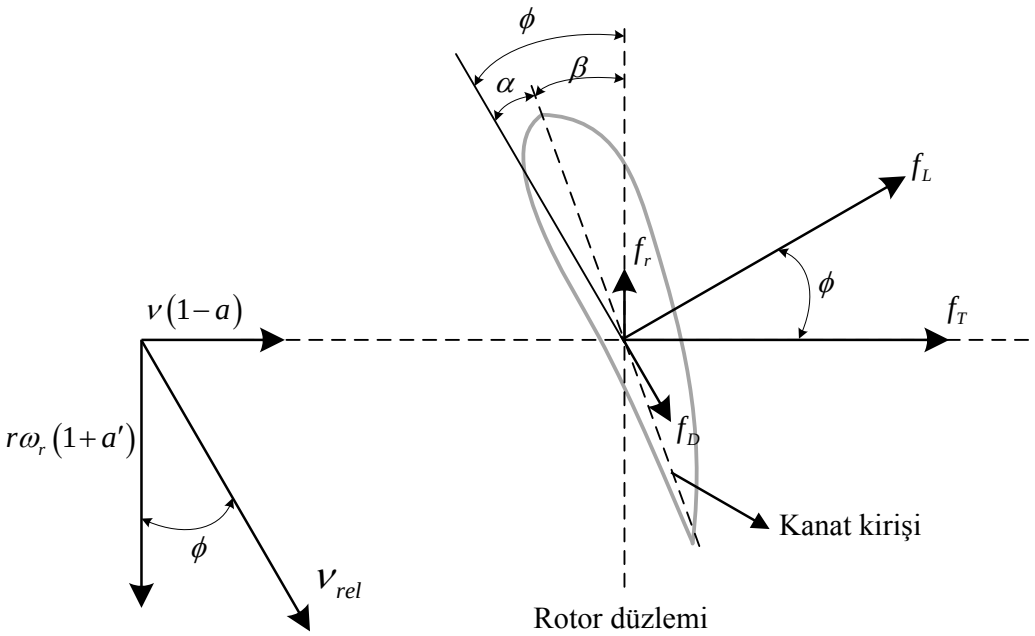
$$C_{p,\max} = 16/27 = 0.5926 \qquad \textbf{(3.15)}$$

olarak bulunur. Bu oran toplam rüzgâr enerjisinden alınabilecek enerjinin maksimum teorik limitidir.

3.2 Kanat Elemanı Teorisi

Bu teori kanat üzerindeki aerodinamik kuvvetlerin analizine dayanır. Rüzgâr türbinlerinde iki temel aerodinamik kuvvet vardır: Sürükleme kuvveti (drag force) ve kaldırma kuvveti (lift force). Sürükleme kuvveti akış yönüne paralel iken kaldırma kuvveti ise akış yönüne dik olarak meydana gelir. Şekil 3.2'de kanat üzerine etkiyen kuvvetler gösterilmiştir.

Şekil 3.2' de f_D sürükleme kuvveti, f_L kaldırma kuvveti, f_T eksenel itme kuvveti ve f_r ise rotoru döndüren döndürme kuvvetidir. α hücum açısı, β kanat açısı, ω_r rotor açısal hızı, a' açısal indüksiyon faktörüdür. v_{rel} ise etkin rüzgâr hızı olup kanat ucu çizgisel hızı ve bölgesel rüzgâr hızının birleşiminden oluşur.



Şekil 3.2 : Kanat kesiti üzerindeki kuvvetler [13].

Rüzgâr türbininin kanatları üzerindeki sürükleme ve kaldırma kuvvetleri, hücum açısına bağlı olan sürükleme kuvveti katsayısı C_D ve kaldırma kuvveti katsayısı C_L cinsinden c kiriş uzunluğu olmak üzere birim uzunluk için aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$f_D = \frac{\rho c}{2} v_{rel}{}^2 C_D(\alpha) \qquad \textbf{(3.16)}$$

$$f_L = \frac{\rho c}{2} v_{rel}{}^2 C_L(\alpha) \qquad \textbf{(3.17)}$$

Sürtünme ve kaldırma kuvvetleri rotor düzlemi üzerinde bileşenlerine ayrılabilir. Buna göre itme kuvveti bu iki aerodinamik kuvvet cinsinden birim uzunluk için

$$f_T = \frac{\rho c}{2} v_{rel}{}^2 \left(C_L(\alpha)\cos(\phi) + C_D(\alpha)\sin(\phi)\right) \qquad \textbf{(3.18)}$$

$$\phi = \alpha + \beta \qquad \textbf{(3.19)}$$

biçiminde yazılır. Bu itme kuvveti rotor, kule ve temel tarafından karşılanmalıdır. Rüzgâr türbininde asıl işi yapan döndürme kuvveti ise birim uzunluk için

$$f_r = \frac{\rho c}{2} v_{rel}{}^2 \left(C_L(\alpha)\sin(\phi) - C_D(\alpha)\cos(\phi) \right) \qquad \textbf{(3.20)}$$

şeklinde ifade edilir.

Etkin rüzgâr hızının ifadesi ise Şekil 3.2'den de görüldüğü gibi

$$v_{rel} = v\sqrt{(1-a)^2 + \left(\frac{r\omega_r}{v}(1+a') \right)^2} \qquad \textbf{(3.21)}$$

biçimindedir.

Tüm rotor üzerindeki itme ve döndürme kuvvetleri **(3.18)** ve **(3.20)** numaralı eşitliklerin kanat uzunluğu üzerinden integrallerinin alınmasıyla bulunur. Genellikle itme kuvveti, döndürme momenti ve güç; itme (C_T), moment (C_q) ve güç (C_p) katsayılarıyla aşağıdaki biçimde ifade edilirler.

$$F_T = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 C_T(\lambda,\beta)v^2 \qquad \textbf{(3.22)}$$

$$T_r = \frac{1}{2}\rho\pi R^3 C_q(\lambda,\beta)v^2 \qquad \textbf{(3.23)}$$

$$P = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 C_p(\lambda,\beta)v^3 \qquad \textbf{(3.24)}$$

Burada R kanat boyu, λ ise türbin kanatlarının ucundaki çizgisel hızın rüzgâr hızına oranı olarak tanımlanan tepe hız oranıdır.

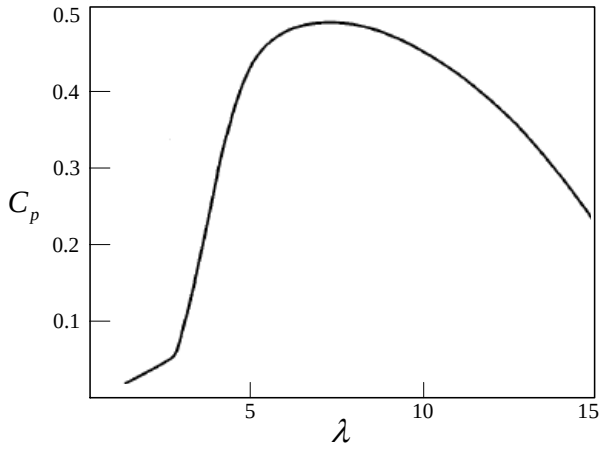
$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \qquad \textbf{(3.25)}$$

3.3 Rüzgâr Türbininin Verimi

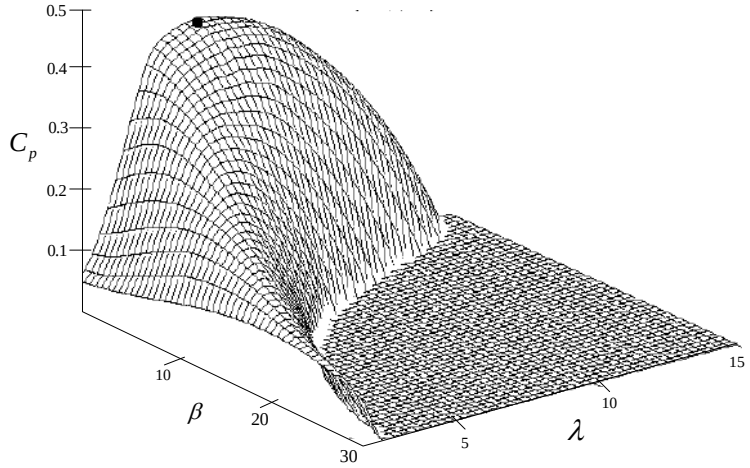
Rüzgâr türbinlerinin verimi güç, moment ve itme kuvvetinin rüzgâra göre değişimi olmak üzere üç ana faktör üzerinden karakterize edilir. Güç katsayısı C_p rotor tarafından yakalanan

rüzgâr enerjisini belirlerken, moment katsayısı C_q dişli kutusunun tasarımında, itme kuvveti katsayısı C_q ise kule tasarımında büyük rol oynar. Bu katsayıların tepe hız oranı λ ile kanat açısı β'nın bir fonksiyonu olarak gösterilmesi yaygındır [15].

Şekil 3.3'te sabit kanat açılı bir türbinin verim eğrisi görülmektedir. Görüldüğü gibi C_p'nin en büyük değeri 0.5'in altında olup Betz limitinden küçüktür. Kanat tasarımı ideal olmadığından güç katsayısı Betz limitine erişememiştir. Kanat açısının değişken olduğu durumda ise türbin performansı Şekil 3.4'te olduğu gibi $C_p - \lambda - \beta$ değerlerinin oluşturduğu bir yüzey ile ifade edilir.



Şekil 3.3 : Üç kanatlı sabit kanat açılı modern bir türbinin $C_p - \lambda$ eğrisi [13].



Şekil 3.4 : Üç kanatlı değişken kanat açılı modern bir türbinin C_p katsayısının λ ve β'ya göre değişimi [13].

4. RÜZGÂR TÜRBİNİ KONTROL SİSTEMLERİ

Rüzgâr türbinlerinde kontrol sistemleri genel olarak türbinin çalışmasının optimize edilmesinden, tüm sistemin güvenli bir şekilde çalışmasından ve elde edilen elektriksel gücün kalitesinden sorumludur. Rüzgâr türbinlerinde, kontrol sisteminin rüzgârın fazlaca değişken, sürekli olmayan ve öngörülemeyen doğasını yenmesi gerektiğinden kontrol problemi ayrı bir önem kazanmaktadır.

4.1 Kontrol Amaçları

Bir rüzgâr türbini sistemi kontrolünün temel amaçları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Türbinin önceden belirlenen başlatma ve durdurma hızlarında çalışmasını ve durmasını sağlamak ve belli işletme koşullarına karşı düşen kontrolörler arasında geçiş yapmak.
- Nominal rüzgâr hızından büyük hızlarda aerodinamik gücü ve açısal hızı kontrol etmek.
- Kısmi yük bölgesinde rüzgârdan yakalanan enerjiyi maksimize etmek.
- Türbin aksamlarını değişken yüklere karşı korumak.
- Ani rüzgârlarda türbinin istenen cevabı vermesini sağlamak.
- Geniş rüzgâr hızı aralıkları için elektrik enerjisini, şebekeye belirlenen seviyede verebilmek.
- Enerji kalite standartlarını (güç faktörü, harmonikler, vb.) karşılamak.

4.2 Sistem Genel Kontrolü

Sistem genel kontrolörü, türbini bir çalışma durumundan diğerine getiren sistem olarak tanımlanabilir.

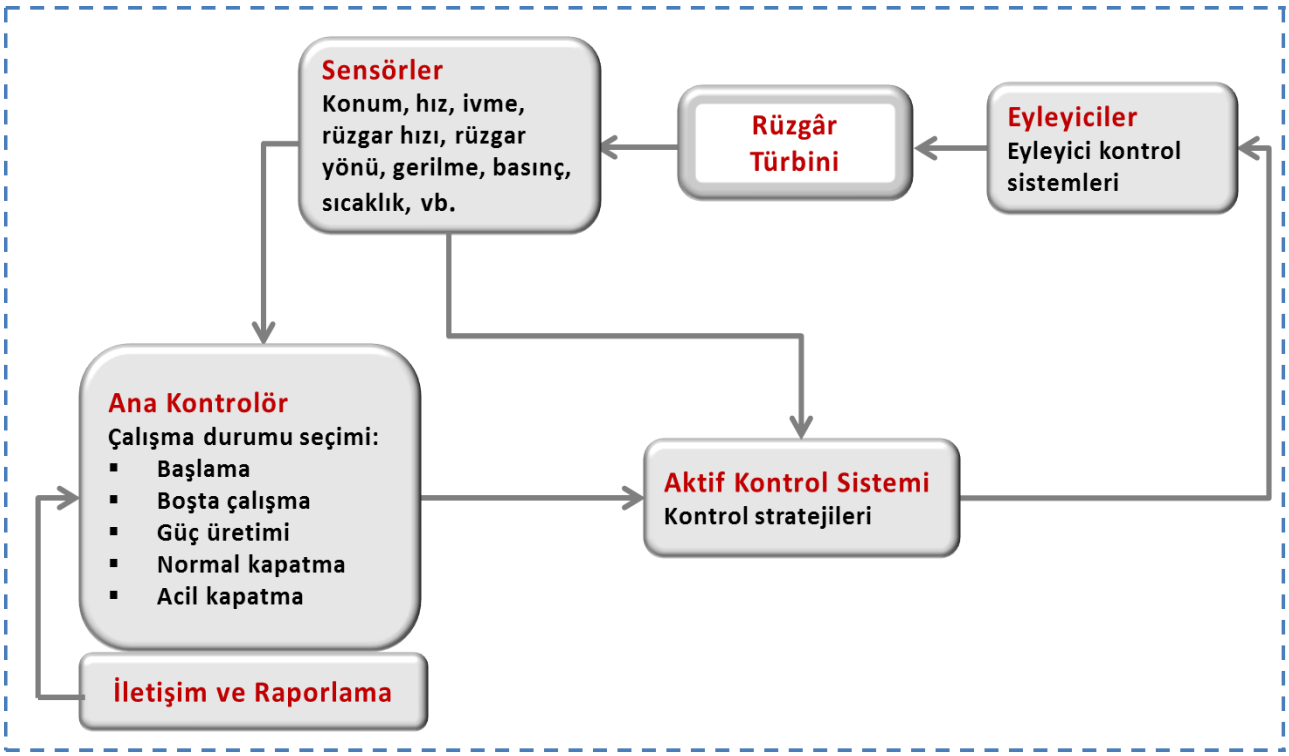
Bu çalışma durumları

- hazırda bekleme,
- devreye alma,
- güç üretimi,

- devreden çıkarma,
- hata durumunda durma

olarak sıralanabilir.

Bir durumdan diğerine geçerken genel kontrolör, istenilen işlem sırasının gerçekleşmesinden sorumludur.

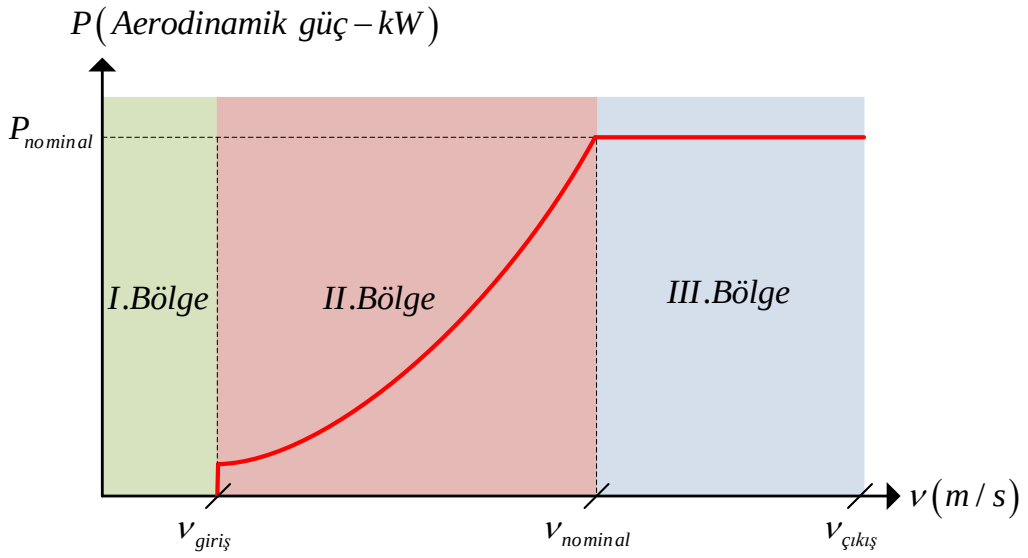


Şekil 4.1 : Sistem genel kontrolü.

4.3 Aerodinamik Güç Kontrolü

Rüzgâr türbinlerinin aerodinamik güç kontrolü türbinin nominal rüzgâr hızı altındaki kısmi yük bölgesinde maksimum enerjiyi yakalaması, nominal hızın üstündeki hızlarda ise türbinin çok hızlı dönüp zarar görmesini engellemek ve türbin hızını optimal seviyede tutarak generatör gücünün sabit tutmak için yapılır [16].

Tipik bir rüzgâr türbinin ideal güç eğrisi Şekil 4.2'de verilmiştir. I. Bölgede rüzgâr hızı çalışma hızının altında olduğundan türbin kapalıdır, güç üretmez. II. Bölge kısmi yük bölgesidir. Burada kontrol sistemi yardımıyla rüzgârdan maksimum enerji alınmaya çalışılır. III. Bölge ise tam yük bölgesi olup burada rüzgâr nominal hızın üzerindedir. Bu bölgede farklı kontrol teknikleriyle rotor hızı ve dolayısıyla generatör gücü sabit tutulmaya çalışılır. Rüzgâr hızı çıkış değerine ulaştığında ise sistemin zarar görmemesi için türbin devreden çıkarılır [17].



Şekil 4.2 : Rüzgâr türbini ideal güç eğrisi.

Türbin güç eğrisini ideale yaklaştırmak amacıyla kullanılan 5 farklı kontrol yönteminden bahsedilebilir [18].

- Pasif durdurma kontrolü (Passive stall control)
- Pasif kanat açısı kontrolü (Passive pitch control)
- Aktif kanat açısı kontrolü (Active pitch control)
- Aktif durdurma kontrolü (Active stall control)
- Yön açısı kontrolü (Yaw control)

4.3.1 Pasif durdurma kontrolü (Passive stall control)

Durdurma (stall) kontrolü kanatların hava akımı ile yaptıkları açı nedeniyle kanat üzerinde oluşan türbülans etkisinin kullanılarak rüzgâr enerjisinin fazlasının kullanılmaması prensibi üzerine kurulmuştur [19].

Durdurma kontrollü sistemler, sabit açılı yani pasif sistemlerden oluşabileceği gibi açı kontrollü aktif sistemlerden de oluşabilir.

Pasif durdurma kontrollü en basit kontrol yapısıdır. Bu şekilde kontrol edilen türbinlerde kanatlar göbeğe sabit bir açı ile bağlıdır. Rüzgâr hızı artınca oluşan durdurma etkisi sonucu kaldırma kuvveti katsayısı C_L'deki azalma ve sürükleme kuvveti katsayısı C_D'deki artma sonucu aerodinamik güç azalır ve güç kontrolü yapılmış olur. Bu sistemler karmaşık kontrol tekniklerine ve hareketli parçalara ihtiyaç duymadığından avantaj sağlarken aerodinamik davranışın belirsizliğinden dolayı dezavantajlıdırlar [15, 18, 19].

4.3.2 Pasif kanat açısı kontrolü (Passive pitch control)

Pasif açı kontrolünde ise temel düşünce; kanatları yüksek hızlarda burularak istenen kanat açısına ulaşacak şekilde tasarlamak, bu şekilde yüksek hızlarda gücü sınırlayarak güç kontrolünü sağlamaktır.

Prensip mantıklı basit gözükse de uygulamada bunu başarmak zordur; çünkü güç kontrolü için gerekli burulma ile kanat üzerine gelen yüklerin oluşturduğu burulma genellikle birbiriyle örtüşmezler [15, 18].

4.3.3 Aktif kanat açısı kontrolü (Active pitch control)

Aktif kanat açısı kontrollü türbinlerde nominal rüzgâr hızının üzerinde kanatların döndürülmesiyle hücum açısı değiştirilerek türbin gücü sabit tutulmaya çalışılır.

Bu türbinler, nominal hız üzerinde sabit güç üretimi sayesinde oldukça kaliteli bir güç çıkısı sağlamaktadırlar, fakat durdurma etkisine göre tasarlanmadıkları için ani rüzgârlara karşı hassastırlar.

Aktif kanat açıcı kontrolünün ana faydaları; enerji yakalama oranını arttırması ve türbininin devreden çıkarılması sırasında rüzgâr yükünü azaltarak frenlemeye kolaylık sağlamasıdır [15].

Kanat açısı kontrollü türbinlerden elde edilecek performans temel olarak kullanılan eyleyici mekanizmalarının hızına ve hassasiyetine bağlıdır. Kanat açısı değişiminin saniyede 5^o ya da daha fazla olması istenir. Böylelikle kuvvetli rüzgârlarda güçteki ani değişmeler sınırlandırılmış olur [20].

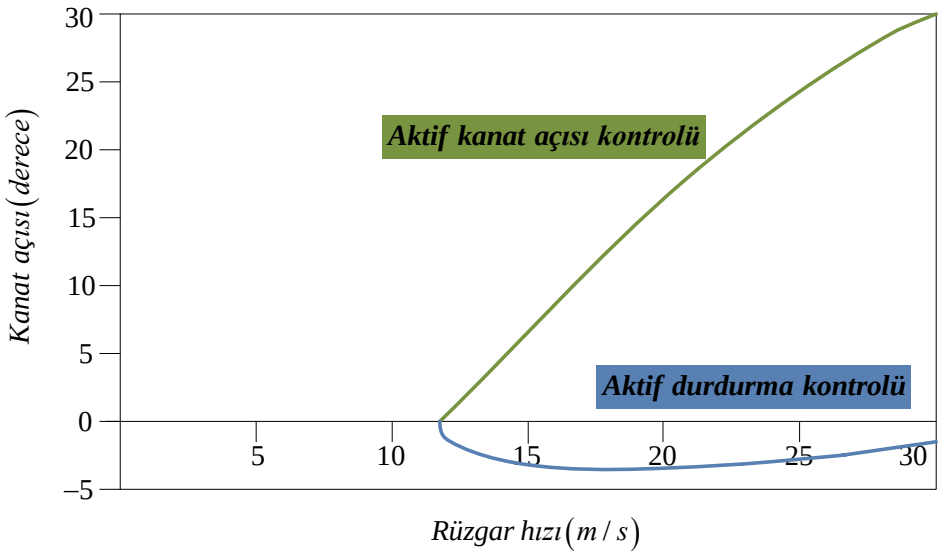
4.3.4 Aktif durdurma kontrolü (Active stall control)

Aktif kanat açısı kontrollü türbinlerde, rüzgâr hızı nominal hızın üzerine çıktığında kanatlar hücum açısını düşürecek şekilde döndürülürken, aktif durdurma kontrolünde kanatlar ters yönde çevrilip, türbinin durdurma (stall) etkisine girmesi ve bu şekilde gücün kontrol edilmesi sağlanır.

Bu kontrolde kantların dönüş yönü, aktif kanat açısı kontrolündekinin tersidir; dolayısıyla aktif durdurma kontrolü, negatif kanat açısı kontrolü (negative pitch control) olarak da bilinir.

Aktif durdurma kontrollü türbinin güç eğrisi kanat açısı kontrollü türbinin güç eğrisiyle büyük benzerlik gösterir.

Aktif durdurma kontrolünün önemli bir avantajı türbinin nominal rüzgâr hızının üzerinde durdurma (stall) etkisine girmesi ve böylece ani yüksek rüzgâr hızlarını daha iyi kompanse edebilmesidir. Ayrıca bu kontrol yapısında güç kontrolü için gerekli kanat açıları, aktif açı kontrolüne göre oldukça düşüktür. Bu sayede türbin rüzgâr hızındaki değişimlere daha hızlı yanıt verebilir [15,18].



Şekil 4.3 : Aktif kanat açısı kontrollü ve aktif durdurma (stall) kontrollü rüzgâr türbinlerinde güç kontrolü için gerekli kanat açıları.

4.3.5 Yön açısı kontrolü (Yaw control)

Yön açısı kontrolü rüzgâr türbininin yönünü her koşulda rüzgârla dik açı yapacak şekilde tutmayı hedefler. Yön açısı kontrolü yukarıda sayılan kontrol yöntemlerine ek olarak kullanılır, tek başına aerodinamik güç kontrolü için yeterli değildir.

Rüzgâr türbininden elde edilen aerodinamik güç yön açısına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir [21].

$$P = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 C_p(\lambda,\beta) v^3 \cos(\theta) \qquad \textbf{(4.1)}$$

Burada θ rüzgâr yönü ile türbin gövdesinin yönü arasındaki açıdır. Görüldüğü gibi θ açısı sıfır olduğunda rüzgâr enerjisinden en iyi şekilde faydalanılacaktır. Dolayısıyla yön açısı kontrolünün temel amacı bu açıyı mümkün oldukça küçük tutmaktır.

Rüzgâr yönü rüzgârın doğası gereği oldukça değişkendir; ancak yön açısı kontrolü ona eşdeğer bir hassaslıkta yapılmaz. Gövde ve rotorun dönme eksenine göre toplam

ataletleri oldukça büyük olduğundan gövdenin dönüşü yavaş olup; bu dönüş hızının, rüzgâr yönünün hassasiyetini yakalaması güçtür. Genellikle rüzgâr yönü belirli bir süre ölçülür, eğer yönde belirgin bir değişme varsa türbin gövdesinin o yöne dönmesi sağlanır. Ayrıca böylelikle mekanik elemanların ömrünü kısaltan küçük yön hareketlerinden de kaçınılabilir [21].

4.4 Kontrol Stratejileri

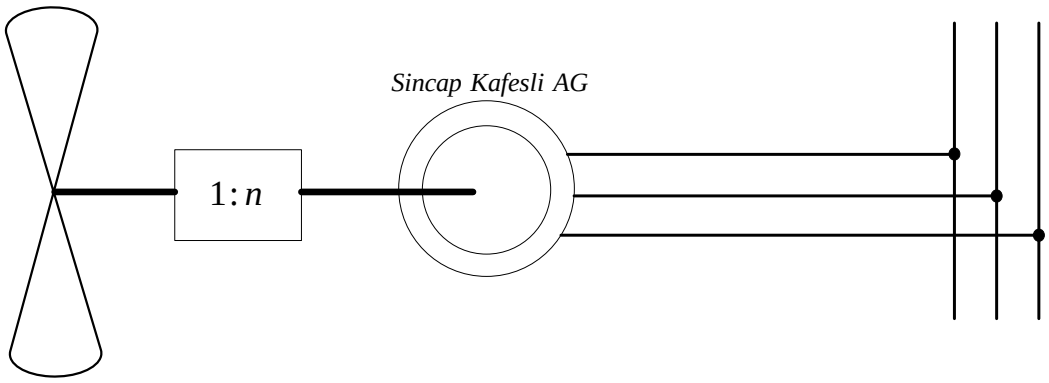
Rüzgâr türbinleri farklı çalışma özelliklerine sahiptir. Farklı çalışma özelliklerindeki türbinler farklı rüzgâr hızları için kontrol amaçlarını yerine getirecek şekilde tasarlanır ve kontrol edilirler.

En yaygın 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 [22]:

- 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)

4.4.1 Sabit hızlı sabit kanat açılı rüzgâr türbini

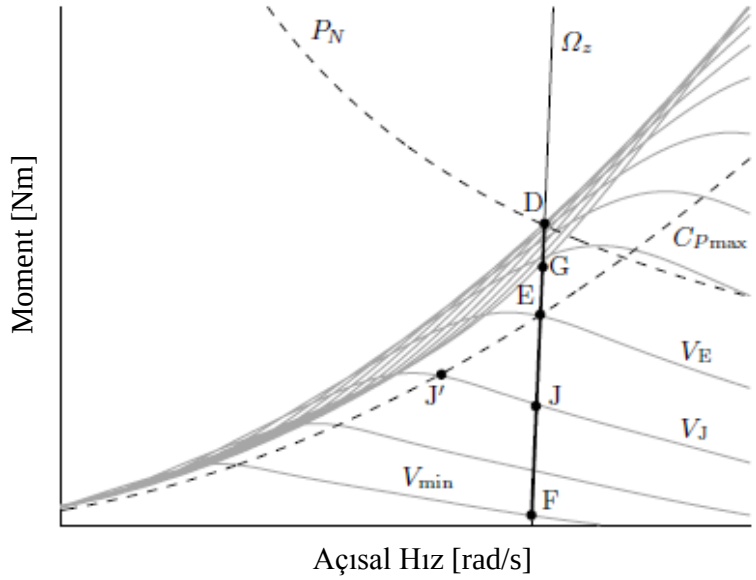
Bu tip rüzgâr türbinlerinde generatör doğrudan şebekeye bağlıdır. Dolayısıyla generatör şaft hızı şebeke frekansına sabitlenir. Generatör hız kontrolü değişken rotor direnci kullanılarak yapılabilir, herhangi bir moment kontrolü uygulanmaz.



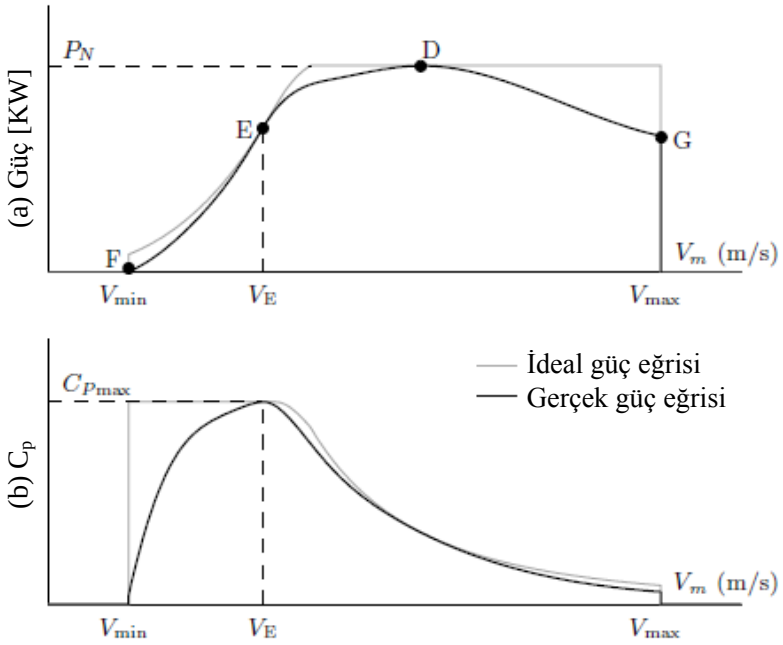
Şekil 4.4 : Doğrudan şebekeye bağlı sincap kafesli asenkron generatör.

Bu türbinler aktif kontrol gerektirmediklerinden düşük maliyetlidir. Buna karşın verimleri oldukça düşüktür [14].

Şekil 4.5'te SH-SK açılı rüzgâr türbininin hız-moment eğrisi verilmiştir. Koyu siyah çizgi generatör moment değişimini, gri soluk çizgiler ise farklı rüzgâr hızları için aerodinamik momenti göstermektedir. İki eğrinin kesiştiği noktalar türbinin farklı rüzgâr hızları için kararlı çalışma noktalarıdır [14].



Şekil 4.5 : SH-SK açılı rüzgâr türbini moment-hız grafiği [14].



Şekil 4.6 : SH-SK açılı türbinin (a) çıkış gücü (b) maksimum güç katsayısı [14].

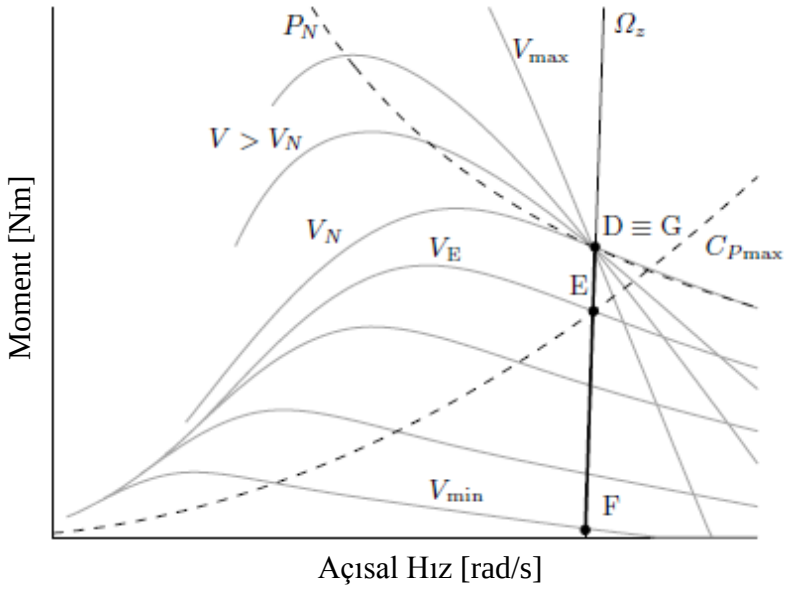
Şekil 4.5'te V değerleri farklı rüzgâr hızlarını, C_{pmax} maksimum güç katsayısı eğrisini, P_n nominal güç eğrisini Ω_z ise sabit generatör hızını ifade eder. Moment çizgisi üzerindeki "D" noktası nominal güç eğrisi üzerindedir. V_D rüzgâr hızından

büyük hızlarda türbin durdurma (stall) etkisine girer ve bu noktadan sonra aerodinamik moment azalacağından çalışma noktası G noktasına geriler. Dolayısıyla bu tip türbinlerde aerodinamik güç kontrolü *pasif durdurma kontrolü* ile sağlanmış olur. Şekil 4.6'da SH-SK açılı türbinin güç eğrisi ve maksimum güç katsayısı eğrisi verilmiştir. Türbin karakteristiğinin idealden oldukçe uzak ve veriminin düşük olduğu görülmektedir [14].

4.4.2 Sabit hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbini

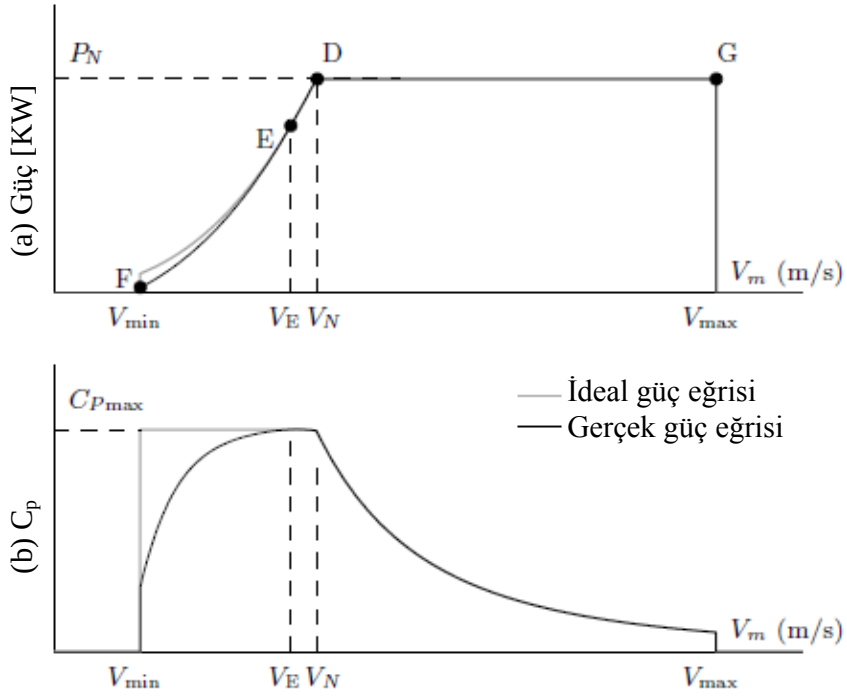
Sabit hızlı değişken kanat açılı türbinler geçtiğimiz 20 yılda özellikle orta ve büyük güçlerde ticari amaçla sıkça kullanılmışlardır. Bu tip türbinlerde de generatör doğrudan şebekeye bağlıdır ve şaft hızı şebeke frekansına sabitlenir. Herhangi bir moment kontrolü yapılmaz. Sabit hızda çalışma maksimum güç kazanımının sadece bir rüzgâr hızında gerçekleşeceği anlamına gelir. Dolayısıyla nominal rüzgâr hızının altında türbinin çalışması optimize edilemez. Nominal rüzgâr hızının üzerinde ise türbin gücü kanat açısının değişimiyle sınırlandırılır. Bu amaçla aktif kanat açısı kontrolü ile aktif durdurma kontrolü kullanılabilir [14].

Şekil 4.7'de SH-DK açılı (aktif kanat açısı kontrollü) rüzgâr türbininin hız-moment eğrisi verilmiştir. Nominal rüzgâr hızının altında kontrol stratejisi SH-SK açılı türbin ile aynıdır. Türbin aynı FD eğrisi üzerinde çalışır. Nominal rüzgâr hızının üzerindeki rüzgâr hızında ise yapılan aerodinamik güç kontrolü ile türbinin, nominal güç eğrisi üzerindeki kararlı D noktasında çalışması sağlanır [14].



Şekil 4.7 : SH-DK açılı rüzgâr türbini moment-hız grafiği [14].

Şekil 4.8'de SH-DK açılı rüzgâr türbininin güç eğrisi ile maksimum güç katsayısı eğrisi görülmektedir. Bu eğriler hem aktif kanat açısı kontrolü hem de aktif durdurma kontrolü için geçerlidir.



Şekil 4.8 : SH-DK açılı türbinin (a) çıkış gücü (b) maksimum güç katsayısı [14].

Nominal rüzgâr hızının altında gerçek güç eğrisi SH-SK açılı rüzgâr türbininkiyle aynıdır ve türbin verimi düşüktür. Nominal rüzgâr hızının üzerindeki rüzgâr hızlarında ise Şekil 4.2'de de verilen ideal güç eğrisi (kanat açısı eyleyicisinde herhangi bir kısıtlama olmaması durumunda) sağlanmıştır.

4.4.3 Değişken hızlı sabit kanat açılı rüzgâr türbini

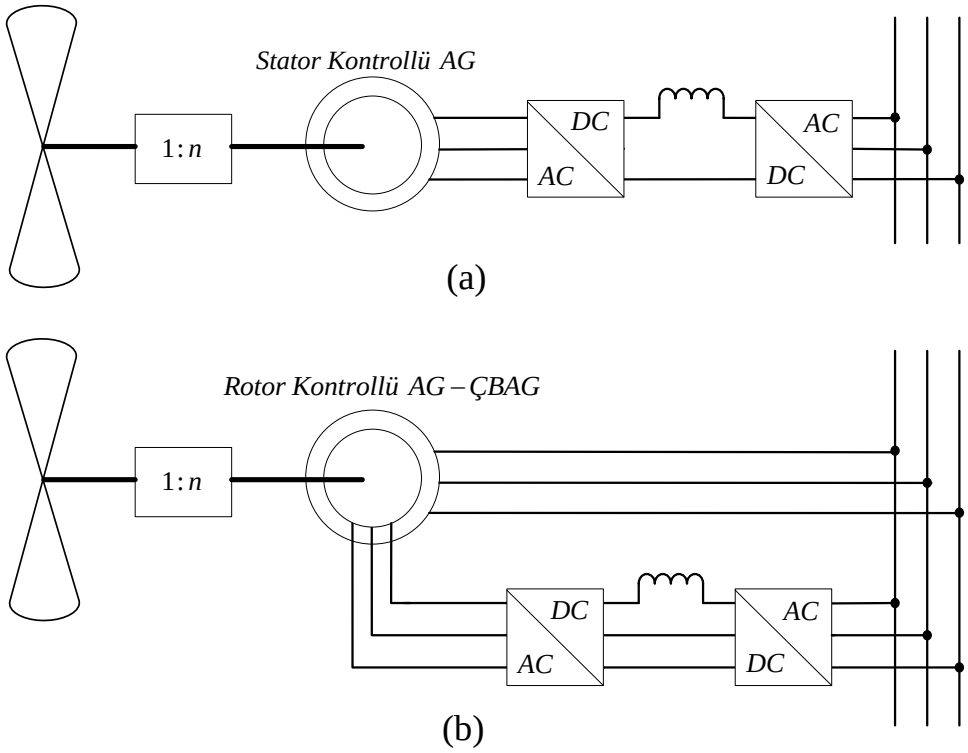
Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde generatör ile şebeke arasında generatör momentini kontrol eden bir frekans konvertörü yer alır. Şaft hızı şebeke frekansına sabitlenmez. Bu amaçla kullanılan birkaç türbin konfigürasyonu aşağıda verilmiştir [23].

Rüzgâr türbinlerini değişken hızlarda çalıştırmak, rüzgârdan çekilen enerjinin arttırılmasını, türbin üzerindeki mekanik yüklerin azaltılmasını ve güç kalitesinin arttırılmasını sağlar.

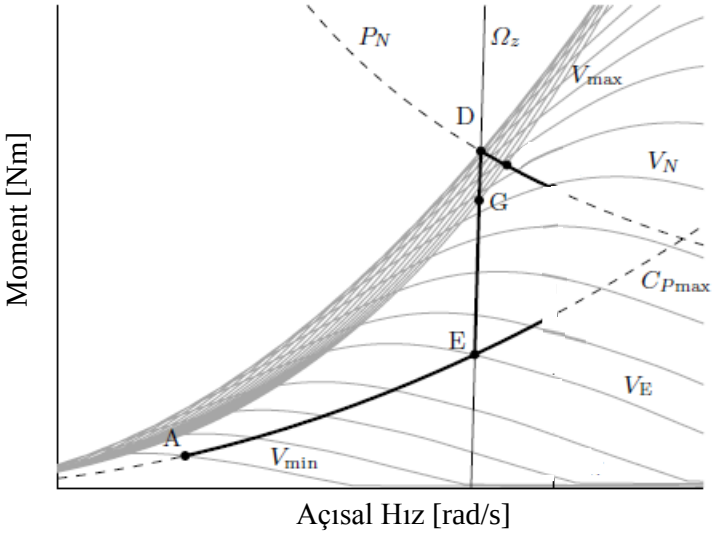
Bu tip rüzgâr türbinlerinde, nominal rüzgâr hızının altındaki rüzgâr hızları için maksimum güç katsayısı elde edilmeye çalışılır. Tepe hız oranı ve kanat açısına bağlı

olan güç katsayısının farklı rüzgâr hızları için istenen değerde tutulması tepe hız oranının dolayısıyla şaft hızının kontrol edilmesiyle sağlanır.

$$\omega_r = \frac{\lambda v}{R} \tag{4.2}$$



Şekil 4.9 : Farklı rüzgâr türbini konfigürasyonları (a) stator kontrollü sincap kafesli asenkron generatör (b) rotor kontrollü asenkron generatör (ÇBAG).



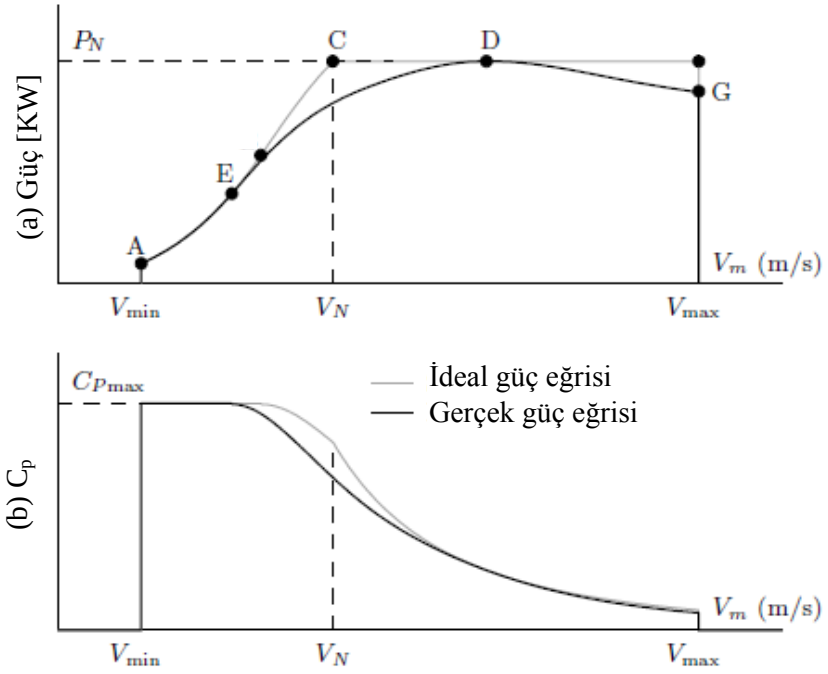
Şekil 4.10 : DH-SK açılı rüzgâr türbini moment-hız grafiği [14].

Rüzgâr hızı arttığında ise türbin SH-SK açılı türbin gibi davranır ve *pasif durdurma kontrolü* ile aerodinamik moment kontrolü sağlanır. Şekil 4.10'da DH-SK açılı rüzgâr türbininin hız-moment eğrisi verilmiştir.

Nominal rüzgâr hızının altında türbin AE eğrisi üzerinde çalışır. Bu bölgede türbin hızı değişkendir. Nominal rüzgâr hızının üzerinde ise türbin karakteristiği SH-SK açılı türbinde olduğu gibi sırasıyla E, D, G noktalarını izler. Şekil 4.11 DH-SK açılı rüzgâr türbininin güç eğrisi ile maksimum güç katsayısı eğrisi göstermektedir. Görüldüğü gibi nominal rüzgâr hızının altında türbin verimi iyiyken, rüzgâr hızı artttıkça türbin verimi düşmektedir.

4.4.4 Değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbini

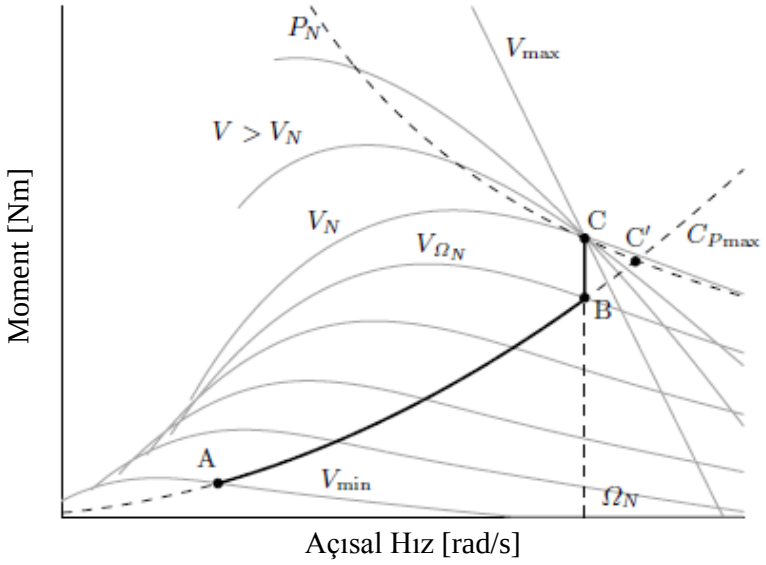
Değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbinleri, sağladıkları kontrol esnekliği sayesinde her geçen gün daha yaygın hale gelmektedir. Bu kontrol stratejisinde rüzgâr türbini, nominal rüzgâr hızının altında sabit kanat açısı ve değişken rotor hızında; nominal rüzgâr hızının üstünde ise değişken kanat açısı ve sabit rotor hızında çalıştırılır. Değişken hızda çalışmasından dolayı Şekil 4.9'da verilen yapılardan biri kullanılır.



Şekil 4.11 : DH-SK açılı türbinin (a) çıkış gücü (b) maksimum güç katsayısı [14].

Aerodinamik moment ise *aktif kanat açısı kontrolü* ya da *aktif durdurma kontrolü* ile kontrol edilir. Nominal rüzgâr hızının üstünde açı kontrolünün yanı sıra generatör

moment kontrolü de yapılabilir. Şekil 4.12'de DH-DK açılı rüzgâr türbininin hız-moment eğrisi görülmektedir.



Şekil 4.12 : DH-DK açılı rüzgâr türbini hız-moment grafiği [14].

Görüldüğü gibi hız-moment eğrisi DH-SK açılı türbin ile SH-DK açılı türbin eğrilerinin birleşiminden oluşur. Rüzgâr hızı ve rotor açısal hızı nominal değerine ulaşana kadar rotor açısal hızı artarken sonrasında rotor açısal hızı sabit tutulur.

Bu tip türbinlerin güç eğrisi ise Şekil 4.2'de verilen ideal güç eğrisini sağlar. Güç katsayısı ise rüzgâr hızı nominal değerine ulaşana kadar maksimum değerinde tutulurken, yüksek hızlarında azaltılarak türbin gücü ve rotor hızı sabit tutulur.

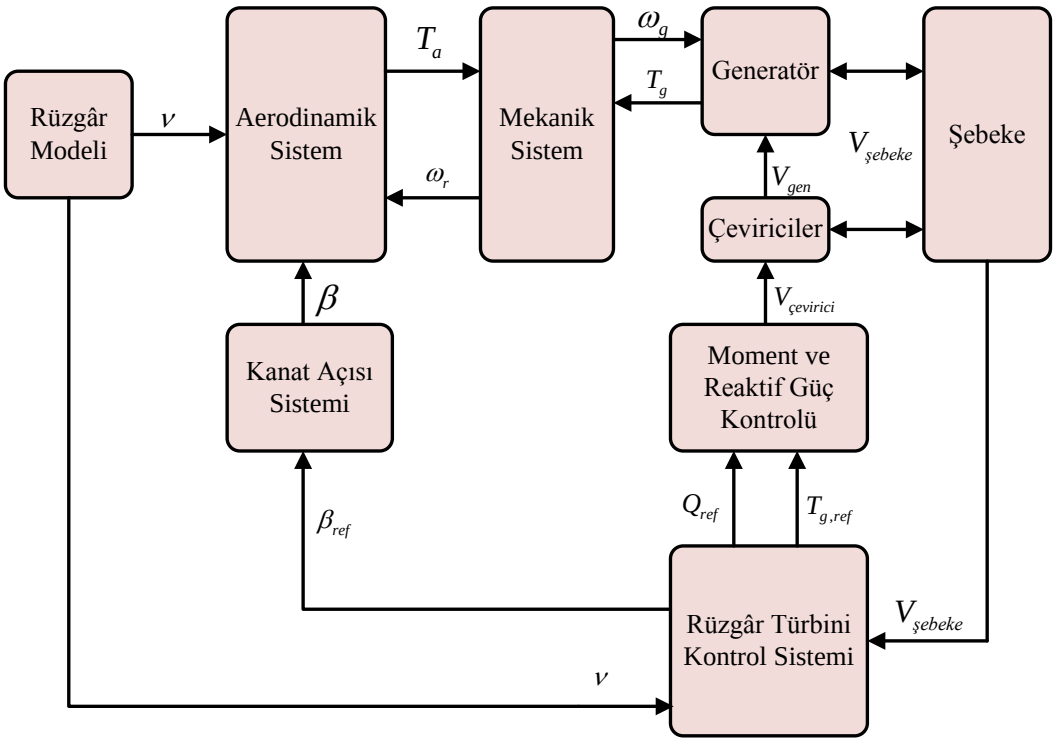
5. DEĞİŞKEN HIZLI DEĞİŞKEN KANAT AÇILI BİR RÜZGÂR TÜRBİNİNİN MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

5.1 Rüzgâr Türbininin Modellenmesi

Değişken hızlı değişken kanat açılı bir rüzgâr sistemi 5 farklı alt sistem kullanılarak modellenebilir [12].

Aerodinamik model; türbin rotor hızını, rüzgâr hızını ve kanat açısını kullanarak türbin momentini ve gücünü hesaplar.

Mekanik sistem; türbin ve generatör momentine bağlı olarak rotor ve generatör açısal hızını hesaplar. Elektriksel sistem; generatör momentini şebeke akımına çeviren generatör ve güç çeviricilerinin modellerini kapsar. Kanat açısı mekanizması; kanat açısı referansını kullanarak kanat açısı dinamiklerini hesaplar.



Şekil 5.1 : Değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbininin blok şeması [12].

Kontrol sistemi; sistem dinamiklerine bakarak referans generatör momenti, referans reaktif güç ve referans kanat açısını hesaplar.

Şekil 5.1'de farklı alt sistemler arasındaki etkileşimler görülmektedir. Burada v rüzgâr hızı, T_a aerodinamik moment, ω_r açısal rotor hızı, T_g generatör momenti, ω_g açısal generatör hızı, V_{gen} generatör gerilimi, $V_{çevirici}$ çevirici gerilimi, $V_{şebeke}$ şebeke gerilimi, Q_{ref} referans generatör reaktif gücü, $T_{g,ref}$ referans generator momenti, β_{ref} referans kanat açısı, β ise kanat açısıdır.

5.1.1 Aerodinamik model

Şekil 5.1'de de görüldüğü gibi aerodinamik model bloğunun çıkışı rüzgâr türbini şaftında oluşan momenttir. Aerodinamik moment daha önce de açıklandığı gibi kanat aerodinamiğine, yani kanatların rüzgâr enerjisini yakalama kapasitesini gösteren C_p güç katsayısına, kanat boyuna, rüzgâr hızına, kanat açısına ve şaft hızına bağlıdır. Bu büyüklükler arasındaki ilişki ise

$$P = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 C_p(\lambda,\beta)v^3 \qquad \textbf{(5.1)}$$

eşitliği ile ifade edilir.

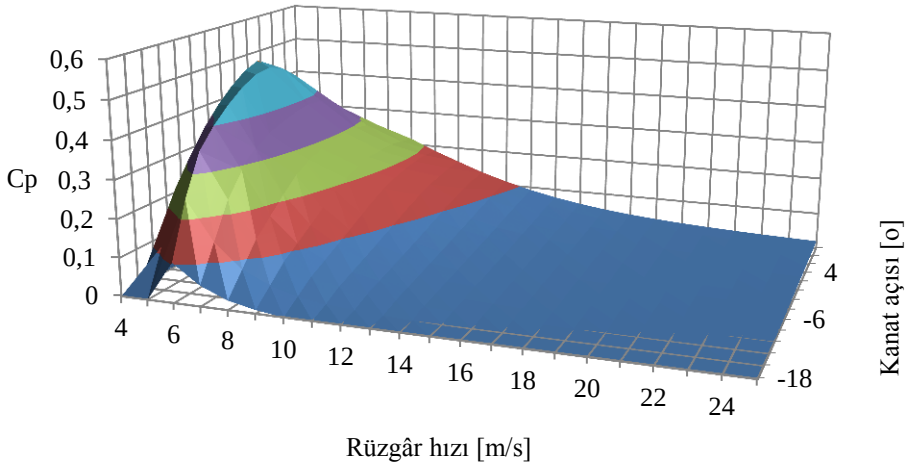
Tepe hız oranı (λ) ve kanat açısına (β) bağlı olan güç katsayısı (C_p) yaygın olarak aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$C_p = k_1\left(\frac{k_2}{\lambda_i} - k_3\beta - k_4\beta^{k_5} - k_6\right)e^{k_7/\lambda_i} \qquad \textbf{(5.2)}$$

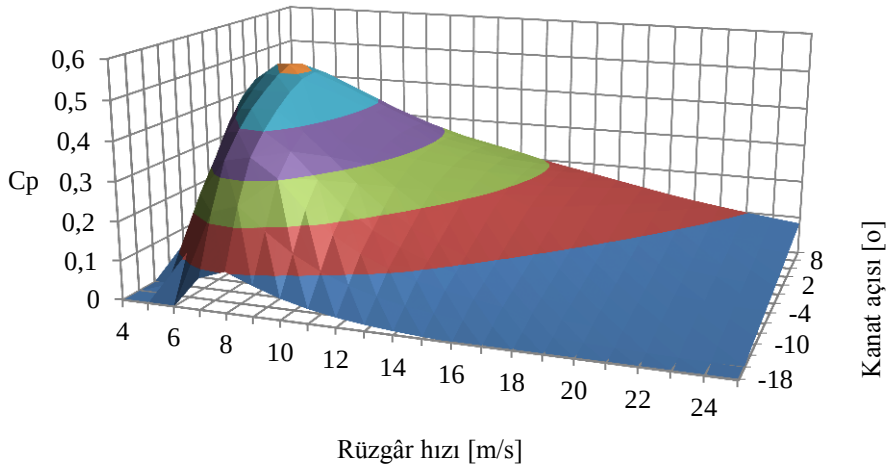
$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + k_8} \qquad \textbf{(5.3)}$$

Burada k parametreleri türbin karakteristikleri ile ilgilidir.

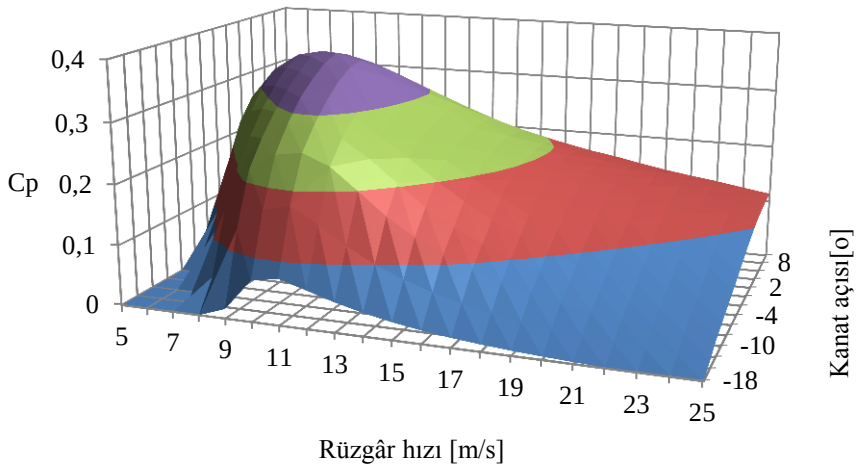
Genellikle güç katsayısı C_p'nin tepe hız oranı ve kanat açısı ile ya da kanat açısı, açısal hız ve rüzgâr hızı ile değişimini gösteren eğriler türbin üreticileri tarafından verilir. Aşağıda bu çalışmada kullanılacak rüzgâr türbini güç katsayısının farklı açısal hızlar için kanat açısı ve rüzgâr hızına göre değişimi verilmektedir. Görüldüğü gibi her yüzeyde C_p'nin değeri Betz limiti olan 0.5926'dan küçüktür. Bu çalışmada rüzgâr türbininin aerodinamik modeli oluşturulurken; denklem **(5.2)** ve **(5.3)**'teki formüller yerine doğrudan türbin verilerinin yer aldığı tablolar kullanılmıştır.



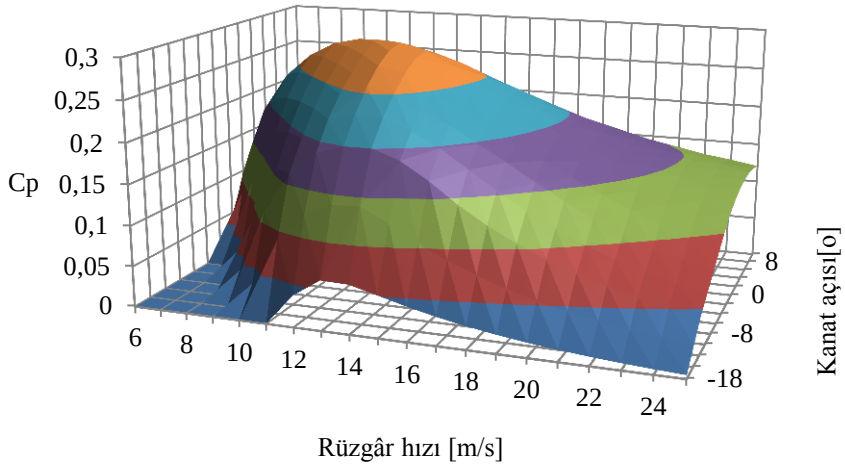
Şekil 5.2 : 10 dev/dk açısal hız için C_p yüzeyi.



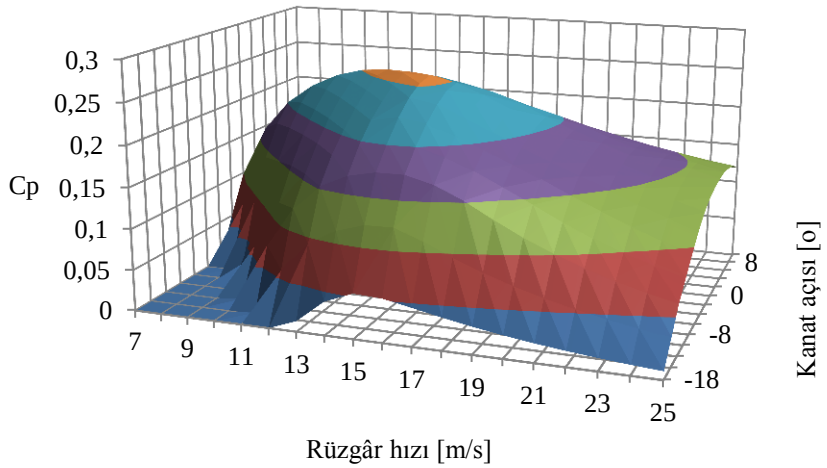
Şekil 5.3 : 20 dev/dk açısal hız için C_p yüzeyi.



Şekil 5.4 : 27.8 dev/dk açısal hız için C_p yüzeyi.



Şekil 5.5 : 35 dev/dk açısal hız için C_p yüzeyi.



Şekil 5.6 : 40 dev/dk açısal hız için C_p yüzeyi.

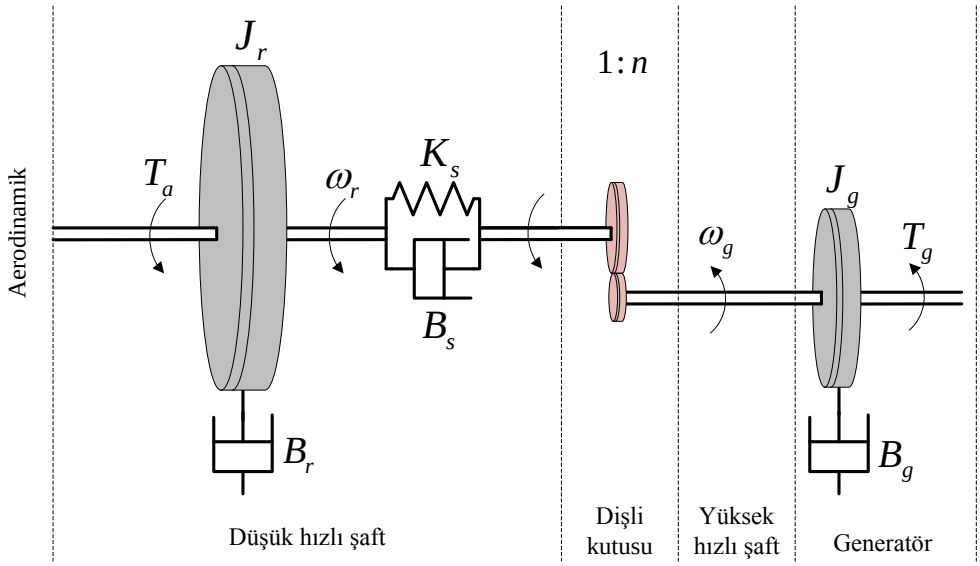
5.1.2 Mekanik model

Rüzgâr türbininin mekanik modeli, türbin rotoru ile generatör arasındaki mekanik aktarım kısmının modellenmesini kapsamaktadır.

Rüzgâr türbininin rotorunda oluşan dairesel hareket generatör şaftına mekanik aktarım ile iletilir. Bu iletim mekanizması kullanılan generatöre göre farklılık gösterir.

Asenkron generatörlerde, rotordaki dairesel hareket generatör şaftına dişli kutulardan geçirilerek aktarılır. Rotordaki dairesel hareket genellikle düşük hızlıdır ve bu hareketin gerçekleştiği rotor şaftındaki moment ise yüksek olur. Dişli kutusu ile bu hız arttırılır. Böylelikle generatör yüksek hızda ve düşük momentte çalıştırılmış olur.

Bu çalışmada mekanik dişli kutusunun kütlesi ihmal edilmiş ve Şekil 5.7'de verilen iki kütleli mekanik model kullanılmıştır.



Şekil 5.7 : Rüzgâr türbini iki kütleli mekanik modeli.

Şekil 5.7'de T_a türbin aerodinamik momenti, T_g generatör momenti, n dişli çevirme oranı, ω_r rotor açısal hızı, ω_g generatör açısal hızı, B_r rotor sönümlenme katsayısı, B_g generatör sönümlenme katsayısı, B_s şaft sönümlenme katsayısı, K_s şaft burkulma katsayısı, J_r rotor eylemsizliği ve J_g generatör eylemsizliğidir. Bu yapıda generatör momenti T_g sisteme frenleme momenti olarak etkir [24].

Rotor ve generatör dinamikleri dönel hareket yasaları kullanılarak aşağıdaki gibi diferansiyel denklemlerle modellenebilir.

$$T_a = J_r\dot{\omega}_r + B_r\omega_r + K_s\left(\theta_r - \frac{\theta_g}{n}\right) + B_s\left(\omega_r - \frac{\omega_g}{n}\right) \tag{5.4}$$

$$T_g + J_g\dot{\omega}_g + B_g\omega_g = \frac{1}{n}\left[K_s\left(\theta_r - \frac{\theta_g}{n}\right) + B_s\left(\omega_r - \frac{\omega_g}{n}\right)\right] \tag{5.5}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \tag{5.6}$$

$$\omega_g = \frac{d\theta_g}{dt} \tag{5.7}$$

Burada $\dot{\omega}_r$ ve $\dot{\omega}_g$ sırasıyla rotor ve generatör açısal hızlarının türevini; θ_r ve θ_g ise sırasıyla rotor ve generatör açısal konumlarını gösterir. Dişli çevirme oranı n ise

$$n = \frac{\omega_g}{\omega_r} \tag{5.8}$$

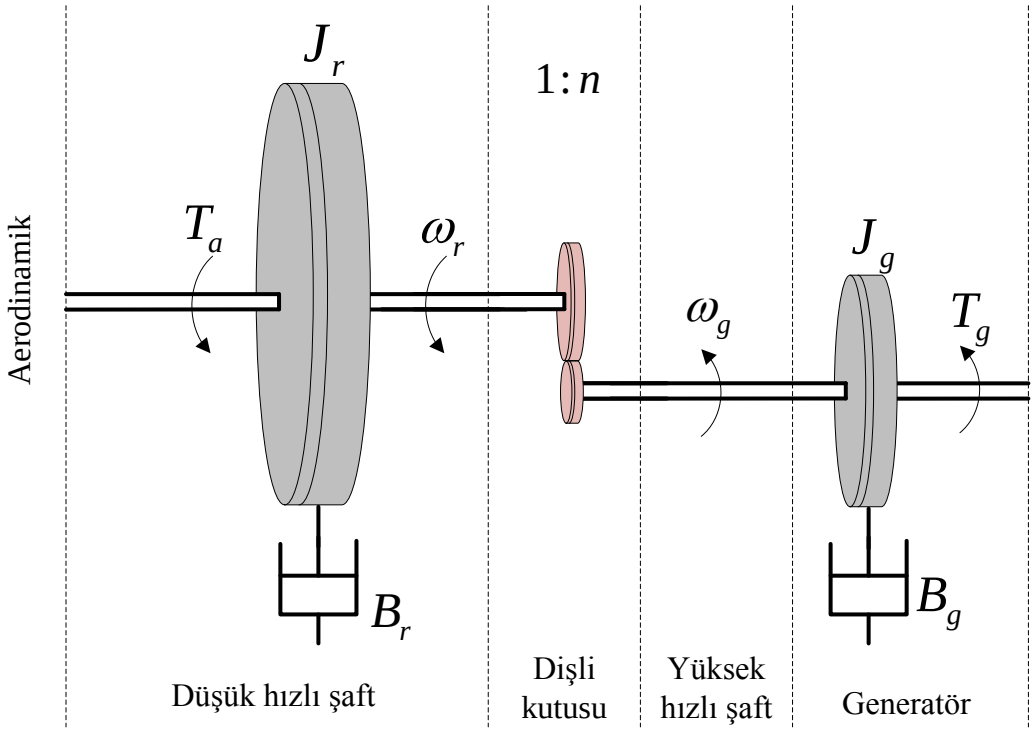
şeklinde tanımlanır.

Elde edilen bu model düşük hızlı şaftın rijit olduğu ve sönümlenme katsayının ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu varsayımı altında basitleştirilebilir. Bu durumda J_T türbinin toplam ataletini, B_T ise türbinin toplam viskoz sürtünmesini göstermek üzere denklem **(5.4)** ve **(5.5)**'ten aşağıdaki eşitlik elde edilebilir [24, 25].

$$T_a - T_g = \left(J_r + n^2 J_g\right)\dot{\omega}_r + \left(B_r + n^2 B_g\right)\omega_r = J_T\dot{\omega}_r + B_T\omega_r \tag{5.9}$$

$$\omega_g = n\omega_r \tag{5.10}$$

Bu durumda elde edilen mekanik model Şekil 5.8'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 5.8 : Rüzgâr türbini mekanik modeli.

Bu çalışmada rüzgâr türbininin mekanik modeli için denklem **(5.9)** ve **(5.10)**'daki eşitlikler kullanılmış ve model parametreleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Mekanik model parametreleri.

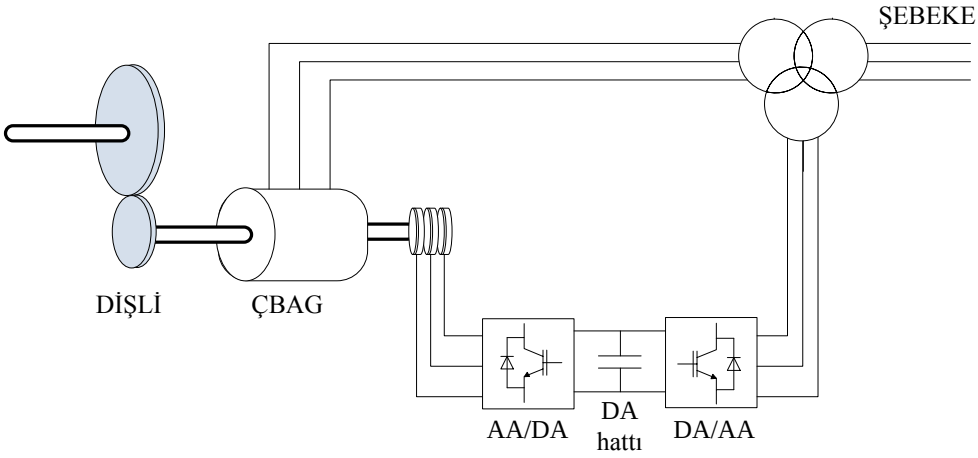
Parametre	**Değer**
Türbin toplam eylemsizliği (J_t)	67650 kg m^2
Türbin toplam viskoz sürtünmesi (B_t)	0.5 Nm s/rad
Dişli çevirme oranı (n)	32

5.1.3 Elektriksel model

Daha önce de belirtildiği gibi değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde generatör ile şebeke arasında generatör momentini kontrol eden bir frekans konvertörü yer alır.

Asenkron generatörler, rüzgâr türbinlerinde en yaygın kullanılan elektrik makineleridir. Bu çalışmada çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) kullanılmıştır.

Çift beslemeli asenkron generatörler (ÇBAG) isimlerinden anlaşılacağı üzere hem doğrudan stator üzerinden hem de güç elektroniği elemanları yardımıyla rotor üzerinden beslenirler. Sincap kafesli asenkron generatör ile güç çeviricileri toplam ÇBAG sistemini oluştururlar [26].



Şekil 5.9 : Çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) sistemi.

Şekil 5.9'da çift beslemeli asenkron generatörün (ÇBAG) kullanıldığı bir rüzgâr güç sistemi görülmektedir. Rotor sargısı ise iki adet DGM tekniğini kullanan eviriciden

oluşan, dört bölgeli güç çeviricisi üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Rotor tarafındaki çevirici kontrol sistemi, elektromanyetik momenti düzenler ve makinanın mıknatıslanmasını sürdürebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki konverter kontrol sistemi ise, DA barasını regüle eder [27, 28].

Çift beslemeli asenkron generatörler senkron altı ve senkron üstü hızda çalıştırılabilirler. Senkron üstü modda çalışmada güç akışı rotordan şebekeye doğru olup kayma negatiftir. Senkron altı modda çalışmada ise güç akışı şebekeden rotora doğru olup kayma pozitif olmaktadır.

Çift beslemeli asenkron generatörlerin diğer generatörlere kıyasla bazı üstün özellikleri mevcuttur. Sadece rotorun kayma gücünü kontrol etmeye yarayan çevirici sistemine sahip olduğu için, toplam sistem gücünün yaklaşık %25'i oranında bir evirici kullanılmaktadır. Bu da maliyeti azaltmaktadır. Sistemde kullanılan filtreler toplam sistem gücünün 0.25 p.u.'lik kısmı için gerekli olduğundan filtre maliyeti de azalmaktadır. Aynı zamanda evirici harmonikleri, toplam sistem harmoniklerinin daha küçük bir bölümünü temsil etmektedir. Ayrıca makine harici bozucu etkilere karşı dayanıklılık ve kararlılık göstermektedir. Bu sistemin en büyük dezavantajı ise periyodik bakıma ihtiyaç duyan bilezik yapısının varlığıdır [27, 28].

5.1.3.1 Çift beslemeli asenkron generatörün matematiksel modeli

3 fazlı p kutup çiftli bir asenkron makinenin gerilim eşitlikleri

$$(\boldsymbol{f}_{abcs})^T = [\, f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs} \,] \tag{5.11}$$

$$(\boldsymbol{f}_{abcr})^T = [\, f_{ar} \quad f_{br} \quad f_{cr} \,] \tag{5.12}$$

olmak üzere aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\boldsymbol{v}_{abcs} = \boldsymbol{r}_s \boldsymbol{i}_{abcs} + \dot{\boldsymbol{\lambda}}_{abcs} \tag{5.13}$$

$$\boldsymbol{v}_{abcr} = \boldsymbol{r}_r \boldsymbol{i}_{abcr} + \dot{\boldsymbol{\lambda}}_{abcr} \tag{5.14}$$

Burada s ve r alt indisleri sırasıyla stator ve rotora ilişkin değişken ve parametreleri ifade etmektedir.

r_s ve r_r diyagonal matrisler olup sırasıyla stator ve rotor sargı dirençlerini, λ_{abcs} ve λ_{abcr} stator ve rotor akılarını ifade etmektedir.

$$\boldsymbol{r}_{s,r} = \begin{bmatrix} r_{s,r} & 0 & 0 \\ 0 & r_{s,r} & 0 \\ 0 & 0 & r_{s,r} \end{bmatrix} \tag{5.15}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abcs} \\ \boldsymbol{\lambda}_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{L}_s & \boldsymbol{L}_{sr} \\ (\boldsymbol{L}_{sr})^T & \boldsymbol{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{i}_{abcs} \\ \boldsymbol{i}_{abcr} \end{bmatrix} \tag{5.16}$$

$$\boldsymbol{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \tag{5.17}$$

$$\boldsymbol{L}_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \tag{5.18}$$

$$\boldsymbol{L}_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \tag{5.19}$$

Burada L_{ls} ve L_{ms} sırasıyla stator sargılarının kaçak ve mıknatıslanma endüktanslarını, L_{lr} ve L_{mr} sırasıyla rotor sargılarının kaçak ve mıknatıslanma endüktanslarını, L_{sr} endüktansı ise stator ve rotor arasındaki ortak endüktansı göstermektedir. Mıknatıslanma endüktansları ile ortak endüktanslar aynı manyetik akı yolu üzerinde tanımlandığından, N_s ve N_r sırasıyla stator ve rotor sarım sayılarını göstermek üzere aralarında

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \tag{5.20}$$

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{N_s} \right)^2 L_{ms} \tag{5.21}$$

ilişkileri mevcuttur.

θ_r elektriksel açısal konum olup θ_g rotorun gerçek açısal konumunu göstermek üzere

$$\theta_r = p\, \theta_g \tag{5.22}$$

şeklinde ifade edilir.

Rotor değişkenleri stator sargılarına indirgenirse

$$\boldsymbol{i}'_{abcr} = \frac{N_r}{N_s} \boldsymbol{i}_{abcr} \tag{5.23}$$

$$\boldsymbol{v}'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} \boldsymbol{v}_{abcr} \tag{5.24}$$

$$\boldsymbol{\lambda}'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} \boldsymbol{\lambda}_{abcr} \tag{5.25}$$

$$\boldsymbol{L}'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} \boldsymbol{L}_{sr} = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \tag{5.26}$$

$$\boldsymbol{L}'_r = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 \boldsymbol{L}_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \tag{5.27}$$

$$\boldsymbol{L}'_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 \boldsymbol{L}_{lr} \tag{5.28}$$

Bu durumda makinenin stator sargılarına indirgenmiş gerilim denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\boldsymbol{v}_{abcs} = \boldsymbol{r}_s \boldsymbol{i}_{abcs} + \dot{\boldsymbol{\lambda}}_{abcs} \tag{5.29}$$

$$\boldsymbol{v}'_{abcr} = \boldsymbol{r}'_r \boldsymbol{i}_{abcr} + \dot{\boldsymbol{\lambda}}'_{abcr} \tag{5.30}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abcs} \\ \boldsymbol{\lambda}'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{L}_s & \boldsymbol{L}'_{sr} \\ \left(\boldsymbol{L}'_{sr}\right)^T & \boldsymbol{L}'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{i}_{abcs} \\ \boldsymbol{i}'_{abcr} \end{bmatrix} \tag{5.31}$$

$$\boldsymbol{r}'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 \boldsymbol{r}_r \tag{5.32}$$

Makinenin elektromanyetik momenti ise

$$T_e = p\left(\boldsymbol{i}_{abcs}\right)^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} \left[\boldsymbol{L}'_{sr}\right] \boldsymbol{i}'_{abcr} \tag{5.33}$$

formülü ile hesaplanır. Makinenin momenti ile hızı arasında T_L asenkron makinenin şaftındaki pozitif yük momenti ve J rotor eylemsizliği olmak üzere

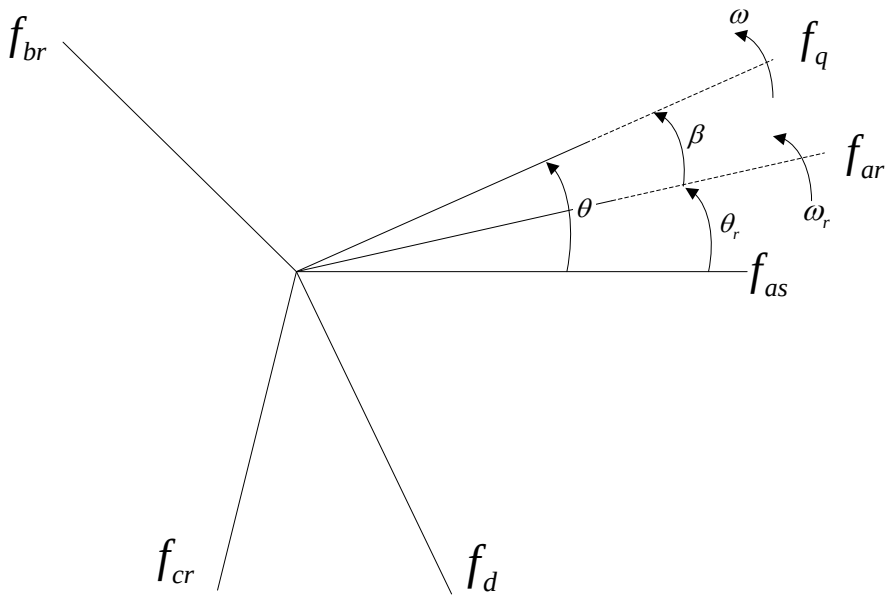
$$T_e = J\frac{\dot{\omega}_r}{p} + T_L \tag{5.34}$$

ilişkisi mevcuttur.

Yukarıda verilen denklemler incelendiğinde 3 fazlı bir asenkron makinenin 3 tanesi statora, 3 tanesi rotora ve 1 tanesi de mekanik kısma ait 7 adet denklemle modellendiği görülmektedir. Modelin doğrusal olmayan çok sayıda diferansiyel denklemden oluşması ve θ_r'ya bağlı olması matematiksel analiz, bilgisayar simülasyonları ve kontrol algoritmaları için kullanımını güçleştirmiştir. Bu nedenle modelin uygun dönüşümler kullanılarak sadeleştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır [29].

5.1.3.2 dq eksen takımı dönüşümü

Çift beslemeli asenkron makinenin denklemleri şebekeye aktarılan aktif ve reaktif güçlerin kontrolünü bağımsız olarak yapılmasına imkan verdiğinden dolayı d-q eksen takımında ifade edilmiştir. Şekil dq eksen takımının yerleşimi gösterilmiştir.



Şekil 5.10 : dq eksen takımı.

Buna göre kullanılacak olan dönüşüm matrisleri stator ve rotor için sırasıyla aşağıda verildiği gibidir.

$$K_s = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(5.35)}$$

$$K_r = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos(\beta) & \cos\left(\beta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\beta+\frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\beta) & \sin\left(\beta-\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\beta-\frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(5.36)}$$

$$\beta = \theta - \theta_r \qquad \textbf{(5.37)}$$

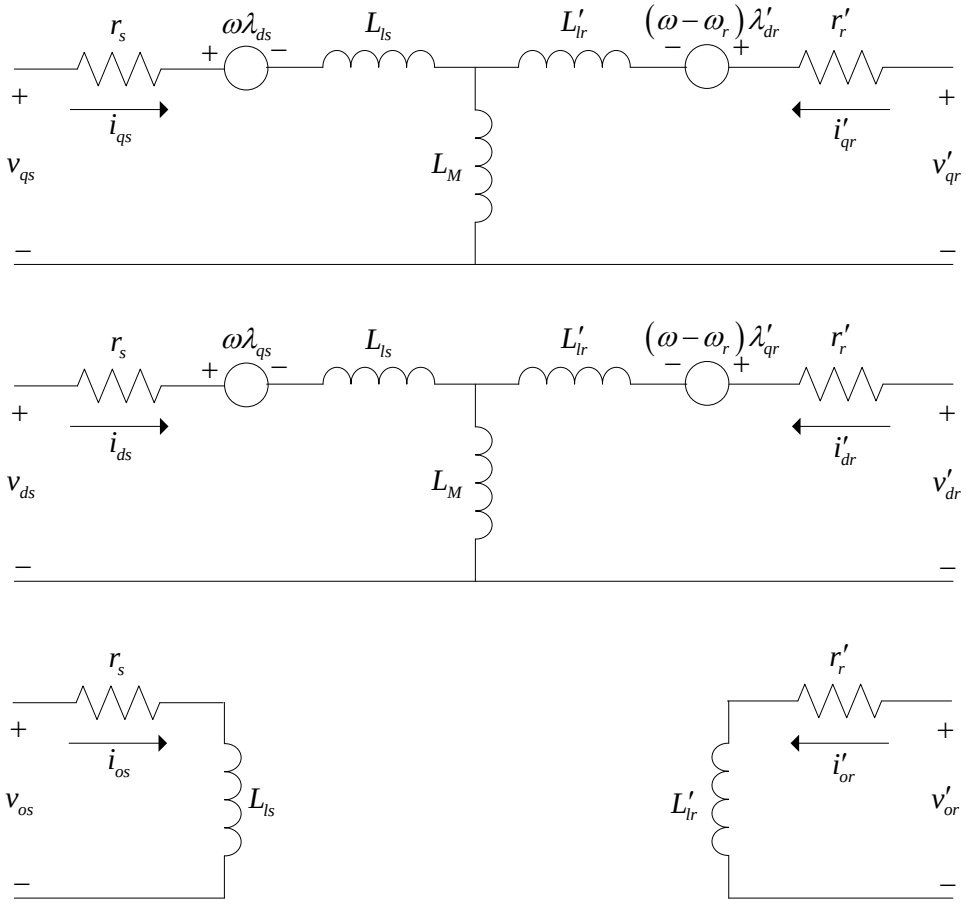
$$\boldsymbol{f}_{qdos} = \boldsymbol{K}_s \boldsymbol{f}_{abcs} \tag{5.38}$$

$$\boldsymbol{f}'_{qdor} = \boldsymbol{K}_r \boldsymbol{f}'_{abcr} \tag{5.39}$$

Burada θ generatör eşitliklerinin ifade edileceği herhangi bir eksen takımının konumunu göstermektedir.

5.1.3.3 dq eksen takımı modeli

Şekil 5.11'de çift beslemeli asenkron generatörün herhangi bir ω değeri için dq eksen takımındaki eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 5.11 : ÇBAG'ün dq eksen takımındaki eşdeğer devre şeması.

Makinenin gerilim eşitlikleri aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$\boldsymbol{v}_{qdos} = \boldsymbol{r}_s \boldsymbol{i}_{qdos} + \omega \boldsymbol{\lambda}_{dqs} + \dot{\boldsymbol{\lambda}}_{qdos} \tag{5.40}$$

$$\boldsymbol{v}'_{qdor} = \boldsymbol{r}'_r \boldsymbol{i}'_{qdor} + (\omega - \omega_r)\boldsymbol{\lambda}'_{dqr} + \dot{\boldsymbol{\lambda}}'_{qdor} \tag{5.41}$$

$$\left(\boldsymbol{\lambda}_{dqs}\right)^{T}=\begin{bmatrix}\lambda_{ds} & -\lambda_{qs} & 0\end{bmatrix} \tag{5.42}$$

$$\left(\boldsymbol{\lambda}'_{dqr}\right)^{T}=\begin{bmatrix}\lambda_{dr} & -\lambda_{qr} & 0\end{bmatrix} \tag{5.43}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{\lambda}_{qdos}\\ \boldsymbol{\lambda}'_{qdor}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{K}_s\boldsymbol{L}_s\left(\boldsymbol{K}_s\right)^{-1} & \boldsymbol{K}_s\boldsymbol{L}_{sr}\left(\boldsymbol{K}_r\right)^{-1}\\ \boldsymbol{K}_r\left(\boldsymbol{L}'_{sr}\right)^{T}\left(\boldsymbol{K}_s\right)^{-1} & \boldsymbol{K}_r\boldsymbol{L}'_r\left(\boldsymbol{K}_r\right)^{-1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{i}_{qdos}\\ \boldsymbol{i}'_{qdor}\end{bmatrix} \tag{5.44}$$

Gerilim eşitlikleri sıklıkla aşağıda verilen genişletilmiş formlarıyla yazılır.

$$v_{qs}=r_s i_{qs}+\omega\lambda_{ds}+\dot{\lambda}_{qs} \tag{5.45}$$

$$v_{ds}=r_s i_{ds}-\omega\lambda_{qs}+\dot{\lambda}_{ds} \tag{5.46}$$

$$v_{os}=r_s i_{os}+\dot{\lambda}_{os} \tag{5.47}$$

$$v'_{qr}=r'_r i'_{qr}+\left(\omega-\omega_r\right)\lambda'_{dr}+\dot{\lambda}'_{qr} \tag{5.48}$$

$$v'_{dr}=r'_r i'_{dr}-\left(\omega-\omega_r\right)\lambda'_{qr}+\dot{\lambda}'_{dr} \tag{5.49}$$

$$v'_{or}=r'_r i'_{or}+\dot{\lambda}'_{or} \tag{5.50}$$

$$\lambda_{qs}=L_s i_{qs}+L_M i'_{qr} \tag{5.51}$$

$$\lambda_{ds}=L_s i_{ds}+L_M i'_{dr} \tag{5.52}$$

$$\lambda_{os}=L_{ls} i_{os} \tag{5.53}$$

$$\lambda'_{qr}=L'_r i'_{qr}+L_M i_{qs} \tag{5.54}$$

$$\lambda'_{dr}=L'_r i'_{dr}+L_M i_{ds} \tag{5.55}$$

$$\lambda'_{or}=L'_{lr} i'_{or} \tag{5.56}$$

$$L_M=\frac{3}{2}L_m \tag{5.57}$$

Generatör momenti ise

$$T_e = \frac{3}{2} p\left(\lambda_{qr} i_{dr} - \lambda_{dr} i_{qr}\right) = \frac{3}{2} p\left(\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}\right) \quad \textbf{(5.58)}$$

şeklinde ifade edilir.

Generatör moment kontrolörü tasarımını kolaylaştırmak için çıkarılan model belli varsayımlar altında basitleştirilebilir. Bu amaçla stator akı vektörü baz olarak alınmıştır ($\theta = \theta_s, \omega = \omega_s$). Stator akısı d-ekseni üzerinde ve sabit olacak şekilde seçildiğinde, d-eksen akısının türevi ile q – ekseninin stator akı bileşeni sıfır olacaktır. Ayrıca stator sargı direnci çok küçük olduğundan ihmal edilmiştir.

$$\lambda_{qs} = 0 \quad \textbf{(5.59)}$$

$$\dot{\lambda}_{ds} = 0 \quad \textbf{(5.60)}$$

$$r_s = 0 \quad \textbf{(5.61)}$$

$$\lambda_{qs} = 0 \Rightarrow i_{qs} = -\frac{L_M}{L_s} i'_{qr} \quad \textbf{(5.62)}$$

$$\dot{\lambda}_{ds} = 0 \Rightarrow \dot{i}_{ds} = -\frac{L_M}{L_s} \dot{i}'_{dr} \quad \textbf{(5.63)}$$

Bu durumdaki ÇBAG gerilim denklemleri aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$v_{ds} = 0 \quad \textbf{(5.64)}$$

$$v_{qs} = \omega_s \lambda_{ds} \quad \textbf{(5.65)}$$

$$v'_{dr} = r'_r i'_{dr} - \left(\omega_s - \omega_r\right)\left(L'_r - \frac{{L_M}^2}{L_s}\right) i'_{qr} + \left(L'_r - \frac{{L_M}^2}{L_s}\right) \dot{i}'_{dr} \quad \textbf{(5.66)}$$

$$v'_{qr} = r'_r i'_{qr} - \left(\omega_s - \omega_r\right)\left(L'_r - \frac{{L_M}^2}{L_s}\right) i'_{dr} + \frac{L_M}{L_s} \lambda_{ds} + \left(L'_r - \frac{{L_M}^2}{L_s}\right) \dot{i}'_{qr} \quad \textbf{(5.67)}$$

Generatörün güç eşitlikleri ise aşağıdaki gibidir.

$$T_e = -\frac{3}{2} p \frac{L_M}{L_s} \frac{v_{qs}}{\omega_s} i'_{qr} \tag{5.68}$$

$$P_s = \frac{3}{2}\left(v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds}\right) = -\frac{3}{2} \frac{L_M}{L_s} v_{qs} i'_{qr} \tag{5.69}$$

$$P_r = -sP_s \tag{5.70}$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_s - p\omega_g}{\omega_s} \tag{5.71}$$

$$P_g = P_s + P_r = P_s \frac{p\omega_g}{\omega_s} = T_e \omega_g \tag{5.72}$$

$$Q_s = \frac{3}{2}\left(v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}\right) = \frac{3}{2} \frac{{v_{qs}}^2}{\omega_s L_s} - \frac{3}{2} \frac{L_M}{L_s} v_{qs} i'_{dr} \tag{5.73}$$

Görüldüğü gibi generatörün aktif gücü rotor akımının q bileşenine, reaktif gücü ise rotor akımının d bileşenine bağlıdır. Bu durum generatörün aktif ve reaktif gücünün ayrı ayrı kontrol edilebilmesini sağlar. Bu modelden generatör moment kontrolünde faydalanılacaktır.

Çizelge 5.2 : Generatör parametreleri.

Parametre	**Değer**
Stator direnci (r_s)	0.95 Ω
Rotor direnci (r'_r)	1.8 Ω
Stator endüktansı (L_s)	0.094 Henry
Rotor endüktansı (L'_r)	0.088 Henry
Karşılıklı endüktans (L_m)	0.082 Henry
Kutup sayısı (p)	3
Senkron frekans (f_s)	50 Hz
Stator gerilimi (V_s)	220 V

Bu çalışmada kullanılacak asenkron generatörün parametreleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

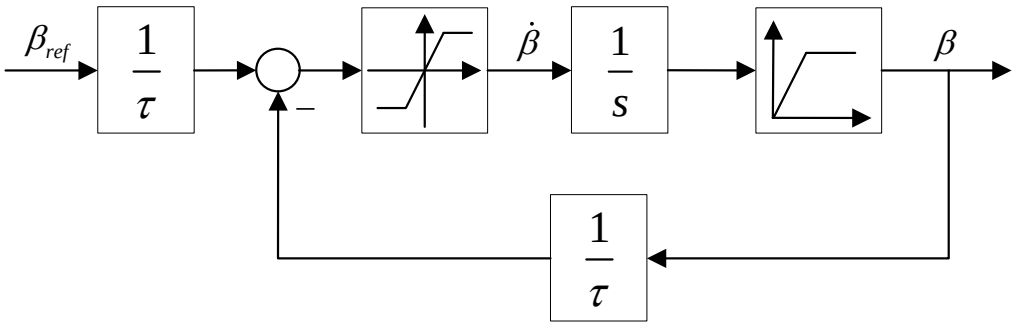
5.1.4 Kanat açısı eyleyicisi modeli

Dinamik bir sistem olan kanat açısı eyleyicisi sistemi birçok moment ve kuvvet etkisi altındadır. Bu momentlerin ifade edilmesi, kanadın yapısal dinamikleri ile kanat çevresindeki havanın davranışının modellenmesini ve yataklardaki sürtünmenin eklenmesi gerektirir. Bu bilgiler dikkate alındığında kanat açısı eyleyicisi modeli için kullanılan en yaygın yaklaşım büyüklüğü ve türevi sınırlı birinci dereceden dinamik bir sistemdir [12, 14].

Eyleyicinin lineer çalışma bölgesi için dinamik davranışı denklem **(5.74)**'teki diferansiyel eşitlik ile ifade edilebilir [14].

$$\dot{\beta} = -\frac{1}{\tau}\beta + \frac{1}{\tau}\beta_{ref} \qquad \textbf{(5.74)}$$

Burada β_{ref} referans kanat açısı, β gerçek kanat açısı, $\dot{\beta}$ ise gerçek kanat açısının türevidir. Şekil 5.12'de kanat açısı eyleyicisinin modeli verilmiştir.



Şekil 5.12 : Kanat eyleyicisi modeli.

Modelleme yaparken kanat açısının değişim hızını modele eklemek önem taşımaktadır. Kanat açısının değişim hızı belli sınırlar içinde olmaktadır. Bu hız normal çalışma sırasında $\pm 10^{\circ}/sn$, acil durumlarda ise $\pm 20^{\circ}/sn$ ile sınırlandırılabilir [12].

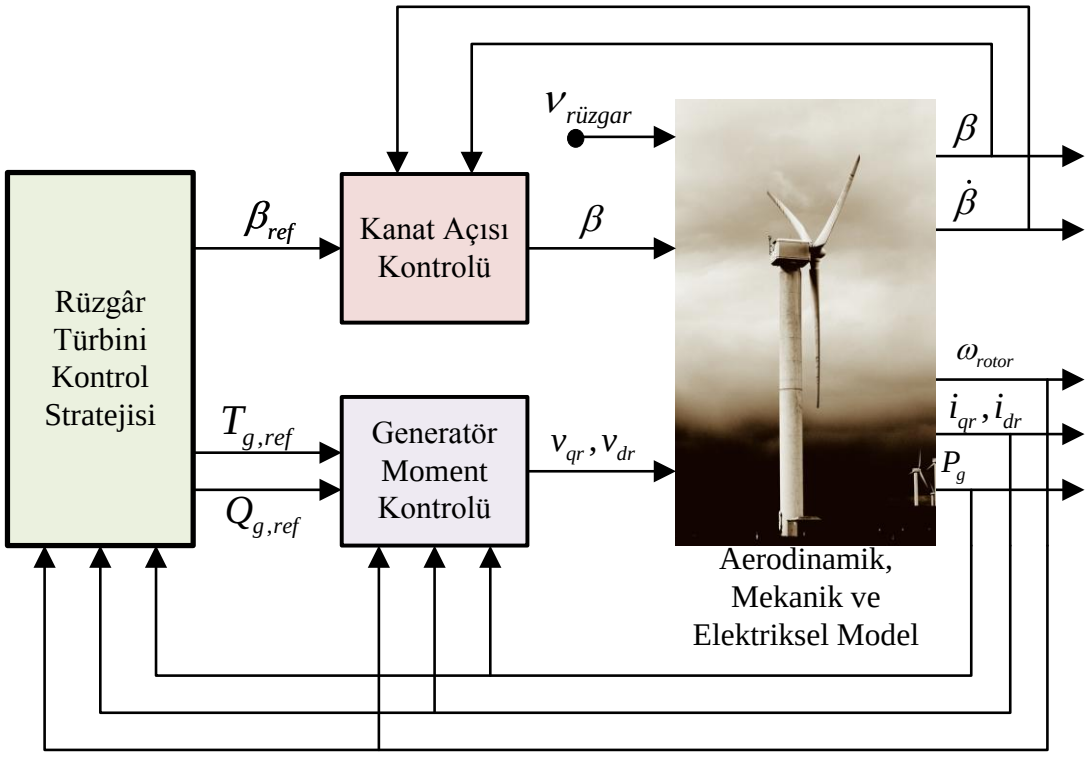
Bu çalışmada kanat açısı eyleyicisi modeli için denklem **(5.74)**'teki eşitlik kullanılmıştır.

5.1.5 Kontrol sistemi

Değişken hızlı ve değişken kanat açılı rüzgâr türbinlerinde aeodinamik güç kontrolü aktif kanat açısı kontrolü ve generatör moment kontrolü ile yapılır. Kontrol sistemi seçilen kontrol stratejisine bağlı olarak referans generatör momenti, referans reaktif güç ve referans kanat açısının belirlenmesi ile kanat açısı kontrolü ve moment kontrolünden sorumludur. Kontrol sistemi ayrıntılı olarak sonraki bölümde ele alınmıştır.

5.2 Rüzgâr Türbininin Kontrolü

Daha önce de belirtildiği gibi değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbinlerinde iki ayrı kontrol yapısı mevcuttur: generatör güç (moment) kontrolü ve kanat açısı kontrolü. İki serbestlik dereceli kontrol sistemi Şekil 5.13'te blok diyagram halinde gösterilmiştir [12].

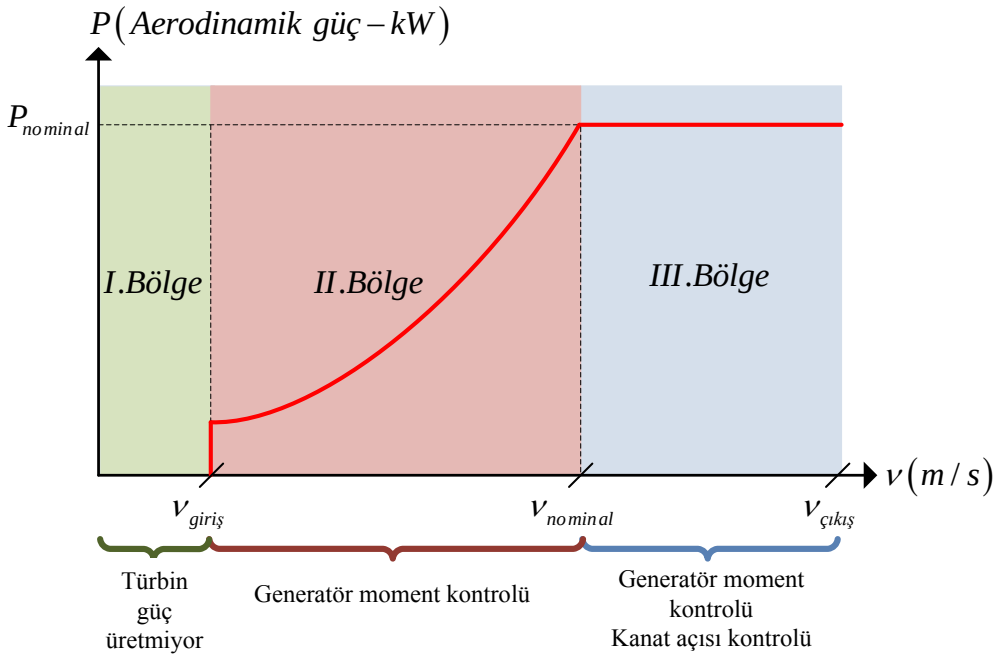


Şekil 5.13 : Rüzgâr türbini kontrol sistemi [12].

Şekil 5.13'te de görüldüğü gibi kontrol sistemi hem kanat açısı ve generetör momenti referans değerlerinin uygun şekilde belirlenmesinden hem de bunların kapalı çevrim kontrolünden sorumludur.

Kontrol sisteminin birincil amacı ideal güç eğrisini sağlamaktır. Buna göre Şekil 5.14'te verilen güç eğrisinin I. Bölgesinde rüzgâr hızı yeterli olmadığı için türbin güç üretmez.

Kısmi yük bölgesi adı verilen II. Bölgede ise türbin maksimum güç katsayında çalıştırılmaya çalışılır. Bu bölgede kanat açısı kontrolü yapılmaz, kanatlar türbinin maksimum rüzgâr gücünü yakalayabileceği konumda tutulur. Daha önce de belirtildiği gibi güç katsayısı $C_p(\lambda,\beta)$, kanat açısı ve tepe hız oranının bir fonksiyonudur. Dolayısıyla türbin maksimum güç katsayısında çalıştırılmak isteniyorsa, kanat açısının sabit olduğu durumda tepe hız oranı da belli bir değerde sabit tutulmalıdır. Tepe hız oranının ifadesi göz önüne alındığında; bu durum rüzgâr hızı değiştikçe rotor hızının da değişmesini gerektirir. Rotor hızı, değişken rüzgâr hızlarında tepe hız oranını sabit tutacak şekilde değiştirilir. Dolayısıyla bu bölgede sadece generatör moment kontrolü yapılır. Rüzgâr hızı ve generatör (rotor) açısal hızı nominal değerlerine ulaşıncaya kadar sadece generatör moment kontrolü yapılır.

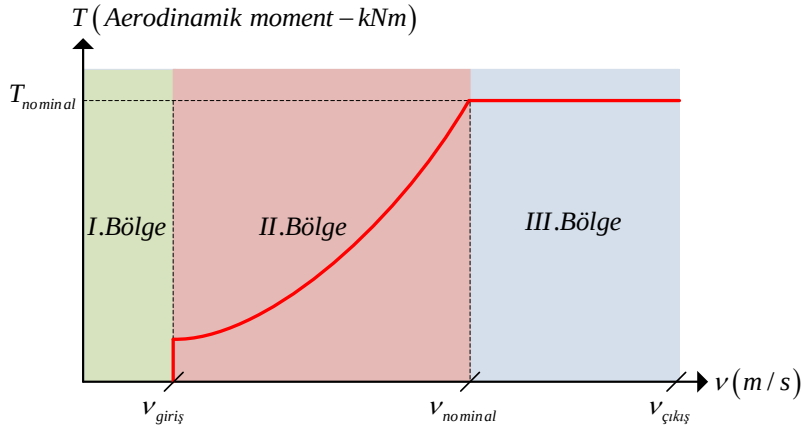


Şekil 5.14 : Rüzgâr türbini aerodinamik güç grafiği.

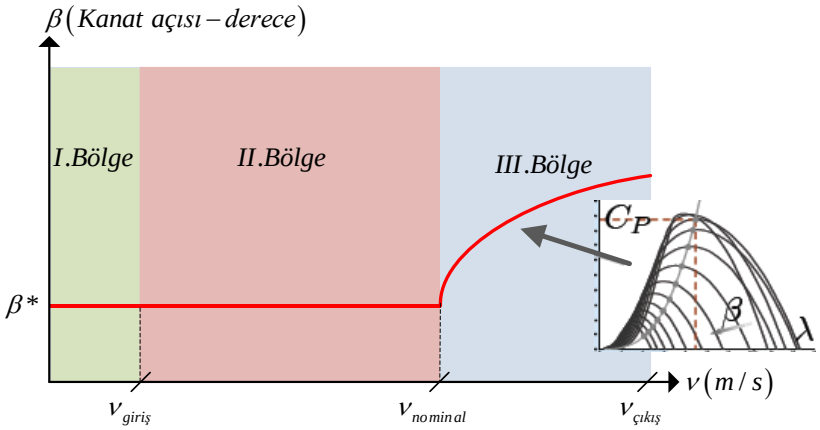
Tam yük bölgesi olarak ifade edilen III. Bölgede ise rüzgâr hızı nominal değerinin üzerinde olduğundan kanat açısı değiştirilmeye başlanır. Kanat açısının değişimi rüzgâr türbininde bir çeşit frenleme mekanizması gibi çalışır. Bu bölgede generatör moment kontrolü ve kanat açısı kontrolü beraber yapılır. Burada amaç türbin gücünü, momentini ve generatör (rotor) açısal hızını nominal değerlerinde sabit tutmaktır.

Rüzgâr hızı çıkış değerine ulaştığında ise sistemin zarar görmemesi için türbin devreden çıkarılır [30, 31].

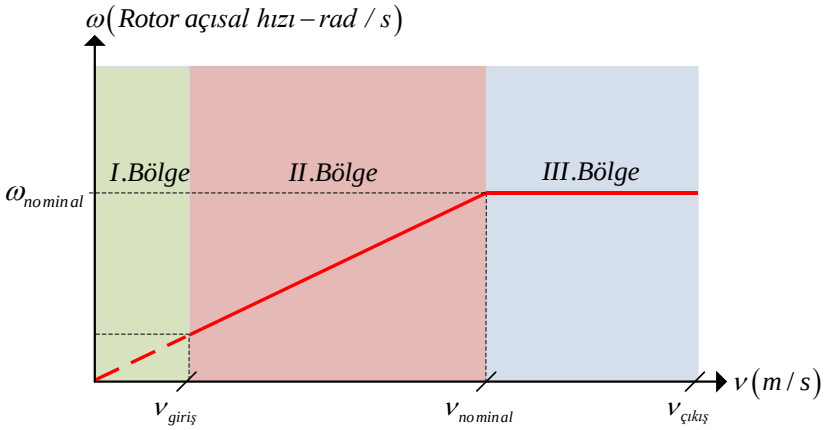
Şekil 5.14, 5.15, 5.16 ve 5.17'de türbin kontrol stratejisini anlatan aerodinamik güç, aerodinamik moment, kanat açısı ve rotor açısal hızı grafikleri verilmiştir [32].



Şekil 5.15 : Rüzgâr türbini aerodinamik moment grafiği.



Şekil 5.16 : Rüzgâr türbini kanat açısı grafiği.



Şekil 5.17 : Rüzgâr türbini rotor açısal hız grafiği.

Bu çalışmada kullanılacak rüzgâr türbini için nominal aerodinamik moment, aerodinamik güç ve rotor açısal hızı ile rüzgâr nominal, giriş ve çıkış hızları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Rüzgâr türbini parametreleri.

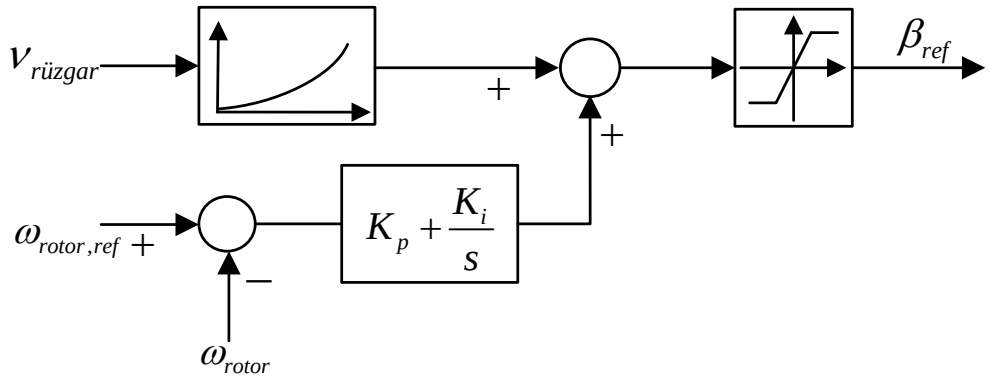
Parametre	**Değer**
Nominal aerodinamik güç ($P_{nominal}$)	500 kW
Nominal aerodinamik moment ($T_{nominal}$)	171.750 kNm
Nominal rotor açısal hızı ($\omega_{nominal}$)	27.8 dev/dk
Nominal rüzgâr hızı ($\nu_{nominal}$)	10 m/s
Giriş rüzgâr hızı ($\nu_{giriş}$)	3 m/s
Çıkış rüzgâr hızı ($\nu_{çıkış}$)	23 m/s
Kanat açısı başlangıç değeri ($\beta*$)	0^{o}

5.2.1 Kanat açısı kontrolü

Kanat açısı kontrolünde ilk aşama referans kanat açısını belirlemektir. Kanat açısı kontrolünde amaç, yüksek rüzgâr hızlarında rotor açısal hızının çok yükselmesini engellemek ve rotor açısal hızı ile aerodinamik momenti nominal değerlerinde tutmaktır. Dolayısıyla referans kanat açısının belirlenmesinde rotor açısal hızı ile farklı rüzgâr hızları ve kanat açıları için türbinin aerodinamik momentinin değişimi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada kullanılacak türbin verileri Şekil 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6'da verilmiştir. Buna göre türbinin farklı rüzgâr hızları için istenen nominal rotor açısal hızını veren kanat açıları büyük ölçüde bellidir. Bu verilerden faydalanarak referans kanat açısını bir tablo yardımıyla belirlemek mümkündür. Belirlenen bu referans kanat açısı yaklaşık bir değer olacağından, oluşacak olan hataları kompanse etmek için rotor açısal hızının kontrolünün de hesaplamaya katılması gerekmektedir.

Buna göre referans kanat açısını hesaplamak için kullanılan yapı Şekil 5.18'de gösterilmiştir.



Şekil 5.18 : Kanat açısı referansı üreteci.

Kanat açısı kontrolü sadece rüzgâr hızı nominal değerinden büyük olduğunda yapılmaz. Rotor açısal hızı ve türbin gücü de sürekli kontrol edilir ve belli sınırları aştıklarında kanat açısı kontrolü devreye girer. Aksi durumlarda kanat açısı kontrolü yapılmaz, kanat açıları 0^{o}'de tutulur. Kanat açıları kanat üreticileri tarafından verilen belli limitler arasında olmalıdır. Şekil 5.18'de bir sınırlandırıcı ile modellenen sınır değerler, bu çalışmada $+10^{o}$ ile -18^{o} arasındadır.

Referans kanat açısının uygulanacağı ve kontrol edileceği kanat açısı eyleyicisinin modeli, çıkışı gerçek kanat açı olacak şekilde Bölüm 5.1.4'te anlatılmıştır. Bu çalışmada kanat açısı eyleyicisinin dinamiğini belirleyen denklem **(5.74)**'teki τ değeri, 0.5 olarak alınmıştır.

5.2.2 Generatör güç kontrolü

Generatör güç kontrolünde daha önce de belirtildiği gibi aktif güç kontrolü (moment kontrolü) ve reaktif güç kontrolü ayrı ayrı yapılır. Her iki kontrolün de yapılabilmesi için referans değerlere ihtiyaç vardır. Generatörün reaktif güç üretmesi ya da tüketmesi istenmediğinden türbinin çalıştığı süre boyunca reaktif güç referansı 0 olarak verilir.

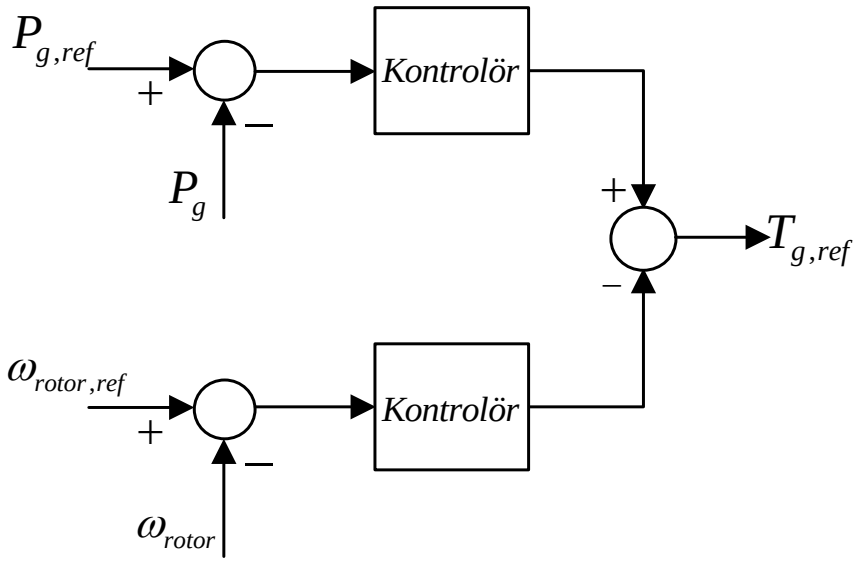
$$Q_{g,ref} = 0 \qquad \textbf{(5.75)}$$

Moment kontrolü için gereken referans generatör momentinin hesabı ise biraz daha karmaşıktır. Düşük rüzgâr hızlarında kanat açısı belli bir değerde tutularak rüzgârdan elde edilebilecek maksimum gücün alınması sağlanır. Bu güç generatör nominal gücünün altındadır. Yüksek rüzgâr hızlarında ise kanat açısı kontrolü ile türbin rotorunun rüzgârdan aldığı güç, kayıplar haricinde generatörün nominal gücü ile

sınırlandırılmaktadır. Dolayısıyla türbin rotoru tarafından yakalanan gücün (kayıpların olmadığı ideal durumda) generatör tarafından aynı büyüklükte elektriksel güce dönüştürülmesi esastır. Bu durumda türbin rotorundaki mekanik güç, generatörün referans gücü olarak alınabilir.

Bununla birlikte nominal hızın altındaki rüzgâr hızlarında, her farklı rüzgâr hızı için elde edilen gücün en yüksek olduğu belli bir rotor hızı vardır ve dolayısıyla türbinin bu hızda dönmesi istenir. Bu hızlar Şekil 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6'da verilen verilerden elde edilebilir. Nominal hızın üzerindeki rüzgâr hızları içinse rotor hızı daha önce de belirtildiği gibi bu türbin için 27.8 dev/dk olmalıdır. Bu şekilde türbin rotorunun referans açısal hızı belirlenmiş olur.

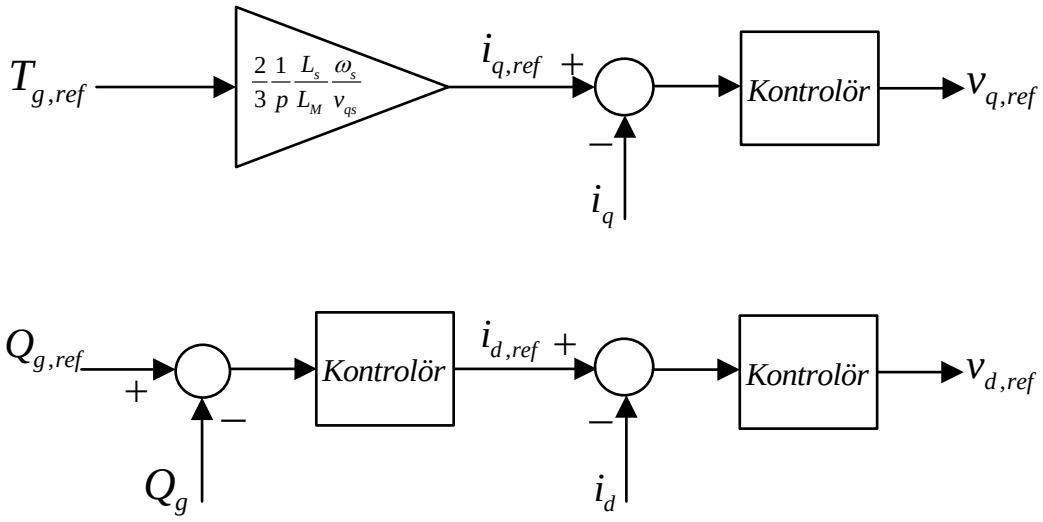
Referans generatör momentinin hesabında hem gücün, hem de hızın bir etkisinin olacağı açıktır. Bu çalışmada referans generatör momenti için güç ve hızın bir kombinasyonu olan Şekil 5.19'daki yapı kullanılmıştır.



Şekil 5.19 : Generatör moment referansı üreteci.

Şekil 5.19'da kontrolör olarak standart PI tipi bir kontrolör ya da değişken katsayılı bir PI kontrolör kullanılabilir.

İstenen generatör momentini ve reaktif gücü sağlayacak generatör kontrolü için ise Şekil 5.20'de verilen kaskat yapı kullanılabilir. Kontrolör olarak standart bir PI tipi kontrolör ya da değişken katsayılı bir PI kontrolör seçilebilir. Şekilde referans generatör momenti $T_{g,ref}$'den referans q ekseni akımı $i_{q,ref}$'e geçerken kullanılan eşitlik denklem **(5.68)**'den elde edilmiştir.



Şekil 5.20 : Generatör moment ve reaktif güç kontrolü.

Generatör modelinde anlatıldığı ve denklem **(5.69)**, **(5.72)** ve **(5.73)**'te görüldüğü üzere generatör momenti T_g sadece i_q akımına, generatör reaktif gücü Q_g ise i_d akımına bağlıdır. Dolayısıyla iki büyüklüğün kontrolü ayrı ayrı yapılabilir. Kontrolörlerin çıkışında elde edilen gerilim değerleri güç elektroniği devreleri üzerinden çift beslemeli asenkron generatöre uygulanır.

6. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu bölümde değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbininin MATLAB/SIMULINK ortamında benzetimi yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan türbinin aerodinamik kısmına ilişkin veriler Şekil 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6'da; mekanik kısma ilişkin veriler Çizelge 5.1'de; generatöre ilişkin veriler Çizelge 5.2'de; rüzgâr türbini parametreleri ise Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Bir önceki bölümde anlatılanlara uygun olarak oluşturulan tüm sistemin modeli Şekil 6.1'de gösterilmektedir. Modelleme türbin, aktarma, çift beslemeli asenkron generatör, kanat açısı eyleyicisi, generatör kontrolü ve kanat açısı kontrolü olmak üzere altı alt sistem kullanılarak yapılmış, her bir alt sistemin giriş ve çıkış işaretleri ayrıntılı olarak verilmiştir.

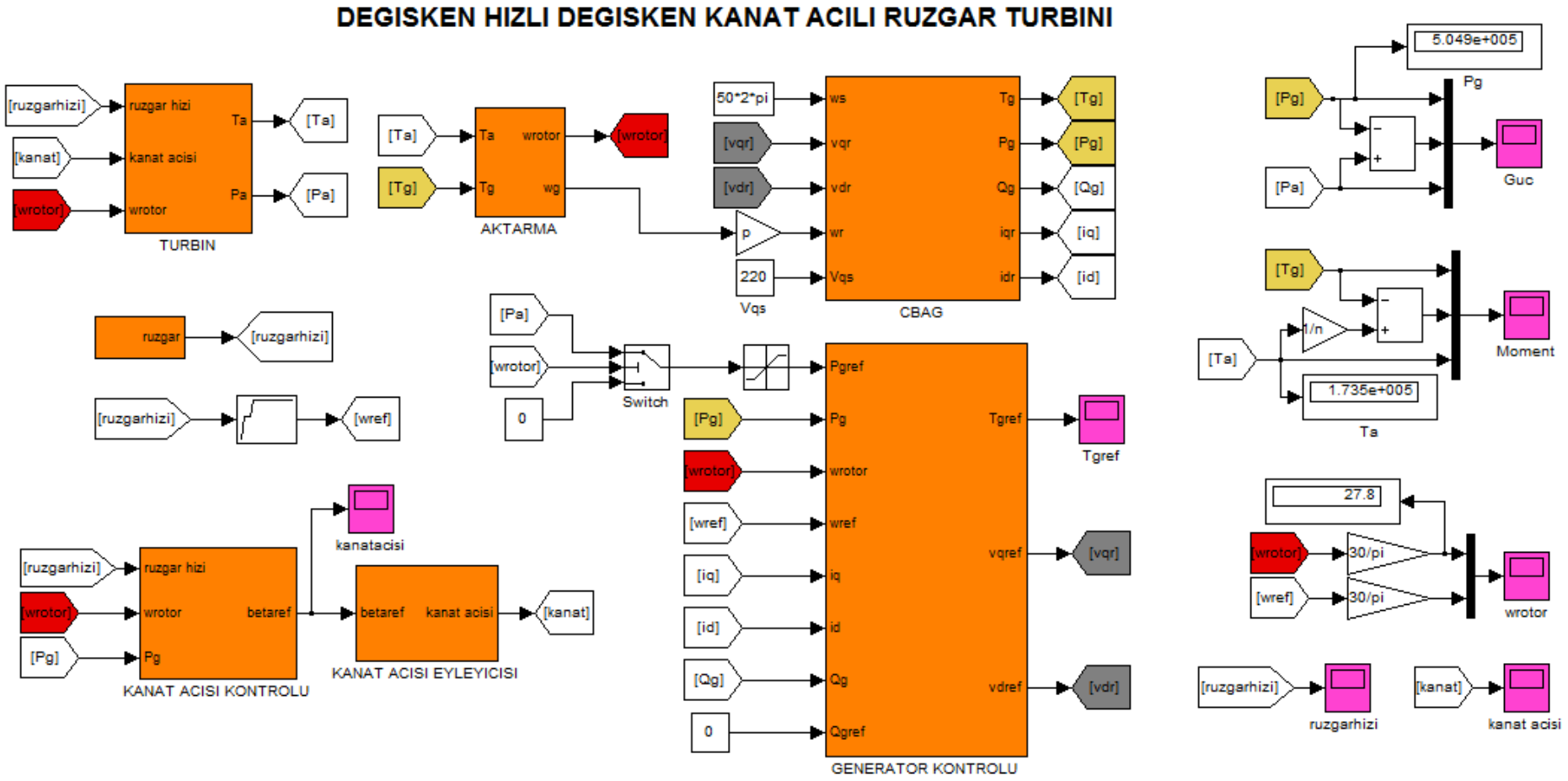
Sisteme dışarıdan giriş olarak rüzgâr hızı ile sabit değerler olan generatör stator geriliminin büyüklüğü $\left(V_{qs} = 220\ V\right)$ ve generatör stator geriliminin senkron hızı $\left(\omega_s = 2\pi 50\right)$ verilmektedir.

Daha önceden de belirtildiği gibi, referans aktif generatör gücü olarak türbin aerodinamik gücü kullanılmıştır. Bilindiği gibi generatörün güç üretebilmesi için rotor hızının belli bir değerin üzerinde olması gerekmektedir. Dolayısıyla çalışmada rotor hızı belli bir değerin üzerine çıkıncaya kadar referans generatör gücü Şekil 6.1'de görülen *switch* yapısı yardımıyla sıfır olarak verilmiş; sonrasında aerodinamik güç referans olarak kullanılmıştır.

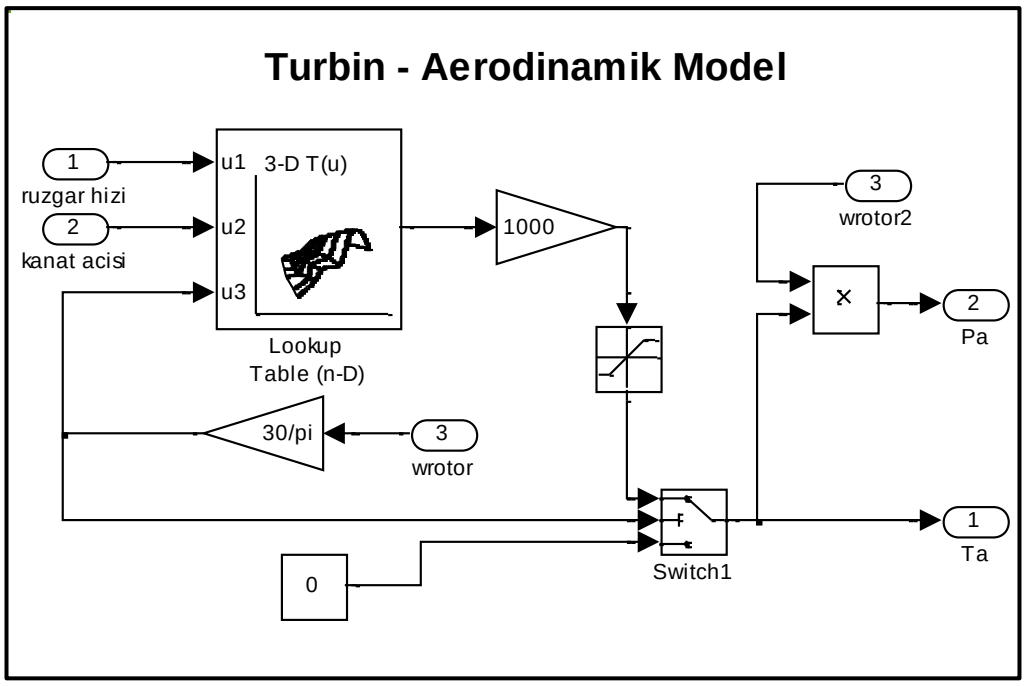
Reaktif güç referansı ise çalışma boyunca sıfır olarak verilmiştir.

Generatör kontrolü bloğundan dq eksen takımında rotor geriliminin referans değerleri çıkış olarak alınmış ve bu değerler çift beslemeli asenkron generatör bloğuna giriş olarak verilmiştir. Referans gerilimler ile generatöre uygulanan gerilimler arasındaki transfer fonksiyonu bir olarak alınmıştır. Aradaki güç elektroniği devreleri ideal olarak kabul edilmiştir.

Şekil 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 ve 6.7'de ise her bir alt sistemin iç yapısı verilmiştir.

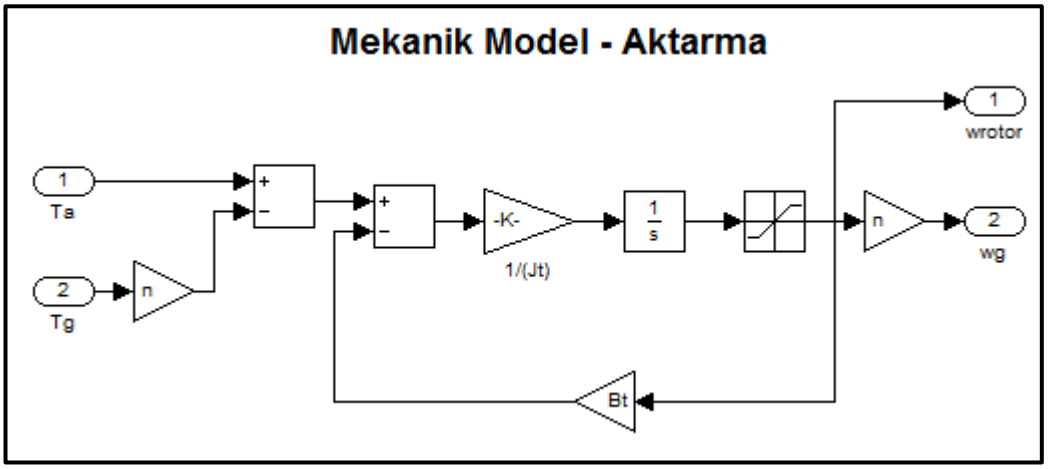


Şekil 6.1 : Değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbini Simulink blok diyagramı.



Şekil 6.2 : Rüzgâr türbini aerodinamik modeli Simulink blok diyagramı.

Türbin alt sistemi rüzgâr hızı, kanat açısı ve rotor açısal hızına bağlı olarak türbin aerodinamik momentini ve gücünü hesaplamaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi bu iş için türbin verilerinin girildiği bir tablodan (lookup table) faydalanılmıştır.

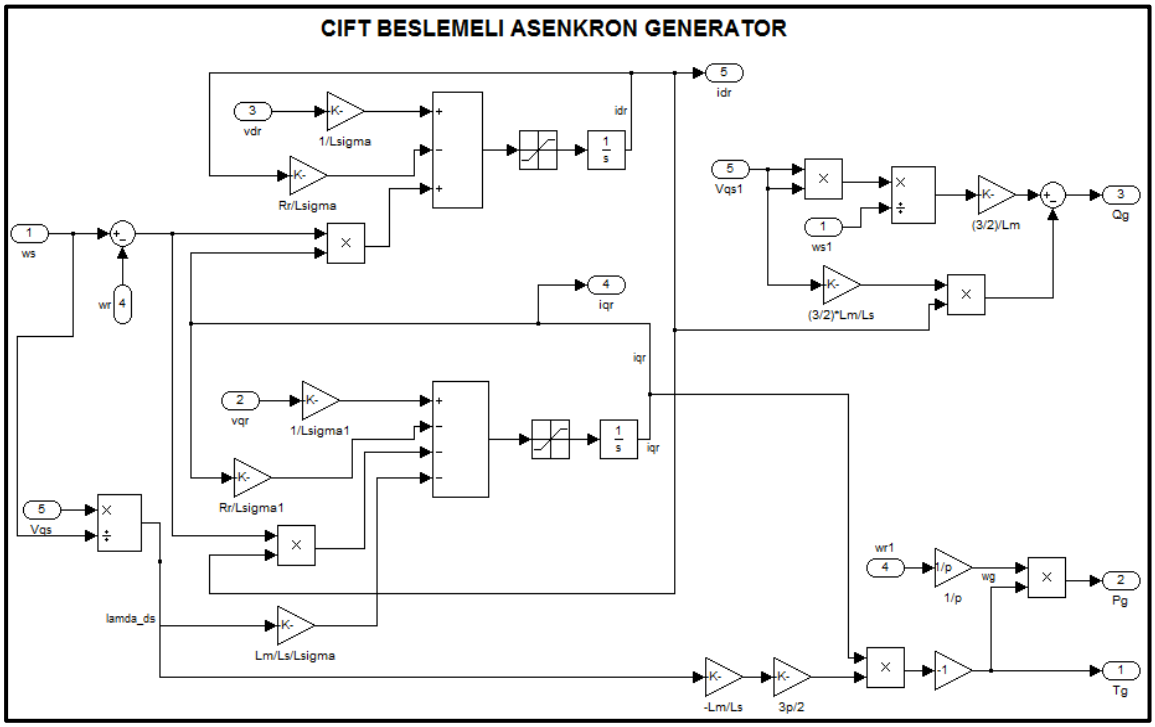


Şekil 6.3 : Rüzgâr türbini mekanik modeli Simulink blok diyagramı.

Mekanik model ise türbin aerodinamik momenti ve generatör momentine bağlı olarak rotor ve generatör açısal hızlarını hesaplamaktadır. Bu amaçla denklem **(5.9)** ve **(5.10)**'dan faydalanılmıştır. Ayrıca rotor açısal hızını 57 dev/dk ile sınırlandıran bir satürasyon elemanı da modele eklenmiştir.

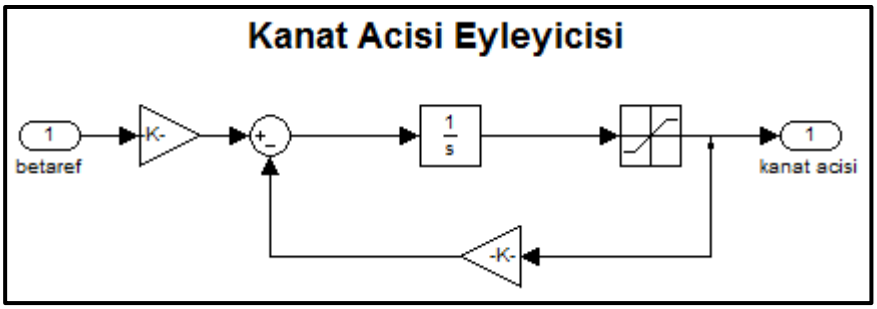
Generatör modeli ise giriş gerilimleri ve generatör açısal hızına bağlı olarak generatör momentini, aktif ve reaktif gücünü hesaplamaktadır. Model oluşturulurken

(5.64), **(5.65)**, **(5.66)** ve **(5.67)** numaralı denklemler; güç ve moment hesabı için ise **(5.68)**, **(5.72)** ve **(5.73)** numaralı denklemler kullanılmıştır.



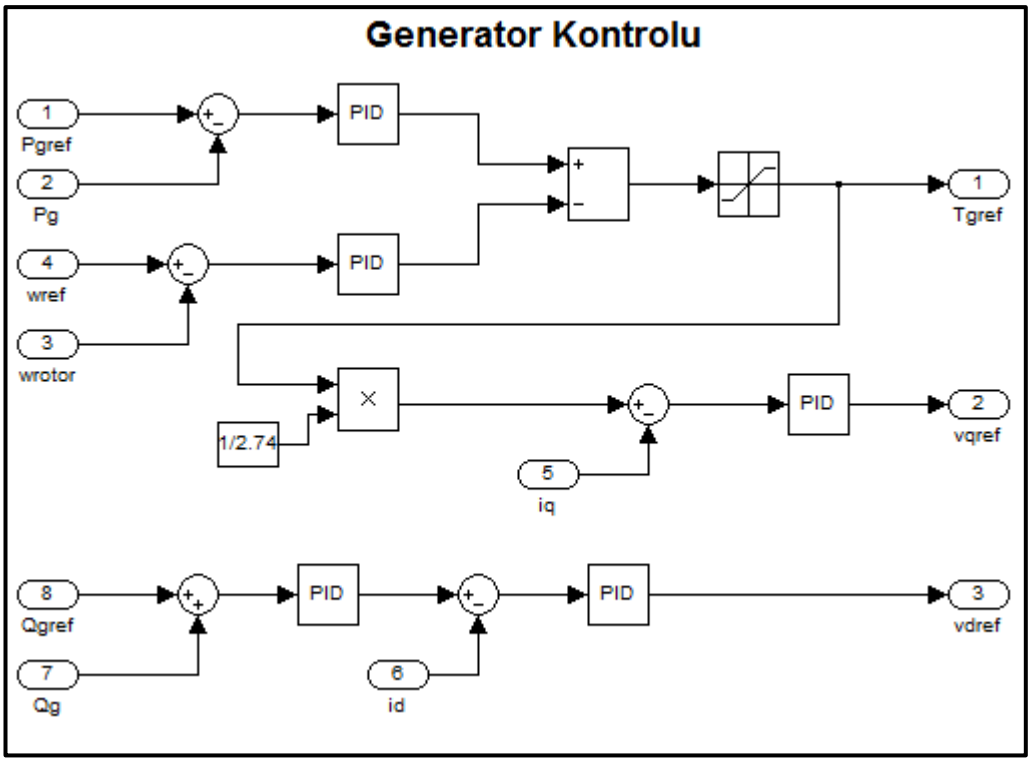
Şekil 6.4 : Rüzgâr türbini generatör modeli Simulink blok diyagramı.

Kanat açısı eyleyicisi modeli referans kanat açısından gerçek kanat açısına geçişi temsil etmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi kanat açısı eyleyicisi birinci dereceden bir sistem olarak modellenmiş; modelleme için denklem **(5.74)** kullanılmıştır.



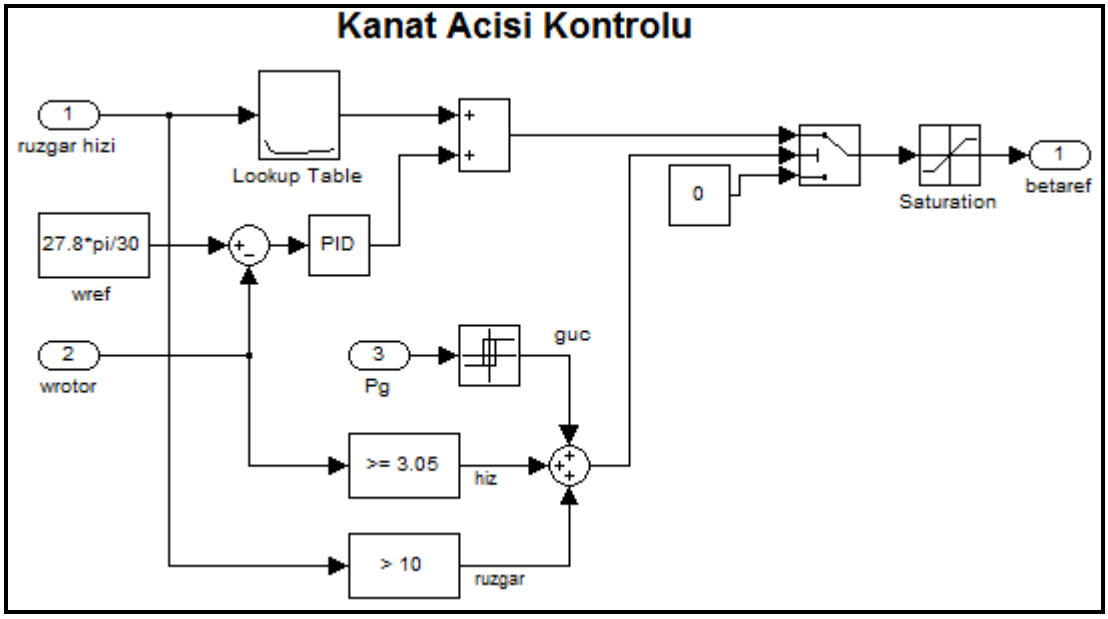
Şekil 6.5 : Rüzgâr türbini kanat açısı eyleyicisi Simulink blok diyagramı.

Generatör kontrolü bloğunda ilk olarak Şekil 5.19'da verilen referans generatör moment üreteci ile referans generatör momenti hesaplanmış; sonrasında Şekil 5.20'de verilen generatör moment kontrolü ile reaktif güç kontrolü yapısı ile sistem kontrol edilmiştir. Buna bağlı olarak hesaplanan çıkış gerilimleri v_{qr} ve v_{dr} generatöre uygulanmıştır. Kontrolör olarak PI tipi kontrolörler tercih edilmiştir.



Şekil 6.6 : Rüzgâr türbini generatör kontrolü Simulink blok diyagramı.

Şekil 6.7'deki yapıda; Şekil 5.18'de anlatılan yaklaşım ile referans kanat açısının elde edilişi görülmektedir. Şekil 5.18'deki yapıya ek olarak generatör gücü, generatör açısal hızı ve rüzgâr hızına ilişkin sınırlandırmalar da yapıya dâhil edilmiş; herhangi birinin sınır değerlerini aşması durumda kanat açısı kontrolünün devreye girmesi sağlanmıştır.



Şekil 6.7 : Rüzgâr türbini kanat açısı kontrolü Simulink blok diyagramı.

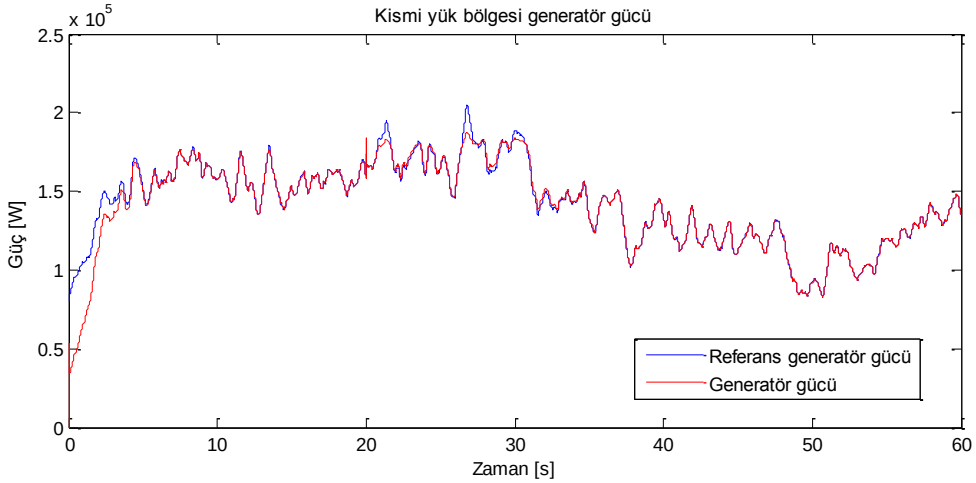
Benzetim çalışmaları kısmi yük bölgesi (II. Bölge) ve tam yük bölgesi için (III. Bölge) ayrı ayrı yapılmıştır.

Şekil 6.8'de kısmi yük bölgesi için kullanılan 60 saniyelik rüzgâr hızı verisi verilmiştir. Görüldüğü gibi 5.5 m/s ile 7.5 m/s arasında değişen rüzgâr hızı nominal rüzgâr hızının altındadır.



Şekil 6.8 : Kısmi yük bölgesi rüzgâr hızı.

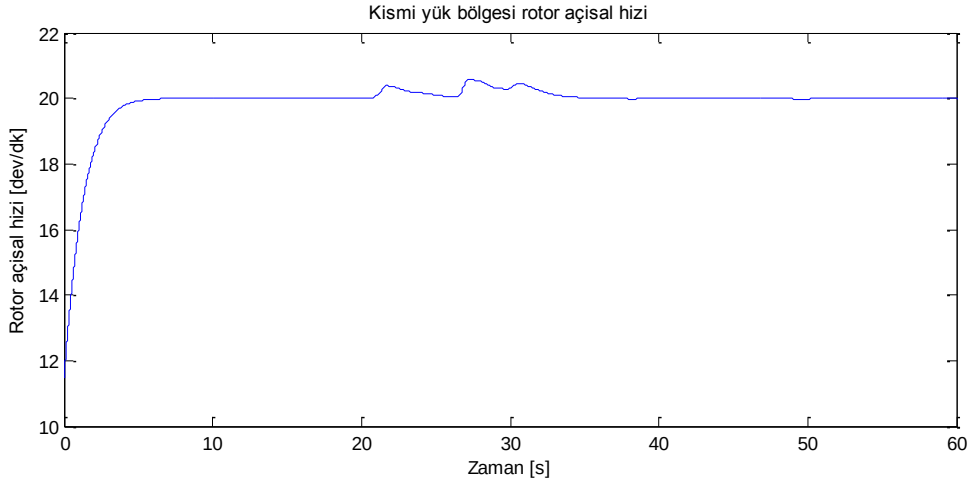
Şekil 6.9'da kısmi yük bölgesindeki generatör gücünün grafiği verilmiştir. Burada generatör referans gücü olarak verilen güç aynı zamanda türbin aerodinamik gücüdür. Görüldüğü gibi generatör gücü, referans gücü oldukça iyi şekilde takip etmektedir. Seçilen rüzgâr hızı düşük olduğundan generatör gücü nominal gücünün (500 kW) altında; ancak bu rüzgâr hızında olabilecek maksimum büyüklüktedir.



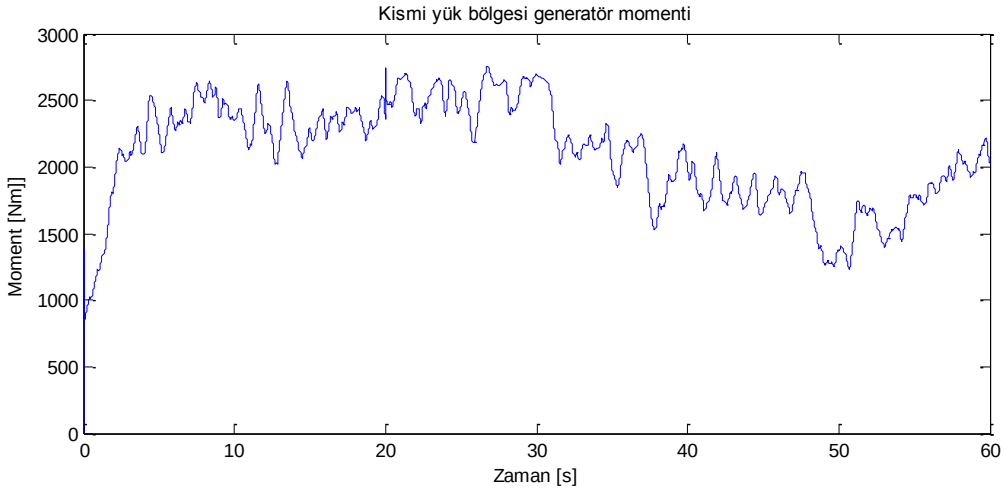
Şekil 6.9 : Kısmi yük bölgesi generatör gücü.

Şekil 6.10'da verilen rotor açısal hızı da yine nominal değerinin altında ve bu rüzgâr hızında maksimum gücü sağlayacak değerdedir. Generatör momenti ise generatör

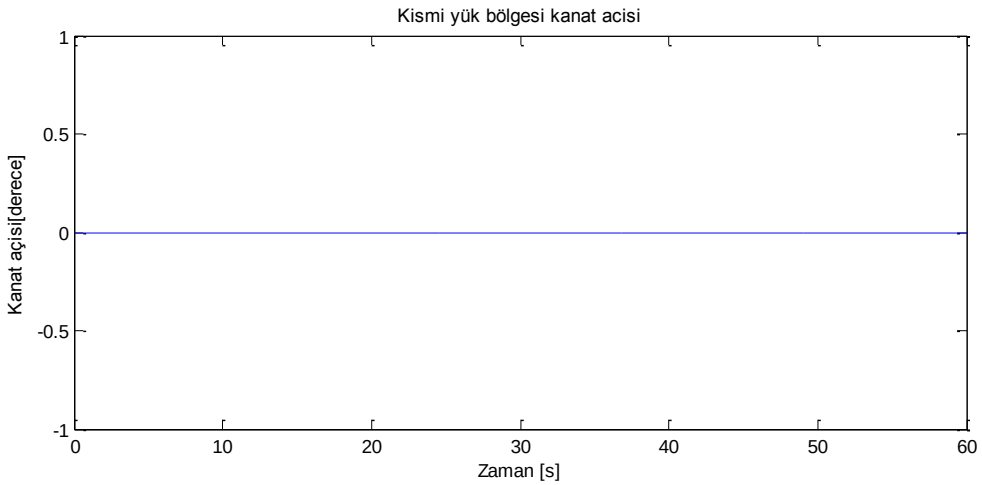
gücüne ve rotor açısal hızına uygun şekilde nominal değerinin altında seyretmektedir.



Şekil 6.10 : Kısmi yük bölgesi rotor açısal hızı.



Şekil 6.11 : Kısmi yük bölgesi generatör momenti.



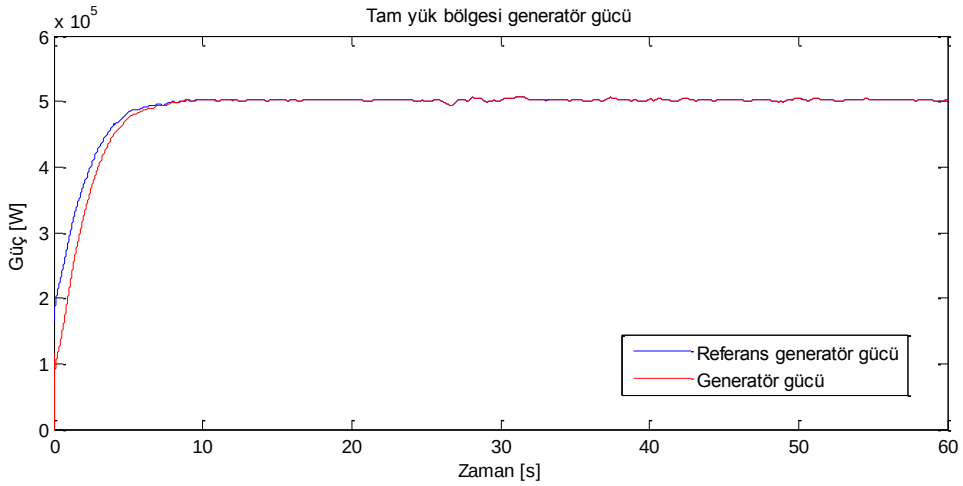
Şekil 6.12 : Kısmi yük bölgesi kanat açısı.

Kısmi yük bölgesindeki kanat açısı ise tasarlandığı gibi maksimum gücü elde edebilmek amacıyla 0 derecede sabit tutulmuş, kanat açısı kontrolü yapılmamıştır.

Şekil 6.13'te tam yük bölgesi için kullanılan 60 saniyelik rüzgâr hızı verisi verilmiştir. Görüldüğü gibi 13 m/s ile 19 m/s arasında değişen rüzgâr hızı, nominal rüzgâr hızının üzerinde seyretmektedir.

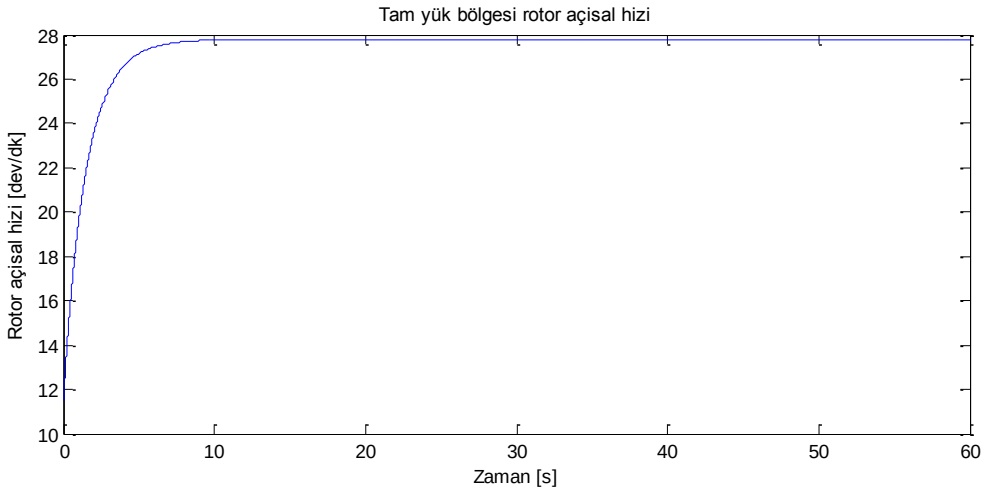


Şekil 6.13 : Tam yük bölgesi rüzgâr hızı.



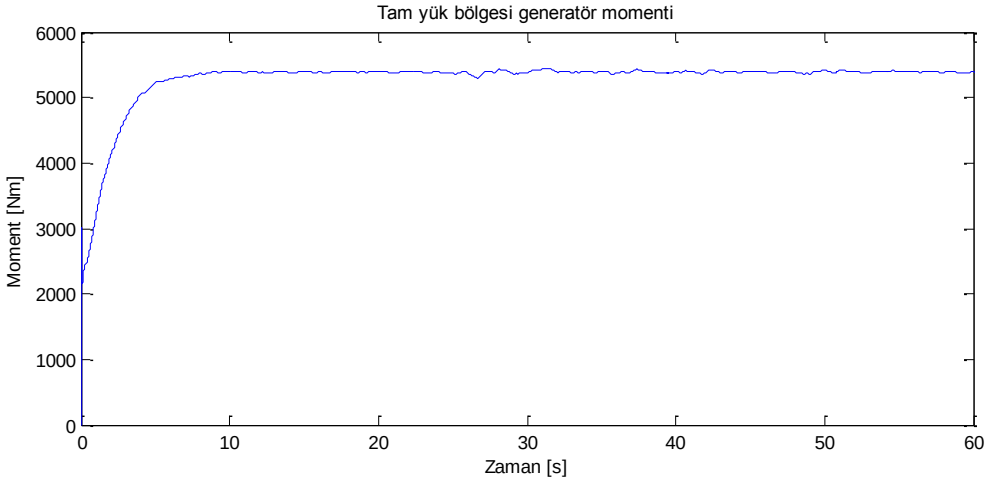
Şekil 6.14 : Tam yük bölgesi generatör gücü.

Şekil 6.14'te tam yük bölgesindeki generatör gücü verilmiştir. Görüldüğü gibi aerodinamik güce eşit olan referans güç ile generatör gücü büyük ölçüde örtüşmektedir. Rotor açısal hızı nominal değerine ulaştıktan sonra (Şekil 6.15) generatör gücü değişen rüzgâr hızına rağmen nominal gücü olan 500 kW mertebesinde sabitlenmiştir. Şekil 6.15'te verilen rotor açısal hız grafiğinde, rotor açısal hızının referans değeri olan 27.8 dev/dk'ya ulaştıktan sonra değişen rüzgâr hızına rağmen istendiği gibi bu noktada sabit kaldığı görülmektedir.

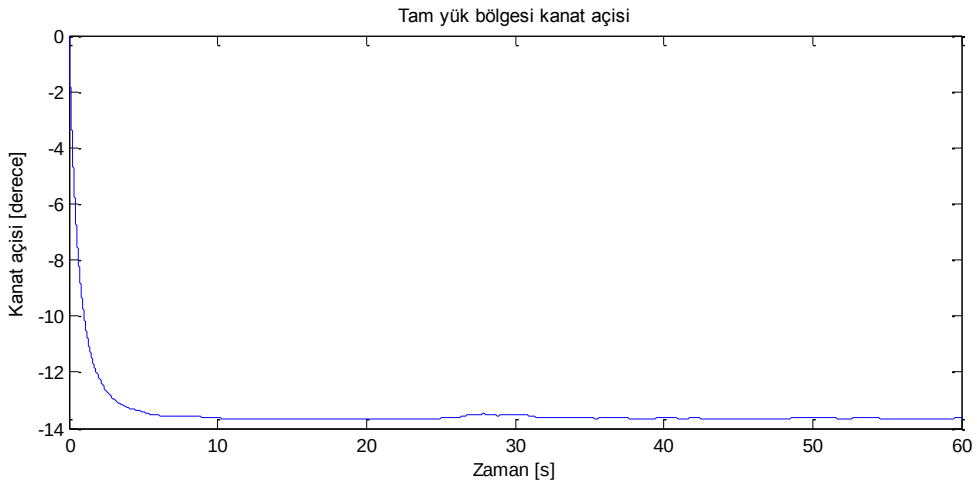


Şekil 6.15 : Tam yük bölgesi rotor açısal hızı.

Generatör momenti de generatör gücü ve rotor açısal hızı gibi kısa sürede nominal değerine ulaşmış ve bu noktada büyük ölçüde sabit kalmıştır.



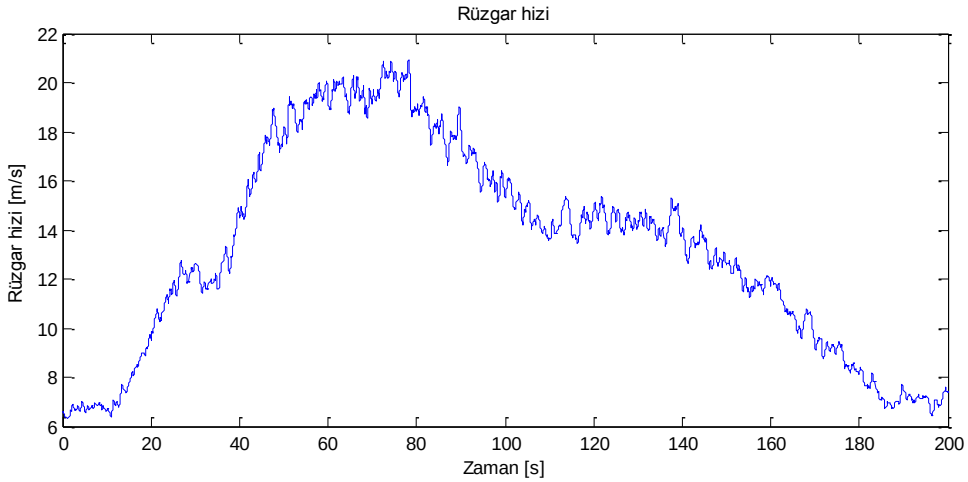
Şekil 6.16 : Tam yük bölgesi generatör momenti.



Şekil 6.17 : Tam yük bölgesi kanat açısı.

Şekil 6.17'de tam yük bölgesindeki kanat açısı grafiği verilmiştir. Bu bölgede kanat açısı sabit tutulmamış, aktif kanat açısı kontrolü yapılmıştır. Bu şekilde generatör gücü, yüksek rüzgâr hızlarında, nominal değerinde sabit tutulmuştur.

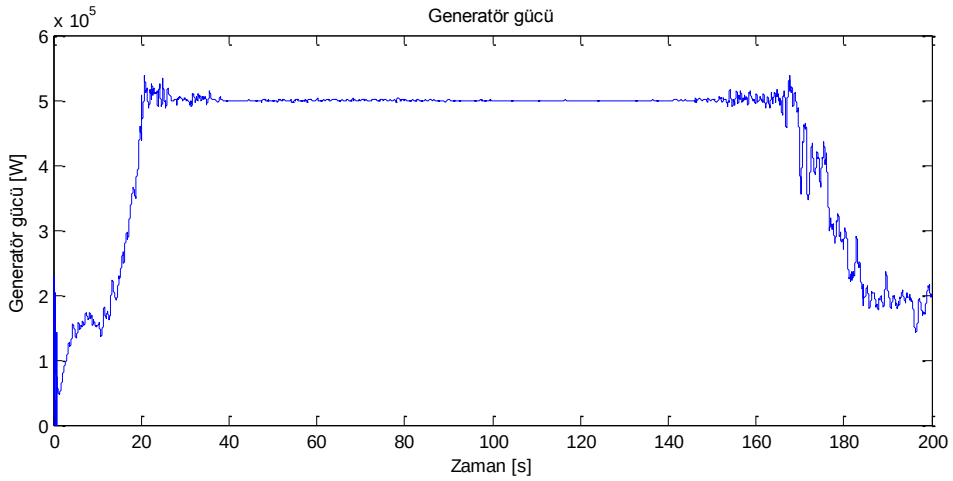
Benzetim çalışmalarında son olarak kısmi yük bölgesi ve tam yük bölgesinin birarada olduğu Şekil 6.18'de verilen rüzgâr profile kullanılmıştır.



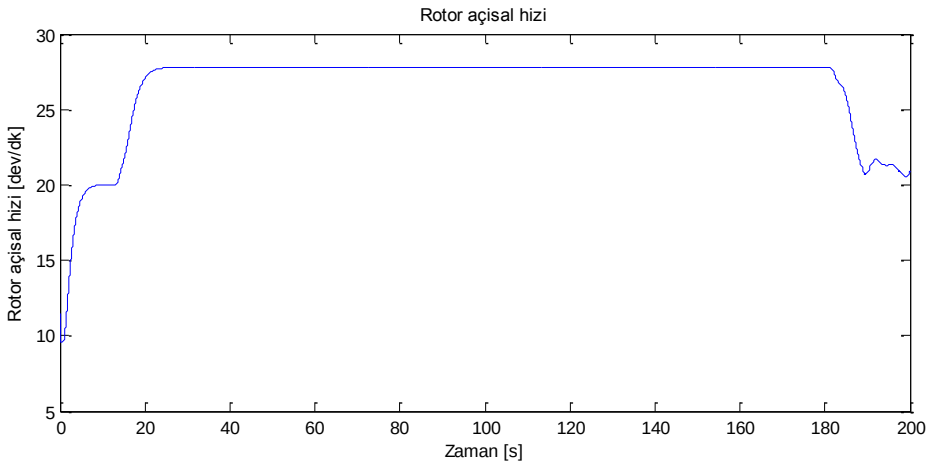
Şekil 6.18 : Rüzgâr hızı.

Şekil 6.19'da generatör gücünün değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi rüzgâr hızı nominal değerinin altındayken (kısmi yük bölgesinde) generatör gücü nominal değerinden az, olabilecek en büyük değerinde; rüzgâr hızı nominal değerinin üstündeyken ise generatör gücü 500 kW civarında seyretmektedir.

Şekil 6.20'de verilen rotor açısal hızı grafiğinde de kısmi yük bölgesinde açısal hızın nominal değerinden az, tam yük bölgesinde ise nominal değeri olan 27.8 dev/dk olduğu görülmektedir.

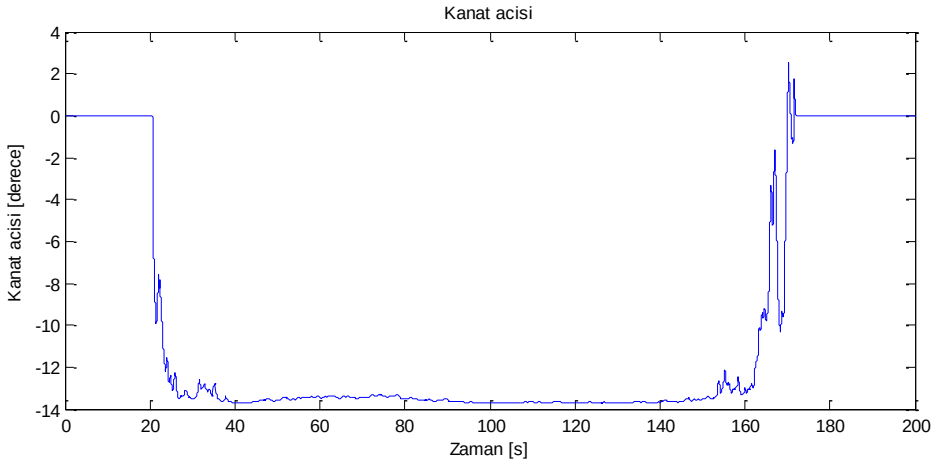


Şekil 6.19 : Generatör gücü.



Şekil 6.20 : Rotor açısal hızı.

Kanat açısı grafiği ise Şekil 6.21'de verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi kısmi yük bölgesinde kanat açısı kontrolü yapılmayıp kanat açısı 0 derecede tutulurken; tam yük bölgesinde gücü ve rotor açısal hızını nominal değerinde tutacak şekilde değişmektedir.



Şekil 6.21 : Kanat açısı.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ülkemizde ve dünyada hızla artan enerji ihtiyacı, bu artış karşısında mevcut fosil yakıtlardaki azalma ve bu yakıtların yol açtığı çevresel sorunlar yenilenebilir enerji kaynaklarını gündeme getirmiştir. Rüzgâr enerjisi de yenilenebilir enerji kaynakları arasında en çok tercih edilen kaynaklardan biridir.

Yapılan bu çalışmada ilk olarak rüzgâr enerjisi hakkında gerekli bilgiler verilmiş, rüzgâr türbinlerinin aerodinamiğini üzerinde durulmuştur. Sonrasında rüzgâr türbinlerinin kontrolü; kontrol sisteminin amaçları, aerodinamik güç kontrolü ve farklı kontrol stratejileri üzerinden anlatılmıştır.

Tezin asıl konusu olan değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgâr türbinlerinin modellenmesi ve kontrolü 5. Bölümde anlatılmış; 6. Bölümde ise benzetimi yapılmıştır. Aerodinamik kısım, mekanik kısım, elektriksel kısım, kanat açısı eyleyicisi, kanat açısı kontrolü ve generatör kontrolü olarak 6 farklı blok halinde büyük ölçüde gerçek verilere dayanan bütünleşik bir model oluşturulmuştur. Düşük rüzgâr hızlarında rüzgârdan maksimum gücü elde edilmesini sağlayacak, yüksek rüzgâr hızlarında ise generatör gücünü ve rotor açısal hızını nominal değerlerinde tutacak bir kontrol stratejisi esas alınmıştır. Bu amaçla kısmi yük bölgesinde sadece generatör moment kontrolü yapılırken, tam yük bölgesinde buna ek olarak kanat açısı kontrolü yapılmıştır.

Benzetim sonuçları incelendiğinde rüzgâr türbini sisteminin istenildiği şekilde çalıştığı görülmüştür. Kısmi yük bölgesi ve tam yük bölgesi davranışları ayrı ayrı incelenmiş; generatör gücü, rotor hızı ve kanat açısının kontrol stratejisiyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada MİLRES - Milli Rüzgâr Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi projesinin türbin, aktarma organları ve generatör verileri kullanılmış olup, yapılan araştırma, uygulanan yöntem ve elde edilen sonuçların projenin kontrol kısmına büyük katkı sağlaması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Rüzgâr Gücü.** (t.y.). *Wikipedia.* Alındığı tarih: 27.11.2012, adres: http://tr.wikipedia.org/wiki/Rüzgar_gücü

[2] **Url-1** *<http://www.anka.itu.edu.tr/anasayfa/index.php?option=com_content&view=article&id=80&Itemid=165>*, alındığı tarih: 30.11.2012.

[3] **Hardy, C.** (2010). Renewable energy and role of Marykirk's James Blyth. *The Courier. D. C. Thomson & Co. Ltd.*. Alındığı tarih: 30.11.2012, adres: http://www.thecourier.co.uk/Community/Heritage-and-History/article/2332/renewable-energy-and-role-of-marykirk-s-james-blyth.html

[4] **Şipar, E.** (2011). *Rüzgar enerjisi türbin sistemleri için gerçek zamanlı dinamik analiz simülatörü gerçekleştirilmesi*, (yüksek lisans tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

[5] **Turhal, S.** (2009). *Rüzgâr türbinleri ve kontrol sistemleri*, (yüksek lisans tezi), Mustafa Kemal Üniversitesi, Antakya.

[6] **Hayli, S.** (t.y). *Rüzgâr enerjisinin önemi Dünya'da ve Türkiye'deki durumu*. Alındığı tarih: 30.11.2012, adres: http://web.firat.edu.tr/sosyalbil/dergi/arsiv/cilt11/sayi1/001-026.pdf

[7] **The World Wind Energy Association**. (2012). *2012 half year report*.

[8] **Global Wind Energy Council**. (2011). *Global wind report: annual market update 2011*.

[9] **TMMOB Makine Mühendisleri** Odası. (2012). *Türkiye'nin enerji görünümü (Yayın No. MMO/588)*. Ankara, Türkiye.

[10] **Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği**. (2012). *Türkiye rüzgar enerjisi istatistik raporu***.** Ankara, Türkiye.

[11] **Rüzgâr türbini.** (t.y.). *Wikipedia.* Alındığı tarih: 27.11.2012, adres: http://tr.wikipedia.org/wiki/Rüzgar_türbini

[12] **Abad, G., Lopez, J., Rodriguez, M. A., Marroyo, L. ve Iwanski, G.** (2011). *Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.

[13] **Manwell, J. F., McGowan, J. G. ve Rogers, A. L.** (2002). *Wind Energy Explained: Theory, Design, and Application*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.

[14] **Bianchi, F. D., Battista, H. D. ve Mantz, R. J.** (2007). *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*. Springer-Verlag London Limited, London.

[15] **Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D. ve Bossanyi, E.** (2011). *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex.

[16] **Takaai, H., Chida, Y., Sakurai, K. ve Takashi, I.** (2009). Pitch angle control of wind turbine generator using less conservative robust control, *The 18th IEEE International Conference on Control Applications,* Saint Petersburg, Russia, 8-10 Temmuz.

[17] **Sandquist, F., Moe, G. ve Anaya-Lara, O.** (2012). Individual Pitch Control of Horizontal Axis Wind Turbines. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 134,* 031901 (7 sayfa).

[18] **Emniyetli, G.** (2007). *Evsel elektrik ihtiyacının karşılanması için rüzgar türbini tasarımı*, (yüksek lisans tezi), Trakya Üniversitesi, Edirne.

[19] **Özpınar, A.** (2010). Rüzgar enerjisi, teşvikleri ve kurum maliyetleri: seminer notları, *TMMOB Makine Mühendisleri Odası*, Ankara, Türkiye.

[20] **Munteanu, I., Bratcu, A. I., Cutululis, N. A. ve Ceang, E.** (2008). *Optimal Control of Wind Energy Systems: Towards a Global Approach.* Springer-Verlag London Limited, London.

[21] **Choi, H. S., Kim, J. G., Cho, J. H. ve Nam, Y.** (2009). Active yaw control of MW class wind turbine, *International Conference on Control, Automation and Systems*, Gyeonggi-do, Korea, 27-30 Ekim.

[22] **Akdoğan, Ş.** (2011). *Değişken hızlı değişken kanat açılı bir rüzgar türbininin modellenmesi, simulasyonu ve kontrolü*, (yüksek lisans tezi), Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.

[23] **Bossanyi, E. A.** (2003). GH bladed theory manual. Alındığı tarih: 20.04.2012, adres: http://ocw.tudelft.nl/fileadmin/ocw/courses/OffshoreWindFarmEnergy/res00099/Theory_Manual.pdf

[24] **Boukhezzar, B., Lupu, L., Siguerdidjane, H. ve Hand, M.** (2007). Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines. *Renewable Energy, 32,* 1273-1287.

[25] **Beltran, B., Ahmed-Ali, T. ve Benbouzid, M. E. H.** (2008). Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion systems, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 3, No. 2, 551-558, Haziran.

[26] **Billah, M. M., Hosseinzadeh, N. ve Ektesabi M. M.** (2010). Modelling of a doublyf fed induction generator (dfig) to study its control system, *20th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC),* Christchurch, New Zealand, 5-8 Aralık.

[27] **Uyar, M., Gencoğlu, M. T., Yıldırım, S.** (2005). Değişken hızlı rüzgar türbinleri için generatör sistemleri, *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Mersin, Türkiye, 19-21 Ekim. 6122216

[28] **Apaydın, M., Üstün, A. K., Kurban, M. ve Filik, Ü. B.** (2009). Rüzgar enerjisinde kullanılan asenkron jeneratörlerin karşılaştırmalı analizi, *V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Diyarbakır, Türkiye, 19-21 Haziran.

[29] **Krause, P. C., Wasynczuk, O. ve Sudhoff, S.D.** (2002). *Anaysis of Electric Machinery and Drive Systems*. IEEE Press, New York.

[30] **Bottaso, C. L., Croce, A., Nam, Y. ve Riboldi, C. E. D.** (2012). Power curve tracking in the presence of a tip speed constraint. *Renewable Energy, 40,* 1-12.

[31] **Datta, R. ve Ranganathan, V. T.** (2003). A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 18, No. 1, 163-168, Mart.

[32] **Bottasso, C. L.** (2011). Short course on wind turbine modeling, control and design. Alındığı tarih: 25.06.2012, adres: http://www.aero.polimi.it/~bottasso/DownloadArea.htm

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad:	**Handan NAK**
Doğum Yeri ve Tarihi:	**Bakırköy 11.05.1988**
Adres:	**İTÜ Maslak D2 Lojmanı**
E-Posta:	**nak@itu.edu.tr**
Lisans:	**İTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü (2011)**
	İTÜ Kontrol Mühendisliği Bölümü (2010)