

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**DEĞİŞKEN RÜZGAR HIZLARINDA RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE
ASENKRON GENERATÖR MOMENT KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özgün KOLAÇIK

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

MAYIS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**DEĞİŞKEN RÜZGAR HIZLARINDA RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE
ASENKRON GENERATÖR MOMENT KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Özgün KOLAÇIK
(301101057)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU

MAYIS 2014

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301101057 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Özgün KOLAÇIK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“DEĞİŞKEN RÜZGAR HIZLARINDA RÜZGAR TÜRBLİNLERİNDE ASENKRON GENERATÖR MOMENT KONTROLÜ ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Önder GÜLER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Lale T. ERGENE
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **02 Mayıs 2014**
Savunma Tarihi : **26 Mayıs 2014**

Yenilenebilir enerjiye inananlara,

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans Tez çalışmam sırasında, değerli yardımları ile beni yönlendiren, zaman ayıran, tecrübelerinden çokça yararlandığım danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Sayın Burak BARUTÇU'ya başta olmak üzere, tez konumda sıkça yararlandığım bilgileri edinmemde katkı sağlayan Prof. Dr. Sayın Ş. Sibel MENTEŞ'e, tez konum üzerine ihtiyaç duyduğum bilgi ve verileri benimle paylaşan değerli iş arkadaşlarıma, bu süreçte benden desteklerini esirgemeyen babam Ali KOLAÇIK, annem Tamam KOLAÇIK, kardeşim Ozan KOLAÇIK'A, gösterdiği sabır, destek ve motivasyon için kız arkadaşım Selen DEMİRBAŞ'a özel teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2014

Özgün Kolaçık
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
SEMBOL LİSTESİ.....	xxi
ÖZET.....	xxv
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Dünya Petrol Öngörüsü.....	4
1.2 Dünya Doğal Gaz Öngörüsü	7
1.3 Dünya Kömür Öngörüsü	12
1.4 Karbon Emisyonu ve Fosil Yakıtlar	16
1.5 Dünya Enerji Politikaları.....	19
1.5.1 Dünya enerji ligi ve politikaları	19
1.5.2 Türkiye enerji stratejisi ve gelecek planlaması	22
1.6 Bölüm Özeti	25
2. RÜZGAR VE RÜZGAR ENERJİSİ	27
2.1 Giriş.....	27
2.2 Tarihsel Gelişim	28
2.3 Dünya Rüzgar Enerjisinin Güncel Trendi ve Gelişimi	29
2.4 Rüzgar ve Rüzgar Enerjisi.....	31
2.5 Rüzgarın Karakteristik Yapısı.....	33
2.5.1 Rüzgarın oluşumuna coğrafi yapının etkisi	34
2.5.2 Uzun dönemli rüzgar hızı değişimi	34
2.5.3 Yıllık ve mevsimsel değişimler, ortalama rüzgar hızı	35
2.5.4 Sinoptik ve günlük değişimler	37
2.5.5 Rüzgarın yükseklikle ve pürüzlülükle değişimi	37
2.6 Rüzgarın Enerjisi.....	38
2.6.1 Rotor disk konsepti, güç faktörü	39
2.6.1.1 Momentum teorisi	40
2.6.1.2 Güç katsayısı	41
2.6.1.3 Betz limiti.....	41
2.6.1.4 İtme sabiti.....	42
2.6.2 Kuvvet, moment ve güç	42
2.7 Bölüm Özeti	44
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ VE ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ	45
3.1 Giriş.....	45
3.1.1 Rotor.....	46
3.1.2 Dişli kutusu ve aktarım dişlisi.....	47

3.1.3 Güç üretim sistemi	48
3.1.3.1 Sabit hızlı ve sınırlı değişkenli rüzgar enerjisi kontrol sistemi	48
3.1.3.2 Değişken hızlı rüzgar enerjisi kontrol sistemi	50
3.2 Rüzgar Türbinlerinin İşletme Karakteristikleri	52
3.2.1 Sabit dönme hızı işletmesi	52
3.2.1.1 $K_p - 1/\lambda$ eğrisi	52
3.2.1.2 Dönme hızı değişiminin etkisi	53
3.2.1.3 Kanat adım açısı değişiminin etkisi	54
3.2.2 Rüzgar hızı güç eğrisi	56
3.3 Bölüm Özeti	58
4. ELEKTRİK MAKİNALARI VE ASENKRON MAKİNALAR.....	59
4.1 Elektrik Makinaları	59
4.1.1 Dönme hareketi, Newton yasası ve güç ilişkileri	59
4.1.1.1 Newton yasası	60
4.2 Magnetik Alan	61
4.2.1 Faraday yasası-zamanla değişen magnetik alanda endüklenen gerilim	63
4.2.2 İletken tel üzerine etkiyen kuvvet	64
4.2.3 Magnetik alan içinde hareket eden cisimde endüklenen gerilim	65
4.3 Asenkron Makinalar	65
4.3.1 Asenkron makina teorisi	66
4.3.2 Kayma Konsepti	67
4.3.3 Frekans	67
4.3.4 Asenkron makinanın eşdeğer devresi	68
4.3.4.1 Rotor devresi eşdeğer modeli	69
4.3.4.2 Nihai eşdeğer devre	70
4.3.5 Asenkron makinada güç ve moment eşitlikleri	72
4.3.5.1 Kayıplar ve güç akış diyagramı	72
4.3.6 Asenkron generatörler	78
5. DEĞİŞKEN RÜZGAR HIZLARINDA GENERATÖR KONTROLÜ	81
5.1 Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatör Modellemesi	81
5.1.1 Elektrik makinalarında referans eksen dönüşümleri	81
5.1.1.1 abc/dq (Park) referans eksen dönüşümü	82
5.1.1.2 abc/ $\alpha\beta$ (Clark) referans eksen dönüşümü	84
5.2 Asenkron Generatör Modellemesi	84
5.2.1 Alan vektör modeli	85
5.2.2 dq referans gövde modeli	87
5.2.2.1 Modelin simülasyonu	89
5.3 Rüzgar Türbinlerinde Generatör Modellemesi	90
5.3.1 Çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG)	90
5.3.1.1 Uygulama-1: KAG asenkron generatör modeli	92
5.3.2 Kafesli asenkron generatör modellemesi (KAG)	93
5.3.3 Maksimum güç noktası (MPPT) kontrolü	97
5.3.3.1 MPPT literatür incelemesi	99
5.3.4 PI kontrol	100
5.3.4.1 Kontrol sistemi	101
5.4 2 Uygulama-2: 2 MW REKS optimum PI kontrol uygulaması	103
5.4.1 Rotor dönme hızının kontrolü	103
5.4.2 Rüzgar momenti ve aerodinamik modelleme	105
5.4.3 Dişli kutusu modellemesi	106
5.4.4 KAG vektör kontrolü	107

5.4.5 KAG modellemesi.....	112
5.4.6 Güç hesaplaması	114
5.4.7 Diğer sonuçlar	115
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	119
6.1 Sonuç ve Öneriler.....	121
KAYNAKLAR	123
EKLER.....	125
ÖZGEÇMİŞ.....	135

KISALTMALAR

OECD	: Organisation for Economic Co-operation and Development
GSYH	: Gayri Safi Yurtiçi Hasıla
BTU	: British Thermal Units
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
OPEC	: Organization of Petroleum Exporting Countries
NBP	: İngiltere Ulusal Dengeleme Noktası
LNG	: Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
AB	: Avrupa Birliği
DC	: Doğru Akım
AC	: Alternatif Akım
REDS	: Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi
REKS	: Rüzgar Enerjisi Kontrol Sistemi
KAG	: Kafesli Asenkron Generatör
BAG	: Bilezikli Asenkron Generatör
ÇBAG	: Çift Beslemeli Asenkron Generatör
IGBT	: Insulated-Gate Bipolar Transistor
AG	: Asenkron Generatör
MPPT	: Maksimum Güç Noktası
OOP	: Optimum Çalışma Noktası
LSS-DŞH	: Low Shaft Speed - Düşük Şaft Hızı
HSS-YŞH	: High Shaft Speed – Yüksek Şaft Hızı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 : Petrol toplam rezerv, üretim ve tüketim verileri	5
Çizelge 1.2 : Doğal gaz toplam rezerv, üretim ve tüketim verileri.....	9
Çizelge 1.3 : Kömür toplam rezerv, üretim ve tüketim verileri	14
Çizelge 1.4 : Dünya enerji talebi ve karbon emisyon öngörüsü	17
Çizelge 1.5 : “Lider Ülkeler” gelecek enerji projeksiyonu	21
Çizelge 1.6 : Türkiye birincil enerji kaynakları rezervi (2012 yılı).....	23
Çizelge 2.1 : 1985-2004 yılları arasında rüzgar türbin boyut ve güçleri.....	27
Çizelge 2.2 : Farklı yüzeylerde z_0 pürüzlülük uzunluğu ve α_p pürüzlülük katsayısı	38
Çizelge 5.1 : Başlıca rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörler	81
Çizelge 5.2 : 2 MW KAG generatör parametreleri.....	92
Çizelge 5.3 : MPPT kontrol lojigi.....	99
Çizelge A.1 : 2 MW KAG tabanlı REKS parametreleri	133

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : 2040 yılı dünya nüfus artışı tahmini.....	1
Şekil 1.2 : 2040 yılı dünya gayri safi yurt içi hasıla artışı.....	2
Şekil 1.3 : Sektörlere göre enerji talebi.....	3
Şekil 1.4 : Petrol ihraç eden devletler (%).....	7
Şekil 1.5 : Petrol ithal eden ülkeler (%).....	7
Şekil 1.6 : Doğal gaz market fiyat değişimi.....	9
Şekil 1.7 : Doğalgaz ihraç eden devletler.....	11
Şekil 1.8 : Doğalgaz ithal eden devletler.....	11
Şekil 1.9 : Dünya kömür fiyatları.....	13
Şekil 1.10 : Dünya kömür ihracatçıları.....	15
Şekil 1.11 : Dünya kömür ithalatçıları.....	16
Şekil 1.12 : Enerji lider ülkelerinin elektrik üretimi dağılımı.....	20
Şekil 1.13 : 2013 yılı Ekim ayı sonu itibariyle elektrik enerjisi üretiminin birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı (%).....	24
Şekil 1.14 : 2013 yılı ekim ayı sonu itibariyle kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı (%).....	24
Şekil 2.1 : Yatay-düşey rüzgar türbin modelleri.....	29
Şekil 2.2 : 2013 yılı dünya rüzgar enerjisi kurulu güç dağılımı (%).....	30
Şekil 2.3 : Dünya 1996-2013 rüzgar enerjisi kurulu gücü değişimi.....	31
Şekil 2.4 : a) Büyük rüzgar hareketi, b) Coriolis etkisi.....	32
Şekil 2.5 : Kara ve deniz meltemleri.....	32
Şekil 2.6 : Dağ ve vadi meltemleri.....	33
Şekil 2.7 : Van der Hoven spektrumu.....	34
Şekil 2.8 : Weibull olasılık dağılım fonksiyonu.....	36
Şekil 2.9 : Weibull-Rayleigh olasılık dağılım fonksiyonu.....	36
Şekil 2.10 : Enerji akış kanalı ve rotor diski.....	39
Şekil 2.11 : Güç katsayısı-uç hızı değişimi.....	43
Şekil 3.1 : Rüzgar türbininin yapısı.....	45
Şekil 3.2 : Optimum kanat sayısı.....	46
Şekil 3.3 : Kaskad dişli kutusu eşdeğer devresi.....	47
Şekil 3.4 : Sabit hızlı REKS genel yapısı.....	49
Şekil 3.5 : Değişken hızlı REKS genel yapısı.....	50
Şekil 3.6 : Değişken hızlı ÇBAG genel yapısı.....	51
Şekil 3.7 : $C_p - \lambda$ ve $K_p - 1/\lambda$ eğrisi.....	53
Şekil 3.8 : Rotor dönme hızının güce etkisi.....	54
Şekil 3.9 : Kanat adım açısı değişiminin güce etkisi.....	55
Şekil 3.10 : Güç eğrisi.....	56
Şekil 3.11 : SL1500-82 teorik güç eğrisi.....	57
Şekil 3.12 : SL1500-82 pratik güç eğrisi.....	57
Şekil 4.1 : Metal devre ve iletken sargı.....	62

Şekil 4.2 : Sağ el kuralı	64
Şekil 4.3 : Asenkron makina a) kafesli b) bilezikli.....	66
Şekil 4.4 : AC asenkron makinanın eşdeğer devresi	68
Şekil 4.5 : Asenkron makina ve transformatörün mıknatıslanma eğrileri	69
Şekil 4.6 : Rotor eşdeğer devresi	70
Şekil 4.7 : Nihai asenkron makina eşdeğer devresi	71
Şekil 4.8 : Asenkron makinanın güç akış diyagramı	72
Şekil 4.9 : Thévenin eşdeğer devresi	74
Şekil 4.10 : Asenkron makina moment-rotor hızı değişim grafiği	76
Şekil 4.11 : Asenkron makina rotor devresi direncinin değişimi	77
Şekil 5.1 : Uzay vektörü \vec{x} ile üç fazlı değişkenler x_a, x_b, x_c	82
Şekil 5.2 : (abc) iki fazlı (d-q) keyfi eksen takımına dönüşümü	83
Şekil 5.3 : (a) AG senkron gövde, (b) AG sabit gövde modeli.....	87
Şekil 5.4 : Asenkron makinanın mekanik karakteristiği.....	92
Şekil 5.5 : 2 MW KAG elektromagnetik moment karakteristiği.....	93
Şekil 5.6 : Beşinci derece kontrolsüz bir asenkron generatörlü REKS işletme noktasının değişimi a) rotor kutupları b) gerçek hareket kutupları	96
Şekil 5.7 : a) U/f sabit tutularak 5. derece asenkron generatörlü bir REKS'in sabit rüzgar altındaki değişimi b) baskın kutub sabit moment kontrolü.....	96
Şekil 5.8 : Güç katsayısının optimum uç hızı gösterimi	97
Şekil 5.9 : REKS'lerin lineer olmayan kontrol yaklaşımları (MPPT)	98
Şekil 5.10 : REKS kontrol algoritması (MPPT)	99
Şekil 5.11 : KAG vektör kontrol şeması.....	101
Şekil 5.12 : Kararlı hal kapalı çevrim hız kontrolü.....	101
Şekil 5.13 : Optimum elektromagnetik momentin hesabı	102
Şekil 5.14 : Rüzgar hızı değişimi.....	104
Şekil 5.15 : Referans elektromagnetik moment ifadesi Γ_G	104
Şekil 5.16 : Rüzgar momenti Γ_{wt}	105
Şekil 5.17 : Referans Rotor dönme hızı Ω_h	106
Şekil 5.18 : Referans Rotor dönme hızı Ω_l	107
Şekil 5.19 : İndirekt vektör kontrol şeması (KAG)	108
Şekil 5.20 : a) Rotor alan-yönlendirmeli KAG modeli b) d-q dekuplaj modeli	109
Şekil 5.21 : KAG (indirekt) vektör kontrolü	110
Şekil 5.22 : Açısal Frekans ω_s	110
Şekil 5.23 : Stator Gerilimi V_s	111
Şekil 5.24 : Stator Gerilimi 0-0.2 s arasında V_s	111
Şekil 5.25 : Asenkron generatör elektromagnetik momenti Γ_G	112
Şekil 5.26 : Stator akımı	113
Şekil 5.27 : Stator akımı	113
Şekil 5.28 : Aktif Güç P	114
Şekil 5.29 : Reaktif Güç Q	115
Şekil 5.30 : Güç faktörü C_p	116
Şekil 5.31 : Uç Hızı λ	116
Şekil 5.32 : Rüzgar hızı ve LSS-DŞH.....	117
Şekil A.1 : KAG rüzgar türbinlerinde elektromagnetik moment modellemesi.	126
Şekil A.2 : KAG REKS PI kontrol algoritması.	127

Şekil A.3 : KAG dönme hızı kontrolü.....	128
Şekil A.4 : Rüzgar momenti ve aerodinamik modelleme.....	129
Şekil A.5 : Dişli kutusu modelleme.....	130
Şekil A.6 : KAG Vektör kontrolü.....	131
Şekil A.7 : KAG Modellemesi.....	132

SEMBOL LİSTESİ

A	: Rotor süpürme alanı (m^2)
A_∞	: Menba kanalı süpürme alanı (m^2)
A_d	: Disk süpürme alanı (m^2)
A_w	: Mansap süpürme alanı (m^2)
a	: Eksenel akış endüksiyon factor
a_{eff}	: Dönüştürme oranı
B	: Magnetik akı yoğunluğu
c	: Ölçek parametresi
C_p	: Güç faktörü
C_T	: İtme sabiti
C_Q	: Moment katsayısı
dl	: Diferansiyel uzunluk
E_k	: Kinetik enerji
e_{ind}	: İletken üzerinde endüklenen gerilim
\exp	: Üstel fonksiyon
F	: Kuvvet
f_e, f_r	: Elektriksel frekans, rotor frekansı
f, f_m	: Frekans
$F(\vartheta)$: Saatlik ortalama rüzgar hızının zamana oranı
g	: Yerçekimi sabiti ($m s^{-2}$)
H	: Magnetik alan yoğunluğu
h	: Yükseklik (m)
$i(t)$: Akım
i	: Dişli kutusu arttırma oranı
J_h, J_l	: HSS-LSS eylemsizlik momenti
J_1, J_2	: Dişli çarkların eylemsizlik momenti
J_{wr}, J_g	: Sırasıyla rüzgar türbini ve generatörün eylemsizlik momenti
J	: Atalet momenti
k	: Şekil parametresi
L_s, L_r	: Stator, Rotor endüktansı
m	: Kütle
N	: İletken sarım sayısı
n_{senk}	: Senkron hız
n_m	: Dakikada devir sayısı
P_0	: Deniz seviyesi atmosfer basıncı

p_d^+	: Disk çıkış basıncı
p_d^-	: Disk giriş basıncı
p_d^+	: Disk çıkış basıncı
p_d^-	: Disk giriş basıncı
P_V	: Rüzgar aerodinamik gücü
P_T	: Mekanik güç
$p(t)$: Güç
p_r	: Kutup sayısı
P_{SCL}, P_{RCL}	: Stator, rotor bakır kayıpları
P_{cu1}, P_{cu2}	: Stator, rotor bakır kayıpları
$P_{core} = P_{fel}$: Histerizis ve faucault kayıpları
$P_{AG} = P_g$: Hava boşluğuna aktarılan güç
P_{conv}	: Şafta iletilen net güç
$P_{F\delta W}$: Mekaniki çalışmada meydana gelen sürtünme
P_{misc}	: Kayıp ve kaçak kayıplar
P_{out}	: Net çıkış gücü
$q(t)$: Elektrik Yüğü
Q	: Moment
R_s, R_r	: Stator, Rotor direnci
R	: Kanat uzunluğı
R_{gaz}	: Gaz sabiti ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)
s	: Kayma
T_{per}	: Tekrar etme periyodu
T_{itme}	: İtme kuvveti
T	: Kelvin sıcaklık (K)
$\mathcal{G}, \mathcal{G}_m$: Rüzgar hızı (m/s)
\mathcal{G}_∞	: Menba rüzgar girişı (m)
\mathcal{G}_d	: Disk rüzgar hızı (m)
\mathcal{G}_w	: Mansap rüzgar hızı (m)
V_{TH}	: Thevenin eşdeğer gerilimi
\mathcal{G}_{min}	: Devreye girme minimum rüzgar hızı
\mathcal{G}_{max}	: Devreden çıkma maksimum rüzgar hızı
X_M	: Mıknatıslanma empedansı
z	: İstenen yükseklik değeri (m)
z_{ref}	: Ölçüm noktası yüksekliğı (m)
z_0	: Pürüzlülük uzunluğı (mm)
Z_{eq}	: Eşdeğer empedans
α_p	: Pürüzlülük katsayısı
α	: Açısal ivme
β	: Kanat açısı

Γ	: Gama fonksiyonu
Γ_{wt}, T_m	: Rüzgar hızının endüklediği aerodinamik moment
Γ_G, T_e	: Generatörün endüklediği elektromagnetik moment
ε	: Özgül yalıtkan sabiti
θ	: Faz açısı
λ	: Uç hızı
μ, μ_r	: Magnetik geçirgenlik, bağlı magnetik geçirgenlik
ρ	: Hava (akış) yoğunluğu (kg/m^3)
τ	: Moment
τ_{ind}	: Endüklenen moment
ϕ	: Toplam akı
ω, ω_m	: Açısal frekans
Ω_l	: LSS rotor dönme hızı

DEĞİŞKEN RÜZGAR HIZLARINDA RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE ASENKRON GENERATOR MOMENT KONTROLÜ

ÖZET

Artan popülasyon kaçınılmaz olarak dünyanın enerji ihtiyacını arttırmakta ve fosil yakıtlı enerji üretim yöntemleri dışında yeni enerji üretim yöntemleri ihtiyacı her geçen gün daha fazla önem kazanmaktadır. Uzun vadede yapılan tahminlerde fosil yakıtların tükeneceği öngörülere yapılmaktadır. Bu da enerji arz güvenliğini tehdit eden önemli bir unsurdur. Ayrıca fosil yakıtların kullanımının artması sera gazı salımlarının sürekli ve düzenli olarak artarak atmosfere karışmasına yol açmakta, bunun sonucu olarak küresel ısınma başta olmak üzere, hava kalitesinde bozulma, su kaynaklarının kirlenmesi gibi öngörülen çevresel etkileri ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynakları geleceğin temiz enerjisinin üretilmesi ve doğabilecek enerji krizlerini önleme veya en azından geciktirmek için oldukça önemlidir. Bu nedenle gelişmiş devletler özellikle rüzgar enerjisine yatırım yapmakta, gelecek enerji politikalarında rüzgar enerjisine önem vermektedirler.

Enerji kaynağı yoksunu ülkeler enerjiyi ithal etmekte, dışa bağımlı bir ekonomik sistemi yönetmeye çalışmaktadırlar. Enerji teminindeki önemli parametrelerden olan sürdürülebilirlik, enerji arz güvenliği ve çeşitlilik enerji kaynağı yoksunu devletler için tehdit arz etmektedir. Fosil yakıt kaynakları olmayan devletlerin alternatif enerji kaynakları arayışlarına girmeleri ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapmaları oldukça önemlidir. Bu nedenle rüzgar enerjisi birçok gelişmiş enerji yoksunu devlet için önemli bir enerji yatırımı olarak popülerliğini arttırmaktadır.

Rüzgar enerjisinin artan önemi ve popülaritesi ile birlikte, gelişen rüzgar türbini teknolojileri, doğabilecek bütün problemlere çözüm bulmakta ve sürekli olarak gelişmektedir. Bu tez kapsamında, değişken rüzgar hızlarında asenkron generatörün maruz kalacağı değişken momentin kontrolü incelenecek, kontrol yöntemleri açıklanacaktır. MATLAB-Simulink programı kullanılarak 2 MW'lık bir rüzgar türbininin değişken rüzgar hızlarında vektör moment kontrolü yöntemiyle çıkış gücü iyileştirilecek, mekanik kontrol olmaksızın toplam türbin verimi iyileştirilecektir. Kafesli asenkron generatör kullanılan rüzgar türbininde rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjiden maksimum verim sağlanarak, rotor hızı kontrol edilecek, asenkron generatörlerin değişken hızlara olan uyumundan faydalanılacaktır. Herbir rüzgar hızında optimum rotor dönme hızı tespit edilerek uç hızı değeri belirlenecektir. Dolayısıyla herbir rüzgar hızında optimum elektromagnetik moment referans değeri belirlenerek asenkron generatör kontrolü yapılacaktır.

TORQUE CONTROL OF ASYNCHRONOUS GENERATORS IN WIND TURBINES UNDER VARIABLE WIND SPEEDS

SUMMARY

2040 population predictions consider a %25 increase compared with 2010 which means 9 billion people all over the world. Additional two billion people means enormous increase on energy demand of the world. Especially electricity usage on residential, other living areas and power industries are estimated to be increased dramatically. Most of world population increase will come from Africa, India and other developing countries. OECD countries and China's population growth are expected to be more stable. That energy demand is predicted to be %1.5 per each year. Nuclear and renewable energy sources will increase %2.5 per year to compensate energy demand. Even though fossil fuels are limited and not equally distributed on the world, energy gained by fossil fuels will still place %75 of total energy generation.

Based on oil proved reserve calculations, it is said 30-50 years remaining oil is left by considering current world growth expectations. Since most developed countries are lack of reaching oil sources in their lands, this limited source would cause an energy crises finally. Similar approaches can be assumed for natural gas as well. %74,2 of proved natural gas reserves are only split up Middle-East and Eurasia countries. Coal reserves might be said to be split to world ground relatively equally. But coal stores hydrocarbon inside which increase carbon emission rates to the Earth which is assumed one of biggest impact of global warming. CO₂ emission increase causes greenhouse gas creation.

All those facts push governments to take necessary actions as soon as possible not to take risk of possible energy crises in future aspects. Meanwhile, Kyoto protocol demands specially developed countries to decrease its volumes of CO₂ emission rates. As a result of this, many environmental impacts occur such as global warming, air and water pollution. Most developed countries declared their energy policies which includes big investments to renewable energy sources leading with wind power already. Since wind power is nature friendly and available for nearly every country surrounding the Earth, it keeps a big popularity to be an alternative energy source for the world. With proved technological developments, wind power is expected to increase its share in total installed power of the world.

Along with wind energy's increased importance and popularity, developed wind turbine technology serves better solutions of whole problems and keep developing itself. Biggest concern on wind power is stability and sustainability. Since wind is not a stable and continuous source, generated power would be also changeable depending on wind speed. Considering kinetic energy of a wind flow as $E_k = 1/2 \rho A v^3$, energy generation proportionally depends on cubic of wind speed, and square of radius of swept area. Wind speed may vary seasonal, day by day and even hours by hours. But, energy demand will stay constant on the other hand.

Theoretically, possible kinetic energy would be converted to rotational mechanic power with maximum %59.3 rate. In real life, modern wind turbines are lack of reaching that amount to increase possible energy from wind. Since mechanically converted energy multiplies by power factor C_p , and power factor varies with tip speed $\lambda = R\Omega_r/V$ of rotor, rotor rotational speed determines efficiency of wind turbines. Wind changes with time, by adopting rotational speed up to wind speed variations, power coefficient would be kept at optimum rate.

Since wind is not a controllable variable input, wind turbine efficiency will directly depend on wind velocity unless we control other only possible variable which is rotor rotational speed. For each wind speed, optimum operation conditions would be defined based on power factor C_p and tip speed λ curve. Rotor speed would determine power factor directly under variable wind speed. With better power factor output, total power plant efficiency would increase as well.

Electrical machines convert mechanical power to electrical power with different principles. As all national grids carry on alternative current (AC) power to consumers, mostly AC machines are used in wind turbines which are synchronous and asynchronous machines. Synchronous machines require relatively stable and constant speed which is not easy to adopt a changeable wind speed. Therefore, most of modern wind turbines include asynchronous generators which are suitable for variable speeds. Another advantage of asynchronous generators are relatively easy torque control which is highly desired by a wind turbine with variable wind speed. To increase efficiency, rotor speed shall be adopted and changed according to wind speed. How to change rotor speed as required? Determining optimum speed is first step to achieve correct operation condition. Based on reference speed, reference torque shall be generated and applied to the generator to reach desired speed of rotor. According to wind and electromagnetic torque which is generated by generator, optimum rotor currents and flux are determined to meet system requirements. And finally system adopt itself for a short time after each wind speed change which submit a reliable power factor increase to whole plant.

Under this thesis, variable torque control of asynchronous generator under variable wind speeds is examined, control technics and methodologies are explained. To reach desired rotor rotational speed, torque control of asynchronous machines has been applied on Matlab-Simulink. By using vector control of asynchronous machines, a Simulink program has been built for a 2 MW wind turbine. Based on reference torque generated according to different wind speeds has been used to control generator torque. In vector control algorithm, stator voltages are created and applied to stator circuit directly to adopt reference speed accordingly. Different voltage varies stator current which is used back to vector control system as a feedback system.

By capturing most power of wind kinetic energy using wind turbines with caged asynchronous generator, power output recruitment is done, concurrency of asynchronous machines with variable speed differences will be used of as well. Tip speed ratio is determined for optimum rotationally speed of rotor for each wind speed. Optimum wind speed is determined by indirect vector control of asynchronous machines. Reference electromagnetic torque is defined; optimum rotor flux is compared with current rotor flux and filtered by a PI control. Rotational speed determines stator q-current reference value, compares with stator q-current, enters a

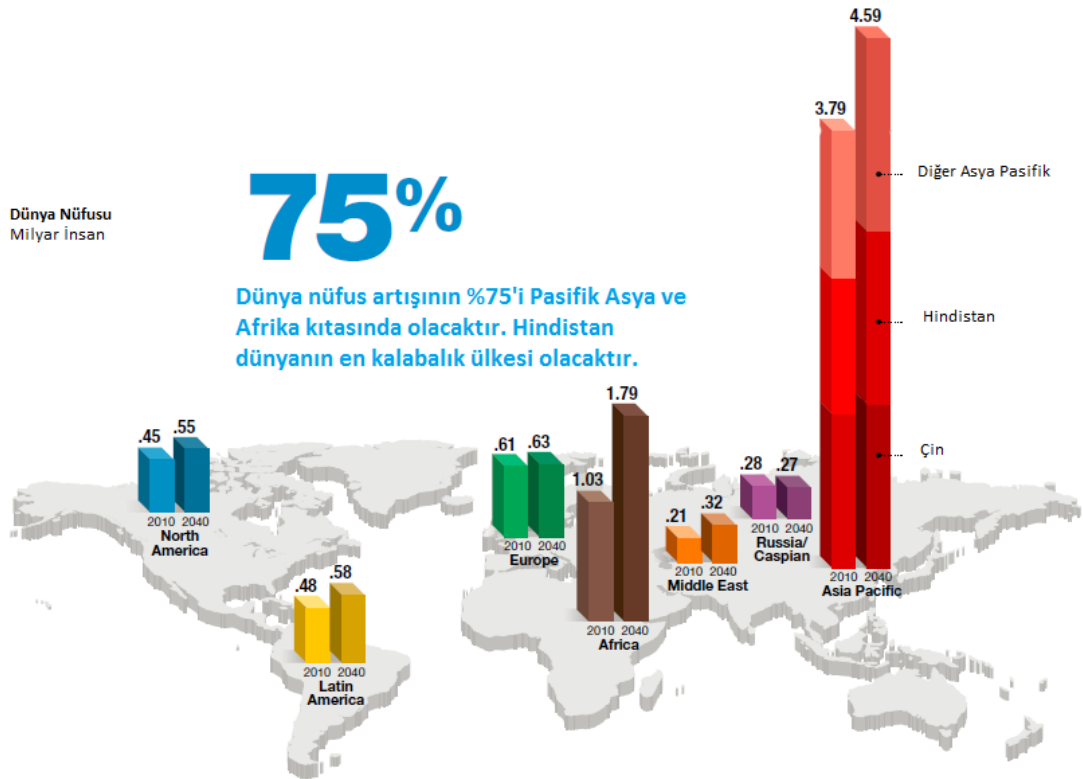
PI control as well. Both PI control outputs determine optimum stator voltage and control electromagnetic torque based on optimum conditions.

Applied simulation results optimum solutions as demanded. Power factor is optimized to best possible values, tip speed is controlled successfully to adopt variable wind speed. As final result, active power output is optimized, captured best possible power from wind without doing any mechanical control such as pitching control of rotor blades. But for bigger wind speeds, pitching would be more reliable and efficient way to keep power output as its rated value. Since squirrel cage induction machine (SCIG) is used in simulation, machine asked for external reactive power to supply generator which vary with wind speed as well.

To respond energy demand which will occur in future, wind power is an important alternative to support grid on specially pick hours. Even though wind power cannot perform as base load in whole system, it is a necessary part to meet pick energy demands which can be seen at any time in a day. Modern wind turbines are designed to fulfill energy gaps of countries during intense terms. More optimization would help to capture more power from wind. Wind is natural power, shall be used more efficiently!

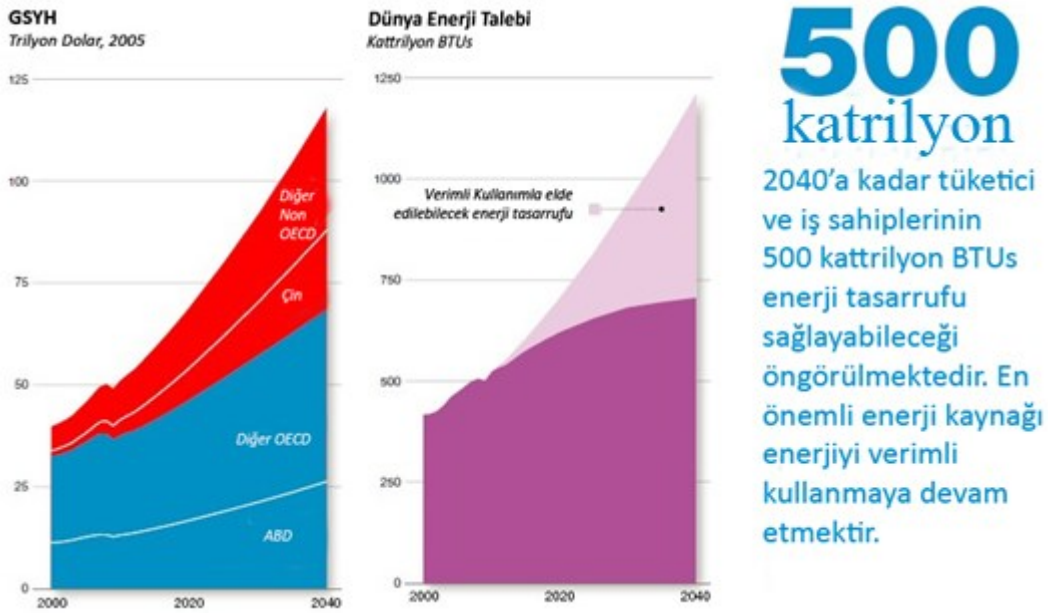
1. GİRİŞ

Fosil yakıtların tükenmesine yönelik bilimsel tahminler, artan dünya enerji ihtiyacının karşılanması noktasında devletleri yeni arayışlara itmekte, gelecek enerji planlamalarında fosil yakıtlara dayalı enerji üretim payının azaltılması yönünde tedbir önlemleri almaya zorlamaktadır. Şekil 1.1'de gösterildiği üzere dünya nüfusunun 2010 yılına göre %25'lik bir artış göstererek 2040 yılında 9 milyar'a ulaşması öngörülmektedir. 2 milyar fazla insan büyük bir enerji talep fazlası anlamına gelmekte, ev, diğer yaşam alanları ve güç endüstrisi için elektrik ihtiyacını arttırması beklenmektedir. Dünya nüfusundaki bu artışın büyük çoğunluğunu Afrika, Hindistan ve diğer gelişmekte olan ülkelerin oluşturması, Çin ve diğer OECD devletlerinin daha tutarlı bir artış göstereceği öngörülmektedir. Toplam hane halkı sayısının %50 oranında artması beklenmektedir ki bu konut enerji ihtiyacını önemli oranda etkilemektedir [1].



Şekil 1.1 : 2040 yılı dünya nüfus artışı tahmini [1].

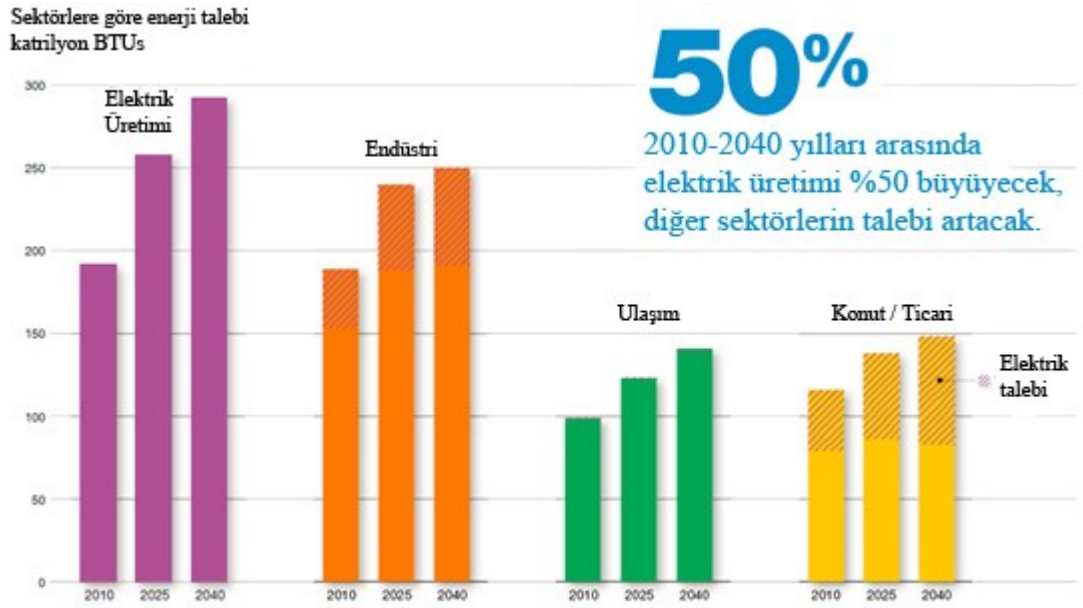
Öngörülen bu artış, ekonomik gelişmeyi tetikleyecek, hayat standartlarının yükselmesiyle enerji talebi de artacaktır. Özellikle Çin, bugünkü büyüme verileri ile öngörülen dünya ekonomik büyümesinde tek başına %20'lik bir paya sahip olacak, Hindistan ve Afrika 30 yıllık süreçte gayri safi yurtiçi hasıla (GSYH) artışında en önemli 2 devlet olacaklardır. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) başta olmak üzere OECD devletlerinin ise ekonomik büyümede %20'lik bir pay alması öngörülmektedir. Şekil 1.2'de global enerji ihtiyacının 2010 verilerine göre %35'lik bir artış ile, 700 kattrilyon BTUs (British Thermal Unit ~1055 Joule) olacağı gösterilmektedir [1].



Şekil 1.2 : 2040 yılı dünya gayri safi yurt içi hasıla artışı [1].

Enerji talebindeki artış özellikle 4 ana sektörde öngörülmektedir: elektrik üretimi, endüstri, ulaşım ve konut. Şekil 1.3'de bu sektörlerin birbirinden bağımsız karakteristik ve gereksinimleri gösterilmiştir. Bugün ve önümüzdeki 30 yıl boyunca, elektrik üretimi en büyük enerji tüketimi konumunda bulunmaktadır. Sadece 100 yılı aşkın bir süre önce elektrik yeni bir icat iken, şu an en temel gereksinimler arasında yer almaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (EIA)'nın raporlarına göre hala 1.3 milyar insan elektrikten yoksundur. Toplam endüstriyel enerji tüketimi 2040'a kadar %30 oranında artacak olup, özellikle tarımdan hammadde üretimine, kimya sanayiinden plastik sanayiine kadar geniş bir yelpazede yer almaktadır. Ulaşım enerji ihtiyacının %45'lik bir artış göstermesi insanların ve her türlü yükün kara, deniz ve hava yolu ile taşınması gerekliliğinin artacak olması nedeniyle öngörülmektedir.

Bütün bu sektörlerin varlıklarını devam ettirebilmeleri ve bu derecede büyük bir artış gösterebilmeleri elektrik üretiminin artmasıyla mümkündür [1].



Şekil 1.3 : Sektörlere göre enerji talebi [1].

2013 Uluslararası Enerji Görünüm raporu (IEO2013) verileri incelendiğinde sıvı yakıtların tüketim artış hızı 2010-2040 yılları arasında %0.9'luk yıllık artış hızına sahiptir. Buna karşın yıllık toplam enerji ihtiyacı artış hızı %1.5 olarak belirlenmiştir. Nükleer enerji ve yenilenebilir kaynakların artış hızı ise %2.5 olarak beklenmektedir. Enerji güvenliği açısından, fosil yakıtların çevreye olan olumsuz etkileri ve petrol fiyatlarındaki düzenli artış nükleer ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını destekler niteliktedir. Hükümet politikaları ve uygulanan teşvikler dünya enerji üretiminde fosil yakıtların dışında alternatif yolların araştırılması ve geliştirilmesini desteklemektedir [2].

Fosil yakıtlar dünya enerji tüketiminde en büyük paya sahip olmaya devam edecektir. 2040 projeksiyonunda petrol, doğal gaz ve kömür dünya enerji tüketiminde %75'den fazla pay sahibi olmaya devam edecektir. Petrol ve diğer sıvı yakıtların en büyük enerji kaynağı olmaya devam etmesi öngörülmekte, ancak 2010 yılında %34 olan payın 2040 yılında %28'e düşmesi beklenmektedir. Sadece endüstri ve ulaşım sektörlerinde sıvı yakıtların kullanımının artması beklenmekte, buna karşın bina ve elektrik üretim sektörlerinde kullanım payının düşmesi öngörülmektedir. Sıvı yakıtların konut, ticaret ve elektrik üretim sektörlerindeki beklenen düşüşü dünya petrol fiyatlarındaki artıştan kaynaklanmaktadır.

Karşı tarafta, petrol fiyatlarındaki artışa rağmen ulaşım sektöründeki sıvı yakıt kullanımı yılda %1.1'lik bir artış hızı ile sürerek toplam sıvı yakıt tüketim artışının %63'ünü teşkil edecektir [2].

1.1 Dünya Petrol Öngörüsü

2012 yılı ortalama günlük varil başına ham petrol fiyatı 111.67 \$ olmuş ve 2011 yılına göre varil başına 0.40\$'lık bir artış göstermiştir. İran'a uygulanan ambargo ABD petrol üretimindeki artış, Libya'nın yeniden üretime katılması ve Suudi Arabistan üretim artışı ile kompanze edilmeye çalışılmaktadır. Global petrol tüketimi 890,000 varil/gün yani %0.9 oranında artmış, geçmiş artış veri ortalamasının altında kalmıştır. OECD devletlerinin tüketimi %1.3 oranında azalmış (530,000 varil/gün), bu geçmiş yedi sene içerisinde altıncı kez düşüş verisi olarak kaydedilmiştir. Zira, OECD devletleri %50.2 ile toplam petrol tüketiminde tarihin en düşük payına gerilemiştir. OECD devletleri dışında geri kalan ülkelerin petrol tüketim oranları 1.4 milyon varil/gün'lük artış göstermiştir (%3.3). Çin bir kez daha 470,000 varil/gün (%5)'lik artış ile en büyük artış kaydeden ülke olmuştur. Keza, Japonya'da 250,000 varil/gün (%6.3)'lük artışla önemli bir ivme kaydetmiştir [3].

Tüketim verilerine karşın, 2012 yılı global petrol üretimi 1.9 milyon varil/gün (%2.2)'lik artış kaydetmiştir. İran üretim verilerinin ambargo nedeniyle düşmesine (-680,000 varil/gün) rağmen, OPEC ülkeleri bu artışın 3 çeyreklik kısmını karşılamıştır. 2012 yılı sonu verilerine göre 1,668.9 milyar varil/gün'lük kanıtlanan petrol rezervi bulunmaktadır. Çizelge 1.1'de dünya kanıtlanmış petrol rezervlerinin yanı sıra 2012 yılına ait toplam petrol üretim verileri ve tüketim verileri yer almaktadır. 2012 yılı petrol üretimi 86,152 bin varil/gün olarak gerçekleşmiştir. Dünyanın artan petrol tüketimi düşünüldüğünde varolan petrol rezervinin 30-50 yıl arasında tükeneceği öngörüsü yapılmaktadır [3]. Keza petrol fiyatlarının geçmişten bugüne değişimi ve var olan öngörüler ile, 2035 yılına kadar varil başına petrol fiyatının 160 \$'a ulaşması beklenmektedir. Özellikle artan fiyat ve kısıtlı rezervler, petrolün enerji üretimindeki payını azaltacak ve bu boşluğun doldurulması elzem olacaktır. Buna göre rüzgar enerjisinin öncülüğünü ettiği yenilenebilir enerji kaynaklarının 2035 yılına kadar %7.5 büyüme kaydetmesi beklenmektedir. Bu büyüme hükümet politikaları ile canlanacak, yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırımlar artacaktır [4].

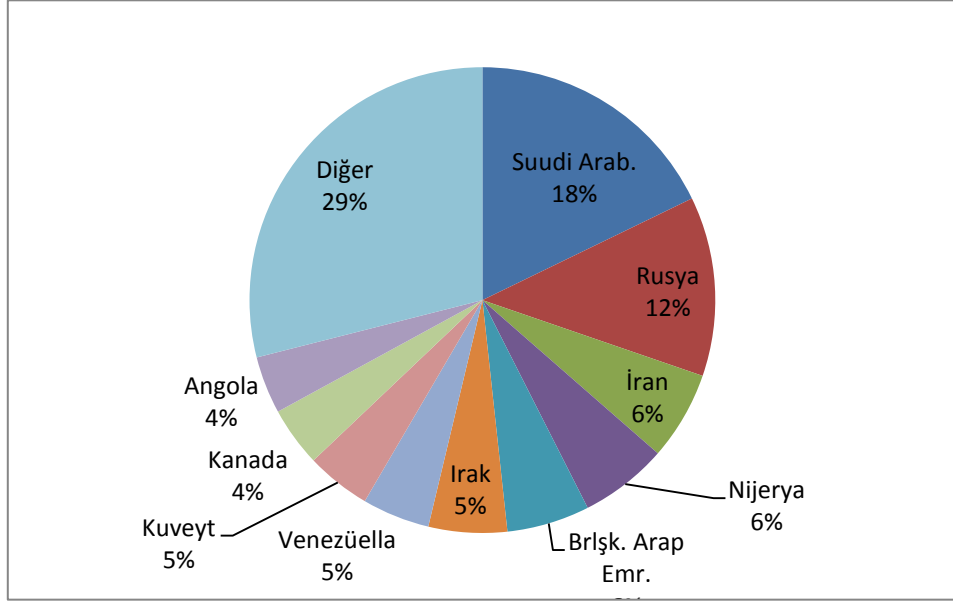
Çizelge 1.1 : Petrol toplam rezerv, üretim ve tüketim verileri [3].

2012 Yılı Verileri	Toplam Petrol Rezervi (Milyar Varil)	Toplam Petrol Üretimi (bin varil/gün)	Toplam Petrol Tüketimi (bin varil/gün)
Toplam Ortadoğu	807.7 (%48.4)	28,270 (%32.5)	8,354 (%9.1)
Suudi Arabistan	265.9 (%15.9)	11,530(%13.39)	2,935 (%3.1)
İran	157.0 (%9.4)	3,680 (%4.2)	1,972 (%2.2)
Irak	150.0 (%9.0)	3,115 (%3.7)	-
Kuveyt	101.5 (%6.1)	3,127 (%3.7)	476 (%0.5)
Brlşk. Arap Em.	97.8 (%5.9)	3,380(%3.7)	720 (%0.8)
Diğer Toplam	35.5 (%2.1)	3,437 (3.81)	2,251 (%2.5)
Güney Amerika	328.4 (%19.7)	7,359 (%9.2)	6,533 (%7.3)
Venezüella	297.6 (%17.8)	2,725 (%3.4)	781 (%0.9)
Brezilya	15.3 (%0.9)	2,149 (%2.7)	2,805 (%3.0)
Diğer Toplam	15.5 (%1)	2,485 (%3.1)	2,947 (%3.4)
Kuzey Amerika	220.2 (%13.2)	15.557 (%17.5)	23.040 (%24.6)
ABD	35.0 (%2.1)	8,905 (%9.6)	18,555 (%19.8)
Kanada	173.9 (%10.4)	3,741 (%4.4)	2,412 (%2.5)
Meksika	11.4 (%0.7)	2,911 (%3.5)	2,074 (%2.2)
Avrupa-Avrasya	140.8 (%8.4)	17.211 (%20.3)	18,543 (%21.3)
Rusya	87.2 (%5.2)	10,643 (%12.8)	3,174 (%3.6)
Kazakistan	30.0 (%1.8)	1,728 (%2.0)	265 (%0.3)
Azerbeycan	7.0 (%0.4)	872 (%1.1)	93 (%0.1)
Norveç	7.5 (%0.4)	1,916 (%2.1)	247 (%0.3)
İngiltere	3.1 (%0.2)	987 (%1.1)	1,468 (%1.7)
Diğer Toplam	6.0 (%0.4)	1,065 (%1.2)	13,296 (%15.3)
1. Almanya	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 2,358 (%2.7)
2. Fransa	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 1,687 (%2.0)
3. İtalya	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 1,345 (%1.6)
4. İspanya	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 1,278 (%1.5)
5. Türkiye	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 685 (%0.8)

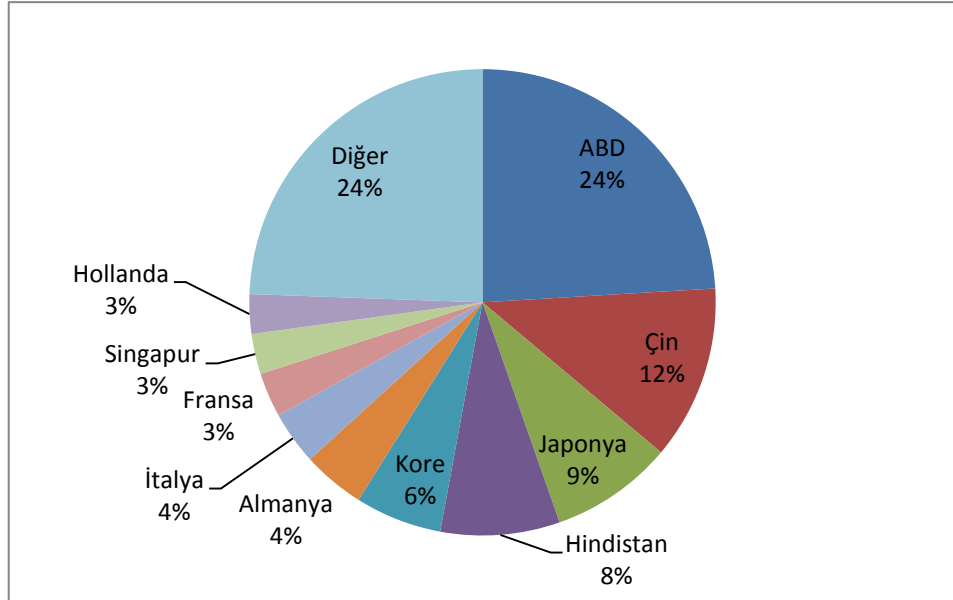
Çizelge 1.1 (devam): Petrol toplam rezerv, üretim ve tüketim verileri [3].

Toplam Afrika	130.3 (%7.8)	9,442 (%7.7)	3,523 (%5.1)
Libya	48.0 (%2.9)	1,509 (%1.7)	İçinde
Nijerya	37.2 (%2.2)	2,417 (%2.8)	İçinde
Cezayir	12.2 (%0.7)	1,667 (%1.8)	367 (%0.4)
Angola	12.7 (%0.7)	1,784 (%2.1)	İçinde
Mısır	4.3 (%0.3)	728 (%0.9)	744 (%0.9)
Diğer Toplam	15.9 (%1)	1,337 (%1.6)	2,411 (%3.8)
Asya Pasifik	41.4 (%2.5)	8,313 (%9.6)	29,781 (%33.6)
Çin	17.3 (%1)	4,155 (%5.0)	10,221 (%11.7)
Hindistan	5.7 (%0.3)	894 (%1)	3,652 (%4.2)
Avusturalya	3.9 (%0.2)	458 (%0.5)	1,019 (%1.1)
Endonezya	3.7 (%0.2)	918 (%1.1)	1,565 (%1.7)
Diğer Toplam	10.8 (%0.8)	1,888 (%2)	13,324 (%14.9)
1. Japonya	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 4,714 (%5.3)
2. G. Kore	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 2,458 (%2.6)
3. Tayland	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 1,212 (%1.3)
4. Singapur	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 1,255 (%1.6)
Genel Toplam	1,668.9 (%100)	86,152 (%100)	89,774 (%100)

Çizelge 1.1 [3] incelendiğinde, ve 2011 yılı petrol ticaret verileri incelendiğinde, dünyanın petrol ihtiyacını karşılayan ülkeler başlıca Suudi Arabistan, Rusya, İran ve Nijerya olarak sıralanmaktadır (Şekil 1.4). Bunun yanı sıra Şekil 1.5’de gösterildiği üzere en büyük tüketiciler ABD, Çin, Japonya ve Hindistan olarak sıralanmaktadır. Bu veriler, özellikle petrol fakiri devletlerin enerji politikalarını belirlerken alternatif enerji kaynaklarına yatırım yapmalarını zaruri kılmaktadır. Rüzgar enerjisi geliştirmeye açık, doğal ve sürekli bir kaynak olarak oldukça talep görmekte, yeni teknolojiler ile birlikte daha çok rakabet görmeye başlamaktadır [5].



Şekil 1.4 : Petrol ihraç eden devletler (%) [5].



Şekil 1.5 : Petrol ithal eden ülkeler (%) [5].

1.2 Dünya Doğal Gaz Öngörüsü

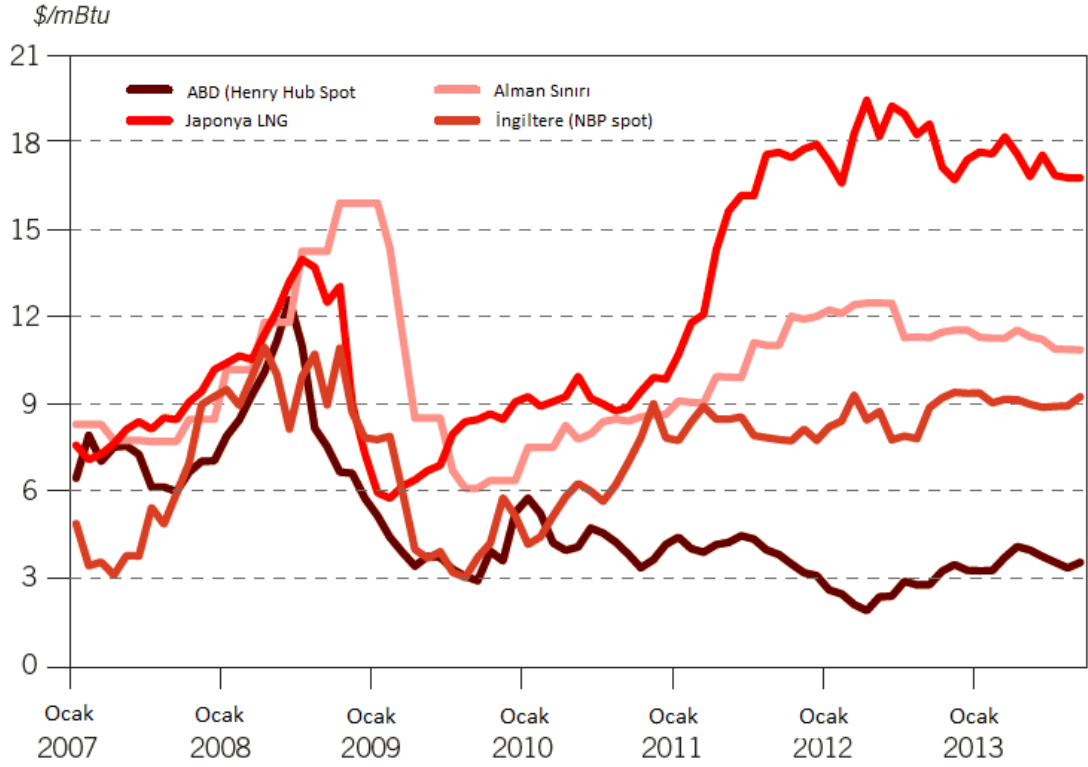
IEO2013 referans raporu doğal gazın dünyanın en hızlı büyüyen fosil yakıt olduğunu göstermekte, tüketimin 2010 yılı 113.0 trilyon feet küp (m^3) verisinden 2040 yılı için 185 trilyon feet küp (m^3) seviyesine çıkması öngörülmektedir. Bu artışın dünyanın geneline yayılması ancak yoğunluğun OECD üyesi olmayan devletler etrafında gelişmesi beklenmektedir. Keza OECD üyesi olmayan devletler, 2010-2040 yılları arasında beklenen üretim artışının %70'den fazlasını karşılayacaktır. Çevresel açıdan diğer hidrokarbon içeren fosil yakıtlara nazaran daha temiz bir yakıt olması, hızlı

artışın önemli etkenlerinden birisidir. Kolay kurulumları, yüksek verimleri ve uzun ömürleri dünyanın birçok bölgesinde elektrik üretiminde tercih edilmelerine yol açmaktadır. Endüstriyel doğal gaz tüketimi 2040 yılına kadar her yıl %1.5 oranında ve elektrik üretiminde doğal gaz kullanımının %2.0 artması beklenmektedir [2].

Doğal gaz CO₂ emisyonlarını düşürmede en öncelikli temel yük sağlayan fosil yakıtlardan olmak ile birlikte, sadece fiyatının kömür fiyatlarının altında seyrettiği zaman tercih edilmektedir. 2010-2012 yılları arasında doğal gaz santralleri %5'lik bir artış göstermiştir. Karbon salınımının azaltılması ile küresel ısınmaya yol açan seragazı etkilerinin azaltılması açısından doğal gaz fiyatlarının kömür fiyatlarına göre daha düşük olan bölgelerde kömür santrallerinin yerine gaz santrallerinin kurulması oldukça önemlidir. Bunun sağlanması için geliştirilen karbon ticaretinde belirlenecek karbon fiyatları devletleri bu dönüşümü yapmaya zorlayacaktır [6].

ABD ve Kanada'nın kaya gazı araştırmaları doğal gazın geleceğini belirleyecek, özellikle doğal gaz fiyatlarını çok etkileyecektir. Şekil 1.6'da görüldüğü üzere doğal gaz spot market fiyatları bölgeden bölgeye büyük farklılık gösterebilmektedir. ABD ve diğer market fiyatları arasında büyük bir fark bulunmaktadır. 2009 yılında ABD'nin kaya gazı kaynağı ve bunun ticari karşılığı yönünde süren çalışmalar ABD spot doğal gaz fiyatında düşüşe neden olmuş, aksine diğer bölgelerdeki fiyatların artmasına neden olmuştur. ABD doğal gaz fiyatları milyon BTU (mBTU=252 milyon kcal) başına \$4 civarında seyretmekte, buna karşın İngiltere Ulusal Dengeleme Noktası (NBP) spot fiyatı \$8/mBTU civarında seyretmekte, Japonya sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) terminalindeki spot fiyat 2009 yılında \$9 ilen 2013 yılında \$18'e çıkmıştır. Endonezya'dan temin edilen gazın yüksek ulaşım maliyetleri, altyapı eksikliği ve farklı market yapıları bu farkın ana nedenleridir [4].

2012 yılında dünya doğal gaz tüketimi %2.2 oranında artmıştır. Tüketimin ortalamanın üzerinde seyrettiği bölgeler Güney & Merkez Amerika, Afrika ve %4.1'lik artış ile dünyanın en büyük artışını gösteren ABD'nin liderliğinde Kuzey Amerika olarak gerçekleşmiştir. Çin %9.9'luk artış ve Japonya %10.3'lük artışla önemli bir ivme kaydetmişlerdir. Buna karşın AB (Avrupa Birliği) üyeleri tüketimi %2.3 düşmüş, eski Sovyetler Birliği devletlerinde de %2.6'lık bir düşüş kaydedilmiştir. Global olarak doğal gaz birincil enerji tüketiminde %23.9'luk bir paya sahiptir. 2000 yılından bu yana ilk defa OECD ülkelerinin tüketim hızı OECD üyesi olmayan devletlerinkinden daha hızlı bir artış göstermiştir.



Şekil 1.6 : Doğal gaz market fiyat değişimi [4].

Global doğal gaz üretimi %1.9'luk bir artış kaydetmiş, ABD üretim de de %4.7'lik artışla artışta en büyük hacime sahip olmuş ve dünyanın en büyük üreticisi konumunu güçlendirmiştir.

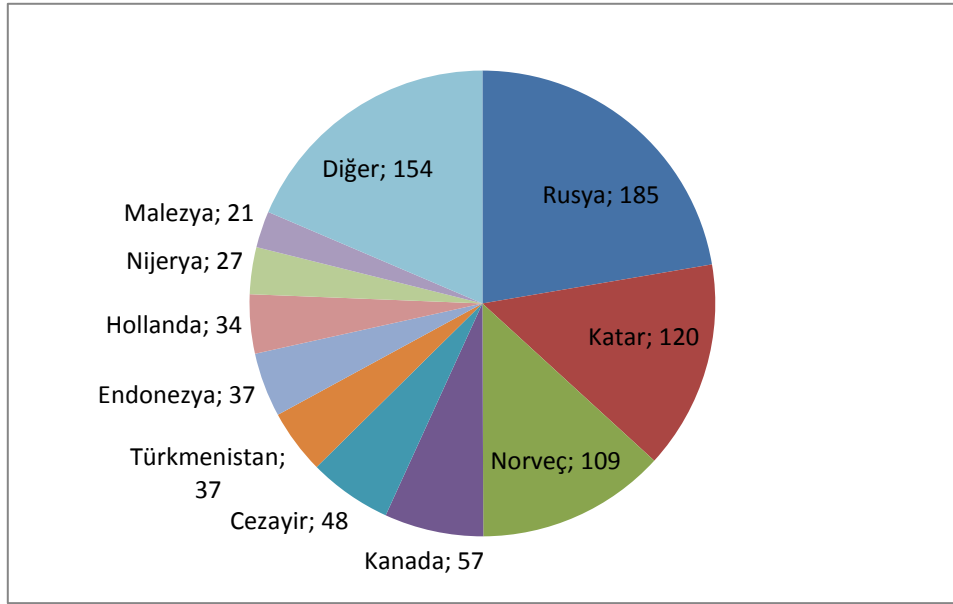
Çizelge 1.2 : Doğal gaz toplam rezerv, üretim ve tüketim verileri [3].

2012 Yılı Verileri	Toplam Doğal Gaz Rezervi (Trilyon m ³)	Toplam Doğal Gaz Üretimi (Milyar m ³ /gün)	Toplam Petrol Tüketimi (Milyar m ³ /gün)
Toplam Ortadoğu	80.5 (%43.0)	548.4 (%16.3)	411.8 (%12.4)
İran	33.6 (%18.0)	160.5 (%4.8)	156.1 (%4.7)
Katar	25.1 (%13.4)	157.0 (%4.7)	26.2 (%0.8)
Brlşk. Arap Em	6.1 (%3.3)	51.7 (%1.5)	62.9 (%1.9)
Irak	3.6 (%1.9)	0.8 (%*)	-
Diğer Toplam	12.1 (%6.4)	178.4 (%5.3)	166.7 (%7.9)
Güney Amerika	7.6 (%4.1)	177.3 (%5.3)	165.1 (%5.0)
Venezüella	5.6 (%3.0)	32.8 (%1.0)	34.9 (%1.1)
Brezilya	0.5 (%0.2)	17.4 (%0.5)	29.2 (%0.9)
Diğer Toplam	5.5 (%0.9)	127.1 (%3.8)	101.0 (%3.0)

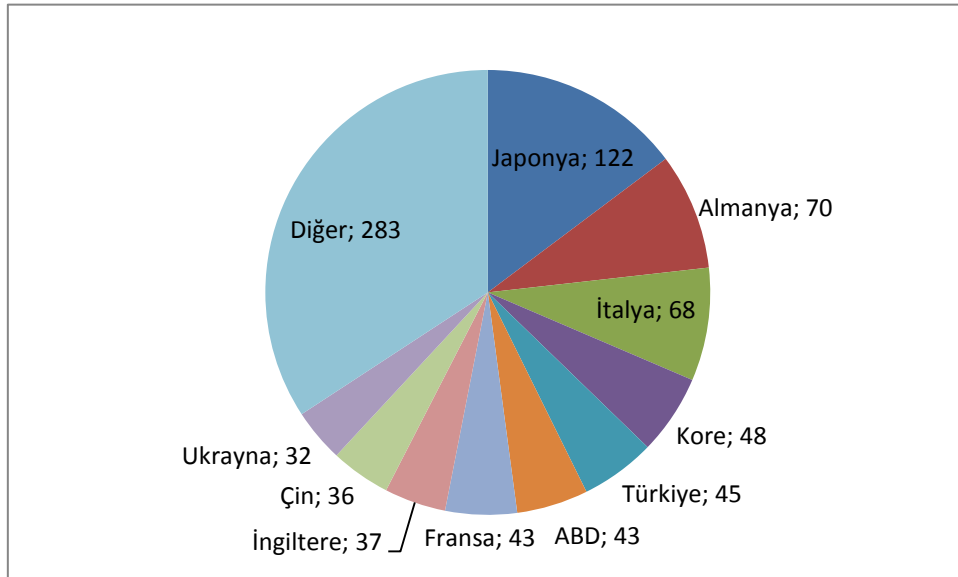
Çizelge 1.2 (devam): Doğal gaz toplam rezerv, üretim ve tüketim verileri [3].

Kuzey Amerika	10.8 (%5.8)	896.4 (%26.8)	906.5 (%27.5)
ABD	8.5 (%4.5)	681.4 (%20.4)	722.1 (%21.9)
Kanada	2.0 (%2.0)	156.5 (%4.6)	100.7 (%3.0)
Meksika	0.4 (%0.2)	58.5 (%1.7)	83.7 (%2.5)
Avrupa-Avrasya	58.4 (%31.2)	1035.4 (%30.7)	1083.3(%32.6)
Rusya	32.9 (%17.6)	592.3 (%17.6)	416.2 (%12.5)
Türkmenistan	17.5 (%9.3)	64.4 (%1.9)	23.3 (%0.7)
Norveç	2.1 (%1.1)	114.9 (%3.4)	4.3 (%0.1)
Kazakistan	1.3 (%0.7)	19.7 (%0.6)	9.5 (%0.3)
Diğer Toplam	4.6 (%2.5)	244.1 (%7.2)	643 (%13.6)
1. Almanya	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 75.2 (%2.3)
2. Fransa	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 42.5 (%1.3)
3. İtalya	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 68.7 (%2.1)
4. İngiltere	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 78.3 (%2.4)
5. Türkiye	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 46.3 (%1.3)
Toplam Afrika	14.5 (%7.7)	216.2 (%6.4)	122.8 (%3.7)
Nijerya	5.2 (%2.8)	43.2 (%1.3)	İçinde
Cezayir	4.5 (%2.4)	81.5 (%2.4)	30.9 (%0.9)
Mısır	2.0 (%1.1)	60.9 (%1.8)	52.6 (%1.6)
Libya	1.5 (%0.8)	12.2 (%0.4)	İçinde
Diğer Toplam	1.3 (%0.6)	18.4 (%0.5)	39.3 (%1.2)
Asya Pasifik	15.5 (%8.2)	490.2 (%14.5)	625.0 (%18.8)
Avustralya	3.8 (%2.0)	49.0 (%1.5)	25.4 (%0.8)
Çin	3.1 (%1.7)	107.2 (%3.2)	143.8 (%4.3)
Hindistan	1.3 (%0.7)	40.2 (%1.2)	54.6 (%1.6)
Malezya	1.3 (%0.7)	65.2 (%1.9)	33.3 (%1.0)
Diğer Toplam	6.0 (%3.1)	228.6 (%6.7)	367.9 (%11.1)
5. Japonya	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 116.7 (%3.5)
6. G. Kore	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 50.0 (%1.5)
7. Tayland	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 51.2 (%1.5)
8. Pakistan	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 41.5 (%1.2)
Genel Toplam	187.3 (%100)	3,363.9 (%100)	3,314.4 (%100)

Çizelge 1.2’de gösterilen 2012 doğal gaz verileri incelendiğinde, en büyük doğalgaz ihracatı yapan ülkeler Rusya, Katar ve Norveç olarak görülmektedir (Şekil 1.7). Norveç (+%12.6), Katar (+%7.8) ve Suudi Arabistan (+%11.1)’lik üretim artış oranı kaydederken Rusya ise %2.7’lik bir düşüş kaydederek dünyanın en büyük hacimde düşüş kaydeden ülkesi olmuştur [3]. Bunun yanı sıra Şekil 1.8’de gösterildiği üzere en çok doğalgaz ithalatı yapan ülkeler sırasıyla Japonya, Almanya, İtalya, Kore ve Türkiye olarak sıralanmaktadır.



Şekil 1.7 : Doğalgaz ihraç eden devletler [5].



Şekil 1.8 : Doğalgaz ithal eden devletler [5].

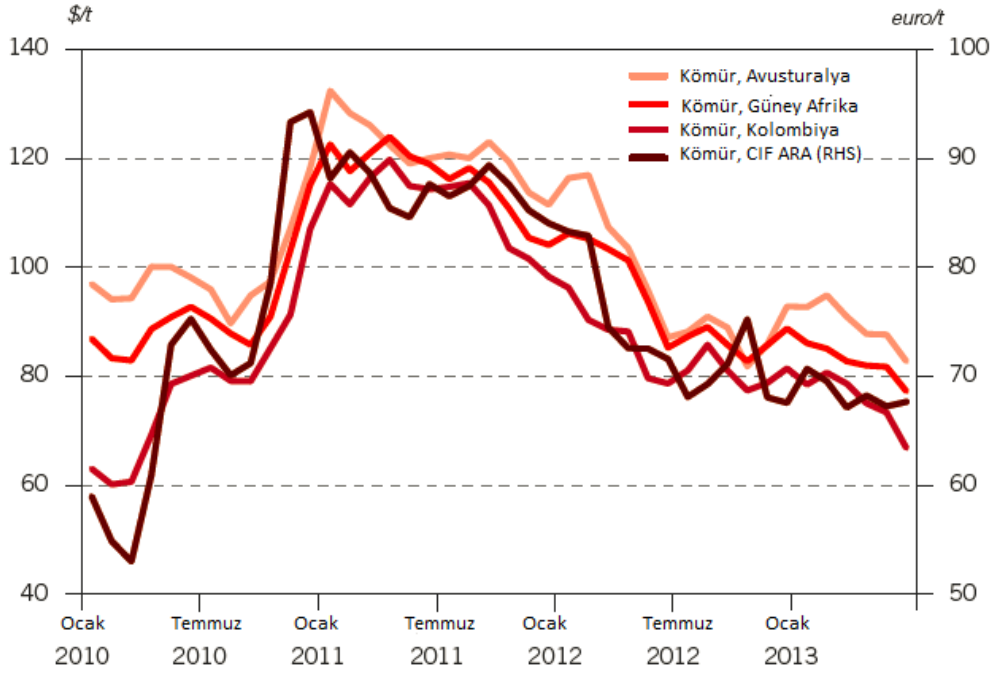
Türkiye dünya doğalgaz ithalatı sıralamasında %5’lik pay ile beşinci sırada yer almaktadır. Bu durum, bir çok gelişmiş ve gelişmekte olan devletin doğal fosil

yakıtlardan yoksun şekilde enerji ihtiyacını karşıladığını göstermektedir. Yenilenebilir enerji, fosil yakıt yoksunu devletlerin enerji taleplerini karşılamada önemli bir çözüm alternatifi konumundadır.

1.3 Dünya Kömür Öngörüsü

Kömür dünyada en geniş alanda kullanılan fosil yakıttır. Kömür, dünya elektrik üretiminin omurgası konumundadır, elektrik ihtiyacının %40'tan fazlasını karşılamaktadır. Aynı zamanda çelik ve beton üretiminde de kömür ana ekipman konumundadır. 2030 yılına kadar kömür tüketiminin %50 oranında artması beklenmekte, gelişmekte olan ülkelerin bu artışın %97'sini oluşturması beklenmektedir. 2000-2010 yılları arasında dünya enerji ihtiyaç artışının yaklaşık yarısını tek başına kömür karşılamıştır.

Kömür, fosil yakıtlar açısından daha geniş bölgelere yayılmış, hemen hemen birçok ülkenin sahip olduğu bir kaynaktır. Kömür kaynaklarının çokluğu, doğalgaz ve petrol aksine enerji güvenliği sağlamakta, devletlerin dışa bağımlılığını azaltmaktadır. Dünya üzerinde toplam 860 milyar ton kömür rezervi olduğu tahmin edilmektedir. Güncel tüketim verilerine göre, 118 yıllık kaynak ömründen bahsedilebilir. Buna karşılık keşfedilmiş petrol ve doğalgaz rezervlerinin eşdeğer ömrü 46 ve 57 yıl olarak hesaplanmaktadır. Ancak rezervler değişkenlik arz etmekte, özellikle kömür rezervinin daha uzun yıllar dünya üzerinde var olacağı yönünde analizler yapılmaktadır. En büyük kömür rezervleri, ABD, Rusya, Çin ve Hindistan'da bulunmaktadır. Keza birçok devlet, elektrik üretiminde tamamen kömür santrallerine endeksli bir politika gütmektedir. Örneğin, Polonya elektriğinin %92'ni, Çin %79'unu, Avusturalya %77'sini, Hindistan %69'unu, ABD %49'unu ve Almanya %46'sını kömürden elde etmektedir. Sera gazına olan olumsuz etkisi nedeniyle çeşitli kısıtlamalarla karşılaşmasına rağmen, kömürün 2030 yılında dünya elektrik üretiminde %33'lük bir paya sahip olması beklenmektedir. Dünyadaki büyük enerji talebinin karşılanması için, bütün enerji kaynakları kullanılmalı, enerji çeşitliliği sağlanmalıdır. Kaynağın varlığına göre temel yükün karşılanması için kömür ya da doğalgaz'dan birisi tercih edilebilir ya da çeşitliliğin artması için, iki kaynak da değerlendirilebilir. Bunlarla birlikte rüzgar enerjisinin öncülüğünde, yenilenebilir enerji şebekenin pik saatlerdeki taleplerinin karşılanmasında önemli bir yere sahip olacaktır [7].



Şekil 1.9 : Dünya kömür fiyatları [3, 4].

ABD kayagazı üzerine yürüttüğü çalışmalar ile kömür santrallerini azaltma politikası sonucunda, özellikle Avrupa devletlerine kömür ihracatını önemli ölçüde arttırmıştır. ABD'deki üretim fazlası kömür ve Çin ekonomisindeki belirsizlik uluslararası kömür fiyatlarının düşmesine neden olmuştur. Örneğin Şekil 1.9'da Aralık 2011'de CIF Antwerp/Rotterdam/Amsterdam (ARA) fiyatları 94€/t olmuş, ancak sonrasında düşme trendine girmiştir. Benzer trend Avusturalya, Kolombiya ve Güney Afrika kömürleri için de geçerlidir. Kömür fiyatlarının değişkenliği üretim ve tüketimin artıp azalmasıyla değişiklik göstermeye devam edecektir. Ancak, uluslararası kömür ticareti global olarak tüketilen kömürün sadece %15'ini teşkil etmektedir. Bununla beraber, doğal gaz market payının artması ile kömür fiyatlarının düşeceği öngörülebilir. Kömür kullanımının önündeki en önemli kısıtlama CO₂ emisyon oranının azaltılması yönündeki politikalar olacaktır. Avrupa'daki düşük karbon fiyatları, Avrupa Birliği (AB)'nin kömür-gaz dönüşümünü desteklemediği sonucunu ortaya koymaktadır. Uzun vadede sera gazını azaltmak üzere uygulanabilecek katı önlemlerin, kömürün enerji üretimindeki kullanımı önünde ciddi bir tehdit oluşturması beklenmektedir. Çin, yükselen enerji ihtiyacını karşılamak üzere kömür kullanımını arttıracaktır. Çizelge 1.3'de görüldüğü üzere en büyük kömür tüketicisi olarak Çin, uzun vadede dünya kömür piyasasını domine etmeyi sürdürecektir. Avusturalya dünyanın en büyük taş kömürü ihracatçısı konumundadır ve en önemli müşterileri Japonya ve Çin'dir [3, 4].

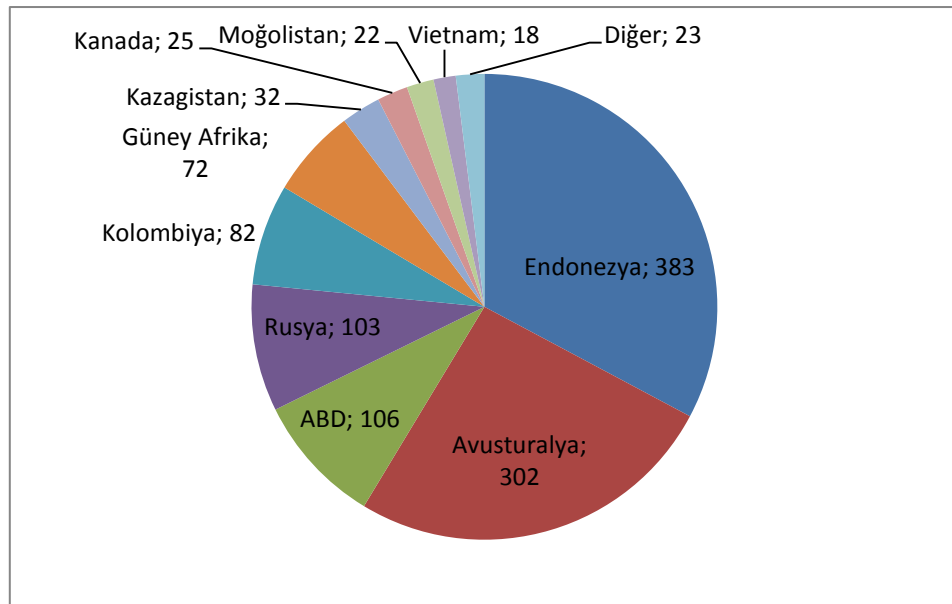
Çizelge 1.3 : Kömür toplam rezerv, üretim ve tüketim verileri [3].

2012 Yılı Verileri	Toplam Kömür Rezervi (Milyon Ton)	Toplam Kömür Üretimi (Milyon Ton Petrol Eşdeğer)	Toplam Petrol Tüketimi (Milyon Ton Petrol Eşd.)
Toplam Ortadoğu ve Afrika	32,895 (%3.8)	150 (%3.9)	107.4 (%2.9)
Güney Afrika	30,156 (%3.5)	146 (%3.8)	89.8 (%2.4)
Zimbabve	502 (%0,1)	1.7 (*%)	- (*%)
Diğer Afrika	1,034 (%0.1)	1.1 (*%)	7.7 (%0.2)
Orta Doğu	1,203 (%0.1)	0.7 (*%)	9.9 (%0.3)
Güney Amerika	12,508 (%1.5)	61.8 (%1.6)	28.2 (%0.8)
Brezilya	4,559 (%0,5)	2.2 (%0.1)	13.5 (%0.4)
Kolombiya	6,746 (%0.8)	58.0 (%1.5)	4.0 (%0.1)
Venezüella	4790.1)	1.2 (%*)	0.2 (%*)
Diğer Toplam	724 (%0.1)	0.5 (%*)	10.5 (%0.3)
Kuzey Amerika	245,088 (%28.5)	557.7 (%13.4)	468.5 (%12.6)
ABD	237295 (%27)	515.9 (%13.4)	437.8 (%11.7)
Kanada	6,582 (%0.8)	35.2 (%0.9)	21.9 (%0.6)
Meksika	1,211 (%0.1)	6.6 (%0.2)	8.8 (%0.2)
Avrupa-Avrasya	304,604 (%35.4)	469.0 (%12.2)	516.9 (%13.9)
Rusya	157010 (%18.2)	168.1 (%4.4)	93.9 (%2.5)
Almanya	40,699 (%4.7)	45.7 (%1.2)	79.2 (%2.1)
Ukrayna	33,873 (%3.9)	45.9 (%1.2)	44.6 (%1.2)
Kazakistan	33,600 (%3.9)	58.8 (%1.5)	35.0 (%0.9)
Türkiye	2,343 (%0.3)	15.4 (%0.4)	31.3 (%0.8)
Diğer Toplam	37,079 (%4.4)	135.1 (%3.5)	▪ 292.9 (%6.4)
1. Polonya	➤ 5,709 (%0.7)	➤ 58.8 (%1.5)	▪ 54.0 (%1.4)
2. Fransa	➤ İçinde	➤ 0.1 (%*)	▪ 11.4 (%0.3)
3. İtalya	➤ İçinde	➤ İçinde	▪ 16.2 (%0.4)
4. İngiltere	➤ 228 (%*)	➤ 10.2 (%0.3)	▪ 39.1 (%1.0)

Çizelge 1.3 (devam): Kömür toplam rezerv, üretim ve tüketim verileri [3].

Asya Pasifik	265,843 (%30.9)	2,606.8 (%67.8)	2,609.1 (%69.9)
Çin	114500 (%13.3)	1,825 (%47.5)	1,873.3 (%50.2)
Avusturalya	76,400 (%8.9)	241.1 (%6.3)	49.3 (%1.3)
Hindistan	60,600 (%7.0)	228.8 (%6.0)	298.3 (%8.0)
Diğer Toplam	14,343 (%1.7)	311.9 (%8.0)	388.2 (%10.4)
1. Japonya	350 (%*)	0.7 (%*)	124.4 (%3.3)
2. G. Kore	126 (%*)	0.9 (%*)	81.8 (%2.2)
3. Tayland	1239 (%0.1)	5.1 (%0.1)	16.0 (%0.4)
4. Pakistan	2070 (%0.2)	1.2 (%*)	4.3 (%0.1)
Genel Toplam	860,938 (%100)	3,845.3 (%100)	3,730.1 (%100)

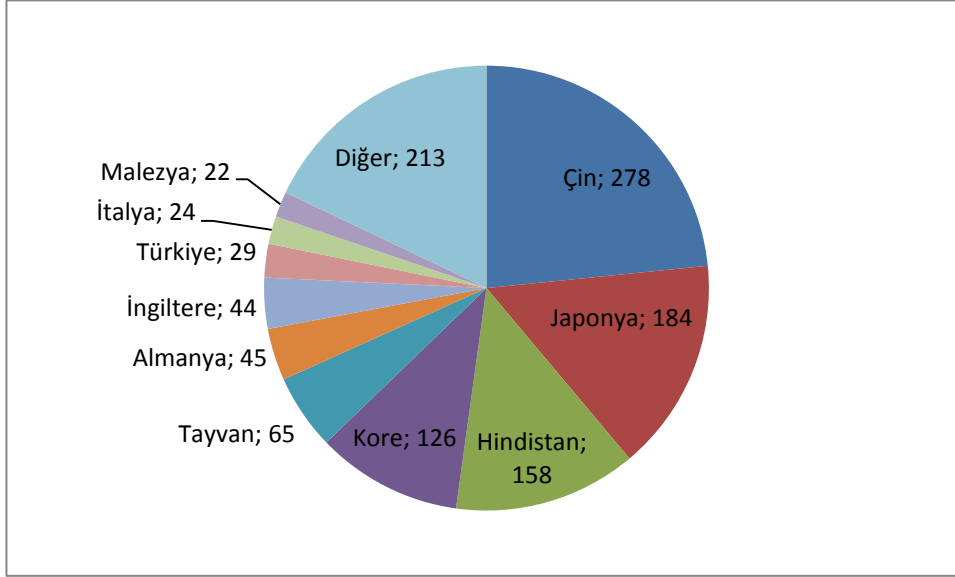
Kömür tüketimi 2012 yılında %2.5 oranında artmıştır. 10 yıllık ortalama artış hızı %4.4'ün altında seyreden bu artış hızı, Çin ve OECD ülkesi olmayan topluluklar tarafından domine edilmiştir. Çin, toplam global kömür tüketiminde ilk defa %50'den fazla bir paya sahip olmuştur. ABD'deki %11.9 oranındaki kömür tüketimindeki azalma OECD tüketiminde %4.2 oranında azalmaya yol açmıştır. Kömür, 1970 yılından bu yana ilk defa birincil enerji tüketiminde en yüksek orana (%29.9) sahip olmuştur [3].



Şekil 1.10 : Dünya kömür ihracatçıları [5].

Şekil 1.10 incelendiğinde en büyük kömür ihracatçıların Endonezya, Avusturalya, ABD ve Rusya olarak sıralandığı görülmektedir. Şekil 1.11'de ise, kömür ithalatının

yarısından fazla kısmının Uzakdoğu-Pasifik devletler tarafından yapıldığı görülmektedir. Türkiye, dünya doğal gaz ithalat listesinde olduğu gibi 29 Mt'luk ithalatıyla %2.4'lük oranıyla dünyanın en çok kömür ithal eden sekizinci ülkesi konumundadır. Keza Çizelge 1.3 [3] verileri incelendiğinde, Türkiye kömür üretiminin yaklaşık iki katı kadar kömür tüketimine sahiptir [5].



Şekil 1.11 : Dünya kömür ithalatçıları [5].

1.4 Karbon Emisyonu ve Fosil Yakıtlar

2010 verileri incelendiğinde fosil yakıtların atmosfere bıraktıkları CO₂ emisyon değerleri içerisinde en büyük pay %43 oranıyla kömüre ait ve sırasıyla %36 oranında petrolden ve %20 oranında gazdan oluşmuştur. Özellikle kömür, Hindistan ve Çin gibi gelişmekte olan ülkelerin enerji ihtiyacını karşılamada kullanılmakta ve birincil enerji kaynakları arasında artan bir değerde bulunmaktadır. Sadece 2009-2010 yılları arasında kömürden kaynaklı CO₂ salınımı %4.9 oranında artmış ve 13.1 Gt CO₂ seviyesine yükselmiştir. Keza 2035 tahminleri kömür kaynaklı CO₂ salınım değerlerinin 15.3 Gt CO₂ değerine ulaşması öngörülmektedir. Ancak, daha verimli ve ileri teknoloji kullanılan termik santrallerin sayılarının artırılması, yenilenebilir enerjinin payının artırılması, nükleer ve karbon tutma ve depolama (CCS) teknolojilerinin geliştirilmesiyle kömür tüketimi azaltılarak 2035 yılına kadar 5.6 Gt CO₂ karbon emisyonu azaltılabilir.

Petrol kaynaklı CO₂ emisyonu 2010 yılında 10.9 Gt CO₂ olarak kaydedilmiş, kömür ve gazın birincil enerji tüketimindeki payının artmasıyla toplam tüketimde payı

azalmıştır. Ancak, 2035 yılına kadar artacak ulaşım talebinin karşılanması ihtiyacından dolayı 12.6 Gt CO₂'a ulaşması beklenmektedir. Doğal gaz kaynaklı CO₂ emisyonu 6.2 GtCO₂ olmuş ve bir önceki yıla göre %7.1'lik bir artış göstermiştir. 2035 yılına kadar bu değer 9.2 Gt CO₂'ye ulaşması beklenmektedir [8].

Çizelge 1.4 : Dünya enerji talebi ve karbon emisyon öngörüsü [3] .

Bölgeler	% Değişim		Toplam Oran	
	2010-2040	2010	2025	2040
DÜNYA ENERJİ TALEBİ	%35	%100	%100	%100
OECD	-%3	%44	%36	%32
Non-OECD	%65	%56	%64	%68
Afrika	%106	%6	%7	%9
Asya Pasifik	%58	%38	%44	%45
Çin	%47	%19	%22	%20
Hindistan	%141	%5	%8	%10
Avrupa	-%6	%16	%12	%11
Avrupa Birliği	-%10	%14	%11	%9
Latin Amerika	%73	%5	%5	%6
Orta Doğu	%76	%6	%7	%7
Kuzey Amerika	-%1	%22	%18	%16
ABD	-%6	%18	%14	%13
Rusya	%1	%8	%7	%6
DÜNYA ELEKTRİK ÜRETİMİ	%52	%100	%100	%100
Petrol	-%31	%5	%3	%2
Gaz	%85	%24	%27	%29
Kömür	%8	%46	%41	%32
Nükleer	%106	%15	%16	%20
Hidro	%66	%6	%6	%7
Rüzgar	%746	%1	%2	%3
Diğer Yenilenebilir	%166	%4	%5	%6

Çizelge 1.4 (devam): Dünya enerji talebi ve karbon emisyon öngörüsü [3] .

CO₂ EMİSYON – MİLYAR TON	%19	%100	%100	%100
	-%22	%42	%32	%27
OECD	2010:	12.8	2040:	9.9
Non-OECD	%49	%58	%68	%73
	2010:	17.7	2040:	26.3

Çizelge 1.4 [3] incelendiğinde, 2040 yılına kadar dünya enerji talebinin %35 oranında artması beklenmektedir. Bu büyük artışın özellikle az gelişmiş ve gelişmekte olan OECD üyesi olmayan devletler ekseninde olması beklenmekte, aksine gelişmiş ülkelerden oluşan OECD devletlerinin 2040 enerji taleplerinin -%3 azalması öngörülmektedir.

Özellikle elektrik üretiminde dünya talep artışının %52 oranında olması beklenmekte, bu talebin karşılanmasında karbon emisyonlarının azaltılması ve sera gazı etkisinin önlenmesi adına, kömürün elektrik üretimindeki payının %46'dan %32'ye düşmesi, doğal gazın %24'den %29'a çıkması ve nükleer enerjinin %15'den %20'ye çıkması beklenmektedir.

Bununla beraber, rüzgar enerjisinin %1 olan payının dünya genelinde %3'lere çıkartılması hedeflenmektedir. Rüzgar, hidro ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının payının %11'den %16'ya çıkartılması ve enerji çeşitliliğinin daha dengeli olması öngörülmektedir.

Önleyici bu önlemler dünya enerji talebindeki bu büyük artış beklentisine karşılık, karbon salınımlarının 30.5 milyar tondan (2010) %19 luk bir artışla 36.3 milyar tona ulaşması beklenmektedir. Özellikle OECD devletlerinin karbon salınımlarının -%22'lik bir azalma kaydetmesi hedeflenmektedir. Bu hedefe ulaşılabilmesi açısından, örneğin Kuzey Amerika ülkelerinin yenilenebilir enerji payını %7'den %13'e çıkarması, Avrupa ülkelerinin de, %11'den %17'ye çıkarması gerekmektedir [1].

1.5 Dünya Enerji Politikaları

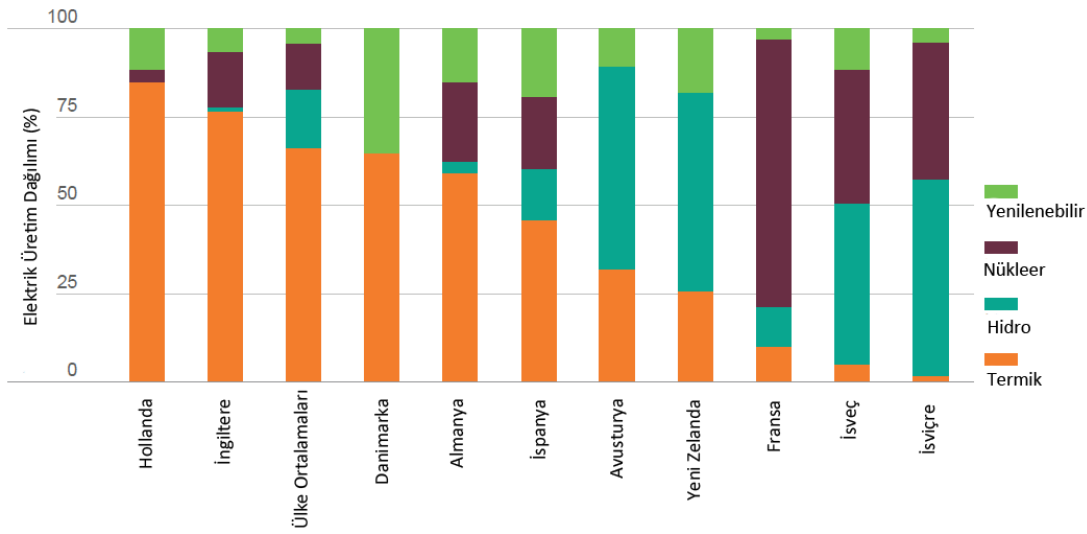
Dünyadaki bir çok ülke enerji sistemlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının payını arttırmak üzere uygun maliyetli ve uygulanabilir çözümler aramaktadır. Hollanda hükümeti yeni bir teşvik paketi yayınlamış, keza Norveç-İsveç yenilenebilir enerji üretimini destekleyici ortaklaşa bir yapı üzerinde tartışmaktadırlar. Birçok devlet, hali hazırda şebekelerinin kaldırabileceği kadar yenilenebilir enerji santrallerini kurmuş, kontrol ve işletmesinde yeterli tecrübeye erişmişlerdir. İspanya, şebeke işletmesini değiştirme ve yenileme yönünde bir politika yürütmektedir, zira 2013 yılı ilk çeyreğinde ülke elektrik tüketiminin yaklaşık yarısı yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmıştır. Danimarka, elektrik üretiminin %50'sini rüzgar enerjisinden karşılama hedefi üzerine büyük bir yatırım planlamaktadır.

Ayrıca İngiltere hükümeti ülke tarihinin en büyük özelleştirme reformuyla daha fazla yenilenebilir enerjiyi teşvik etmeyi planlamaktadır. Bu reform ile uzun dönem düşük karbon emisyon teknolojileri üretmek hedefine ulaşmayı bekleyen İngiltere, böylelikle fosil yakıtlara olan bağlılığını azaltarak kısa, orta ve uzun vadede enerji güvenliğini sağlamayı hedeflemektedir. Alman hükümeti ise ülkenin kuzeyinden güneyine akan enerjinin kompanze edilebilmesi için ülke şebekesinin güçlendirilmesi yolunda yeni şebeke planlamasıyla varolan sistemini güçlendirmektedir [9].

1.5.1 Dünya enerji ligi ve politikaları

Enerji güvenilirliği ve sürdürülebilirliği açısından güvenlik, ekonomik güç ve çevresel sürdürülebilirlik kıstaslarına göre ülkeler kendi aralarında değerlendirilmekte ve sürdürülebilir enerji alanında kendi aralarında sıralanmaktadırlar. Arz-talep dengesi, enerji kaynaklarına erişim, enerji üretiminin çevresel etkileri gibi birçok açıdan yapılan değerlendirmeler sonucunda sıralanan ülkelerin politikaları gelecek enerji yatırımları için de reel kaynak durumundadır. Zira bu devletlerin yüksek GSYH sahibi (25,500 USD'den yüksek), OECD üyesi, endüstri devleri konumunda ve %25'den fazla düşük ya da sıfır karbon emisyon oranlı elektrik üretim payına sahip olmaları gibi ortak özelliklerinin yanı sıra; büyük oranda nükleer enerji payına sahip olma, düşük ve yüksek fosil yakıt kaynaklarına sahip olma, enerji ithalat ve ihracatçıları konumunda olmaları ve çok farklı coğrafyalarda yer almaları gibi çok büyük farklılıkları da mevcuttur.

Yenilenebilir Enerji ve düşük karbonlu enerji kaynakları (nükleer dahil) kullanımı derecelendirmede en önemli parametreleri oluşturmaktadır. Bu enerji kaynakları, elektrik üretiminin çevresel etkilerini azaltmakta, ülkelerin enerji ithal etmelerinin önüne geçerek enerji sürdürülebilirliği ve enerji güvenliği sağlamaktadır. Şekil 1.12’de sıralanan “Lider Ülkeler”in hemen hemen hepsi ortalamanın üzerinde bir şekilde enerji üretimini yenilenebilir enerji, hidroelektrik ve nükleer santrallerden karşılamaktadır. Ancak örneğin, Danimarka elektriğinin %35’ni yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılarken, Fransa elektriğini %76 oranında nükleer santrallerden üretmektedir.



Şekil 1.12 : Enerji lider ülkelerinin elektrik üretimi dağılımı [10].

Nükleer enerjinin varolan yüksek riski, yaşanan olumsuz tecrübeler ve toplumsal tepki bir yandan ülkeleri nükleer enerjiden uzaklaşma ve terk etme fikrine itmekte, diğer yandan da doğacak olan büyük enerji boşluğunun doldurulması yönünde büyük bir problem ortaya çıkarmaktadır. Örneğin, İsviçre 2011 yılında Japonya’nın Fukushima Nükleer Santralinde meydana gelen kaza sonrasında nükleer santrallerini aşamalı olarak azaltma kararı almıştır. Bununla beraber, İsviçre en son santralini 1984 yılında devreye almış olmakla beraber, varolan santrallerine herhangi bir yenileme çalışması yapmayı planlamamaktadır. Almanya da 2022 yılına kadar nükleer santrallerini aşamalı olarak azaltmak niyetindedir. Bunlara ek olarak, AB yeni bir güvenlik protokolü uygulayarak nükleer reaktör başına 30 ila 200 milyon € ek maliyet getirme hazırlığındadır. Nükleer enerjinin artacak maliyetler ve potansiyel kapatmalarla birlikte “Lider Ülkeler” payı olan %22’nin azalması ve doğacak boşluğun diğer enerji kaynaklarıyla kompanse edilmesi beklenmektedir.

Her ne kadar yenilenebilir enerji kaynakları bölgeden bölgeye farklılık arz etmekle birlikte, “Lider Ülkeler”in birincil enerji üretim dağılımları diğer ülkeler için bir model teşkil edebilir. Örneğin, Danimarka biyokütle yakıtlı termik santrallerini arttırmakta, rüzgar enerjisiyle birlikte kullanmakta; Avusturya hidroelektrik santrallerine ağırlık vermekte, Yeni Zelanda hidro ve jeotermal enerjinin payını arttırmak yönünde politika geliştirmektedir. Ekonomik gücü iyi olmayan devletlerin yenilenebilir enerji projelerini teşvik etmeleri zor olmakla birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyetlerinin azalması ve ek olarak daha uygun şartların oluşmasıyla yenilenebilir enerji daha rekabetçi bir konuma gelebilir. Ancak, “Lider Ülkeler” için dahi, rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji santrallerinin sisteme entegrasyonu şebekede çeşitli sorunlara yol açmaktadır.

Bütün “Lider Ülkeler” Çizelge 1.5’de görüldüğü üzere yenilenebilir enerjinin payının artırılması ve sera gazı salımlarının azaltılması yönünde hedeflere sahiptirler. Kyoto Protokolü’nü imzalayan ülkeler 2012-2020 yılları için sera gazı emisyon hedeflerini belirlemişlerdir. Enerji üretim ve tüketim taraflarında enerji verimliliğinin artırılması sağlanmaz ise, CO₂ seviyelerinin potansiyel risk sınırını aşacağı ve geri döndürülemez iklim değişikliklerinin ortaya çıkabileceği tahminleri yapılmaktadır. “Lider Ülkeler” hedeflerin tutturulabilmesi adına bir takım enerji verimliliği ölçüm tedbirleri uygulamakta ve fosil yakıt kullanan santrallerin yerine düşük ya da sıfır karbon emisyonlu enerji kaynaklarını kullanıma sokmaktadır [10].

Çizelge 1.5 : “Lider Ülkeler” gelecek enerji projeksiyonu [10].

“Lider Ülkeler”	2020 Projeksiyonu	2050 Projeksiyonu
İsveç	<ul style="list-style-type: none"> • Toplam enerji tüketiminin %50’si yenilenebilir enerjiden • 2005 sera gazı emisyonu miktarının %17 azaltımı 	<ul style="list-style-type: none"> • Net sıfır sera gazı emisyonu
Danimarka	<ul style="list-style-type: none"> • Toplam enerji tüketiminin %30’u yenilenebilir enerjiden • 1990 sera gazı emisyonu miktarının %20 azaltımı 	<ul style="list-style-type: none"> • Fosil yakıtlardan bağımsızlık
Hollanda	<ul style="list-style-type: none"> • Toplam enerji tüketiminin %14’u yenilenebilir enerjiden • 2005 sera gazı %16 azaltma 	<ul style="list-style-type: none"> • 1990 sera gazı emisyon değerlerine göre %80-95 sera gazı emisyon miktarı azaltımı

Çizelge 1.5 (devamı): “Lider Ülkeler” gelecek enerji projeksiyonu [10].

“Lider Ülkeler”	2020 Projeksiyonu	2050 Projeksiyonu
Almanya	<ul style="list-style-type: none">• 2005 sera gazı emisyonu miktarının %14 azaltımı	<ul style="list-style-type: none">• %80-95 sera gazı emisyon miktarı azaltımı
Avusturya	<ul style="list-style-type: none">• Toplam enerji tüketiminin %34’u yenilenebilir enerjiden• 2005 sera gazı emisyonu miktarının %16 azaltımı	<ul style="list-style-type: none">• %100 yerli kaynak, dışa bağımlılığın sıfırlanması
İsviçre	<ul style="list-style-type: none">• 1990 sera gazı emisyonu miktarının %20 azaltımı	<ul style="list-style-type: none">• -
Fransa	<ul style="list-style-type: none">• 2005 sera gazı emisyonu miktarının %14 azaltımı• Toplam enerji tüketiminin %23’ü yenilenebilir enerjiden	<ul style="list-style-type: none">• -
İngiltere	<ul style="list-style-type: none">• 1990 sera gazı emisyonu miktarının %15 azaltımı• Toplam enerji tüketiminin %15’i yenilenebilir enerjiden	<ul style="list-style-type: none">• %80 sera gazı emisyon miktarı azaltımı
İspanya	<ul style="list-style-type: none">• 2005 sera gazı emisyonu miktarının %10 azaltımı	<ul style="list-style-type: none">• -
Yeni Zelanda	<ul style="list-style-type: none">• 1990 sera gazı emisyonu miktarının %10-20 azaltımı• Toplam enerji tüketiminin %90’ı yenilenebilir enerjiden	<ul style="list-style-type: none">• %50 sera gazı emisyon miktarı azaltımı

Ülkelerin enerji politikalarını değiştirmesi, enerji güvenliğinin sağlanması ve talebin karşılanması açısından önemlidir. Yenilenebilir enerji, ülkelerin dışa bağımlılığını azaltacak, enerji sürdürülebilirliğini sağlayacak ve fosil yakıt bağımlılığını azaltabilecektir. Rüzgar enerjisi bu nedenle birçok ülke tarafından giderek yaygınlaşan bir pay ile kullanılmakta ve geliştirilmektedir.

1.5.2 Türkiye enerji stratejisi ve gelecek planlaması

Türkiye enerji stratejisinde temel yaklaşım; arz-talep dengesinin yeterli yedekle sağlanması, kaynak çeşitliliği, dışa bağımlılık, çevresel etkiler ve piyasalarda oluşan fiyatlar açısından sektörün belirlenen hedeflere uygun olarak gelişmesi ve

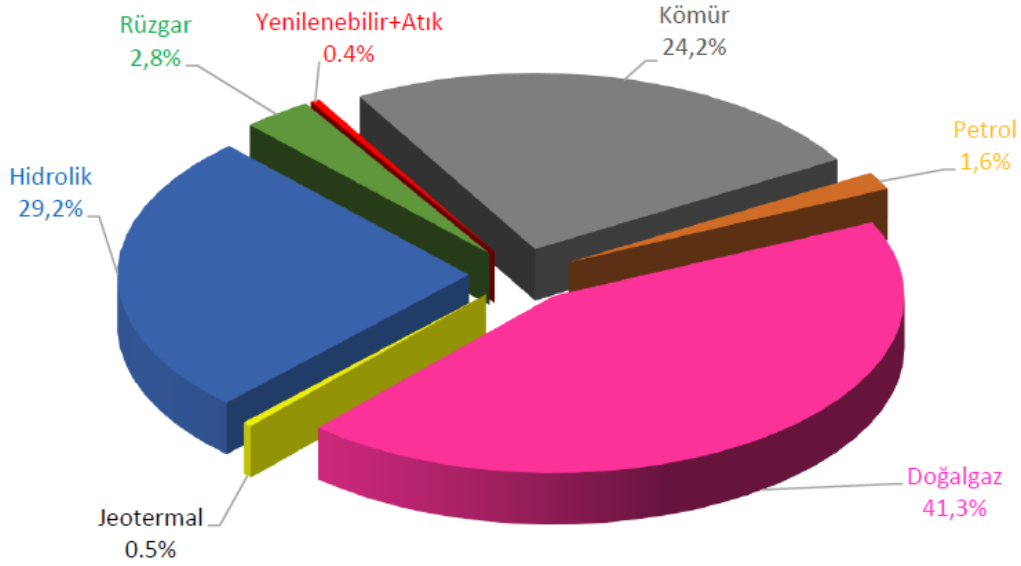
hedeflerden sapma halinde ise, piyasanın yönlendirilmesini sağlayacak tedbirlerin alınmasıdır. Kaynak kullanım hedefleri 21 Mayıs 2009 tarihli “Elektrik enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi” uyarınca belirlenen strateji gereği bilinen linyit ve taşkömürü kaynakları 2023 yılına kadar elektrik enerjisi amacıyla değerlendirilmiş olacaktır [11]. Belirlenen hedef süresinde iki nükleer güç santralin devreye alınması ve üçüncü nükleer santralin inşasına başlanması hedeflenmektedir. Türkiye’nin yenilenebilir enerji planlaması dahilinde 2023 yılına kadar yenilenebilir enerjinin elektrik üretimi içindeki payının %30’a çıkarılması, bunu sağlamak adına teknik ve ekonomik değerlendirilebilecek bütün hidroelektrik potansiyelin elektrik üretiminde kullanılması, rüzgar enerjisi kurulu gücünün 20,000 MW’a çıkarılması öngörülmektedir [12]. Türkiye’nin birincil enerji kaynakları rezervi Çizelge 1.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 1.6 : Türkiye birincil enerji kaynakları rezervi (2012 yılı) [12].

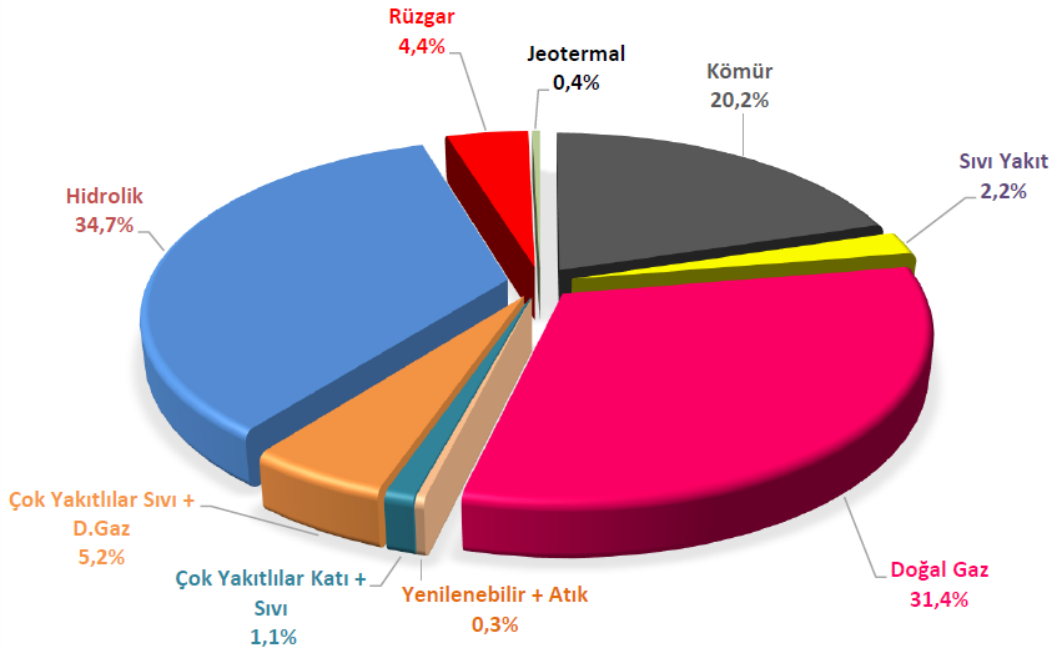
Kaynaklar	Görünür	Muhtemel	Mümkün	Toplam
Taş Kömürü (Milyon Ton)	526	425	368.4	1,319.4
Linyit (Milyon Ton)	10,782.3	826.767	143.141	11,752.2
Bitüm	1,641.4			1,641.4
Hidrolik (GWh/Yıl)	129,388			129,388
Ham Petrol (Milyon ton)	43.1			43.1
Doğalgaz (Milyar m³)	6.2			6.2
Nükleer(Ton)				
Uranyum	9,129			9,129
Toryum	380,000			380,000
Rüzgar (MW)	48,000			48,000
Güneş (Milyon TEP)	32.6			32.6

Türkiye’nin 2012 yılı birincil enerji talebi 119.5 milyon ton eşdeğer petrol (TEP) olmuş ve içerisinde doğal gazın payı %32, kömürün payı %31, petrolün payı %26, hidrolik enerjinin payı %4 ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %7 olmuştur. 2023 yılında birincil enerji talebimizin %90 artarak 218 milyon TEP’e ulaşması beklenmektedir. Kömürün %37 doğal gazın %23, petrolün %26, hidrolik enerjinin %4, nükleer enerjinin %4, yenilenebilir ve diğer enerji kaynaklarının payının %6 olması öngörülmektedir. Elektrik enerjisi tüketim artışı uzun yıllardan

beri ortalama %7 seviyelerinde gerçekleşmiştir. 2002 yılında 136.6 kWh olan elektrik tüketimi yaklaşık iki kat artarak 2012 yılında 242 milyar kWh'e ulaşmıştır. 2013 yılı Ekim ayı sonu itibariyle elektrik enerjisi üretiminin birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı Şekil 1.13'de gösterilmiştir [12].



Şekil 1.13 : 2013 yılı Ekim ayı sonu itibariyle elektrik enerjisi üretiminin birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı (%) [13].



Şekil 1.14 : 2013 yılı ekim ayı sonu itibariyle kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı (%) [12].

Görüldüğü üzere, Türkiye elektrik üretiminin önemli bir kısmını dışa bağımlı olduğu doğal gazdan üretmekte, fosil yakıtların elektrik üretimindeki payı %67.1 olarak

gerçekleşmekte, yenilenebilir enerji kaynaklarının payı ise %32.9 olarak gerçekleşmiştir. Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücümüz ise 2013 Ekim ayı sonu itibariyle 61,984 MW'a yükselmiştir. Mevcut kurulu güç dağılımı Şekil 1.14'de gösterilmiştir [12].

Özellikle 2012-2013 yıllarını ele alındığında devreye alınan 9,085 MW'lık santralin %64'ü yenilenebilir, %36'sı ise termik kaynaklara dayalıdır. Rüzgar enerjisi kurulu gücü değişimi incelendiğinde, 2002 yılında yok sayılacak düzeyde (18.9 MW) olan kurulu güç 2013 yılı Ekim ayı itibariyle 2,689 MW'a ulaşmıştır [12].

1.6 Bölüm Özeti

Enerji hayatın her alanında giderek artan bir ihtiyaç olarak dünyanın önünde durmaktadır. Zira giderek artan dünya nüfusu, az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin artan ve artacak enerji ihtiyacının karşılanması, artan hayat standartının gereği olarak insanların beklenti düzeylerinin artması devletlerin gelecek planlamasını şekillendirmekte; kısa, orta ve uzun vadede strateji geliştirme zorunluluğu ortaya çıkarmaktadır. Zira 2040 yılına kadar dünya nüfusunun 9 milyar insana ulaşacağı tahmin edilmektedir. Fazladan 2 milyar insan büyük bir enerji talebi ortaya çıkaracaktır. 2010 yılı dünya enerji tüketimi verilerine göre 2040 yılında dünya enerji tüketiminin %52 oranında artması beklenmektedir. IEO2013 verilerine göre fosil yakıtlardan elde edilen enerji, toplam enerjinin %82'sini oluşturmaktadır ki bu durum enerjinin çok büyük ölçüde fosil yakıtlara bağlı olduğu anlamına gelmektedir. Yapılan orta ve uzun vadeli tahminler fosil yakıtların dünya enerji temininde çok önemli bir yere sahip olmaya devam edeceği yönündedir. Ancak fosil kaynakların dünyada homojen bir şekilde var olmaması, kaynak fakiri ülkelerin enerji arz güvenliğini sağlamaları açısından yeni arayışlara girmeleri anlamına gelmektedir. Enerji çeşitliliğinin sağlanması, riskin düşürülmesi ve talebin en yüksek olduğu zamanlarda enerji talebini karşılayabilecek yapıda doğal ve sürekli olan yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimdeki oranının arttırılması oldukça önemlidir. Birçok gelişmiş devlet, enerji stratejilerini bu planlama ile yönlendirmekte, günün birinde biteceği öngörülen fosil yakıtlara olan bağımlılıklarını azaltmak yönünde politikalar belirlemektedir. Zira fosil kaynakların üç ana ürünü olan petrol, doğal gaz ve kömür rezervleri ve ithalat oranları incelendiğinde birçok gelişmiş devletin ithalat rakamlarının önemli bir kısmını enerji kaynağı ithalatının oluşturduğu görülmektedir.

Türkiye de kömür hariç diğer iki ana fosil kaynaktan yoksun bir ülke konumundadır. Zira birincil enerji talebi verileri incelendiğinde, %89 oranında fosil yakıtlara bağlı olduğumuz görülmektedir. Bunlardan %58'i çok büyük ölçüde ithal edilen doğal gaz ve petrolden oluşmaktadır. Bu durum enerji arz güvenliği açısından önemli bir sorun teşkil etmektedir. Zira hükümet politikası ve stratejileri bu bağımlılığı azaltmak yönünde olup, yenilenebilir enerjinin ülkedeki payı arttırılmaya çalışılmaktadır.

Rüzgar enerjisi bu noktada ülkeler için önemli bir teknoloji olmakta, giderek büyük yatırımlar ile devletlerin birincil enerji talebinde yer edinmektedir. Türkiye hükümet politikası olarak 2023 yılına kadar 20.000 MW'lık bir rüzgar payına sahip olmayı hedeflemektedir. 2013 yılı Ekim ayı sonunda rüzgar enerjisi kurulu gücü 2.689 MW'a yükselmiştir ki; bu toplam kurulu gücün %4.4'üne karşılık gelmektedir. Henüz hedeflenen kurulu gücün %13'ü yapıldığı düşünüldüğünde, rüzgar yatırımlarının artması beklenmektedir.

Bir başka bakış açısı ile, dışa bağımlılığın azaltılması ve enerji çeşitliliğinin sağlanması adına rüzgar enerjisinin ülke payındaki yerinin arttırılması gerekmektedir. Zira fosil yakıt bağımlılığı ülkelerin ekonomik gelişmesini kısıtlamakta, hayat standartlarının yükselmesini önlemektedir. Rüzgar enerjisinin gelecekte birçok ülke tarafından daha fazla kullanılacağı ülkelerin politikalarından anlaşılmakta; ilerde doğabilecek büyük enerji açığını kapatmakta ve özellikle talebin en yüksek olduğu saatlerde ihtiyacın karşılanması için rüzgar enerjisi, enerji çeşitliliği ve esnekliği yaratacaktır.

Bu tezde, rüzgar enerjisinin temelleri, rüzgar türbinlerinin çalışması ve rüzgar santrallerinin enterkonekte sisteme entegrasyonunda kullanılan kontrol yöntemleri mercek altına alınacak, özellikle değişken rüzgar hızlarında oluşacak moment değişiminin kontrolü ile generatör çıkış gücü kontrol edilme yöntemleri incelenecektir. Rüzgar hızı mevsimsel, bölgesel ve hatta anlık olarak değişmektedir. Dolayısıyla türbinler değişken rüzgar hızlarında değişken momente maruz kalmaktadır. Moment, mekanik yöntemlerle kontrol edilebildiği gibi elektriksel olarak da kontrol edilebilmektedir. Elektrik kontrol yöntemleri, rüzgar türbinlerinin şebekeye bağlanması ve şebekeye uyumları açısından oldukça önemlidir. Rüzgar doğal bir enerji kaynağıdır.

2. RÜZGAR VE RÜZGAR ENERJİSİ

2.1 Giriş

Rüzgar enerjisi en az 3000 yıldır kullanılmaktadır. Modern endüstrileşme ile birlikte doğan enerji çeşitliliği ihtiyacı ve fosil kaynaklara olan bağımlılığın azaltılması zorunluluğu rüzgar enerjisini daha popüler hale getirmiştir. 1970 başlarında ilk petrol krizi ile birlikte rüzgar enerjisine olan ilgi yeniden ortaya çıkmıştır. Ancak bu sefer devletler rüzgar enerjisinden mekanik güç elde etmek değil bizzat elektrik enerjisi elde etmek üzerine yoğunlaşmıştır [14].

1990 sonlarına doğru rüzgar enerjisi üzerine var olan araştırmalar yoğunlaşmış, özellikle 20. Yüzyılın son 10 senesinde dünya genelinde rüzgar kapasitesi her üç yıllık periyot içerisinde ikiye katlanarak büyümüştür. 1985-2004 yılları arasında kurulu rüzgar türbinlerinin boyut ve kapasiteleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir [14].

Çizelge 2.1 : 1985-2004 yılları arasında rüzgar türbin boyut ve güçleri [14].

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

Rüzgar enerjisi gelişen teknoloji ile birlikte uygun maliyetli yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak birçok açıdan tercih edilmektedir. Özellikle sıfır seragazı etkisi ile diğer fosil kaynaklı elektrik üretim santrallerine göre daha çevrecidir. En basit tanımlama ile bir rüzgar türbini rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren bir yapıya sahiptir. Rüzgar türbinleri çıkış gücü ve rotor dizaynına bağlı olmak üzere farklı yapı ve tiplerde geliştirilmektedir [15].

Hızlı gelişim gösteren rüzgar türbin teknolojisi, 1989 yılı sonlarında 30m rotor çaplı 300 kW’lık türbin üretebilirken, sadece 10 yıl sonra 80 m rotor çaplı 2000 kW çıkış

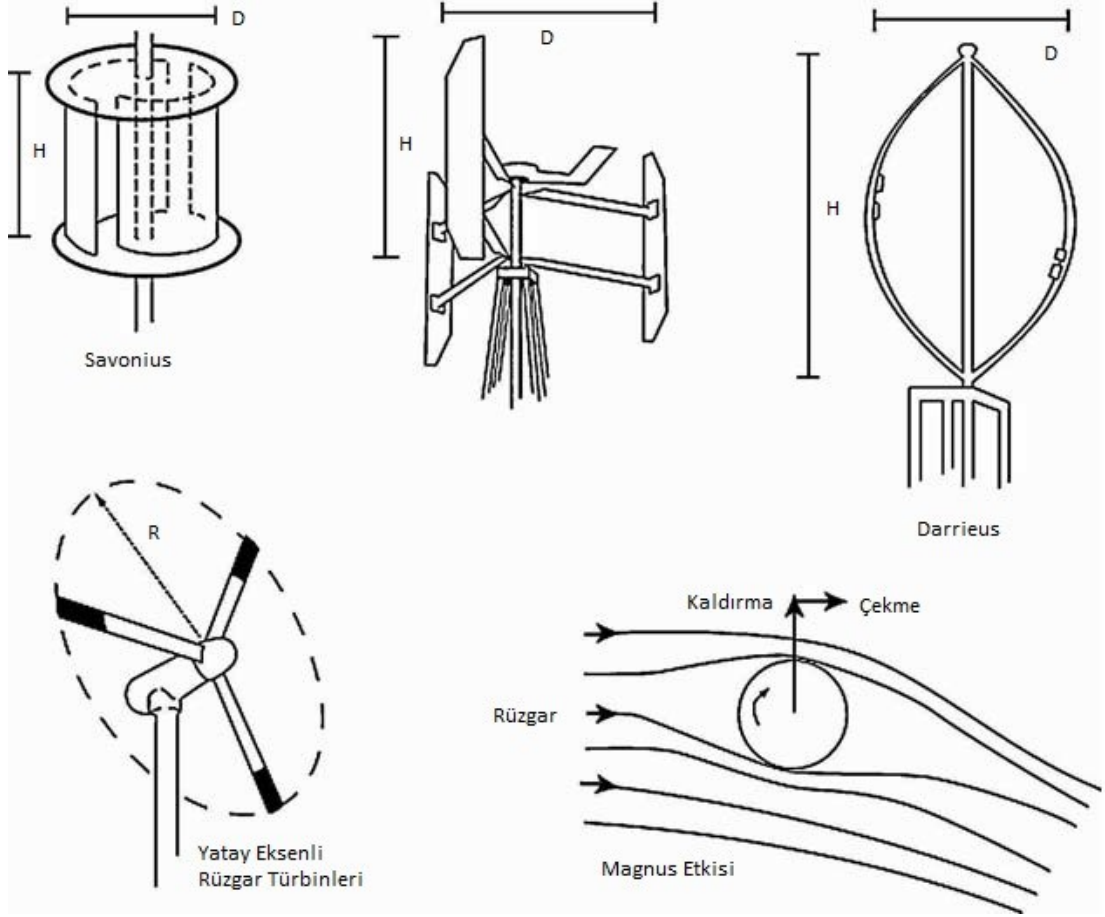
gücüne sahip rüzgar türbinleri geliştirebilmiştir [14]. Bu bölümde rüzgar enerjisi, geçmişi ve gelişimi üzerinde durulacaktır.

2.2 Tarihsel Gelişim

Dünyanın ilk otomatik çalışan rüzgar türbini 19. Yüzyıl sonlarında 12 kW DC çıkış gücüne sahip bir rüzgar türbini ile Amerikalı bilim adamı Charles F. Brush tarafından yapılmıştır. Aynı dönemde ilk elektrik üreten rüzgar türbini Danimarkalı bilim adamı Poul La Cour tarafından geliştirilmiştir. 1941 yılında Amerikalı Palmer Cosslett Putnam'ın geliştirdiği rüzgar türbini 1250 kW çıkış gücüne sahiptir ve 53 m'lik çelik kanadıyla literatüre geçmiştir. Alman Profesör Ulrich Hütter 1950-1960 yılları arasında yenilikçi ve daha hafif rüzgar türbinleri imal etmiştir [16].

Petrol fiyatlarındaki büyük artış ve doğan kriz, birçok gelişmiş devletin rüzgar enerjisine daha büyük önemle yatırım yapmasına neden olmuş, bu bağlamda ABD'de bir takım prototip türbinler üretilmiştir. 1975 yılında 38 m rotor çaplı 100 kW çıkış güçlü Mod-0 ile başlayıp 97.5 m rotor çaplı 2.5 MW çıkış güçlü Mod-5B ile biten bu prototip çalışmaların benzerleri İngiltere, Almanya ve İsveç'de de geliştirilmiştir. Hangi türbin tipinin en ekonomik olacağı üzerine birçok araştırma yapılmış ve Kanada'da 4 MW düşey eksenli Darrieus rüzgar türbini üretilmiş ve çeşitli geliştirmeler ile test türbini halinde kullanılmıştır. Bunu takiben İngiltere'de Dr. Peter Musera gazırove tarafından 500 kW'lık alternatif bir "H" tipi düşey eksen rüzgar türbini prototipi geliştirilmiştir. ABD'de 1981 yılında 3MW gücünde yenilikçi bir yatay eksenli rüzgar türbini geliştirilmiştir. Ancak optimum kanat sayısı hala belirlenememiştir. Bu bağlamda 1980 yılında 15.000 adet düşük güçlü (<100kW) rüzgar türbini ile 1500 MW kurulu güce sahip bir rüzgar çiftliği kurulmuştur [16].

Rüzgar türbinlerinin bu gelişimi esnasında optimum modelin bulunması ve geliştirilmesi adına bir çok çalışma yapılmıştır: yatay ve düşey eksenli kanat yapıları, ucu şekilli kanatlar, Savonius ve Magnus tip türbinler vb. düşey rotor eksenli türbinlerin rüzgar yönüyle ilgili bir kısıtlaması söz konusu değildir. Bir hava akışında dönen bir silindire bir itme kuvveti rüzgar yönüne dik şekilde etkir. Bu etki Magnus etkisi olarak bilinir [17].



Şekil 2.1 : Yatay-düşey rüzgar türbin modelleri [17].

Finlandiya’da Sigurd Johannes Savonius tarafından 1922’de Savonius S tipi rotorlu iki yarım silindirden oluşan bir prototip geliştirilmiştir. 1927 yılında Fransız Georges Darrieus tarafından kanatları dalgalı bir halata benzeyen yeni bir düşey eksenli rüzgar türbini geliştirilmiştir. Şekil 2.1’de başlıca yatay ve düşey eksenli rüzgar türbinleri verilmiştir [17].

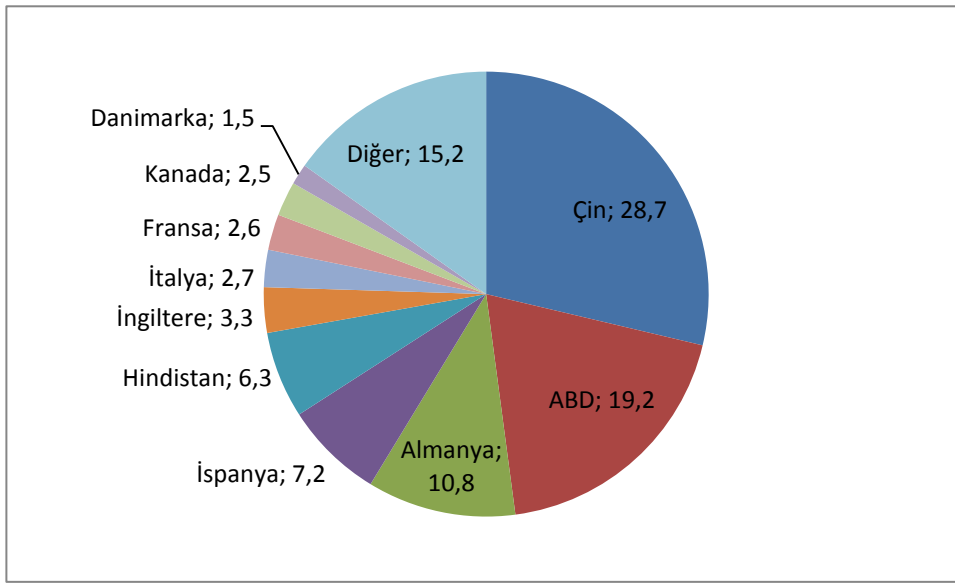
2.3 Dünya Rüzgar Enerjisinin Güncel Trendi ve Gelişimi

Savonius ve Darrieus gibi birçok düşey eksenli rüzgar türbini test modelleri geliştirilmişse de, bugün çoğu işletimden kalkmıştır. Buna ek olarak, düşük gürültü seviyeleri, görece daha kısa olmaları ve dolayısıyla bakım ve onarımlarının kolay oluşu ve rüzgar yönünden bağımsız olarak çalışabilmeleri gibi bir takım avantajlarına rağmen; düşey eksenli rüzgar türbinleri birçok dezavantaja sahiptir.

Örneğin yere yakın olmalarından ötürü daha düşük rüzgar hızlarına maruz kalmaktadırlar, ayrıca rotor verimleri düşüktür. Diğer yandan birçok prototip

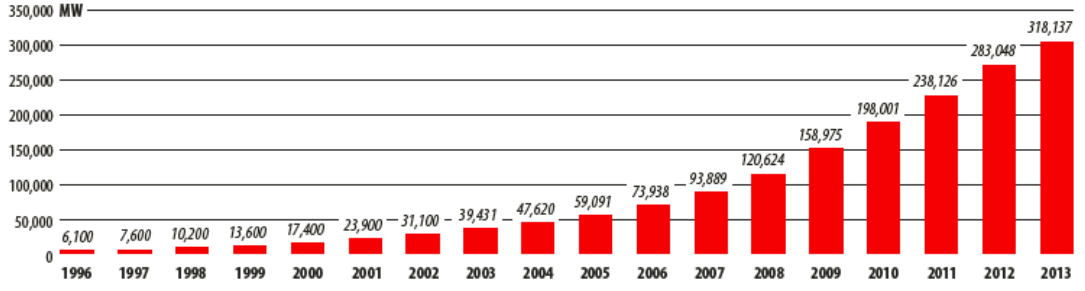
modelde türbinler gergiler yardımıyla sabitlenmektedir. Bu da geniş alanları işgal etme ve sahanın verimsiz kullanımına yol açmaktadır.

Buna karşılık, yatay eksenli rüzgar türbinleri rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjiyi daha yüksek oranda elektrik enerjisine dönüştürebilme kabiliyetine sahiptir. Böylelikle daha verimli bir teknoloji sunan yatay eksenli rüzgar türbinleri dünya genelinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması yönünde ortaya konan politikalar ile birlikte hızla gelişen rüzgar enerjisi 2013 yılı sonu verilerine göre 318,137 MW kapasitesine ulaşmıştır. Şekil 2.2’de 2013 yıl sonu rüzgar kurulu gücünün dağılımı görülmektedir.



Şekil 2.2 : 2013 yılı dünya rüzgar enerjisi kurulu güç dağılımı (%) [18].

Türkiye 2013 yılı sonu itibariyle 2,959 MW rüzgar enerjisi kurulu gücüne sahiptir. Bu da dünya genelinde binde 9.30’lık bir pay anlamına gelmektedir. Şekil 2.3’de ise, dünyada rüzgar enerjisi kurulu gücünün tarihsel gelişimi yer almaktadır. Bu veriler gelişmiş ve gelişmekte olan fosil kaynak yoksunu devletlerin rüzgar enerjisi yatırımlarına ne kadar önem verdiklerini göstermektedir. Bu gelişimin artarak sürmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam dünya kurulu gücündeki payının artması enerji çeşitliliği ve arz güvenirliliğinin sağlanması açısından oldukça önemlidir [18].

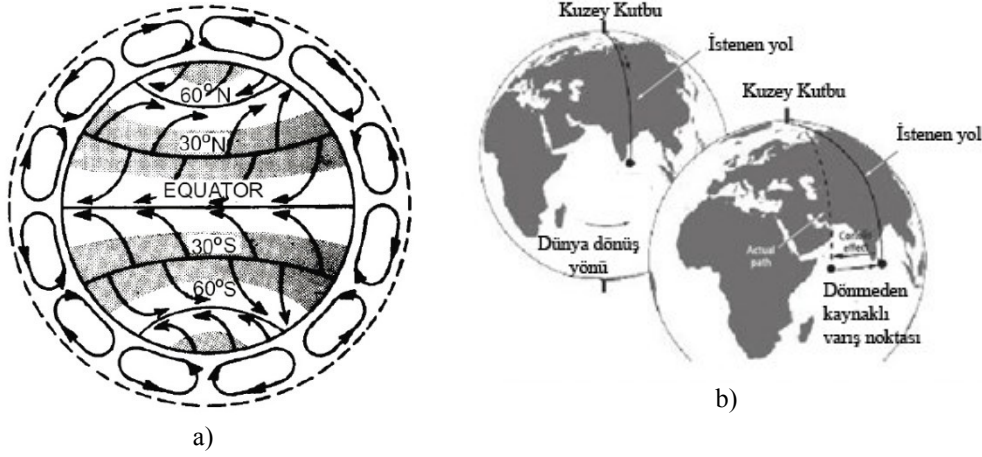


Şekil 2.3 : Dünya 1996-2013 rüzgar enerjisi kurulu gücü değişimi [18].

2.4 Rüzgar ve Rüzgar Enerjisi

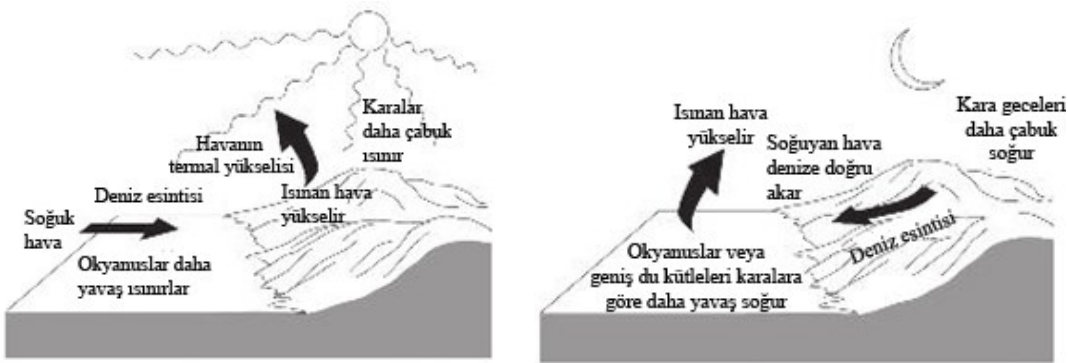
Rüzgar atmosferdeki sıcaklık farklarının doğurduğu farklarından kaynaklanan hava hareketidir. Dünyanın şeklinden ve dönüş ekseninden ötürü güneş ışınları dünyanın farklı bölgelerine farklı açılarla gelir. Dolayısıyla dünya yüzeyinin farklı bölgeleri yıl içerisinde farklı miktarda ısınırlar [19]. Dünya yüzeyinin farklı bölgelerinin farklı miktarda ısınması bölgesel basınç farklarını doğurur. Bu ısınma ve soğumanın ana kaynağı güneş olduğu için, rüzgarın da ana kaynağı güneştir denebilir [20].

Büyük rüzgar hareketleri dünyanın şeklinden ve yıl içinde güneşe göre değişen konumundan doğmaktadır. Dünya şeklinden dolayı üç farklı iklim bölgesine ayrılmıştır. Ekvator'dan 30° Kuzey ve Güney enlemleri boyunca uzanan bölgelerde tropikal iklim hakim iken, 30°-60° Kuzey ve Güney enlemleri arasında ise ılıman iklim hakimdir. Bu bölgeler tropikal iklime nazaran daha az güneş ışını alırlar ve dolayısıyla daha serindirler. Üçüncü iklim bölgesi ise 60° Kuzey ve Güney enlemleri ile kutup noktaları (90°) arasında kalan ve kutup ikliminin görüldüğü bölgelerdir. Dünya yüzeyinin farklı ısınması büyük hava hareketlerine yol açar. Örneğin, Şekil 2.4a'da görüldüğü üzere tropikal iklimin görüldüğü bölgelerde ısınan hava yükselir ve ılıman iklimin görüldüğü bölgelere doğru hareket eder. Doğan hava boşluğu ılıman ve kutup ikliminin hüküm sürdüğü bölgelerdeki soğuk hava kütlesiyle yer değiştirir. Tropikal nemli sıcak hava kütlesi kuzey ve güneye doğru hareket eder ve soğumaya başlar. Soğuyan havanın bir kısmı ekvatora geri dönerken bu ekvatora doğru bir rüzgar hareketinin oluşmasına neden olur. İlıman iklim bölgesine ulaşan hava kütlesi soğuyarak yağmura dönüşür [20].



Şekil 2.4 : a) Büyük rüzgar hareketi, b) Coriolis etkisi [20].

Dünyanın dönüş yönünden ötürü bölgesel rüzgar hareketleri meydana gelir. Yerkürenin şeklinden dolayı herbir noktanın bir tam dönüş hareketi yapma süresi farklılık arz eder. Bundan dolayı Coriolis etkisi olarak tanımlanan bu olay büyük rüzgar hareketlerinin yanında bölgesel rüzgar hareketlerinin oluşmasına neden olur. Şekil 2.4b'de gösterildiği gibi bir uçağın hedef varış noktası ile gerçekte vardığı nokta dünyanın dönüşüyle ilgilidir [20]. Rüzgarın oluşmasında yer yüzü şekilleri, kara ve deniz parçalarının etkisi söz konusudur. Şekil 2.5'de de gösterildiği üzere güneş ışınları kara ve deniz parçalarını ısıtmaya başlar.

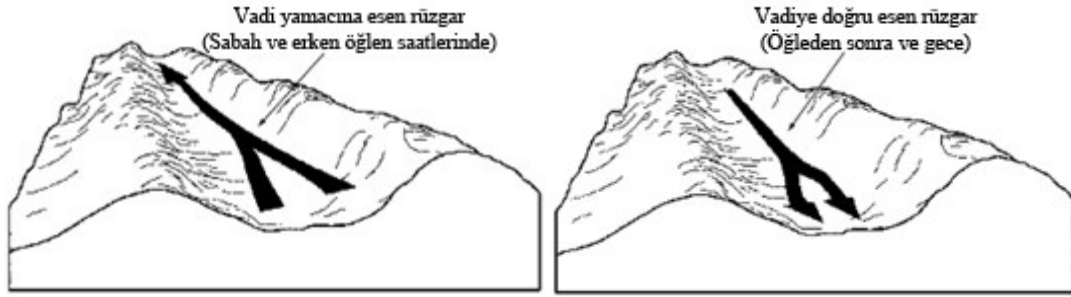


Şekil 2.5 : Kara ve deniz meltemleri [20].

Kara parçası denize veya su birikintisine göre daha hızlı ısınacağı için ısınan hava yükselir ve denizden karaya doğru bu yükselen havadan kaynaklı boşluğu doldurmak üzere bir hava hareketi oluşur. Kara parçası üzerinde ısınan hava alçak basınç bölgesini oluştururken deniz üzerindeki soğuk hava yüksek basınç bölgesini oluşturur. Gündüz denizden karaya doğru gerçekleşen bu soğuk hava hareketine deniz meltemi ismi verilir. Akşam saatlerinde ise, kara parçası deniz parçasına göre

daha hızlı bir şekilde soğur, deniz kütlesi üzerindeki alçak basınçlı sıcak hava kütlesi yükselir ve kara kütlesindeki yüksek basınçlı soğuk hava denize doğru hareket eder. Bu hava hareketine ise kara meltemi ismi verilir [20].

Kara-deniz meltemlerinin oluşmasında olduğu gibi yine yeryüzü şekillerinin farklılığı sıcaklık farkları meydana getirmektedir. Şekil 2.6'da dağ-vadi meltemlerinin oluşumu gösterilmiştir. Gündüz güneş ışınları ilk olarak dağ yamaçlarını ısıtır, ısınan hava yükselir, vadiden dağın yamacına doğru rüzgar esintisi oluşur. Buna vadi meltemi denirken, gece ise tam tersi yönde hava hareketi oluşur. Gece hızla soğuyan dağ yamaçlarından vadiye doğru soğuk hava kütlesi akışı meydana gelir. Buna da dağ meltemi adı verilir.

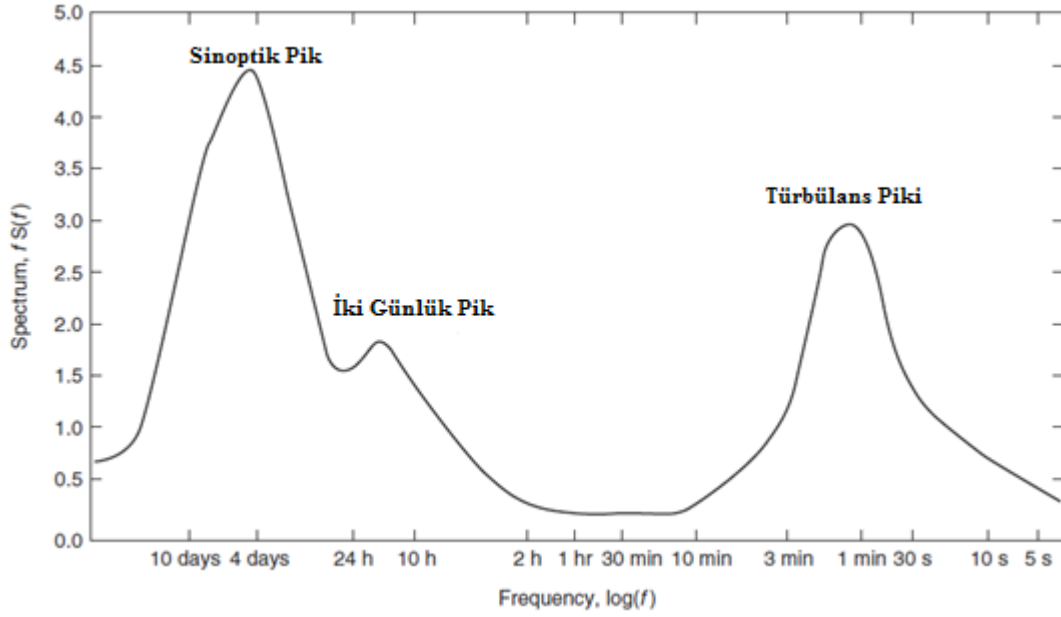


Şekil 2.6 : Dağ ve vadi meltemleri [20].

2.5 Rüzgarın Karakteristik Yapısı

Dünya yüzeyinde bir noktada görülen rüzgar büyük rüzgar hareketleri ve yerel rüzgarların bir kombinasyonudur. Dolayısıyla rüzgar tamamen coğrafi konuma, iklim şartlarına, deniz seviyesi yüksekliğine, bölgenin pürüzlülük yapısına ve çevreleyen engellere bağlıdır. Bütün bu etmenler de rüzgar türbinlerini doğrudan etkileyen etmenlerdir [19]. Rüzgar hızı sürekli olarak zamana ve yüksekliğe bağlı olarak değişmektedir. Frekans tanım bölgesinde rüzgar hızının kinetik enerji dağılımı van der Hoven tarafından tanımlanmış ve spektrum Şekil 2.7'de gösterilmiştir [14].

Türbülans tepesi çoğunlukla fırtınalarda meydana gelmekte ve birkaç saniyeden bir dakikaya kadar sürmektedir. İki günlük tepe değeri gün bazında rüzgar hızının değişimine bağlıdır (örneğin kara-deniz meltemleri) ve sinoptik (anlık - kısa bir süre içinde) tepe değeri de hava şartlarındaki mevsimsel değişimlere bağlı olarak ifade edilmektedir.



Şekil 2.7 : Van der Hoven spektrumu [14].

Bir güç sistemi entegrasyonu açısından bakıldığında, türbülans tepe değeri rüzgar enerjisinden elektrik üretim güç kalitesini etkileyebilmektedir. Sinoptik ve iki günlük tepe değerleri uzun süreli güç sistemi dengesini etkileyebilmektedir [14].

2.5.1 Rüzgarın oluşumuna coğrafi yapının etkisi

Rüzgarın ana kaynağı güneş olarak tanımlanmaktadır, zira yeryüzü bölgelerinin farklı ısınması basınç farklarına yol açmaktadır. Büyük rüzgar hareketleri yukarıda anlatıldığı üzere dünyanın dönüşü nedeniyle Coriolis etkisine maruz kalmaktadır. Dünya yüzeyinin değişkenliği ve kara-deniz (okyanus) dağılımı küçük yerel rüzgar hareketlerinin oluşmasını sağlamaktadır. Bu durum rüzgarın günden güne tahmin edilmesi oldukça güç bir şekilde değişmesini de açıklamaktadır [15].

Tepeler ve dağlar yerel rüzgar hızı rejimlerinin artmasına neden olmaktadır. Kara-deniz meltemleri ve dağ-vadi meltemleri bölgesel rüzgarların oluşmasına etkimekte ve farklılık arz etmektedir [15].

2.5.2 Uzun dönemli rüzgar hızı değişimi

Bir bölgenin rüzgar karakteristiği uzun dönemler içerisinde büyük farklılıklar içermez. Rüzgar rejimi belli periyotlar içerisinde yılın benzer zamanlarında benzerlik arz edebilir. Ancak bir yıldan diğer yıla aynı dönemde rüzgarlılık farklılık arz edebilir. Bunun birçok nedeni olabilir: global iklim olayları, volkanik faaliyetlerin yol açtığı atmosferdeki partiküllerin değişimi (örn. el Niño), güneş lekeleri vb. Bu

değişim kurulacak rüzgar tarlalarının güç çıkışını tahmin etmeyi oldukça güçleştirmekte ve proje ömrünün de hesaplanmasını zorlaştırmaktadır [15].

2.5.3 Yıllık ve mevsimsel değişimler, ortalama rüzgar hızı

Yıldan yıla ortalama rüzgar hızının yıllık tahmininin oldukça zor olmasından dolayı yıl boyunca rüzgar hızındaki değişim olasılık dağılım fonksiyonu yardımıyla karakterize edilebilir. Weibull dağılım fonksiyonu ortalama rüzgar hızını en doğru tanımlayan dağılım fonksiyonu olarak bilinmektedir.

$$F(\mathcal{G}) = \exp\left(-\left(\frac{\bar{\mathcal{G}}}{c}\right)^k\right) \quad (2.1)$$

$F(\mathcal{G})$ saatlik ortalama rüzgar hızının zamana bölümünü ifade eder. “c” ölçek parametresi “k” şekil parametresi olarak tanımlanır. “c” yıllık ortalama rüzgar hızı $\bar{\mathcal{G}}$ ’a bağlıdır:

$$\bar{\mathcal{G}} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2.2)$$

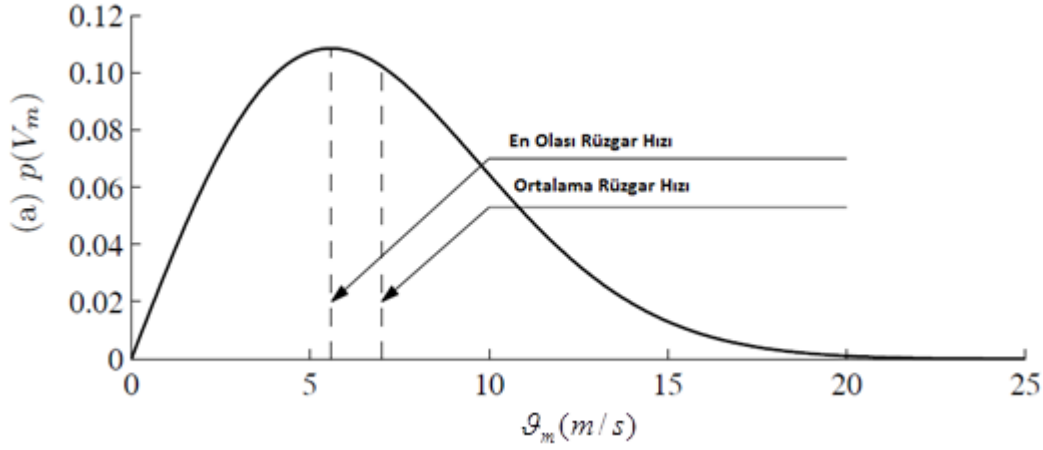
Γ gama fonksiyonu olmak üzere olasılık yoğunluk fonksiyonuna türevi alındığında:

$$f(\mathcal{G}) = -\frac{dF(\mathcal{G})}{d\mathcal{G}} = k \frac{\bar{\mathcal{G}}^{k-1}}{c^k} \exp\left(-\left(\frac{\bar{\mathcal{G}}}{c}\right)^k\right) \quad (2.3)$$

Buradan ortalama rüzgar hızı:

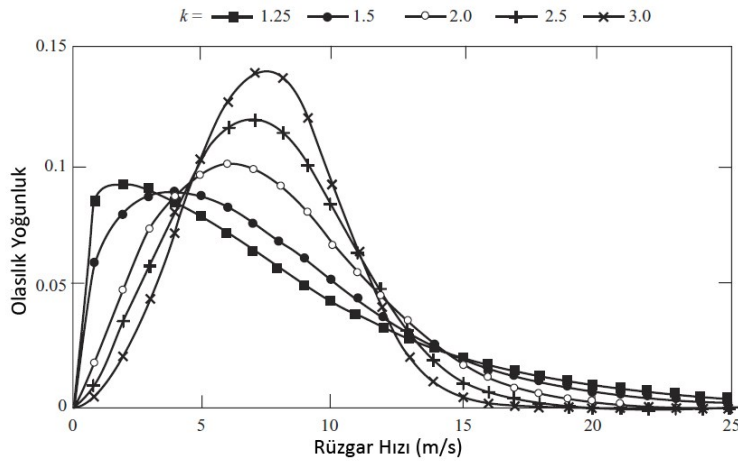
$$\bar{\mathcal{G}} = \int_0^{\infty} \bar{\mathcal{G}} f(\mathcal{G}) d\mathcal{G} \quad (2.4)$$

\mathcal{G}_m rüzgar hızı olmak üzere Weibull olasılık dağılım fonksiyonu bir sahada en sık görülme ihtimali olan rüzgar hızının ortalama rüzgar hızından farklılığını ortaya koymaktadır. Şekil 2.8’de tipik bir saha için verilen Weibull dağılımında ortalama rüzgar hızı 7 m/s olmasına rağmen en olası rüzgar hızı 5.5 m/s olarak tespit edilmiştir. Bu nedenle Weibull dağılım fonksiyonu rüzgar analizi için doğruya en yakın sonucu vermektedir [19].



Şekil 2.8 : Weibull olasılık dağılım fonksiyonu [19].

Weibull olasılık dağılım fonksiyonunda “k” katsayısı $k=2$ ve $c=\sqrt{2}b$ olarak alındığında Şekil 2.9’da gösterildiği üzere Rayleigh dağılım fonksiyonu elde edilir. Bu değer ve öngörü birçok saha noktasına uymaktadır. “k” katsayısının 2.5, 3 gibi değerler alması yıllık ortalama rüzgar hızı içerisinde saatlik ortalama rüzgar hızı değişiminin az olduğu; 1.5 veya 1.2 gibi değerler alması durumunda ise ortalama rüzgar hızı değişiminin daha keskin olduğu sonucunu ortaya çıkarır.



Şekil 2.9 : Weibull-Rayleigh olasılık dağılım fonksiyonu [19].

Weibull dağılımı saatlik ortalama rüzgar hızlarının rastgele değişimleri tanımlamada oldukça faydalıdır. Ancak, Weibull dağılımı birçok sahanın rüzgar rejimini tanımlamada iyi bir temsil oluşturmakla birlikte, bazı istisnai durumlar da mevcuttur. Örneğin yaz ve kış aylarında rüzgar rejiminde büyük farklılıklar olan sahalarda çift-pikli “bi-Weibull” dağılım fonksiyonu farklı ölçek ve şekil parametreleriyle kullanılmaktadır [15].

$$F(\mathcal{G}) = F_1 \exp\left(-\left(\frac{\bar{\mathcal{G}}}{c_1}\right)^{k_1}\right) + (1 - F_1) \exp\left(-\left(\frac{\bar{\mathcal{G}}}{c_2}\right)^{k_2}\right) \quad (2.5)$$

2.5.4 Sinoptik ve günlük değişimler

Mevsimsel değişimlerden daha kısa süreli rüzgar hızı değişimleri daha rastgele ve daha az tahmin edilebilir konumdadır. Bununla beraber bu kısa değişimler kesin kalıplar içermektedir. Bu değişimlerin frekans içeriği tipik olarak 4 gün ve civarında tepe yapmaktadır. Bunlar “sinoptik-anlık” değişimler olarak adlandırılır. Sinoptik değişimler alçak ve yüksek basınç sahalarının büyük ölçekli hava hareketleriyle ilgilidir.

Coriolis kuvveti havayı yüksek basınçtan alçak basınca hareket ettiren dairesel bir hareket endükler. Bu uyumlu, büyük ölçekli atmosferik hareketin verilen noktaya ulaşması birkaç gün sürmektedir. Frekans spektrumu incelendiğinde, birçok saha 24 saat sonunda belirgin bir günlük tepe değeri göstermektedir. Bu çoğunlukla yerel termal etkilerle açıklanmaktadır. Gün içindeki yoğun ısınma atmosferde büyük ısı aktarımına yol açmakta, gece ise ters yönde soğuma meydana gelmektedir. Kara ve deniz meltemleri günlük tepe değerinin görülmesinde önemli bir rol oynamaktadır [15].

2.5.5 Rüzgarın yükseklikle ve pürüzlülükle değişimi

Ortalama rüzgar hızı yüksekliğin bir fonksiyonudur. Yeryüzü bütün engellerden arındırılmış olsa dahi, yüzeye yakın yerlerde rüzgarın akışına karşı sürtünme kuvveti uygulamakta ve rüzgarı yavaşlatmaktadır. Bu olay rüzgar kayması (wind shear) olarak adlandırılır ve rüzgar türbinleri dizaynında ve yerleştirilmesinde oldukça önemlidir. Yüksekliğe bağlı rüzgar değişimini tanımlamak üzere birçok matematiksel model geliştirilmiştir. Bunlardan biri Prandtl logaritmik yasasıdır [19]:

$$\frac{\bar{\mathcal{G}}_m(z)}{\bar{\mathcal{G}}_m(z_{ref})} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (2.6)$$

Burada z istenen yükseklik değeri, z_{ref} ölçüm noktasının yüksekliği ve z_0 pürüzlülük uzunluğunu temsil etmektedir. Pürüzlülük uzunluğunun farklı yüzeylerdeki değişimi

Çizelge 2.2’de gösterilmiştir. Yüksekliğin ve pürüzlülüğün ortalama rüzgar hızına etkisi başka kabul ile Eşitlik (2.7)’de gösterilmiştir [19]:

$$\bar{g}_m(z) = \bar{g}_m(z_{ref}) \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{\alpha_p} \quad (2.7)$$

Burada α_p pürüzlülük katsayısı olmak üzere saha şartlarına bağlı olarak değişmektedir ve Çizelge 2.2’de gösterilmiştir [19].

Çizelge 2.2 : Farklı yüzeylerde z_0 pürüzlülük uzunluğu ve α_p pürüzlülük katsayısı

Yüzey Tipi	z_0 (mm)	α_p
Kumsal	0.2-0.3 arası	0.10
Biçilmiş Çim	1-10 arası	0.13
Yüksek Çim	40-100 arası	0.19
Şehir	1000-2000 arası	0.32

2.6 Rüzgarın Enerjisi

Per-unit cinsinden bir akışta depolanan kinetik enerji $E_k = \frac{1}{2} \rho \bar{g}^2$ olarak ifade edilir.

Burada ρ akışın yoğunluğunu temsil etmektedir. Bir A alanından geçen akışın miktarı AV ’dir. Dolayısıyla A alanından g hızıyla geçen bir rüzgardaki güç [19]:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A \bar{g}^3 \quad (2.8)$$

Yukarıdaki denklemden görüldüğü üzere rüzgardan elde edilen güç hava yoğunluğu ρ , süpürme alanı A (*rotor süpürme alanı*) ve rüzgar hızı g ile orantılıdır. Burada hava yoğunluğu hava basıncı ve hava sıcaklığının bir fonksiyonudur ki bunların ikisi de yüksekliğe bağlı bileşenlerdir [14]:

$$\rho(z) = \frac{P_0}{RT} \exp\left(\frac{-gz}{RT}\right) \quad (2.9)$$

$\rho(z)$ = hava yoğunluk fonksiyonu (kgm^{-3});

P_0 = deniz seviyesi atmosfer basıncı (1.225 kg m^{-3});

R_{gaz} = havanın gaz sabiti ($287.05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$);

- g = yerçekimi sabiti (9.81 m s⁻²);
T = sıcaklık (K);
z = deniz seviyesine göre yükseklik (m)

Standart hava yoğunluğu 15 °C sıcaklık ve 1 atm deniz seviyesi atmosfer basıncı altında 1.225 kg/m³'dür. Hava yoğunluğu sıcaklıkla ve yükseklikle ters orantılı olarak değişmektedir. Havanın sahip olduğu kinetik enerji rüzgar türbinlerinde mekanik dönme kuvvetine dönüşmektedir. [14].

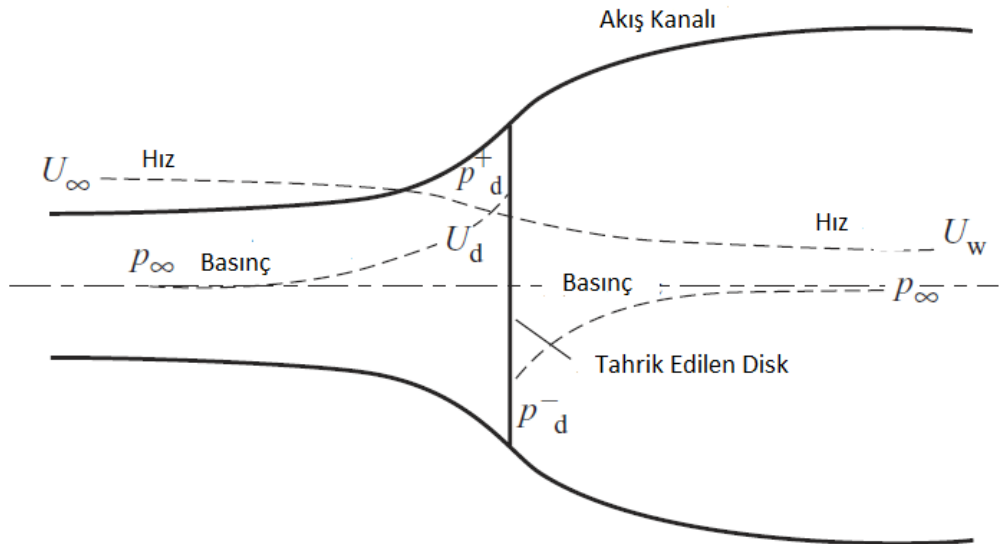
2.6.1 Rotor disk konsepti, güç faktörü

Rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjinin tamamı rüzgar türbini aracılığıyla mekanik enerjiye dönüştürülemez. Rüzgar türbininin aerodinamik davranışı elde edilecek mekanik gücü sınırlamaktadır.

Disk'in akış kaynağının (menba) kesit alanı akış çıkışının (mansap) kesit alanından küçüktür. Akış kanalındaki bu büyümenin nedeni debinin her yerde eşit olması gerekliliğidir:

$$\rho A_{\infty} \bar{g}_{\infty} = \rho A_d \bar{g}_d = \rho A_w \bar{g}_w \quad (2.10)$$

Şekil 2.10'da enerji akış kanalı ve rotor disk gösterilmektedir:



Şekil 2.10 : Enerji akış kanalı ve rotor disk [15].

∞ sembolü menbayı, d diski ve w rüzgar çıkışını temsil etmektedir. Tahrik disk modeli hız değişimini endüklemektedir. Endüklenen akışın yön elemanı $-a\mathcal{G}_\infty$ olarak gösterilir. Buradaki a aksenal akış endüksiyon faktörü veya içeriye akış faktörüdür. Bu nedenle diskteki net akış hızı [15]:

$$\bar{\mathcal{G}}_d = \bar{\mathcal{G}}_\infty(1-a) \quad (2.11)$$

2.6.1.1 Momentum teorisi

Diskten geçen rüzgar ($\bar{\mathcal{G}}_\infty - \bar{\mathcal{G}}_w$) herbir noktada değişikliğe uğrar ve momentum değişim oranı rüzgar hızının her bir noktadaki değişimine eşittir:

$$\text{Momentum değişim oranı} = (\bar{\mathcal{G}}_\infty - \bar{\mathcal{G}}_w)\rho A_d \mathcal{G}_d \quad (2.12)$$

Bu momentum değişimi disk boyunca var olan basınç farkından ileri gelmektedir zira akış tüneli tamamen atmosfer basıncıyla çevrilidir dolayısıyla sıfır net kuvvet uygulamaktadır [15]:

$$(P_d^+ - P_d^-)A_d = (\bar{\mathcal{G}}_\infty - \bar{\mathcal{G}}_w)\rho A_d \mathcal{G}_d(1-a) \quad (2.13)$$

Basınç farkı $(P_d^+ - P_d^-)$ 'ı bulmak için Bernoulli eşitliğinden faydalanılır. Bernoulli eşitliği sabit şartlarda bir akıştaki kinetik enerji, statik basınç ve potansiyel enerji toplamının sabit olduğunu belirtmektedir. Dolayısıyla bir birimlik hava hacmi:

$$\frac{1}{2}\rho\bar{\mathcal{G}}^2 + P + \rho gh = \text{sabit} \quad (2.14)$$

Buradan menba;

$$\frac{1}{2}\rho_\infty\bar{\mathcal{G}}_\infty^2 + \rho_\infty gh_\infty = \frac{1}{2}\rho_d\bar{\mathcal{G}}_d^2 + P_d^+ + \rho_d gh_d \quad (2.15)$$

$(\rho_\infty = \rho_d)$ ve $(h_\infty = h_d)$ olarak kabul edildiğinde;

$$\frac{1}{2}\rho\bar{\mathcal{G}}_\infty^2 + \rho_\infty = \frac{1}{2}\rho\bar{\mathcal{G}}_d^2 + P_d^+ \quad (2.16)$$

Benzer şekilde mansap:

$$\frac{1}{2} \rho \bar{g}_w^2 + \rho_\infty = \frac{1}{2} \rho \bar{g}_d^2 + P_d^- \quad (2.17)$$

İki denklem eşitlendiğinde:

$$(P_d^+ - P_d^-) = \frac{1}{2} \rho (\bar{g}_\infty^2 - \bar{g}_w^2) \quad (2.18)$$

Eşitlik (2.13)'de yerine yazıldığında:

$$\bar{g}_w = (1 - 2a) \bar{g}_\infty \quad (2.19)$$

Bu eşitlik aksenal hız kaybının yarısının menbada diğer yarısının mansapta kaldığını göstermektedir [15].

2.6.1.2 Güç katsayısı

Eşitlik (2.13)'de havadaki kuvvet aşağıdaki gibi yazılır:

$$F = (P_d^+ - P_d^-) A_d = 2 \rho A_d \bar{g}_\infty^2 a (1 - a) \quad (2.20)$$

Bu kuvvetin çıkaracağı güç ise ve güç katsayısı:

$$C_p = \frac{\text{Güç}}{\frac{1}{2} \rho \bar{g}_\infty^3 A_d} \quad (2.21)$$

Burdan güç katsayısı [15]:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (2.22)$$

2.6.1.3 Betz limiti

Güç katsayısı C_p 'nin maksimum olduğu değer:

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) = 0 \quad (2.23)$$

Yukarıdaki denklemden $a=1/3$ olarak bulunur:

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (2.24)$$

Güç faktörünün teorik maksimum değeri Alman bilimadamı Albert Betz tarafından tanımlanmıştır. Buna göre rüzgarın ihtiva ettiği kinetik enerjinin teoride en fazla %59.3'ü rotorda mekaniki enerjiye dönüşebilir [15]. Ancak bu değer teorik sınırı göstermektedir, pratikte en fazla %45 seviyelerine ulaşılabilir [19].

2.6.1.4 İtme sabiti

Diske etkiyen Eşitlik (2.20)'de verilen kuvvet boyutsuz bir itme sabiti tanımlayabilir:

$$C_T = \frac{\text{Güç}}{\frac{1}{2} \rho \bar{g}_\infty^2 A_d} \quad (2.25)$$

Burdan itme sabiti:

$$C_T = 4a(1-a) \quad (2.26)$$

$a \geq \frac{1}{2}$ değerleri için $(1-2a)\bar{g}_\infty$ ifadesi sıfır veya negatif olduğundan, momentum teorisi geçerliliğini kaybetmektedir [15].

2.6.2 Kuvvet, moment ve güç

Türbin rotoruna etkiyen itme kuvveti ve süpürülen toplam alan türbin kanatlarının dönmesine neden olur. İtme kuvveti (C_T), moment (C_Q) ve güç (C_P) katsayıları aşağıda belirtilmektedir [19]:

$$T_{itme} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_T(\lambda, \beta) \bar{g}^2, \quad (2.27)$$

$$Q = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_Q(\lambda, \beta) \bar{g}^2, \quad (2.28)$$

$$P_T = C_P(\lambda, \beta) P_V = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_P(\lambda, \beta) \bar{g}^3, \quad (2.29)$$

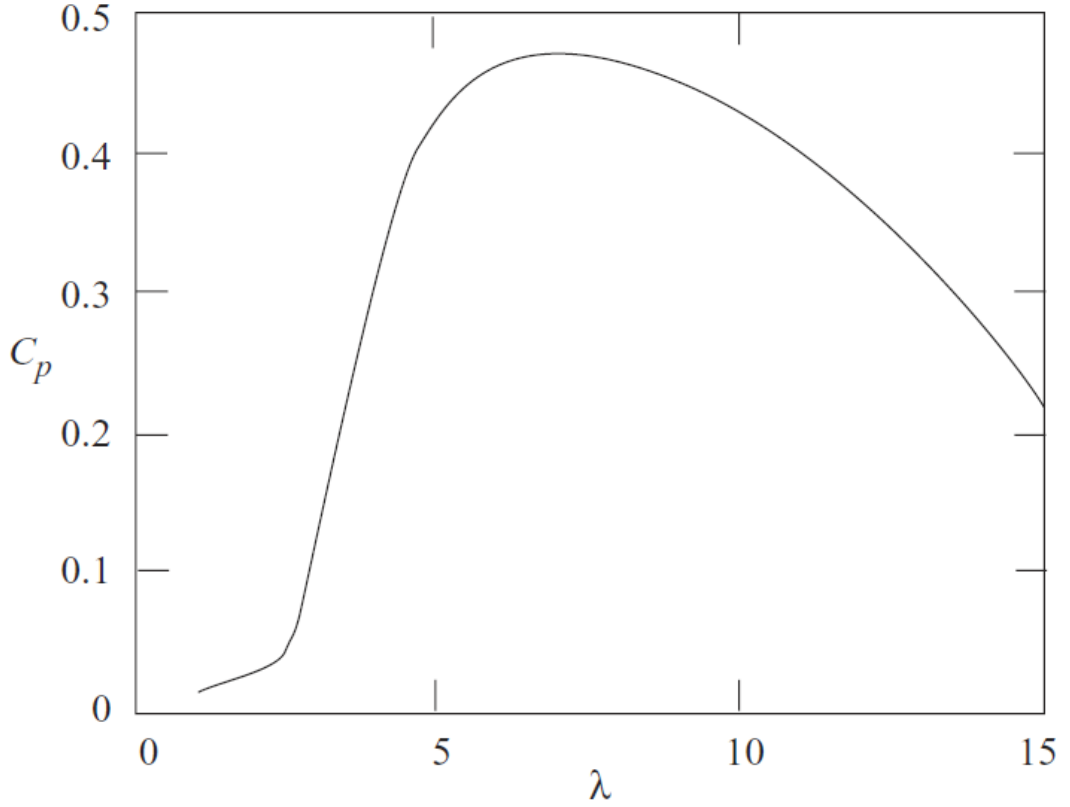
Burada (C_Q) ve (C_P) arasında aşağıdaki ilişki mevcuttur:

$$C_Q = C_P / \lambda \quad (2.30)$$

λ uç hızı oranı olarak tanımlanmaktadır:

$$\lambda = \frac{R\Omega_r}{g} \quad (2.31)$$

Uç hızı Eşitlik (2.31)'de görüldüğü üzere R kanat uzunluğu, Ω_r açısal rotor hızı (dişli kutusu öncesi) ve g rüzgar hızına bağlıdır. Uç hızı oranı oldukça önemlidir ve kanat açısı β ile birlikte türbinin işletme karakteristiğini belirler [21].



şekil 2.11 : Güç katsayısı-uç hızı değişimi [21].

şekil 2.11'de kanat açısı $\beta = 0$ sabit olmak üzere güç katsayısı C_p 'nin uç hızı λ ile değişimi görülmektedir. C_p 'nin maksimum olduğu nokta optimum kanat ucu hızı olarak değerlendirilmektedir. Türbin veriminin arttırılması ve kontrol algoritmalarının geliştirilmesi açısından C_p ile λ arasındaki ilişki oldukça önemlidir

[19]. Eşitlik (2.29)'da görüldüğü üzere $C_p(\lambda)$ rüzgar türbinin verimini belirlemektedir. $C_p(\lambda)$ ise rüzgardan elde edilen momentin hesabında kullanılmaktadır [21].

2.7 Bölüm Özeti

Rüzgar Enerjisi tarihi geçmişi olan, yıllarca önemli araştırmalara konu olmuş yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Dünya devletlerinin elektrik üretiminde fosil yakıtlara olan bağımlılıklarını azaltmak ve sera gazı emisyon oranlarını düşürmek yönündeki politikaları rüzgar enerjisine olan ilgiyi arttırmış ve teknolojinin gelişmesini desteklemiştir.

Rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjinin önce mekanik sonra da elektrik enerjisine dönüştürülmesi rüzgar türbinlerinin temel çalışma ilkesini oluşturmaktadır. Bir akışta

depolanan kinetik enerji $E_k = \frac{1}{2} \rho \bar{\mathcal{G}}^2$ olarak ifade edilir. Burada ρ akışın yoğunluğunu temsil etmektedir. Bir A alanından geçen akışın oranı AV 'dir.

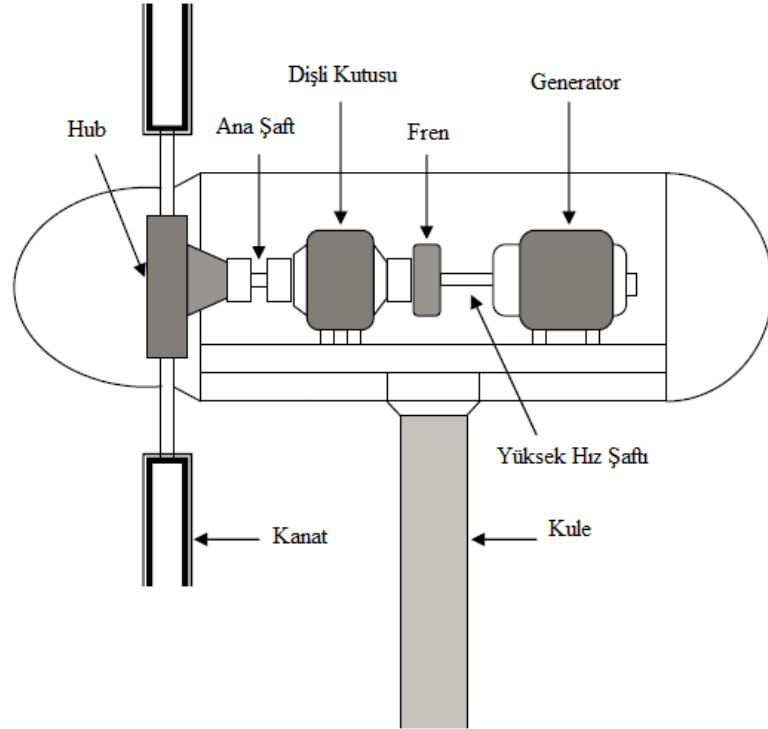
Dolayısıyla A alanından $\bar{\mathcal{G}}$ hızıyla geçen bir rüzgardaki güç $P_v = \frac{1}{2} \rho A \bar{\mathcal{G}}^3$ olarak

hesaplanmaktadır. Aerodinamik disk konsepti hava akışının sahip olduğu bu kinetik enerjinin tamamının rotor miline mekanik enerji olarak aktarılamayacağını belirtmektedir. Rotor miline aktarılan kinetik enerji bir güç faktörü C_p ile çarpılmaktadır. Güç faktörü teorik olarak maksimum 0.59 değerini almaktadır (betz limiti). C_p uç hızı λ 'ya bağlı olarak değişmekte ve pratikte en fazla 0.45 değerine ulaşabilmektedir. Türbin kontrol algoritması farklı rüzgar hızlarına karşı C_p 'nin maksimum değerinde tutulmasını hedeflemektedir. $C_p(\lambda, \beta)$ olmak üzere uç hızı ve kanat açısına bağlı bir fonksiyon olduğundan, değişken rüzgar hızlarında rotor dönel hızı kontrol edilmektedir.

3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ VE ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ

3.1 Giriş

Rüzgar türbinlerinin ana ekipmanları rotor, dönüşüm sistemi ve generatör olarak sıralanmaktadır. Şekil 3.1’de yatay eksenli bir rüzgar türbininin ana ekipmanları gösterilmiştir. Rotor, aerodinamik dönüşümün gerçekleştiği kanatlar, kanatları birbirine bağlayan ve kanat hareket mekanizmasını (pitching sistemi) barındıran göbek (hub)’dan oluşmaktadır. Dönüşüm sistemi rotor tarafından süpürülen mekanik enerjiyi elektrik makinasına iletmektedir, düşük ve yüksek hız şaftı, dişli kutusu ve fren sisteminden oluşur. Dişli kutusu genellikle rotor hızını 20-50 rpm (devir/dakika – d/dk)’den 1000-1500 d/dk seviyelerine yükseltmektedir. Elektrik generatörü mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir ve elektrik çıkışı şebekeye bağlanmaktadır. Değişken hızlı rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi (REDS)’nde şebeke ile stator-rotor sargıları arasında güç elektroniği dönüştürücüleri kullanılır [19].

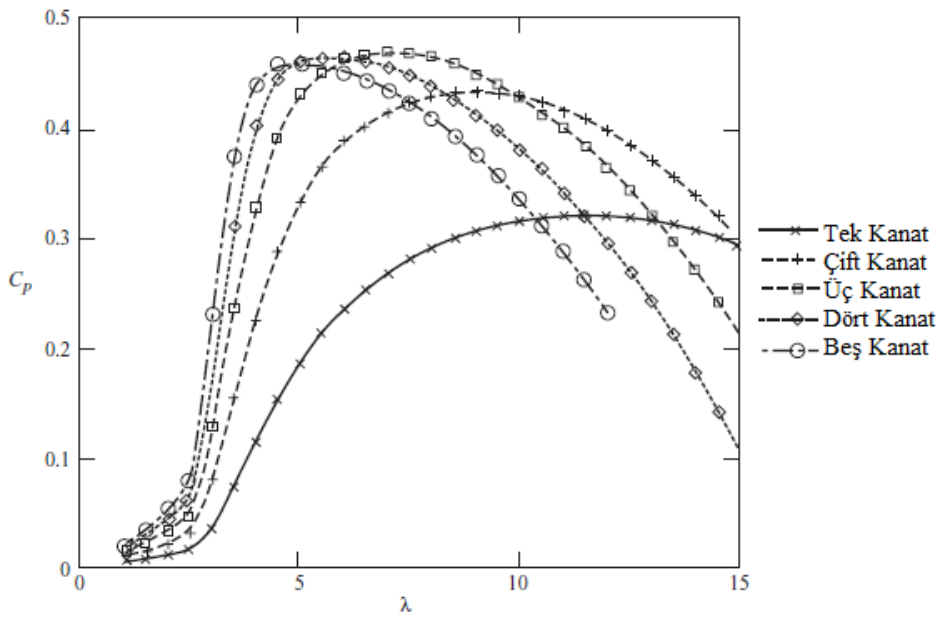


Şekil 3.1 : Rüzgar türbininin yapısı [19].

3.1.1 Rotor

Rotor rüzgar türbininin en önemli ve göze çarpan parçasıdır. Rotor rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjiyi şafta mekanik enerji olarak iletir. Rotor; kanat, hub, şaft, rulman ve diğer iç elemanlardan oluşmaktadır.

Rüzgar türbini rotoru tek kanatlı olarak dizayn edilebileceği gibi çok kanatlı olarak da kullanılmaktadır. Tek kanatlı rüzgar türbinleri daha hızlı döndükleri ve tek kanadın karşısında rüzgarın itme etkisini dengeleyecek bir elemanın bulunmaması nedeniyle çok fazla titreşim ve gürültüye sahiptirler. İki kanatlı rüzgar türbinleri de benzer sıkıntılardan dolayı verimli değildirler [22]. Keza dört-beş kanatlı dizaynlar da verimlilikleri görece daha keskin değişen ve maliyeti 3 kanatlı dizaynlara göre daha yüksek dizaynlardır [15]. Şekil 3.2 incelendiğinde en optimum dizaynın üç kanatlı türbinler olduğu görülmektedir. Bu nedenle hemen hemen bütün ticari rüzgar türbinleri üç kanata göre dizayn edilmekte ve üretilmektedir. Rotor büyüklüğü ve kanat çapı türbinin gücüyle orantılı olarak değişmektedir. Modern rüzgar türbinleri rüzgarı karşıdan alacak şekilde dizayn edilmektedirler. Rüzgar itme kuvveti kanatları kuleye doğru iter ve rotor süpürme alanını azaltır. Bu esnada kanatlarda meydana gelen titreşimler kanatlarda yorulmaya neden olur. Bu problemten kaçınmak üzere kanatlar dışa doğru eğimli tasarlanmaktadır. Eğilen kanat rüzgar altında işletme koşullarında nominal pozisyonda çalışmakta ve enerji kaybı ve yorulmanın mümkün olduğu kadar önüne geçilmektedir [22].

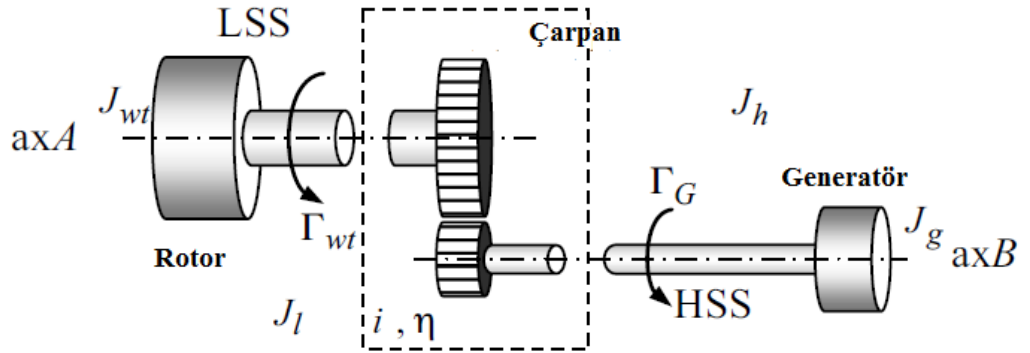


Şekil 3.2 : Optimum kanat sayısı [22].

3.1.2 Dişli kutusu ve aktarım dişlisi

Dişli kutusunun görevi rotor hızını arttırarak elektrik makinasını tahrik edebilecek seviyeye getirmektir [15]. Bir rüzgar türbininde rotorun hızı 30-50 d/dk civarındadır ve bunun yanında generatör nominal çalışma aralığı genellikle 1000-1500 d/dk arasındadır. Dolayısıyla dişli kutusu aradaki bu hız farkını gidererek hızı arttırmaktır. İdeal dişli kutusu kötü, fırtınalı hava şartlarında dahi hatasız çalışacak şekilde dizayn edilmelidir. Kompakt yapısından ötürü bu dönüşüm esnasında oluşacak ısıdan kaçınmak zordur. Tipik bir 600 kW'lık rüzgar türbini dişli kutusunda yaklaşık 18 kW'lık bir ısı kaybı yaşamaktadır. Bir diğer sıkıntı dişli çarklarının imalatıdır. Eğimli çarklar bitişik dişlerin daha yumuşak bir şekilde birbirlerine geçişlerinden ötürü daha az gürültülü çalışırlar. Ancak eğik dişli çarkları değişken hızlara olan uyumsuzlukları nedeniyle dişli kutusunda kullanılamamaktadır [22].

Dişli kutusundaki moment seviyesi nominal rüzgar hızına kadar olan hızlarda sıfırla nominal moment değeri arasında rüzgar hızına göre değişmektedir. Şayet fren sistemi dişli kutusu girişine kurulmazsa frenleme sırasında dişli kutusuna nadiren kısa süreli büyük moment etkimektedir [15]. Dişli kutusu rotor hızını i kat arttırmaktadır dolayısıyla momenti i kat azaltmaktadır. Şekil 3.3 kaskat yapıda bir dişli kutusu eşdeğer devresini göstermektedir:



Şekil 3.3 : Kaskad dişli kutusu eşdeğer devresi [21].

Yukarıdaki eşdeğer devrede rüzgar türbini ve generatör momentleri aşağıdaki gibidir:

$$J_h \cdot \frac{d\Omega_h}{dt} = \frac{\eta}{i} \cdot \Gamma_{wt}(\Omega_l, v) - \Gamma_G(\Omega_h, c) \quad (3.1)$$

$$J_l \cdot \frac{d\Omega_l}{dt} = \Gamma_{wt}(\Omega_l, v) - \frac{i}{\eta} \Gamma_G(\Omega_h, c) \quad (3.2)$$

Burada;

$\Gamma_{wt}(\Omega_l, v)$ rüzgar hızı v tarafından endüklenen aerodinamik moment;

$\Gamma_G(\Omega_h, c)$ generatör tarafından endüklenen elektromagnetik moment;

J_h, J_l sırasıyla yüksek şaft hızı (YŞH, HSS) ve düşük şaft hızını (DŞH, LSS);

$$J_h = (J_l + J_{wt}) \cdot \frac{\eta}{i^2} + J_2 + J_g \quad (3.3)$$

$$J_l = J_{wt} + J_1 + (J_g + J_2) \cdot \frac{i^2}{\eta} \quad (3.4)$$

J_1, J_2 sırasıyla dişli çarklarının eylemsizlik momentini;

J_{wt}, J_g sırasıyla rüzgar türbini ve generatörün eylemsizlik momentini temsil etmektedir [21].

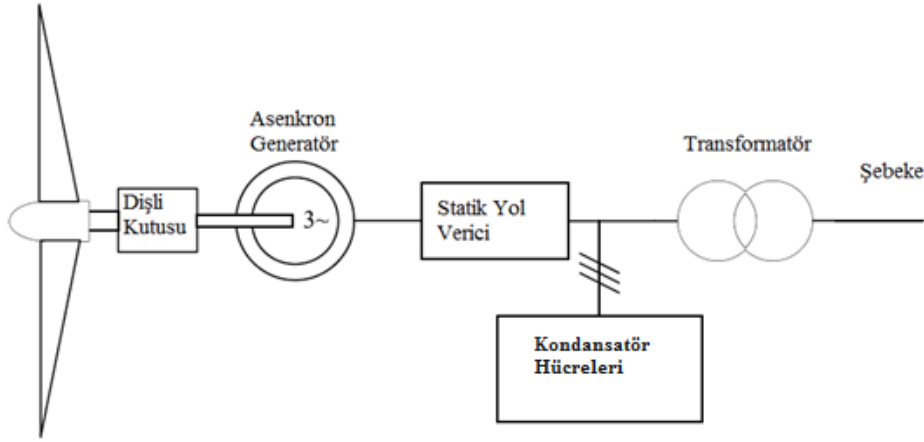
3.1.3 Güç üretim sistemi

Rüzgar türbinlerinde mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmede çoğunlukla asenkron makinalar kullanılmaktadır. Senkron makinalar da kullanılabilirle beraber, şebeke bağlantısına uyumlulukları ve değişken hızlarda çalışabilmeleri nedeniyle asenkron makinalar çoklukla tercih edilmektedir. Bununla beraber modern rüzgar türbinleri elektrik kalitesini arttırmak amaçlı büyük güç elektroniği elemanlarıyla donatılmaktadırlar. Rüzgar türbinlerinde kullanılan elektrik makinaları değişken rüzgar hızlarında stabil çalışabilmeli ve şebekeye uygun frekans ve gerilimde bir enerji vermelidir [19].

3.1.3.1 Sabit hızlı ve sınırlı değişkenli rüzgar enerjisi kontrol sistemi

Rüzgar enerjisi kontrol sistemi (REKS) rüzgar hızından bağımsız bir şekilde rotor şaftının sabit bir hızla tahrik edilmesi prensibine dayanır. Bu şekilde sisteme aktarılacak akımın frekansı şebeke frekansı ile aynı olmaktadır. Sabit hızlı REKS'ler genellikle kafesli asenkron generatörlerden (KAG), statik yol verici ve kondansatör

hücrelerinden meydana gelmektedir ve direkt olarak şebekeye bağlanmaktadır. Şekil 3.4 sabit hızlı REKS'in genel yapısı gösterilmektedir [21].

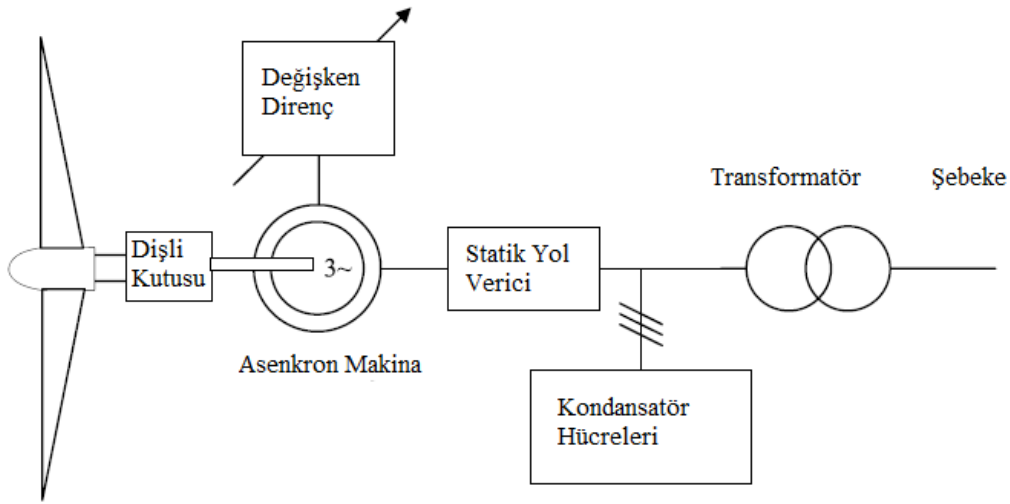


Şekil 3.4 : Sabit hızlı REKS genel yapısı [21].

Öncelikle asenkron makina motor olarak çalıştırılır ve rüzgar momentiyle aynı yönde bir elektromagnetik moment endükleme sağlanır. Kararlı halde dönme hızı senkron hızı geçer ve elektromagnetik moment negatif olur ve bu makinanın generatör çalışmaya geçmesi anlamına gelir. Direkt olarak şebekeye bağlanmasından ötürü, KAG kendi rotor direncinin sahip olduğu doğal mekanik şartlarda çalışır. Dolayısıyla KAG dönme hızı senkron hıza oldukça yakındır. Bunun yanında rüzgar hızındaki değişim dönme hızında sadece küçük değişimlere yol açmaktadır. Rüzgardan elde edilen gücün rüzgar hızının küpüyle değiştiği düşünüldüğünde bileşik elektromagnetik moment dalgalanmaları önemlidir. KAG'lar basit mekanik yapıları, yüksek verimlilikleri ve düşük bakım maliyetleri nedeniyle tercih edilirler. Bunların yanında mukavemetleri yüksek ve stabildirler. En büyük dezavantajları ise aktif güç, reaktif güç, uç gerilimi ve rotor hızı arasındaki ilişkidir. Aktif güçteki artış ancak elektrik makinasının daha çok reaktif güç tüketmesiyle mümkündür. Şebekeden reaktif güç kullanımını sınırlandırmak için KAG'lar kapasitör hücreleri ile bağlanırlar. Statik yol vericiler ise ani akım boşalmalarına karşı şebekeye bağlantının daha sorunsuz olmasını sağlamaktadır [21].

KAG kullanılan rüzgar türbinlerinde maksimum verime belli bir rüzgar hızında erişilmektedir. Toplam türbin verimini arttırabilmek için bazı sabit hızlı REKS'ler 2 sargı setinden oluşur, dolayısıyla 2 farklı optimum çalışma hızına erişir. İlk sargı seti (genellikle 8 çift) genellikle düşük rüzgar hızları için kullanılır, diğer sargı seti (genellikle 6 çift) ise orta ve yüksek rüzgar hızlarında kullanılır. Sabit hızda çalışma

karakteristiğinden ötürü mekanik stres önemlidir. Rüzgar hızındaki bütün dalgalanma mekanik moment olarak iletilir ve elektriksel dalgalanmaya neden olur. Ayrıca sabit hızlı REKS'lerin kontrol edilebilirlikleri düşüktür. Bu nedenle sınırlı kontrollü KAG rüzgar türbinleri geliştirilmiştir. Bunlar bilezikli asenkron generatör (BAG) ile geliştirilmişlerdir ve rotor devresinde değişken bir dirence sahiptirler. En büyük farkı güç elektroniği elemanlarıyla kontrol edilen harici rotor devre dirençleridir. Dolayısıyla rotor devre direnci değişkenliği sağlanmakta ve generatörün kayması kontrol edilebilmektedir [21]. Asenkron makina karakteristikleri Bölüm 4'de verilecektir. Genellikle senkron hızın %10'u kadar bir aralıkta kontrol sağlanabilmektedir.



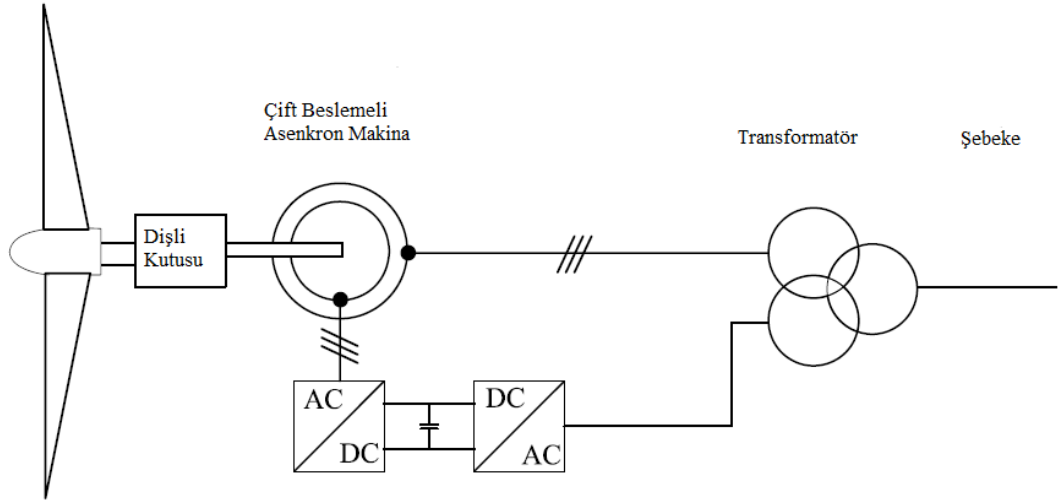
Şekil 3.5 : Değişken hızlı REKS genel yapısı [21].

Şekil 3.5'de genel yapısı gösterilen değişken rotorlu BAG'ler sınırlı bir hız kontrol imkanı sunsa dahi, kontrol sistemine göre öncelikle dizaynın sabit rüzgar hızına göre yapılması gerekmektedir. Ayrıca rotor devresine eklenecek direnci belirlemek üzere ayrı bir kontrol algoritması oluşturulmalıdır. Rotor devresine eklenecek direncin kaymayı artırırken verimliliği düşürmesi ise sistemin dezavantajıdır [14].

3.1.3.2 Değişken hızlı rüzgar enerjisi kontrol sistemi

Değişken hızlı rüzgar türbinleri modern rüzgar türbinlerinde en çok kullanılan modeldir. Güç elektroniği dönüştürücüleri ile şebekeye aktarılacak gücün frekans ve genliği ayarlanarak değişken hızda çalışma mümkün olabilmektedir. Genel yapısı Şekil 3.6'da gösterilen çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) kullanılarak

değişken hızda değişken güç üretimi sağlanmaktadır. ÇBAG bir BAG tipi olarak tanımlanabilir. Zira stator sargıları direkt üç-fazlı sabit frekanslı şebekeye bağlanırken rotor sargıları AC-DC-AC dönüşümlerden geçerek şebekeye bağlanmaktadır. Dolayısıyla stator sargıları şebeke gerilimine maruz kalırken rotor sargıları da güç elektroniği dönüştürücüleri aracılığıyla gerilime maruz kalmaktadır. Çift besleme terimi buradan gelmektedir [21]. Bu sistem değişken rüzgar hızlarına adaptasyon sağlamak ve şebekeye sabit frekans ve genlikte güç üretmektedir. Ayrıca değişken hızlı REKS'lerin en önemli avantajlarından biri de reaktif güç çıkışının kontrol edilebilmesidir [14].



Şekil 3.6 : Değişken hızlı ÇBAG genel yapısı [21].

Rotor devresine bağlı iki adet IGBT dönüştürücüsü mevcuttur. Bunlar arasında bir DC hat vardır. Bu iki dönüştürücü güç elektroniği üniteleri rotor ve şebeke taraflı olarak adlandırılırlar. Rotor tarafındaki dönüştürücü ünite generatörün aktif ve reaktif gücünü kontrol etmekte, şebeke tarafındaki dönüştürücü ünite ise DC-hat gerilimini kontrol ederek geniş güç faktöründe çalışmayı sağlamaktadır.

Stator çıkışı devamlı olarak şebekeye bağlıdır, rotor ise dönüş hızına bağlı olarak senkron hız üzerinde şebekeyi beslemekte, senkron hız altındaki durumlarda ise şebekeye güç çekmektedir. İki durumda da rotor güç akışı kayma ile orantılıdır [21]. Dönüştürücülerin boyutu generatör gücü ile doğrudan alakalı değildir. Çalışma hız aralığı dönüştürücülerin büyüklüklerini tanımlamaktadır. Genellikle senkron hızın $\pm 40\%$ aralığında çalışma öngörülmektedir. ÇBAG tabanlı REKS'ler yüksek

mertebede kontrol edilebilmektedirler. Büyük rüzgar değişim aralıklarında maksimum güç elde edilmekte ve aktif-reaktif güç kontrolü rotor akımlarından bağımsız olarak tamamen dekuplaj edilmektedirler. Son olarak şebekede iki yönlü güç akışı sağlayarak gerilim kontrolünde aktif bir şekilde yer almaktadırlar [21].

3.2 Rüzgar Türbinlerinin İşletme Karakteristikleri

Rüzgar türbilerinin ana işletme karakteristikleri üç ana gösterge ile ifade edilebilir: güç, moment ve itme. Bu üç değişken de rüzgar hızı ile değişim göstermektedir. Güç, rotor tarafından yakalanan enerjiyi gösterirken; maruz kalınan moment dişli kutusunun boyutunu belirlemektedir. Rotor itmesi ise kulenin dizaynında önem teşkil etmektedir. Bu nedenle türbin performansını boyutsuz bir şekilde göstermek, rüzgar türbinin sabit hızlı mı yoksa değişken hızlı bir yapıda mı olmasından bağımsız olarak performans eğrileri ile türbinin karakteristiğini belirlemek daha uygun olmaktadır. Güç, moment ve itme karakteristikleri uç hızının bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir [15].

3.2.1 Sabit dönme hızı işletmesi

Rüzgar türbinleri şebekeye bağlı olsun ya da olmasın üretilen elektriğin sabit frekanslı olması gerekmektedir. Aksi halde birçok elektrikli cihaz çalışmayacaktır. Bu nedenle rüzgar türbinleri çoğunlukla sabit dönme hızında çalıştırılırlar.

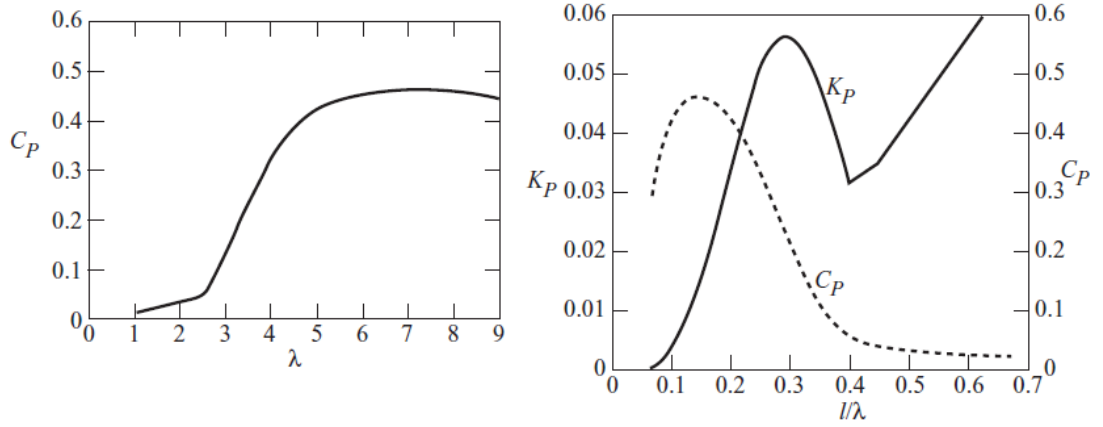
3.2.1.1 $K_p - 1/\lambda$ eğrisi

Güç, moment ve itme eğrilerinin yanı sıra sabit hızlı bir rüzgar türbin işletmesinde alternatif bir performans eğrisi tanımlanabilir. $C_p - \lambda$ eğrisi boyutsuz olarak rüzgar hızının sabit olması halinde üretilen gücün rotor dönme hızıyla nasıl değiştiğini göstermektedir.

$K_p - 1/\lambda$ eğrisi ise yine boyutsuz olarak dönme hızı sabit tutulduğunda gücün rüzgar hızıyla değişimini göstermektedir. Tipik bir sabit kanat açılı rüzgar türbininin $C_p - \lambda$ ve $K_p - 1/\lambda$ eğrileri Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

$$K_p = \frac{\text{Güç}}{\frac{1}{2}\rho(\Omega R)^3 A_d} = \frac{C_p}{\lambda^3} \quad (3.5)$$

$K_p - 1/\lambda$ eğrisi yukarıda da belirtildiği üzere güç-rüzgar hızı ile aynı karakteristiği göstermektedir. Türbin verimliliği ise $C_p - \lambda$ eğrisi ile gösterilebilir. Bir rüzgar türbininin maksimum verimlilikte çalışması eğriden görüldüğü üzere değişken rüzgar hızlarına karşı değişken dönel hızla tahrik edilmelerine bağlı olarak değişmektedir.



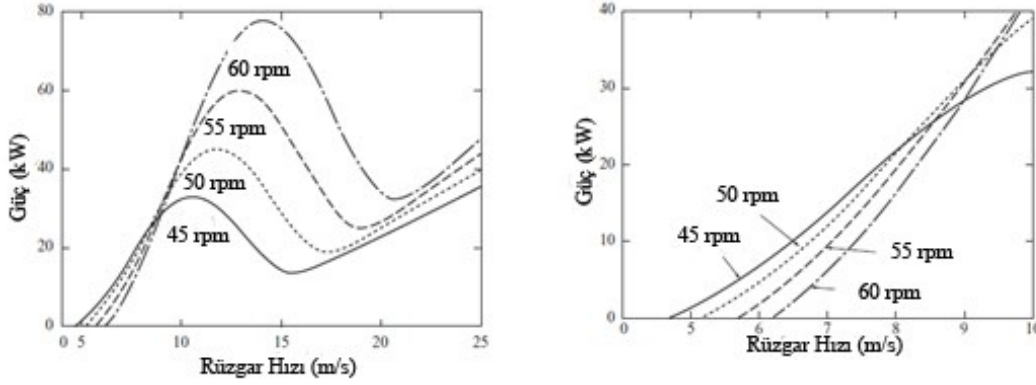
Şekil 3.7 : $C_p - \lambda$ ve $K_p - 1/\lambda$ eğrisi [15].

Şekil 3.7’de $K_p - 1/\lambda$ gösterilen eğrisinin önemli bir özelliği rüzgar hızı arttıkça bir noktada düşmeye başlaması ve sonrasında azar azar rüzgar hızıyla artmasıdır. Bu özellik rüzgar hızı arttıkça generatörün aşırı yüklenmeyeceğini göstermektedir. Bir diğer söylemle, rüzgarın küpüyle artan rüzgar enerjisi generatörün bu özelliği nedeniyle sürekli artan bir performans sergileyemeyecektir. Dolayısıyla gücün maksimumuma eriştiği rüzgar hızında rüzgar hızından bağımsız bir şekilde gücün maksimum noktada kalması sağlanmalıdır. Bu kontrol yöntemi rüzgardan elde edilecek gücün maksimum şekilde kullanılabilmesini sağlamaktadır [15].

3.2.1.2 Dönme hızı değişiminin etkisi

Sabit hızda tahrik edilen bir rüzgar türbininin güç çıkışı işletmedeki seçilen dönme hızına bağlıdır. Düşük bir dönme hızı kullanıldığında türbin maksimum güç noktasına daha düşük bir rüzgar hızında erişir ancak üretilecek güç de bu nedenle daha düşük olmaktadır.

Maksimum güce erişilen nominal rüzgar hızından büyük rüzgar hızlarında türbin kanat açıları ile kontrol edilir ki bu çok verimsiz bir işletme şeklidir [15]. Şekil 3.8 dönme hızı ile güç arasındaki ilişkiyi göstermektedir. 45-60 rpm'lik %33'lük bir hız artışı maksimum gücü %150 oranında arttırmaktadır. Düşük rüzgar hızlarında ise, dönme hızının artmasıyla güçte keskin bir düşüş yaşandığı görülmektedir. Bu durum iki hızlı türbinlerin geliştirilmesine neden olmaktadır. Türbini bir rüzgar hızında maksimum gücü elde edebileceği dönme hızında çalıştırmak yüksek mertebede bir devreye girme (cut-in) rüzgar hızı gereksinimi ortaya koymaktadır. İki hızlı çalışma karakteristiğinde düşük rüzgar hızlarında düşük dönme hızı devreye girme rüzgar hızını düşürmekte ve rüzgardan yakalanacak olan enerjiyi arttırmaktadır. Ancak doğacak ek maliyet bu çalışma şartını uygulanabilir olmaktan çıkarmaktadır[15].



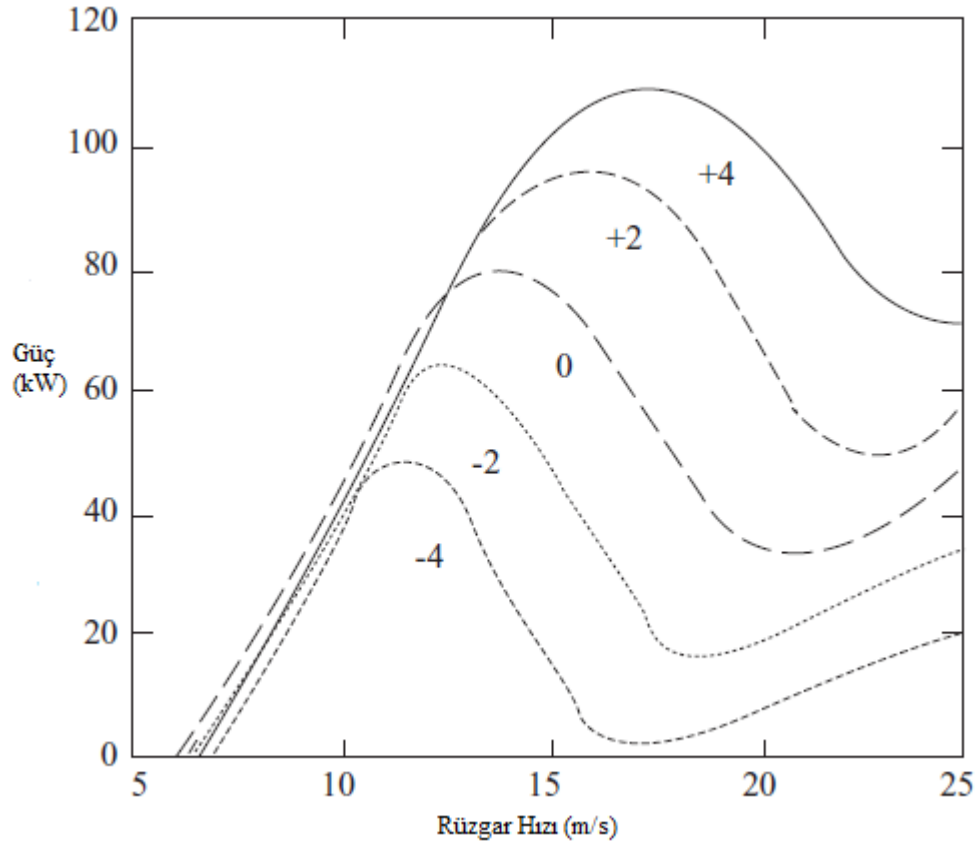
Şekil 3.8 : Rotor dönme hızının güce etkisi [15].

3.2.1.3 Kanat adım açısı değişiminin etkisi

Gücü etkileyen bir diğer parametre de kanat adım açısıdır: β_s . Kanat açıları kanadın göbeğine bağlantı noktasından kontrol edilmektedir. Kanat adım açısının değişiminin güç çıkışındaki etkisi Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Kanat açısındaki küçük değişimler yakalanan güçte oldukça anlamlı değişimler gösterebilmektedir. Kanat açısının pozitif değişimi etki alanını düşürmekte, keza açının negatif değişimi de etki alanını arttırmaktadır.

Rüzgar türbini işletmesinde böylece farklı rüzgar hızlarında optimum dönme hızı kanat açıları ayarlayarak elde edilebilir. Kanat adım açısının değişimi sadece güç kontrolünde kullanılmamaktadır. Büyük pozitif bir kanat adım açısı türbinin başlangıç momentini de yükseltmektedir. 90°'lik bir adım açısı genellikle türbini

kapatırken kullanılır. Zira rotor rölanti hızı minimize edilmiş olur. Adım açısı kontrolünün dezavantajı dayanıklılık ve maliyet olarak sıralanabilir [15].

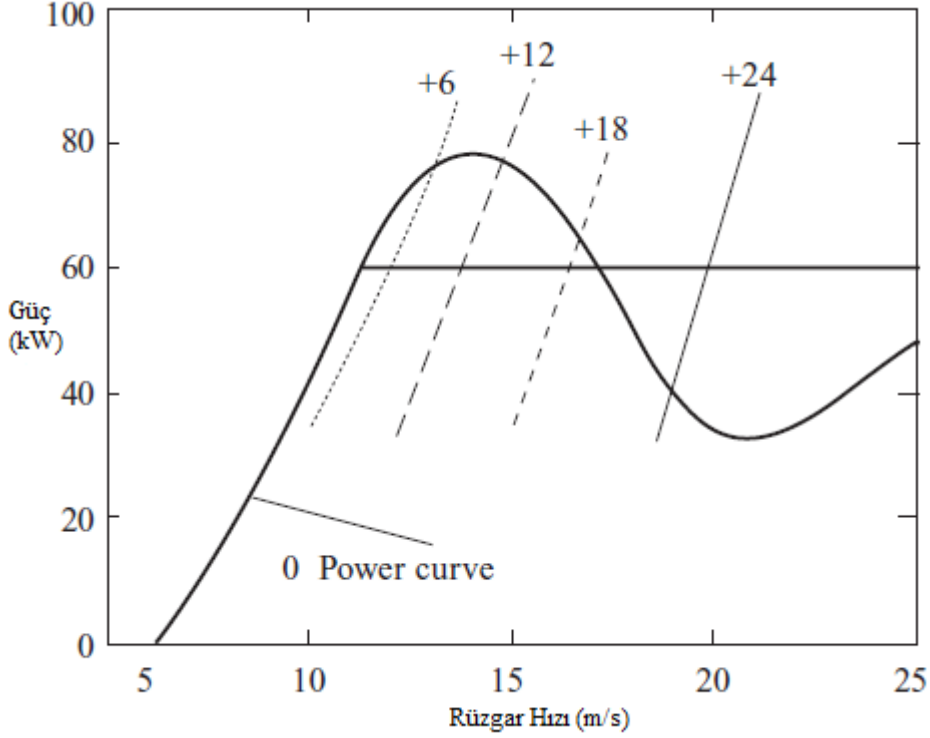


Şekil 3.9 : Kanat adım açısı değişiminin güce etkisi [15].

Şekil 3.9'da 60 kW'lık bir türbinin güç eğrisi görülmektedir. Nominal güce 12 m/s rüzgar hızında ulaşılmaktadır. Nominal rüzgar hızının altındaki rüzgar hızlarında adım açısı 0° olarak tutulmaktadır. Nominal hıza erişildiğinde 2° gibi küçük bir negatif adım açısı uygulanarak güç nominal seviyede tutulur. Rüzgar hızının nominal hızı geçmesiyle birlikte adım açısı pozitif ve negatif yönde değiştirilerek gücün nominal seviyede kalması sağlanır. Bu küçük değişimler oldukça etkili bir çözüm sunarken kanatların maruz kaldıkları sönüm ve yorulma problemleri sabit açılı kanat kullanılan türbinler ile aynı orandadır.

Nominal güce erişilmesiyle birlikte adım açısının arttırılmasıyla rüzgara maruz kalan yüzey düşürülebilir. Rüzgarın değdiği alanın azalması kaldırma kuvvetini ve momenti de azaltmaktadır. Kanatların etrafından akan rüzgar ise aynı kalacaktır. Şekil 3.10'da Şekil 3.9'da kullanılan rüzgar türbini kullanılmış, sadece nominal hızın altındaki bölgede adım açısı 0° alınmıştır. Nominal hızın üzerinde kanat açısı

değiştirilerek nominal güç maksimum seviyede tutulmuştur. Rüzgar hızındaki artış kanat açısında da benzer bir artışa neden olmaktadır. Fırtınalı durumlarda büyük adım açısı ayarı gerekmektedir [15].



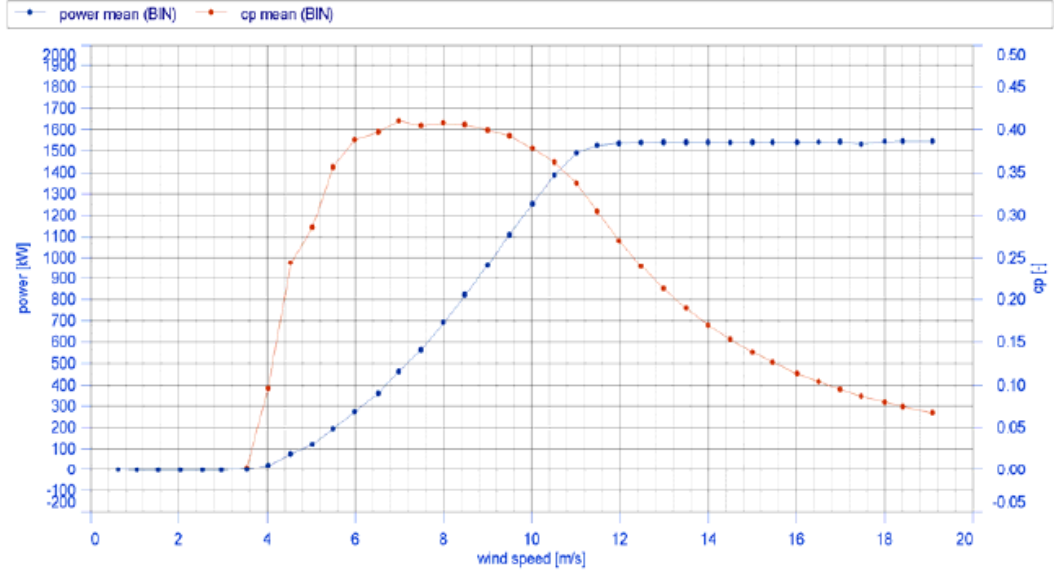
Şekil 3.10 : Güç eğrisi [15].

3.2.2 Rüzgar hızı güç eğrisi

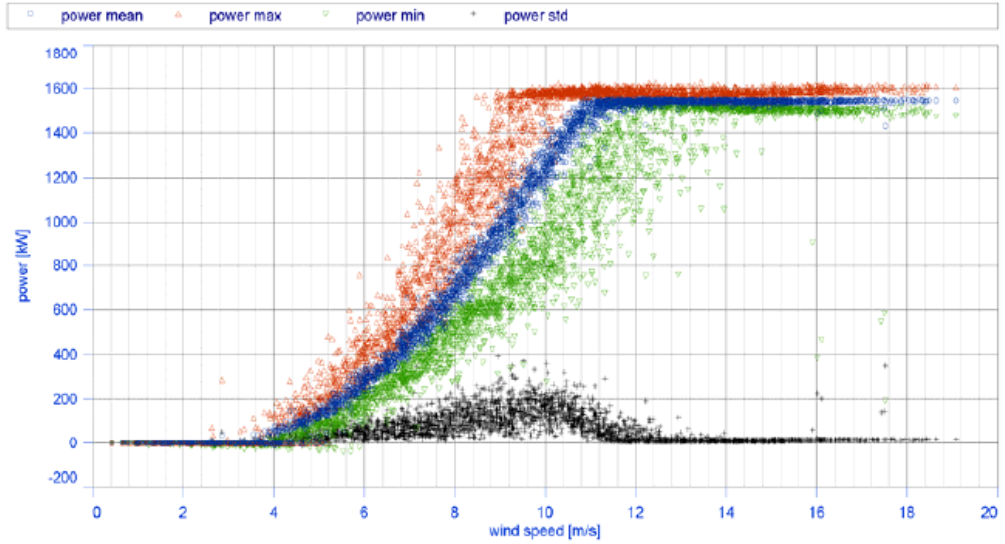
Rüzgardan elde edilen enerji daha önce de belirtildiği üzere rüzgar hızının küpüyle doğru orantılı olarak değişmektedir. Ancak yukarıda görüldüğü üzere rüzgar türbinlerinde kullanılan elektrik makinaları rüzgar hızının küpüyle artan bu gücü aynı şekilde elektrik enerjisine çevirememektedir. Belli bir rüzgar hızından sonra rüzgar hızındaki artış çıkış gücünü azaltmaya başlamaktadır. Dolayısıyla nominal rüzgar hızının üstünde mekanik ve elektrik kontrol algoritmalarıyla elde edilebilecek nominal güç sabit tutulmaya çalışılmaktadır [14].

Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de Sinovel firmasına ait SL1500-82 model 1.5 MW'lık bir rüzgar türbininin teorik ve gerçek zamanlı ölçülmüş güç eğrisi görülmektedir. Gerçek zamanlı ölçümler 05.11.2009 ile 22.04.2010 arasında gerçekleştirilmiştir. 82.9 m'lik rotor çapı ve 70 m'lik kule yüksekliğiyle ilgili rüzgar türbininin devreye girme ve devreden çıkma rüzgar hızları sırasıyla 3 m/s ve 20 m/s olarak tanımlanmıştır [23].

Üretilen güç hava yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Güç eğrisinde gösterilen nominal güce erişilme anındaki rüzgar hızı ve rotor dönme hızı sistemin en verimli olduğu şartı oluşturur. Zira nominal hız aşıldığında rüzgar türbini nominal gücü verecek şekilde sınırlandırılarak toplam verim düşmektedir [23].



Şekil 3.11 : SL1500-82 teorik güç eğrisi [23].



Şekil 3.12 : SL1500-82 pratik güç eğrisi [23].

İdeal rüzgar türbinlerinde devreye girme rüzgar hızı (\mathcal{G}_{cut-in}) ve devreden çıkma rüzgar hızı ($\mathcal{G}_{cut-off}$) arasında işletme koşulları sağlanır. (\mathcal{G}_{cut-in}) altındaki hızlarda rüzgardan elde edilecek enerji çok az olduğundan türbinler çalıştırılmazlar. ($\mathcal{G}_{cut-off}$)

üzeri rüzgar hızlarında ise yapısal aşırı yüklemelere karşı türbini korumak amacıyla türbin işletmesi durdurulur.

Güç eğrisi üç ana çalışma alanından oluşur. Düşük rüzgar hızlarında kullanılabilir güç nominal gücün altındadır. Bu bölgede elde edilen gücün maksimum olabilmesi için güç katsayısının maksimum olması gerekir ($C_{P_{max}}$) [19].

$$P_{av} = C_{P_{max}} P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_{P_{max}} v^3 \quad (3.6)$$

Nominal rüzgar hızının altında kalan rüzgar hızlarında amaç varolan enerjiden maksimum gücü elde edebilmektir. Rüzgar hızının nominal hızdan büyük olduğu anlarda ise aşırı yüklenmeyi önlemek amacıyla üretilen güç sınırlandırılır. Bu bölgede varolan enerji nominal güçten büyük olduğu için ($C_{P_{max}}$) değeri görece daha düşük tutulmalıdır. Bu iki çalışma bölgesi arasında kalan ve nominal hıza yakın bölgede ise gürültü seviyelerini yakalayabilmek için rotor dönme hızı yavaşlatılır ve merkezkaç kuvveti verilen sınırın altında tutulur [19].

3.3 Bölüm Özeti

Rüzgar türbinleri rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye sonrasında da elektrik enerjisine dönüştürmek üzere üretilmektedirler. Bunu sağlayabilmek adına üç ana elemandan oluşurlar: rotor, dönüşüm sistemleri ve generatör. Rotor kanatları rüzgara maruz kalarak rotor çapına bağlı bir daireyi süpürerek kinetik enerjiyi rotor şaftına mekanik enerji olarak iletirler. Ancak bu hız elektrik üretimini sağlayacak generatörleri sürmek için yeterli değildir. Bu nedenle bu düşük hız, dişli kutusundaki çarklar yardımıyla belirli oranda yükseltilerek generatör şaftına iletilir. Yükseltilmiş hız generatör rotorunu tahrik ederek elektrik enerjisi üretilir. Generatör karakteristiği gereği teorik olarak rüzgarın küpüyle doğru orantılı olarak artan rüzgarın kinetik enerjisinin tamamı belirli bir seviyeden sonra elektrik enerjisine dönüştürülemez.

Generatörün nominal hızına eriştikten sonra çıkış gücü düşmeye başlar. Dolayısıyla nominal güce eriştikten sonra büyük rüzgar hızlarında gücü sabit tutmak adına mekanik ve elektrik kontrol yapılır.

4. ELEKTRİK MAKİNALARI VE ASENKRON MAKİNALAR

4.1 Elektrik Makinaları

Bir elektrik makinası mekanik enerjiyi elektrik enerjisine ve elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürebilen çift yönlü elektromekanik bir cihazdır. Elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektrik makinası motor olarak adlandırılırken, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren elektrik makinası generatör olarak isimlendirilir. Aslında bu iki durum makinanın iki işletme durumudur. Elektrik makinaları hayatın bir çok alanında sıklıkla kullanılmaktadır. Temel olarak üç ana sektörde yaygın bir şekilde kullanılırlar. Evlerde kullanılan buzdolaplarında, dondurucularda, vakumlu süpürgelerde, mutfak robotlarında, klimalarda, fanlarda ve birçok ev eşyasında elektrik motorları kullanılır. Endüstride atölyelerde kullanılan hemen hemen bütün elektrikli iş aletleri elektrik motoru ile çalışmaktadır. Ve santrallerde enerji üretiminde kullanılan generatörler elektrik makinalarının son kullanım alanı olarak sıralanmaktadır.

Elektrik makinaları temiz ve verimli bir enerji kaynağı olmalarından ötürü sıklıkla kullanılırlar. İçten yanmalı motorlar gibi kimyasal yakıt gereksinimleri yoktur, dolayısıyla çevreye etkileri oldukça azdır [24].

4.1.1 Dönme hareketi, Newton yasası ve güç ilişkileri

Hemen hemen bütün elektrik makinaları bir eksen etrafında makina şaftına bağlı bir şekilde dönmektedir. Dolayısıyla bu bölümde kısaca dönme hareketi, hız, ivme, Newton yasası ve dönme hareketinin endüklediği güçten bahsedilecektir.

Açısal Konum, θ , sabit bir referans noktasına göre bir cismin referans bir yönden yaptığı açıdır. Açısal konum genellikle radyan veya derece olarak ölçülür.

Açısal Hız, ω , açısal konumun zamana göre değişim oranıdır:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (4.1)$$

Açısal konumun birimi radyan ise açısal hızın birimi de rad/saniye olur. Elektrik makinalarında rotor hızı çoğunlukla rad/s olarak verilir. Mekanik hız aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$n_m = 60f_m \quad (4.2)$$

$$f_m = \frac{\omega_m}{2\pi} \quad (4.3)$$

Burada ω_m açısal hız (rad/s), f_m saniyedeki devir sayısı ve n_m dakikadaki devir sayısını ifade etmektedir.

Açısal ivme α , açısal hızın zamana göre değişimini ifade etmektedir.

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (4.4)$$

Moment τ , bir cismin hızını değiştiren kuvvettir. Benzer bir şekilde, dönen bir cisme etkiyen kuvvet açısal hızı değiştirir. Dolayısıyla moment dönen bir cisme açısal ivme kazandıran dönme kuvveti olarak tanımlanır.

$$\begin{aligned} \tau &= (\text{uygulanan kuvvet})(\text{dik mesafe}) \\ \tau &= (\vec{F})(r \sin \theta) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Burada r dönme hareketinin yarıçapı \vec{F} ise uygulanan kuvveti temsil etmektedir. Momentin birimi SI birim sisteminde newton-metre (N-m) ifade edilir [24].

4.1.1.1 Newton yasası

Newton yasası hareket eden bir cisme uygulanan kuvvetin açısal ivme ile ilişkisini tanımlar. Bu ilişki aşağıdaki gibidir:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (4.6)$$

m cismin kütlesi ve \vec{a} ivmeyi ifade eder. SI birim sisteminde kuvvetin birimi Newton'dur. Benzer şekilde dönmekte olan bir cisme etkiyen moment ile açısal hız arasındaki ilişki Newton'un dönme kanunu olarak ifade edilir:

$$\tau = J\alpha \quad (4.7)$$

J burada eylemsizlik momentini ifade eder [24].

İş W

Doğrusal harekette cismin bir kuvvetin etkisiyle yer değiştirmesi olarak ifade edilir. Benzer şekilde dönme hareketinde bir açı boyunca etkiyen momentin cismin açısını değiştirmesi olarak tanımlanır [24]:

$$W = \int \tau d\theta \quad (4.8)$$

Güç P

Güç iş yapabilme yetisidir. İşin zamana göre türev değişimi gücü tanımlar. SI birim sisteminde birimi watt'tır.

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}(\tau\theta) = \tau \left(\frac{d\theta}{dt} \right) = \tau\omega \quad (4.9)$$

Yukarıdaki Eşitlik (4.9) elektrik makinaları çalışma prensiplerinde oldukça büyük bir öneme sahiptir. Çünkü bu eşitlik motor veya generatörün milindeki mekanik gücü tanımlamaktadır [24].

4.2 Magnetik Alan

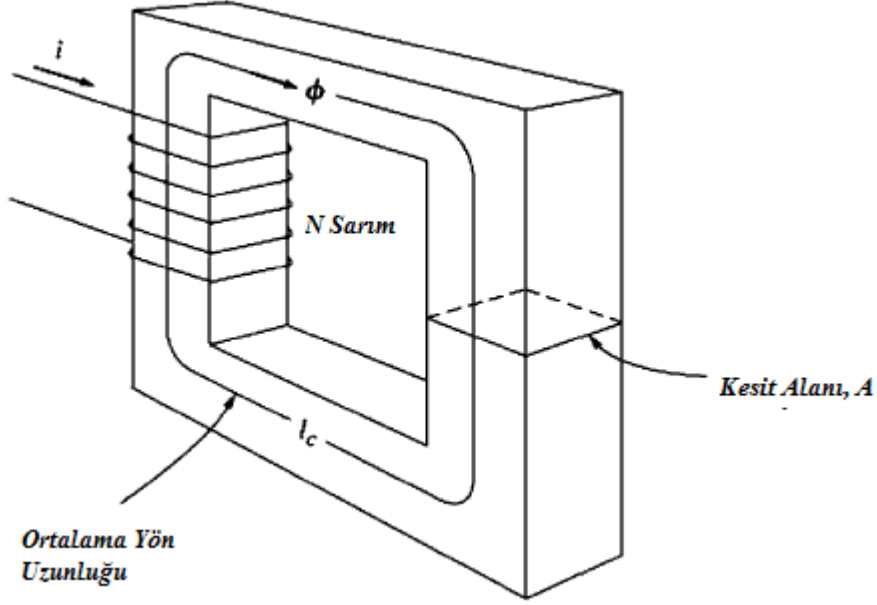
Magnetik alan enerji dönüşümlerinin temelini oluşturmaktadır. Temelde magnetik alan dört prensibe dayanır:

1. Akım taşıyıcı iletken etrafını çevreleyen bir magnetik alan oluşturur.
2. Zamanla değişen magnetik alan bobin içerisinde gerilim endükler. (transformatör çalışmanın temel prensibi)
3. Magnetik alan içerisinde, üzerinden akım geçen bir iletkene bir kuvvet etkir. (motor çalışmanın temel prensibi)
4. Magnetik alan içerisinde hareket eden bir iletkenin uçlarında gerilim endüklenir. (generatör çalışmanın temel prensibi)

Magnetik alan temelleri Amper yasasıyla tanımlanır.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{net} \quad (4.10)$$

Burada \vec{H} , I_{net} akımı tarafından üretilen magnetik alan yoğunluğunu ifade ederken $d\vec{l}$ diferansiyel uzunluğu ifade etmektedir.



Şekil 4.1 : Metal devre ve iletken sargı [24].

Şekil 4.1’de dikdörtgen biçiminde metal devre ve N sarımlı iletken sargı görülmektedir. Amper yasasına göre endüklenen magnetik alan N sarımlı iletkenden geçen akımla doğru orantılıdır. Demir ve diğer ferromagnetik metallerin özelliklerinden dolayı magnetik alan metal devre içinde hapsolür.

$$\vec{H}l_c = Ni \quad (4.11)$$

$$\vec{H} = \frac{Ni}{l_c} \quad (4.12)$$

Çekirdek içerisinde üretilen magnetik akı metal devre malzemesine bağılıdır. Magnetik alan yoğunluğu \vec{H} ile magnetik akı yoğunluğu \vec{B} arasında aşağıdaki gibi bir ilişki vardır:

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (4.13)$$

Burada μ materyalin magnetik geçirgenliğini (Henry(H)/m), B magnetik akı yoğunluğunu ($\text{wb/m}^2\text{-T}$) ifade etmektedir. Bir malzemenin magnetik geçirgenliğinin boşluk magnetik geçirgenliğine oranı ise bağıl geçirgenlikle tanımlanmaktadır:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (4.14)$$

Bağıl geçirgenlik malzemeye bağlıdır. Çeliğin geçirgenliği havaya göre çok daha fazla olduğundan akının büyük bir kısmı metal devre içerisinde kalır, çok az kaçak akı dışarı aktarılır. Kesit alan üzerinden geçen toplam akı ise:

$$\phi = \int_A \vec{B} \cdot \vec{dA} \quad (4.15)$$

Burada dA yüzey alanının diferansiyel bir parçasıdır. Şayet akı yoğunluğu kesite dik ve kesit üzerinde eşit dağılmışsa toplam akı [24]:

$$\phi = BA = \frac{\mu NiA}{l_c} \quad (4.16)$$

4.2.1 Faraday yasası-zamanla değişen magnetik alanda endüklenen gerilim

Magnetik alanın bilinen en önemli etkisi Faraday yasası tarafından açıklanır. Faraday yasası, bir bobinden geçen akının zamana göre değişimiyle orantılı bir gerilim endüklediğini anlatır:

$$e_{ind} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (4.17)$$

Burada e_{ind} bir iletken üzerinde endüklenen gerilimi ifade ederken ϕ ise bobin üzerinden geçen akıyı ifade eder. N sarımlı bir bobinde ise endüklenen gerilim sarım sayısı ile orantılıdır:

$$e_{ind} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (4.18)$$

Bu eşitlikteki eksi işaret Lenz yasasından gelmektedir. Bobin uçları kısa devre edildiğinde bobinde endüklenen gerilim akı ile ters yönde bir akım akmasına neden

olur. Bu nedenle eşitlikte eksi işareti yer alır. Uygulamada Eşitlik (4.18)'da bir problem mevcuttur. Zira eşitlik her bir sarımda eşit akı olduğu varsayımına göre yazılmıştır. Ancak uygulamada bu böyle değildir. Zira ancak çok sıkı sarımlarda bu mümkün olabilmektedir. Dolayısıyla her bir tur akının toplamı alınır:

$$e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (4.19)$$

$$\lambda = N\phi \quad (4.20)$$

4.2.2 İletken tel üzerine etkiyen kuvvet

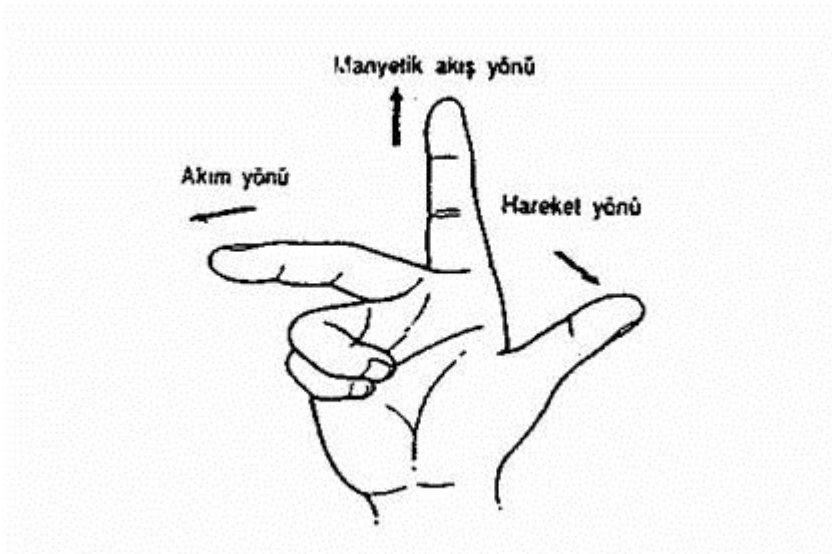
Magnetik alanın diğer önemli etkisi ise magnetik alan içinde üzerinden akım akan bir iletkene kuvvet etkimesidir. Magnetik alanın yönüne göre:

$$\vec{F} = i(l \times \vec{B}) \quad (4.21)$$

Burada i akım, l iletken uzunluğu ve \vec{B} magnetik akı yoğunluk vektörüdür. Akı yoğunluğu ile iletken tel arasında θ açısı olmak üzere aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$F = i l B \sin \theta \quad (4.22)$$

Akım, akı yoğunluğu ve etkiyen kuvvet arasındaki ilişki Şekil 4.2'de gösterildiği üzere sağ el kuralıyla tanımlanır [25]:



Şekil 4.2 : Sağ el kuralı [25].

4.2.3 Magnetik alan içinde hareket eden cisimde endüklenen gerilim

Magnetik alanın üçüncü büyük etkisi magnetik alan içinde hareket eden bir iletkenin uçlarında gerilim endüklenmesidir:

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad (4.23)$$

Burada v dönen iletkenin hızını göstermektedir. Magnetik alan içinde dönen cisimin uçlarında gerilim endüklenmesi generatörlerin temel çalışma prensibini oluşturur.

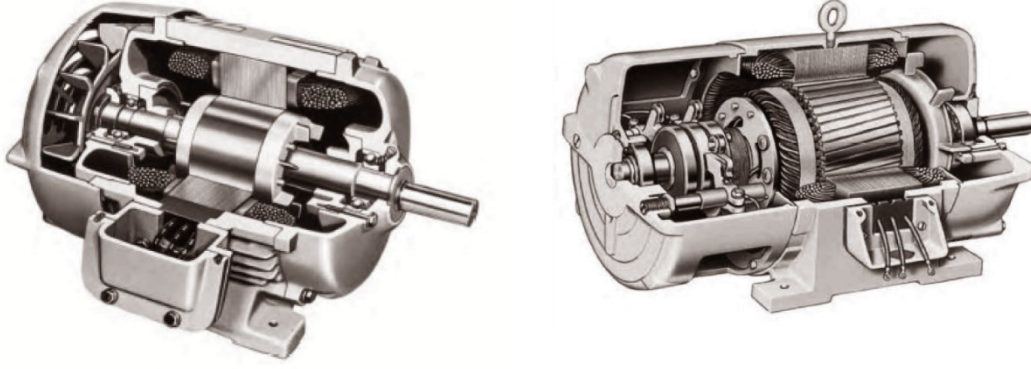
4.3 Asenkron Makinalar

Asenkron makinalar senkron makinalardan farklı olarak dışarıdan harici bir alan akımına ihtiyaç duymazlar. Zira amortisör sargıları senkron makinalarda olduğu gibi harici bir DC kaynak olmaksızın makinayı sürebilir. Asenkron makinaların rotor sargılarında rotor akımı ve rotor magnetik alanı oluşturan rotor gerilimi endüklenir. Dolayısıyla asenkron makinalar DC alan akımına ihtiyaç duymazlar. Asenkron makinalar da diğer elektrik makinaları gibi generatör ve motor olarak çalışabilirler [24].

Temel olarak bir asenkron makina döner alan prensibine göre çalışır. Çok fazlı bir stator sargısından aynı fazda sinüzoidal bir akım geçerse stator ile rotor arasında sabit genlikli döner alan oluşur. Bu döner alan hızı rotor sargıları duruyorken kendi hızıyla n_{senk} , rotor n_m hızı ile aynı yönde dönüyorken ise $n_{senk} - n_m$ hızı ile rotor sargılarını keser. Faraday yasasına göre rotor iletkenlerinde gerilim endüklenir. Ohm yasasına göre ise rotorda endüklenen gerilim rotor sargılarından akım akmasına yol açar [26].

Asenkron makinalar senkron makinalarla aynı fiziksel yapıya sahiptirler. En büyük farkları rotor yapısıdır. Asenkron makinalarda iki farklı rotor çeşidi vardır: kafesli ve bilezikli asenkron makinalar [24].

Şekil 4.3 kafesli ve bilezikli asenkron makinaların temel kesitlerini göstermektedir. Soldaki şekil kafesli rotora sahip asenkron makinayı temsil etmektedir. Sağdaki şekil ise bilezikli asenkron makiniyi göstermektedir.



Şekil 4.3 : Asenkron makina a) kafesli b) bilezikli [24].

4.3.1 Asenkron makina teorisi

3 fazlı bir gerilim statora uygulandığında 3 fazlı stator akımı akar. 3 fazlı bu akım döner bir B_s magnetik alanı üretir. Magnetik alan dönme hızı aşağıdaki formülle belirlenir:

$$n_{senk} = \frac{120 f_e}{P} \quad (4.24)$$

Burada f_e şebeke frekansı, P kutup sayısını ifade etmektedir. Döner magnetik alan B_s rotor sargılarını keser ve rotor sargılarında bir gerilim endükler.

$$e_{ind} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} \quad (4.25)$$

Bu denklemde, \vec{v} magnetik alanın rotor sargılarını kesme hızını, \vec{B} magnetik akı yoğunluk vektörünü ve \vec{l} magnetik alan içindeki iletkenin uzunluğunu göstermektedir. Stator magnetik alanının rotor sargılarında gerilim endüklemesi rotor üzerinde bağıl harekete yol açmaktadır. Rotor sargılarından akan akım rotor magnetik alanını \vec{B}_R oluşturur. Dolayısıyla makinada endüklenen moment ifadesi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\tau_{ind} = k \vec{B}_R \times \vec{B}_s \quad (4.26)$$

Endüklenen moment rotor dönme yönü ile aynı yönde olduğundan rotor aynı yönde hızlanmaya başlar. Ancak bu hızlanmanın bir üst limiti vardır. Rotor dönme hızının senkron hıza erişmesi durumunda rotor magnetik alan hızına erişir ve gerilim

endüklenmez. e_{ind} sıfırlanması durumunda rotordan akım akmaz dolayısıyla rotor magnetik alanı sıfırlanır. Bundan ötürü endüklenen moment sıfıra eşitlenir ve rotor sürtünme kayıplarının etkisiyle yavaşlamaya başlar. Bu nedenle bir asenkron makina senkron hıza yakın hızlarda çalışabilir ancak tam olarak senkron hızda çalıştırılmaz.

4.3.2 Kayma Konsepti

Rotor sargılarında endüklenen gerilim rotorun bağıl ve magnetik alan hızına bağlıdır. Asenkron makina çalışma karakteristiği rotorun gerilim ve akımına bağlıdır. Rotorun bağıl hızını ve magnetik alanı tanımlamak için iki tanımlama çoğunlukla kullanılır. Bunlardan birincisi senkron hız ile rotor hızı arasındaki hız farkını tanımlayan kayma hızı'dır:

$$n_{kayma} = n_{senk} - n_m \quad (4.27)$$

Burada n_{kayma} makinanın kayma hızı, n_{senk} magnetik alan hızı ve n_m rotorun mekanik şaft hızını göstermektedir. Bağıl hızı tanımlayan diğer terim de kaymadır.

$$s = \frac{n_{senk} - n_m}{n_{senk}} \quad (4.28)$$

Kayma eşitliği aynı zamanda açısal hız ω ile de yazılabilir:

$$s = \frac{\omega_{senk} - \omega_m}{\omega_{senk}} \quad (4.29)$$

Rotor senkron hızda döndüğünde $s = 0$, rotor dönmüyorken ise $s = 1$ konumundadır [24].

4.3.3 Frekans

Asenkron makinalar rotorda gerilim ve akım endükleme prensibine göre çalışır. Dolayısıyla dönel transformatör olarak da adlandırılır. Zira transformatör gibi primer (stator) sargılar sekonder (rotor) sargılarda gerilim endüklemektedirler. Ancak transformatörlerden farklı olarak sekonder sargıların frekansı primer sargı frekansına eşit olmak zorunda değildir.

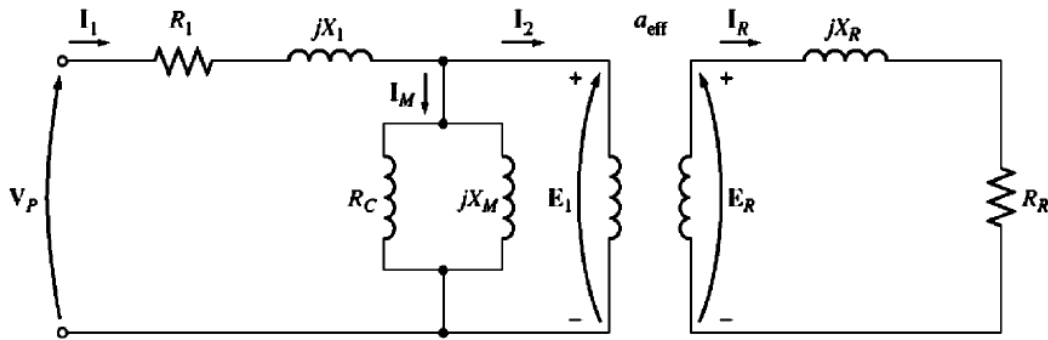
Şayet rotor hareket etmiyorsa, rotor frekansı stator frekansına eşittir. Diğer yandan, rotor senkron hızda dönerken rotor frekansı sıfır olacaktır. Dolayısıyla rotor frekansı kaymanın bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$f_r = sf_e \quad (4.30)$$

f_e stator elektrik frekansı olmak üzere rotor frekansı direkt olarak kaymaya bağlı olarak ifade edilir [24].

4.3.4 Asenkron makinanın eşdeğer devresi

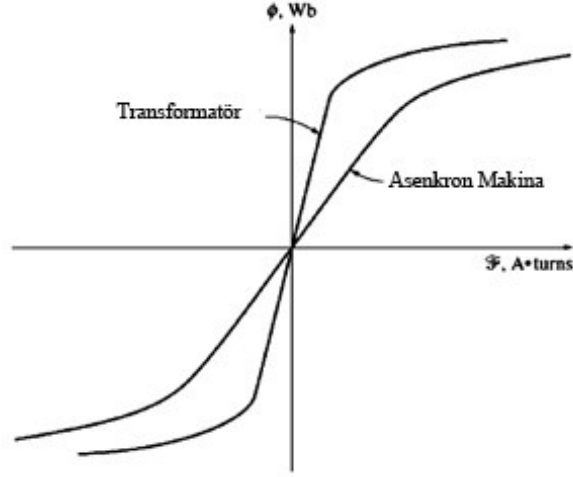
Asenkron makinaların eşdeğer devresi çalışma prensibi transformatörlere benzediğinden transformatör eşdeğer devresine benzerler. Bir asenkron makina da ayrı bir alan devresi yoktur. Bu nedenle senkron makinalarda olduğu gibi eşdeğer devrede dahili bir gerilim kaynağı E_A yoktur.



Şekil 4.4 : AC asenkron makinanın eşdeğer devresi [24].

Şekil 4.4'de bir asenkron makinanın eşdeğer devresi gösterilmiştir. Stator direnci R_1 , stator kaçak reaktansı X_1 ile gösterilmektedir. Asenkron makinadaki akı uygulanan E_1 geriliminin bir fonksiyonudur. Asenkron makina ve transformatörün magnetomotor-akı grafiği Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Eğriler incelendiğinde asenkron makina eğrisinin grafiğinin transformatör eğrisine göre daha yatık olduğu görülmektedir. Bunun ana nedeni asenkron makinada rotor ile stator arasındaki hava boşluğudur. Zira bu hava boşluğu magnetik direnci arttırmakta dolayısıyla primer ve sekonder sargılar arasındaki kuplajı azaltmaktadır. Bu nedenle eşdeğer devredeki mıknatıslanma reaktansı X_M çok daha küçük değerler alacaktır. Primer gerilimi E_1 sekonder gerilimi E_R 'ye ideal bir transformatörün a_{eff} dönüştürme oranıyla bağlanır.

a_{eff} bilezikli elektrik makinalarında stator-rotor sargıları oranına eşitken, kafesli asenkron makinalarda ise rotor üzerinde sargı olmadığından dolayı tespit edilmesi zordur.



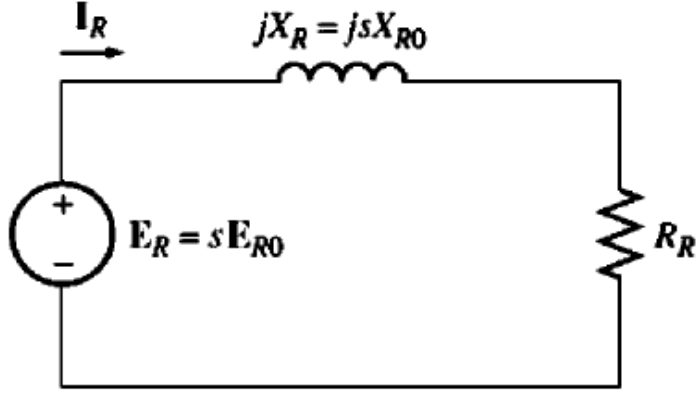
Şekil 4.5 : Asenkron makina ve transformatörün mıknatıslanma eğrileri [24].

4.3.4.1 Rotor devresi eşdeğer modeli

Stator sargılarına gerilim uygulandığında, rotor sargılarında bir gerilim endüklenir. Genel bir ifade ile, rotor ile stator magnetik alanı arasındaki bağıl hareket büyüdükçe rotorda endüklenen gerilim ve rotor frekansı da buna bağlı olarak büyür. En büyük bağıl hareket farkı rotor sabit duruyorken meydana gelir. Bu çalışma durumuna kilitli rotor denir. En küçük endüklenen gerilim ($0 V$) ve frekans ($0 Hz$) ise rotorun senkron hızda sürüldüğü şartlarda oluşur. Bu çalışma şartında bağıl hareket sıfırdır. Rotorda endüklenen gerilimin genliği ve frekansı direkt olarak kaymayla orantılı olarak değişmektedir. Dolayısıyla kilitli rotor çalışma şartında rotorda endüklenen gerilim E_{R0} olarak gösterilirse herhangi bir rotor çalışma hızında kaymaya bağlı endüklenecek gerilim aşağıdaki gibidir:

$$E_R = sE_{R0} \quad (4.31)$$

Endüklenen bu gerilim rotor devresinde direnç ve reaktans üzerinde endüklenmektedir. Şekil 4.6'da rotor eşdeğer devresi gösterilmektedir.



Şekil 4.6 : Rotor eşdeğer devresi [24].

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R \quad (4.32)$$

$$X_R = s(2\pi f_e L_R) = sX_{R0} \quad (4.33)$$

Yukarıdaki eşitlikte X_{R0} kilitli rotor çalışmadaki rotor reaktansını ifade etmektedir. Şekil 4.4'de gösterilen rotor eşdeğer devresi incelendiğinde rotor akımı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\vec{I}_R = \frac{\vec{E}_{R0}}{R_R/s + jX_{R0}} \quad (4.34)$$

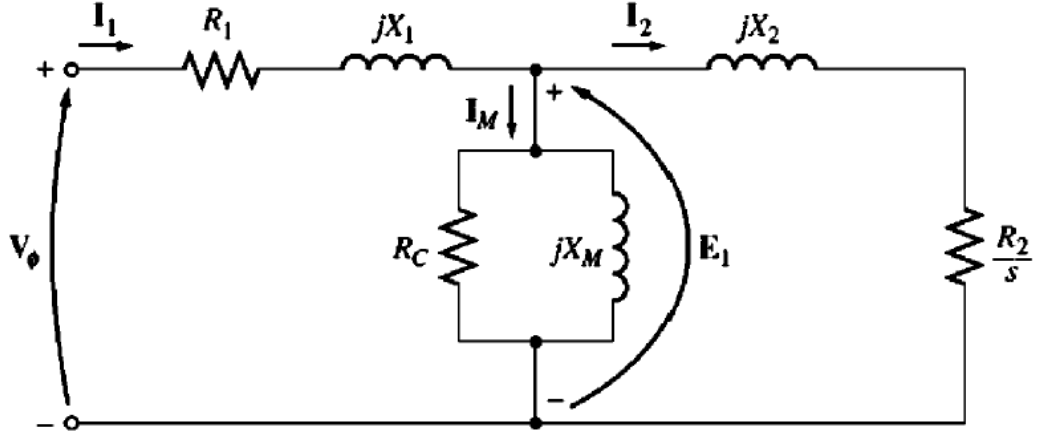
Görüldüğü üzere rotor akımı direkt olarak kaymaya bağlı olarak değişmektedir.

$$Z_{eş} = R_R/s + jX_{R0} \quad (4.35)$$

Rotor eşdeğer devresinde eşdeğer empedans yukarıdaki eşitlikle ifade edilmektedir.

4.3.4.2 Nihai eşdeğer devre

Asenkron makinanın nihai eşdeğer devresini oluşturabilmek için rotor devresini stator devresine indirgemek gerekmektedir. Şekil 4.7'de nihai eşdeğer devre gösterilmiştir. Tipik bir transformatörün primer ve sekonder sargılarındaki gerilim, akım ve empedans değişimleri aşağıdaki eşitliklerde gösterilmiştir:



Şekil 4.7 : Nihai asenkron makina eşdeğer devresi [24].

$$V_P = V'_S = aV_S \quad (4.36)$$

$$I_P = I'_S = \frac{I_S}{a} \quad (4.37)$$

$$Z'_S = a^2 Z_S \quad (4.38)$$

Yukarıdaki eşitliklerde P alt indisi primer sargıları S alt indisi ise sekonder sargıları ifade etmektedir. Tam olarak aynı dönüşüm asenkron makina rotor devresinde de yazılabilir.

$$E_1 = E'_R = a_{eff} E_{R0} \quad (4.39)$$

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{eff}} \quad (4.40)$$

$$R_2 = a_{eff}^2 R_R \quad (4.41)$$

$$X_2 = a_{eff}^2 X_{R0} \quad (4.42)$$

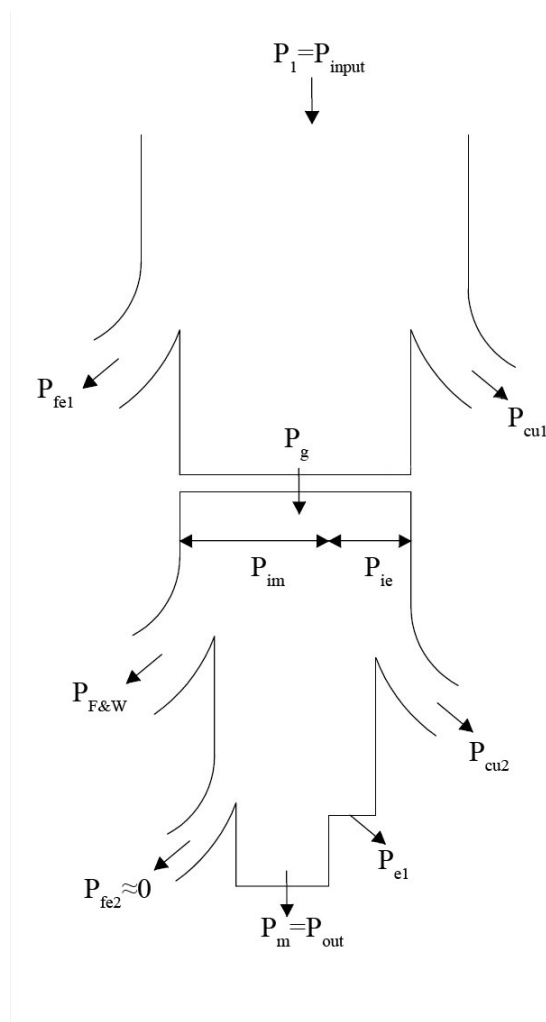
Özellikle kafesli asenkron makinalarda rotor direnci R_R ve kilitli rotor reaktansının X_{R0} belirlenmesi oldukça zor hatta imkansızdır. Dolayısıyla a_{eff} dönüşüm oranının hesabı da oldukça zordur. Dolayısıyla her bir eşdeğer devre değeri ölçülerek belirlenir.

4.3.5 Asenkron makinada güç ve moment eşitlikleri

Asenkron makinalar tek yönlü uyarılan elektrik makinaları oldukları için güç ve moment eşitlikleri senkron makinalardan farklıdır. Bu bölümde asenkron makinaların güç ve moment eşitlikleri incelenecektir.

4.3.5.1 Kayıplar ve güç akış diyagramı

Bir asenkron makina temel olarak dönel bir transformatör olarak ifade edilebilir. Asenkron makina girişine üç fazlı akım ve gerilim uygulandığında sekonder sargılar (rotor sargıları) kısa devre edildiği için sekonder sargılardan elektrik çıkışı yerine mekanik güç elde edilir. Motor şeklinde çalışan bir asenkron makinanın güç akış diyagramı Şekil 4.8'da gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : Asenkron makinanın güç akış diyagramı [24].

Giriş gücü P_1 olarak üç fazlı akım ve gerilimi göstermektedir. Makinadaki ilk kayıp stator bakır kayıplarıdır $P_{cu1} = I^2 R$. Sonrasında histerezis ve Foucault akımı (girdap

akımları) kayıpları P_{fe1} kaçak akımlardan kaynaklı kayıpları oluşturur. Geri kalan net güç rotor ile stator arasındaki hava boşluğu aracılığıyla rotora iletilir P_G . Rotor bakır kayıpları $P_{cu2} = I^2 R$ oluştuktan sonra shaftta iletilen net mekanik güç P_{conv} olarak ifade edilir. Mekanik çalışmada meydana gelen sürtünme $P_{F\&W}$ kayıpları ve kaçak kayıplar P_{fe2} düşüldüğünde net mekanik çıkış gücü P_{out} olarak gösterilmektedir.

Şekil 4.7'deki nihai eşdeğer devre incelendiğinde güç ve moment eşitlikleri yazılabilir. Stator giriş akımı ve eşdeğer empedans aşağıdaki gibi yazılmaktadır:

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{eş}} \quad (4.43)$$

$$Z_{eş} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{R_C - jX_M + \frac{1}{R_2/s + jX_2}} \quad (4.44)$$

Bu nedenle stator bakır kayıpları, demir kayıpları ve rotor bakır kayıpları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \quad (4.45)$$

$$P_{core} = 3E_1^2 R_C \quad (4.46)$$

Hava boşluğuna iletilen güç ve rotor kayıpları ise;

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (4.47)$$

$$P_{RCL} = 3I_2^2 R_2 \quad (4.48)$$

Rotor shaftından net iletilen mekanik gücü gösteren eşitlik aşağıda gösterilmiştir:

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \quad (4.49)$$

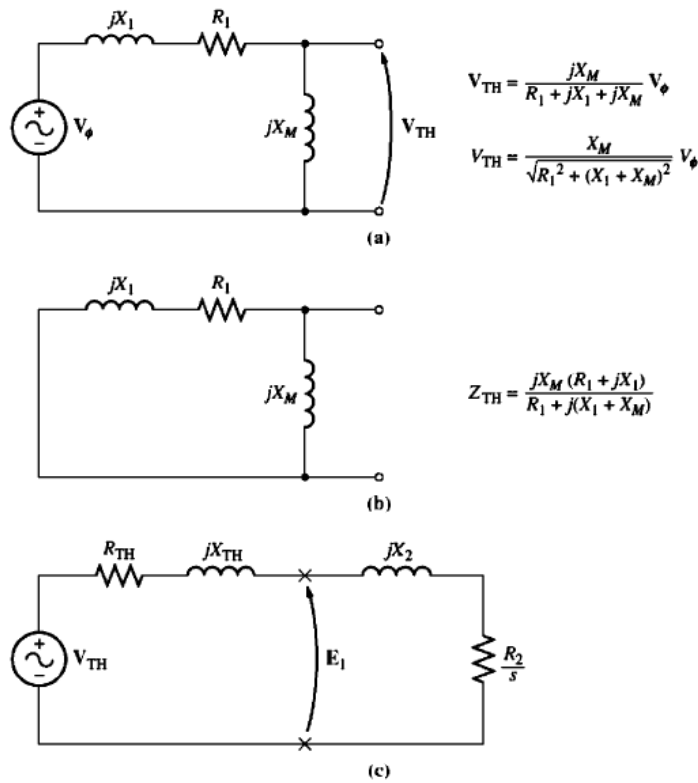
$$P_{conv} = (1 - s)P_{AG} \quad (4.50)$$

Dolayısıyla kaymanın artması asenkron makinaların verimini direkt olarak düşürmekte, şafta aktarılan mekanik gücü azaltmaktadır. Benzer şekilde makinada endüklenen moment elektrik-mekanik güç dönüşümü esnasında üretilir.

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (4.51)$$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{senk}} \quad (4.52)$$

Eşitlik (4.52) endüklenen momentin direkt olarak hava boşluğunda endüklenen güce ve senkron hıza bağlı olduğunu göstermektedir. Zira senkron açısal hız ω_{senk} sabit olduğundan hava boşluğundaki güç endüklenen momenti vermektedir. Hava boşluğundaki güç stator devresinden rotor devresine iletilir ve R_2/s direncinde absorbe edilen güce eşittir.



Şekil 4.9 : Thévenin eşdeğer devresi [24].

Hava boşluğundaki gücü eşdeğer devreden hesaplayabilmek için eşdeğer devre daha basit bir forma getirilir. Bunu yapmanın birçok yolu olmakla beraber Thévenin eşdeğer devresi en kolay ve işlevsel yöntemdir. Thévenin eşdeğer devre teoremine

göre öncelikle mıknatıslanma reaktansı X_M 'in uçları açık devre konumuna getirilir ve oluşan devrenin gerilimi hesaplanır. Thévenin empedansını hesaplamak için ise, faz gerilimi kısa devre yapılır ve $Z_{eş}$ hesaplanır. Şekil 4.9'de asenkron makina eşdeğer devresi hesabı yer almaktadır.

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \quad (4.53)$$

Thévenin eşdeğer devresinin eşdeğer empedansı ise;

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (4.54)$$

Yine eşdeğer devreden I_2 akımı hesaplanırsa;

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (4.55)$$

Dolayısıyla hava boşluğunda endüklenen gerilimin ifadesi;

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (4.56)$$

$$P_{AG} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (4.57)$$

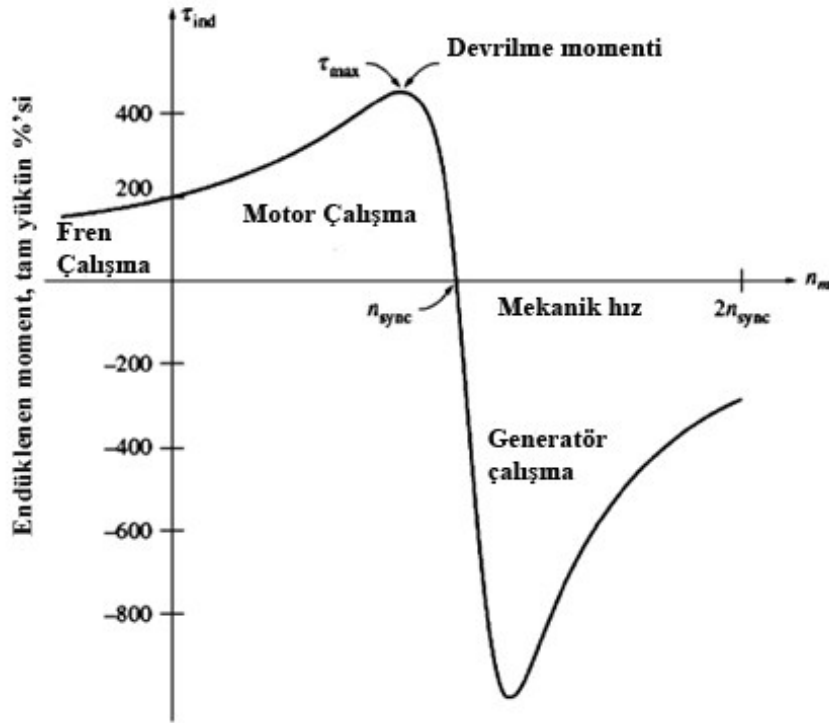
Rotorda endüklenen moment hava boşluğundaki güç ile ifade edildiğinden endüklenen moment ifadesi aşağıdaki eşitlikle birlikte yazılır:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{senk}} \quad (4.58)$$

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{\omega_{senk} [(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad (4.59)$$

Asenkron makina moment-rotor hızı değişim grafiği yukarıdaki denklem uyarınca Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Şekil 4.10 incelendiğinde senkron hızda endüklenen

momentin sıfır olduğu görülmektedir. Yüksüz ve tam yükte çalışmada moment-hız eğrisi lineere yakın bir davranış gösterir. Maksimum bir moment değeri mevcuttur ve bu değer aşılamaz. Bu noktaya devrilme momenti denir. Devrilme momenti nominal momentin 2 veya 3 katına eşittir. Başlangıç momenti nominal momentten biraz daha fazladır. Asenkron makina senkron hızın üstünde sürülürse generatör çalışma bölgesine geçer. Rotorun magnetik alanın tersi yönde dönmesi ile asenkron makina frenleme moduna geçer ve rotoru durdurarak magnetik alan yönünde döndürme eğilimine girer.



Şekil 4.10 : Asenkron makina moment-rotor hızı değişim grafiği [24].

Devrilme momenti

Endükllenme momenti P_{AG}/ω_{senk} formülüne bağlı olduğu için, maksimum devrilme momenti ancak hava boşluğunun gücünün maksimum olduğu noktada mümkündür. Hava boşluğundaki güç $R_2/2$ direnci tarafından tüketilen güce eşit olduğundan, devrilme momenti bu dirençte tüketilen gücün maksimum olduğu an oluşacaktır. $R_2/2$ maksimum olduğu kayma değeri aşağıdaki eşitlikte gösterilmiştir.

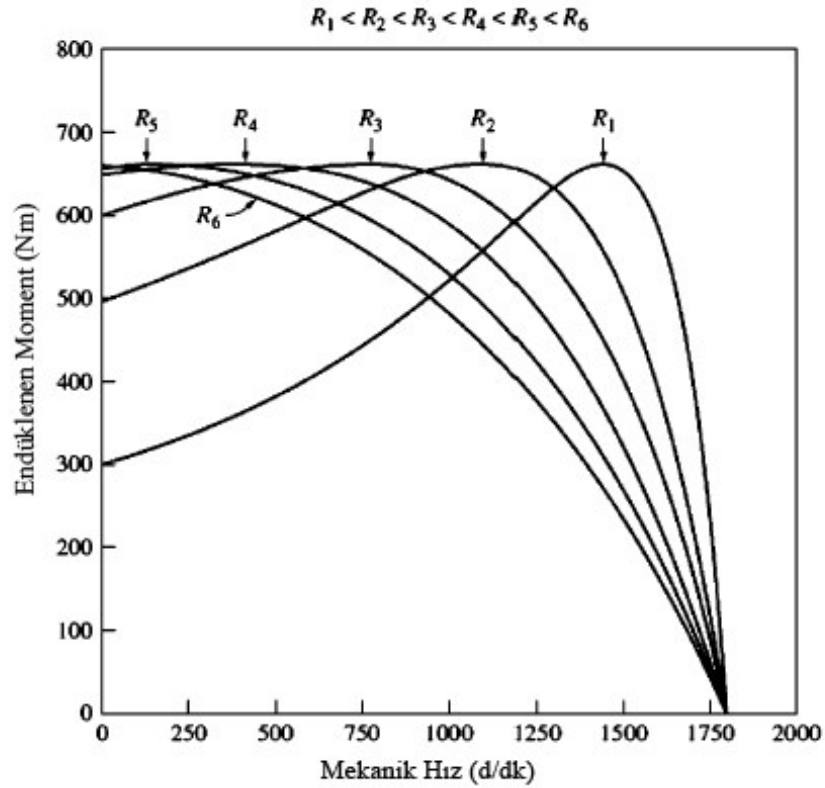
$$s_{\max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (4.60)$$

Dolayısıyla maksimum moment ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$s_{\max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (4.61)$$

$$\tau_{\max} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{\text{senk}} \left[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right]} \quad (4.62)$$

Görüldüğü üzere moment uygulanan gerilimin karesiyle orantılıdır. Keza, stator empedansı ve rotor direnci ile de ters orantılıdır. Devrilme momentinin oluştuğu kayma noktası da rotor devresi direncine bağlıdır. Şekil 4.11'da farklı rotor dirençlerine göre devrilme momentinin görüldüğü rotor hızındaki değişim görülmektedir.



Şekil 4.11 : Asenkron makina rotor devresi direncinin değişimi [24].

Bilezikli asenkron makinalarda rotor devresi direncine harici dirençler eklendiğinde moment-hız grafiğinin değişimi Şekil 4.11’de görülmektedir. Şekilde de görüleceği üzere direnç arttıkça devrilme momentinin görüldüğü rotor hızı değeri düşmektedir. Ancak maksimum moment seviyesi değişmemektedir.

4.3.6 Asenkron generatörler

Şekil 4.10’de de gösterildiği üzere dışarıdan harici bir kuvvet yardımıyla senkron hızın üzerinde sürülen asenkron makinalar generatör modunda çalışmaktadırlar. Moment-hız grafiği incelendiğinde, uygulanabilecek momentin maksimum değeri vardır. Bu maksimum moment değeri üzerinde bir moment şafta uygulanırsa generatör aşırı hızlanacaktır. Generatör çalışmada asenkron makinaların belli başlı sınırları söz konusudur. Ayrı bir alan devresinin olmayışı bir asenkron makinanın reaktif güç üretmemesi anlamına gelmektedir. Aksine reaktif güç tüketen asenkron generatörler, çalışma esnasında stator magnetik alanını bozmamak adına harici bir reaktif güç kaynağına ihtiyaç duyarlar. Bu harici reaktif güç kaynağı aynı zamanda uç gerilimini de kontrol etmelidir. Zira alan akımı olmaksızın bir asenkron makina çıkış gerilimini kontrol edemez. Asenkron generatörlerin en büyük avantajı basit yapılarıdır. Bir asenkron makina ayrı bir alan devresine ihtiyaç duymaz ve devamlı olarak sabit bir hızda sürülmek zorunda değildir. Senkron hızdan hızlı sürülen bir asenkron makina generatör modunda çalışmaya başlayacaktır. Basit yapıları ve değişken hızlardaki çalışmaları özellikle rüzgar türbinlerinde, ısı dönüşüm sistemlerinde ve benzeri güç üretim uygulamalarında kullanılmalarına yol açmaktadır. Asenkron generatörler aynı zamanda şebekeden bağımsız bir şekilde ihtiyaç duyacağı reaktif gücü kondansatör hücrelerinden sağlayacak şekilde ayrı bir güç sistemi olarak da kullanılabilirler. Asenkron makinalar tarafından ihtiyaç duyulan I_M mıknatıslanma akımı istenen uç gerilimine ulaşmak için harici kondansatörler yardımıyla sağlanırlar. Bir asenkron generatör tahrik edilmeye başladığında alan devresindeki artık mıknatıslık küçük bir gerilim üretir. Bu küçük gerilim kapasitif bir akım akmasına neden olur. Bu akım gerilimin artmasına yol açar. Artan gerilim kapasitif akımın artmasına yol açar ve bu şekilde devam ederek nominal gerilime erişilir. Şayet asenkron generatörün rotorunda artık akı mevcut değil ise, gerilim büyüyüp artamayacak ve bir an için harici bir motor ile magnetize edilecektir.

Asenkron generatörlerin en büyük sorunu yüklerdeki özellikle reaktif yüklerdeki değişimlerle birlikte uç gerilimlerinin çok değişmesidir. Endüktif yüklerde gerilim çok sert biçimde düşmektedir. Bunun nedeni bu durumda kondansatör hücrelerinin hem asenkron makinaya hem de yüke ihtiyacı olan reaktif gücü vermek zorunluluğudur. Ancak yüke çevrilmiş hiçbir reaktif güç generatörün tekrar mıknatıslanma devresini tamamlamak üzere geri dönmez, bu da gerilimde büyük oranda düşmeye yol açar. Bu nedenle asenkron generatör tarafından üretilen güç ile bir asenkron motora yol vermek çok zordur. Özel teknikler uygulanarak yol verme esnasında kullanılan kondansatör sayıları arttırılmalı ve normal çalışma şartlarında bu sayı azaltılmalıdır. Asenkron makinanın moment-hız karakteristiğinden ötürü generatör frekansı yük değişimiyle değişkenlik göstermektedir. Ancak normal işletme şartlarında moment-hız karakteristiği çok dik bir eğri konumundadır.

5. DEĞİŞKEN RÜZGAR HIZLARINDA GENERATÖR KONTROLÜ

Rüzgardan elde edilen enerji ve rüzgar türbinlerinin temel yapısı incelendikten sonra, bu bölümde değişken rüzgar hızlarında asenkron generatör kontrolü ile çıkış gücünün nasıl optimize edilebileceği anlatılacaktır. Farklı rüzgar hızlarında maksimum verimi alabilmek için mekanik kontrol dışında elektriksel kontrol incelenecektir. MATLAB-Simulink programı yardımıyla oluşturulacak simulasyon ile gerçek zamanlı bir rüzgar türbininin çıkış gücü gözlemlenecektir.

5.1 Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatör Modellemesi

Bölüm 4’de açıklandığı üzere AC generatörler 2 ana gruba ayrılırlar: senkron generatörler ve asenkron generatörler. Değişken rüzgar hızlarına uyumları ve basit kontrol edilebilirlikleri nedeniyle asenkron makinalar rüzgar türbinlerinde çokça kullanılmaktadır. Bilezikli asenkron generatör (BAG) ve kafesli asenkron generatörler (KAG) sıklıkla kullanılırlar. Belli başlı rüzgar türbinlerinde kullanılan generatör çeşitleri Çizelge 5.1’de gösterilmiştir [27].

Çizelge 5.1 : Başlıca rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörler [27].

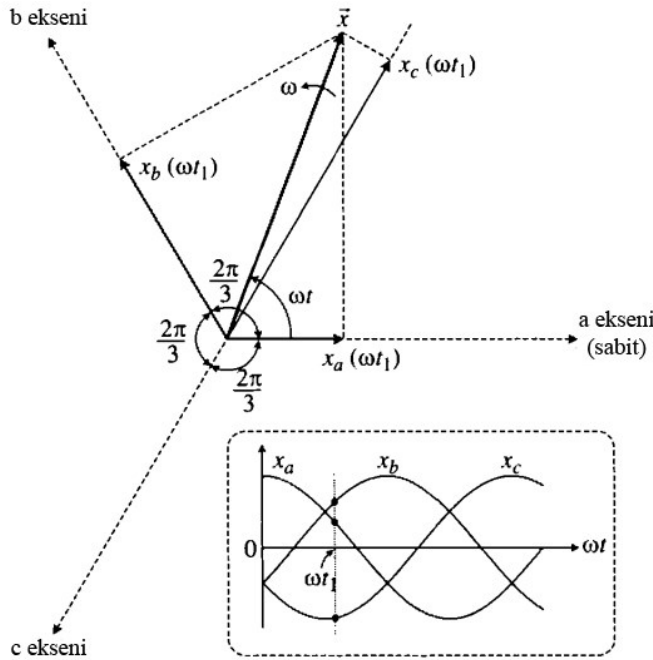
Generatör Tipi	Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG)	Kafesli Asenkron Generatör (KAG)	Bilezikli Senkron Generatör (BSG)
Nominal Gerilim	690 V	690 V	400 V
Nom. Güç	2 MW	2.3 MW	2.3 MW
Hız Aralığı	900-1900 rpm	600-1600 rpm	6-21.5 rpm
Kutup Sayısı	4	4	72
Üretici	Gamesa G90	Siemens SWT	Enercon E-70

5.1.1 Elektrik makinalarında referans eksen dönüşümleri

Elektrik makinalarının analizini kolaylaştırmak ve aynı zamanda uygulanabilir hale getirebilmek için referans eksen teorisi kullanılmaktadır. Özellikle üç fazlı sabit eksen (abc eksen olarak da bilinir), iki fazlı referans eksen ($\alpha\beta$ eksen) ve senkron eksen (d-q dönme eksen) takımı çoğunlukla kullanılır [27].

5.1.1.1 abc/dq (Park) referans eksen dönüşümü

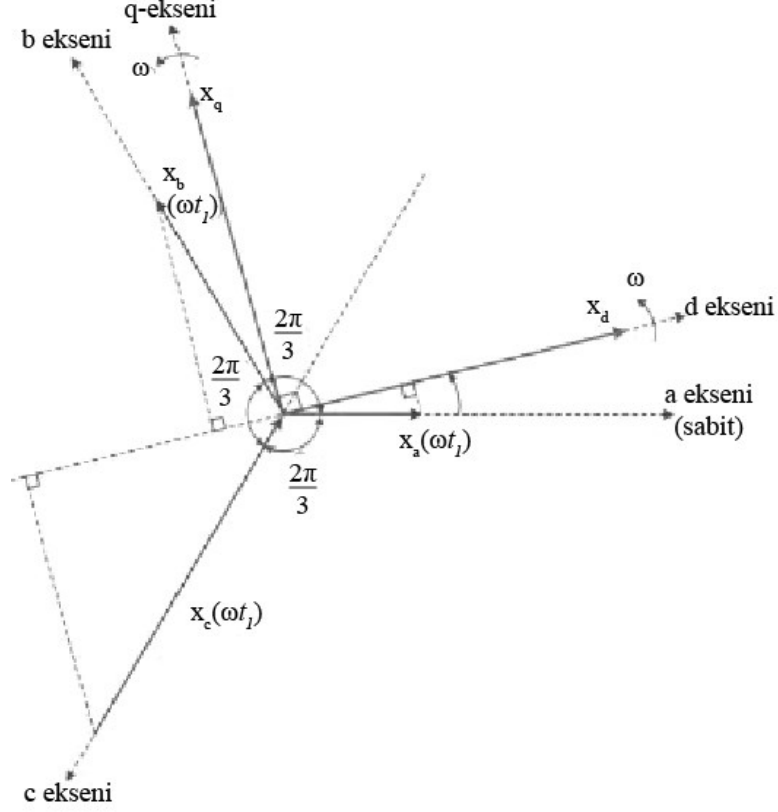
Üç fazlı x_a, x_b, x_c elektriksel değişkenleri göz önüne alındığında (gerilim, akım ya da kaçak akı), bu değişkenler üç fazlı (abc) sabit referans ekseninde bir uzay vektörü \vec{x} yardımıyla gösterilebilir. Uzay vektör ile üç fazlı değişken arasındaki ilişki Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Burada \vec{x} uzay vektörü abc referans eksenine göre ω hızıyla dönmektedir. abc eksenleri uzayda sabit kabul edildiğinden her bir üç fazlı değişken uzay vektörünün bir tam dolanımına karşılık 1 devir dönmektedir. Burada uzay vektörünün genliği ve dönme hızı sabit kabul edildiğinde ve ayrıca üç fazlı değişkenlerin aralarında $2\pi/3$ faz farkı olan sinüsoidal dalga şekline sahip olacak şekilde tanımlandığında Şekil 5.1 elde edilmektedir.



Şekil 5.1 : Uzay vektörü \vec{x} ile üç fazlı değişkenler x_a, x_b, x_c [27].

Üç fazlı abc ekseninde yer alan değişkenler iki fazlı birbirine d (direkt) ve q (dörtlük, quadrature) eksen takımlarında dönüştürülebilir. d-q eksen takımı Şekil 5.2’de de görülebileceği üzere abc eksen takımına göre a-ekseni ile d-ekseni arasında bir θ açısı yer almaktadır. dq-ekseni uzayda θ açısına bağlı bir şekilde $\omega = d\theta/dt$ hızında dönmektedir. abc eksenindeki değişkenleri d-q dönme eksenine dönüştürmek için basit trigonometrik hesaplamalar kullanılır. Eşitlik (5.1)’de kullanılan matris takımı üç fazlı bir değişkenin iki fazlı döl el eşitliğini vermektedir:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (5.1)$$



Şekil 5.2 : (abc) iki fazlı (d-q) keyfi eksen takımına dönüşümü [27].

Bu dönüşümün tersi de mümkündür. d-q/abc ters dönüşümü aşağıdaki eşitlikte gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Uzay vektörü \vec{x} , d-q döne referans ekseninde d-q eksen takımıyla aynı hızda döndüğü kabul edildiğinde, \vec{x} ile d π -ekseni arasındaki vektör açısı ϕ sabit olarak tanımlanır. Bu nedenle burada görülen değişkenler x_d ve x_q DC değişkenlerdir. abc/dq dönüşümünün avantajlarından birisi üç fazlı AC değişkenlerin efektif bir şekilde iki fazlı DC değişkenler olarak ifade edilebilmeleridir. Rüzgar enerjisi sistemlerinde senkron referans eksen takımı sıklıkla kullanılmaktadır [27].

5.1.1.2 abc/αβ (Clark) referans eksen dönüşümü

Üç fazlı sabit eksen takımlı bir değişkeni iki fazlı sabit eksen takımlı bir değişkene dönüştürmek için çoğunlukla abc/αβ dönüşümü kullanılır. αβ referans eksenini uzayda dönmediği yani sabit olduğundan dolayı θ sifira eşit kabul edilerek aşağıdaki dönüşüm yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Burada $\vec{x}_a + \vec{x}_b + \vec{x}_c = 0$ dengeli bir üç fazlı sistem ilişkisine bakıldığında, x_α ile x_a arasında aşağıdaki eşitlik yazılır:

$$x_\alpha = \frac{2}{3} \left(x_a - \frac{1}{2} x_b - \frac{1}{2} x_c \right) = x_a \quad (5.4)$$

Benzer şekilde iki fazlı değişkenlerin üç faza dönüşümü için αβ/abc dönüşümü kullanılmaktadır [27].

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

5.2 Asenkron Generatör Modellemesi

Daha öncede belirtildiği üzere rüzgar türbin endüstrisinde yaygınlıkla kullanılan iki tane ana generatör tipi mevcuttur. Bunlardan birincisi çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) ve diğeri de kafesli asenkron generatördür (KAG). Bu iki generatör aynı stator yapısına sahiptir, rotor yapıları farklıdır.

KAG rotoru üst üste konmuş çekirdek ve rotor çubuklarından oluşur. Rotor çubukları levhanın içine gömülmüş oluklara yerleştirilmiş ve her iki uçlarından birer halka yardımıyla kısa devre edilmişlerdir. Stator sargılarına üç fazlı bir gerilim uygulandığında hava boşluğunda bir magnetik alan oluşur. Bu magnetik alan rotor barlarında bir gerilim endükler. Rotor sargıları kısa devre edilmiş olduğundan endüklenen gerilim bir rotor akımı oluşturur. Bu akım döner alanla etkileşime girerek

elektromagnetik moment üretir. ÇBAG rotoru ise statora benzer şekilde üç fazlı sargılar içerir. Bu sargılar rotor levhasının dışına yerleştirilir. Bu sargılar genellikle rotor şaftına yerleştirilmiş kayma bileziği üzerinden beslenir. ÇBAG kullanılan rüzgar enerji santrallerinde rotor sargıları bir güç dönüşüm sistemine bağlanır ve bu şekilde rotor hızı ayarlanabilir.

Asenkron generatörlerde sıklıkla kullanılan iki tane dinamik model vardır. Bunlardan birincisi uzay vektör teorisi ve diğeri de uzay vektör modelinden türetilmiş dq-eksen modelidir. Uzay vektör modeli matematiksel açıklamalar içerir ve sadece bir tane eşdeğer devre ile gösterilir. Ancak kompleks değişkenler içerir. Bunun yanında dq-eksen modeli her bir eksen takımı için ayrı birer eşdeğer devre ihtiva eder. Her iki model de birbirine eşittir ve asenkron generatörlerin geçici ve kararlı hal çalışma koşullarının analizinde kullanılırlar [27].

5.2.1 Alan vektör modeli

Asenkron makinaların uzay vektör modeli iki temel kabule dayanır: (1) asenkron makina simetrik yapıdadır, üç fazlı ve dengelidir ve (2) rotor ve statorun magnetik çekirdeği lineerdir ve kayıplar ihmal edilmiştir. Uzay vektör modeli genellikle gerilim eşitlikleri, akı eşitlikleri ve hareket eşitliklerinden oluşur. Stator ve rotorun keyfi bir referans noktasına göre yazılan gerilim eşitlikleri aşağıdaki gibidir:

$$\vec{v}_s = R_s \dot{i}_s + p\vec{\lambda}_s + j\omega\vec{\lambda}_s \quad (5.6)$$

$$\vec{v}_r = R_r \dot{i}_r + p\vec{\lambda}_r + j(\omega - \omega_r)\vec{\lambda}_s \quad (5.7)$$

\vec{v}_s, \vec{v}_r -- Stator ve rotor gerilim vektörleri (V)

\dot{i}_s, \dot{i}_r -- Stator ve rotor akım vektörleri (A)

$\vec{\lambda}_s, \vec{\lambda}_r$ -- Stator ve rotor kaçak akı vektörleri (Wb)

R_s, R_r -- Stator ve rotor sargı dirençleri (Ω)

ω -- referans noktanın dönme hızı (rad/s)

ω_r -- rotor elektrik açısal hızı (rad/s)

p -- türev operatörü (d/dt)

Bu eşitlikte $j\omega\vec{\lambda}_s$ ve $j(\omega-\omega_r)\vec{\lambda}_r$ hız gerilimini ifade eder. İkinci eşitlik stator ve rotor kaçak akıları $\vec{\lambda}_s$ ve $\vec{\lambda}_r$ tanımlar:

$$\vec{\lambda}_s = (L_{ls} + L_m)\dot{i}_s + L_m\dot{i}_r = L_s\dot{i}_s + L_m\dot{i}_r \quad (5.8)$$

$$\vec{\lambda}_r = (L_{lr} + L_m)\dot{i}_r + L_m\dot{i}_s = L_r\dot{i}_r + L_m\dot{i}_s \quad (5.9)$$

$L_s = L_{ls} + L_m$ -- stator öz-endüktansı (H)

$L_r = L_{lr} + L_m$ -- rotor öz-endüktansı (H)

L_{ls}, L_{lr} -- stator ve rotor kaçak endüktansı (H)

L_m -- mıknatıslanma endüktansı (H)

Üçüncü ve son eşitlik hareket denklemdir. Rotor mekanik hızının dinamik davranışını mekanik ve elektromagnetik moment ifadeleriyle tanımlar:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_m \quad (5.10)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} \operatorname{Re}(j\vec{\lambda}_s \dot{i}_s^*) = -\frac{3P}{2} \operatorname{Re}(j\vec{\lambda}_r \dot{i}_r^*) \quad (5.11)$$

J -- rotorun eylemsizlik momenti (kgm^2)

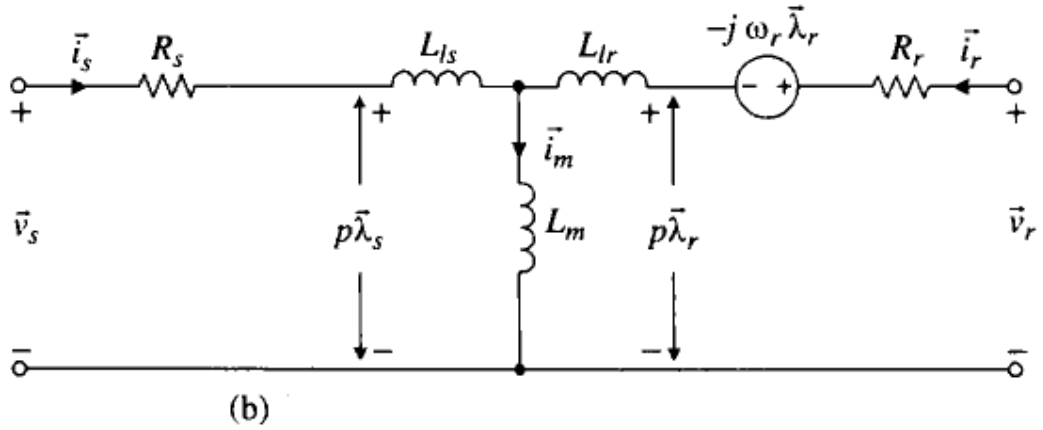
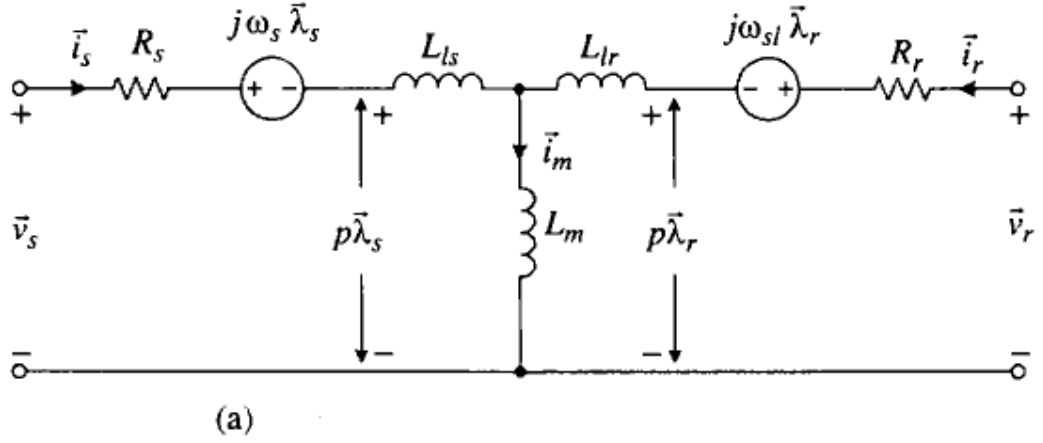
P -- kutup çifti sayısı

T_m -- generatörün mekanik momenti (Nm)

T_e -- elektromagnetik moment (Nm)

ω_m -- rotor mekanik hızı, $\omega_m = \omega_r / P$ (rad/s)

Eşitlikler (5.6) - (5.11) asenkron generatörün uzay vektör modelini oluşturmaktadır. Eşdeğer devre Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Keyfi referans noktasına göre belirlenmiş asenkron generatör modeli sıklıkla kullanılan senkron nokta modeli gibi diğer modellere kolaylıkla dönüştürülebilir.



Şekil 5.3 : (a) AG senkron gövde, (b) AG sabit gövde modeli [27].

Burada Şekil 5.3(a)'deki asenkron generatör (AG) senkron gövdesi incelendiğinde senkron hız ω_s ve açılma kayma frekansı ω_{sl} arasında aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$\omega_s = 2\pi f_s \quad (5.12)$$

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r \quad (5.13)$$

Uzay vektör modeli hem ÇBAG hem de KAG için geçerlidir. KAG'de rotor devresi kısa devre edildiğinden rotor gerilimi sıfıra ayarlanır.

5.2.2 dq referans gövde modeli

Asenkron generatörün dq-eksen takımı modeli uzay vektör modelini d-eksen ve q-eksen takımına ayrıştırarak oluşturulur.

$$\vec{v}_s = v_{ds} + jv_{qs}; \quad \vec{i}_s = i_{ds} + ji_{qs}; \quad \vec{\lambda}_s = \lambda_{ds} + j\lambda_{qs} \quad (5.14)$$

$$\vec{v}_r = v_{dr} + jv_{qr}; \quad \vec{i}_r = i_{dr} + ji_{qr}; \quad \vec{\lambda}_r = \lambda_{dr} + j\lambda_{qr} \quad (5.15)$$

Eşitlik (5.15) eşitlik (5.7)'da yerine yazılırsa asenkron makinanın dq-eksen takımı gerilim eşitlikleri elde edilir.

$$\vec{v}_{ds} = R_s i_{ds} + p\lambda_{ds} - \omega\lambda_{qs} \quad (5.16)$$

$$\vec{v}_{qs} = R_s i_{qs} + p\lambda_{qs} + \omega\lambda_{ds} \quad (5.17)$$

$$\vec{v}_{dr} = R_r i_{dr} + p\lambda_{dr} - (\omega - \omega_r)\lambda_{qr} \quad (5.18)$$

$$\vec{v}_{qr} = R_r i_{qr} + p\lambda_{qr} + (\omega - \omega_r)\lambda_{dr} \quad (5.19)$$

Benzer şekilde eşitlik (5.15) eşitlik (5.9) yerine yazılırsa:

$$\vec{\lambda}_{ds} = (L_{ls} + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (5.20)$$

$$\vec{\lambda}_{qs} = (L_{ls} + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (5.21)$$

$$\vec{\lambda}_{dr} = (L_{lr} + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (5.22)$$

$$\vec{\lambda}_{qr} = (L_{lr} + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (5.23)$$

Eşitlik (5.11)'deki elektromagnetik moment eşitliği de aynı şekilde dq-eksen kaçak akıları cinsinden yazılabilir. En çok kullanılan elektromagnetik moment eşitlikleri aşağıda verilmiştir [27]:

$$T_e = \frac{3P}{2} (i_{qs}\lambda_{ds} - i_{ds}\lambda_{qs}) \quad (a) \quad (5.24)$$

$$T_e = \frac{3PL_m}{2} (i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \quad (b) \quad (5.25)$$

$$T_e = \frac{3PL_m}{2L_r} (i_{qs}\lambda_{dr} - i_{ds}\lambda_{qr}) \quad (c) \quad (5.26)$$

5.2.2.1 Modelin simülasyonu

Modelin simülasyonunun yapılabilmesi için Eşitlikler (5.16) - (5.19) yeniden düzenlenir. p türev operatörü Laplace operatörü s ile temsil edilirse aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$\lambda_{ds} = (v_{ds} - R_s i_{ds} + \omega \lambda_{qs}) / s \quad (5.27)$$

$$\lambda_{qs} = (v_{qs} - R_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds}) / s \quad (5.28)$$

$$\lambda_{dr} = (v_{dr} - R_r i_{dr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{qr}) / s \quad (5.29)$$

$$\lambda_{qr} = (v_{qr} - R_r i_{qr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{dr}) / s \quad (5.30)$$

Benzer şekilde Eşitlikler (5.20) - (5.23)'deki kaçak akı eşitliği aşağıdaki gibi matris formda yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

Rotor ve stator akımları da Eşitlik (5.31) eşitliğinin tersi alınarak $[i] = [L]^{-1}[\lambda]$ formuyla elde edilebilir. $D_1 = L_s L_r - L_m^2$ olmak üzere:

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{D_1} \begin{bmatrix} L_s & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

Hareket ve moment eşitlikleri de aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [27]:

$$\omega_r = \frac{P}{JS} (T_e - T_m) \quad (5.33)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} (i_{qs} \lambda_{ds} - i_{ds} \lambda_{qs}) \quad (5.34)$$

5.3 Rüzgar Türbinlerinde Generatör Modellemesi

Asenkron makina uzay vektör modellemesi ve dq-eksen dönüşümü tanımlandıktan sonra rüzgar türbinlerinde kullanılan asenkron makina eşitliklerine dönüştürülecektir. Eşitlikler (5.10) - (5.11) asenkron makina moment eşitliklerini göstermektedir. Burada yükseltilmiş rotor dönme hızı Ω_h Eşitlik (5.10)'de ω_r yerine yazıldığında:

$$J \frac{d\Omega_h}{dt} = \Gamma_{mek} - \Gamma_G \quad (5.35)$$

Bu eşitlik yüksek şaft hızı (YŞS-HSS) tarafı öngörülerek yazılmıştır. Γ_{mek} mekanik momenti ve Γ_G elektromagnetik momenti ifade etmektedir.

5.3.1 Çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG)

Çift beslemeli asenkron generatörün (ÇBAG) elektromagnetik momenti Eşitlik (5.24)'de gösterildiği üzere:

$$\Gamma_G = \frac{3PL_m}{2} (i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \quad (5.36)$$

Eşitlik (5.31) ve (5.32) eşitlikleri yeniden düzenlendiğinde:

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{V_{ds}}{L_s} - \frac{R_s}{L_s} i_{ds} - \frac{L_m}{L_s} \frac{di_{dr}}{dt} + \omega_s \left(i_{qs} + \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \right) \quad (5.37)$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{V_{qs}}{L_s} - \frac{R_s}{L_s} i_{qs} - \frac{L_m}{L_s} \frac{di_{qr}}{dt} - \omega_s \left(i_{ds} + \frac{L_m}{L_s} i_{dr} \right) \quad (5.38)$$

$$\frac{di_{dr}}{dt} = \frac{V_{dr}}{L_r} - \frac{R_r}{L_r} i_{dr} - \frac{L_m}{L_r} \frac{di_{ds}}{dt} + (\omega_s - \omega) \left(i_{qr} + \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \right) \quad (5.39)$$

$$\frac{di_{qr}}{dt} = \frac{V_{qr}}{L_r} - \frac{R_r}{L_r} i_{qr} - \frac{L_m}{L_r} \frac{di_{qs}}{dt} - (\omega_s - \omega) \left(i_{dr} + \frac{L_m}{L_r} i_{ds} \right) \quad (5.40)$$

Burada $\omega = p\Omega_h$ olmak üzere, $\omega_s = d\theta_s/dt$ stator frekansı, R_s, R_r sırasıyla stator ve rotor direnci ve L_s, L_r sırasıyla stator ve rotor endüktansını göstermektedir.

$v_{ds}, v_{qs}, v_{dr} = v_{qr} = 0$ sırasıyla stator ve rotor d-q gerilim ifadeleri olmak üzere;

$\phi_{dr} = L_r i_{dr}, \phi_{qr} = L_r i_{qr}$ rotor akısı (d,q) olmak üzere [21]:

$$x = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t)]^T = [i_{ds} \ i_{qs} \ i_{dr} \ i_{qr}]^T \quad (5.41)$$

$$u = [v_{ds} \ v_{qs} \ v_{dr} \ v_{qr}]^T \quad (5.42)$$

Burada birleşik ve giriş vektörleri için ÇBAG kararlı hal denklemi dördüncü derece modeli:

$$\dot{x} = A(\Omega_h) \cdot x + B \cdot u \quad (5.43)$$

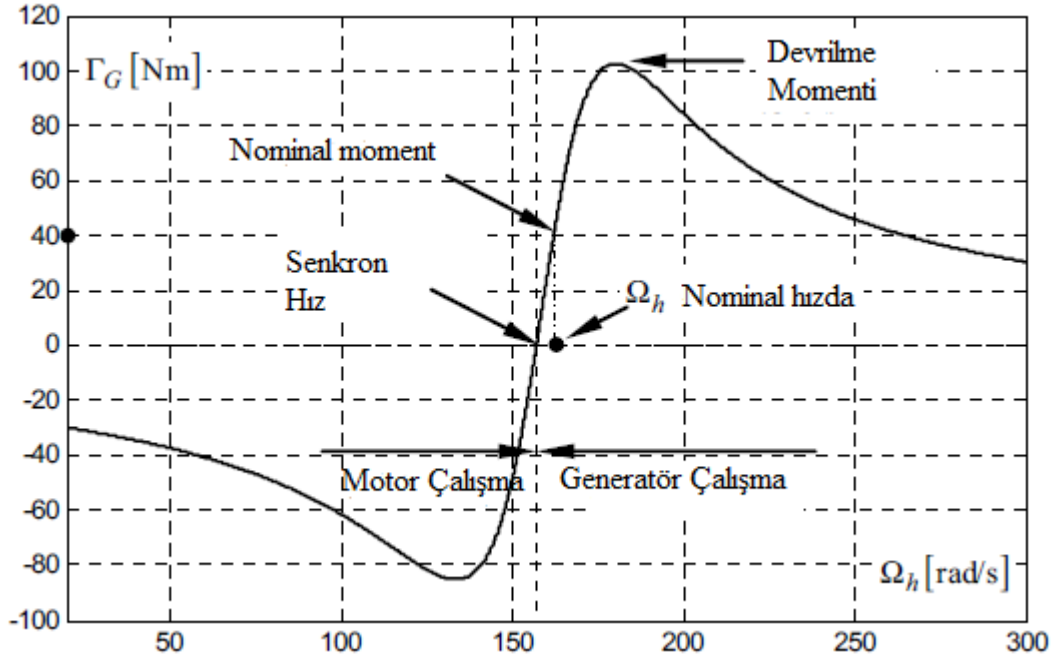
$$y \equiv \Gamma_G = \frac{3pL_m}{2} (x_2 x_3 - x_1 x_4) \quad (5.44)$$

A ve B katsayısı aşağıdaki gibidir:

$$A(\Omega_h) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \omega_s + \frac{p\Omega_h L_m^2}{\sigma L_s L_r} & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} & \frac{p\Omega_h L_m}{\sigma L_s} \\ -\left(\omega_s + \frac{p\Omega_h L_m^2}{\sigma L_s L_r}\right) & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & -\frac{p\Omega_h L_m}{\sigma L_s} & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} & -\frac{p\Omega_h L_m}{\sigma L_r} & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & \omega_s - \frac{p\Omega_h}{\sigma} \\ \frac{p\Omega_h L_m}{\sigma L_r} & \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} & \frac{p\Omega_h}{\sigma} - \omega_s & -\frac{R_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \quad (5.45)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & \frac{-L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & \frac{-L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{-L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

Burada A dönme hızı Ω_h 'nin bir fonksiyonudur. Eşitlik (5.36)'da ifade edilen elektromagnetik momentin ifadesi Şekil 5.4'de gösterilmiştir [21].



Şekil 5.4 : Asenkron makinanın mekanik karakteristiği [21]

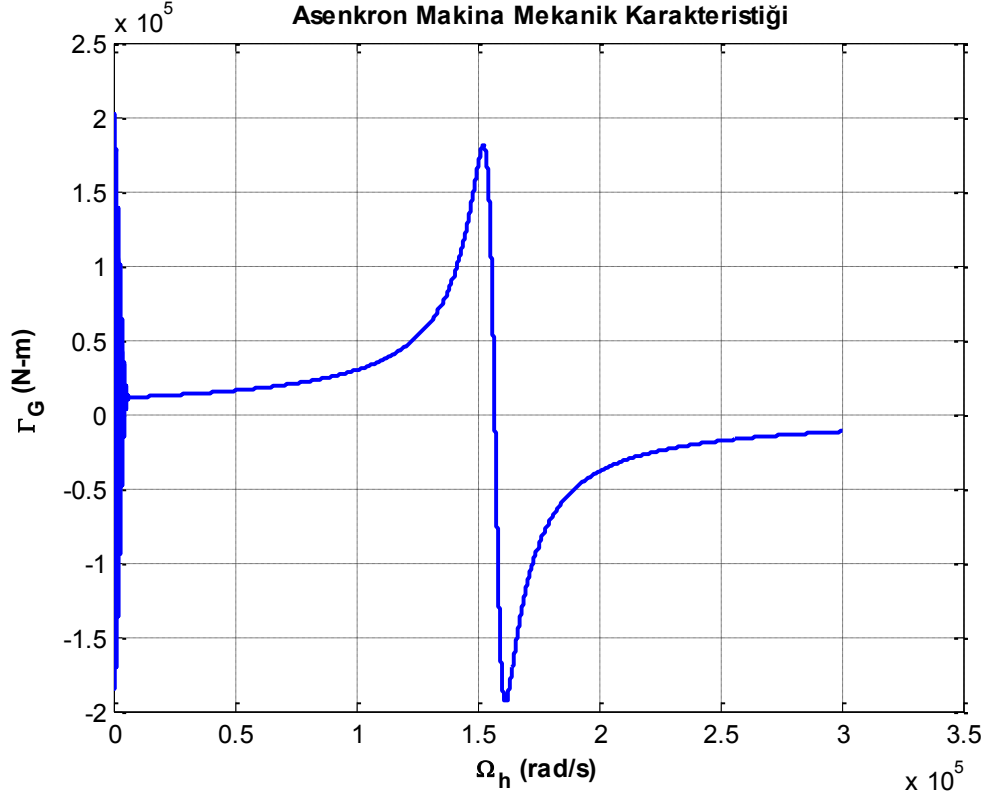
5.3.1.1 Uygulama-1: KAG asenkron generatör modeli

Şekil 5.4’de uygun şekilde tanımlanan asenkron makina karakteristikleri örnek bir uygulama ile MATLAB-Simulink programına girilmiştir. 2 MW nominal güce sahip kafesli asenkron generatör (KAG)’dan oluşan bir rüzgar türbininin doğrusal modellenmesi yapılmış ve rotor dönme hızının momente olan etkisi incelenmiştir. Kullanılan KAG parametreleri Çizelge 5.2’de gösterilmiştir. 2 MW KAG generatör parametreleri [21].

Çizelge 5.2 : 2 MW KAG generatör parametreleri [21].

Türbin Rotoru	Dışlı Kutusu	Kafesli Asenkron Generatör (KAG)
	Yükseltme Oranı: $i = 100$	$p = 2, R_s = 1.1m\Omega, R_r = 1.3m\Omega,$
Kanat Çapı: $R = 45m$	YŞH (HSS) eylemsizlik: $J_h = 990kg \cdot m^2$	$L_m = 2.9936m\Omega, L_s = 3.0636m\Omega,$
	Verim $\eta = 0.95$	$L_r = 3.068m\Omega, \omega_s = 2\pi \cdot 50rad/s$ $, \Gamma_{Gmax} = 17e5Nm, V_s = 960V$

Kullanılan Simulink programı Ek-A1’de verilmiştir. Asenkron makina 1-300 rad/s Ω_h rotor dönme hızı ile sürüldüğünde ortaya çıkan elektromagnetik moment karakteristiği Şekil 5.5’de gösterilmiştir.



Şekil 5.5 : 2 MW KAG elektromagnetik moment karakteristiği

Eşitlik (5.36) ve Şekil 5.5 incelendiğinde rüzgar türbinlerinde kullanılan asenkron generatörlerin değişken rotor dönme hızlarında değişken elektromagnetik karakteristik gösterdiği görülmektedir.

5.3.2 Kafesli asenkron generatör modellemesi (KAG)

KAG modeli ÇBAG modelinden türetilir. Rotor sargıları kısa devre edildiği için rotor geriliminin d ve q bileşenleri sıfırdır. Dolayısıyla Eşitlik (5.42)'de $V_{dr} = V_{qr} = 0$ kabul edilir. Dolayısıyla uzay ve giriş vektörleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$x = [x_1(t) \quad x_2(t) \quad x_3(t) \quad x_4(t)]^T = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{dr} \quad i_{qr}]^T \quad (5.47)$$

$$u = [V_{ds} \quad V_{qs}]^T \quad (5.48)$$

KAG modeli bu yaklaşımla aşağıdaki şekli alır:

$$\dot{x} = A(\Omega_h) \cdot x + B \cdot u \quad (5.49)$$

$$y \equiv \Gamma_G = \frac{3pL_m}{2} (x_2x_3 - x_1x_4) \quad (5.50)$$

Burada $A(\Omega_h)$ Eşitlik (5.45)'de gösterildiği gibidir. B ise aşağıdaki gibi yazılır [21]:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & \frac{-L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & \frac{-L_m}{\sigma L_s L_r} \end{bmatrix} \quad (5.51)$$

Son olarak, bir dişli kutusuna sahip rüzgar enerjisi kontrol sisteminde (REKS) moment kontrolünün modellenmesinin en basit yolu birinci derecede sistemi indirgemektir. Lineer sistem modellenmesi rüzgar türbin momentindeki değişim aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta \Gamma_{wt} = \gamma \cdot \Delta \Omega_l + (2 - \gamma) \cdot \bar{\Delta v} \quad (5.52)$$

Burada;

$$\gamma = \gamma(\bar{\lambda}) = C_p'(\bar{\lambda}) \cdot \bar{\lambda} / C_p(\bar{\lambda}) - 1 \quad (5.53)$$

Moment parametresi olmak üzere, büyük ölçüde optimum çalışma noktası $C_p'(\lambda) = dC_p(\lambda) / d\lambda$ ve $\bar{\lambda} = R\bar{\Omega}_l / \bar{v}$ bağlıdır. Burda Γ_{wt} :

$$\Gamma_{wt} = \frac{P_{wt}}{\Omega_l} = \frac{1}{2} \pi \rho v^2 R^3 C_\Gamma(\lambda) \quad (5.54)$$

ve $C_\Gamma = C_p / \lambda$ moment katsayısı olmak üzere Eşitlik (5.52) aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$\Delta \Gamma_{wt} = \frac{\gamma \pi \sigma R^3}{2} \cdot C_\Gamma(\bar{\lambda}) \cdot \frac{v^2}{\Omega_l} \cdot \Delta \Omega_l + \frac{(2 - \gamma) \pi \rho R^3}{2} \cdot C_\Gamma(\bar{\lambda}) \cdot \bar{v} \cdot \Delta v \quad (5.55)$$

Lineer REKS uzay modeli rüzgar moment değişiminin Eşitlik (5.55) dişli sistemi ile olan ilişkisini tanımlar. Elde edilen bu değer Eşitlik (5.43)'de yerine yazılır. Elde edilen nihai Eşitlik (5.56), (5.57) ve (5.58)'de gösterilmiştir [21]:

$$\dot{x} = A(\bar{x}, \bar{v}) \cdot x + B(\bar{\Omega}_h, \bar{v}) \cdot u \quad (5.56)$$

$$A(\bar{x}, \bar{v}) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \omega_s + \frac{p\bar{\Omega}_h L_m^2}{\sigma L_s L_r} & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} & \frac{p\bar{\Omega}_h L_m}{\sigma L_s} & \frac{pL_m}{\sigma L_s} \left(\frac{L_m \bar{i}_{qs}}{L_r} + \bar{i}_{qr} \right) \\ \left(\omega_s + \frac{p\bar{\Omega}_h L_m^2}{\sigma L_s L_r} \right) & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & -\frac{p\bar{\Omega}_h L_m}{\sigma L_s} & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} & -\frac{pL_m}{\sigma L_s} \left(\frac{L_m \bar{i}_{ds}}{L_r} + \bar{i}_{dr} \right) \\ \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} & -\frac{p\bar{\Omega}_h L_m}{\sigma L_r} & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & \omega_s - \frac{p\bar{\Omega}_h}{\sigma} & -\frac{p}{\sigma} \left(\frac{L_m \bar{i}_{qs}}{L_r} + \bar{i}_{qr} \right) \\ \frac{p\bar{\Omega}_h L_m}{\sigma L_r} & \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} & \frac{p\bar{\Omega}_h}{\sigma} - \omega_s & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & -\frac{p}{\sigma} \left(\frac{L_m \bar{i}_{ds}}{L_r} + \bar{i}_{dr} \right) \\ -\frac{3}{2J_h} pL_m \bar{i}_{qr} & \frac{3}{2J_h} pL_m \bar{i}_{dr} & \frac{3}{2J_h} pL_m \bar{i}_{qs} & -\frac{3}{2J_h} pL_m \bar{i}_{ds} & \frac{\gamma}{iJ_h} \frac{\pi p R^3}{2} C_\Gamma \frac{v^2}{\bar{\Omega}_h} \end{bmatrix} \quad (5.57)$$

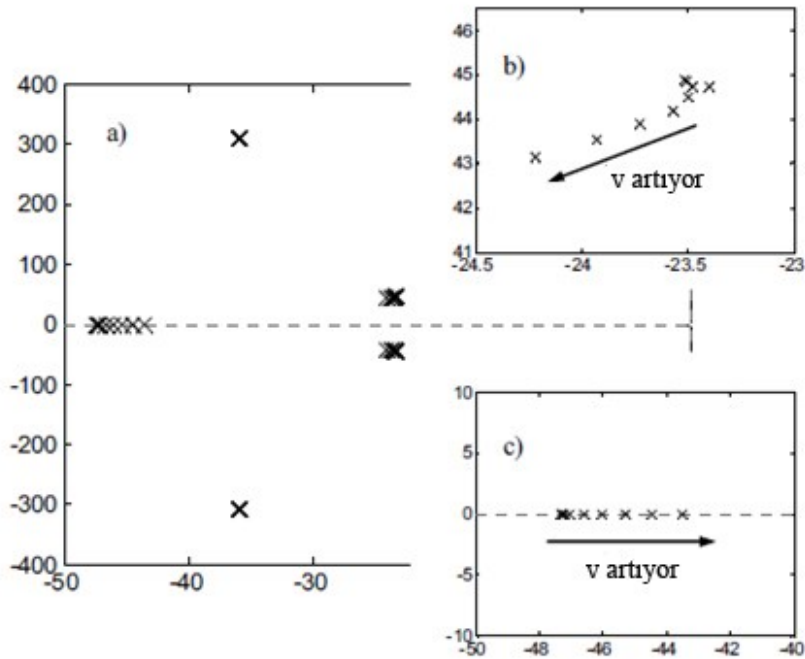
$$B(\bar{\Omega}_h, \bar{v}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_m} & 0 \\ -\frac{L_m}{\sigma L_s L_m} & 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_m} & 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(2-\gamma) \pi p R^3}{iJ_h} \frac{C_\Gamma}{2} \bar{v} \end{bmatrix} \quad (5.58)$$

Şekil 5.6'da 5. derece kontrolsüz düşük güçlü (10 kW altı) asenkron makina tabanlı bir REKS modelinin rüzgar hızı \bar{v} değişimlerin karşı oluşan titreşimleri gösterilmektedir. Rotor ve gerçek hareket kutuplarının yer değişimi görülmektedir. Görüldüğü üzere stator kutupları işletme rüzgar hızındaki değişimler karşısında etkilenmezken, rotor kutupları rüzgar hızındaki artışa karşın görece daha hızlı bir artış göstermiştir. Aynı zamanda gerçek hareket kutupları daha yavaş bir değişim göstermiştir.

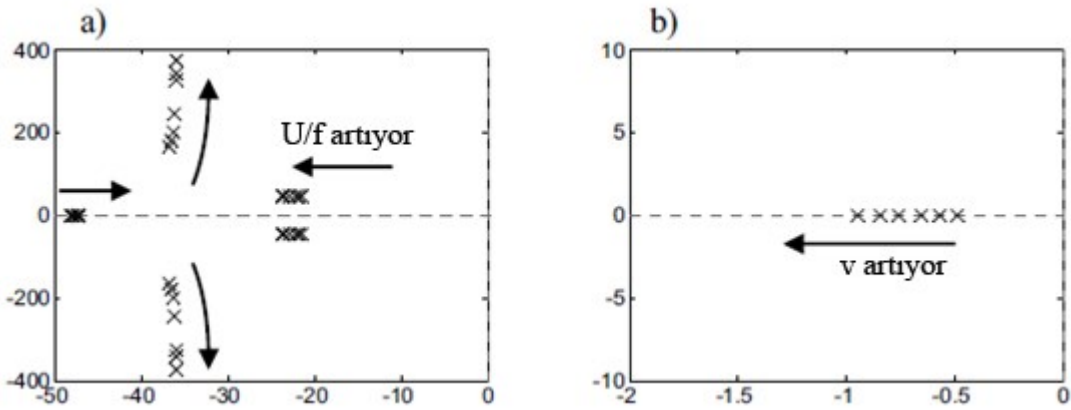
Şekil 5.7'de ise asenkron makinanın iki farklı yöntemle kontrol edilmesi durumunda göstermiş olduğu kutup değişimi verilmiştir. Bu nedenle sabit rüzgar hızı altında $U/f = \text{sabit}$ tutulması durumunda tipik kutup dağılımı gösterilmiştir. Burada U/f oranı büyüdükçe rotor ve stator kutuplarındaki değişimin gerçek hareket kutbundan daha hızlı olduğu görülmektedir.

Bu değerlendirmeler sonunda kontrol algoritmasında kullanılmak üzere bir sonuç doğmaktadır. Kontrollü bir REKS modelinin dinamikleri generatör karakteristiğinin biçimine ve kontrol yapısına bağlıdır. Yani iki mekanik karakteristiğin (türbin ve generatörün) bağlı hareketi REKS'in cevap zamanını etkiler.

Örneğin, sabit moment kontrolünün dinamikleri Ω_h, Γ_G 'de yük karakteristiklerinin eğimi sıfır iken) $U/f = \text{sabit}$ olması halinden (büyük eğime sahip bölgelerde) 10 kat daha yavaş olabilir. Bu nedenle yükün eğiminin kontrolü REKS kontrolünde çok önemlidir [21].



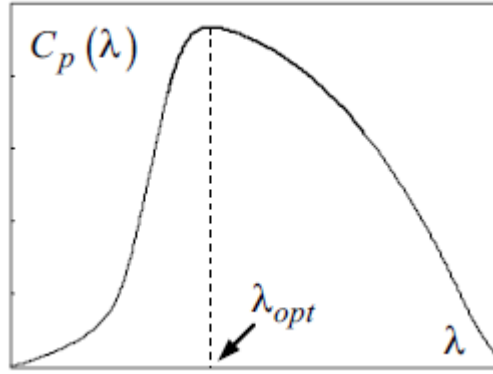
Şekil 5.6 : Beşinci derece kontrolsüz bir asenkron generatörlü REKS işletme noktasının değişimi a) rotor kutupları b) gerçek hareket kutupları [21].



Şekil 5.7 : a) U/f sabit tutularak 5. derece asenkron generatörlü bir REKS'in sabit rüzgar altındaki değişimi b) baskın kutbun sabit moment kontrolü [21].

5.3.3 Maksimum güç noktası (MPPT) kontrolü

Değişken hızlı sabit kanat açılı rüzgar türbinlerinde rüzgardan elde edilen enerjinin maksimum olabilmesi güç katsayısı C_p 'nin maksimum olmasına bağlıdır. Bu nedenle değişken hızlı rüzgar türbinlerinde güç kontrolü farklı rüzgar hızlarında değişecek olan C_p güç katsayısını maksimum tutacak optimum rotor dönme hızında rüzgar türbininin sürülmesine dayanır (Şekil 5.8). Herbir rüzgar hızı için optimum rotor dönme hızı vardır [21]. Farklı rüzgar hızlarından maksimum güç elde edebilmek için, rotor dönme hızı ilgili güç eğrisine göre optimum hızda sürülmelidir (MPP). $P_M \propto \omega_M^3$ teorisine göre güç elde edilecek rüzgar hızının küpüyle orantılıdır. Rüzgardan elde edilen mekanik güç, hız ve rüzgar türbininin momenti arasındaki ilişki optimum çalışma şartlarını belirlemektedir [27].



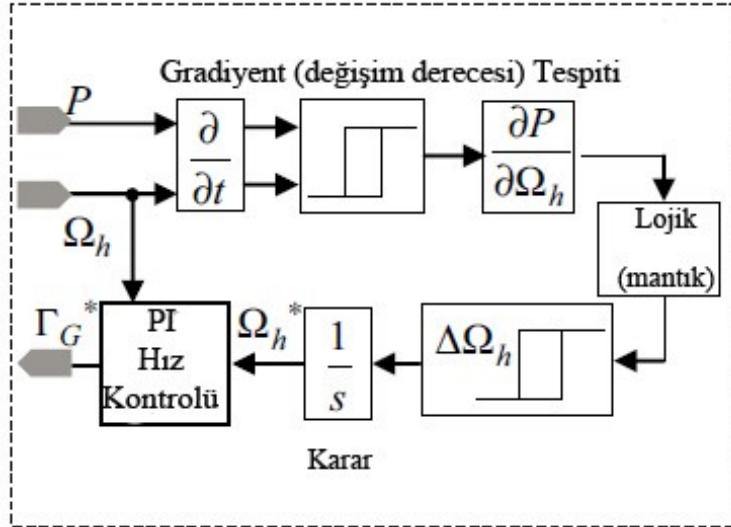
Şekil 5.8 : Güç katsayısının optimum uç hızı gösterimi [21].

Herbir rotor dönme hızında farklı bir güç eğrisi-uç hızı grafiği ortaya çıkacağından güç eğrisinin maksimum olduğu nokta istenen çalışma noktasıdır. Maksimum güç noktası (MPPT) λ_{opt} ve $C_{p\max} = C_p(\lambda_{opt})$ parametreleri bilinmeksizin referans rotor dönme hızını belirlemektedir. Rotor dönme hızının artması ya da azalmasına karar verebilmek için, $P_{wt}(\Omega_r)$ grafiğinde maksimum gücün sağlandığı noktada işletme yapılmalıdır. Bu iki şekilde yapılabilir:

- Hız referans noktası $\Delta\Omega_r$ değişimine göre belirlenir. İlgili aktif güç değişimi ΔP 'de $\partial P_{wt} / \partial \Omega_r$ değerini belirlemek için tanımlanır. Bu değer in işareti işletme noktasının maksimum güç noktasında pozisyonunu belirler. Şayet

referans hız bu türevle doğru orantılı bir eğime ayarlanırsa, sistem optimum çalışma noktasına erişir ki bu durumda $\partial P_{wt} / \partial \Omega_l = 0$ olur;

- Bir örnek sinyali varolan referans hızına eklenir, burada örnek sinyal yavaş bir sinüsoidal değişkime sahip olmak şartıyla; genliği sistemi önemli derecede etkilememektedir. Ancak hala aktif güç içersinde tespit edilebilir bir cevaba sahiptir. Maksimum çalışma aralığının yakalanabilmesi için örnek sinyalin faz gecikmesi ile aktif gücün sinüsoidal bileşeni karşılaştırılır. Şayet faz gecikmesi *sıfır*/ π ise, varolan çalışma noktası $P_{wt}(\Omega_l)$ 'in artan/azalan kısmında yer almaktadır. Bu nedenle hız referansının eğimi artırıp/azalmalıdır. Maksimuma nokta etrafında örnek sinyal tespit edilebilir bir cevap üretmez ve hız referansı değiştirilmesine gerek yoktur.



Şekil 5.9 : REKS'lerin lineer olmayan kontrol yaklaşımları (MPPT) [21].

Esasen, bu yaklaşım güç ve dönme hızındaki değişim derecesini hesaplama prensibine dayanır. Bu bilgi $\partial P / \partial \Omega_h$ değerini belirlemede kullanılır. Bu değer in işareti güç eğrisindeki statik işletme noktasını (OP) belirler. Bu türevin sıfır olduğu noktalarda elde edilen güç maksimumdur. Açma-kapama lojik devre referans rüzgar hızını güncelleyerek $\partial P / \partial \Omega_h$ değerini küçük tutmak için kullanılır.

Optimum çalışma noktası (OOP-OÇN) etrafında OP özellikle türbülanslı rüzgar hızlarında nispeten büyük farklılıklar içerir. Buna rağmen bu yöntemle türbin en uygun şartlarda çalıştırılarak verimi artırılabilir. Değişken hızlı hız kontrol sistemi Şekil 5.9'da gösterilmiştir. [21]

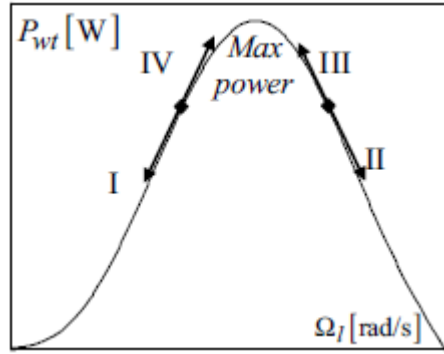
5.3.3.1 MPPT literatür incelemesi

Maksimum güç noktası (MPPT) temelde tepe tırmanma metoduna dayanmaktadır. Ölçülebilir değişkenlerin değişim derecesinin tahmini için örnekleme sinyalleri kullanılır. Bir REKS’de optimum uç hızı ve maksimum aerodinamik verimlilik gibi bilinmeyen parametreleri tanımlamak için MPPT algoritmaları optimum çalışma şartını sağlayarak $\partial P_{wt}/\partial \Omega_l = 0$ değerini almasını sağlar. Bundan dolayı, rüzgar türbini referans hızı $\partial P_{wt}/\partial \Omega_l$ işaretine bağlı olarak Çizelge 5.3’de temel algoritma yer almaktadır. Şekil 5.10 kontrol algoritmasını göstermektedir.

Çizelge 5.3 : MPPT kontrol lojği [21].

$\frac{d\Omega_l}{dt} \cdot \frac{dP_{wt}}{dt}$	< 0	> 0
< 0	$\Omega_l \uparrow$ durumI	$\Omega_l \downarrow$ durumII
> 0	$\Omega_l \downarrow$ durumIII	$\Omega_l \uparrow$ durumIV

Türbin çıkış gücü ölçümü mevcut olmadığından, çıkış gücünün tahmini ölçülen aktif güce dayanır ve işletme noktalarının belirlenmesinde kullanılır. Keza, rotor dönme hızının düşük shaft hızı (DŞH-LSS)’da generatörün ölçülen hızı olarak kullanılır.



Şekil 5.10 : REKS kontrol algoritması (MPPT) [21].

MPPT kontrol algoritması aşağıdaki adımları izler (k. Adım):

1. Dönme hızı $\Omega_k \sim \Omega_l$, elektrik çıkışı $P_k \sim P_{wt}$ ve rüzgar hızı $v_k = v$ ölçülür.
2. Rüzgar hızına bağlı olarak dönme hızı değişim adımı belirlenir, $\Delta \Omega_0$.
3. Güç ve hız değişimi tahmin edilir, işaretler belirlenir:
 $A = isaret((P_k - P_{k-1})/(t_k - t_{k-1}))$ ve $B = isaret((\Omega_k - \Omega_{k-1})/(t_k - t_{k-1}))$.

4. Rotor dönme hız değişiminin işareti belirlenir $isaret(C) = \overline{A \oplus B}$ (Çizelge 5.3) ve k. adımda hız değişiminin değeri elde edilir: $\Delta\Omega_k = isaret(C) \cdot \Delta\Omega_0$.
5. İntegrali alınarak kontrol girdisi elde edilir (yüksek şaft hızı (YŞH-HSS) referans değeri) $\Omega_k^* = \Omega_k + \Delta\Omega_k$; $\Omega_h^* = i \cdot \Omega_k^*$.
6. Diğer rüzgar hızı için (k+1) aynı adımlar tekrarlanır.

Değişken rüzgar hızlarında optimum çalışma noktasının bulunması, mümkün olan maksimum gücün elde edilebilmesi prensibine dayanır. Maksimum gücün elde edileceği noktayı belirlerken, rüzgar hızındaki değişimler ve türbin eylemsizliği bazı kısıtlamalara yol açar. Bunlardan en önemlisi tahmin hataları ve önemli yüksek frekanslı güç dalgalanmalarıdır. Bu etkiler de şebekeyi olumsuz etkilemektedir.

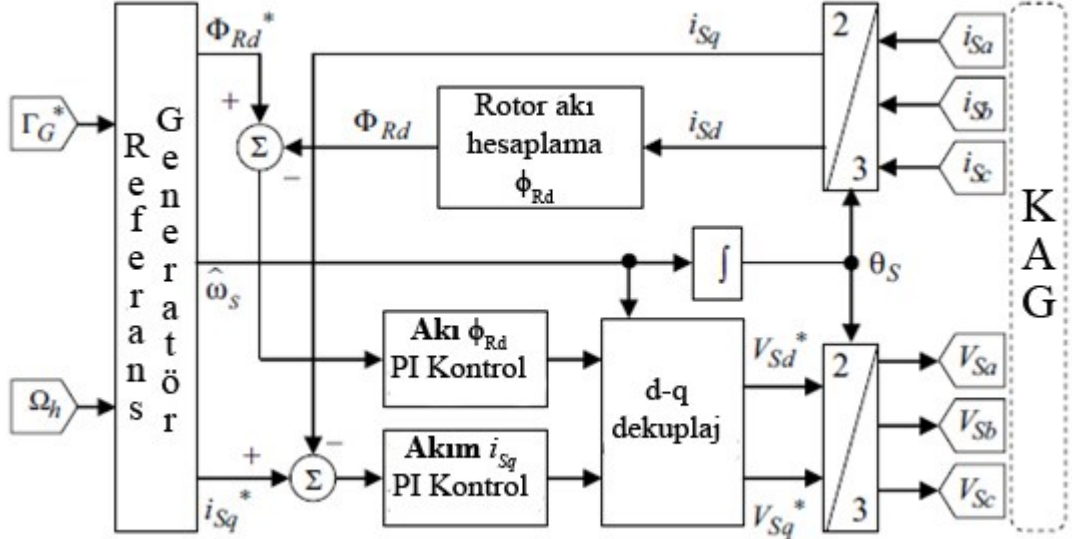
Birinci sorun rüzgar hızı tahmini gibi deneysel metodlarla giderilebilir. İkinci sorun MPPT uygulamasının genişletilerek bulanık mantık teknikleriyle giderilebilir. Temel kurallar $\partial P_{wt} / \partial \Omega_l$ değerinin düşük tutulmasına dayanır. $\Delta\Omega_0$ dönme hızı değişim adımı değişkendir ve hızın optimum çalışma noktasından farkına bağlıdır [21].

5.3.4 PI kontrol

Klasik PI (orantısal integral) endüstride geniş bir uygulama alanında kullanılmaktadır. Dizayn mantığı basit bir geri beslemeye dayanır. Bu geri besleme bilgisi birçok modelleme uygulamasında sistem iyileştirmesi için kullanılır. Yukarıda anlatıldığı üzere sabit kanatlı rüzgar türbinlerinde rüzgardan maksimum enerjinin elde edilebilmesi için rotor dönme hızı optimum şekilde ayarlanır. Benzer şekilde uç hızı da optimum çalışma noktasında tutulmalıdır. Bu çalışma rejimine optimum dönme hızı (rüzgar hızıyla doğru orantılı), veya optimum rotor gücü (dönme hızının küpüyle orantılı) gibi değişkenler yardımıyla ulaşılabilir. PI kontrol hedeflenen dönme hızıyla ölçülen dönme hızı arasındaki farkı sıfırlar ve referans momente erişilmesini sağlar.

$$\Gamma_{wt_{opt}} = \Gamma_{ref} = K \cdot \Omega_{l_{opt}}^3 = \frac{1}{2} \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \rho \pi R^5 \quad (5.59)$$

Bir asenkron makinada PI kontrol vektör kontrolüne dayanır. Şekil 5.11'de KAG vektör kontrolü şeması görülmektedir.



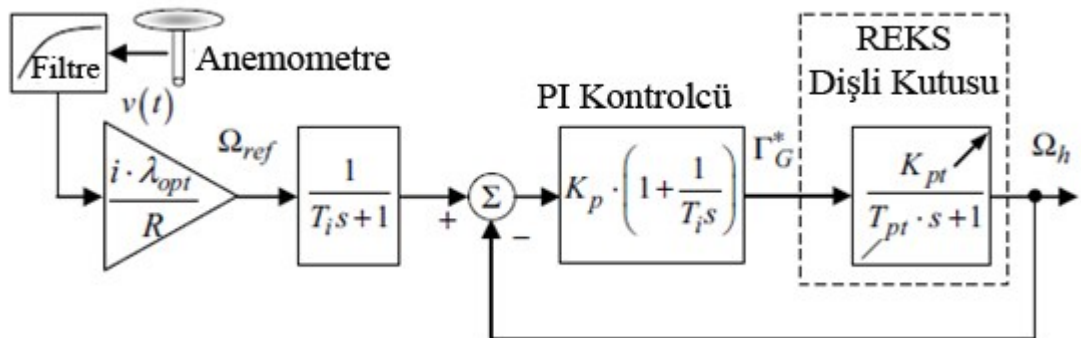
Şekil 5.11 : KAG vektör kontrol şeması [21].

5.3.4.1 Kontrol sistemi

Moment kontrol çevrimi ve referans moment ifadesi aşağıdaki eşitlikte belirtilmiştir. Burada K katsayı ve η dişli kutusunun toplam mekanik verimini ifade eder.

$$\Gamma_{ref} = \frac{K}{i} \cdot \left(\frac{\Omega_h}{i} \right)^2 \cdot \eta \quad (5.60)$$

PI kontrol kararlı hal çalışmada rüzgar hız değişimlerine karşı maksimum enerji verimliliğini sağlamayı amaçlar. Basitleştirilmiş bir kapalı çevrim yapısı Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Güç aktarım ünitesi $T_{pt} = 1/K_2$ ve $K_{pt} = K_1/K_2$ olmak üzere ve $K_1 = 1/J_h$ ve $K_2 = (-\partial\Gamma_{wt}/\partial\Omega_l)/(i \cdot J_h)$ olmak üzere model aşağıdaki gibidir:



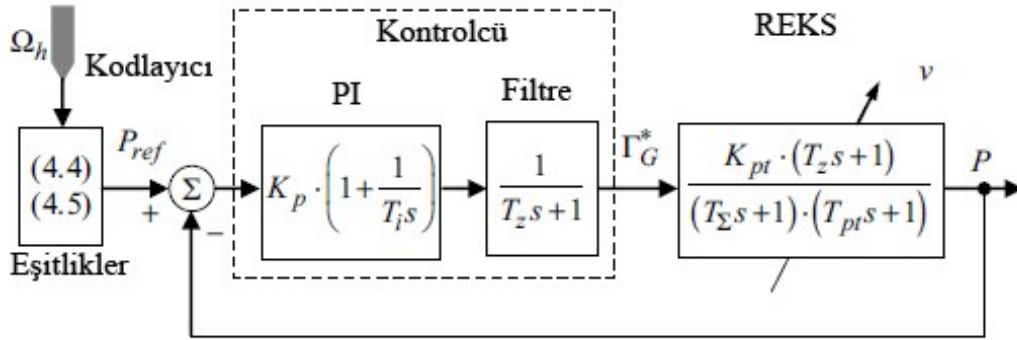
Şekil 5.12 : Kararlı hal kapalı çevrim hız kontrolü [21].

İkinci derece dinamik sistemin katsayıları doğal frekans ω_n ile sönüm oranı ζ kullanılarak aşağıda ifade edilmiştir:

$$T_i = \frac{2\zeta}{\omega_n} - \frac{1}{\omega_n^2 \cdot T_{pt}} \quad (5.61)$$

$$K_p = \frac{T_i \cdot T_{pt}}{K_{pt}} \cdot \omega_n^2 \quad (5.62)$$

Yüksek K_p değeri daha iyi bir performans sağlamakla birlikte moment kontrolünün bir limiti olacağından ötürü K_p 'nin de bir sınırı olacaktır. Bir rüzgar türbininde sistem girişine elektromagnetik moment uygulanırken, generatörden elde edilen aktif güç sistemin çıkışını oluşturur. Kontrol algoritması sistem girişinde değişime neden olacak rüzgar değişimlerindeki güç değişimini kontrol etmek üzere dizayn edilir.



Şekil 5.13 : Optimum elektromagnetik momentin hesabı [21].

Ana zaman sabiti $T_i = T_{pt}$ olmak üzere sistem sıfırı kontrol sistemine entegre edilmiş birinci derece T_z zaman sabitli bir filtre ile kompanse edilir. Bu nedenle Şekil 5.13'de gösterilen bu kontrol sisteminde bir PI filtreleme uygulanır. Bu gibi kapalı çevrim sistemler ikinci dereceden bir sistem dinamiğine sahiptirler. Kapalı devre çevrim kullanılmasından ötürü sistem dinamiği T_{loop} olmak üzere kontrol sisteminin kazancı (gain):

$$K_p = \frac{T_{pt} \cdot T_{\Sigma}}{K_{pt} \cdot T_{loop}^2} \quad (5.63)$$

Böylece kapalı çevrim bir kontrol sistemi ile seçilen işletme noktası sağlanır. Olabilecek en büyük kazanç K_p değeri sistem hatasını azaltır. [21]

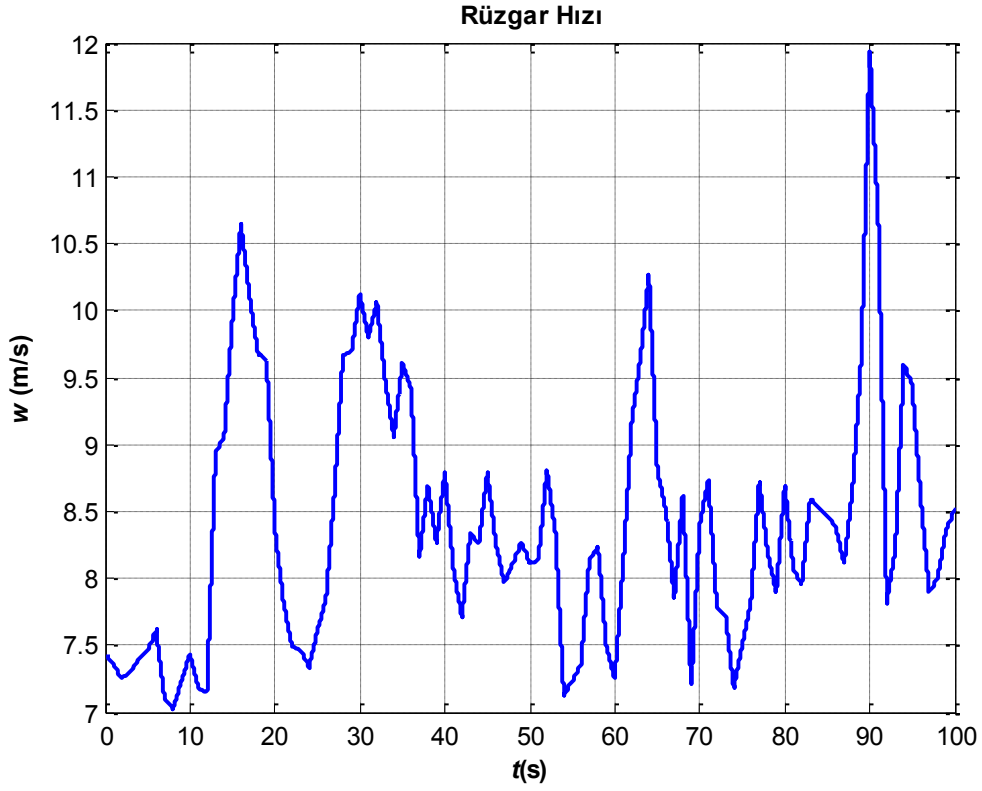
5.4 2 Uygulama-2: 2 MW REKS optimum PI kontrol uygulaması

Çizelge A.2’de parametreleri verilmiş olan 2 MW kafesli asenkron makina (KAG) kullanılan bir REKS’de PI kontrol yapılarak değişken rüzgar hızlarında optimum çalışma sağlanacaktır. Değişen rüzgar hızların karşı optimum uç hızı ve rotor dönme hızı elektriksel olarak kontrol edilecek bir MATLAB-Simulink uygulaması kurulacaktır. Kullanılan bloklar ve algoritmalar aşağıda adım adım açıklanmıştır.

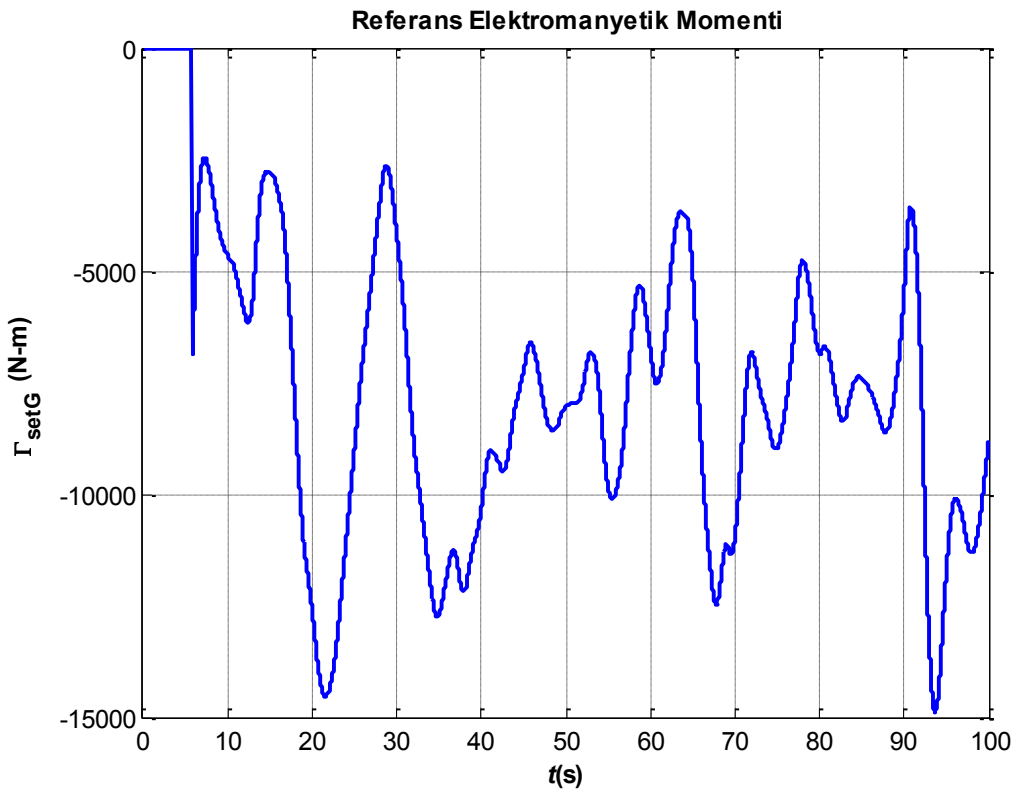
5.4.1 Rotor dönme hızının kontrolü

Eşitlikler (5.59)- (5.63) ‘den yararlanarak ve Şekil 5.12’de gösterilen blok şeması kullanılarak rotor dönüşü rüzgar hızına bağlı olacak şekilde bir PI kontrol döngüsünden geçirilir. Kullanılan rüzgar türbininin optimum kanat ucu hızı $\lambda_{opt} = 7$ olduğundan rotor dönme hızı optimum çalışma aralığına ayarlanır. Yüksek shaft hızı (YŞH-HSS) optimum Ω_h değeri belirlenir.

Sonrasında eklenen PI kontrol sisteminde doğal frekans $\omega_n = 0.66 \text{ rad/s}$ ve sönüm oranı $\zeta = 0.7$ olmak üzere zaman sabiti $T_i = 1.88 \text{ s}$ ve kazanç faktörü $K_p = 733$ olarak hesaplanır. Böylece elde edilen optimum Ω_h dönme hızı ölçülen dönme hızı ile karşılaştırılır. Elde edilen hız hatası PI kontrolü ile indirgenir ve elde edilen kazanç faktörü yardımıyla yükseltilerek referans elektromagnetik moment ifadesi elde edilir. Türbin parametrelerinde yazılan maksimum elektomagnetik moment ifadesinin 15’de biri $emT_{max}/15$ güvenlik faktörü olarak yer almıştır. Böylece referans elektromagnetik moment ifadesi set_emT elde edilir ve türbin set edilir. Modellemede kullanılan rüzgar hız girişi Şekil 5.14’de gösterilmiştir.



Şekil 5.14 : Rüzgar hızı değişimi



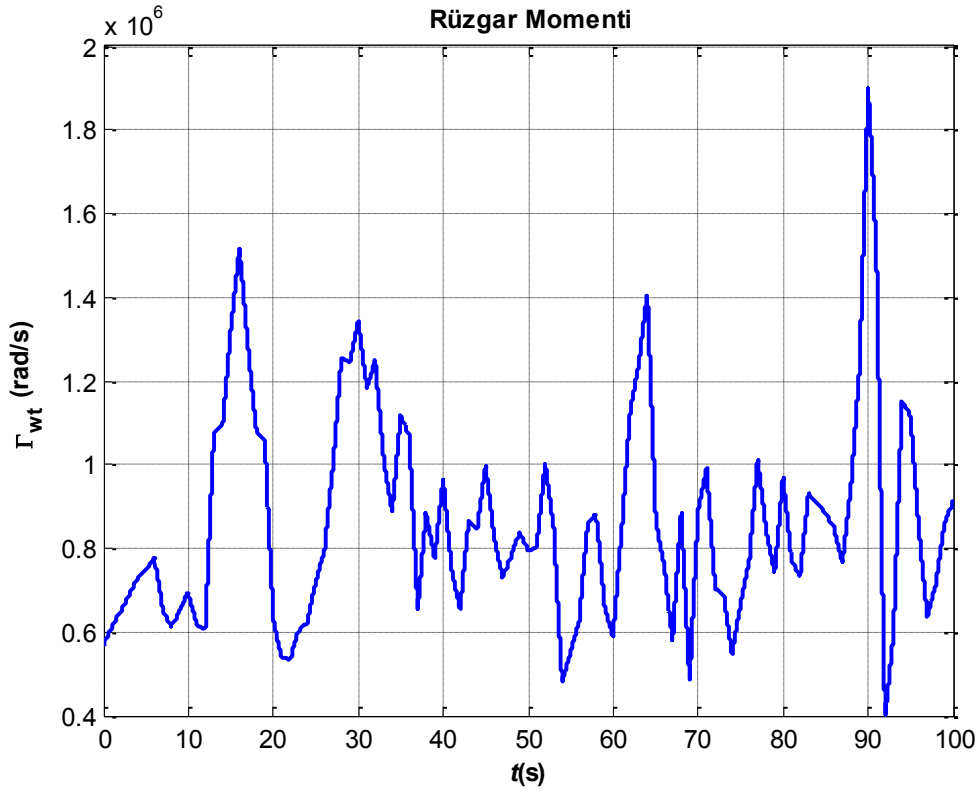
Şekil 5.15 : Referans elektromanyetik moment ifadesi Γ_G

Elde edilen referans elektromagnetik moment Şekil 5.15’de gösterilmiştir. Rüzgar hızındaki zamana bağlı değişime karşın, optimum çalışmanın sağlanabilmesi için generatör elektromagnetik momentini hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere rüzgar hızındaki artış generatör momentini negatif yönde arttırmaktadır.

5.4.2 Rüzgar momenti ve aerodinamik modelleme

Rotor dönme hızı Ω_l ve rüzgar hızının v uç hızını tanımladığı bilindiğinden bu iki giriş parametresi kullanılarak rüzgarın endüklediği Γ_{wt} rüzgar momenti hesaplanır. Moment katsayısı $C_\Gamma = C_p / \lambda$ olmak üzere aşağıdaki eşitlik algoritması kurularak rüzgar momenti hesaplanır:

$$\Gamma_{wt} = \frac{P_{wt}}{\Omega_l} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot v^2 \cdot R^3 \cdot C_\Gamma(\lambda) \quad (5.64)$$



Şekil 5.16 : Rüzgar momenti Γ_{wt}

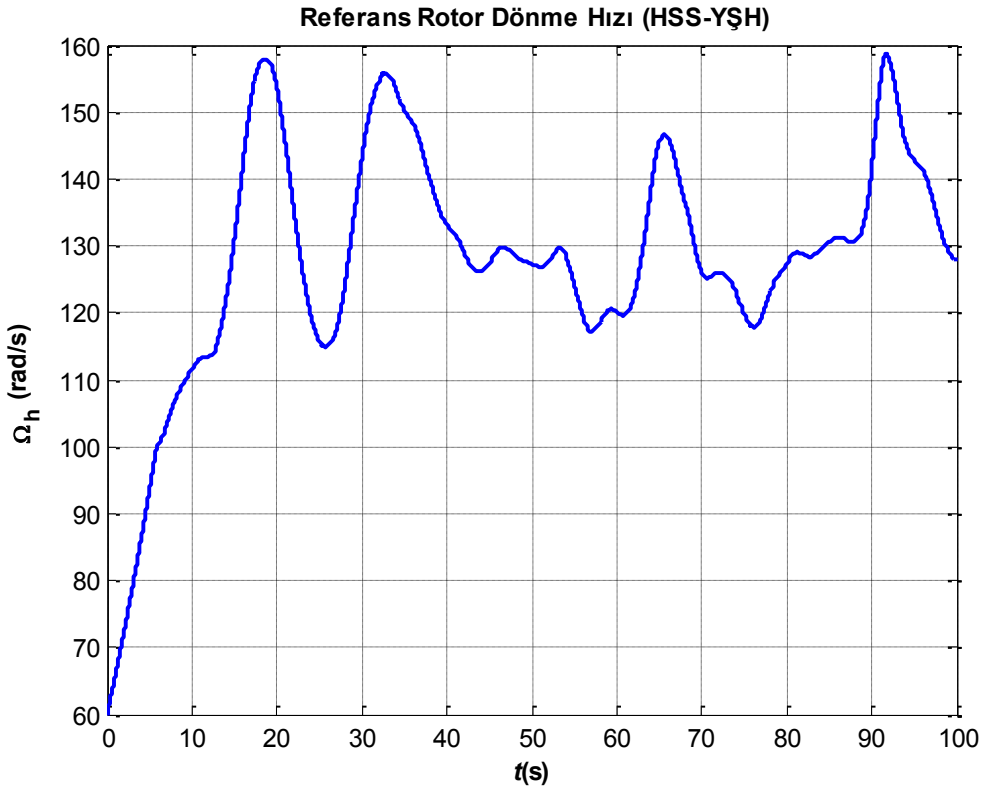
Rotorun sahip olduğu eylemsizlik momenti J_{wt} de eklendiğinde aerodinamik modelleme tamamlanır. Elde edilen rüzgar momenti daha sonra elektromagnetik

moment ifadesi ile dişli modeline iletilir. Elde edilen rüzgar momenti ifadesi Şekil 5.16’da gösterilmiştir:

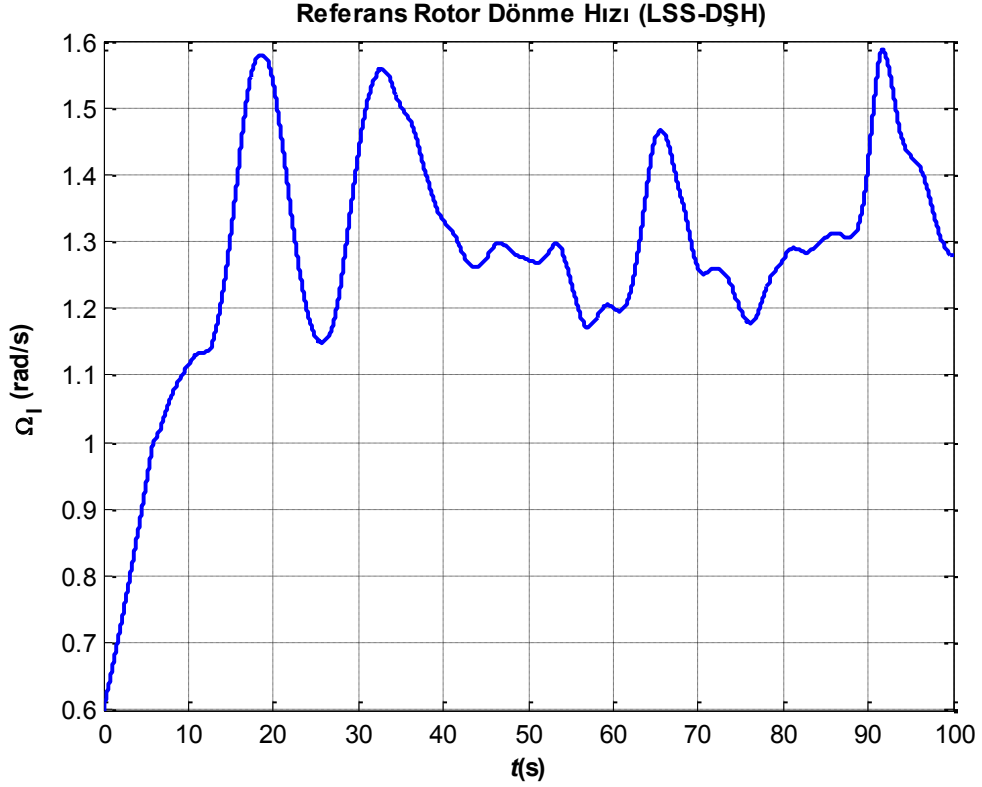
5.4.3 Dişli kutusu modellemesi

Rüzgar türbinlerinde kullanılan dişli kutusunun moment denklemleri Eşitlikler (3.1)-(3.4) ifadeleri kullanılarak kurulan algorithmada dişli kutusunun LSS eylemsizlik momenti $J_{d_l} = J_1$ ve HSS eylemsizlik momenti $J_{d_h} = J_2$ eklendiğinde yüksek şaft dönme hızı (YŞH-HSS) Ω_h ve düşük şaft dönme hızı (DŞH-LSS) elde Ω_l edilir. Dişli kutusu algoritması türbin rotoru ile generatör arasındaki bağlantının kararlı hal çalışma karakteristiğini tanımlar. Γ_{wt} ile Γ_G moment-dönme hızı grafiklerinin kesiştiği noktalar optimum çalışma noktaları olarak ifade edilirler. Böylelikle dişli kutusunun giriş ve çıkışındaki dönme hızları belirlenir.

Burada Ω_l rüzgar momenti ve aerodinamik modelleme algoritmasında kullanılmak üzere giriş verisi olarak kullanılırken Ω_h ise KAG vektör kontrol modellemesine aktarılır. Rotor dönme hızları Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de gösterilmiştir.



Şekil 5.17 : Referans Rotor dönme hızı Ω_h



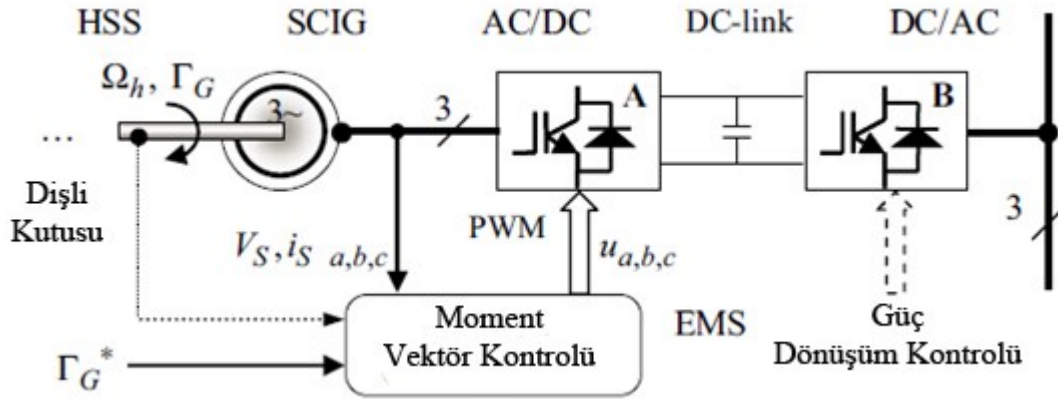
Şekil 5.18 : Referans Rotor dönme hızı Ω_r

5.4.4 KAG vektör kontrolü

Elde edilen Ω_r rotor dönme hızı ve KAG stator akımları kullanılarak generatör statorunda endüklenen gerilim ve açısal frekans ifadeleri indirekt vektör kontrolü yardımıyla yapılır. Asenkron makina kontrolünde oldukça popüler olan bu kontrol yönteminin şeması Şekil 5.19'da gösterilmiştir. AC-AC dönüştürücü ünitelere uygulanan giriş kontrol ifadesi asenkron makina d-q eksen takımı modellemesini oluşturur. Bu tekniğe göre moment kontrolü performansı çok iyi bir netice verirken salınımlara karşı uyumu değişken rüzgar hızlarında rüzgar enerji sistemlerine uygulanabilirliklerini arttırmaktadır. Vektör kontrol sistemi özellikle KAG'lara uygulanmaktadır.

AC-AC dönüştürücüler makina ve şebeke tarafı olmak üzere ikiye ayrılır. Makina tarafındaki AC/DC doğrultucu (A), yüksek shaft hızı (YŞH-HSS) momentinin generatör momentini kontrolü ile değiştirilebilmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla türbin değişken rüzgar hızlarına uyum sağlayabilmektedir. Şebeke tarafındaki DC/AC inverteri üretilen elektrik enerjisini çıkış geriliminin frekansını ve gerilimi kontrol ederek şebekeye iletmek için kullanılır. Burada vektör kontrolü yardımıyla

generatör momentinin kontrolüyle HSS momentini kontrol edilecek ve türbinin değişken rüzgar hızlarında kontrolü sağlanmış olacaktır [21].



Şekil 5.19 : İndirekt vektör kontrol şeması (KAG) [21].

Değişen rüzgar hızına karşı set edilen optimum çalışmadaki optimum elektromagnetik momente bağlı olarak sistem stator gerilimini ve stator akı açısı θ_s üretir. Elektromagnetik moment ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\Gamma_G = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot (i_{sq} \cdot \phi_{rd} - \phi_{rq} \cdot i_{sq}) \quad (5.65)$$

Rotor alanı d-eksenine yönlendirildiği öngörüldüğünde $\phi_{rq} = 0$ olur. Bu bilgiler ışığında Eşitlik (5.43) - (5.46) denklemleri yardımıyla aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

$$\Gamma_G = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot i_{sq} \cdot \phi_{rd} \quad (5.66)$$

$$\frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{d\phi_{rd}}{dt} + \phi_{rd} = L_m \cdot i \quad (5.67)$$

$$\omega_s = p \cdot \Omega + \frac{L_m}{\phi_{rd}} \cdot \frac{R_r}{L_r} \cdot i \quad (5.68)$$

KAG modelindeki yukarıdaki denklem kullanılarak alan yönlendirmeli matematiksel moment elde edilebilir:

$$\phi_{rd}(s) = M(s) \cdot (V_{sd}(s) + N(s) \cdot I_{sq}(s)) \quad (5.69)$$

$$I_{sq}(s) = P(s) \cdot (V_{sq}(s) - R(s) \cdot \phi_{rd}(s)) \quad (5.70)$$

Burada yer alan katsayılar aşağıdaki gibidir:

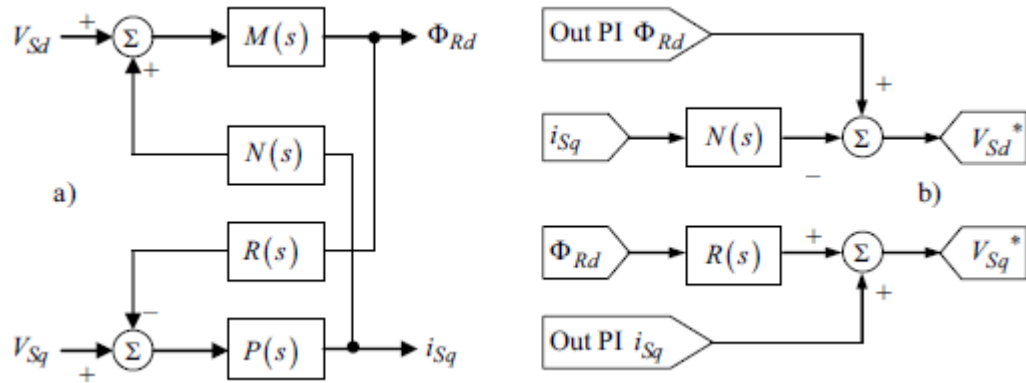
$$M(s) = \frac{1}{\left[(R_s + \sigma L_s \cdot s) \cdot \frac{1 + L_r/R_r \cdot s}{L_m} + \frac{L_m}{L_r} \cdot s \right]} \quad (5.71)$$

$$N(s) = \omega_s \cdot \sigma L_s \quad (5.72)$$

$$P(s) = \frac{1}{R_s + \sigma L_s \cdot s} \quad (5.73)$$

$$R(s) = \omega_s \cdot \left(\sigma L_s \cdot \frac{1 + L_r/R_r \cdot s}{L_m} + \frac{L_m}{L_r} \right) \quad (5.74)$$

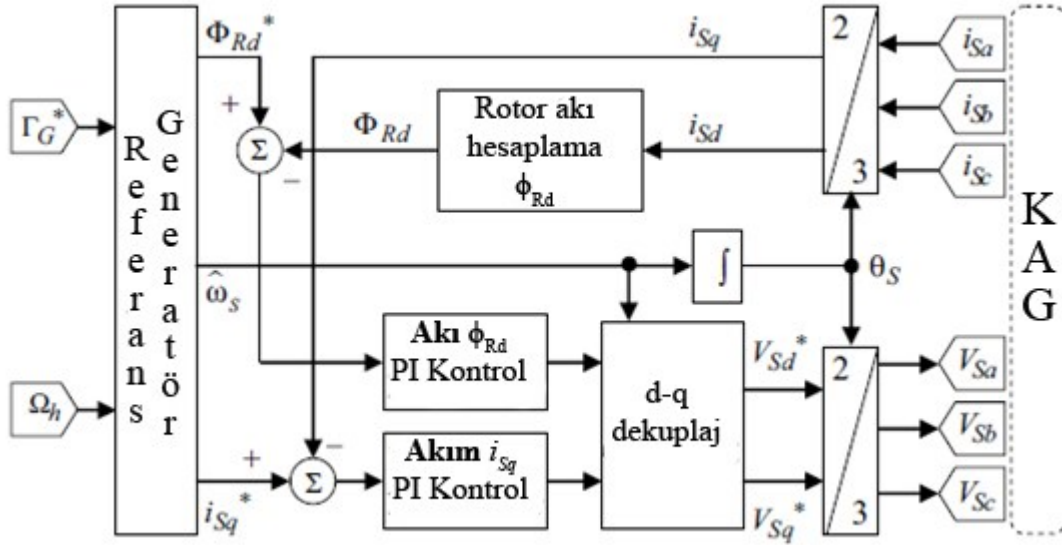
Bu denklemler üzerine kurulan modelleme Şekil 5.20'de gösterilmiştir. Bu model uyarınca PI kontrol yardımıyla $V_{sd} \rightarrow \phi_{rd}$ ile $V_{sq} \rightarrow i_{sq}$ arasında ortogonal bir dekuplaj oluşturularak generatör momenti kontrol edilebilir.



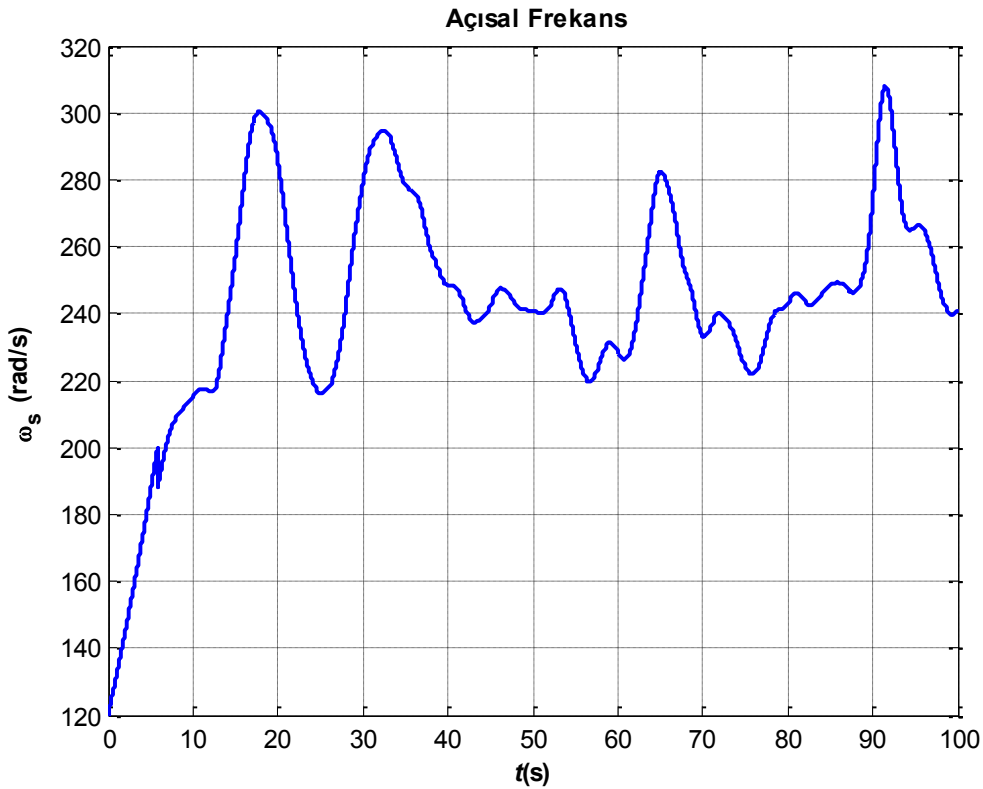
Şekil 5.20 : a) Rotor alan-yönlendirmeli KAG modeli b) d-q dekuplaj modeli [21].

Bu yaklaşımdan yola çıkarak bu çalışmada Şekil 5.21'de temelleri gösterilen ve endüstride yaygın bir şekilde kullanılan vektör kontrolü kullanılmıştır. Referans moment ifadesi ile elde edilen HSS dönme hızı ifadeleri kullanılarak iki dekuplaj çevrimi oluşturulur. Bunlardan birincisi rotor akı çevrimidir. Bu çevrim sayesinde asenkron makinanın alan yönlendirmesi sağlanarak ϕ_{rd} kontrol edilir. İkinci çevrim ise moment çevrimidir. i_{sq} kontrolü için elektromantik moment kontrolü sağlanır.

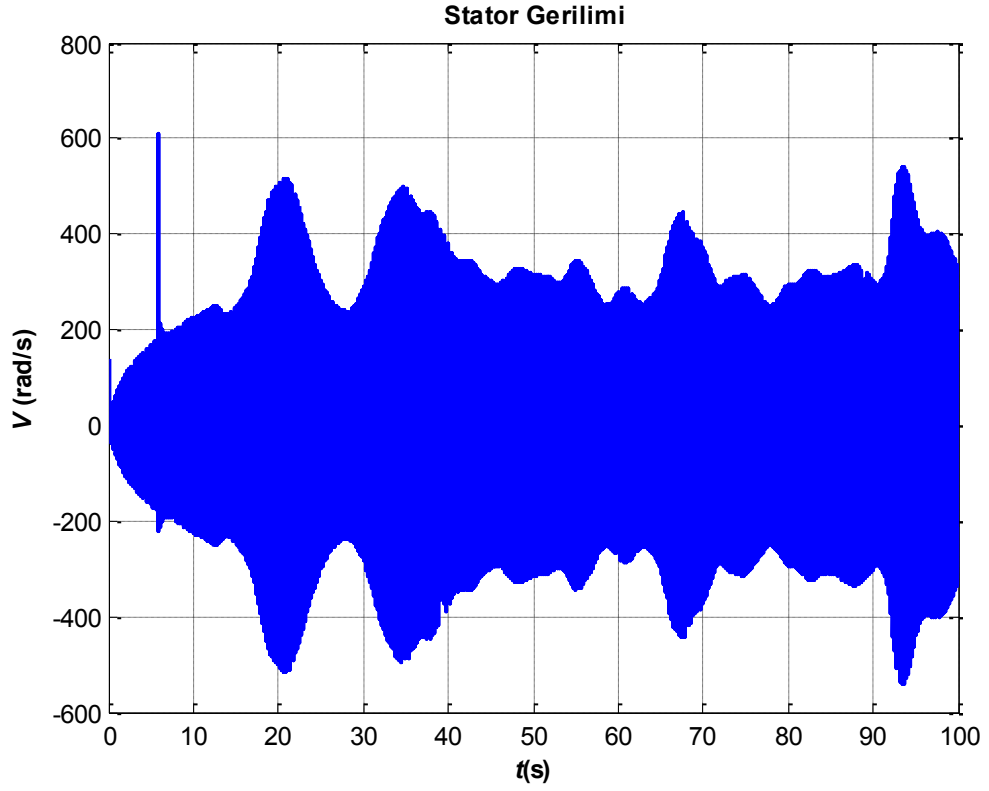
Böylelikle hızlı ve kesin moment kontrolü sağlanır. Stator gerilim ifadesi doğrudan asenkron makinaya bağlanır. KAG indirekt algoritması sonuçları Şekil 5.22’de gösterilmiştir. Vektör kontrol algoritmasında elde edilen stator gerilim ifadesi grafiği Şekil 5.23’de gösterilmiştir. Şekil 5.24’de ise 0-0.2 saniye arasında üç fazlı stator sinüsoidal gerilimi gözlemlenmektedir.



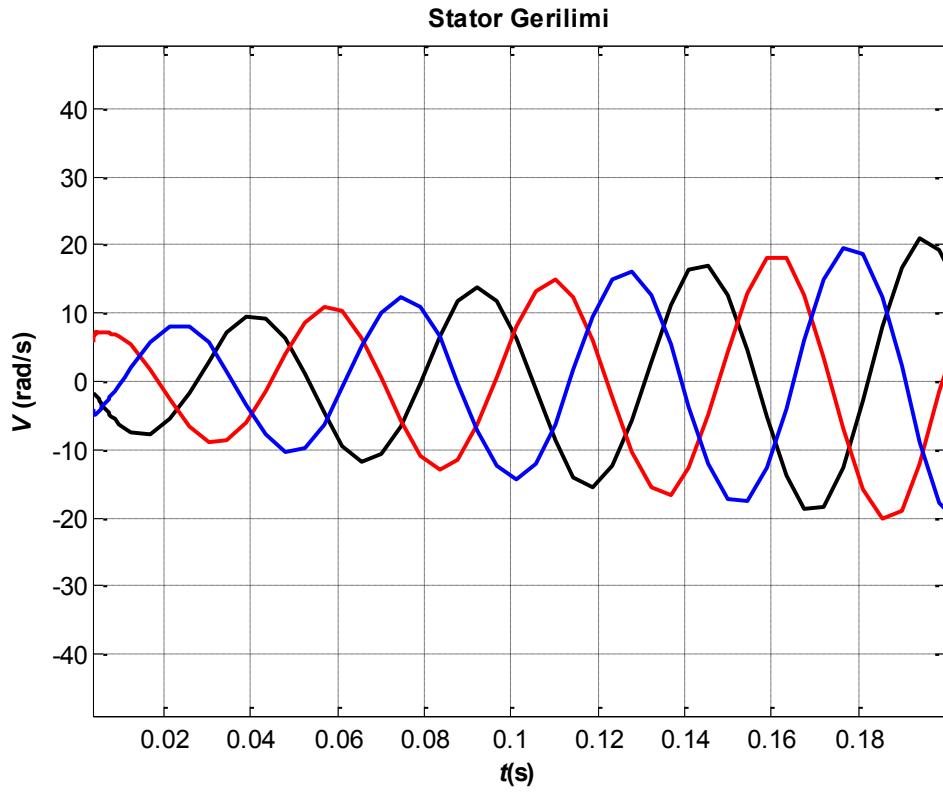
Şekil 5.21 : KAG (indirekt) vektör kontrolü [21]



Şekil 5.22 : Açısal Frekans ω_s



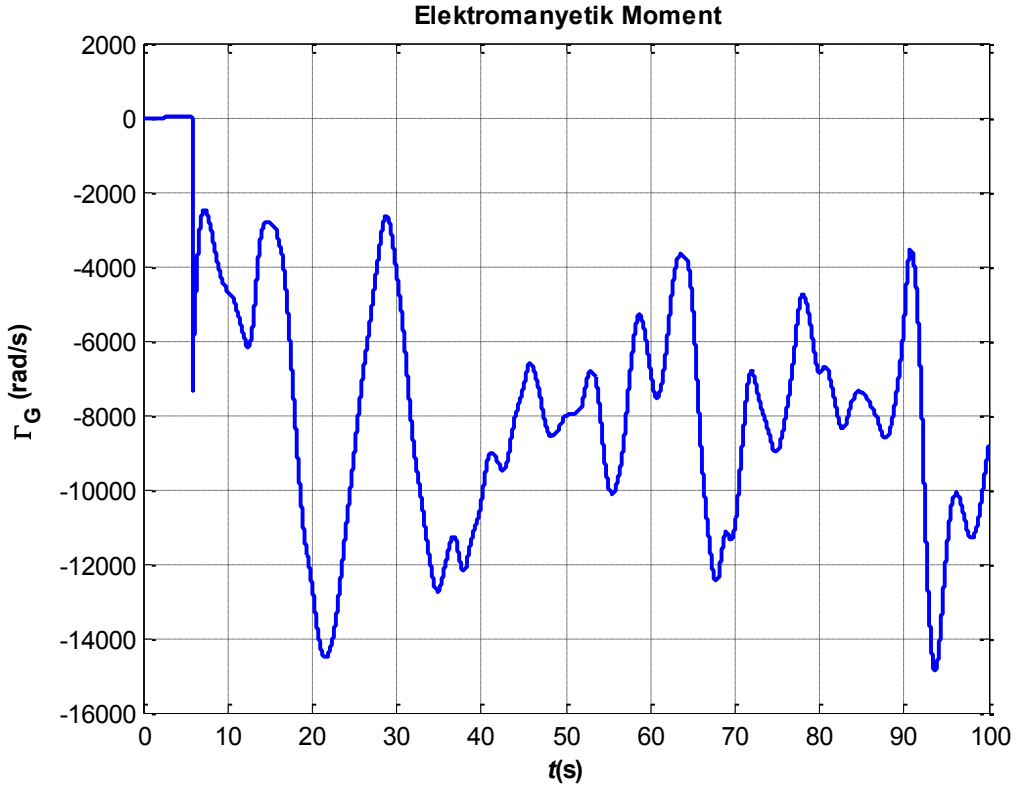
Şekil 5.23 : Stator Gerilimi V_s



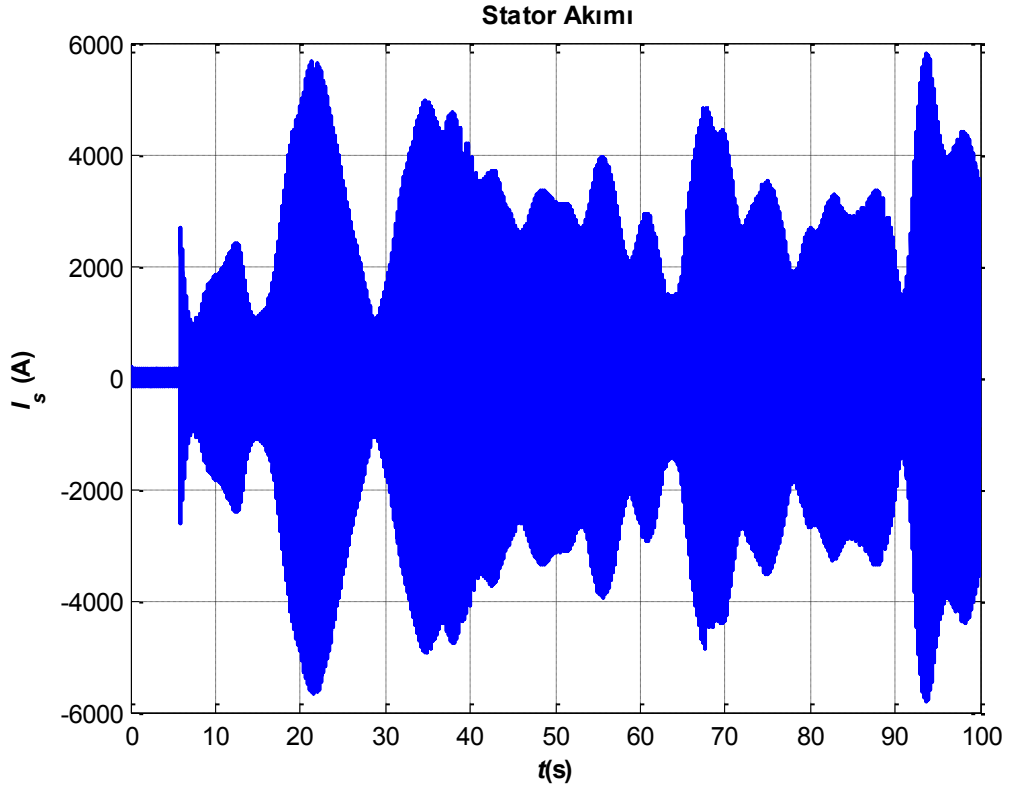
Şekil 5.24 : Stator Gerilimi 0-0.2 s arasında V_s

5.4.5 KAG modellemesi

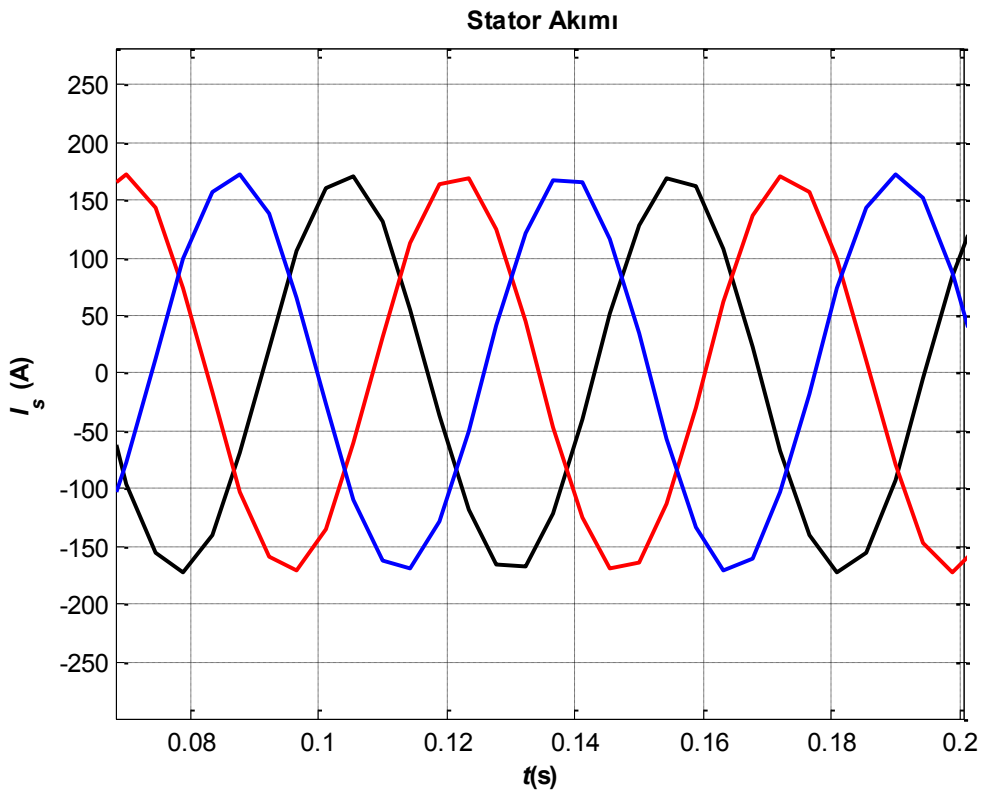
KAG dinamik modeli kurularak elde edilen stator gerilimi V_s , rotor dönme hızı Ω_h ve açısal frekans ω_s kullanılarak bir algoritma kurulmuştur. Kısa devre rotorlu KAG rotor gerilimleri $V_{rd} = V_{rq} = 0$ 'dır. KAG parametreleri Eşitlikler (5.43) - (5.46) denklemlerindeki A ve B katsayıları modellemeye girilmiştir. Burada $R_s, R_r, L_s, L_r, L_m, p$ parametreleri girilerek stator akımının d-q eksen bileşenleri, rotor akımının d-q eksen bileşenleri ve elektromagnetik moment ifadeleri elde edilir. Sistem çıkışındaki stator akımı vektör kontrol sistemine geri beslemede kullanılmak üzere giriş sistemine uygulanırken elektromagnetik moment ifadesi dişli kutusu algoritmasında kullanılmaktadır. Kurulan algoritma sonunda KAG elektromagnetik momenti ve stator akım değişimi Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'de gösterilmiştir. Stator akımının 0-0.2 saniye süreleri arasındaki sinüsoidal akım şekli Şekil 5.27'de gösterilmiştir.



Şekil 5.25 : Asenkron generatör elektromagnetik momenti Γ_G



Şekil 5.26 : Stator akımı



Şekil 5.27 : Stator akımı

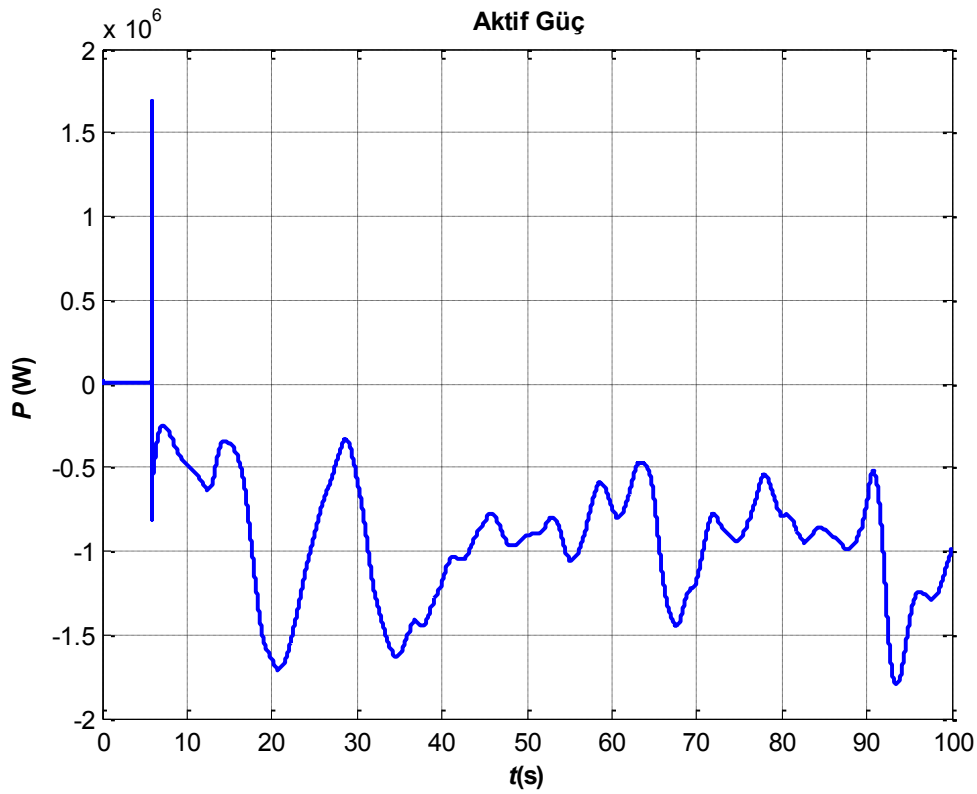
5.4.6 Güç hesaplaması

Sistem tamamlandıktan, stator akım ve gerilim ifadeleri elde edildikten sonra generatörde üretilen gücün ifadeleri yazılır:

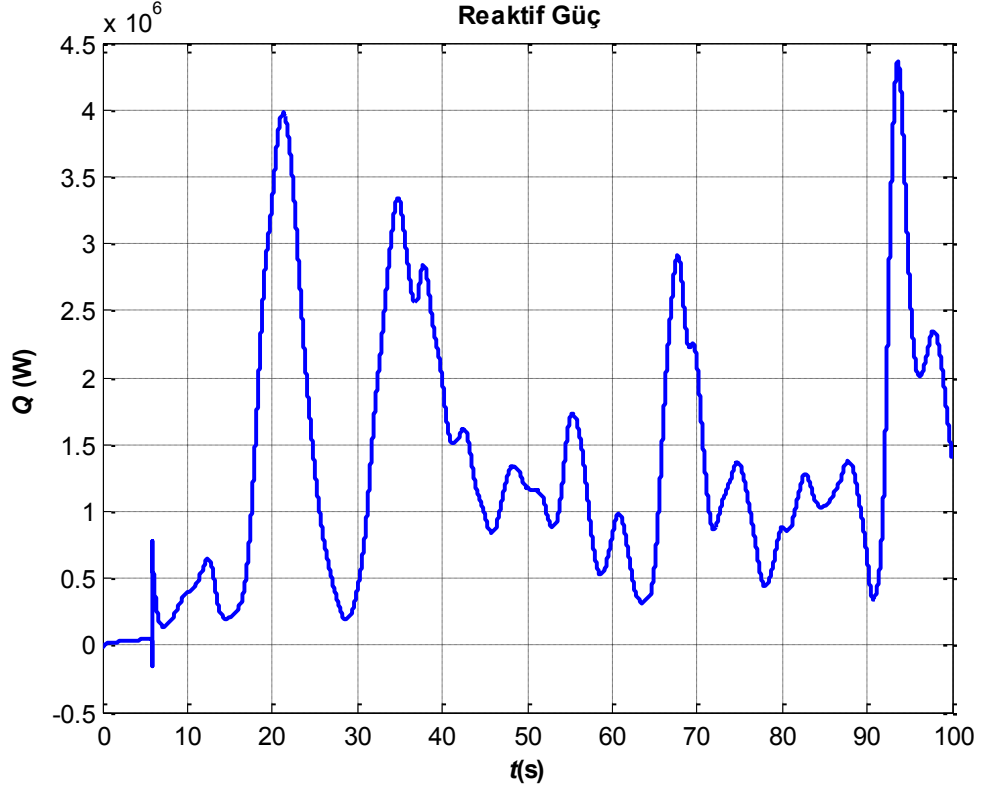
$$P = 3/2(V_{sd} \cdot I_{sd} + V_{sq} \cdot I_{sq}) \quad (5.75)$$

$$Q = 3/2(V_{sq} \cdot I_{sd} + V_{sd} \cdot I_{sq}) \quad (5.76)$$

Elde edilen aktif ve reaktif güç ifadeleri Şekil 5.28 ve Şekil 5.29'da gösterilmiştir. Reaktif güç grafiğine bakıldığında KAG tipik özelliği olarak rüzgar hızının arttığı noktalarda asenkron generatörün ihtiyaç duyduğu reaktif güç değeri artmaktadır.



Şekil 5.28 : Aktif Güç P



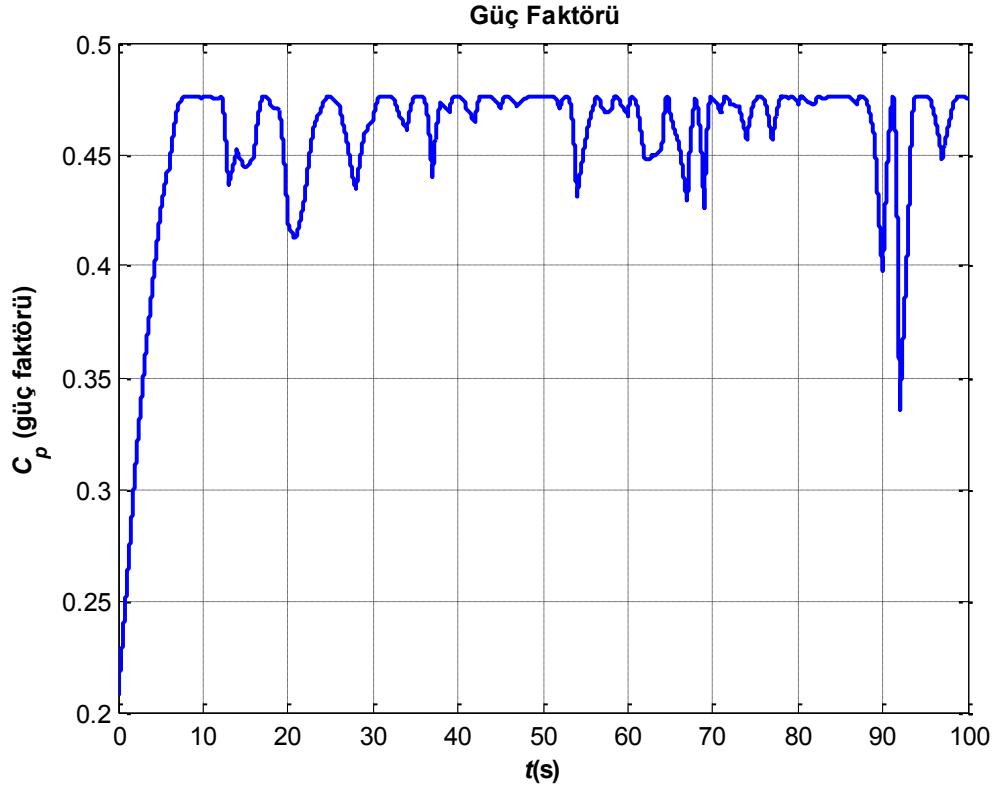
Şekil 5.29 : Reaktif Güç Q

5.4.7 Diğer sonuçlar

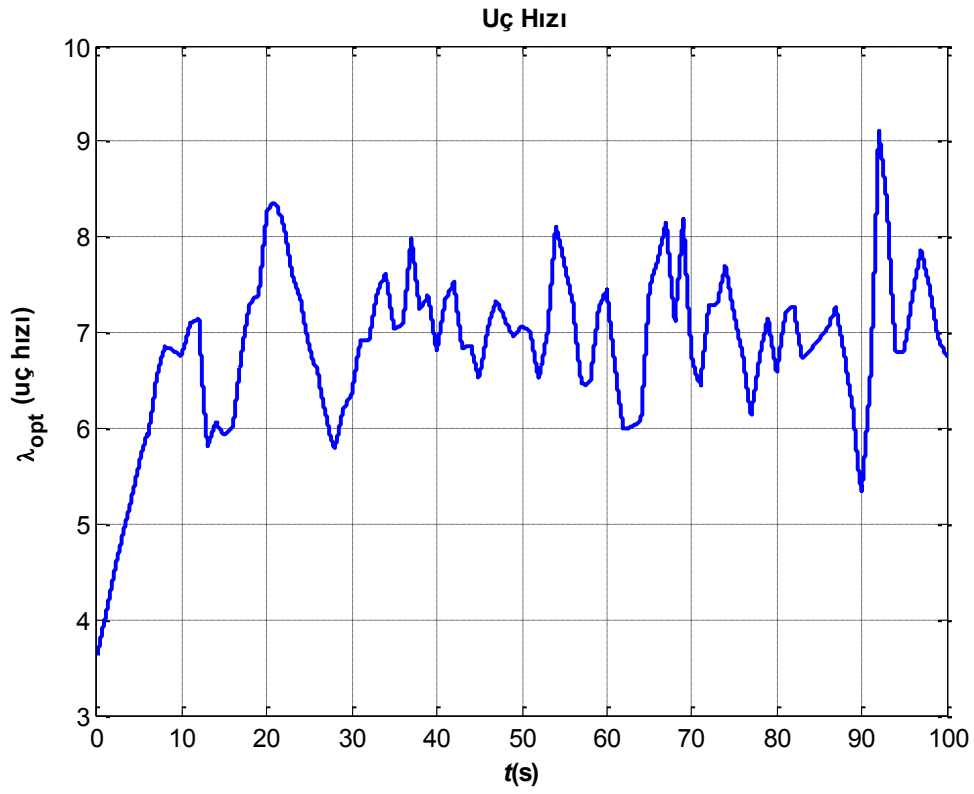
Kurulan bu model sonucunda rüzgar türbininin güç katsayısının değişimi Şekil 5.30'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere farklı rüzgar hızlarına karşılık güç faktörü C_p değeri optimum çalışma şartını sağlamıştır. Rüzgar türbini karakteristik özelliği gereği maksimum güç faktörü $C_{p_max} = 0.47$ ile sınırlandırılmıştır.

Güç katsayısının optimum olabilmesi değişen rüzgar hızlarına karşın kanat uç hızı oranının optimum şartda tutulmasına bağlıdır. Seçilen rüzgar türbininde nominal rüzgar hızında optimum uç hızı oranı $\lambda_{opt} = 7.5$ olarak belirlenmiştir. Bu modellemede elde edilen optimum uç hızı oranları Şekil 5.31'de gösterilmiştir.

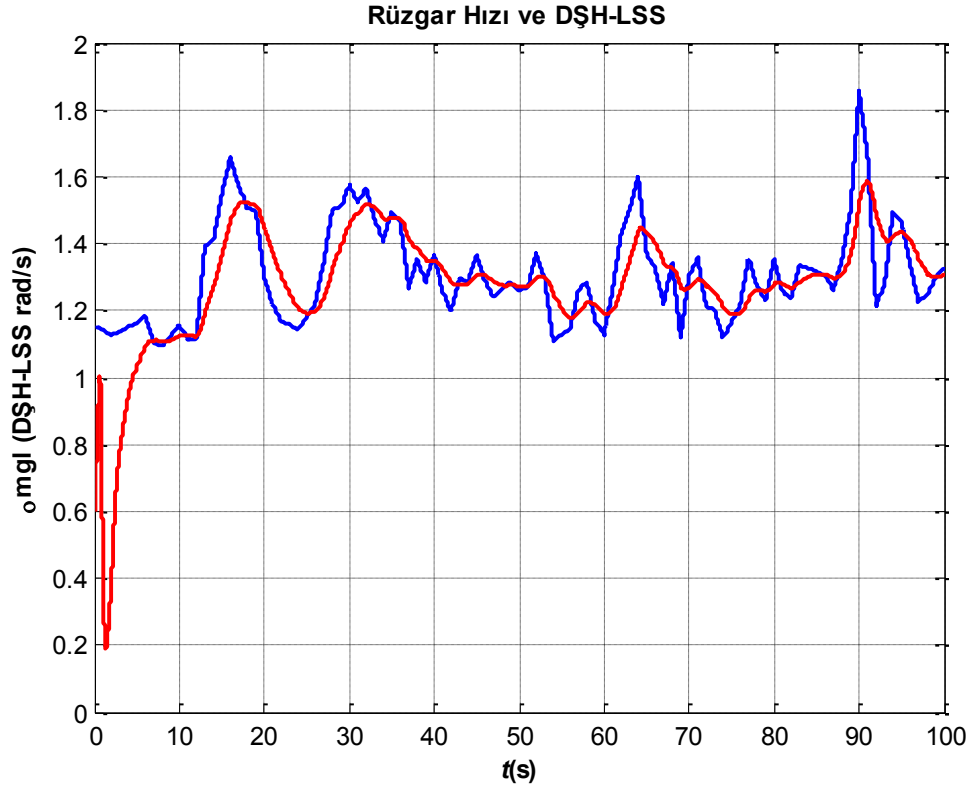
Rüzgar hızı ile LSS rotor dönme hızı arasındaki ilişki de Şekil 5.32'da gösterilmiştir. Rüzgar hızındaki ani değişimlere karşı rotor en olası hızda ve kararlı halde sürülmektedir. Bu da hem türbin salınımlarını azaltmakta hem de güç çıkışını kontrol etmektedir.



Şekil 5.30 : Güç faktörü C_p



Şekil 5.31 : Uç Hızı λ



Şekil 5.32 : Rüzgar hızı ve LSS-DŞH

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Artan dünya enerji ihtiyacı ve fosil yakıtlara bağıllık devletleri yeni enerji kaynaklarını kullanmaya ve yatırım yapmaya teşvik etmektedir. Özellikle temel yükleri karşılayan ve kömür, doğal gaz ve petrole dayalı enerji üretim sistemi fosil yakıtlar bakımından fakir devletler için büyük bir cari açık yükü getirmektedir. Karbon bakımından zengin bu fosil yakıtların tüketiminin doğaya olan sera gazı etkisi dünya devletlerince ayrıca değerlendirilen büyük bir problemdir. Karbon salımlarına yönelik yapılan tahmin ve senaryolar özellikle OECD devletlerinin yakın gelecekte karbon salımlarını azaltmamaları halinde oldukça ciddi bir global ısınmanın dünyayı etkisi altına alabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynakları hem yakıt maliyetlerinin olmaması, hem çevreye olan etkilerinin çok az olması açısından tercih edilir konuma gelmiştir. Rüzgar enerjisi son yıllarda popülerliğini arttıran ve sürekli gelişen teknolojiyle birlikte çokça kullanılan bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak ele alınmaya başlanmıştır.

2040 yılına yönelik yapılan tahmin çalışmalarında insan nüfusunun 9 milyar insana ulaşması beklenmektedir ki bu da bugünkü nüfus rakamlarına 2 milyar insan eklenmesi anlamına gelmektedir. Bu nüfus artışının enerji tüketimini %52 oranında arttırması beklenmektedir. Güncel enerji tüketim rakamlarına bakıldığında, IEO2013 verilerine göre dünya toplam enerji tüketiminin %82'sinin fosil yakıtlardan karşılandığı görülmektedir. Bu da enerji üretimindeki fosil yakıtlara olan bağıllığı göz önüne sermektedir. Benzer şekilde süregelen senaryolar fosil yakıtların ileri yıllarda da büyük oranda enerji üretim ve tüketimindeki yerinin büyük olacağını söylemektedir. Fosil yakıtların dünyaya homojen şekilde dağılmaması birçok fosil yakıt yoksunu ülkeyi enerji ithal etmek zorunda bırakmakta, geçmişe dönük birçok savaşın da temel kaynağı enerji olarak ortaya konmaktadır. Enerji çeşitliliğinin sağlanması, riskin düşürülmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payınının arttırılması oldukça önemlidir.

Rüzgar enerjisi bu noktada birçok devlet tarafından önemsenen ve yatırım yapılan bir yenilenebilir enerji kaynağı türüdür. Birçok gelişmiş devlet enerji politikalarını revize ederek rüzgar yatırımlarını arttırma ve toplam kurulu güç içerisindeki payının %20-30'a çıkarılması yönünde politikalar oluşturmaktadır. Benzer şekilde Türkiye hükümeti de 2023 yılı hedefini rüzgar enerjisi kurulu gücünü 20.000 MW'a çıkarmak şeklinde deklare etmektedir.

Rüzgar enerjisi rüzgarın akışından dolayı sahip olduğu kinetik enerjiyi önce kanatlar yardımıyla dönme yani mekanik enerjiye çevirme, sonrasında da generatörler yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürme prensibine dayanır. \mathcal{V} hızındaki bir rüzgar akışı $P_v = \frac{1}{2} \rho A \mathcal{V}^3$ gücüne sahiptir. Ancak akış dinamiği disk konseptine göre bu kinetik enerjinin tamamı rotor şaftına aktarılamaz. Betz limitine göre teorik olarak kinetik enerjinin maksimum %59'u rotor şaftına mekanik enerji olarak aktarılır. Pratikte ise rüzgar türbinleri rüzgarın enerjisini %45'e kadar rotor şaftına aktarabilmektedir. Her bir rüzgar türbini belli bir rüzgar hızında nominal güç çıkışı verebilmektedir. Nominal rüzgar hızının altındaki rüzgar hızlarında rüzgar hızının küpüyle değişerek güç azalmaktadır. Nominal rüzgar hızından yüksek hızlarda ise güç çıkışı generatörün yapısı nedeniyle sabit tutulmaktadır. Rüzgar hızı zamanla değişen ve tahmin edilmesi güç bir parametre olması nedeniyle rüzgar türbinleri yıl içerisinde nominal güçlerinin tamamını elektrik enerjisine dönüştüremezler. Türbinlerin kapasite faktörleri çoğunlukla %25-40 arası olarak ifade edilmektedir.

Asenkron makineler basit yapıları ve değişken hızlara olan uyumlulukları nedeniyle rüzgar türbinlerinde çoklukla kullanılırlar. Değişen rüzgar hızlarında rotor hızı kontrol edilerek optimum çalışma şartı sağlanması yoluyla türbin verimleri yükseltilebilir. Asenkron makineler senkron hızın altında motor modunda çalışırken senkron hızın üzerindeki hızlarda endüklenen elektromagnetik moment negatif olduğundan dolayı makina generatör modda çalışarak elektrik üretir. Kafesli ve bilezikli olmak üzere temelde iki farklı asenkron makina tipi mevcuttur. Rüzgar türbinlerinde çoğunlukla asenkron makineler kullanılmaktadır.

Rüzgar türbinlerinde Betz limiti olarak tanımlanan güç faktörü C_p 'nin maksimum olması varolan rüzgardan sağlanacak faydayı yüksek tutmak için önemlidir. Güç faktörünün kanat uç hızı ile olan ilişkisi herbir rüzgar hızında optimum uç hızının yakalanarak türbinin güç faktörünün optimum çalışma karakteristiği göstereceği sonucunu ortaya koymaktadır. Uç hızının $\lambda = \frac{R\Omega_l}{g}$ şeklinde tanımlanmasından ötürü her bir rüzgar hızında Ω_l rotor hızı kontrol edilerek optimum çalışma şartı sağlanabilir. Asenkron makinaların karakteristik özelliği gereği vektör kontrolü yardımıyla generatör momenti referans noktası belirlenerek rotor dönmesi rüzgar hızına göre ayarlanır. Bu şart sağlandıktan sonra rüzgar hız değişimi karşısında türbin en verimli işletme şartlarında çalıştırılarak maksimum fayda sağlanmış olur.

6.1 Sonuç ve Öneriler

Rüzgar türbinlerine olan ilgi ve ihtiyacın artmasıyla birlikte türbin teknolojilerinin gelişmesi ve türbinlerin verimliliklerinin artırılması oldukça önemlidir. Bu tezde rüzgar türbinlerinde bilinen kanat adım açısı kontrolünden bağımsız olarak nominal rüzgar hızlarının artındaki hızlarda maksimum gücün üretilebilmesi adına elektrik kontrol üzerinde durulmuştur. Elde edilen sonuçlardan kanat uç hızının optimum değere yakınlığı ve güç faktörünün %47'ye ulaştığı görülmektedir. Böylelikle rüzgarın varolan enerjisinden elektrik olarak maksimum fayda sağlanmış, toplam santral verimi optimize edilmiştir. Nominal rüzgar hızının üzerindeki rüzgar hızlarında ise elektrik kontrol santral verimini azaltmaktadır. Kanat adım açısı kontrolü çoğunlukla yüksek rüzgar hızlarında kullanılmaktadır.

Rüzgar türbinlerinin artan enerji talebinde daha çok talep göreceği öngörüsüyle kontrol algoritmalarının geliştirilmesi önemlidir. Güncel türbinler çoğunlukla mekanik kontrol üzerine kurulu iken elektrik kontrolün de santral verimini arttıracığı muhakkaktır. Elektrik kontrolün geliştirilmesi rüzgar türbinlerini daha talepkar kılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **EXXONMOBIL** (2013). The Outlook for Energy: A view to 2040, *Exxon Mobil*, Texas, United States of America.
- [2] **U.S. Energy Information Administration** (2013). International Energy Outlook 2013, *U.S. Energy Information Administration*, Washington, United States of America.
- [3] **BP** (2013). BP Statistical Review of World Energy June 2013, *BP*, United Kingdom.
- [4] **OPEC** (2013). World Oil Outlook, *Organization of the Petroleum Exporting countries*, Intergovernmental Organization, Austria.
- [5] **The International Energy Agency** (2013). Key World Energy Statistics, *IEA*, Paris.
- [6] **The International Energy Agency** (2013). Tracking Clean Energy Progress 2013, IEA Input to the Clean Energy Ministerial, *IEA*, Paris.
- [7] **World Coal Association** (2012). Coal-Energy Sustainable Development, Worldcoal, *WCA*, United Kingdom.
- [8] **The International Energy Agency** (2012). CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights, *IEA*, Paris.
- [9] **The International Energy Agency** (2013). Energy Policy Highlights, *IEA*, Paris.
- [10] **World Energy Council** 2013. Time to Get Real- the Case for Sustainable Energy Investment, *WEC*, United Kingdom.
- [11] **Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı** (2009). Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Stratejisi Belgesi, 10 sheets, *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı*, Türkiye.
- [12] **Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı** (2013). 2014 Yılı Bütçe Sunumu, *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı TBMM Plan ve Bütçe Komisyonu*, Türkiye.
- [13] **Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı** (2013). Mavi Kitap 2013, *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Bağlı ve İlgili Kuruluşlar Dairesi Başkanlığı*, Türkiye.
- [14] **Ackermann, T.** (2005). *Wind Power in Power Systems*, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [15] **Jha, A.R., Ph.D.** (2010). *Wind Turbine Technology*, CRC Press, USA.
- [16] **Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E.** (2001). *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom.
- [17] **Nelson, V.** (2009). *Wind Energy Renewable Energy and the Environment*, CRC Press, USA.

- [18] **Global Wind Energy Council** (2013). *Global Wind Statistics*, GWEC, Belgium.
- [19] **Bianchi, F. D., De Battista, H.** (2007). *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*, Springer, UK.
- [20] **Chiras, D., Sagrillo, M.** (2009). *Power From the Wind: Achieving Energy Independence*, New Society Publishers, Canada.
- [21] **Munteanu, I, Bratcu, A. I., Cutululis, N.** (2008). *Optimal Control of Wind Energy Systems: Towards a Global Approach*, Springer, UK.
- [22] **Mathew, S.** (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, Springer, Germany.
- [23] **GL Garrad Hassan Deutschland GmbH** (2010). Power Performance Measurement on a Sinovel SL 1500-82 Wind Turbine at Linghai, China, Report WT 8033/10, GL, China.
- [24] **Chapman, J. S.** (2005). *Electric Machinery Fundamentals 4th Edition*, Mc Graw Hill, Australia.
- [25] **Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., Umans, S. D.** (2003). *Electric Machinery 6th Edition*, Mc Graw Hill, USA.
- [26] **Çetin, İ.** (1987). *Elektrik Motörleri*, İdefix Kitap, İstanbul.
- [27] **Wu, B., Lang ,Y., Zargari, N.** (2011). *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.

EKLER

EK A.1 : KAG Tabanlı Asenkron Makina Simulink Modellemesi

EK A.2 : KAG REKS PI Kontrol Algoritması

EK A.3 : KAG Dönme Hızı Kontrolü

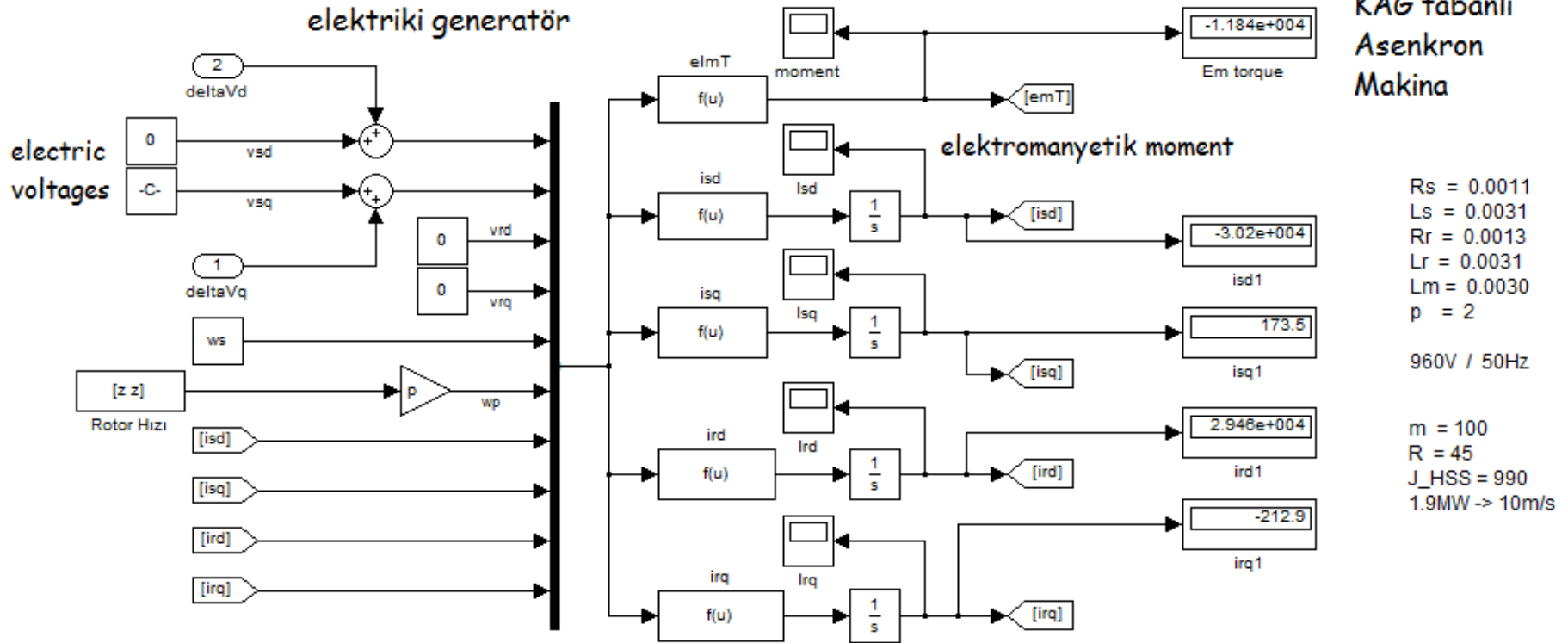
EK A.4 : Rüzgar Momenti ve Aerodinamik Modelleme

EK A.5 : Dişli Kutusu Modelleme

EK A.6 : KAG Vektör Kontrolü

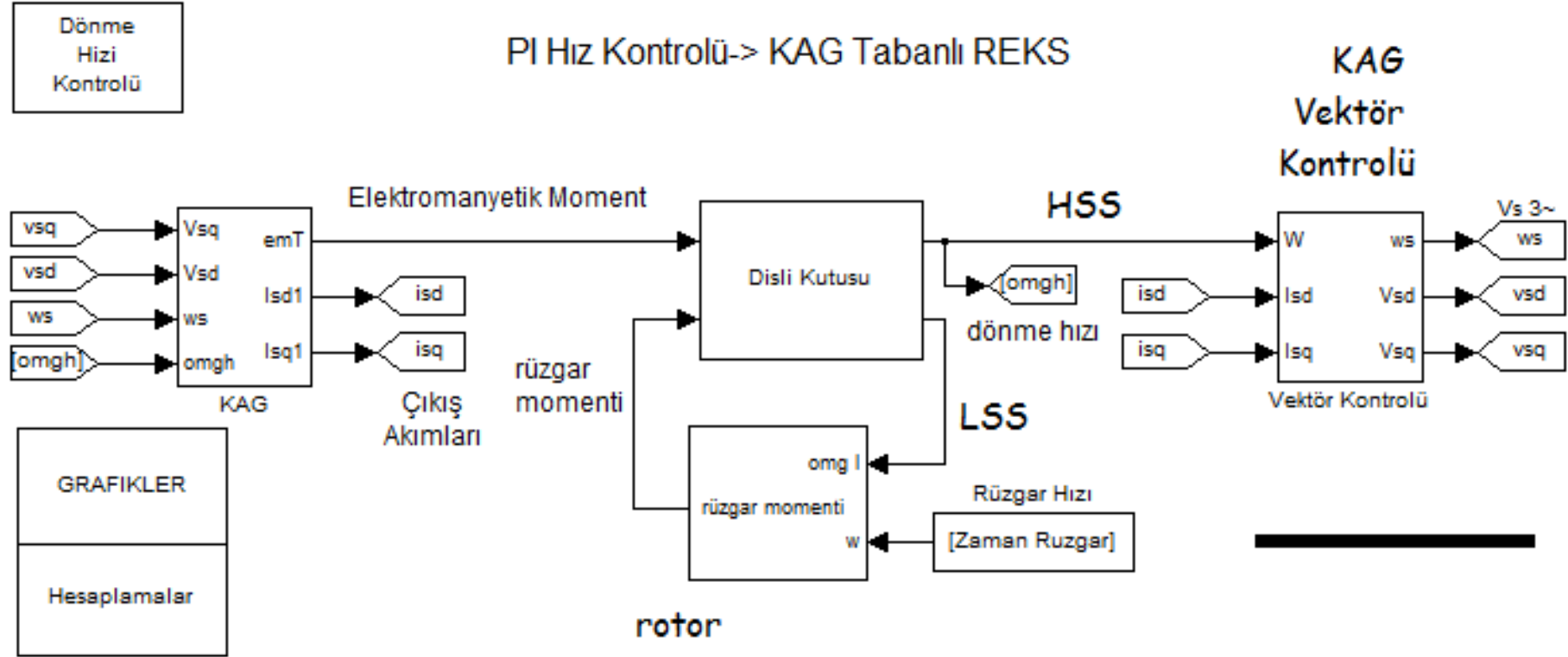
EK A.7 : KAG Modellemesi

EK A.1: KAG Tabanlı Asenkron Makina Simuling Modellemesi



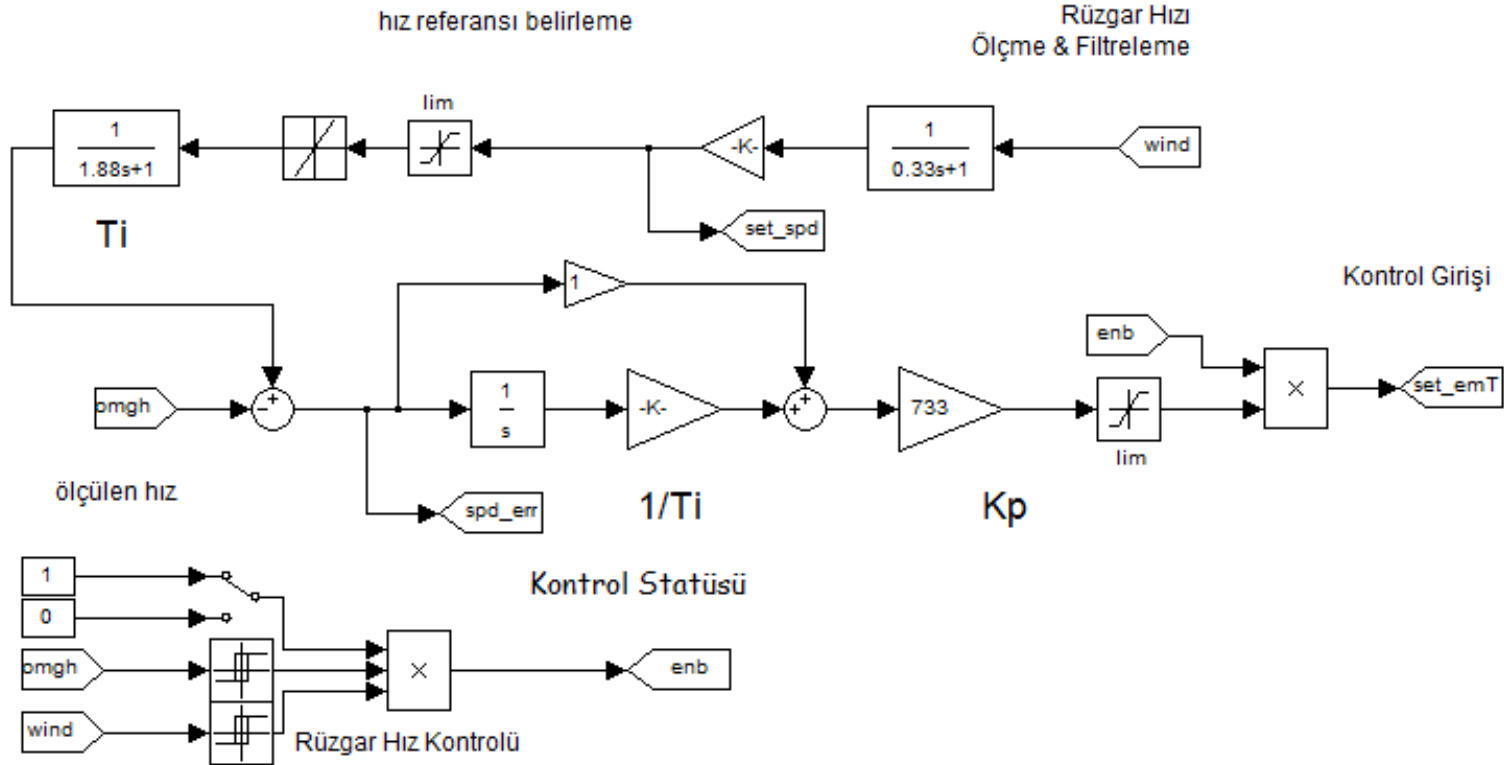
Şekil A.1 : KAG rüzgar türbinlerinde elektromagnetik moment modellemesi.

EK A.2: KAG REKS PI Kontrol Algoritması



Şekil A.2 : KAG REKS PI kontrol algoritması.

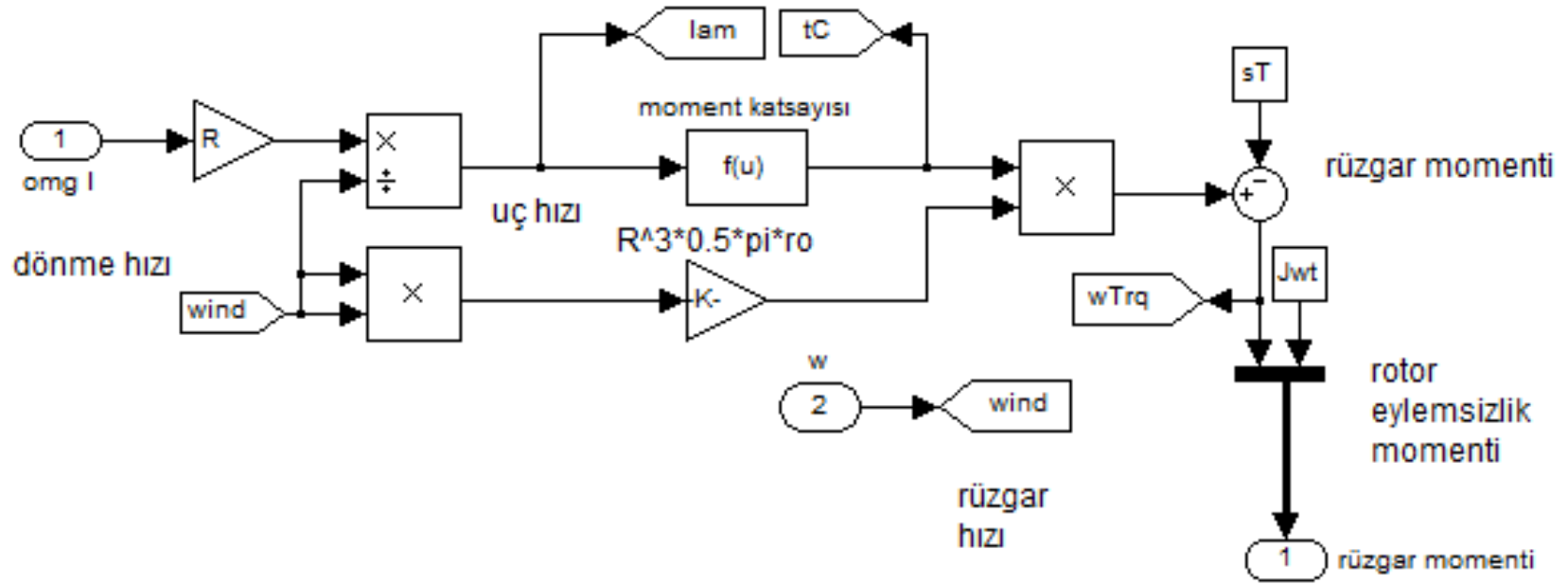
EK A.3: KAG Dönme Hızı Kontrolü



4.5.1 Referans Hız Kontrolü

Şekil A.3 : KAG dönme hızı kontrolü.

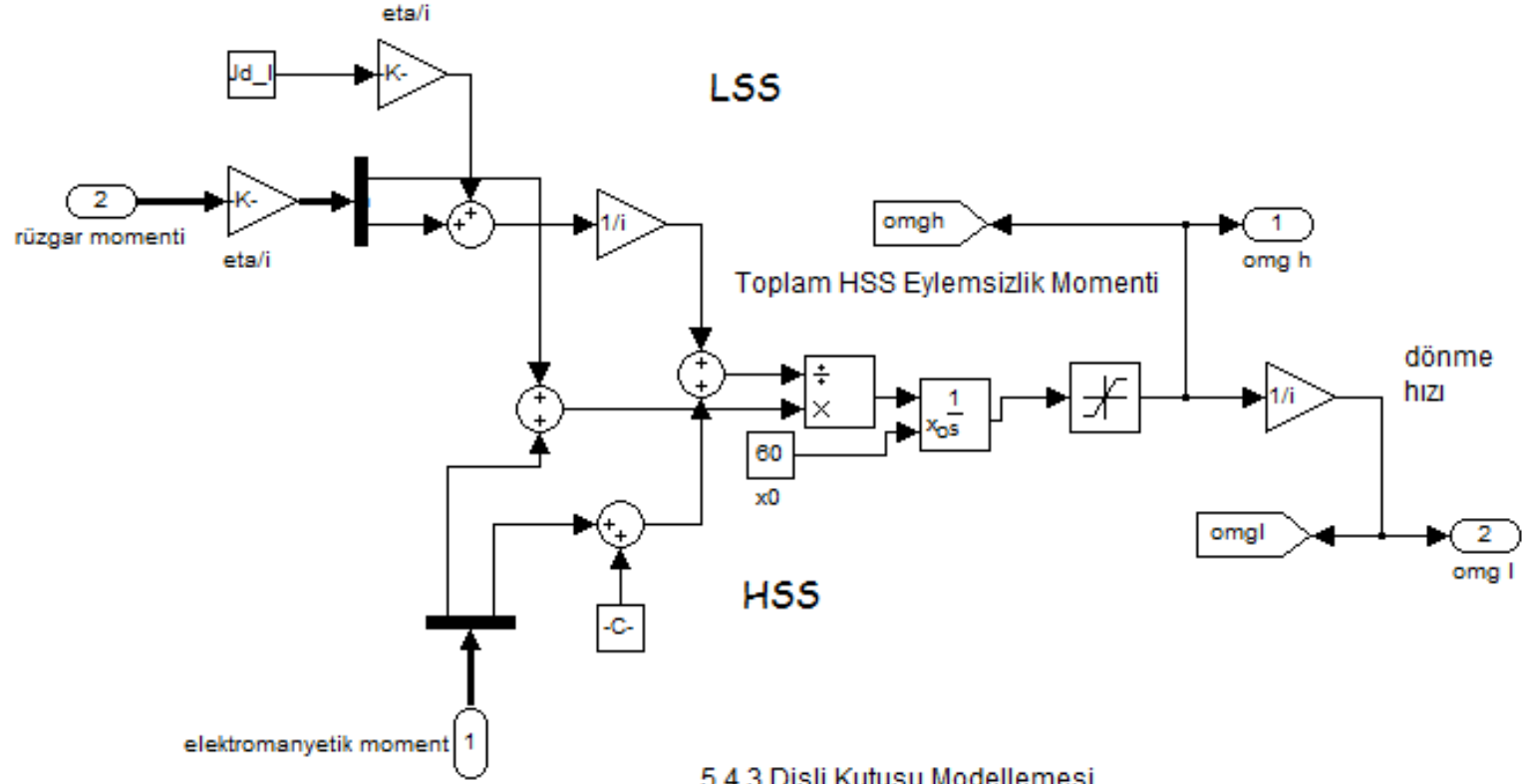
EK A.4: Rüzgar Momenti ve Aerodinamik Modelleme



5.4.2 Rüzgar Momenti ve Aerodinamik Modelleme

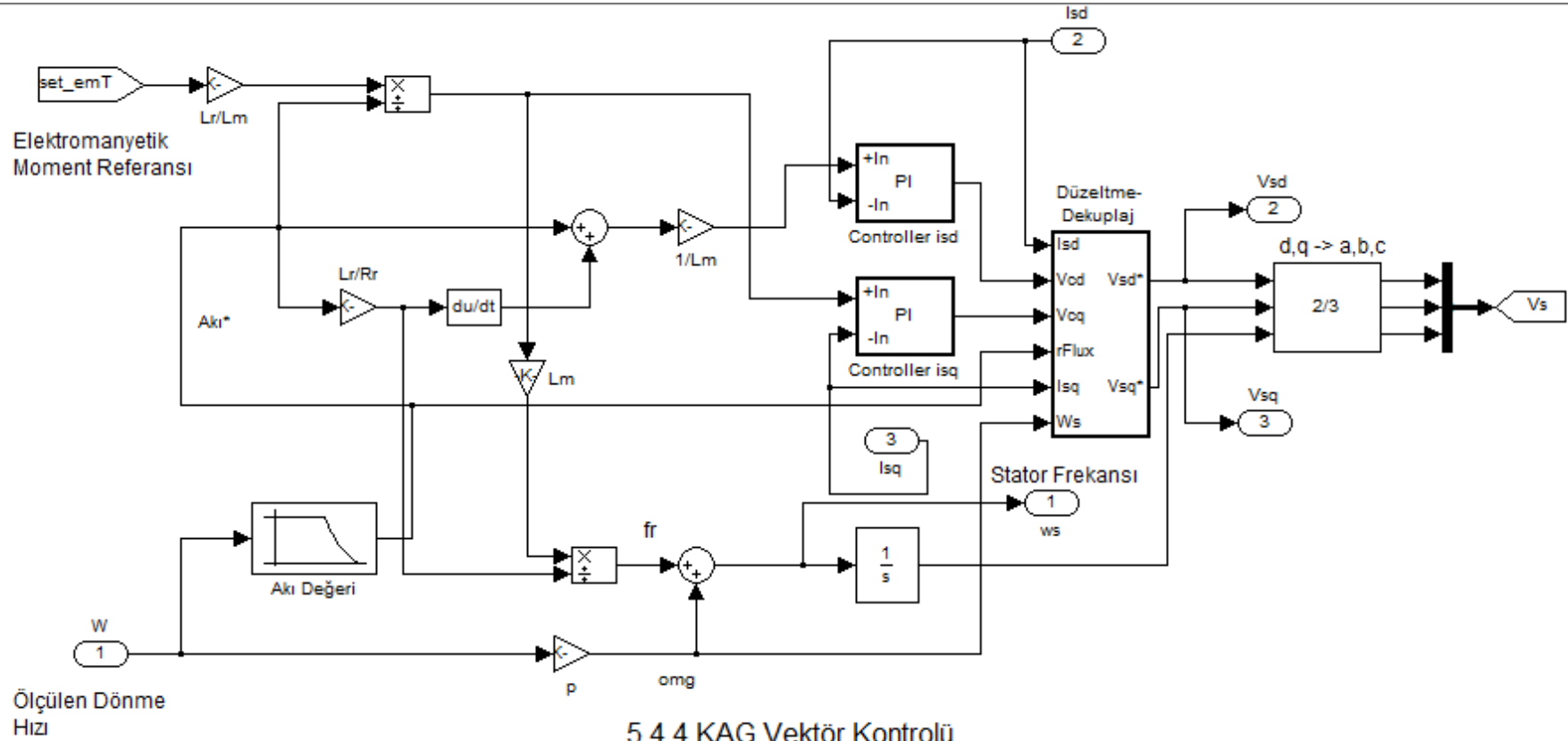
Şekil A.4 : Rüzgar momenti ve aerodinamik modelleme.

EK A.5: Dişli Kutusu Modelleme



Şekil A.5 : Dişli kutusu modelleme.

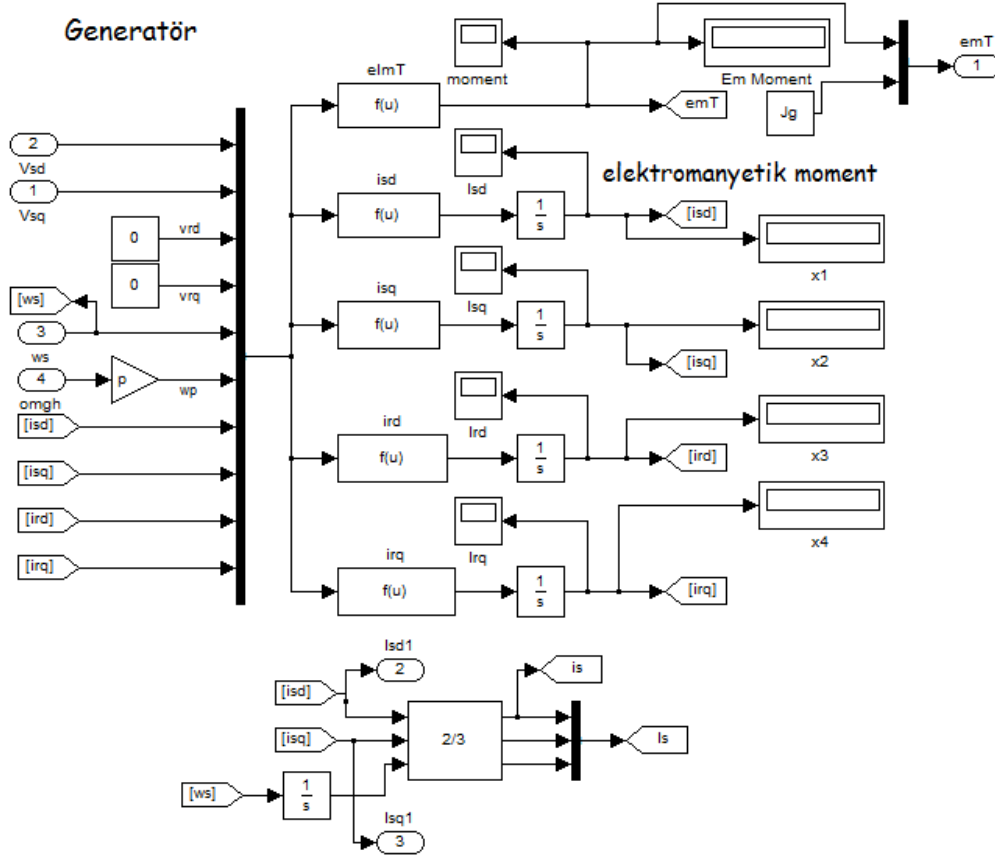
EK A.6: KAG Vektör Kontrolü



5.4.4 KAG Vektör Kontrolü

Şekil A.6 : KAG Vektör kontrolü.

EK A.7: KAG Modellemesi



3.5.5 KAG Modellemesi

Şekil A.7 : KAG Modellemesi.

Çizelge A.1 : 2 MW KAG tabanlı REKS parametreleri [21].

Türbin Rotoru	Dişli Kutusu	KAG
Kanat Uzunluğu: R=45 m	Dişli yükseltme oranı: i=100 HSS eylemsizlik momenti:	$p = 2, R_s = 4m\Omega, R_r = 4m\Omega$ $L_m = 5.09mH, L_s = 5.25mH$
Nom. Rüzgar Hızı: $v_n = 10.5m / s$	$J_h = 990kg \cdot m^2$ Verimlilik: $\eta = 0.95$	$L_r = 5.25mH, \omega_s = 100\pi \text{ rad/s}$ $\Gamma_{G \max} = 17e5, V_s = 960V$

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Özgün Kolaçık
Doğum Yeri ve Tarihi: Kadıköy – 04.07.1988
Adres: Esenkent Mah. Kültür Sit. G blok d.6 Maltepe/İST
E-Posta: ozgunkolacik@hotmail.com
Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi / Elektrik Mühendisliği