

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DEĞİŞKEN HIZLI DOĞRUDAN TAHRİKLİ
MIKNATIS UYARMALI SENKRON GENERATÖRLÜ
RÜZGAR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİNİN
MODELLENMESİ VE BENZETİMİ**

ALPER ULUTAŞ

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

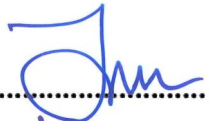


ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DEĞİŞKEN HIZLI DOĞRUDAN TAHRİKLİ
MIKNATIS UYARMALI SENKRON GENERATÖRLÜ
RÜZGAR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİNİN
MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

ALPER ULUTAŞ

Prof.Dr. H. Tarık DURU
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof.Dr. İbrahim ŞENOL
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi
Doç.Dr. Bora ALBOYACI
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 14.06.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde küresel enerjinin yüzde sekseninin fosil yakıtlardan elde edildiği dünyamızın sürdürülebilirliği ve yeni kuşaklara temiz bir çevre ve doğa bırakabilmek için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına bağlı olarak kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması gerekmektedir. Bu bağlamda, son yirmi yılda teknolojinin gelişmesiyle birlikte ciddi adımlar atılmış ve hala da atılmaya devam edilmektedir. Bizlere düşen görev ise vicdani sorumluluklarımızı unutmayıp doğayı katletmemek, yeşil bir çevre ve temiz bir dünyada yaşamımızı tamamlamaktır.

Bu tez çalışması sırasında, öncelikle danışmanlığımı üstlenen, her türlü ilgisini ve bilgisini esirgemeyen kıymetli hocam Prof. Dr. H. Tarık DURU'ya, öğrenim hayatım boyunca her zaman yanımda olan, bana karşı inançlarını asla kaybetmeyen, maddi manevi her zaman destek çıkan, kısacası bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan AİLEME sonsuz teşekkür ederim. Canım annem Hatice Birgül ULUTAŞ için...

Haziran – 2019

Alper ULUTAŞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ÖZET.....	x
ABSTRACT	xi
GİRİŞ	1
1. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN GENEL YAPISI VE SINIFLANDIRILMASI	6
1.1. Eksen Tipine Göre Sınıflandırılmış Rüzgar Türbinleri.....	9
1.1.1. Dikey eksenli rüzgar türbinleri	9
1.1.2. Yatay eksenli rüzgar türbinleri	10
1.2. Hızlarına Göre Sınıflandırılmış Rüzgar Türbinleri	12
1.2.1. Sabit hızlı rüzgar türbinleri	12
1.2.2. Değişken hızlı rüzgar türbinleri	12
1.3. Kuruldukları Yerlere Göre Sınıflandırılmış Rüzgar Türbinleri	13
1.3.1. Kara üstü rüzgar türbinleri	13
1.3.2. Deniz üstü rüzgar türbinleri	13
1.4. Tahrik Mekanizmasına Göre Sınıflandırılmış Rüzgar Türbinleri	14
1.4.1. Dişli kutusu sürücülü rüzgar türbinleri	14
1.4.2. Doğrudan tahrikli rüzgar türbinleri.....	14
1.4.3. Kayış - zincir sürücülü rüzgar türbinleri.....	15
2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖRLER	16
2.1. Doğru Akım Generatörleri	16
2.2. Alternatif Akım Asenkron Generatörler	16
2.2.1. Sincap kafesli asenkron generatörler	17
2.2.2. Rotoru sargılı (bilezikli) asenkron generatörler.....	19
2.2.2.1. Çift beslemeli asenkron generatörler.....	19
2.2.2.2. Opti – Slip asenkron generatörler.....	20
2.3. Alternatif Akım Senkron Generatörler.....	21
2.3.1. Rotoru sargılı senkron generatörler	22
2.3.2. Mıknatıs uyarmalı senkron generatörler	23
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN DÖNÜŞTÜRÜCÜLER	25
3.1. Ardışık Dönüştürücüler	25
3.2. Tandem Dönüştürücüler	26
3.3. Matris Dönüştürücüler.....	27
3.4. Çok Seviyeli Dönüştürücüler	28
3.5. Rezonans Dönüştürücüler	29
4. RÜZGAR ENERJİSİ VE RÜZGAR TÜRBİNİNİN DİNAMİĞİ	31
4.1. Rüzgarın Kinetik Enerjisi.....	31
4.2. Betz Limiti ve Güç Katsayısı	33
4.3. Uç Kanat Hızı Oranı.....	37
4.4. Rüzgar Türbininin Ürettiği Tork ve Tork Katsayısı.....	40

4.5. Rüzgar Türbini Dinamiği ve Şaft Hızı	42
5. DEĞİŞKEN HIZLI DOĞRUDAN TAHRİKLİ BİR RÜZGAR TÜRBİNİ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ.....	44
5.1. Rüzgar Türbini Modeli.....	44
5.2. Generatör Modeli	48
5.2.1. Mıknatıs uyarmalı senkron generatör modeli	48
5.2.2. Clarke – Park dönüşümleri	53
5.3. Dönüştürücü Modeli ve Kontrolü	55
5.3.1. Generatör tarafı alan yönlendirmeli vektör kontrolü	56
5.3.1.1. Akım kontrolü döngüsü.....	58
5.3.1.2. Maksimum güç çekme ve optimum tork kontrolü	60
5.3.2. Şebeke tarafı gerilim yönlendirmeli vektör kontrolü.....	62
5.3.2.1. Akım kontrolü döngüsü.....	64
5.3.2.2. DA barası gerilim kontrolü döngüsü	65
5.3.2.3. Faz kilitleme döngüsü	66
5.3.3. Uzay vektörü darbe genişlik modülasyonu.....	67
5.4. Şebeke Modeli.....	78
6. BENZETİM ÇALIŞMASI VE SONUÇLARI.....	80
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR	89
EKLER.....	96
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	98
ÖZGEÇMİŞ	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Rüzgar türbinine ait başlıca ekipman ve mekanizmaların gösterimi	7
Şekil 1.2.	Dikey eksenli rüzgar türbini örnekleri (a) Savonius (b) Eliptik Darrieus (c) H-Rotor Darrieus.....	10
Şekil 1.3.	Üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbini örneği	11
Şekil 2.1.	Doğru akım generatörlü rüzgar türbini modeli.....	16
Şekil 2.2.	Yumuşak yol verici ile sürülmüş sincap kafesli asenkron generatörlü rüzgar türbini modeli.....	18
Şekil 2.3.	Frekans dönüştürücüsü ile kontrol edilmiş sincap kafesli asenkron generatörlü rüzgar türbini modeli	18
Şekil 2.4.	Çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbini modeli.....	20
Şekil 2.5.	Opti – Slip asenkron generatörlü rüzgar türbini modeli.....	21
Şekil 2.6.	Rotoru sargılı senkron generatörlü rüzgar türbini modeli	23
Şekil 2.7.	Mıknatıs uyarmalı senkron generatörlü rüzgar türbini modeli.....	24
Şekil 3.1.	Ardışık dönüştürücü devresi.....	26
Şekil 3.2.	Tandem dönüştürücü devresi.....	27
Şekil 3.3.	Matris dönüştürücü devresi	28
Şekil 3.4.	Çok seviyeli dönüştürücünün bir evirici ayağının devreleri (a) Üç seviye diyot kenetlemeli (b) İki yönlü ara anahtarlamalı (c) Kondansatörlü (d) Üç fazlı iki katlı gerilim kaynaklı eviricilerden oluşan (e) H köprü eviricili	29
Şekil 3.5.	Rezonans dönüştürücü devresi	30
Şekil 4.1.	Rüzgarın hızı ve kesit alanının ideal model gösterimi	33
Şekil 4.2.	Rüzgar türbinin uç kanat hızı oranına bağlı güç katsayısı değişim grafiği.....	38
Şekil 4.3.	Rüzgar türbininin kanat açısına göre değişen uç kanat hızı oranına bağlı güç katsayısı değişim grafiği	39
Şekil 4.4.	Farklı rüzgar türbini tipleri için uç kanat hızı oranına bağlı güç katsayısı değişim grafiği (a) Dikey eksenli Savonius (b) Amerikan tipi çok kanatlı (c) Hollanda tipi dört kanatlı (d) Dikey eksenli Darrieus (e) Üç kanatlı (f) İki kanatlı (g) Bir kanatlı	39
Şekil 4.5.	Rüzgar türbinin uç kanat hızı oranına bağlı tork katsayısı değişim grafiği.....	41
Şekil 4.6.	Farklı rüzgar türbini tipleri için uç kanat hızı oranına bağlı tork katsayısı değişim grafiği (a) Amerikan tipi çok kanatlı (b) Hollanda tipi dört kanatlı (c) Üç kanatlı (d) İki kanatlı (e) Bir kanatlı	41
Şekil 4.7.	Türbin ve generatörden oluşan iki kütleli örnek dinamik model	42
Şekil 4.8.	İki kütleli dinamik modelin elektriksel eşdeğer devresi.....	43
Şekil 5.1.	Farklı kanat açılarına göre güç katsayısının uç kanat hızı oranına göre değişimi	45

Şekil 5.2.	Farklı kanat açılarına göre tork katsayısının uç kanat hızı oranına göre değişimi	45
Şekil 5.3.	Uç kanat hızı oranının (λ) hesaplanması blok diyagramı	46
Şekil 5.4.	Türbin sabitlerinin hesaplanması blok diyagramı	47
Şekil 5.5.	Güç ve tork katsayılarının hesaplanması blok diyagramı.....	47
Şekil 5.6.	Mekanik güç ve mekanik torkun hesaplanması blok diyagramı.....	47
Şekil 5.7.	Bir adet çift kutba sahip mıknatıs uyarmalı senkron generatör (a) kesiti (b) eşdeğer devresi.....	48
Şekil 5.8.	Mıknatıs uyarmalı senkron makinanın generatör modunda çalışma eşdeğer devresi (a) d eksen (b) q eksen.....	51
Şekil 5.9.	abc ve $\alpha\beta$ referans düzlemlerinin birbirine göre durumları	54
Şekil 5.10.	$\alpha\beta$ ve dq referans düzlemlerinin birbirine göre durumları	54
Şekil 5.11.	Ardışık dönüştürücülü sistemin prensip şeması	56
Şekil 5.12.	Generatör tarafı alan yönlendirmeli vektör kontrolünün şematik gösterimi.....	57
Şekil 5.13.	Generatör tarafı referans U_q gerilimi hesaplanmasının blok diyagramı.....	59
Şekil 5.14.	Generatör tarafı referans U_d gerilimi hesaplanmasının blok diyagramı.....	59
Şekil 5.15.	Rüzgar türbinine ait güç bölgelerine göre çıkış gücü değişimi grafiği	60
Şekil 5.16.	Kanat açısı hesaplanmasının blok diyagramı	61
Şekil 5.17.	Optimum tork kontrolü hesaplanmasının blok diyagramı.....	62
Şekil 5.18.	Şebeke tarafı gerilim yönlendirmeli vektör kontrolünün şematik gösterimi.....	63
Şekil 5.19.	Şebeke tarafı referans U_d gerilimi hesaplanmasının blok diyagramı.....	65
Şekil 5.20.	Şebeke tarafı referans U_q gerilimi hesaplanmasının blok diyagramı.....	65
Şekil 5.21.	DA barası referans gerilimi hesaplanmasının blok diyagramı	66
Şekil 5.22.	Gerilim beslemeli evirici devresi örneği	68
Şekil 5.23.	Eviricinin anahtarlama durumlarına göre oluşan uzay vektörleri.....	69
Şekil 5.24.	Oluşan altıgende referans gerilimi vektörü ve bölgeler	72
Şekil 5.25.	Bölge I için uzay vektörü darbe genişlik modülasyonu gerilimleri	73
Şekil 5.26.	Bölge I için verilen anahtarlama durumu	76
Şekil 5.27.	Bütün bölgeler için anahtarlama durumları.....	77
Şekil 5.28.	Simetrik üç fazlı şebeke gerilimleri.....	78
Şekil 6.1.	Rüzgar hızı ve shaft hızının zamana bağlı değişimi.....	80
Şekil 6.2.	Uç kanat hızı oranı ve kanat açısının zamana bağlı değişimi.....	81
Şekil 6.3.	Güç katsayısı ve tork katsayısının zamana bağlı değişimi	81
Şekil 6.4.	Mekanik tork ve elektromanyetik torkun zamana bağlı değişimi	82
Şekil 6.5.	DA barası geriliminin zamana bağlı değişimi	83
Şekil 6.6.	Mekanik güç, şebeke aktif ve reaktif güçlerinin zamana bağlı değişimleri	83
Şekil 6.7.	Generatör çıkış akımlarının zamana bağlı değişimi	84

Şekil 6.8.	Dönüştürücü çıkış akım ve geriliminin zamana bağlı değişimi	85
Şekil 6.9.	Dönüştürücü çıkış akım ve geriliminin bir periyoduna ait zamana bağlı değişimi	85
Şekil 6.10.	Şebeke akım ve geriliminin zamana bağlı değişimi	86
Şekil 6.11.	Şebeke akım ve geriliminin bir periyoduna ait zamana bağlı değişimi	86



TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1.	Rüzgar türbini bileşenlerinin gruplandırılması.....	6
Tablo 5.1.	800kW rüzgar türbini parametreleri	46
Tablo 5.2.	Mıknatıs uyarmalı senkron generatör parametreleri.....	53
Tablo 5.3.	Anahtarlama durumlarına göre faz – nötr ve faz – faz gerilimleri	70
Tablo 5.4.	Anahtarlama durumlarına göre $\alpha\beta$ düzlemi gerilimleri.....	72
Tablo 5.5.	Referans gerilimin konumuna göre uzay vektörlerinin uygulanma sırası ve süreleri	76
Tablo 5.6.	Şebeke ve filtre parametreleri.....	79

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Kanatların süpürdüğü alan, (m ²)
a	: İvme, (m/sn ²)
B _s	: Sönümleme katsayısı, (Nms/rad)
C	: Kapasitans, (F)
C _P	: Güç katsayısı
C _T	: Tork katsayısı
E	: Kinetik enerji, (J)
e	: Hata sinyali
E _r	: Rüzgarın kinetik enerjisi, (J)
F	: Kuvvet, (N)
f	: Frekans, (Hz)
I	: Akım, (A)
J _g	: Generatörün ataleti, (kg.m ²)
J _t	: Türbinin ataleti, (kg.m ²)
K _b	: Burkulma katsayısı, (Nm/rad)
K _I	: İntegral kazancı
K _P	: Oran kazancı
K _{sabit}	: Sabitler çarpımının değeri
L	: Endüktans, (H)
m	: Kütle, (kg)
m _h	: Havanın kütlesi, (kg)
ḡ _h	: Birim zamanda akan havanın kütlesi, (kg/s)
n	: Devir sayısı, (d/dk)
P	: Güç, (W)
p	: Kutup çifti sayısı
P _g	: Generatör çıkış gücü, (W)
P _m	: Türbinin ürettiği mekanik güç, (W)
P _n	: Anma Gücü, (W)
P _r	: Rüzgarın gücü, (W)
R	: Rotor çapı, (m)
r	: Rotor yarıçapı, (m)
R _s	: Generatör sargısı direnci, (ohm)
S _n	: Anma görünür gücü, (VA)
t	: Zaman, (s)
T _e	: Elektromanyetik tork, (Nm)
T _i	: İntegral zamanı
T _m	: Türbinin ürettiği tork, (Nm)
T _s	: Şafta iletilen tork, (Nm)
U	: Gerilim, (V)
V	: Hız, (m/s)
V _b	: Başlatma hızı, (m/s)
V _d	: Durdurma hızı, (m/s)
V _n	: Anma rüzgar hızı, (m/s)

V_r	: Rüzgar hızı, (m/s)
V_u	: Uç kanat hızı, (m/s)
Q_g	: Generatör reaktif gücü, (VAr)
β	: Kanat açısı, ($^\circ$)
θ	: İki vektör arasındaki açı, (rad)
θ_e	: Elektriksel açı, (rad)
θ_r	: Rotor açısı, (rad)
λ	: Uç kanat hızı oranı
λ_{PM}	: Manyetik akı bağı, (Vs)
ρ	: Havanın yoğunluk katsayısı, (kg/m^3)
ω_e	: Elektriksel açısal hız, (rad/s)
ω_g	: Generatör rotorunun açısal hızı, (rad/s)
ω_t	: Türbin şaftının açısal hızı, (rad/s)

Kısaltmalar

AA	: Alternatif Akım
BJT	: Bipolar Junction Transistor (Çift Kutuplu Yüzey Birleşimli Transistör)
ÇBAG	: Çift Beslemeli Asenkron Generatör
DA	: Doğru Akım
DAG	: Doğru Akım Generatörü
FAST	: Fatigue, Aerodynamics, Structures, Turbulence (Yıpranma, Aerodinamik, Yapılar, Türbülans)
GTO	: Gate Turn-Off Thyristor (Kapıdan Kesmeli Tristör)
IEC	: International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (Kapısı Yalıtılmış Çift Kutuplu Transistör)
MİLRES	: Milli Rüzgar Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör)
NREL	: National Renewable Energy Laboratory (Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı)
OAPEC	: The Organization of Arab Petroleum Exporting Countries (Petrol İhraç Eden Arap Ülkeleri Birliği)
OSIG	: Opti-Slip Asenkron Generatör
OTK	: Optimum Tork Kontrolü
PI	: Proportional Integral (Oran İntegral)
RGK	: Reaktif Güç Kontrolü
PLL	: Phase Locked Loop (Faz Kilitleme Döngüsü)
RSSG	: Rotoru Sargılı Senkron Generatör
SKAG	: Sincap Kafesli Asenkron Generatör
MUSG	: Mıknatıs Uyarmalı Senkron Generatör
THD	: Total Harmonic Distortion (Toplam Harmonik Bozulumu)
TURBSIM	: Turbulence Simulator (Türbülans Benzetimi)
YEKDEM	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması

DEĞİŞKEN HIZLI DOĞRUDAN TAHRİKLİ MIKNATIS UYARMALI SENKRON GENERATÖRLÜ RÜZGAR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

ÖZET

Yapılan bu tez çalışmasında, fosil enerji kaynaklarının tükenmeye başlamasıyla birlikte yeşil enerji olarak bilinen ve yenilenebilir enerji kaynaklarının bir türü olan rüzgar enerjisinin, rüzgar türbinleri vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüşümü konusu ele alınmıştır. İlk olarak geçmişten günümüze kadar olan rüzgar türbinleri sınıflandırılmış, sonra rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörler ve frekans dönüştürücüler hakkındaki bilgiler kısaca verilmiştir. Daha sonra literatür ve piyasa araştırması yapılarak, 800kW gücünde değişken hızlı, doğrudan tahrikli bir rüzgar türbininin matematiksel olarak modellenmesi kararlaştırılmıştır. Modellemede, günümüzde popüler olan mıknatıs uyarmalı senkron generatör tercih edilmiş ve generatör parametreleri piyasada kabul görmüş bir rüzgar türbini üreticisinden alınmış olup generatör tasarımı ile ilgili herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Frekans dönüştürücüsü olarak uygulamalarda sıkça kullanılan ardışık dönüştürücü yapısı tercih edilmiş ve uzay vektörü darbe genişlik modülasyonu tekniği kullanılmıştır. Dönüştürücünün generatör tarafında, alan yönlendirmeli vektör kontrolü ile optimum tork kontrolü yapılarak generatörün hızı kontrol altında tutulmuştur. Benzer şekilde, dönüştürücünün şebeke tarafında gerilim yönlendirmeli vektör kontrolü yapılarak şebekenin aktif gücü kontrol edilmiştir. Türbinin anma rüzgar hızından küçük olan rüzgar hızlarında maksimum güç çekme kontrolü yapılarak türbinden maksimum güç elde edilmiş, anma rüzgar hızından büyük olan rüzgar hızlarında ise kanat açısı kontrolü yapılarak türbinin gücü ve dönme hızı sabit tutulmuştur. Son olarak, yapılan modelleme MATLAB/Simulink programı kullanılarak benzetim çalışması ile desteklenmiş ve sonuçları paylaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Doğrudan Tahrikli, Kanat Açısı Kontrolü, Maksimum Güç İzleme Noktası, Mıknatıs Uyarmalı Senkron Generatör (MUSG), Rüzgar Türbini.

MODELING AND SIMULATION OF VARIABLE SPEED DIRECT DRIVE PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR BASED WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM

ABSTRACT

In this thesis, as a result of the depletion of fossil energy sources, the conversion of wind energy, which is a kind of renewable energy sources and known as green energy, into electrical energy by using wind turbines was discussed. Firstly, the wind turbines from past to present were classified, then brief informations about generators and frequency converters used in wind turbine systems were given. Afterwards, literature and market researches have been done, consequently it was decided to mathematical modeling and simulating for 800kW variable speed direct drive wind turbine. In the modeling, the permanent magnet synchronous generator which is being popular nowadays was preferred, and the parameters of generator were taken from a commercially accepted wind turbine manufacturer, and no study has been done regarding the generator design. As frequency converter was preferred back-to-back converter which is often used in applications, and it was controlled by space vector pulse width modulation technique. In generator side converter, the speed of generator was controlled by optimal torque control method through field oriented control. Likewise, in grid side converter, provided active power to grid was controlled by voltage oriented control. The maximum power was obtained by maximum power point tracking control at smaller wind speeds than rated wind speed of turbine, the generated power and rotational speed were kept stable with the achieving pitch control at higher wind speeds than rated wind speed of turbine. Finally, the modeling was supported by simulation using MATLAB/Simulink and results were shared in chapter of simulation results.

Keywords: Direct Drive, Pitch Control, Maximum Power Point Tracking, Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG), Wind Turbine.

GİRİŞ

Son yıllarda fosil yakıtların azalması nedeniyle ortaya çıkan enerji kıtlığı ve mevcut fosil yakıtların kullanımı nedeniyle ortaya çıkan karbon ve emisyon gazlarının oluşturduğu çevre kirliliği, insan yaşamı ve sosyal gelişim için önemli sorunlardan birisidir. Ayrıca gelişen dünyamızda enerji tüketimi, çeşitli sebepler nedeniyle hızlı bir şekilde artmış ve mevcut enerjiler yetersiz gelmeye başlamıştır. 1973 yılında Petrol İhraç Eden Arap Ülkeleri Birliğinin (OAPEC) petrolde ambargo ilan etmesiyle ortaya çıkan petrol kriziyle beraber, insanlar yeni enerji kaynakları aramaya yönelmesinin başlıca sebeplerinden birisi olarak bilinir [1]. Bu mevcut durumu çözenin en basit yolu, kaynağını güneşten alan yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaktır.

Rüzgar enerjisi, güneşin atmosferi ve yer yüzeyini homojen olarak ısıtamaması sonucu ortaya çıkan sıcaklık ve basınç farkından dolayı havada bir akım oluşturarak, sıcak ve soğuk hava kütlelerinin yer değiştirmesi sonucu ortaya çıkan ısı enerjisinin kinetik enerjiye dönüşmüş halidir. Rüzgarlar yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru akarken, dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesi, yüzey sürtünmeleri, yerel ısı yayılımı, rüzgar önündeki farklı atmosferik olaylar ve arazinin topografik yapısı gibi nedenlerden dolayı şekillenir [2]. Şekillenen bu rüzgardan meydana gelen bu enerji, rüzgar türbinleri denilen mekanizmalar topluluğunun shaftını döndürerek bir hareket oluşturur. Bu hareket ile rüzgar enerjisi mekanik enerjiye dönüşmüş olur. Rüzgar enerjisi geçmişten günümüze değirmenlerde tahıl öğütmek, su pompalamak, elektrik enerjisi üretmek gibi amaçlar için kullanılmıştır.

Rüzgar türbinleri, rüzgarda bulunan kinetik enerjiyi uçak kanadına benzeyen kanatlarla yakalayıp, bir eksen etrafında dönme hareketi oluşturarak önce mekanik enerjiye ardından generatörler vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürür. Rüzgar türbinleri, tasarımına, yapısına, kullanım yerlerine, hızına vb. etkenlere göre çeşitli sınıflara ayrılırlar. Günümüzde kullanılanları ise yatay eksenli önden rüzgarlı değişken hızlı üç kanatlı rüzgar türbinleridir. Modern rüzgar türbinlerinde rotor göbekleri yer seviyesinden 60 ila 100 metre yükseklikte bir kule üzerinde bulunur.

Rüzgar türbinlerinden elde edilebilecek enerji miktarı doğrudan türbinin göbek yüksekliğine ve rüzgarın hızına bağlıdır. Türbinin göbek yüksekliğinin artırılması sonucu rüzgar hızının artacağı gerçeği dikkate alınarak mevcut rüzgar gücünden en fazla şekilde yararlanılır [2]. Teknolojik gelişmelere paralel olarak 1 ila 6 MW arası güçlerde rüzgar türbinleri üretilmekte ve kullanılmaktadır [2]. Rüzgar türbinlerinin kapasitesi artıkça boyutu ve maliyetleri de artmaktadır.

Rüzgar enerjisi ile elektrik şebekesine enerji sağlaması söz konusu olduğunda, çok sayıda rüzgara türbininin bir araya gelmesi sonucu rüzgar çiftlikleri meydana gelir ve şebekeye elektrik enerjisi verirler. Rüzgarın nereden, ne zaman, hangi hızla geleceği bilinmeyen bir durumdur. Ancak tahminler vasıtasıyla yorumlar üretilebilir. Bu yüzden rüzgar türbinleri genellikle maliyet başına yıllık enerji üretimine göre tasarlanırlar [3]. Ayrıca rüzgar çiftliklerinin kurulumu için bir bölgenin değerlendirilmesi, rüzgar özelliklerine, rüzgar kapasitesine ve diğer nedenlere bağlı olarak yapılır.

Tez çalışması kapsamında değişken hızlı doğrudan tahrikli mıknatıs uyarmalı senkron generatörlü 800kW bir rüzgar türbininin matematiksel olarak modellenmesi ve benzetim çalışması kararlaştırılmıştır. Teze başlamadan önce yerli ve yabancı kaynaklar genel olarak incelenmiş, tezin amacına yönelik tespitler yapılmış, eksik olan bilgiler çalışma sırasında açıklanmış ve literatürde mevcut olan çalışmalara katkı sağlaması amaçlanmıştır. Çalışmaya benzer şekilde bulunan literatürdeki diğer çalışmaların özeti aşağıda verilmiştir.

Çetin ve arkadaşları, rüzgar türbinlerinin rotorunda oluşan kayıplar üzerinde çalışmalar yapmış ve Glauert – Schmitz teorilerini ele almışlardır. Ayrıca pratikte en çok kullanılan profil tipleri için 1..4 kanat sayısına sahip türbinler için optimum uç kanat hızı oranını incelemişler, elde edilen değerlere göre optimum güç katsayısını tablo halinde vermişlerdir [4].

Ulu ve arkadaşı, Tübitak MİLRES (Milli Rüzgar Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi) projesi kapsamında 500kW çift beslemeli asenkron generatör tasarımı yapmışlar, Ansoft Maxwell 2D benzetim programında analizini gerçekleştirmişlerdir [5].

Gürkaynak, değişken hızlı çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbini modellemiş, kontrolsüz doğrultucuyla doğrulttuğu gerilimi şebeke tarafında histeresiz kontrol yaparak benzetim çalışması sonuçlarını vermiştir [6].

Gökalan, doğrudan tahrikli mıknatıs uyarmalı senkron generatör kullanarak rüzgar türbini modellemiştir. Tahrik kaynağı olarak DC motor kullanmış ve alan yönlendirmeli kontrol ile deneysel sonuçlar elde etmiştir [7].

Akdoğan, çift beslemeli asenkron generatör kullanarak değişken hızlı değişken kanat açılı rüzgar türbini modellemiş ve kontrolünü gerçekleştirmiştir. Çalışmasında NREL'in (National Renewable Energy Laboratory) geliştirdiği yüksek serbestlik dereceli rüzgar türbini simülastörü FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence) ve yine NREL'in geliştirdiği TURBSIM (Turbulence Simulation) kullanmıştır [8].

İnal, MİLRES projesi kapsamında çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbini modelleyerek MATLAB/Simulink programıyla benzetim çalışması yapmıştır. Ayrıca türbin kontrolünde kullanmak amacıyla üç fazlı IGBT köprü doğrultucu kartı tasarımı yapmış ve osiloskop sonuçlarını sunmuştur [9].

Nak, MİLRES projesi kapsamında çift beslemeli asenkron generatör kullanarak değişken hızlı değişken kanat açılı 500kW rüzgar türbini modellemiş ve kontrolünü gerçekleştirmiştir. Çalışmasında, MATLAB/Simulink programını kullanarak benzetim çalışması yapmıştır [10].

Aydemir, doğrudan tahrikli mıknatıs uyarmalı senkron generatör kullanarak 2MW rüzgar türbini modellemiş, uzay vektörü darbe genişlik modülasyonu tekniği ile değişken rüzgar hızlarında şebekede arıza sırasında şebeke gerilimini incelemiştir. MATLAB/Simulink programını kullanarak benzetim çalışması yapmıştır [11].

Özsoy, MİLRES kapsamında kullanılan parametrelerle çift beslemeli asenkron generatörlü değişken hızlı rüzgar türbininin kontrol yöntemi tasarımı ve uygulamasını gerçekleştirmiştir. Çalışma içerisinde MATLAB/Simulink programı kullanarak beş farklı deney çalışmasıyla benzetimini yapmıştır [12].

Al-Toma, 2MW değişken hızlı mıknatıs uyarmalı senkron generatör rüzgar türbini kontrolü için hibrit kontrol şemaları modellemiş ve detaylı analiz sonuçlarını benzetim çalışması ile sunmuştur. Yaptığı çalışmada PI kontrolcüsü kullanmış, daha sonra bulanık mantık kontrolcüsü ve model referansı bulanık kontrolcüsü geliştirerek bulduğu sonuçları karşılaştırmıştır [13].

Huang, 2MW doğrudan tahrikli mıknatıs uyarmalı senkron generatör rüzgar türbini ve kontrol sistemi modellemiş ve benzetimini MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirmiştir. Sistemin donanım karmaşıklığını azaltmak ve güvenilirliğini arttırmak için rotor şaftı üzerinden hız sensörü ortadan kaldırılmış, kayar mod gözlemci tabanlı rotor pozisyonu algoritması sunmuştur. Generatör tarafı kontrolde alan yönlendirmeli vektör kontrolü ve şebeke tarafı kontrolde gerilim yönlendirmeli vektör kontrolü kullanarak uzay vektörü darbe genişlik modülasyonu ile şebeke bağlantısını gerçekleştirmiştir [14].

Yapılan bu tez çalışmasının birinci bölümünde, rüzgar türbinlerinin genel yapısı ele alınmış, uygulamada en çok karşılaşılan bazı mekaniksel ve elektriksel parçalar kısaca tanıtılmıştır. Bu parça ve aşamaların gelecek yıllarda daha da çeşitlenmesi beklenmektedir. Ayrıca geçmişte kullanılmış ve mevcutta kullanılmaya devam edilen rüzgar türbinleri eksen tipine göre, hızlarına göre, kuruldukları yere göre ve tahrik mekanizmasına göre sınıflandırılmıştır. İkinci bölümde, rüzgar türbinlerinde yaygın olarak kullanılan generatör çeşitleri ve yapıları, avantajları ve dezavantajlarıyla birlikte verilmiştir. Üçüncü bölümde rüzgar türbinleri yapısında kullanılan ve kullanılabilecek frekans dönüştürücüsü yapıları tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde, rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü matematiksel ifadelerle ispatlanmış ve güç katsayısı, tork katsayısı, uç kanat hızı oranı, türbin dinamiği gibi rüzgar türbinindeki kavramların matematiksel formülleri çıkartılmıştır. Beşinci bölümde, değişken hızlı doğrudan tahrikli mıknatıs uyarmalı senkron generatör ve ardışık dönüştürücüden oluşan türbin sistemi MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve uzay vektörü darbe genişlik modeli kullanılarak kontrol sistemi tasarlanmıştır. Modelde, dönüştürücünün generatör tarafında alan yönlendirmeli vektör kontrolü uygulanmış ve optimum tork kontrolü ile şaft hızı kontrol altında tutularak kısmi güç bölgesinde maksimum güç çekilmiştir. Tam yük bölgesinde ise yüksek rüzgar hızlarında kanat açısı kontrolü yapılarak şaftın hızı sabit tutulmuştur.

Dönüştürücünün şebeke tarafında ise gerilim yönlendirmeli vektör kontrolü uygulanarak şebeke bağlantısı gerçekleştirilmiş, dönüştürücünün bara gerilimi sabit tutularak şebekeye verilen aktif ve reaktif güçler kontrol altına alınmıştır. Altıncı bölümde, yapılan benzetim çalışması farklı rüzgar hızlarında gerçekleştirilerek sonuçları grafikler halinde verilmiştir. Yedinci bölümde ise yapılan çalışmanın sonuçları ve öneriler verilmiştir.



1. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN GENEL YAPISI VE SINIFLANDIRILMASI

Rüzgar türbinleri, rüzgardan aldığı kinetik enerjiyi mekanik enerjiye çevirerek generatör vasıtasıyla şebekeye güç veren makinelerdir. Dolayısıyla yapısında hem mekaniksel hem de elektriksel bileşenleri içerir ve tamamına rüzgar türbini denir. İçerdiği elektriksel ve mekaniksel bileşenlerde, birincil yani olmazsa olmaz temel bileşenler ve ikincil yani tasarım ve duruma göre değişebilen bileşenler olarak gruplandırmak mümkündür. Örnek gruplandırma Tablo 1.1’de verilmiştir [15].

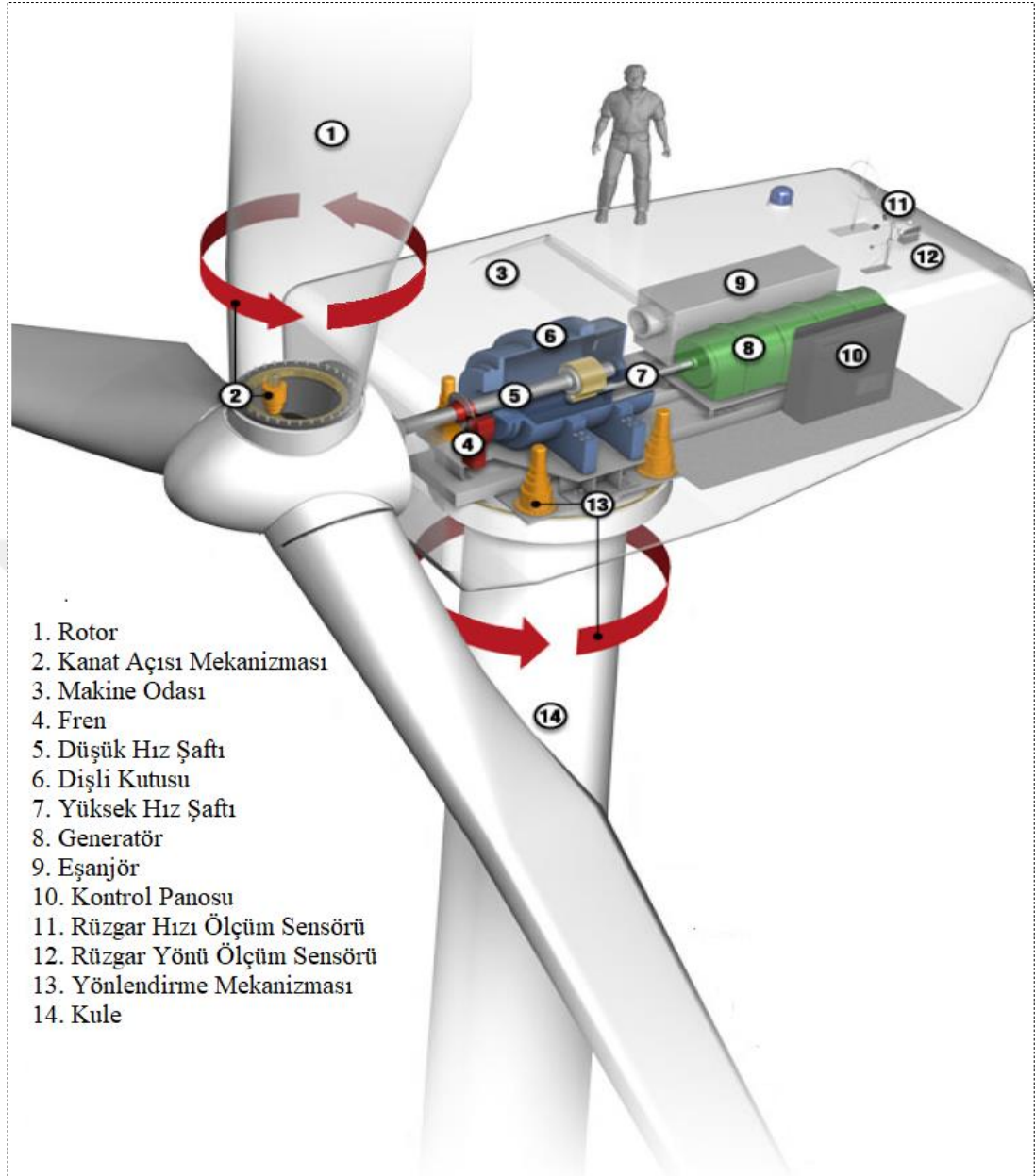
Tablo 1.1. Rüzgar türbini bileşenlerinin gruplandırılması

Mekaniksel	Birincil	Temel, kule, makine odası, rotor
	İkincil	Dişli Kutusu, fren, hidrolik kontrol sistemi, yağlama ve soğutma sistemi
Elektriksel	Birincil	Generatör, kontrol sistemi
	İkincil	Transformatör, frekans dönüştürücü, anemometre, rüzgar yönü sensörü

Şekil 1.1’de örnek olarak günümüzde en çok kullanılan üç kanatlı yatay eksenli bir rüzgar türbini kesiti verilmiş ve çeşitli bileşenleri gösterilmiştir. Bazı bileşenler birkaç yapının bir araya gelmesiyle oluşur. Aşağıda bu bileşenlerin görevleri ve tanımları kısaca bahsedilmiştir [16].

1- Rotor; göbek ve kanatlardan oluşmaktadır. Rüzgarın kinetik enerjisini mekanik enerjiye çeviren kanatlar göbeğe monte edilir. Günümüzdeki rüzgar türbini kanatları uçak kanadına benzer. Yapı itibarıyla içi boş, hafif ve dayanıklıdır. Polyester ile kuvvetlendirilmiş fiberglass veya epoksi ile güçlendirilmiş fiber karbondan yapılmakta ve omurga ile desteklenmektedir [2].

2- Kanat açısı mekanizması; değişken hızlı rüzgar türbinleri için rüzgar hızı arttığında rotor hızını ve kanatlara uygulanan kuvveti azaltmak yani türbini korumak için kanatlara açı yaptıran mekanizmadır.



Şekil 1.1. Rüzgar türbinine ait başlıca ekipman ve mekanizmaların gösterimi [16]

3- Makine odası; kulenin tepesinde bulunan kuleye rulmanlar ile bağlanmış yönlendirme mekanizmasıyla dönebilen odadır. Hareket kabiliyeti enerji kablolarının burkulma tehlikesine karşı birkaç turla sınırlandırılmıştır. İçerisinde generatör, varsa dişli kutusu, yardımcı ekipmanlar ve kontrol panosu bulunur.

4- Fren; türbin şaftını bakım zamanında ve duruş anında mekanik olarak kitlemek için kullanılır. Elektrikli ya da hidrolik sistem ile çalışır. Frenler tasarıma göre dişli kutu üzerinde olabilir ya da rotorda disk şeklinde de bulunabilir.

5- Düşük hız şaftı; düşük hızla dönen türbin rotorunun bulunduğu şafttır. Eğer sistemde dişli kutusu varsa dişli kutusu ile türbin rotoru arasında kalır. Eğer doğrudan tahrikli sistemse generatör rotoruna kadar uzanır.

6- Dişli kutusu; türbinde kullanılan generatörün elektrik enerjisini üretmesi için düşük hızlardan, olması gereken anma hızı aralığına yükselten mekanik dişli aksamdır. Doğrudan tahrikli sistemlerde dişli kutusu bulunmaz. Genellikle az kutuplu asenkron generatörler ile birlikte kullanılır.

7- Yüksek hız şaftı; dişli kutusu bulunan sistemlerde, dişli kutusundan sonra uzanan generatör rotorunun bağlı bulunduğu şafttır.

8- Generatör; rüzgar vasıtasıyla türbinde oluşan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren elektrik makinesidir. Üretilen elektrik enerjisi, iletim hatlarıyla şebekeye verilir ya da batarya grubuna depolanır.

9- Eşanjör; generatörün soğutma tipine göre bulunan, eğer varsa dişli kutusuna ait yağlama ünitesindeki yağın soğutulmasını sağlayan ekipmandır.

10- Kontrol panosu; rüzgar türbininin otonom çalışmasını sağlayan elektromekanik ve dijital kontrol cihazlarının bulunduğu panodur.

11- Rüzgar hızı ölçüm sensörü (Anemometre); rüzgar hızını ölçüp analog sinyalleri kontrol panosuna ileten sensördür.

12- Rüzgar yönü ölçüm sensörü; rüzgarın akış yönünü ölçüp analog sinyalleri kontrol panosuna ileten sensördür.

13- Yönlendirme mekanizması; rüzgar yönü ölçüm sensöründen aldığı bilgiye göre türbinin kanatlarını ve makine odasının yönünü rüzgara göre yönlendiren, kulenin en üstünde bulunan mekanizmadır.

14- Kule; makine odasını ve kanatları taşıyan yapıdır. Havada bulunan rüzgar yükseklik arttıkça daha da çok olacağından kulelerin boyutu tasarıma göre yükselmektedir. Bu sayede daha büyük uzunlukta kanatlar da üretilir. Kule taşıma ve üretim kolaylığı bakımından birkaç parçadan oluşabilir. Makine odasına erişmek için içerisinde merdiven vardır. Günümüz türbinlerinde merdivene ek olarak asansör de

ilave edilmektedir. Frekans dönüştürücüleri genellikle kulenin en alt katında muhafaza edilir. Rüzgar türbinlerinin en önemli ekipmanlarından birisidir. Eğer kule yeterince iyi tasarlanmamış ve sağlam değilse büyük fırtınalı havalarda devrilebilir.

15- Temel; rüzgar türbininin, eğer kara üstüyse yeryüzünde durmasını sağlayan, eğer deniz üstüyse deniz üstünde durmasını sağlayan inşaat yapısıdır. Kule her ne kadar sağlam olsa da temeli sağlam olmayan rüzgar türbinleri rüzgardan kaynaklı yanal kuvvetlere karşı koyamazsa devrilebilir, bu da ciddi anlamda can ve mal kaybına neden olabilir.

16- Frekans dönüştürücüsü; yapısında yarı iletken güç elektroniği bileşenleri bulunan, generatörde üretilen alternatif akımı doğrultarak şebeke ile aynı frekansa sahip alternatif akıma dönüştüren cihazdır.

17- Transformatör; generatörün çıkış gerilimini şebeke gerilimine yükselten elektrik makinasıdır.

Rüzgar türbinleri, çeşitli neden ve amaçlara bağlı olarak; eksen tipine göre, hızlarına göre, kuruldukları yere göre ve tahrik mekanizmasına göre sınıflandırılabilir:

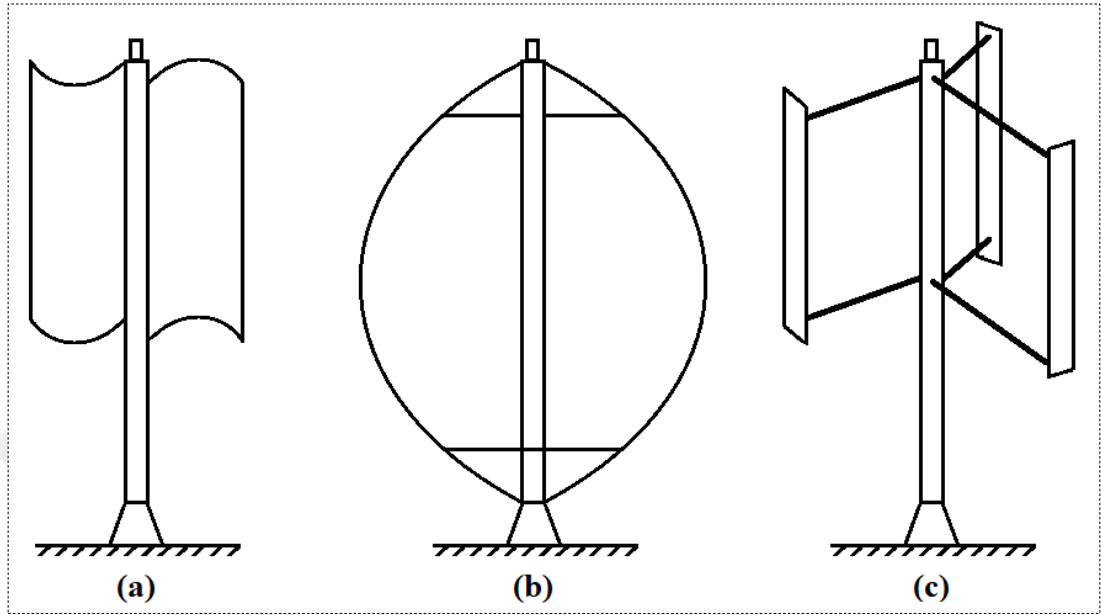
1.1. Eksen Tipine Göre Sınıflandırılmış Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri dönme ekseninin yönüne yani şaftının yere göre durumuna göre dikey eksenli rüzgar türbinleri ve yatay eksenli rüzgar türbinleri olmak üzere iki alt sınıfa ayrılırlar:

1.1.1. Dikey eksenli rüzgar türbinleri

Dikey eksenli rüzgar türbinleri, kendi içinde Savonius ve Darrieus olarak iki tipe ayrılır. Savonius tipi rüzgar türbininin kanatları kepçe ya da “S” şeklinde iki adettir. Bu yapısından dolayı kanatlarında türbülanslar oluşur [17]. Uygulamada neredeyse hiç yoktur, sadece rüzgar hızını ölçmek için kullanılan fincan şeklindeki anemometreler Savonius tipine benzemektedir [16]. Bir diğer tip ise Darrieus tipi rüzgar türbinleridir. Uygulamada Eliptik ve H-Rotor olarak iki çeşide ayrılır. Eliptik Darrieus türbininin kanatları üstten ve alttan birleştirilmiş elips şeklindedir [17, 18].

H-Rotor Darrieus türbininin kanatları ise H şeklinde üç bıçaktan oluşur. Şekil 1.2’de örnek dikey eksenli rüzgar türbini tipleri gösterilmiştir.



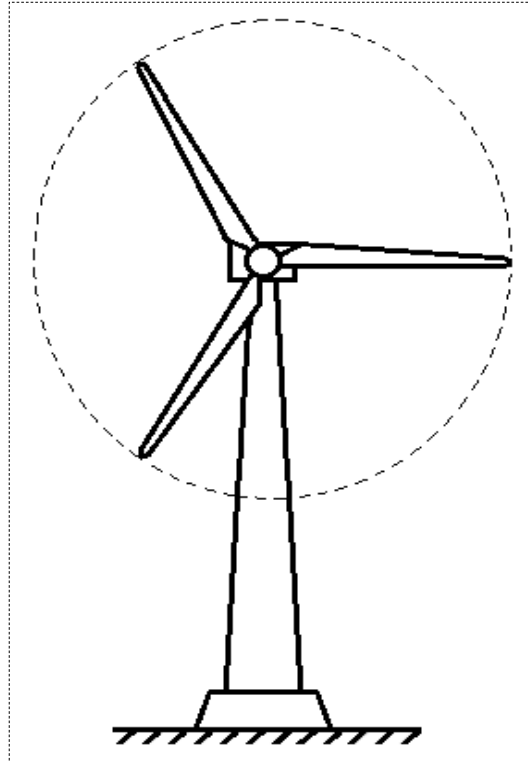
Şekil 1.2. Dikey eksenli rüzgar türbini örnekleri (a) Savonius (b) Eliptik Darrieus (c) H-Rotor Darrieus

Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin en büyük avantajı rüzgar yönü fark etmeksizin her yönden rüzgar gücünü alabilen rüzgar türbinleri olmasıdır. Fakat bu avantaj türbinin verimliliği ve verdiği güç açısından bir dezavantajdır [19]. Ayrıca türbin kanatlarının yatay eksenli türbin kanatlarına göre yeryüzüne yakın olması da verimliliği etkileyen bir diğer faktördür [20]. Kanatlar sabittir ve kanat açısı kontrolü yoktur, türbin pasif fren ile kontrol edilir. Rüzgarın kanatlara girip çıkmasıyla generatörde tork dalgalanması oluşur ve yüksek hızlarda bu durumu kontrol altında tutmak zordur [18]. Makine odası yoktur, dişli kutusu, generatör ve diğer ekipmanlar zemine yerleştirilir [21, 22]. Rotoru uzundur, buna bağlı olarak burulma, mukavemet titreşimleri sorun haline gelebilmektedir. [23]. Darrieus tipi dikey eksenli rüzgar türbinleri 1980’lerin sonuna kadar geliştirilmiş ve ticari olarak üretilmiştir. Daha sonrasında ise araştırmalar ve geliştirmeler neredeyse durmuştur. En büyük dikey eksen rüzgar türbini, Kanada’da kurulan 4200kW gücündeki Ecole C’dir [21].

1.1.2. Yatay eksenli rüzgar türbinleri

Yatay eksenli rüzgar türbinleri, rüzgarın hızından etkin biçimde yararlanabilmesi ve türbülansın daha az etkilenmesi gibi nedenlerle rüzgar santrallerinde en çok

kullanılan türbin çeşididir. Kanat profiline kazandırdığı aerodinamikle havanın kaldırma kuvvetinden faydalandığı için yüksek güçler elde edilebilmektedir [24]. Verimlilik ve denge açısından genellikle üç kanatlı olarak kullanılırlar fakat dört kanatlı, beş kanatlı veya iki kanatlı olanları da vardır [15]. Yüksekte bulunan kanatlar daha fazla güç yoğunluğu bulunan rüzgarı yakalar. Dikey eksenli rüzgar türbinine kıyasla, türbin kanatları ve makine odası bir kule üzerindedir. Dezavantaj olarak makine odasında bulunan generatör, dişli kutusu ve diğer makine ekipmanları kule üzerinde ek bir ağırlık yaparlar. Yatay eksenli rüzgar türbinleri, rüzgarın kuleye ulaşmadan rotora önden gelmesi durumunda ileri ya da önden rüzgarlı rüzgar türbini adını alırlar. Rüzgarın önce kuleye çarpıp daha sonra rotora arkadan gelmesi durumunda ise geri ya da arkadan rüzgarlı türbin adını alırlar. Günümüzde kullanılanlar ise üç kanatlı önden rüzgarlı yatay eksenli rüzgar türbinleridir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde en iyi verim, rüzgarın türbine dik olacak şekilde akmasıyla elde edilir. Bunun için türbinin kanatlarının bulunduğu göbek, rüzgarın yönüne doğru kule üzerinde sınırlı tur sayısı ile yönlendirme kontrolü yaparak döner. Ayrıca rüzgarın akışını en iyi şekilde ayarlamak için kanatlarıyla açı kontrolü de yaparlar. Şekil 1.3'te örnek üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbini gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbini örneği

1.2. Hızlarına Göre Sınıflandırılmış Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri, şaftın dönüş hızına göre sabit hızlı rüzgar türbinleri ve değişken hızlı rüzgar türbinleri olmak üzere iki alt sınıfa ayrılırlar:

1.2.1. Sabit hızlı rüzgar türbinleri

Sabit hızlı rüzgar türbinleri, 1990'ların başında kullanılan en yaygın rüzgar türbinleriydi [19, 21]. Bu tip türbinlerin generatörü genellikle sincap kafesli asenkron generatörlerdir [13]. Sabit hızlı türbin generatörünün stator sargıları şebekeye doğrudan bağlı olarak rüzgar hızından bağımsız bir şekilde sabit frekansta gerilim endükler. Belirli bir rüzgar hızından en yüksek verim ve güç elde etmek için tasarlanmışlardır [21]. Bu tip türbinler basit, sağlam, güvenilir ve en düşük maliyete sahip elektromekanik donanımlara sahiptir. Dezavantajlarının başında mekanik stres, gürültü, kontrol edilemeyen reaktif güç tüketimi ve sınırlı güç kalitesi kontrolüdür [19, 25]. Zayıf şebekelerde kullanıldığında, güç dalgalanmaları aynı zamanda gerilim dalgalanmalarına neden olacağından önemli boyutlarda hat kayıplarına neden olur [21].

1.2.2. Değişken hızlı rüzgar türbinleri

Değişken hızlı rüzgar türbinleri, çeşitli rüzgar hızlarından maksimum güç elde etmek için tasarlanmışlardır. Son yıllarda, kurulu rüzgar türbinleri arasında değişken hızlı rüzgar türbinleri baskın hale gelmiştir [19, 21]. Dişli kutulu ve özellikle düşük hızlı doğrudan tahrikli sistemlerde başarıyla uygulanır. Türbinin dönme hızı, şebeke frekansından bağımsız olarak rüzgarın dönme hızına göre değişir, aktif ve reaktif güçler dönüştürücü vasıtasıyla kolayca kontrol edilebilir. Sabit hızlı rüzgar türbinlerine göre daha az mekanik stres, daha az gürültü, daha fazla verim ve daha kaliteli güç sağlar [25]. Generatörde oluşan elektromanyetik tork kararlı yapıdadır. Dezavantajları ise, daha fazla bileşenden oluşması, dönüştürücü ile birlikte kullanılması, anahtarlama elemanlarının oluşturduğu ek kayıplar, karmaşık kontrol sistemi ve artan donanımların maliyetli olmasıdır [19, 25]. Değişken hızlı rüzgar türbinleri çeşitli generatör – dönüştürücü kombinasyonlarına elverişlidir.

1.3. Kuruldukları Yerlere Göre Sınıflandırılmış Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri, kuruldukları yer bakımından kara üstü rüzgar türbinleri ve deniz üstü rüzgar türbinleri olmak üzere iki alt sınıfa ayrılırlar:

1.3.1. Kara üstü rüzgar türbinleri

Kara üstü rüzgar türbinleri adından da anlaşılabilceği gibi karaya kurulan rüzgar türbinleridir. Dünya geneline bakıldığında rüzgar türbinleri en çok karaya kurulmuştur. Avantajları arasında deniz üstü kurulanlara göre türbine erişmek, arıza gidermek daha kolaydır ve maliyetleri daha düşüktür. Dezavantajları arasında, deniz üstüne göre daha fazla kule uzunluğu gerektirmesi, daha az verimlilik gibi nedenler vardır ve karada toprak işgal etmekte, yerleşim yerlerine yakın kurulanlar gürültüye sebebiyet vermektedir [15]. Ar-Ge çalışmaları, kara üstü rüzgar türbinlerinin kurulum yerlerinin azalmasından ve deniz üstü rüzgar türbinlerinin çeşitli avantajlarından dolayı artık deniz üstü rüzgar türbinlerine ağırlık vermektedir [26].

1.3.2. Deniz üstü rüzgar türbinleri

Karadan uzak, denizin üstünde mevcut şartlara göre özel olarak tasarlanmış bir temel ile kurulan rüzgar türbinlerine deniz üstü rüzgar türbinleri denmektedir. Denizlerdeki rüzgar, karadaki rüzgarlara göre daha sert ve sabittir. Denizlere kurulan türbinler karaya kurulanlara göre daha büyük, kurulum ve bakım maliyetleri fazladır [15, 19]. Bu maliyet karadan uzaklığa ve denizdeki suyun derinliğine göre artar [19]. Suyun çok derin olmadığı yerlerde kule temeli yere sabitlenmekte, daha derin sular için yüzen temeller daha ekonomik olabilmektedir [15]. Kule boyutu kara üstü rüzgar türbinlerine göre daha kısadır [27]. Herhangi bir durum karşısında türbinlere ulaşmak hava, rüzgar, dalgalar, derinlik gibi nedenlerden dolayı zor olabilmektedir [27]. Bu türbinler her ne kadar pahalı olsa da, nem ve ayrıca tuzluluk gibi nedenlerle mekanik donanımlarda sorunlara yol açsa da enerji üretimi tam yük süreleri açısından büyük avantajlar sağlar ve güvenilir güç kaynağı olarak kabul edilebilir [15, 19]. Bakım maliyetlerini ve arıza olasılığını en aza indirmek için dişli kutusu ve fırça bilezik tertibatı bulunmayan doğrudan tahrikli mıknatıs uyarmalı senkron generatör rüzgar türbinleri deniz üstü kurulum için önemli bir avantaj sağladığı görülmektedir.

1.4. Tahrik Mekanizmasına Göre Sınıflandırılmış Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri, dişli kutusu bulunan, arada herhangi bir aktarma organı bulunmayıp doğrudan tahrikli olan ve kayış – zincir tertibatlı olmak üzere üç alt sınıfa ayrılırlar:

1.4.1. Dişli kutusu sürücülü rüzgar türbinleri

Dişli kutusunun görevi, rotorun bağlı bulunduğu shaftın düşük dönme hızındaki mekanik enerjisini, belirli bir dönüşüm oranıyla rotorun bağlı bulunduğu shafta yüksek hızlı olacak şekilde aktarmaktır. Bu türbinlerde genellikle asenkron generatör kullanılmaktadır ve bu generatörler az kutuplu dolayısıyla yüksek devir sayısına sahiptir. Sabit hızlı türbinlerde kullanılan sincap kafesli asenkron generatör yapılarında üç kademeli dişli kutusu kullanılmaktaydı [28]. Dişli kutuları, rüzgar türbinlerinin boyutu ve rüzgar hızındaki değişimler nedeniyle sürekli değişen torklara maruz kaldığından rüzgar türbinlerindeki en zayıf halka olarak bilinir [19, 29]. Türbin kulesi üzerinde ek bir ağırlık yaratması, makine odasında yer kaplaması, arızalanma olasılığının yüksek olması ve buna bağlı olarak sık bakım gerektirmesi, harici yağlama sistemine ihtiyaç duyması, dişlilerden ve döner ekipmanlardan kaynaklı verim kaybının yaşanması, dişlilerin gürültü oluşturması, ek maliyet oluşturması dişli kutusunun dezavantajları arasında yer alır. Generatörde oluşan kayıpların neredeyse %70'i dişli kutusunda oluşmaktadır [30]. Günümüzde generatör ve dönüştürücü tekniklerinin geliştirilmesine bağlı doğrudan tahrikli sistemler yaygınlaşmaktadır.

1.4.2. Doğrudan tahrikli rüzgar türbinleri

Arada herhangi bir aktarma organı bulunmayan türbin rotoru ile generatör rotorunun aynı shaft üzerinde olduğu sistemlerdir. Günümüzde çok kutuplu olarak üretilen senkron generatörler arada dişli kutusu olmadan doğrudan tahrikli rüzgar türbini ile birlikte çalışmaktadır [31]. Dolayısıyla rotor hızı düşük, tork yüksektir. Dişli kutulu sisteme göre daha basittir ve dişli kutusu olmadığı için türbinin bakım ihtiyacını azaltır. Rotorun yavaş hızda dönmesi ve dişli kutusu olmayışı, türbinin daha az gürültülü çalışmasına ve dişli kaybının olmayışından dolayı verimliliğin artmasına neden olmaktadır. Dişli kutusu maliyetleri ve bakım maliyetleri ortadan kalkmakta

fakat güç arttıkça ve hız azaldıkça generatörün boyutunu daha büyük ve maliyetli yaptığından bu sistemler daha maliyetli olabilmektedir [30]. Enerji verimliliği ve güvenilirliği göz önüne alındığında deniz üstü rüzgar türbinleri için en ideal çözümdür [19, 28].

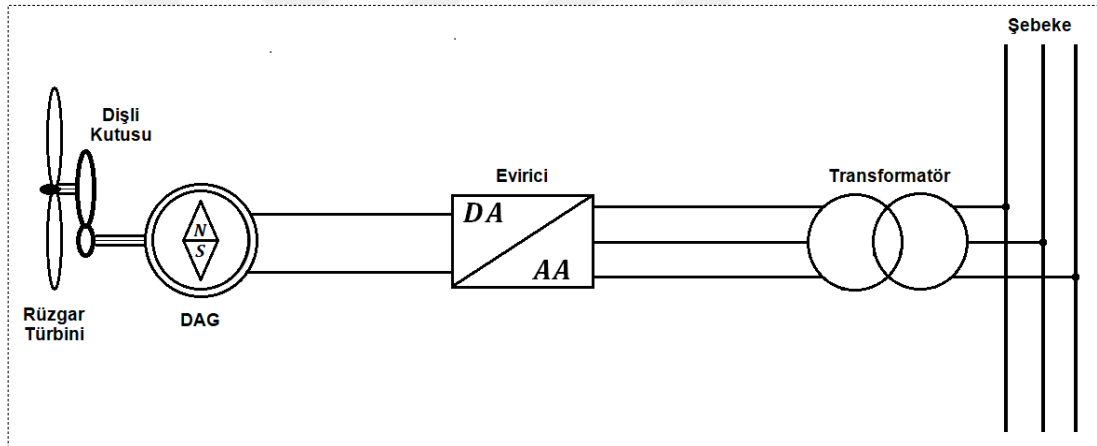
1.4.3. Kayış - zincir sürücülü rüzgar türbinleri

Ticari uygulamalarda görülmesi de dişli kutusu yerine kayış – zincir sürücülü rüzgar türbinleri için çalışmaların olduğu görülmektedir ve teorik olarak mümkündür. Eğer rotor şaftı ile türbin şaftı arasındaki mesafe uzaksa kayış – zincir sistemi kullanılabilir [15]. Fakat kullanılan kayış – zincir sisteminin yüksek hızlarda çalışabilme kabiliyetinin ve sağlamlığının iyi olması kaçınılmaz bir durumdur. Hobi türbinleri için dişli kutusu yerine kullanılacak en ideal çözüm olabilir.

2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖRLER

2.1. Doğru Akım Generatörleri

Doğru akım generatörleri, güvenilirliklerinin düşük olması ve bakım gerektirmesi gibi nedenlere rağmen düşük güçlü rüzgar türbinlerinde ve hobi amaçlı olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda, makinedeki komütatör aşınmasını yok etmek için etmek için kalıcı mıknatıslı olarak tasarlanırlar ve akım çıkışı yarı iletken doğrultucularla doğrultulur. Bu şekilde generatörün güvenilirliği artırılabilir. Hız kontrolü kolaydır. Genellikle seri ve şönt bağlantıya sahiptirler [32]. Basit örnek olarak doğru akım generatörlü rüzgar türbini Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Doğru akım generatörlü rüzgar türbini modeli

2.2. Alternatif Akım Asenkron Generatörler

Asenkron generatörler, mekanik sadeliği, yüksek verimliliği ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle rüzgar türbinlerinde en yaygın kullanılan generatörlerdir. Asenkron generatörlerin statorundaki manyetik alan, akımın frekansına ve sargılardaki kutup sayısına göre senkron hızda döner. Eğer rotor bu manyetik alandan arada kayma oluşturarak daha küçük hızda dönerse motor modunda, rotoru dışarıdan rüzgar türbini gibi bir tahrik mekanizması ile tahrik edilerek senkron hızdan büyük hızda döndürülürse yani makine senkron üstüyse kaymaya bağlı olarak

generatör durumunda çalışır ve şebekeye güç verir fakat reaktif güç tüketir. Başlıca dezavantajı statorda gerilim oluşması için mıknatıslanma akımına ihtiyaç duymasındır.

Asenkron generatörler, sincap kafesli asenkron generatörler ve rotoru sargılı (bilezikli) asenkron generatörler olmak üzere iki gruba ayrılırlar:

2.2.1. Sincap kafesli asenkron generatörler

Rotorunda kısa devre edilmiş çubukların kenarlarından halka şeklinde birleştirilmesiyle oluşan yapının tıpkı bir sincap kafesine benzemesinden dolayı bu şekilde adlandırılır. Rotorunda kısa devre edilmiş çubukların bulunmasından dolayı fırça sistemi yoktur, bu yüzden dışardan kontrol sağlanamaz. Türbin ile sincap kafesli asenkron generatör arasında dişli kutusu bulunur.

Eski uygulamalarda rotorun mıknatıslanma için ihtiyaç duyduğu reaktif gücü sağlamak için kondansatör bankalarıyla ve yumuşak yol vericilerle birlikte sabit hızlarda kullanılırken daha sonraları stator sargısına ve şebeke arasında dört bölgeli tam ölçekli frekans dönüştürücüsü kullanılarak da uygulanmıştır. Bu sayede değişken hızlarda da işletilmiştir [33, 34]. Daha sonraları tam ölçekli frekans dönüştürücülerinin sıklıkla uygulanmaya başlamasıyla yerini çift beslemeli asenkron generatörlere bırakmıştır. Bu uygulamalarda dönüştürücünün stator tarafı yani doğrultucu katı elektromanyetik torku düzenler ve makinenin ihtiyaç duyduğu mıknatıslanma için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafı dönüştürücü yani evirici katı şebekeye verilen aktif ve reaktif gücü düzenler, DA bara gerilimini sabit tutar.

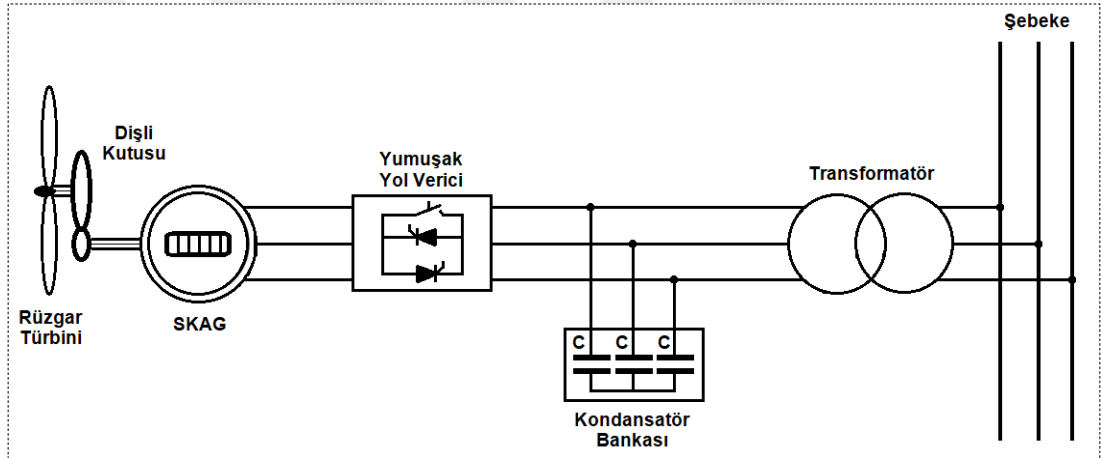
Sincap kafesli asenkron generatörlerin kullanım avantajları arasında [35];

- Sağlam yapılıdır, fırça düzeneği yoktur, ekonomiktir.
- Eğer varsa frekans dönüştürücüsünün doğrultucu katı ayarlanabilir uyarma akımı üretebilir.
- Tepkisi hızlıdır.
- Eğer varsa yedek kondansatör grubu mevcut olduğunda evirici katı reaktif güç kompanzasyonu yapabilir.

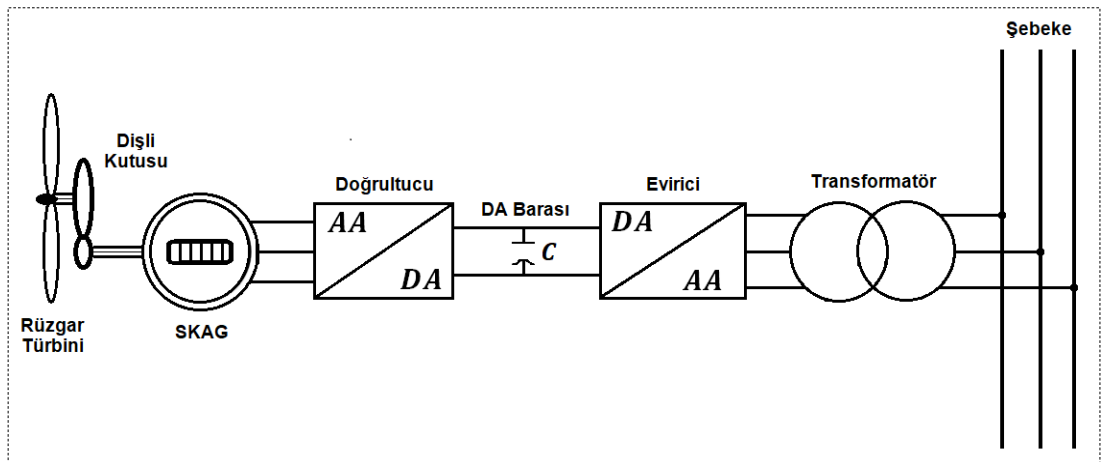
Dezavantajları arasında [19, 35, 36];

- Karmaşık kontrol sistemine sahiptir ve kontrol sistemini uygulayabilmek için sıcaklık ve frekansa göre değişen generatör parametrelerinin iyi bilinmesi gerekir.
- Makinenin mıknatıslanma akımını karşılamak için eğer varsa dönüştürücünün anma gücü generatöre göre %30-50 arasında daha fazla olması gerekir. Bu da fazladan maliyet oluşturur.
- Moment hız eğrisi doğrusaldır, böylece rüzgar gücündeki dalgalanmalar doğrudan şebekeye iletilir. Bu geçici akımlar, anma akımının 7-8 katına kadar olabileceğinden şebeke bağlantısı çok önemlidir.

Basit örnek olarak Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te sincap kafesli asenkron generatörlü rüzgar türbini modelleri verilmiştir.



Şekil 2.2. Yumuşak yol verici ile sürülmüş sincap kafesli asenkron generatörlü rüzgar türbini modeli



Şekil 2.3. Frekans dönüştürücüsü ile kontrol edilmiş sincap kafesli asenkron generatörlü rüzgar türbini modeli

2.2.2. Rotoru sargılı (bilezikli) asenkron generatörler

Rotoru sargılı asenkron generatörler, rotorunda kayar bilezikli fırça sistemi bulunan veya elektronik uyarım düzenine sahip asenkron generatörlerdir. Bu sayede rotor akımının dışarıdan kontrol edilebilme özelliği vardır. Türbin şaftıyla generatör şaftı arasında istenilen hız aralığını elde etmek için dişli kutusu vardır. Sabit hızlı çalışan türbinlerin yerini almışlardır ve günümüzde tercih edilen dolayısıyla yaygın olarak kullanılan generatör tipidir. Sincap kafesli asenkron generatörler ile kıyaslandığında onun kadar basit ve sağlam değildir [37].

Rotoru sargılı asenkron generatörler kendi içerisinde iki alt gruba ayrılarak rüzgar türbinlerinde kullanılırlar:

2.2.2.1. Çift beslemeli asenkron generatörler

Bu tip generatörlere çift beslemeli denmesinin sebebi stator sargıları doğrudan şebekeye bağlı, rotor sargılarının ise arada frekans dönüştürücüsü ile şebekeye bağlı olmasından kaynaklanır. Senkron altı ve senkron üstü hızlarda, geniş ama sınırlı bir aralıkta değişken hızlı olarak çalışırlar. Bu generatörlerde kullanılan dönüştürücü, mekanik ve elektriksel frekans farkına göre değişken frekanslı bir rotor akımı üretir [36]. Aynı zamanda rotor üzerinde çift yönlü bir güç akışı söz konusudur. Frekans dönüştürücüsü, stator tarafı ve şebeke tarafı olarak ikiye ayrılır. Stator tarafı kontrol, vektör kontrolü kullanarak aktif ve reaktif gücü kontrol eder, elektromanyetik torku düzenler ve generatörün mknatisiyetini sürdürebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafı kontrol, DA bara gerilimini ve frekansını, şebeke aktif ve reaktif gücünü dolayısıyla güç faktörünü kontrol eder. Bu sayede zayıf şebekelerde reaktif güç üretme ve tüketme kabiliyeti sayesinde zayıf şebekelerde başarılı olur [36]. Frekans dönüştürücüsünün boyutu seçilen hız aralığının %70 kadarını kullanır, bu da dönüştürücü seçiminde verimliliği artırır ve yatırım maliyetlerini azaltır [19].

Çift beslemeli asenkron generatörlerin kullanım avantajları arasında [35, 38];

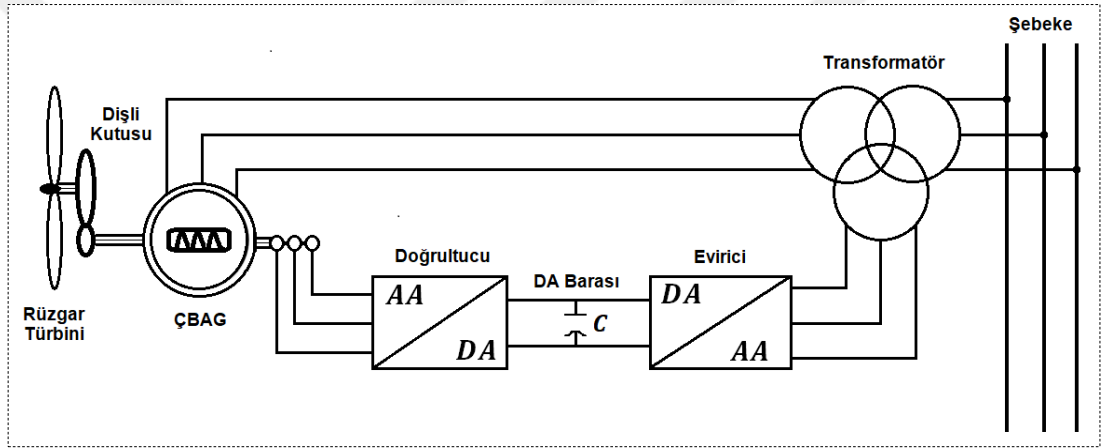
- Frekans dönüştürücüsünün anma gücü, rotor ile şebeke arasında bulunduğu için toplam gücün %25'ini oluşturur. Bu da dönüştürücü maliyetini azaltır.
- Filtre elemanları yine anma gücünün %25'i kadarı olduğu için maliyeti düşüktür, harmonikler daha azdır.

- Titreşim gibi dış etkenlere karşı dayanıklı ve kararlıdır.

Dezavantajları arasında [35, 37];

- Kontrol sistemi karmaşıktır.
- Rotorunda sargılar bulunduğu için bakır kaybı vardır.
- Bilezik ve fırçaların bulunması nedeniyle aşınmadan kaynaklı kayıp vardır, özellikle deniz kenarında ve deniz aşırı rüzgar türbinlerinde periyodik bakım yapılması önemlidir.

Basit örnek olarak Şekil 2.4'te çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbini modeli verilmiştir.



Şekil 2.4. Çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbini modeli

2.2.2.2. Opti – Slip asenkron generatörler

Opti – Slip asenkron generatörler, rotoru sargılı asenkron generatörlerin bilezik fırça sistemi olmadan rotordaki kaymanın değiştirilebildiği generatörlerdir. Rotor sargısının direnci arttıkça kayma da artar. Harici dirençler rotora monte edilir. Daha az anahtarlama ve basit kontrol düzeneği kullanılarak fiber optik haberleşme yöntemiyle kayma değiştirilebilir. Opti – Slip özelliği ile değiştirilen kayma sayesinde tork ve güç çıkışında daha küçük dalgalanmalar oluşur [36, 39]. Generatörün statoru doğrudan şebekeye bağlıdır.

Opti – Slip asenkron generatörlerin kullanım avantajları arasında [25, 39];

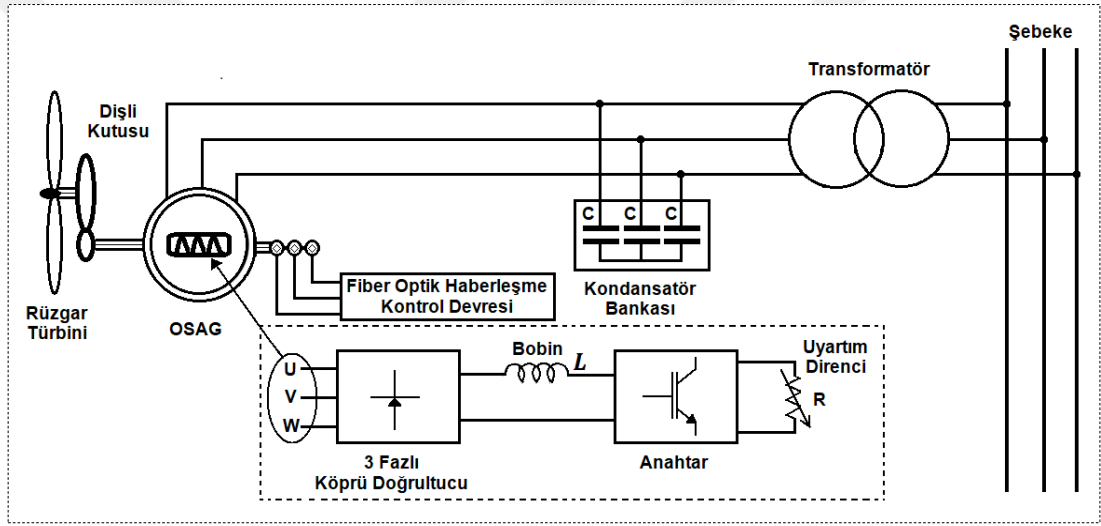
- Kontrol devresi basittir ve güç elektroniği anahtarlarının sayısı azdır.

- Sincap kafesli asenkron generatörler ile karşılaştırıldığında daha fazla hız aralığına sahiptir.
- Kurulum maliyeti, işletme maliyeti azdır.

Dezavantajları arasında [25, 36, 39];

- Çalışma hızı aralığı %0-10 ile sınırlıdır.
- Aktif ve reaktif güç kontrolü zayıftır. Reaktif güç dengeleme sistemi gerektirir.
- Kayma gücü ayarlanabilir dirençte bakır kaybı oluşturur.

Basit örnek olarak Şekil 2.5'te Opti – Slip asenkron generatörlü rüzgar türbini modeli verilmiştir.



Şekil 2.5. Opti – Slip asenkron generatörlü rüzgar türbini modeli

2.3. Alternatif Akım Senkron Generatörler

Senkron generatörler, statorda oluşan manyetik alanın hızına yani şebeke frekansına senkron olarak çalışan generatörlerdir. Senkron hız, döner alanın frekansı ve rotorun kutup çifti sayısı ile belirlenir. Enerji üretiminde en çok kullanılan generatör tipidir. Dişli kutusu bulunan uygulamalar ve çok kutuplu ise doğrudan tahrikli uygulamalar vardır. Asenkron generatörler ile kıyaslandığında senkron generatörler aynı boyuttaki asenkron generatörlerden daha pahalı ve mekanik olarak karmaşıktır [19].

Alternatif akım senkron generatörler kendi içinde iki alt gruba ayrılarak rüzgar türbinlerinde kullanılırlar:

2.3.1. Rotoru sargılı senkron generatörler

Rotoru sargılı senkron generatörler, günümüzdeki rüzgar türbini uygulamalarında çok kutuplu olarak kullanılırlar ve yavaş dönerler. Genellikle rüzgar türbini uygulamalarında dişli kutusu olmadan doğrudan tahrikli olarak kullanılırlar fakat dişli kutusu olan sistemlerde vardır. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde stator sargısı ile şebeke arasına bir dönüştürücü konularak şebeke frekansı ile aynı frekansta gerilim elde edilir. Sabit hızlı rüzgar türbinlerinde ise arada dönüştürücü olmadan doğrudan şebekeye bağlanırlar [40]. Reaktif güç elemanlarına gereksinimi yoktur. Rotorunda oluşan mıknatıslanma, rotor sargılarına bilezik fırça tertibatıyla DA verilerek ya da fırçasız olarak rotorda bulunan döner doğrultuculu ek sargılı DA uyarım sistemi ile oluşturulur.

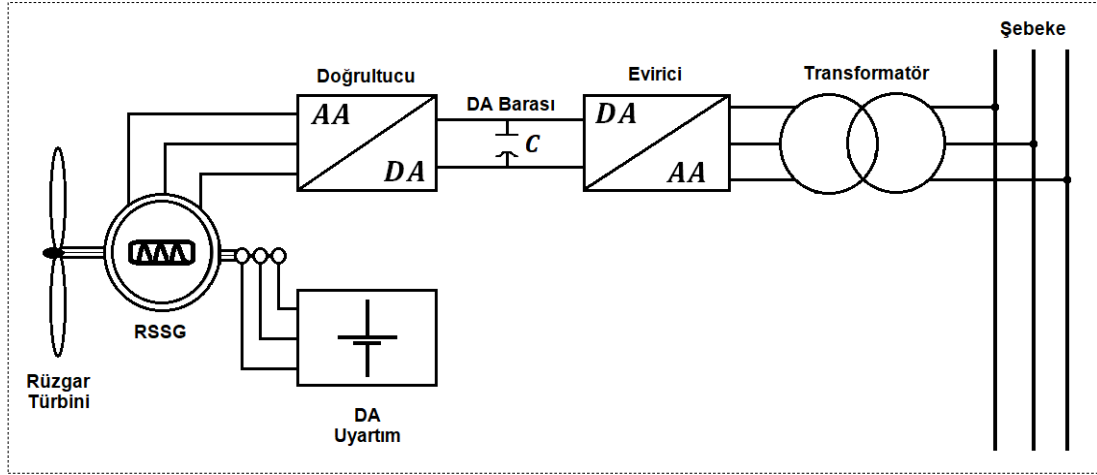
Rotoru sargılı senkron generatörlerin kullanım avantajları arasında [41];

- Verimlilik yüksektir, elektromanyetik tork üretimi için bütün stator akımını kullanır.
- Eğer dönüştürücü varsa dönüştürücünün rotor tarafı, farklı güç aralıkları için akı kontrol yaparak kayıplar en aza indirilebilir.
- Makinenin güç faktörü doğrudan kontrol edilebilir, stator akımı herhangi bir çalışma koşulunda en aza indirilebilir.
- Çok düşük hızlarda bile geniş ama sınırlı bir hız aralığında kontrol edilebilirler.
- Aktif ve reaktif güçler normal çalışmada ve şebeke hatası durumunda tam olarak kontrol edilebilirler.

Dezavantajları arasında [41];

- Rotorunun sargılı olması ve uyarım devresinin olması nedeniyle ilave bakır kayıpları oluşur.
- Eğer kullanılmışsa dönüştürücünün anma gücü, aktif ve reaktif gücü ayarlamak için %20 daha büyük seçilmelidir.
- Rotoru sargılı yapıda olduğu için kutup aralığı büyüktür, bu da rotorun daha büyük tasarlanmasına neden olur.

Basit örnek olarak Şekil 2.6'da rotoru sargılı senkron generatörlü rüzgar türbini modeli verilmiştir.



Şekil 2.6. Rotoru sargılı senkron generatörlü rüzgar türbini modeli

2.3.2. Mıknatıs uyarmalı senkron generatörler

Rotorunda sargılar yerine sürekli mıknatıslar bulunan senkron generatörlerdir ve rüzgar türbinleri için günümüzde önemli bir yere sahiptir. Kendinden uyarımlı olmasından dolayı, yüksek güç faktörü ve yüksek verimlilikte çalışırlar [21, 40]. En önemli özelliklerinden birisi arada dişli kutusu olmadan, geniş ölçekli düşük hızlarda yüksek tork üretmesidir. Mıknatıs uyarmalı senkron generatörler başlatma, senkronizasyon ve gerilim düzenlemesi sırasında bazı sorunlara neden olabilir [21, 39]. Bu nedenle bu tür generatörlerden elektrik enerjisi üretmek için mutlaka bir frekans dönüştürücü kullanılmalıdır ve kontrolü yapılmalıdır. Tüm bunlar ek maliyetleri beraberinde getirmektedir. Bakım genellikle yatak yağlamasıyla sınırlıdır [40]. Bu tip generatörlerde sıcaklığın kontrol edilmesi çok önemlidir. Sıcaklık yükseldikçe manyetik akı sağlayan mıknatıslar özelliklerini kaybedebilir [40].

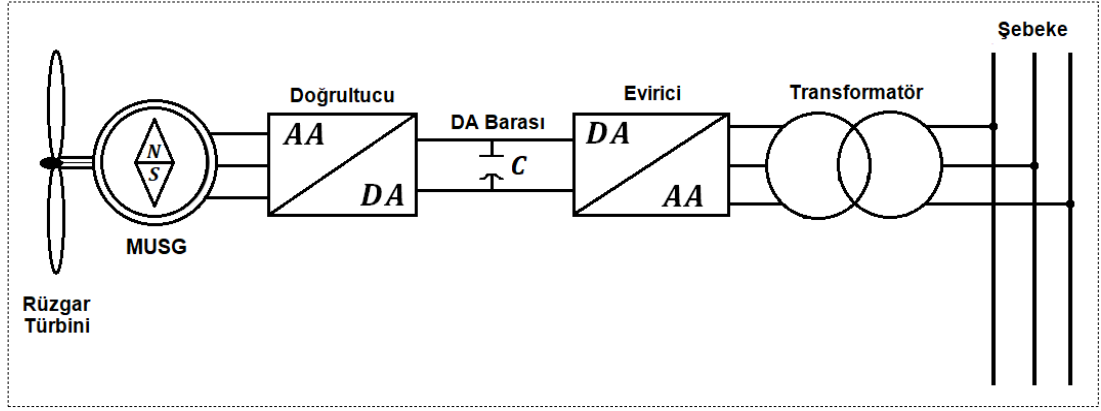
Mıknatıs uyarmalı senkron generatörlerin kullanım avantajları arasında [21, 39];

- İndüksiyon prensibine göre çalışan makinelerine göre verimliliği daha yüksektir.
- Düşük hızlarda yüksek tork üretirler, bu da doğrudan tahrikli rüzgar türbinleri için kullanım alanı yaratır.

Dezavantajları arasında [21];

- Sürekli mıknatısların maliyeti fazladır ve üretimi zordur.
- Çok mıknatıslı olmasından dolayı diğer generatörlere göre hacmi ve ağırlığı daha fazladır.

Basit örnek olarak Şekil 2.7’de mıknatıs uyarmalı senkron generatörlü rüzgar türbini modeli verilmiştir.



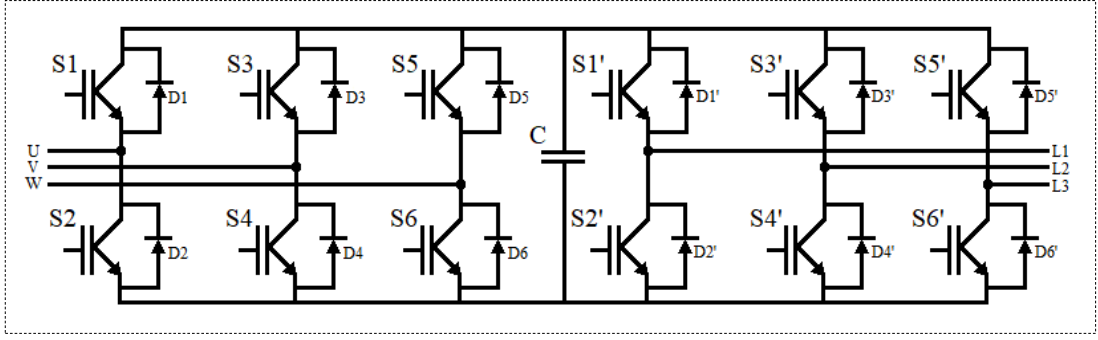
Şekil 2.7. Mıknatıs uyarmalı senkron generatörlü rüzgar türbini modeli

3. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Güç elektroniğinin hızla gelişmesi ve maliyetlerin düşmesiyle birlikte rüzgar türbinlerinde farklı yapıda dönüştürücüler de ortaya çıkmaktadır. Rüzgar türbinlerinde kullanılan ya da kullanılabilecek frekans dönüştürücüleri, ardışık (back-to-back) dönüştürücüler, tandem dönüştürücüler, matris dönüştürücüler, çok katlı dönüştürücüler ve rezonans dönüştürücüler olarak kısaca açıklanmıştır.

3.1. Ardışık Dönüştürücüler

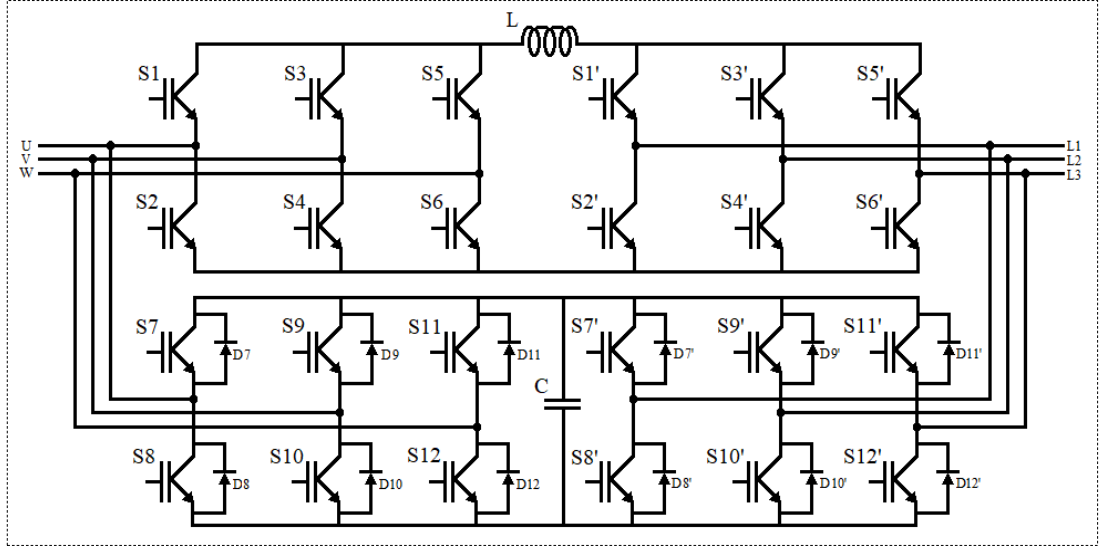
İki adet gerilim beslemeli dönüştürücüden oluşan çift yönlü bir frekans dönüştürücüsüdür. Yapısında DA barası ve kondansatör bulunur. DA bara gerilimi, şebeke akımını kontrol etmek için şebekenin faz-faz arası geriliminden daha yüksek tutulmalıdır [36, 40]. Kondansatörler, istenen gerilimi elde etmek için uygulamaya göre seri ya da paralel bağlanabilirler [13]. Çıkış gerilimi seviyesi genellikle 380V – 690V'tur [42]. Bu nedenle dönüştürücü çıkışında gerilimi yükseltmek için bir yükseltici transformatör kullanılır. Rüzgar türbini uygulamalarında dönüştürücünün (şebekeye güç üretimi çalışmasına göre) generatör tarafı yani kontrollü doğrultucu katı ve şebeke tarafı yani evirici katı olacak şekilde iki katı bulunur. Fakat iki yönlü bir dönüştürücü olduğu için bu işlem bazı durumlara göre tam tersi olarak da çalışabilir. Generatör ve şebeke arasında bir kondansatör bulunduğu için iki taraf ayrılarak bağımsız çalışmasına ve ikisinin ayrı ayrı kontrol edilmesine olanak sağlar [36, 42]. Fakat bu kondansatör ağır ve hacimlidir. Maliyetleri artırır ve sistemin genel ömrünü azaltır [40, 42]. DA barasına ek olarak bir yükseltici bobin konularak şebekede oluşabilecek anormal koşullara karşı bir miktar koruma sağlanabilir [40]. Anahtarlama kayıpları vardır. Yüksek anahtarlama hızı şebeke tarafında bir elektromanyetik gürültü filtresi gerektirebilir [40, 42]. En çok kullanılan frekans dönüştürücüsüdür. Bunun sonucu olarak gerekli bilgiler literatürde mevcuttur ve kaynaklardan kolaylıkla yararlanılabilir [40]. Ayrıca piyasada kabul görmüş bir pazarı olduğu için ve diğer dönüştürücülere göre maliyeti daha düşüktür [42]. Şekil 3.1'de ardışık dönüştürücü devre yapısı verilmiştir.



Şekil 3.1. Ardışık dönüştürücü devresi

3.2. Tandem Dönüştürücüler

Bu dönüştürücüler yeni geliştirilmiş bir frekans dönüştürücüleridir ve amacı iki yönlü frekans dönüştürücüsünde oluşan harmonik bozulmaları telafi etmek için aktif bir filtre kullanılmasıdır [40]. Yapısı itibariyle birincil dönüştürücü olarak bir akım kaynağı dönüştürücüden ve ikincil dönüştürücü olarak bir gerilim kaynağı dönüştürücüden oluşur. Toplamda on iki tane anahtarlama elemanı vardır. Tandem dönüştürücülerde, birincil dönüştürücünün düşük anahtarlama frekansı ve ikincil dönüştürücüdeki anahtarlama frekansının düşük seviyede olması kayıpların yaklaşık %70 oranında azalmasını sağlar [40]. Yapısında akım kaynaklı dönüştürücü bulunduğu için tek başına akım kaynaklı dönüştürücü ile karşılaştırıldığında, ikincil dönüştürücüde bulunan DA linkine bağlı kondansatör sayesinde giriş ve çıkış uçları arasında gerilim artışı olmaz fakat birincil dönüştürücü olarak akım kaynaklı dönüştürücü uygulamak sadece şebeke geriliminin %0,866'sını kullanabilir yapar. Bu da aynı gücü elde etmek için generatörden ve anahtarlardan daha fazla akım geçmesine neden olur [40]. Bu dönüştürücüde, akım büyüklüğünün gerilim kaynağı dönüştürücü tarafından, faz kayma akımının ise akım kaynağı dönüştürücü tarafından kontrolleri gerçekleşir [40]. Ayrıca birincil dönüştürücünün sebep olduğu bozulmaları, ikincil dönüştürücü hafif yük koşullarında eviricinin sönmelenmesini sağlayan aktif bir direnç gibi hareket edebilir [40]. Tandem dönüştürücüler çok fazla anahtarlama elemanı ve bileşen gerektirdiği için maliyeti fazladır ve kontrolü karmaşıktır [40]. Generatör uçları arasındaki gerilim ikincil dönüştürücü tarafından ayarlandığından dönüştürücüdeki gerilim stresleri yüksektir. Bu nedenle filtre gerektirebilir [40]. Henüz yeni bir yapı olduğu için araştırmaları devam etmektedir [40]. Şekil 3.2'de tandem dönüştürücü devre yapısı verilmiştir.

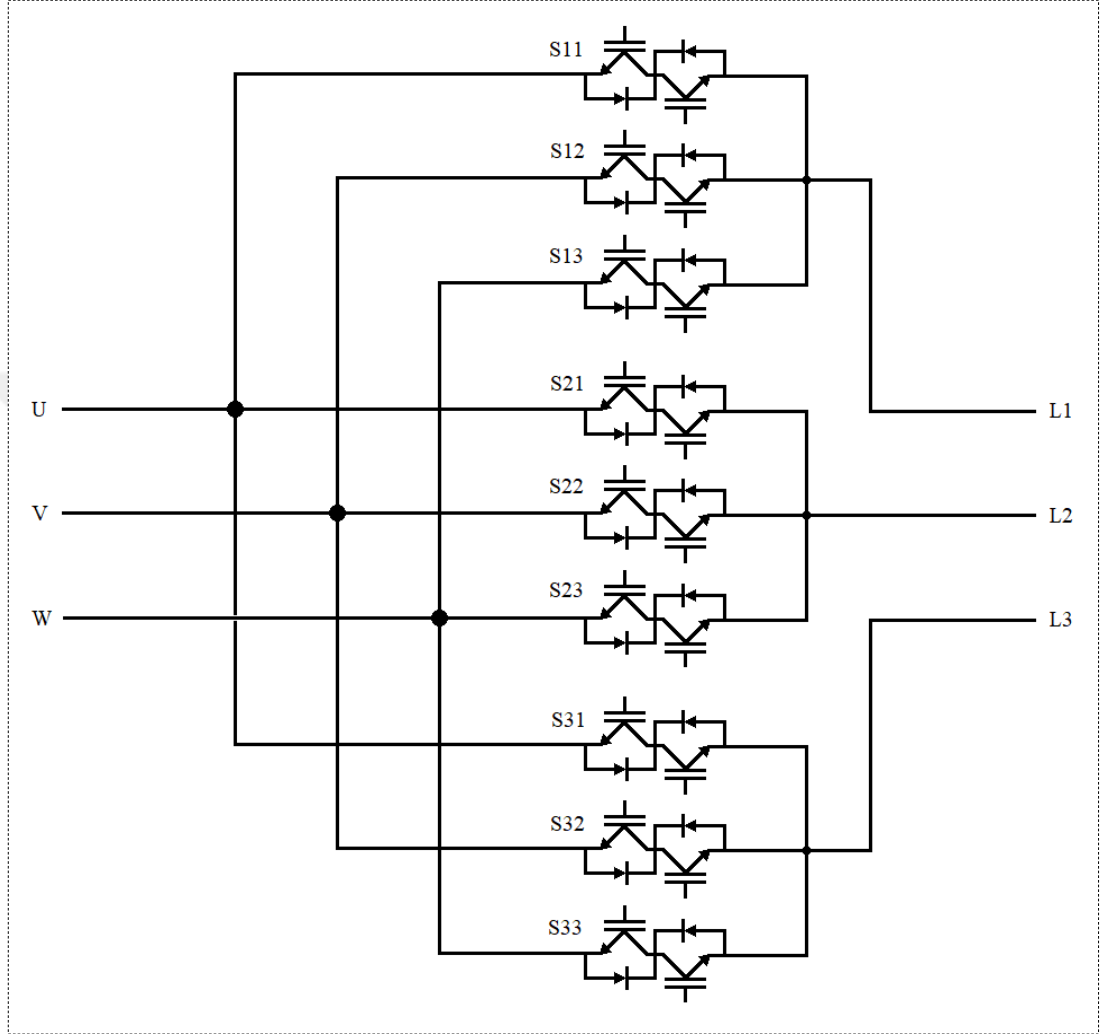


Şekil 3.2. Tandem dönüştürücü devresi

3.3. Matris Dönüştürücüler

Matris dönüştürücüler, devresinde pasif bileşen içermeyen ve dokuz adet çift yönlü anahtar bulunan AA/AA dönüştürücülerdir [43]. Temel amaç, giriş ve çıkış gerilim uçlarını anahtarlar ile bağlayarak kaynaktan istenen frekansta gerilim elde etmektir. Matris dönüştürücünün düşük frekans çıkışı için yarı iletkenlerin termal stresi diğer dönüştürücülere göre daha azdır [40, 42]. DA barasında kondansatör olmayışı, dönüştürücünün güvenilirliğinin artmasına, boyutunun ve ağırlığının azalmasına yol açtığını gibi dönüştürücünün verimini arttırabilir ve ömrünü uzatabilir fakat dönüştürücünün girişi ve çıkışını birleştirmektedir [44]. Bu durumda girişte oluşan dengesiz gerilim ve yük durumunda çıkışa yansır [40, 45]. Matris dönüştürücülerde herhangi bir hata durumundaki koruma ardışık dönüştürücüler kadar iyi değildir [42]. Bu durumu ortadan kaldırmak için on iki adet ilave diyot ve bir DA bara kondansatörü eklenerek aşılıma çalışılmış araştırmalar mevcuttur [40]. Ayrıca anahtarlama sırasında dönüştürücüyü korumak için çıkış ayağındaki iki ya da üç anahtarın aynı anda açık olmasına izin verilmez ve üç çıkış ucunun her biri diğer üç uca sırasıyla bağlı olmalıdır. Matris dönüştürücünün çıkış gerilimi sınırlıdır. Dönüştürücünün çıkış gerilimi giriş geriliminin 0,866 katıdır ve gerilim beslemeli darbe genişlik modülasyonu dönüştürücü ile aynı gücü elde etmek için çıkış akımı 1,15 kat daha fazla olmalıdır. Bu da iletkende bakır kaybının yüksek olmasına neden olur [40, 42, 43, 46]. Matris dönüştürücünün çıkış gerilimindeki harmonikler, gerilim çıkışlarının ayrı anahtarlama yapısında olması nedeniyle sabit DA bara gerilimli iki

seviyeli dönüştürücülere göre daha düşüktür [40, 47]. Anahtarların kombinasyonu modülasyon stratejisine bağlıdır [40]. Şekil 3.3'te matris dönüştürücü devre yapısı verilmiştir.

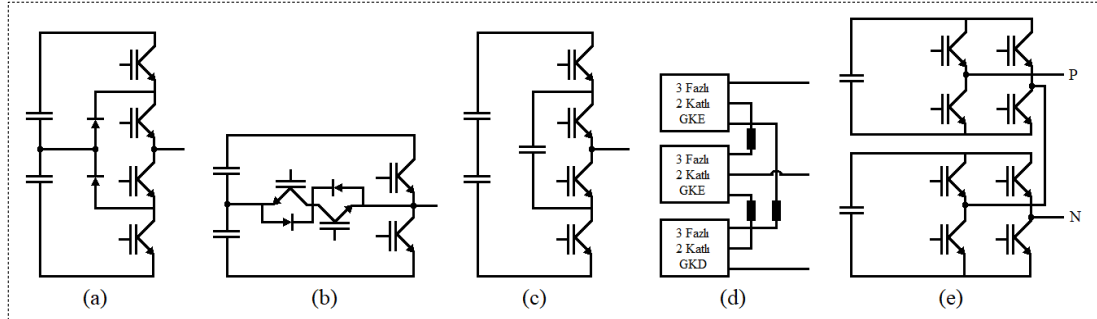


Şekil 3.3. Matris dönüştürücü devresi

3.4. Çok Seviyeli Dönüştürücüler

Nötr noktası kenetlenmiş üç seviyeli dönüştürücülerin geliştirilmesinden beri çeşitli çok seviyeli dönüştürücüler üzerinde çalışılmıştır [40]. Çok seviyeli dönüştürücülerin genel amacı, kondansatörleri çeşitli seviyelerde gerilim kaynağı olarak kullanıp sinüzoidal bir gerilim oluşturmaktır. Dönüştürücüler arasında en yüksek gerilimi sağlayabilen ve filtrelere en az ihtiyaç duyan dönüştürücü tipidir [40, 45]. Toplam anahtarlama frekansı iki seviyeli dönüştürücünün %25'ine kadar düşürülebilmektedir [40]. Diyot kenetlemeli, iki yönlü ara anahtarlı, kondansatörlü, çok sayıda iki seviyeli

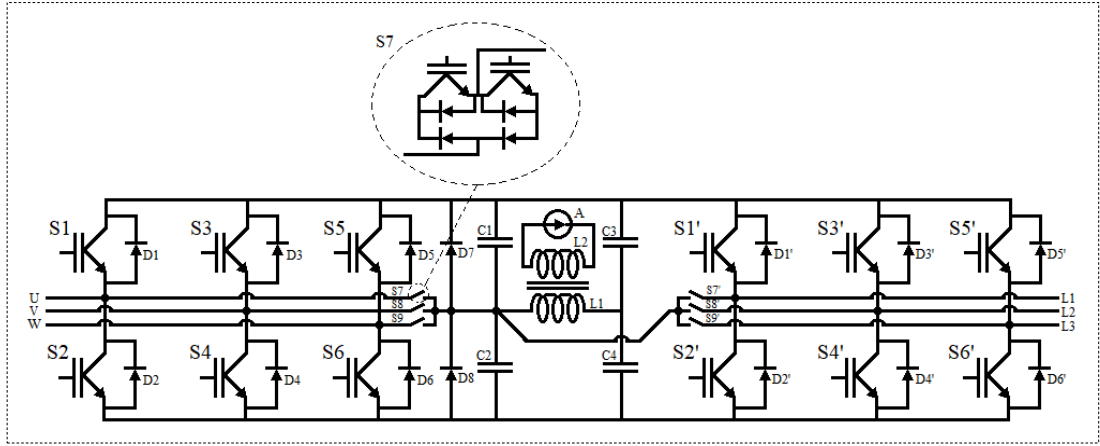
üç fazlı gerilim beslemeli dönüştürücü bağlı ve kaskad tek fazlı H köprü eviricili olmak üzere beş farklı yapılandırma önerisi vardır [40]. Şekil 3.4'te bu yapılandırmaların devre yapıları, eviricinin bir ayağı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Çok seviyeli dönüştürücünün bir evirici ayağının devre yapıları (a) Üç seviye diyot kenetlemeli (b) İki yönlü ara anahtarlamalı (c) Kondansatörlü (d) Üç fazlı iki katlı gerilim kaynaklı eviricilerden oluşan (e) H köprü eviricili

3.5. Rezonans Dönüştürücüler

Dönüştürücüler arasında anahtarlama kayıplarını azaltmak için birkaç rezonans dönüştürücü topolojisi önerilmiştir [40]. Bu topolojilerin ortak kötü yanları arasında karmaşık donanım yapısı ve karmaşık kontrol, DA barasında yük boyunca yüksek tepe gerilimi ve rezonans devresinden yüksek güç akışı olmasıdır [40]. Şekil 3.5'te verilen örnek devre yapısı diğer bahsedilen dönüştürücülerdeki dezavantajları barındırmayan, geliştirilmiş “Doğal Kenetlemeli Dönüştürücü” yapısı olarak karşımıza çıkar [40]. Doğal kenetlemeli dönüştürücü, ardışık dönüştürücüden ve rezonansı elde etmek için ek bir devreden oluşur. Diğer rezonans dönüştürücülerle karşılaştırıldığında doğal kenetlemeli dönüştürücünün farkı, rezonans gerilimi sabitlenir ve DA bara gerilimini aşamaz [40]. Rezonans devresi dönüştürücünün güç kısmında değildir ve bütün dönüştürücü için sadece bir rezonans devresi gerekir. Amacına uygun olarak anahtarlama kayıpları azdır ve dönüştürücünün verimliliği fazladır. Elektromanyetik gürültü azdır dolayısıyla filtrelemeye daha az ihtiyaç duyarlar. İki ana kondansatörün gerilim dengesizliği doğal kenetlemeli dönüştürücü için bir problem olabilir. Her komütasyon için ana kondansatörlerden sadece biri boşaltılır. Anahtar karakteristiklerindeki küçük farklılıklar nedeniyle gerilim dengesizliği telafi edilmelidir [40].



Şekil 3.5. Rezonans dönüştürücü devresi

4. RÜZGAR ENERJİSİ VE RÜZGAR TÜRBİNİNİN DİNAMİĞİ

4.1. Rüzgarın Kinetik Enerjisi

Fizik kurallarına göre kütlesi ve hızı olan her cismin bir kinetik enerjisi vardır ve bu enerji Denklem (4.1)'de verilen eşitlikteki gibidir;

$$E = \frac{1}{2}mV^2 \quad (4.1)$$

Burada; E (J) cismin sahip olduğu kinetik enerji, m (kg) cismin kütlesi, V (m/s) cismin sahip olduğu anlık hız değeridir.

Güç, birim zamanda yapılan iş ya da harcanan enerjidir. Dolayısıyla kinetik enerjinin birim zamandaki gücü ise Denklem (4.2)'deki eşitlik yardımıyla bulunur;

$$P = \frac{dE}{dt} \quad (4.2)$$

Burada; P (W) güç, t (s) zamandır.

Hava gazlardan oluşmuş bir maddedir, dolayısıyla bir ağırlığı vardır. Basınç ve sıcaklık farklarından dolayı hava hareket eder ve kinetik enerji kazanır. Bu doğrultuda rüzgarın sahip olduğu kinetik enerji eşitliği Denklem (4.3)'teki gibi yazılabilir;

$$E_r = \frac{1}{2}m_h V_r^2 \quad (4.3)$$

Burada; E_r (J) rüzgarın sahip olduğu kinetik enerji, m_h (kg) havanın kütlesi, V_r (m/s) rüzgarın hızıdır.

Rüzgarın gücü ise Denklem (4.4)'teki gibi yazılabilir;

$$P_r = \frac{\frac{1}{2}m_h V_r^2}{t} = \frac{1}{2}\dot{m}_h V_r^2 \quad (4.4)$$

Burada; P_r (W) rüzgar gücü, \dot{m}_h (kg/sn) birim zamanda akan havanın kütlesidir.

Birim zamanda akan havanın kütlesi, rotor kanatlarının süpürdüğü alandan geçen kütledir. Bu kütle havanın yoğunluğuna ve hızına da bağlı olduğundan Denklem (4.5)'teki gibi gösterilebilir;

$$\dot{m}_h = \rho A V_r \quad (4.5)$$

Burada; A (m^2) kanatların süpürdüğü alan, ρ (kg/m^3) havanın yoğunluk katsayısıdır.

Kanatların süpürdüğü alan ise Denklem (4.6)'daki gibi bulunur;

$$A = \pi r^2 \quad (4.6)$$

Burada; r (m) bir kanadın uzunluğudur ya da rotor yarıçapıdır.

Rüzgarın sahip olduğu gücü bulmak için Denklem (4.5)'ten elde edilen eşitlik Denklem (4.4)'te yerine yazılırsa, rüzgar gücü eşitliği Denklem (4.7)'deki gibi yazılabilir;

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A V_r^3 \quad (4.7)$$

Elde edilen bu eşitlik rüzgarda var olan güçtür. Bu güç elektrik enerjisi üretiminde, rüzgar türbinleri vasıtasıyla önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştürülür. Rüzgar gücünün tamamını mekanik enerjiye dönüştürmek imkansızdır. Çünkü rüzgar, türbin kanatlarından çıktıktan sonra da azalan bir hızla akmaya devam eder. Bunun için bir güç katsayısı denkleme ilave edilir. Dolayısıyla türbin tarafından rüzgardan elde edilebilecek mekanik güç eşitliği, Denklem (4.8)'deki gibi olur [6, 48];

$$P_m = C_p \frac{1}{2} \rho A V_r^3 \quad (4.8)$$

Burada; P_m (W) türbin tarafından dönüştürülen mekanik güç, C_p güç katsayısıdır.

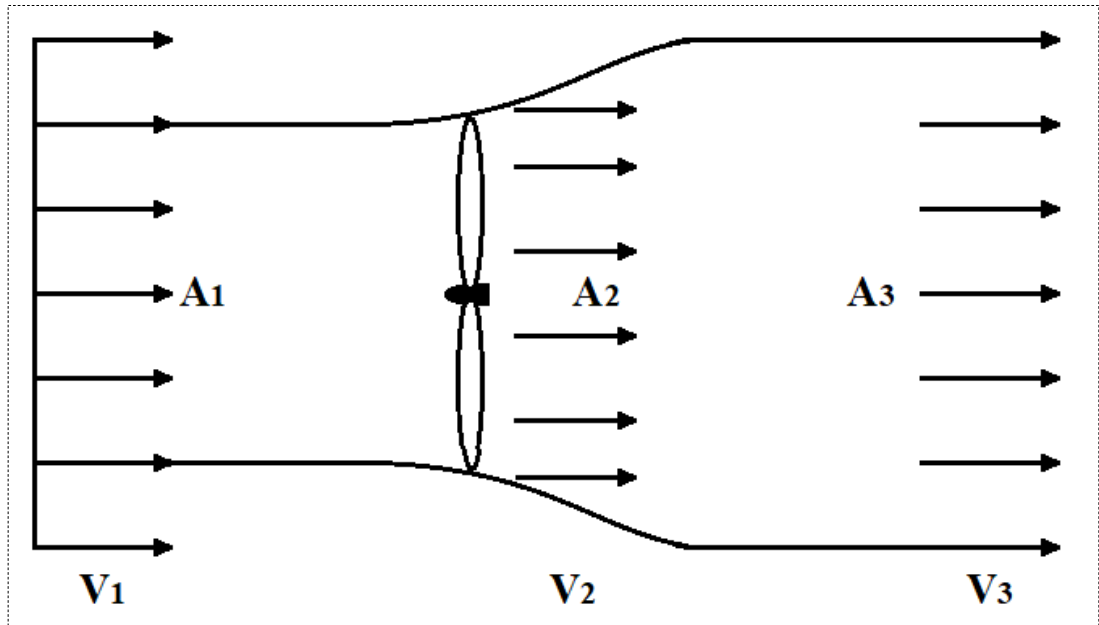
4.2. Betz Limiti ve Güç Katsayısı

Rüzgar türbinlerinden elde edilebilecek güç denklemindeki güç katsayısının bulunması teorisi ilk kez 1919 yılında Alman mühendis Albert Betz tarafından ortaya atılmıştır. Betz, Almanya'daki Göttingen Üniversitesi'nde yaptığı çalışmayla, termodinamikteki Carnot döngüsü verimliliğine benzetmiştir [48]. Betz, bu denklemi rüzgar türbini güç katsayısına yorumlayarak Betz Limiti'ni ortaya çıkarmıştır. Teoriye göre bazı kabuller yapılmıştır. Bunlar [48];

- Rotorun göbeği yoktur.
- Rüzgara karşı herhangi bir sürtünme direnci göstermeyen sonuçlanmayan sonsuz sayıda rotor kanadı vardır.

Bu kabullere ek olarak rotor tarafından süpürülen tüm alandaki rüzgarın alan boyunca aynı olduğu varsayılır ve rotorun önündeki havanın hızı aksenal olarak kabul edilir [48].

Yapılan bu kabuller doğrultusunda, havada bulunan rüzgarın türbin kanatlarına ilk giriş hızı V_1 , türbin kanatlarındaki hızı V_2 ve türbin kanatlarından çıkış hızı V_3 olsun. Ayrıca türbin kanatlarından önceki havanın kesit alanı S_1 , türbin kanatlarının süpürdüğü kesit alanı S_2 ve türbin kanatlarından çıktıktan sonraki kesit alanı S_3 olsun. İdeal model Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Rüzgarın hızı ve kesit alanının ideal model gösterimi

Kinetik enerjisi bulunan rüzgar rotor kanatlarına önden gelip, rotor kanatlarında frenlenerek arkadan düşük hızla çıkar. Kanatlarda oluşan bu frenleme, türbin rotorunu döndürerek mekanik enerji üretir. Buna bağlı olarak, türbinin mekanik enerji üretmesi esnasında rüzgarın enerjisi yani hızı azalır. Dolayısıyla $V_3 < V_1$ olacaktır. Havada akan kütle ise, türbin kanatlarından sonra düzgün bir biçimde dağılır yani kesit alanı artar. Dolayısıyla $A_3 > A_1$ olacaktır [48].

Hava akımı sıkıştırılmaz bir akış olarak değerlendirilirse, daha önce Denklem (4.5)'te verilen birim zamanda akan havanın kütlesi eşitliğinden yararlanarak Denklem (4.9) yazılabilir;

$$\dot{m}_h = \rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2 = \rho A_3 V_3 = \text{sabit} \quad (4.9)$$

Bu denklem birim zamanda akan havanın kütlesinin rüzgar akımı boyunca sabit olduğunu gösterir.

Newton'un ikinci kanunu olan dinamiğin temel kanunu yasasından faydalanılarak rotor üzerine uygulanan kuvvet Denklem (4.10)'daki gibi bulunur;

$$F = ma = m \frac{dV}{dt} = \dot{m}_h \Delta V = \rho A_2 V_2 (V_1 - V_3) \quad (4.10)$$

Burada; F (N) kuvvet, a (m/s^2) ivmedir.

Artımsal enerji ya da artımsal iş, rüzgar türbininin kanatlarında Denklem (4.11) ve Denklem (4.12)'deki gibi yazılabilir;

$$dE = Fd \quad (4.11)$$

$$P = \frac{dE}{dt} = F \frac{dx}{dt} = FV_2 \quad (4.12)$$

Çıkarılan güç eşitliği, kuvvet denklemi olan Denklem (4.10)'da yerine koyulursa Denklem (4.13) elde edilir;

$$P = \rho A_2 V_2^2 (V_1 - V_3) \quad (4.13)$$

Rüzgar türbini kanatlarına giren rüzgarın sahip olduğu enerji ile kanatlardan çıktıktan sonraki rüzgarın sahip olduğu enerji farkı türbinden elde edilen gücü verir;

$$P \cong \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2}mV_1^2 - \frac{1}{2}mV_3^2}{\Delta t} = \frac{1}{2}\dot{m}_h(V_1^2 - V_3^2) = \frac{1}{2}\rho A_2 V_2 (V_1^2 - V_3^2) \quad (4.14)$$

Denklem (4.13) ve Denklem (4.14)'te verilen güç eşitlikleri birbirine eşitlenirse son hali Denklem (4.15), Denklem (4.16), Denklem (4.17) ve Denklem (4.18)'de verildikleri gibi olur;

$$P = \frac{1}{2}\rho A_2 V_2 (V_1^2 - V_3^2) = \rho A_2 V_2^2 (V_1 - V_3) \quad (4.15)$$

$$\frac{1}{2}(V_1^2 - V_3^2) = V_2 (V_1 - V_3) \leftrightarrow \forall \rho, A_2, V_2 \neq 0 \text{ ise} \quad (4.16)$$

$$\frac{1}{2}(V_1 - V_3)(V_1 + V_3) = V_2 (V_1 - V_3) \quad (4.17)$$

$$V_2 = \frac{1}{2}(V_1 + V_3) \leftrightarrow \forall (V_1 - V_3) \neq 0 \text{ ya da } V_1 = V_3 \text{ ise} \quad (4.18)$$

Çıkarılan eşitliğe göre kanatlardaki rüzgar hızı, giriş ve çıkış rüzgar hızlarının aritmetik ortalamasıdır. Ayrıca türbinden enerji elde etmek için türbinin bir fren görevi görmesi gerekir ve türbin kanatlarından sonra da akışın devam etmesi gerekir [48]. Son olarak F kuvveti ve P gücü, Denklem (4.19) ve Denklem (4.20)'deki gibi giriş ve çıkış hızları cinsinden yazılırsa;

$$F = \rho A_2 V_2^2 (V_1 - V_3) = \frac{1}{2}\rho A_2 V_2 (V_1^2 - V_3^2) \quad (4.19)$$

$$P = \rho A_2 V_2^2 (V_1 - V_3) = \frac{1}{4}\rho A_2 (V_1 + V_3)^2 (V_1 - V_3) = \frac{1}{4}\rho A_2 (V_1^2 - V_3^2)(V_1 + V_3) \quad (4.20)$$

$b = \frac{V_3}{V_1}$ çıkış hızı faktörü olarak bir değişken tanımlanırsa F kuvvet eşitliği ve P güç eşitliği Denklem (4.21) ve Denklem (4.22)'deki gibi olur;

$$F = \frac{1}{2}\rho A_2 V_1^2 (1 - b^2) \quad (4.21)$$

$$P = \frac{1}{4}\rho A_2 V_1^3 (1 - b^2)(1 + b) \quad (4.22)$$

Denklemlere bakılarak rüzgardan elde edilebilecek gücün kanatlara giriş hızının küpüyle orantılı olduğu ve çıkış hızı faktörünün bir fonksiyonu olduğu görülür.

Rüzgardan elde edilebilecek maksimum güç, daha önce Denklem (4.8)'de verilen türbinin ürettiği mekanik gücün yine daha önce Denklem (4.7)'de verilen rüzgarın sahip olduğu gücüne oranıyla Denklem (4.23)'teki gibi bulunabilir;

$$C_P = \frac{P_m}{P_r} = \frac{\frac{1}{4}\rho A_2 V_1^3 (1-b^2)(1+b)}{\frac{1}{2}\rho A_2 V_1^3} = \frac{1}{2}(1-b^2)(1+b) \quad (4.23)$$

C_P güç katsayısını bulmak için Denklem (4.24)'te verilen türevin zincir kuralı uygulanıp Denklem (4.25)'te verildiği gibi sıfıra eşitlenirse;

$$\frac{d}{dx}(uv) = u \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_P}{db} &= \frac{1}{2} \frac{d}{db} [(1-b^2)(1+b)] = \frac{1}{2} [(1-b^2)-2b(1+b)] = \frac{1}{2} (1-b^2-2b-2b^2) \\ &= \frac{1}{2} (1-3b^2-2b) = \frac{1}{2} (1-3b)(1+b) = 0 \end{aligned} \quad (4.25)$$

Elde edilen denklemin kökleri Denklem (4.26)'da verilen eşitlik yardımıyla bulunursa;

$$(1+b) = 0 \rightarrow b = \frac{V_3}{V_1} = -1 \rightarrow V_3 = -V_1 \quad (4.26)$$

Çıkış hızı giriş hızının negatifi olamayacağından bu sonuç çözüm değildir. Diğer kök ise Denklem (4.27)'den;

$$(1-3b) = 0 \rightarrow b = \frac{V_3}{V_1} = \frac{1}{3} \rightarrow V_3 = \frac{1}{3} V_1 \quad (4.27)$$

olarak bulunur. Denklem (4.27)'nin kökü Denklem (4.23)'te yerine yazılırsa Denklem (4.28)'deki güç katsayısının değeri elde edilir;

$$C_P = \frac{1}{2}(1-b^2)(1+b) = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2\right) \left(1 + \frac{1}{3}\right) = \frac{16}{27} = 0,59259 \quad (4.28)$$

Sonuca göre rüzgardan elde edilebilecek maksimum mekanik güç rüzgar gücünün %59,26'sına eşittir. Denklem (4.29)'da verilen bu eşitliğe Betz Eşitliği ya da Betz Limiti denir ve 1919 yılından beri bütün rüzgar türbini tasarımlarında kullanılmıştır.

Bu limit, en iyi performanslı rüzgar türbininin bile aşamayacağı bir değeri bize gösterir [15].

$$C_{P_{maks}} = 0,5926 \quad (4.29)$$

Sürtünmeler, kayıplar, aerodinamik özellikler, kanat sayısının sonsuz olmaması vb. gibi gerçek şartlar göz önüne alındığında C_P katsayısı 0,5'ten yukarı çıkamamaktadır. Günümüz türbinlerinde C_P katsayısı 0,4 ile 0,5 arasındadır [31, 48].

4.3. Uç Kanat Hızı Oranı

Güç katsayısının en büyük değeri Betz Limiti ile sınırlandırılır ve bu değer sabit değildir. Uygulamalarda güç katsayısı, uç kanat hızı oranına (λ) ve kanat açısına (β) bağlı bir fonksiyondur, $C_P(\lambda, \beta)$.

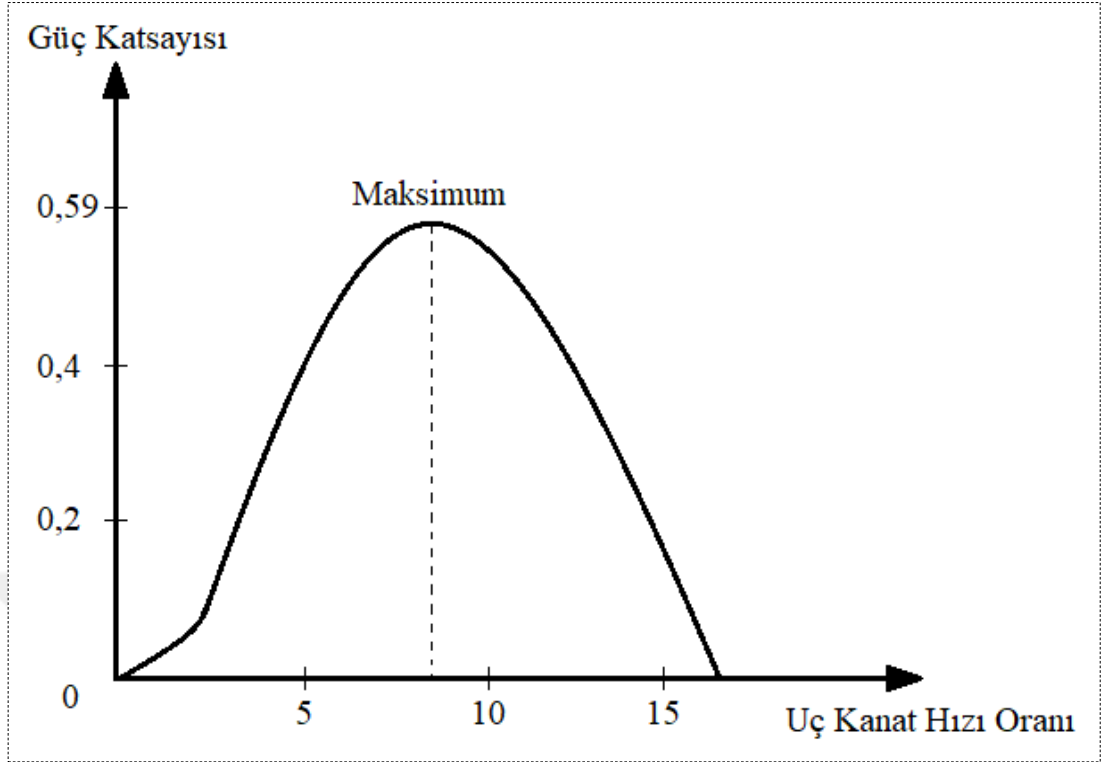
Uç kanat hızı oranı, kanadın çizgisel hızının rüzgar hızına oranıdır. Türbin kanatlarının tasarlanmasındaki kilit faktör bu orandır [4, 48]. Genel olarak üç kanatlı türbinlerde bu oran 6..8 arasında değişmekte olup, sonucu 7 olan oran yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Uç kanat hızı oranının eşitliği Denklem (4.30)'da verilmiştir;

$$\lambda = \frac{V_u}{V_r} = \frac{\omega_t r}{V_r} = \frac{2\pi n r}{60 V_r} \quad (4.30)$$

Burada; λ uç kanat hızı oranı, V_u (m/s) uç kanat hızı, ω_t (rad/sn) türbin şaftının açısal hızı, r (m) kanat uzunluğu, n (d/dk) türbin şaftının devir sayısıdır.

Şekil 4.2'de üç kanatlı bir rüzgar türbininin uç kanat hızı oranına bağlı tipik güç katsayısı değişim grafiği gösterilmektedir.

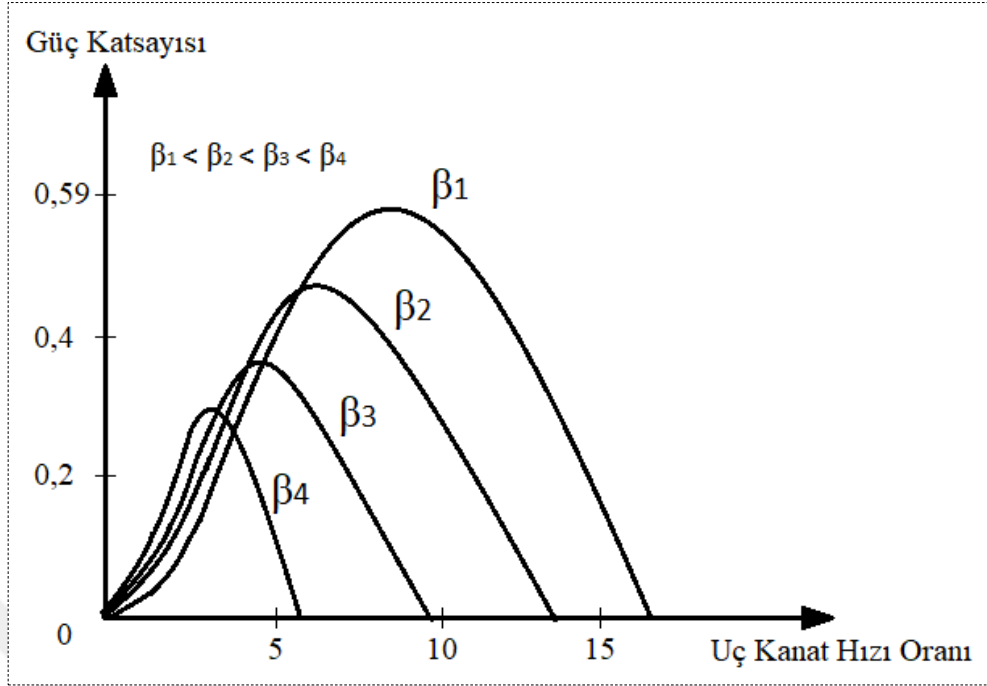
Uç kanat hızı oranı türbinin açısal hızına bağlıdır. Eğer türbin, çok yavaş dönerse kanatlarının arasından geçen enerjiyi tam yakalayamaz, çok hızlı dönerse rüzgarda sürtünme yaratan büyük bir düzlem oluşturur [48, 49]. Her iki durumda da güç katsayısının değeri azalır.



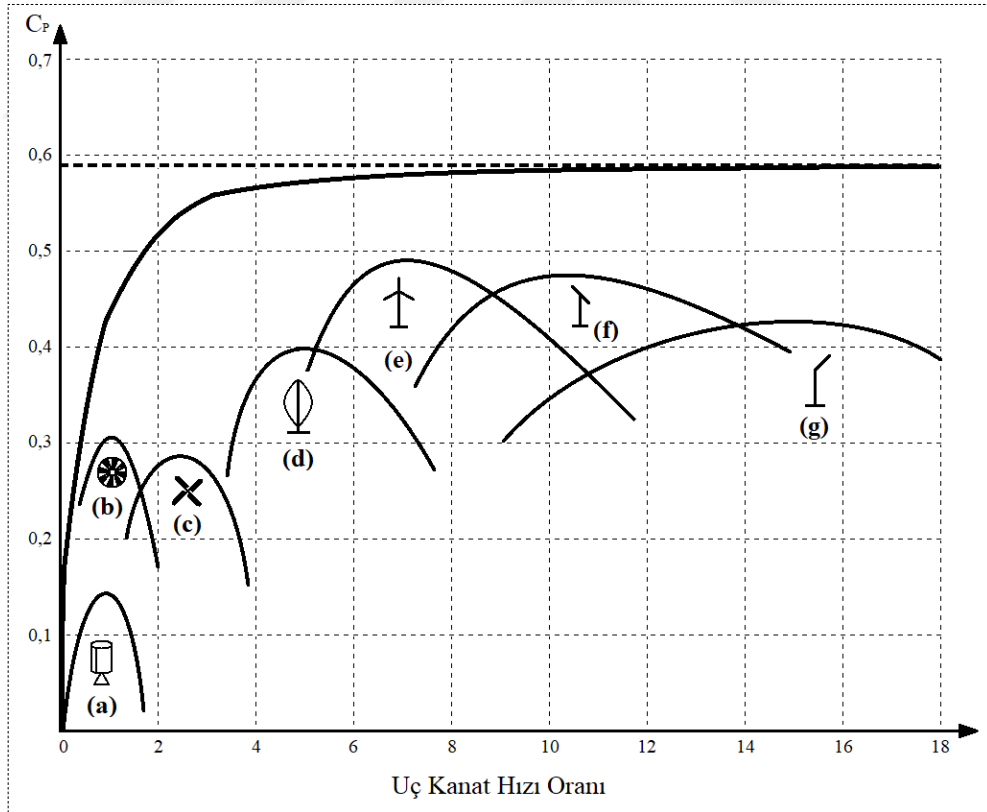
Şekil 4.2. Rüzgar türbininin uç kanat hızı oranına bağlı güç katsayısı değişim grafiği

Rüzgar türbinlerinden maksimum güç elde edebilmek için optimum uç kanat hızı oranının etrafında çalıştırılması gerekir [48]. Rüzgarın hızı, türbinin tasarlanan anma rüzgar hızı değerlerinden daha büyük hızlara çıkarsa uç kanat hızı oranı düşer, dolayısıyla güç katsayısı da azalır. Fakat güç eşitliği, rüzgar hızının küpüyle doğru orantılı olduğundan güç katsayısı düşse bile teorik olarak türbin gücü artar. Yine de anma rüzgar hızından daha büyük rüzgar hızlarında mekanik aksamlara ve generatöre zarar vermemek için türbinin yavaşlatılması gerekir. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde bu durumu gidermek için, kanatlar türbinin yine maksimum güç verebileceği derece kadar kanat açısı kontrolü yapar ve rüzgarın hızından dolayısıyla rüzgarın uyguladığı kuvvetten daha az etkilenir. Benzer şekilde, eğer rüzgar anma hızında veya anma hızının altındaysa üretilecek gücü sınırlamak için güç katsayısı kanat açısı kontrolü ile değiştirilebilir. Şekil 4.3'te kanat açısına göre değişen uç kanat hızı oranına bağlı güç katsayısı değişim grafiği verilmiştir.

Optimum uç kanat hızı oranını elde etmek için rotorun kanat sayısı azaldıkça rüzgardan maksimum güç elde etmek için türbinin daha hızlı dönmesi gerekir [48]. Güç katsayısı ile uç kanat hızı oranı arasındaki ilişki, farklı rüzgar türbini tipleri ve kanatları için Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Rüzgar türbininin kanat açısına göre değişen uç kanat hızı oranına bağlı güç katsayısı değişim grafiği



Şekil 4.4. Farklı rüzgar türbini tipleri için uç kanat hızı oranına bağlı güç katsayısı değişim grafiği (a) Dikey eksenli Savonius (b) Amerikan tipi çok kanatlı (c) Hollanda tipi dört kanatlı (d) Dikey eksenli Darrieus (e) Üç kanatlı (f) İki kanatlı (g) Bir kanatlı

Verilen şekilde de görüldüğü gibi yatay eksene sahip bir, iki ve üç kanatlı türbinlerin güç katsayısı değeri diğerlerine göre fazladır. Bu nedenle uygulamada bu tip rüzgar türbinleri kullanılır.

4.4. Rüzgar Türbininin Ürettiği Tork ve Tork Katsayısı

Rüzgar türbinleri dönme hareketi yaptığı için bir döndürme kuvvetine yani torka sahiptir ve aslında generatöre tork iletir. İletilen bu tork, generatörde enerji üretmesi için yine bir dönme hareketi oluşturur. Generatörde oluşan bu tork değeri, Denklem (4.31) ve Denklem (4.32)'deki gibi rüzgar türbininin ürettiği gücün şaftın açısal hızının oranı olarak bulunabilir;

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (4.31)$$

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_t} = C_P(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho A V_r^3 \quad (4.32)$$

Burada; T_m (Nm) türbinin ürettiği torktur.

Denklem (4.30)'da verilen uç kanat hızı oranı eşitliğinden açısal hız çekilip Denklem (4.33)'teki gibi yazılabilir;

$$T_m = C_P(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho A V_r^3 \frac{1}{\frac{\lambda V_r}{r}} = \frac{C_P(\lambda, \beta)}{\lambda} \frac{1}{2} \rho A r V_r^2 \quad (4.33)$$

C_P güç katsayısı, C_T tork katsayısı cinsinden Denklem (4.34)'teki gibi tanımlanırsa;

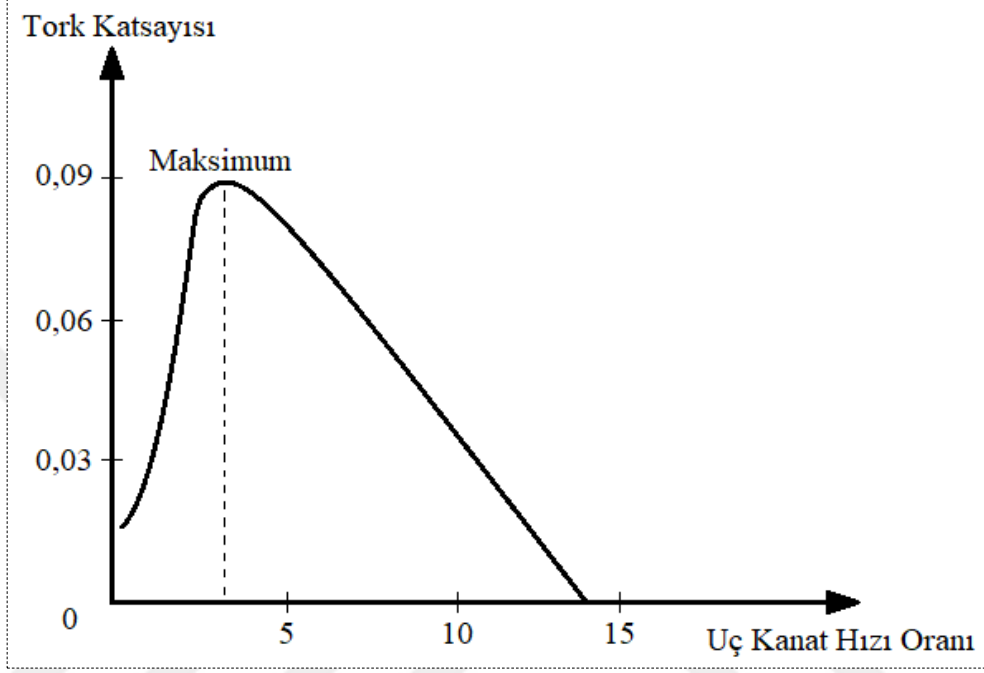
$$C_T = \frac{C_P(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (4.34)$$

Tanımlanan bu eşitlik Denklem (4.33)'te yerine koyulursa Denklem (4.35)'teki türbinin ürettiği tork eşitliği elde edilir;

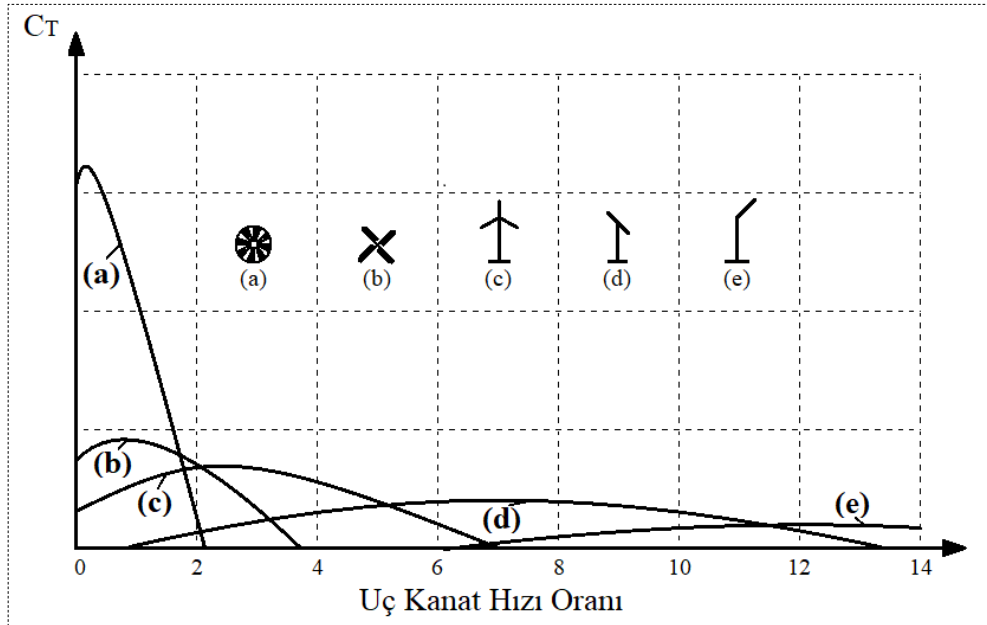
$$T_m = C_T(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho A r V_r^2 \quad (4.35)$$

Denklemden de görüldüğü gibi türbinin ürettiği tork rüzgar hızının karesiyle doğru orantılıdır.

Üç kanatlı bir rüzgar türbininin uç kanat hızı oranına bağlı tipik tork katsayısı değişim grafiği Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Ayrıca tork katsayısının değişimini diğer tip rüzgar türbinleriyle kıyaslamak için C_p güç katsayısının uç kanat hızı oranına bölümüyle elde edilen tork katsayısı grafiği de Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.5. Rüzgar türbininin uç kanat hızı oranına bağlı tork katsayısı değişim grafiği



Şekil 4.6. Farklı rüzgar türbini tipleri için uç kanat hızı oranına bağlı tork katsayısı değişim grafiği (a) Amerikan tipi çok kanatlı (b) Hollanda tipi dört kanatlı (c) Üç kanatlı (d) İki kanatlı (e) Bir kanatlı

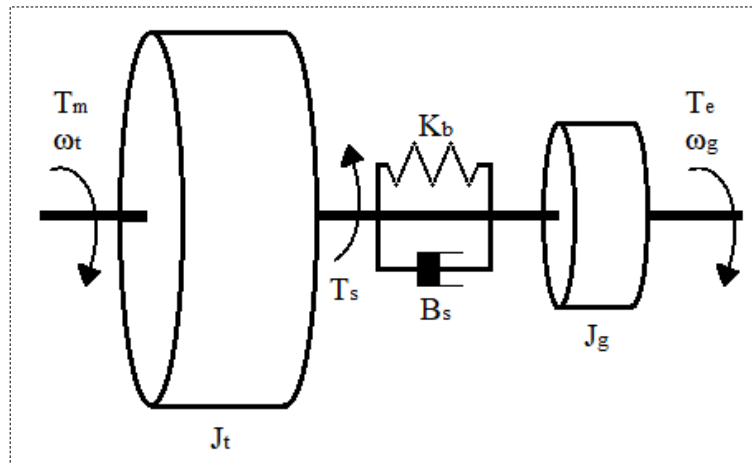
Verilen şekilden de anlaşılacağı gibi bir, iki, üç kanatlı türbinlerin kalkış tork değerinin düşük olduğu, dolayısıyla türbinin hızlı devreye girdiği görülmektedir. Elde edilen güç ve tork katsayısı eğrilerinin bir sonucu olarak bir ve iki kanatlı türbinler tork değişimleri ve gürültü açısından sorun yarattığı için günümüzde üç kanatlılar kullanılmaktadır [31].

4.5. Rüzgar Türbini Dinamiği ve Şaft Hızı

Türbinin ilk kalkış torku çok önemlidir. Generatörün boyutu arttıkça hem ataleti hem de kütlesi artacaktır. Bununla birlikte şebekeye doğrudan bağlı olan sistemlerde yükün gerektirdiği generatör torkunu aşması gerekir [29]. Genel olarak kontrol sisteminin tasarımı ve analizi bir dinamik modelleme gerektirir [35].

Rüzgar türbini birçok mekanik bileşenden oluşur ve her bileşenin kendine ait bir dinamik davranışı vardır [6]. Rüzgar türbininin göbek ve kanatlardan oluşan rotorun ataleti toplam ataletin yaklaşık %90'ı, generatörün ataleti ise yaklaşık %6-8'dir [6, 18, 50]. Geriye kalan kısımların toplam ataleti ise %2-4 olup, rotorla birlikte kabul edilebilir ve ikinci kütle olarak generatör ile birlikte iki kütleli bir model olarak sistemin karakteristiğini ifade edebilir [6, 18]. Gerçek modelleme yapılmak istenirse destek yatakları, kaplinler, frenler gibi diğer ekipmanlar eklenerek farklı sayı kütleli bir model de oluşturulabilir [51].

Benzetim çalışmaları için yapılan analizleri kolaylaştırmak için basit bir dinamik model istenir. Şekil 4.7'de iki kütleli dinamik model verilmiştir.



Şekil 4.7. Türbin ve generatörden oluşan iki kütleli örnek dinamik model

Newton'un ikinci kanunundan yola çıkılarak oluşturulan açısal hız denklemleri Denklem (4.36), Denklem (4.37) ve Denklem (4.38)'de verilmiştir [18];

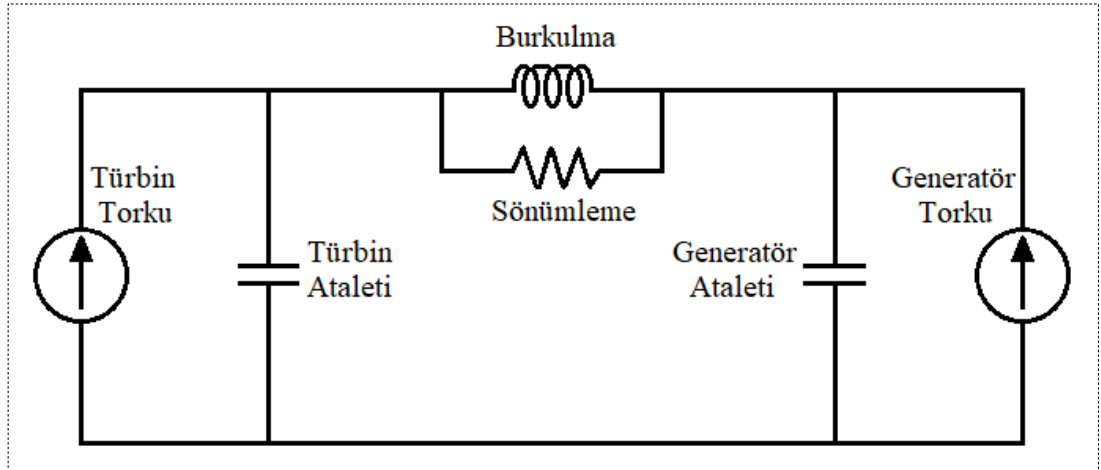
$$T_m - T_s = J_t \frac{d\omega_t}{dt} \quad (4.36)$$

$$T_s - T_e = J_g \frac{d\omega_g}{dt} \quad (4.37)$$

$$T_s = K_b \int (\omega_t - \omega_g) dt + B_s (\omega_t - \omega_g) \quad (4.38)$$

Burada; T_m (Nm) türbinin ürettiği tork, T_s (Nm) türbinden şaft iletilen tork, T_e (Nm) generatörde oluşan elektromanyetik tork, J_t (kg.m^2) türbinin ataleti, J_g (kg.m^2) generatörün ataleti, K_b (Nm/rad) şaftın burkulma katsayısı, B_s (Nms/rad) şaftın sönümlenme katsayısı, ω_t (rad/sn) türbinin açısal hızı, ω_g (rad/sn) generatörün açısal hızıdır.

Şaftın dinamiğinin anlaşılmasına yardımcı olmak için elektriksel eşdeğer bir devre ile karşılaştırma yapılabilir. Gerçekte de tork akım gibi, hız gerilim gibi, atalet kondansatör gibi, burkulma etkisi bobin gibi ve sönümlenme etkisi direnç gibi etkiler gösterir [52]. Bu bağlamda örnek olarak Şekil 4.7'de verilen iki kütleli modelin elektriksel eşdeğer devresi Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. İki kütleli dinamik modelin elektriksel eşdeğer devresi

5. DEĞİŞKEN HIZLI DOĞRUDAN TAHRİKLİ BİR RÜZGAR TÜRBİNİ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

Çalışma kapsamında değişken hızlı, doğrudan tahrikli, mıknatıs uyarmalı senkron generatörlü 800kW'lık bir rüzgar elektrik enerjisi dönüşüm sistemi modellenmiş ve benzetim çalışması yapılmıştır. Türbinin modellenmesi için güç katsayısı eğrisini tanımlayan bağıntı yardımıyla tork katsayısı eğrisi elde edilmiş ve kısmi güç bölgesinde optimum tork kontrolü uygulanarak rüzgardan maksimum güç elde edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca kanat açısı kontrolü yapılarak yüksek rüzgar hızlarında shaftın hızı kontrol altında tutulmuştur.

Dönüştürücünün generatör tarafı ve şebeke tarafında vektör kontrolü uygulanmış, gerilim vektörlerinin kontrolü uzay vektörü darbe genişlik modülasyonu tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Modellenen sisteme ait benzetim çalışması sonuçları ise altıncı bölümde verilmiştir.

5.1. Rüzgar Türbini Modeli

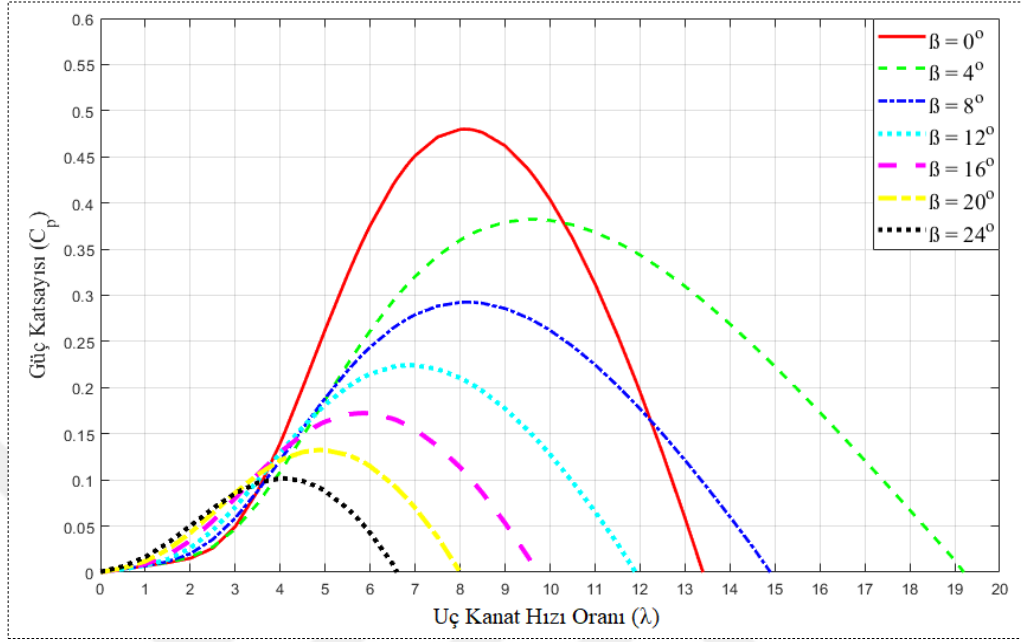
Rüzgar türbinlerinin güç katsayısı eğrisi, türbin üreticilerine ve türbin tasarımlarına göre değişiklik gösterir. Bu katsayıyı belirlemek için, IEC 61400-12 rüzgar türbinlerinin güç performansı testi yönetmeliğine göre ölçümleri yapılır [53, 54]. Uç kanat hızı oranı ve kanat açısına bağlı güç katsayısı için örnek bir eğri veren fonksiyonunun eşitliği Denklem (5.1)'de ve Denklem (5.2)'de verilmiştir [6, 55];

$$C_P(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\gamma} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\gamma} + C_6 \lambda} \quad (5.1)$$

$$\gamma = \left(\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \right)^{-1} \quad (5.2)$$

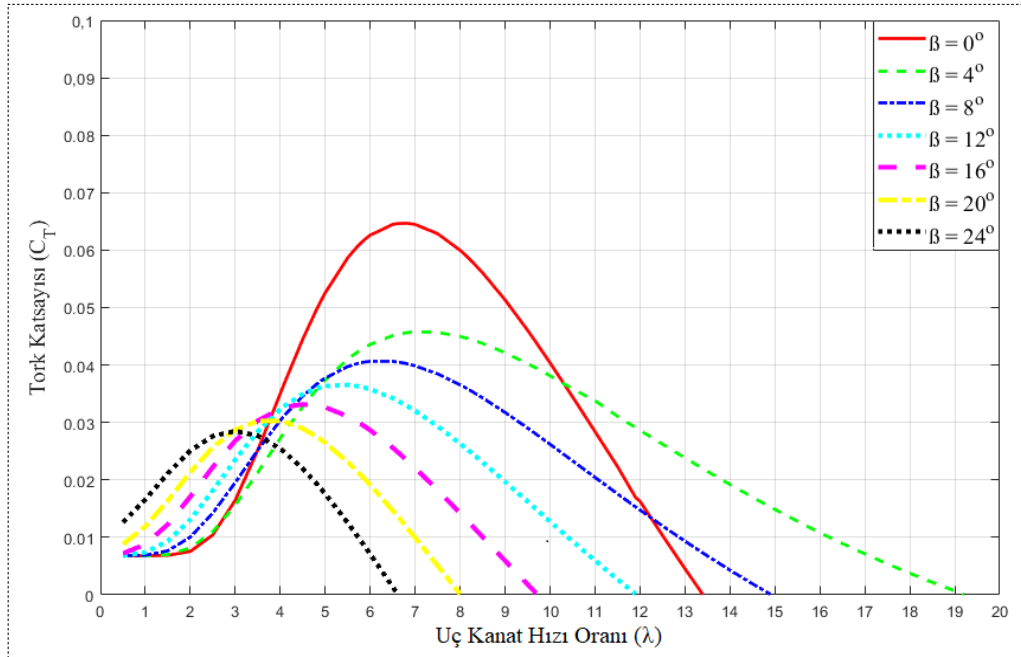
Burada; $C_1..C_2$ türbin tasarımına bağlı değişiklik gösteren parametreler olarak tanımlanmaktadır ve bu çalışma için; $C_1=0,5176$, $C_2=116$, $C_3=0,4$, $C_4=5$ $C_5=21$,

$C_6=0,0068$ olarak verilmiştir [6, 55]. Verilen parametreler doğrultusunda çeşitli kanat açılı için uç kanat hızı oranına bağlı güç katsayısı grafiği Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Farklı kanat açılına göre güç katsayısının uç kanat hızı oranına göre değişimi

Aynı parametreler doğrultusunda çeşitli kanat açılı için uç kanat hızı oranına bağlı tork katsayısı grafiği de Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Farklı kanat açılına göre tork katsayısının uç kanat hızı oranına göre değişimi

Daha önce Denklem (4.6)'da verilen kanatların süpürdüğü alan eşitliği yine daha önce verilen Denklem (4.8)'de yerine koyulursa Denklem (5.3) elde edilir;

$$P_m = C_P \frac{1}{2} \rho \pi r^2 V^3 \quad (5.3)$$

Modelleme ve benzetim çalışması için Denklem (5.4) ve Denklem (5.5)'ten türbinin kanat uzunluğu bulunur. Havanın yoğunluğu $1,225 \text{ kg/m}^3$ alınmıştır [49]. Anma rüzgar hızı $10,3 \text{ m/s}$, C_P güç katsayısı ise Şekil 5.1'in maksimum değeri olan $0,48$ alınmıştır.

$$800000 = 0,48 \frac{1}{2} 1,225 \pi r^2 10,3^3 \quad (5.4)$$

$$r = 28,15 \approx 30 \text{ m} \quad (5.5)$$

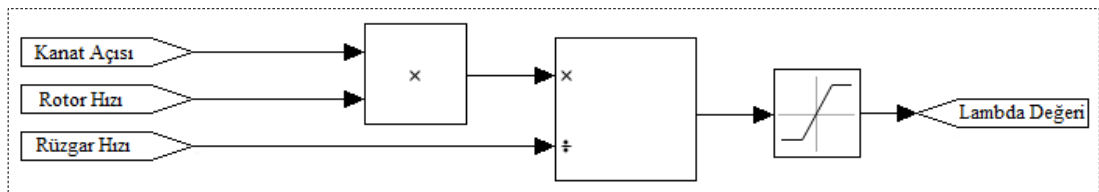
Bulunan sonuca göre kanat uzunluğu bu çalışma için 30 metre alınmıştır.

Rüzgar türbininin modellenmesi ve benzetim çalışması için kullanılan türbin parametreleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

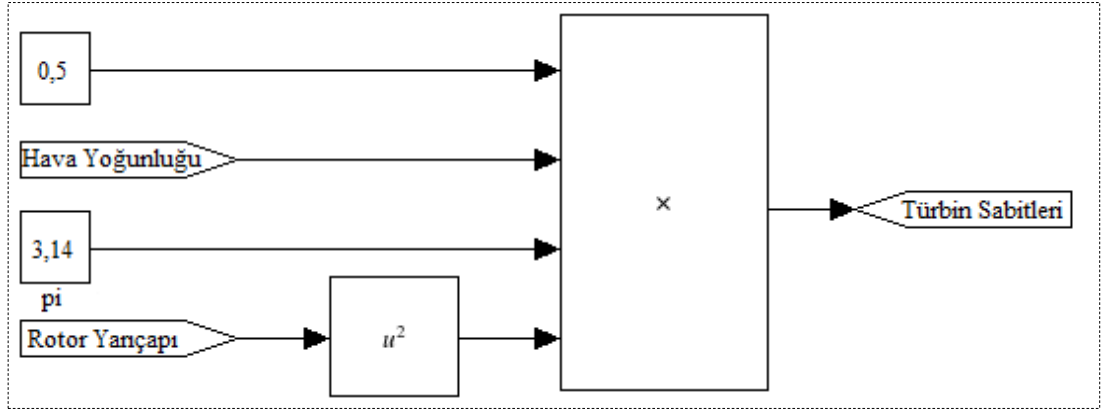
Tablo 5.1. 800kW rüzgar türbini parametreleri

Parametre	Sembol	Birim	Değer
Anma Gücü	P_n	kW	800
Anma Rüzgar Hızı	V_n	m/s	10,3
Rotor Çapı	R	m	60
Kanat Sayısı	-	adet	3
Başlatma Hızı	V_b	m/s	5
Durdurma Hızı	V_d	m/s	20
Rotor Hızı	n	d/dk	22,7
Hava Yoğunluğu	ρ	kg/m^3	1,225

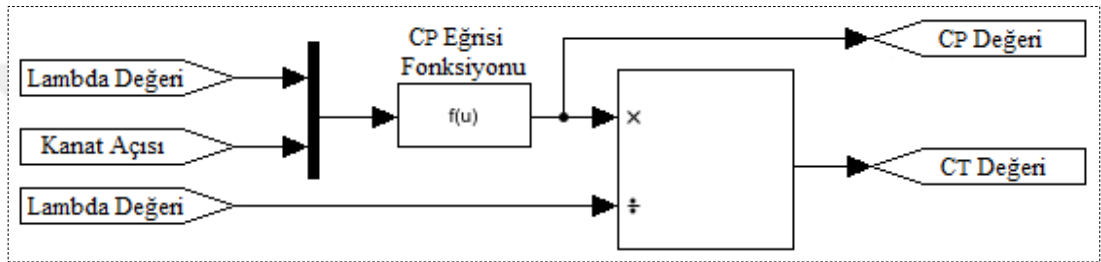
Verilen tablo değerleri doğrultusunda benzetim çalışması için oluşturulan blok diyagramlar Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir.



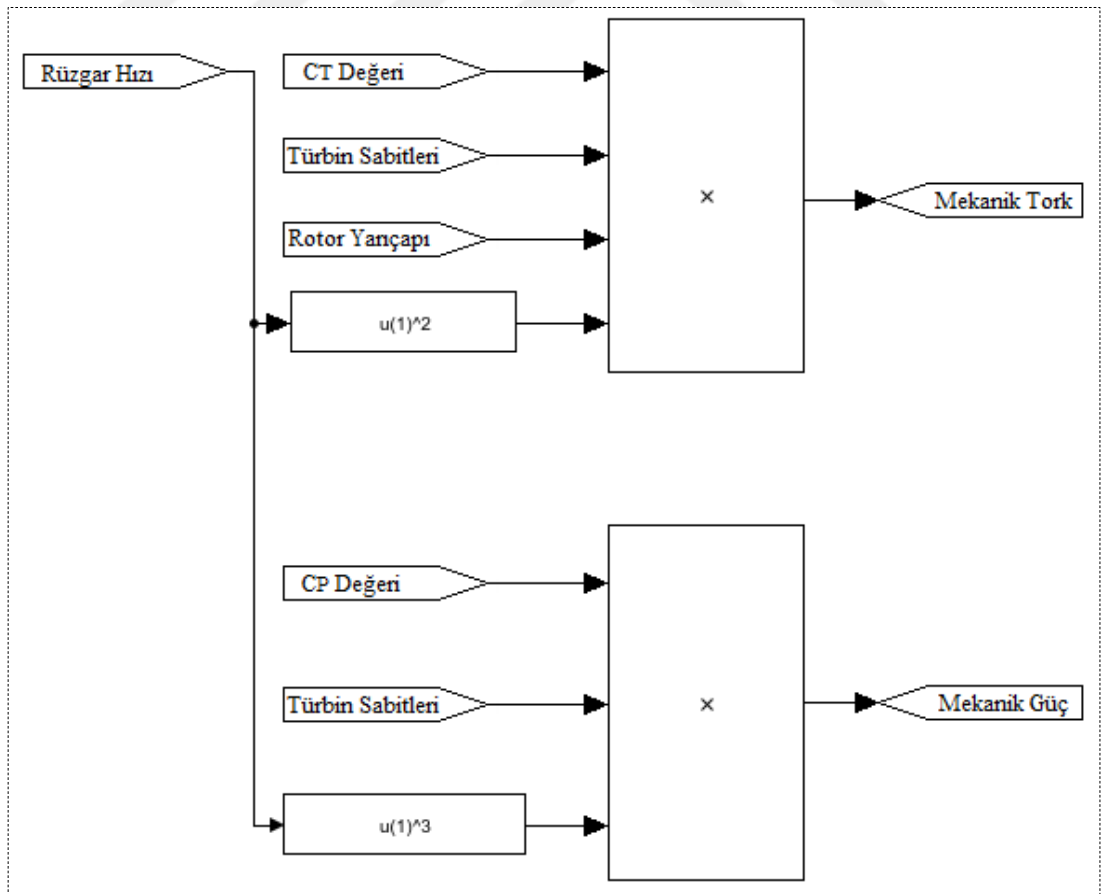
Şekil 5.3. Uç kanat hızı oranının (lambda) hesaplanması blok diyagramı



Şekil 5.4. Türbin sabitlerinin hesaplanması blok diyagramı



Şekil 5.5. Güç ve tork katsayılarının hesaplanması blok diyagramı



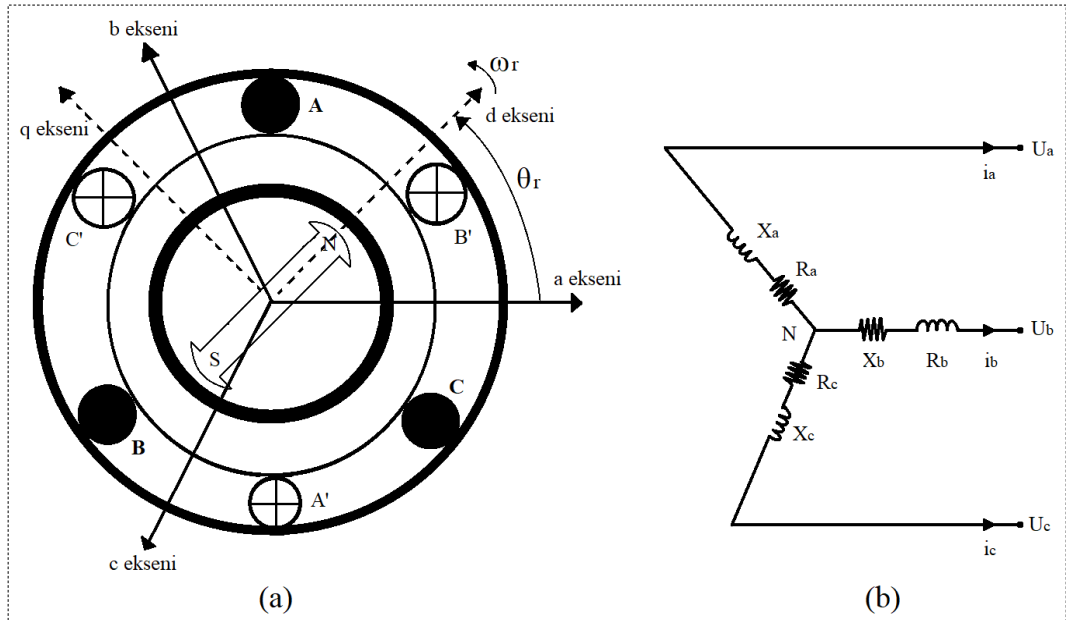
Şekil 5.6. Mekanik güç ve mekanik torkun hesaplanması blok diyagramı

5.2. Generatör Modeli

Alternatif akım makinalarının analizinin ve kontrolünün yapılabilmesi için matematiksel modelinin ve kullanılan matematiksel ifadelerin bilinmesi gerekir [56]. Üç fazlı sistemlerin karmaşıklığı, işlem kalabalıklığı ve gereksiz boyut büyümesi gibi nedenlerle denklemler, matematiksel dönüşümler vasıtasıyla iki fazlı sistemlere dönüştürülebilir hatta bir doğru akım makinası gibi modellenebilir [56]. Bu bağlamda mıknatıs uyarımlı senkron generatörlerin stator akımı ve rotor akısı denklemleri Clarke – Parke dönüşümü yapılarak gerçek (d ekseni) ve sanal (q ekseni) olarak ifade edilebilir ve kontrol edilebilirler [57].

5.2.1. Mıknatıs uyarımlı senkron generatör modeli

Örnek olarak Şekil 5.7’de bir adet çift kutuplu mıknatıs uyarımlı senkron generatörün dq ekseni ve abc eksenini gösteren kesiti ve üç faz eşdeğer devresi verilmiştir. Üç fazlı yıldız bağlı stator sargıları arasında 120° açı vardır ve rotorunda sürekli mıknatıslara sahiptir. Sürekli mıknatıslar tarafından sağlanan manyetik akı d ekseni yönündedir. Buradaki dq ekseni rotor ve kalıcı mıknatıslarla aynı ω_r açısal hız ile dönmektedir. Ayrıca θ_r açısı d ekseni ile a ekseni arasındaki açıyı belirtir.



Şekil 5.7. Bir adet çift kutuplu mıknatıs uyarımlı senkron generatör (a) kesiti (b) eşdeğer devresi

Modelleme ve analizi yapmak için generatörde aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır [58];

- Stator sargıları sinüzoidal bir şekilde dağılmıştır.
- Sürekli mıknatısların zayıf bir elektrik iletkeni olması sebebiyle sönümlenme sargıları ihmal edilmiştir.
- Fuko ve histeresiz akımları ihmal edilmiştir.
- Stator sargılarındaki zıt elektromotor kuvvet sinüzoidaldir.

Mıknatıs uyarmalı senkron generatörün rotorunda sargılar olmadığı için rotor endüktansı ve rotor ile stator arası ortak endüktansı yoktur [58]. Bu nedenle manyetik akı bağları Denklem (5.6), Denklem (5.7), Denklem (5.8)'deki gibi yada matris olarak Denklem (5.9)'daki gibi ifade edilebilir;

$$\lambda_a = L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c + \lambda_{pm} \sin(\theta_e) \quad (5.6)$$

$$\lambda_b = L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c + \lambda_{pm} \sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5.7)$$

$$\lambda_c = L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c + \lambda_{pm} \sin\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5.8)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{pm} \sin(\theta_e) \\ \lambda_{pm} \sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \lambda_{pm} \sin\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Burada; $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ (Wb ya da Vs) her faza ait manyetik akı bağları, λ_{pm} (Wb ya da Vs) sürekli mıknatısların sağladığı sabit akı, i_a, i_b, i_c (A) her faza ait akımlar, L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} (H) her faza ait öz endüktanslar, $L_{ab}, L_{ac}, L_{ba}, L_{bc}, L_{ca}, L_{cb}$ (H) ortak endüktanslar, θ_e (rad) elektriksel açıdır.

Genel olarak mıknatıs uyarmalı senkron makinanın üç fazlı gerilim eşitlikleri matris olarak Denklem (5.10)'daki gibi yazılabilir [59];

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Burada; R_s (Ω) generatörün stator sargısı direncidir.

Mıknatis uyarmalı senkron makinanın Clarke – Park dönüşümleri yardımıyla faz – nötr gerilimleri Denklem (5.11) ve Denklem (5.12)’de, akımların dq referans düzlemi eşitlikleri ise Denklem (5.13) ve Denklem (5.14)’te verilmiştir. Burada verilen U_0 gerilimi ve I_0 akımının sıfır yani etkisiz olduğu kabul edilir;

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = [U_m] \begin{bmatrix} \sin(\theta_e) \\ \sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) & 1 \\ \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = [i_m] \begin{bmatrix} \sin(\theta_e) \\ \sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) & 1 \\ \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Burada: U_m (V) mıknatis uyarmalı senkron makinanın uçlarında endüklenen gerilimin tepe gerilimi, I_m (A) mıknatis uyarmalı senkron makinanın sargılarından akan akımın tepe değeridir.

Gerekli dönüşümler yapılarak mıknatis uyarmalı senkron makinanın motor modunda çalışma uç denklemleri Deklem (5.15) ve Denklem (5.16)’daki gibi verilir [60-68];

$$U_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (5.15)$$

$$U_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \lambda_{pm} \quad (5.16)$$

Burada; U_d, U_q (V) dq eksenine ait gerilimler, i_d, i_q (A) dq eksenine ait akımlar, L_d, L_q (H) dq eksenine ait endüktans değerleri, ω_e (rad/sn) elektriksel açısal hızdır.

Eğer makine generatör modunda çalışıyorsa akımlar yön değiştirir ve uç denklemleri Denklem (5.17), Denklem (5.18), Denklem (5.19), Denklem (5.20) ve Denklem (5.21)'deki gibi olur [69, 70];

$$U_d = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + \omega_e L_q i_q \quad (5.17)$$

$$U_q = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_e L_d i_d + \omega_e \lambda_{pm} \quad (5.18)$$

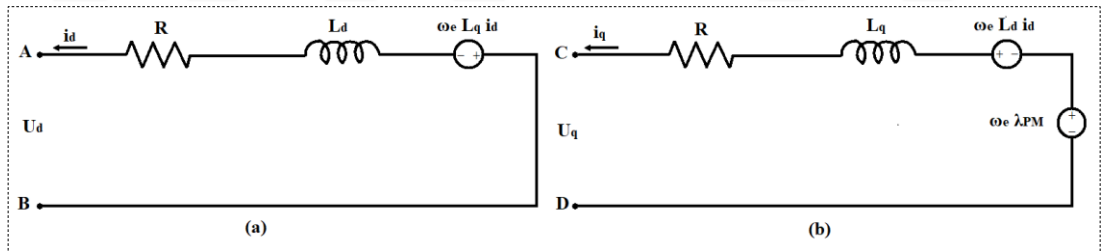
$$\theta_e = p\theta_r \quad (5.19)$$

$$\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} \quad (5.20)$$

$$\omega_e = p\omega_r \quad (5.21)$$

Burada: θ_r (rad) rotor açısı, p makinanın kutup çifti sayısıdır.

Şekil 5.8'de mıknatıs uyarımlı senkron makinanın generatör modunda çalışma eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 5.8. Mıknatıs uyarımlı senkron makinanın generatör modunda çalışma eşdeğer devresi (a) d eksenini (b) q eksenini

Generatörün ürettiği aktif ve reaktif güçler, Denklem (5.22) ve Denklem (5.23)'te verilen dq referans düzlemi eşitlikleri ile elde edilebilir [14, 62];

$$P_g = \frac{3}{2} (U_d i_d + U_q i_q) \quad (5.22)$$

$$Q_g = \frac{3}{2} (U_q i_d - U_d i_q) \quad (5.23)$$

Burada; P_g (W) generatörün çıkış gücü, Q_g (VAr) generatör reaktif gücüdür.

Denklem (5.15) ve Denklem (5.16)'daki gerilim eşitlikleri, güç eşitliği olan Denklem (5.22)'de yerine yazılırsa Denklem (5.24) ve bu denklemin düzenlenmiş hali olan Denklem (5.25) elde edilir;

$$P_g = \frac{3}{2} \left(R i_d + L_d \frac{d i_d}{d t} - \omega_e L_q i_q \right) i_d + \frac{3}{2} \left(R i_q + L_q \frac{d i_q}{d t} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \lambda_r \right) i_q \quad (5.24)$$

$$P_g = \frac{3}{2} R (i_d^2 + i_q^2) + \frac{3}{2} \left(L_d i_d \frac{d i_d}{d t} + L_q i_q \frac{d i_q}{d t} \right) + \frac{3}{2} (\omega_e \lambda_{pm} i_q + \omega_e (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (5.25)$$

Elde edilen Denklem (5.25)'teki birinci terim makinedeki bakır kayıplarını, ikinci terim eğer akımlar değişmiyorsa statorun manyetik alanında korunan enerjiyi, son kısım ise mekanik güçten dönüşen elektriksel gücü ifade eder [59, 71]. Makinedeki bakır kayıpları ihmal edilip kararlı durumda çalıştığı varsayılırsa toplam güç Denklem (5.26)'daki gibi yazılabilir;

$$P_g = \frac{3}{2} (\omega_e \lambda_{pm} i_q + \omega_e (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (5.26)$$

Mıknatis uyarmalı senkron generatörün ürettiği elektromanyetik tork ise Denklem (5.27)'deki gibi yazılabilir;

$$T_e = \frac{P_g}{\omega_r} = \frac{P_g}{\frac{\omega_e}{p}} = \frac{3}{2} p (\lambda_{pm} i_q + (L_d - L_q) I_d I_q) \quad (5.27)$$

Denklemdaki birinci kısım manyetik torku, ikinci kısım relüktans torkunu gösterir [71]. Yüze monte edilmiş mıknatis uyarmalı senkron generatörlerde L_d ve L_q endüktansları eşittir ve relüktans durumu yoktur. Bu durumda Denklem (5.28) yazılabilir ve elektriksel tork sadece I_q akım bileşenine bağlı olur;

$$T_e = \frac{3}{2} p \lambda_{pm} i_q \quad (5.28)$$

Şaftın sönümlenme ve burkulma katsayıları ihmal edilmiş mıknatis uyarmalı senkron generatörün ve rüzgar türbinin iki kütleli dinamik model hareket denklemi, Denklem (5.29)'daki gibi yazılabilir;

$$(J_{toplam}) \frac{d\omega_r}{d t} = T_m - T_e \quad (5.29)$$

Benzetim çalışmasında kullanılan miknatıs uyarmalı senkron generatör parametreleri bir üretici firmadan sağlanmış ve değerler Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Miknatıs uyarmalı senkron generatör parametreleri

Parametre	Sembol	Birim	Değer
Anma Hızı	n	d/dk	22,3
Maksimum Hız	n_{max}	d/dk	24
Anma Elektriksel Frekansı	f_n	Hz	19,3
Kutup Çifti Sayısı	p	adet	52
Faz Sayısı	-	-	3
Bağlantı Tipi	-	-	Yıldız
Anma Görünür Gücü	S_n	kVA	1036
Anma Gerilimi	V_n	V	591
Anma Akımı	I_n	A	1012
Sargı Endüktansı (Ld - Lq)	L	mH	1,98
Sargı Direnci (Faz - Faz)	R	m Ω	13
Akı Bağı		Vs	3,123
Anma Güç Faktörü	Cos (φ)	-	0,82

5.2.2. Clarke – Park dönüşümleri

Clarke ve Park dönüşümleri üç fazlı alternatif akım makinalarının vektör kontrolünde yaygın olarak kullanılırlar [57]. Alan yönlendirmeli kontrol ve tork hesaplamaları gibi bazı durumlarda vektörlerin birbirine göre durumu ve açıları önemli olup, dönüştürülmüş vektörlerden birini durağanlaştıran bir referans düzlemine göre analiz yapmak basitleşmektedir [72].

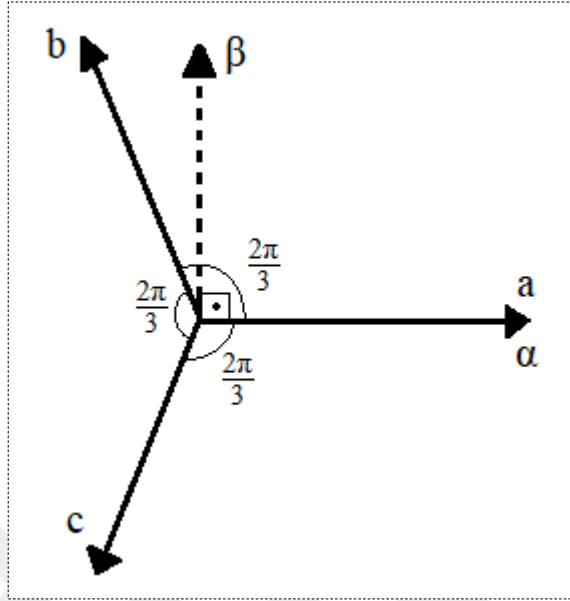
abc düzlemi değişkenleri (akı, akım, gerilim vb.) X_a , X_b , X_c olarak verilsin. Clarke dönüşümü, abc düzlemi bileşenlerini, $\alpha\beta$ olarak tanımlanan dik bir sabit düzlemdeki iki bileşene dönüştürür. Bu dönüşüm, Denklem (5.30), Denklem (5.31) ve Denklem (5.32)’de verilen eşitliklerle ifade edilir [57];

$$X_\alpha = X_a \quad (5.30)$$

$$X_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}X_a + \frac{2}{\sqrt{3}}X_b \quad (5.31)$$

$$X_a + X_b + X_c = 0 \quad (5.32)$$

Verilen denklemlere göre abc ve $\alpha\beta$ referans düzlemlerinin birbirine göre durumları Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

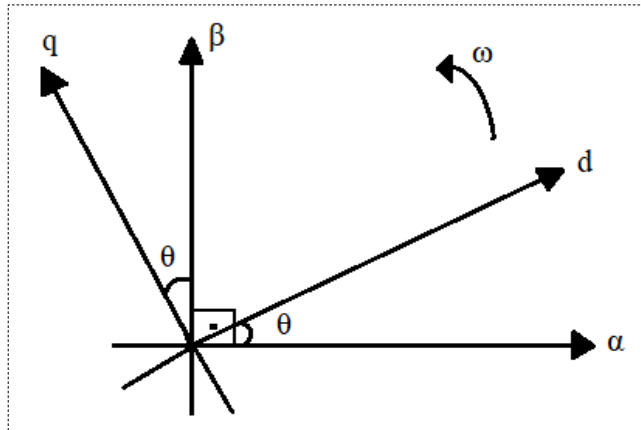


Şekil 5.9. abc ve $\alpha\beta$ referans düzlemlerinin birbirine göre durumları

Park dönüşümü ise, $\alpha\beta$ referans düzlemindeki iki bileşeni uygun bir θ açısı ile ortogonal dönen dq referans düzlemine dönüştürür. Bu dönüşüm aşağıda Denklem (5.33) olarak verilen matris ile ifade edilir [57];

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

Şekil 5.10'da $\alpha\beta$ ve dq referans düzlemlerinin birbirine göre durumu gösterilmiştir.



Şekil 5.10. $\alpha\beta$ ve dq referans düzlemlerinin birbirine göre durumları

Yapılan analiz ve hesaplamalardan sonra tekrar abc referans düzlemine matrisin tersini alarak geçmek mümkündür. Ters Park dönüşümü matrisi Denklem (5.34)'te ve ters Clarke dönüşümü eşitlikleri ise Denklem (5.35), Denklem (5.36) ve Denklem (5.37)'de verilmiştir;

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

$$X_a = X_\alpha \quad (5.35)$$

$$X_b = -\frac{1}{2}X_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}X_\beta \quad (5.36)$$

$$X_c = -\frac{1}{2}X_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}X_\beta \quad (5.37)$$

Bu iki dönüşümü ardışık uygulamak, alternatif akım ve gerilimi, doğru akım ve gerilime dönüştürerek hesaplamaları basitleştirir [73]. abc referans düzleminden dq referans düzlemine doğrudan dönüşüm işlemi Clarke ve Park dönüşümlerinin bir arada uygulanışı Denklem (5.38) ve Denklem (5.39)'da verilmiştir;

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (5.38)$$

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

5.3. Dönüştürücü Modeli ve Kontrolü

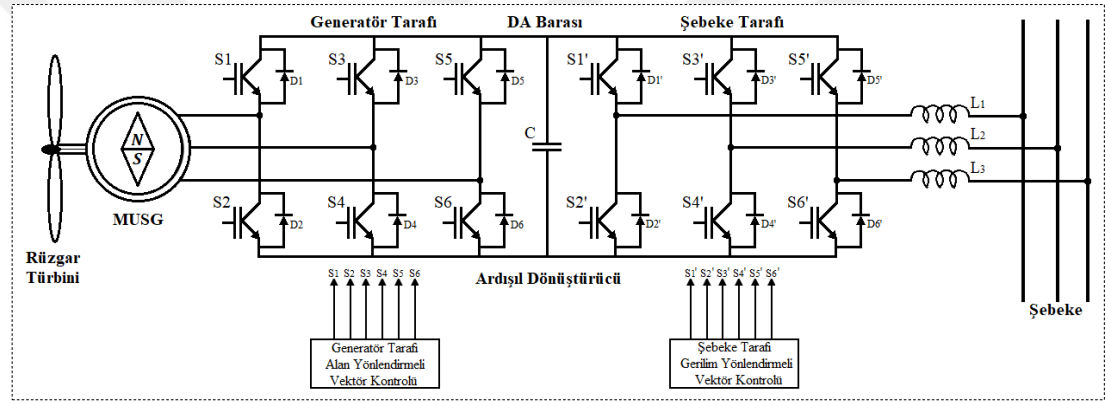
Mıknatis uyarmalı senkron generatörlü rüzgar türbini sistemlerinde üç adet sistem değişkeninin kesinlikle kontrol edilmesi gerekir [14];

- Farklı rüzgar hızlarında mıknatis uyarmalı senkron generatör tarafından üretilen optimum güç
- Şebekeye verilen aktif ve reaktif güçler

- Ardışık dönüştürücü de bulunan DA barasının gerilimi

Şekil 5.11’de ardışık dönüştürücü bulunan sistemin prensip şeması verilmiştir. Dönüştürücü burada generatör tarafı ve şebeke tarafı olarak iki kısma ayrılır. Her kısım için altışar IGBT elemanı seçilmiş ve DA barası kondansatör değeri literatürdeki benzer çalışmalarda da gözlenen değerler olmak üzere $C = 5000 \mu\text{F}$, gerilim seviyesi 1200V olarak belirlenmiştir.

Generatör tarafı dönüştürücü, düşük rüzgar hızlarından maksimum güç elde etmek için rotorun hızını kontrol etmektedir. Şebeke tarafı dönüştürücü ise DA barasının gerilimini sabit tutmakta, şebekeye verilen aktif ve reaktif gücü kontrol etmektedir.



Şekil 5.11. Ardışık dönüştürücülü sistemin prensip şeması

Vektör kontrolünün görevi, bir vektör ile temsil edilen stator akım bileşenlerini, rotor akısı ile aynı hızda dönen bir referans düzlemi içerisinde kontrol etmektir [57,74]. Yani Clarke – Park dönüşümünün gerekliliğinin diğer nedenlerinden birisi de vektör kontrolü uygulamaktır. Mıknatıs uyarmalı senkron makina ve asenkron makinalar gibi yüksek performans gerektiren sürücü mimarilerinde vektör kontrolü kullanılır. Bu kontrol yönteminin uygulanmasıyla birlikte güç elektroniği devresindeki kayıplar en aza iner ve generatör optimum çalışma noktasına yakın çalışır [35].

5.3.1. Generatör tarafı alan yönlendirmeli vektör kontrolü

Mıknatıs uyarmalı senkron generatörün rotor akımına vektör kontrolü uygulamak için dq referans düzleminde bir eksenin akı bileşeni ile hizalanması gerekir. Yaygın olarak akı bileşeni d eksenine ile hizalanır ve tork bileşeni de q eksenini oluşturur. Alan yönlendirmeli vektör kontrolü ile elektromanyetik tork ve stator akısı bağımsız

Şekil 5.12’de de görüldüğü gibi, i_{qg}^* akımı, referans tork akımıdır yani maksimum güç çekmek için optimum tork kontrol yönteminde kullanılır.

5.3.1.1. Akım kontrolü döngüsü

PI denetleyicisi, optimum çalışma ve istenen cevabı elde etmek için uygun olarak ayarlanması gereken bir oran (K_P) ve bir integral (K_I) parametreleri içerir. Genel olarak zaman bölgesinde bir hata sinyali uygulanan PI denetleyicinin eşitliği Denklem (5.40)’taki gibidir [13];

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt \quad (5.40)$$

S-bölgesinde PI denetleyicinin çıkış sinyali ile hata sinyalinin oranı transfer fonksiyonu verir;

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} = K_P \left(\frac{s + \frac{1}{T_i}}{s} \right) \quad (5.41)$$

$$T_i = \frac{K_P}{K_I} \quad (5.42)$$

Burada; T_i integral zamanıdır.

Verilen Denklem (5.41) ve Denklem (5.42)’den yararlanarak alan yönlendirmeli vektör kontrolünü uygulayabilmek için elde edilen referans gerilimlerin eşitlikleri Denklem (5.43) ve Denklem (5.44)’teki gibi yazılabilir;

$$u_d^* = K_{P1} e_{dg} + K_{I1} \int e_{dg} dt - \omega_{eg} L_{qg} i_{qg} \quad (5.43)$$

$$u_q^* = K_{P2} e_{qg} + K_{I2} \int e_{qg} dt + \omega_{eg} L_{dg} i_{gd} + \omega_{eg} \lambda_{pm} \quad (5.44)$$

Burada; u_{dg}^* , u_{qg}^* dq eksenli referans gerilimleri, K_{P1} , K_{P2} akım kontrol döngüsünün oran kazanç parametreleri, K_{I1} , K_{I2} akım kontrol döngüsünün integral kazanç parametreleridir. e_{dg} ve e_{qg} ise akım bileşeninin hata sinyalidir ve Denklem (5.45) ve Denklem (5.46)’daki gibi hesaplanır;

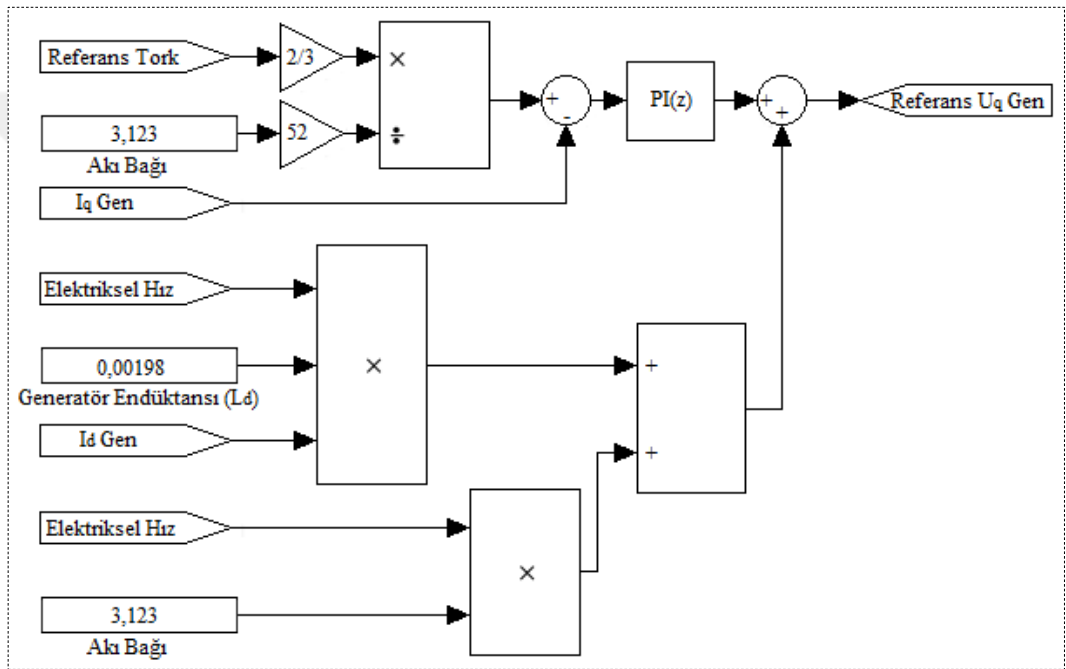
$$e_{dg} = i_{dg}^* - i_{dg} \quad (5.45)$$

$$e_{qg} = i_{qg}^* - i_{qg} \quad (5.46)$$

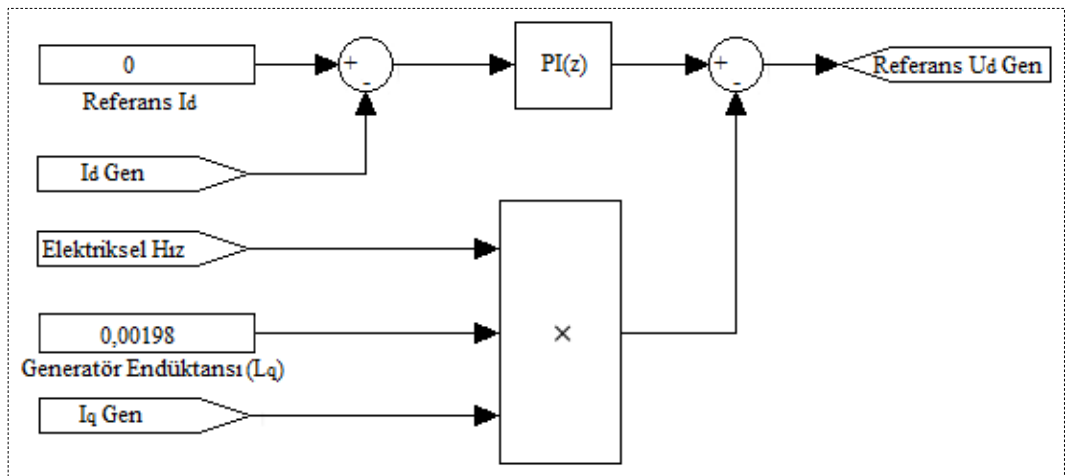
S-bölgesinde verilen eşitliklerin son hali Denklem (5.47) ve Denklem (5.48)'deki gibi yazılabilir;

$$u_{dg}^* = \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right)_{PI_1} (i_{dg}^* - i_{dg}) - \omega_{eg} L_{qg} i_{qg} \quad (5.47)$$

$$u_{qg}^* = \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right)_{PI_2} (i_{qg}^* - i_{qg}) + \omega_{eg} L_{dg} i_{dg} + \omega_{eg} \lambda_{pm} \quad (5.48)$$



Şekil 5.13. Generatör tarafı referans U_q gerilimi hesaplanmasının blok diyagramı

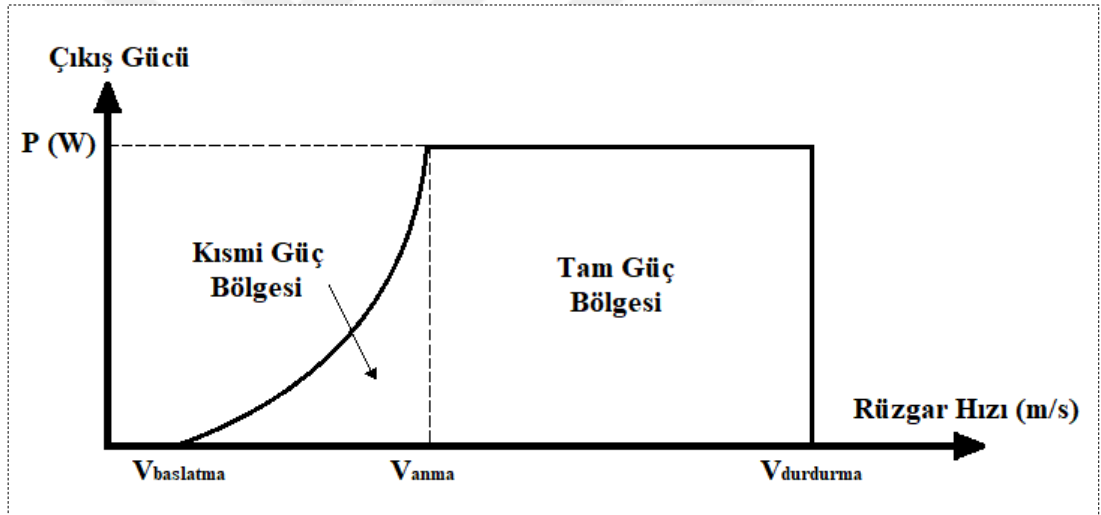


Şekil 5.14. Generatör tarafı referans U_d gerilimi hesaplanmasının blok diyagramı

Benzetim çalışması için oluşturulan akım kontrol döngüsü blok diyagramları Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te verilmiştir. Çalışmada kullanılan PI denetleyici parametreleri PI_1 ve PI_2 için $K_P = 6$, $K_I = 8$ olarak ayarlama metoduyla belirlenmiştir.

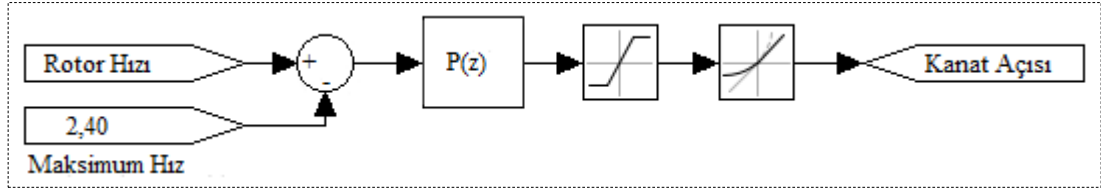
5.3.1.2. Maksimum güç çekme ve optimum tork kontrolü

Değişken hızlı rüzgar türbinlerinin kısmi güç bölgesi ve tam güç bölgesi olmak üzere iki adet güç bölgesi vardır. Bu bölgelerin dışında kalan alanlarda ise türbin duruş vaziyetinde olup şebekeye enerji vermez. Rüzgar türbinlerinin tasarımları üreticiden üreticiye değişmekte olup, her türbin için bir başlatma rüzgar hızı, anma rüzgar hızı ve durdurma rüzgar hızı vardır. Başlatma hızları genellikle 3 – 5 m/s hızlarında, durdurma hızları ise 20 – 25 m/s hızları arasında değişmektedir. Anma rüzgar hızı ise rüzgar türbininin kanat tasarımında kullanılan ana parametrelerden biridir.



Şekil 5.15. Rüzgar türbinine ait güç bölgelerine göre çıkış gücü değişimi grafiği

Anma hızından büyük rüzgar hızlarında rotorun dönme hızını kontrol etmek için kanat açısı kontrolü yapılır. Türbin kanatlarının açı derecesi anlık rotor hızının maksimum rotor hızıyla farkı alınarak aradaki hata değeri bir kapalı çevim P denetleyicisinden geçirilerek ayarlanabilir. Türbin kanadı açı yaptığında tork katsayısının değeri azalır fakat türbinin ürettiği tork rüzgar hızının karesiyle orantılı olduğu için generatöre iletilen tork da hep maksimum olmuş olur. Şekil 5.16'da kanat açısı kontrolünün blok diyagramı verilmiştir. Benzetim çalışması için P denetleyicisinin kazancı $K_P = 100000$ olarak ayarlama metoduyla belirlenmiştir.



Şekil 5.16. Kanat açısı hesaplanmasının blok diyagramı

Anma rüzgar hızından daha düşük hızlarda ise türbinin üreteceği tork, anma torkundan az olur ve dolayısıyla generatör şebekeye anma gücünden daha az güç verir. Şebekeye verilen gücün, o anki rüzgarın hızına bağlı olarak verilebilecek maksimum güç olması için türbinin ürettiği torkun da mevcut rüzgar hızına göre maksimum olması gerekir. Türbinin bunu yapabilmesi için tork katsayısının optimum değerinde olması, dolayısıyla rotor hızının kontrol edilerek uç kanat hızı oranının optimum değerinde tutulması gerekir. Anma hızından düşük hızlarda türbinin üretebileceği optimum uç kanat hızı oranı eşitliği Denklem (5.49)'da, optimum tork eşitliği ise Denklem (5.50)'de verilmiştir;

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega_t r}{V_r} \quad (5.49)$$

$$T_{opt} = C_{T_{opt}}(\lambda_{opt}, \beta_0) \frac{1}{2} \rho \pi r^3 V_r^2 \quad (5.50)$$

Denklem (5.49)'da verilen eşitlikten rüzgar hızı çekilirse Denklem (5.51) elde edilir;

$$V_r = \frac{\omega_t r}{\lambda_{opt}} \quad (5.51)$$

Elde edilen Denklem (5.51), Denklem (5.50)'de verilen rüzgar hızının yerine yazılırsa Denklem (5.52) elde edilir;

$$T_{opt} = C_{T_{opt}}(\lambda_{opt}, \beta_0) \frac{1}{2} \rho \pi r^3 \left(\frac{\omega_t r}{\lambda_{opt}} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{C_{T_{opt}}(\lambda_{opt}, \beta_0) \rho \pi r^5}{\lambda_{opt}^2} \omega_t^2 \quad (5.52)$$

Denklem (5.52)'de verilen λ_{opt} değeri maksimum tork katsayısını vereceği optimum değerdir ve sabittir. Denklemdeki tüm sabitler bir araya getirilirse Denklem (5.53) elde edilir ve optimum tork eşitliğinin son hali Denklem (5.54)'teki gibi yazılabilir;

$$K_{sabit} = \frac{1}{2} \frac{C_{T_{opt}}(\lambda_{opt}, \beta_0) \rho \pi r^5}{\lambda_{opt}^2} \quad (5.53)$$

$$T_{opt} = K_{sabit} \omega_t^2 \quad (5.54)$$

Denklemlerden de anlaşılacağı gibi rüzgarın havadaki hızı kontrol edilemeyeceği için optimum uç kanat hızı oranı ancak rotor hızı kontrol edilerek sağlanabilir. Ayrıca dikkat edilirse ancak rüzgar hızından düşük hızlarda maksimum güç çekmek yani optimum torku hesaplayabilmek için rüzgar hızının ölçülmesine gerek yoktur sadece anlık rotor hızının bilinmesi gerekir. Benzetim çalışması için K sabitinin değeri $K_{sabit} = 62626$ olarak hesaplanmıştır.

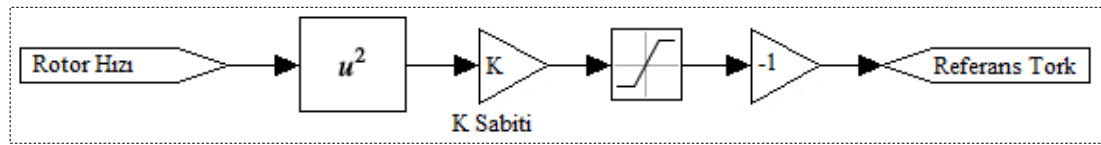
Rotor hızı, daha önce hareket denklemi olan Denklem (5.29)'da verildiği gibi doğrudan generatörde oluşan elektromanyetik tork ile alakalıdır. Denklem (5.54)'te bulunan optimum tork değeri, Denklem (5.55) ve Denklem (5.56)'da verildiği gibi generatörün elektromanyetik tork denklemi ile eşitlenirse, generatörün tork akımı olan i_q 'nin referans değeri Denklem (5.57) yardımıyla bulunur ve alan yönlendirmeli vektör kontrolü sağlanmış olur.

$$T_{opt} = T_e \quad (5.55)$$

$$T_{opt} = \frac{3}{2} p \lambda_{pm} i_{qg}^* \quad (5.56)$$

$$i_{qg}^* = \frac{2}{3} \frac{T_{opt}}{p \lambda_{pm}} \quad (5.57)$$

Şekil 5.17'de optimum tork kontrolünün blok diyagramı verilmiştir.

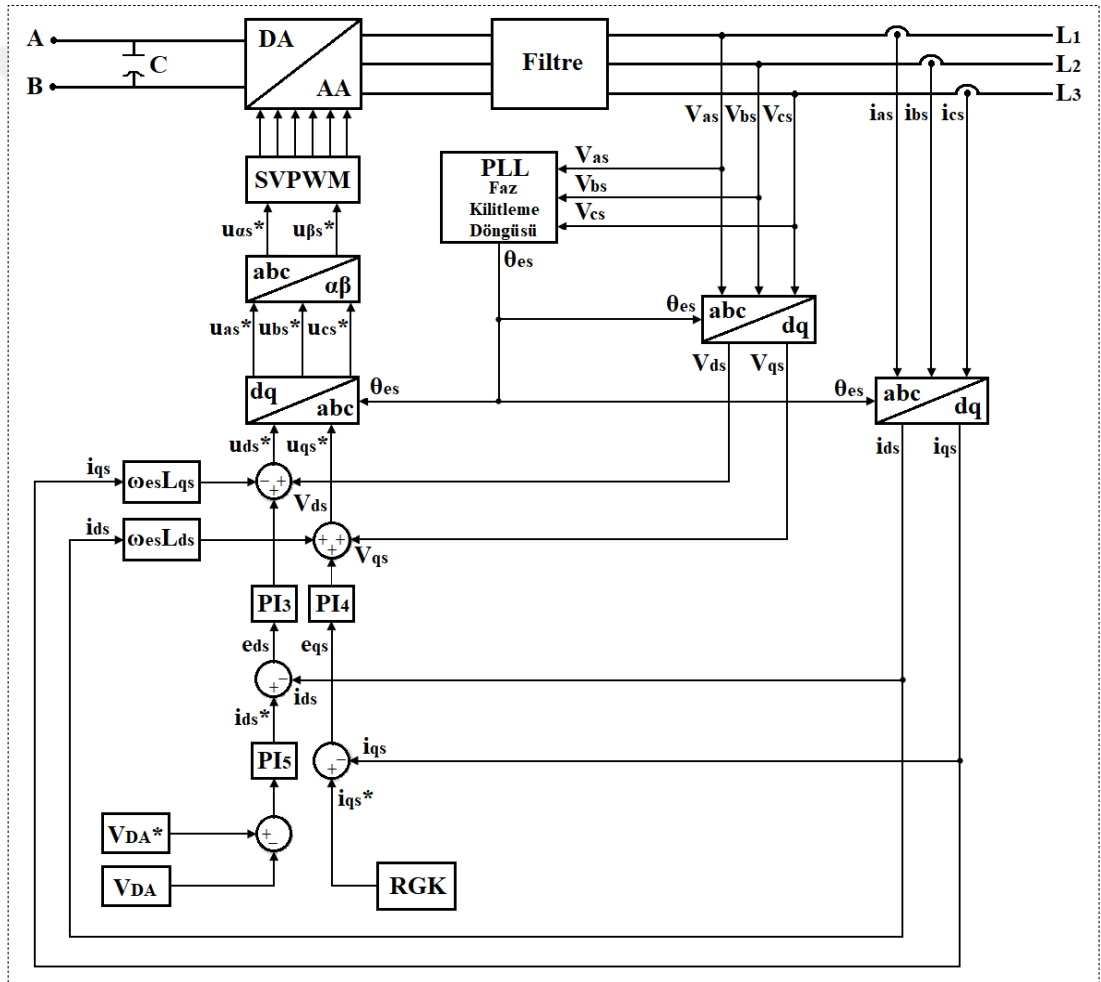


Şekil 5.17. Optimum tork kontrolü hesaplanmasının blok diyagramı

5.3.2. Şebeke tarafı gerilim yönlendirmeli vektör kontrolü

Gerilim yönlendirmeli vektör kontrolü, alan yönlendirmeli vektör kontrolüne benzer şekilde dq referans düzleminin bir ekseninin, şebeke geriliminin bir eksenini ile hizalanması anlamına gelir. Genellikle d eksenine göre hizalanır ve bu eksen DA bara gerilimini kontrol eder [75]. Dönüştürücünün şebekeye verdiği aktif gücün kararlı olması için DA bara geriliminin sabit tutulması gerekir [76]. Ayrıca i_{ds} akımı

aktif gücü, i_{qs} akımı ise reaktif gücü oluşturur [75]. Şebekenin i_{ds} ve i_{qs} akımları referans akımlar ile karşılaştırılır ve aradaki hata iki ayrı PI denetimine sokulur. PI denetiminde her iki eksen akımı kontrol edilir ve çıkan değerler ile birlikte şebeke, eğer varsa transformatör ve filtre parametreleri kullanılarak U_{ds}^* ve U_{qs}^* referans gerilimleri oluşur. Oluşan referans gerilimler ters Clarke – Parke dönüşümleri aracılığıyla $\alpha\beta$ referans düzlemine dönüştürülür ve bu dönüşüm şebekenin anlık olarak sürekli elektriksel açısına ihtiyaç duyar. Oluşan $U_{\alpha s}^*$ ve $U_{\beta s}^*$ referans gerilimleri uzay vektörü darbe genişlik modülasyonu tekniği ile şebeke tarafı dönüştürücünün anahtarlama sinyallerini oluşturur.



Şekil 5.18. Şebeke tarafı gerilim yönlendirmeli vektör kontrolünün şematik gösterimi

Şekil 5.18'de de görüldüğü gibi i_{ds}^* referans akımı, DA barasının mevcut gerilimi V_{DA} ve referans gerilim V_{DA}^* arasındaki hatanın bir PI denetleyici tarafından kontrol edilerek oluşturulur. i_{qs}^* referans akımının değeri ise şebeke reaktif gücünü sıfır yapmak için değeri sıfırdır [74].

5.3.2.1. Akım kontrolü döngüsü

Gerilim yönlendirmeli vektör kontrolünü uygulayabilmek için referans gerilim eşitlikleri Denklem (5.58) ve Denklem (5.59)'daki gibi yazılabilir;

$$u_{ds}^* = K_{P3}e_{ds} + K_{I3} \int e_{ds} dt - \omega_{es} L_{qs} i_{qs} + V_{ds} \quad (5.58)$$

$$u_{qs}^* = K_{P3}e_{qs} + K_{I3} \int e_{qs} dt + \omega_{es} L_{qs} i_{qs} + V_{qs} \quad (5.59)$$

Burada; u_{ds}^* , u_{qs}^* dq eksenli referans gerilimleri, K_{P3} , K_{P4} şebeke tarafı akım kontrol döngüsünün oran kazanç parametreleri, K_{I3} , K_{I4} şebeke tarafı akım kontrol döngüsünün integral kazanç parametreleridir. e_{ds} ve e_{qs} ise akım bileşeninin hata sinyalleridir ve bu hata sinyalleri Denklem (5.60) ve Denklem (5.61)'de verildiği gibi hesaplanır;

$$e_{ds} = i_{ds}^* - i_{ds} \quad (5.60)$$

$$e_{qs} = i_{qs}^* - i_{qs} \quad (5.61)$$

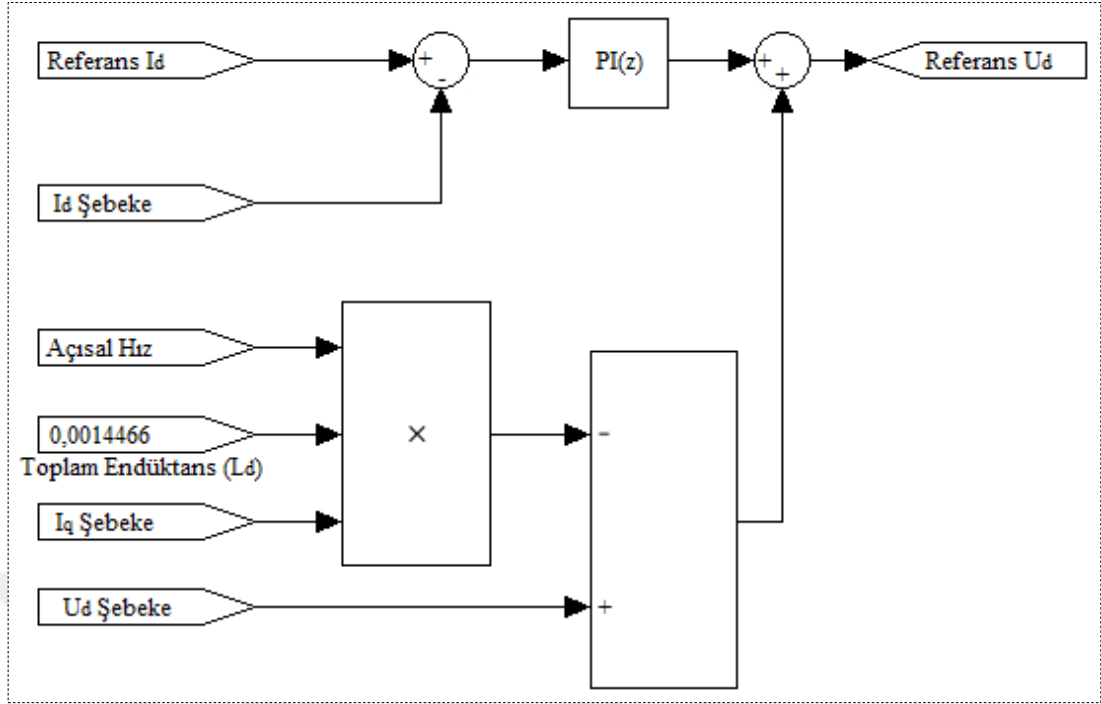
Şebeke akımlarının bağımsız kontrollerini kolaylaştırabilmek için $\omega_{es} L_{ds} i_{ds}$ ve $\omega_{es} L_{qs} i_{qs}$ şebeke modeline göre çarpaz olarak yer değiştirir [64, 76]. Referans gerilim eşitlikleri Denklem (5.62) ve Denklem (5.63)'teki gibi yazılabilir;

$$u_{ds}^* = \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right)_{PI_3} (i_{ds}^* - i_{ds}) - \omega_{es} L_{qs} i_{qs} + V_{ds} \quad (5.62)$$

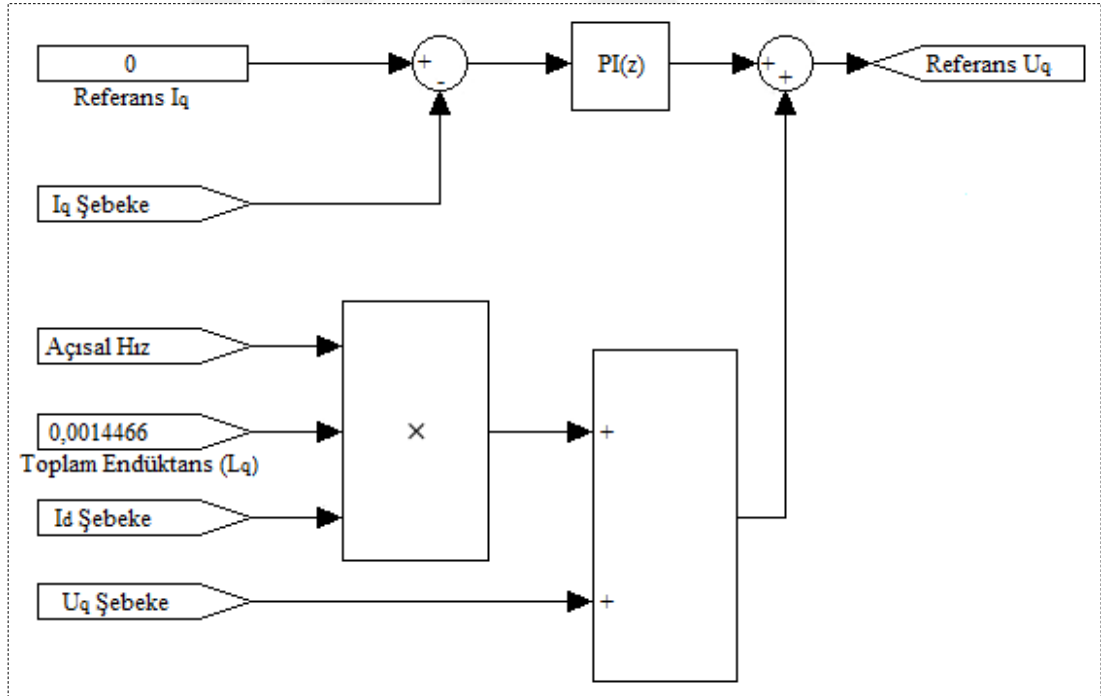
$$u_{qs}^* = \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right)_{PI_4} (i_{qs}^* - i_{qs}) + \omega_{es} L_{ds} i_{ds} + V_{qs} \quad (5.63)$$

Burada U_{ds} gerilimi, şebeke tarafı dönüştürücünün darbe genişlik modülasyonu için modülasyon indeksini düzenler [13]. Şebeke gerilimi d eksenine hizalandığı için U_{qs} geriliminin değeri sıfırdır ve iptal edilebilir [77].

Benzetim çalışması için oluşturulan akım kontrol döngüsü blok diyagramları Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan PI denetleyici parametreleri PI_3 için $K_P = 4,75$, $K_I = 8,35$ ve PI_2 için $K_P = 6,75$, $K_I = 8,35$ olarak ayarlama metoduyla belirlenmiştir.



Şekil 5.19. Şebeke tarafı referans U_d gerilimi hesaplanmasının blok diyagramı



Şekil 5.20. Şebeke tarafı referans U_q gerilimi hesaplanmasının blok diyagramı

5.3.2.2. DA barası gerilim kontrolü döngüsü

DA barasının anlık gerilim değeri ile referans gerilimin farkı PI denetiminden geçerek i_d^* referans akımını oluşturur ve eşitliği Denklem (5.64)'teki gibi yazılabilir;

$$i_d^* = K_{P5}e_{DA} + K_{I5} \int e_{DA} dt \quad (5.64)$$

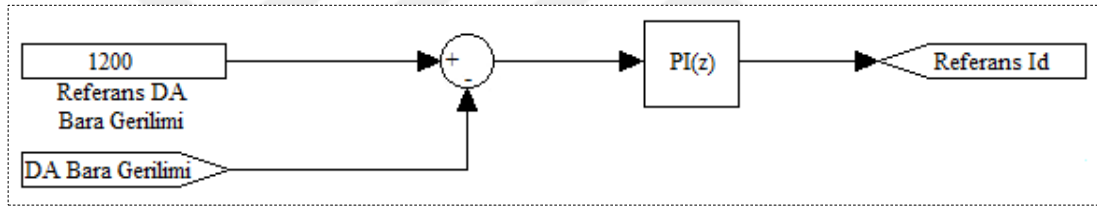
Burada; K_{P5} oran kazanç parametresi, K_{I5} integral kazanç parametresi, e_{DA} gerilim farkının hata sinyalidir ve Denklem (5.65)'teki gibi ifade edilir;

$$e_{DA} = U_{DA}^* - U_{DA} \quad (5.65)$$

Verilen eşitliklerin son hali Denklem (5.66)'daki gibi yazılabilir;

$$i_d^* = \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right)_{PI5} (U_{DA}^* - U_{DA}) \quad (5.66)$$

Benzetim çalışması için oluşturulan DA bara gerilimi kontrolü döngüsü blok diyagramı Şekil 5.21'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan PI denetleyici parametresi PI_5 için $K_P = 6,4$, $K_I = 9,5$ olarak ayarlama metoduyla belirlenmiştir.



Şekil 5.21. DA barası referans gerilimi hesaplanmasının blok diyagramı

5.3.2.3. Faz kilitleme döngüsü

Şebekeye bağlı rüzgar türbinlerinde dönüştürücü çıkış gerilimlerinin faz sırasının doğru, frekansın ve şebeke açısının ise şebeke ile senkron olması gerekir. Şebeke gerilimlerinin açısı faz kilitleme döngüsü ile belirlenir [59]. Faz kilitleme döngüsü, üretilen sinyallerin fazını giriş sinyalinin fazına karşılık gelecek şekilde otomatik olarak ayarlayan bir geri beslemeli kontrol sistemidir [13]. Dönüştürücü akımının açısı ile şebeke geriliminin açısını senkronize etmeye çalışarak güç faktörünü mümkün olduğunca 1'de tutmaya çalışır. Şebeke gerilimi ile dönüştürücü çıkış akımı arasında faz kayması olması durumunda, dönüştürücü akımının frekansını değiştirir [13]. Bu döngü için MATLAB/Simulink programının kütüphanesinde bulunan hazır blok kullanılmıştır.

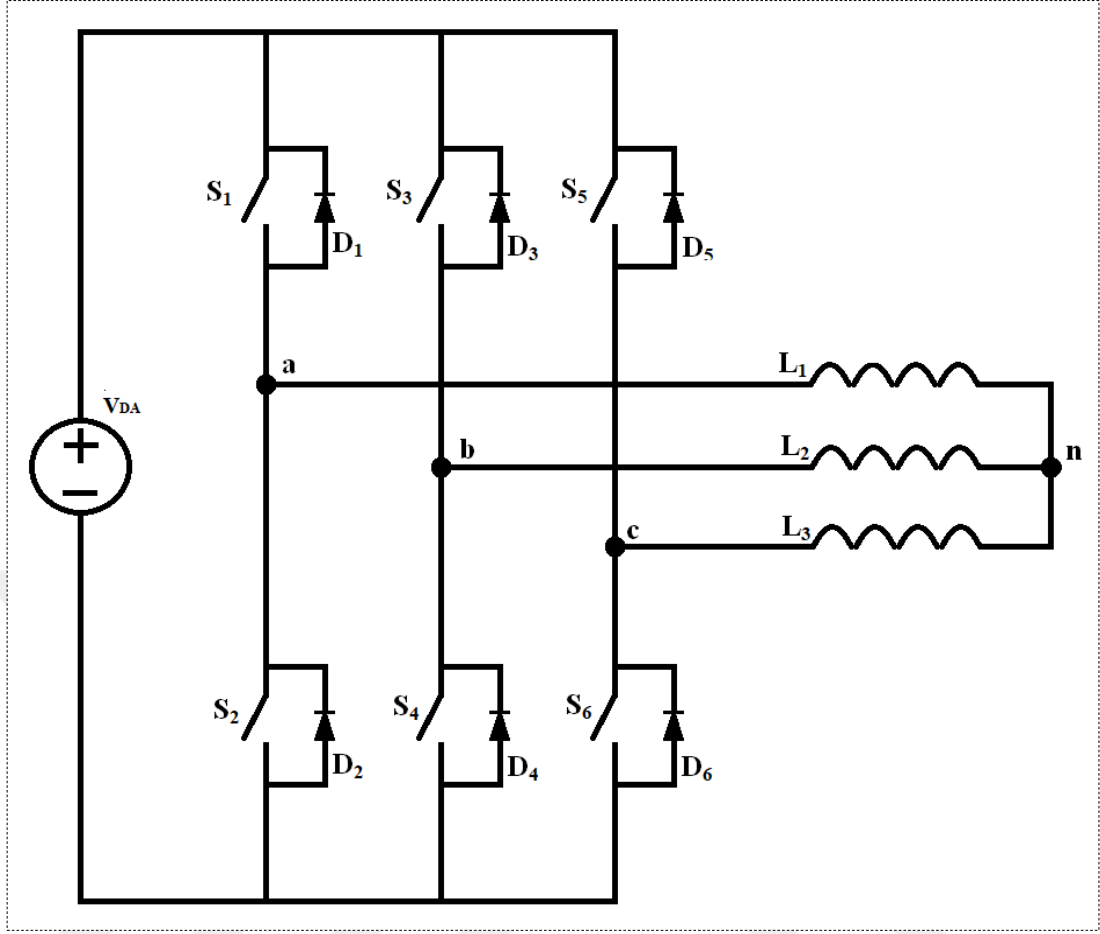
5.3.3. Uzay vektörü darbe genişlik modülasyonu

Uzay vektörü darbe genişlik modülasyonu, yarı iletkenlerin anahtarlanması için frekans dönüştürücülerinde kullanılan bir dijital modülasyon tekniğidir. Bu modülasyon tekniği anahtarlama kayıplarını en aza indirmeyi ve istenen çıkış akımını veya doğru anahtarlama sırasıyla en az harmonik bozulma içeren gerilim elde etmeyi amaçlar [78]. Bu avantajlarına karşın anahtarlama hesaplarının karmaşık olması gibi dezavantajı da vardır. Uygulamalarda yaygın olarak asenkron motor hız kontrolünde ve servo motor kontrolünde kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında incelenen miknatis uyarmalı senkron generatörlü enerji dönüşüm sisteminde modellenen dönüştürücünün denetiminde uzay vektörü darbe genişlik modülasyonu tekniği kullanılmaktadır. Esas olarak dönüştürücü geriliminin U_d ve U_q bileşenlerinin bağımsız denetimine olanak veren bir yöntem olmasına karşın dolaylı olarak motor ve generatör çalışmada akım denetimi için kullanılması, çalışma akımları ve şebekeye aktarılan aktif güç denetimi için uzay vektörü darbe genişlik modülasyonunun kullanılması mümkün olmaktadır. Aşağıda yöntemin temel prensipleri açıklanmıştır.

Üç fazlı dönüştürücünün evirici katını oluşturan altı adet anahtarlama elemanlarının iletim ve kesim durumları çıkış geriliminin şeklini belirler. Diğer modülasyon tekniklerine benzer şekilde altı adet anahtarlardan ($S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$) her faza ait üst kol anahtarı iletimdeyken, ilgili alt kol anahtarı kesimde olmalıdır [73]. Bu anahtarlar IGBT, GTO, BJT, MOSFET gibi anahtarlama elemanlarından oluşabilir.

Doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için genellikle gerilim beslemeli evirici kullanılır. Şekil 5.22'de tipik bir gerilim beslemeli evirici devresi verilmiştir.

Uzay vektörü darbe genişlik modülasyonunun temeli sekiz adet anahtarlama durumunun uzay vektörleri olarak tanımlanmasına dayanır. Şekil 5.22'de verilen evirici katı devresindeki üst kol anahtarlarının sekiz adet anahtarlama kombinasyonunun altı tanesi yük üzerinde sıfırdan farklı bir gerilim oluştururken kalan iki tanesi de sıfır gerilimi oluşturur.



Şekil 5.22. Gerilim beslemeli evirici devresi örneği

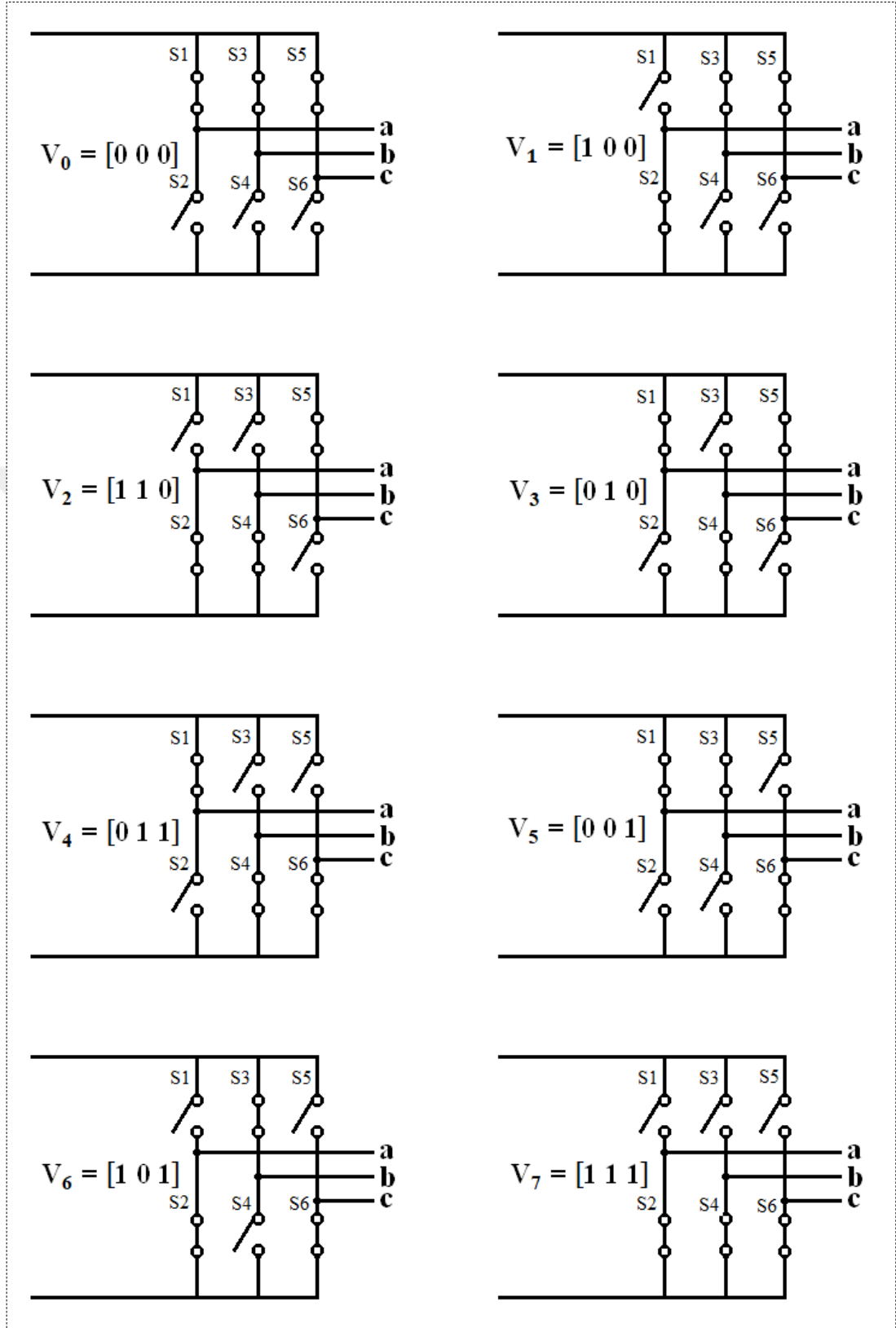
Anahtarlara karşılık gelen faz – nötr ve faz – faz arası gerilimleri Denklem (5.67) ve Denklem (5.68)’deki gibi ifade edilebilir [14, 79];

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{DA} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_3 \\ S_5 \end{bmatrix} \quad (5.67)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ac} \end{bmatrix} = V_{DA} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_3 \\ S_5 \end{bmatrix} \quad (5.68)$$

Burada; V_{an} , V_{bn} , V_{cn} (V) faz – nötr gerilimleri, V_{ab} , V_{bc} , V_{ac} (V) faz – faz gerilimleri, V_{DA} (V) DA bara gerilimi, S_1 , S_3 , S_5 üst kol anahtarlarıdır.

Şekil 5.23’te diğer anahtarlama durumlarına göre oluşan uzay vektörleri verilmiştir.



Şekil 5.23. Eviricinin anahtarlama durumlarına göre oluşan uzay vektörleri

Anahtarlama durumlarına göre elde edilen gerilimler Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Anahtarlama durumlarına göre faz – nötr ve faz – faz gerilimleri

Gerilim Vektörleri	Anahtarlar			Faz – Nötr Gerilimleri			Faz – Faz Gerilimleri		
	S ₁	S ₂	S ₃	V _{an}	V _{bn}	V _{cn}	V _{ab}	V _{bc}	V _{ac}
V ₀	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V ₁	1	0	0	$\frac{2}{3} V_{DA}$	$-\frac{1}{3} V_{DA}$	$-\frac{1}{3} V_{DA}$	V _{DA}	0	-V _{DA}
V ₂	1	1	0	$\frac{1}{3} V_{DA}$	$\frac{1}{3} V_{DA}$	$-\frac{2}{3} V_{DA}$	0	V _{DA}	-V _{DA}
V ₃	0	1	0	$-\frac{1}{3} V_{DA}$	$\frac{2}{3} V_{DA}$	$-\frac{1}{3} V_{DA}$	-V _{DA}	V _{DA}	0
V ₄	0	1	1	$-\frac{2}{3} V_{DA}$	$\frac{1}{3} V_{DA}$	$\frac{1}{3} V_{DA}$	-V _{DA}	0	V _{DA}
V ₅	0	0	1	$-\frac{1}{3} V_{DA}$	$-\frac{1}{3} V_{DA}$	$\frac{2}{3} V_{DA}$	0	-V _{DA}	V _{DA}
V ₆	1	0	1	$\frac{1}{3} V_{DA}$	$-\frac{2}{3} V_{DA}$	$\frac{1}{3} V_{DA}$	V _{DA}	-V _{DA}	0
V ₇	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Uzay vektörü darbe genişlik modülasyonunun temel prensibi, evirici tarafından üretilen sekiz adet ayrı uzay vektörü gerilimlerini kullanarak ideal gerilim vektörüne mümkün olduğunca yaklaşan bir referans gerilim vektörü sağlamaktır [78]. Referans gerilimi elde etmek için $\alpha\beta$ referans düzlemine geçilebilir. Denklem (5.69)'da Clarke dönüşümünün başka gösterimi ile $\alpha\beta$ referans düzlemi gerilimleri verilmiştir;

$$\vec{V}_{ref} = V_{\alpha} + jV_{\beta} = \frac{2}{3} \left(V_{an} e^{j0} + V_{bn} e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_{cn} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) \quad (5.69)$$

$$V_{\alpha} + jV_{\beta} = \frac{2}{3} \left[V_{an} + V_{bn} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + V_{cn} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right] + j \frac{2}{3} \left[V_{bn} \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) - V_{cn} \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (5.70)$$

Denklem (5.70)'te verilen eşitliğin her iki yanındaki gerçek ve sanal kısımlar birbirlerine eşitlenirse Denklem (5.71) ve Denklem (5.72) elde edilir;

$$V_{\alpha} = \frac{2}{3} \left[V_{an} + V_{bn} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + V_{cn} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (5.71)$$

$$V_{\beta} = \frac{2}{3} \left[V_{bn} \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) - V_{cn} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (5.72)$$

Elde edilen $\alpha\beta$ düzlemi gerilimlerinin matris olarak gösterimi Denklem (5.73)'teki gibi olur;

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (5.73)$$

Burada; V_{α} , V_{β} (V) $\alpha\beta$ düzlemi gerilim vektörleridir.

Clarke dönüşümü sonucunda altı adet sıfırdan farklı gerilim vektörü ve iki adet sıfır gerilim vektörü tarafından oluşan altıgen içerisinde döndürülen bir referans gerilim vektörü elde edilir. Gerilim vektörleri ($V_1..V_6$) altıgenin köşe noktalarını oluştururlar, sıfır vektörleri (V_0, V_7) ise merkezde yer alırlar ve yüke sıfır gerilim uygularlar. Elde edilen altıgende birbirine komşu iki gerilim vektörleri arasında 60° 'lik açı vardır. Gerilim vektörleri arasında oluşan her alan bir bölgeyi temsil eder. Her bölümde iki gerilim vektörü ve iki sıfır vektörü anahtarlanır ve referans gerilim vektörü elde edilir. Oluşan altıgen Şekil 5.24'te verilmiştir.

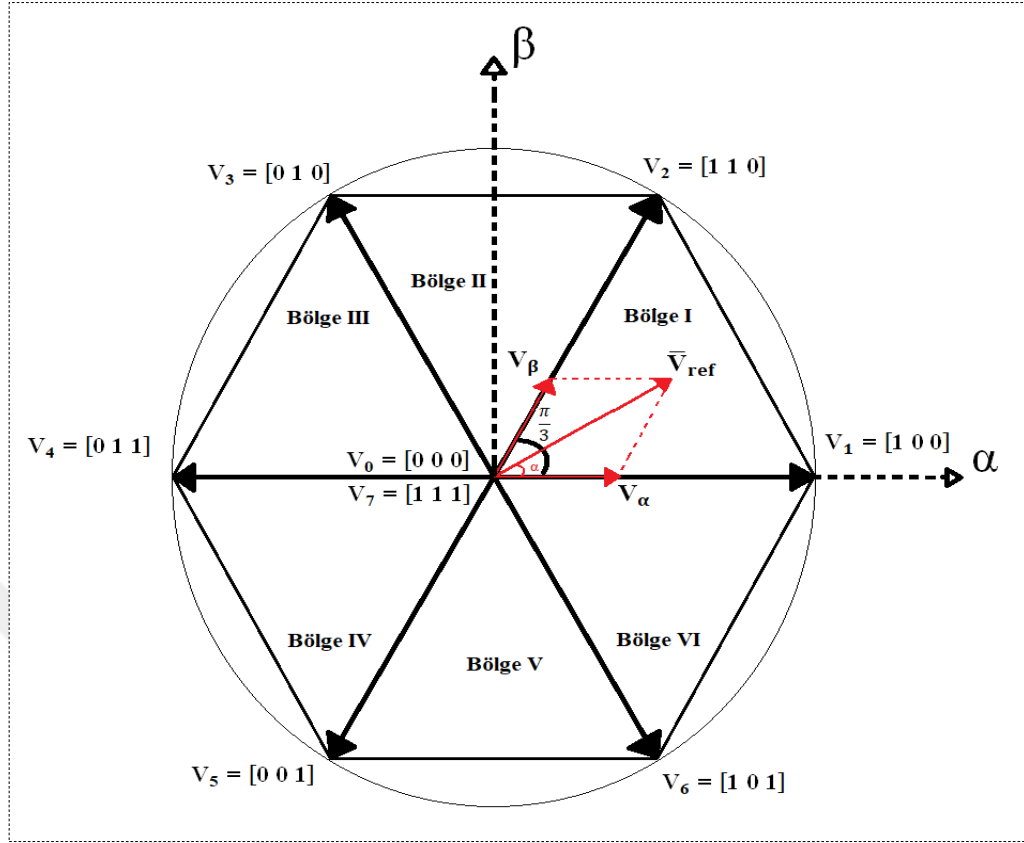
Oluşan referans gerilim vektörünün boyutu ve açısı Denklem (5.74) ve Denklem (5.75)'teki gibi elde edilebilir;

$$|V_{ref}| = \sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \quad (5.74)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}} \right) = \omega t = 2\pi f t \quad (5.75)$$

Burada; V_{ref} (V) referans gerilim vektörü, θ ($^\circ$) $\alpha\beta$ düzlemi gerilimleri arasındaki açı, f (Hz) frekanstır.

Anahtarlama durumlarına göre $\alpha\beta$ düzlemi gerilimleri Tablo 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.24. Oluşan altıgende referans gerilimi vektörü ve bölgeler

Tablo 5.4. Anahtarlama durumlarına göre $\alpha\beta$ düzlemi gerilimleri

Gerilim Vektörleri	Anahtarlar			$\alpha - \beta$ Gerilimleri	
	S_1	S_2	S_3	V_α	V_β
V_0	0	0	0	0	0
V_1	1	0	0	$\frac{2}{3} V_{DA}$	0
V_2	1	1	0	$\frac{1}{3} V_{DA}$	$\frac{1}{\sqrt{3}} V_{DA}$
V_3	0	1	0	$-\frac{1}{3} V_{DA}$	$\frac{1}{\sqrt{3}} V_{DA}$
V_4	0	1	1	$-\frac{2}{3} V_{DA}$	0
V_5	0	0	1	$-\frac{1}{3} V_{DA}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}} V_{DA}$
V_6	1	0	1	$\frac{1}{3} V_{DA}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}} V_{DA}$
V_7	1	1	1	0	0

$$\vec{V}_{\text{ref}} \frac{T_s}{2} = \vec{V}_1 T_1 + \vec{V}_2 T_2 + \vec{V}_0 \frac{T_0}{2} + \vec{V}_7 \frac{T_0}{2} \quad (5.79)$$

Denklem (5.80)'de de verildiği gibi V_0 ve V_7 sıfır vektörleri sıfıra eşit olacağından eşitliğin son hali Denklem (5.81)'deki gibi yazılır;

$$\int_0^{\frac{T_0}{4}} \vec{V}_0 dt = \int_{\frac{T_0}{4}+T_1+T_2}^{\frac{T_s}{2}} \vec{V}_7 dt = 0 \quad (5.80)$$

$$\vec{V}_{\text{ref}} \frac{T_s}{2} = \vec{V}_1 T_1 + \vec{V}_2 T_2 \quad (5.81)$$

Verilen denklemi diğer bölgeler için de genelleştirecek olursak eşitlik Denklem (5.82)'deki gibi olur;

$$\vec{V}_{\text{ref}} \frac{T_s}{2} = \vec{V}_k T_1 + \vec{V}_{k+1} T_2 \quad (5.82)$$

Burada T_1 ve T_2 her bir örnekleme periyodu boyunca V_k ve V_{k+1} gerilim vektörleri için gerekli olan süreyi belirtir. k ise içinde bulunulan bölgenin indisidir. Hesaplanan T_1 ve T_2 süreleri, her bölge için anahtarlama sinyalleri üretmek amacıyla uygulanır. Anahtarlama süreleri, örnekleme periyodunun yarısı için düzenlenir, diğer yarısı ise birincisinin simetriğidir.

Şekil 5.25'te, eğer V_{ref} vektörü tam ortadaysa yani aradaki açı 30° ise T_1 ve T_2 süreleri birbirine eşit olacaktır. Eğer V_{ref} vektörü V_α vektörüne yakınsa, T_1 süresi T_2 'den büyük olacaktır. Eğer V_{ref} vektörü V_2 ile çakışıksa T_1 süresi sıfır olacaktır. V_{ref} gerilimi bütün bölgeleri kapsayan altıgen içerisinde dairesel olarak dönerse ve T_0 süresi sıfırdan büyükse, çıkış gerilimi sinüzoidal bir dalga olarak karşımıza çıkacaktır.

Referans gerilim eşitliğini $\alpha\beta$ düzlemi gerilimleri cinsinden ifadesi Denklem (5.83) ve düzenlenmiş hali olan Denklem (5.84)'teki gibi matris olarak yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \frac{T_s}{2} = \frac{2}{3} V_{\text{DA}} \left(T_1 \begin{bmatrix} \cos \frac{(k-1)\pi}{3} \\ \sin \frac{(k-1)\pi}{3} \end{bmatrix} + T_2 \begin{bmatrix} \cos \frac{k\pi}{3} \\ \sin \frac{k\pi}{3} \end{bmatrix} \right) \quad (5.83)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \frac{T_s}{2} = \frac{2}{3} V_{DA} \begin{bmatrix} \cos \frac{(k-1)\pi}{3} & \cos \frac{k\pi}{3} \\ \sin \frac{(k-1)\pi}{3} & \sin \frac{k\pi}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} \quad (5.84)$$

Denklem (5.84)'te verilen matrisin tersi alınarak T_1 ve T_2 süreleri Denklem (5.85)'teki gibi bulunabilir;

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}T_s}{2V_{DA}} \begin{bmatrix} \sin \frac{k\pi}{3} & -\cos \frac{k\pi}{3} \\ -\sin \frac{(k-1)\pi}{3} & \cos \frac{(k-1)\pi}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (5.85)$$

V_{ref} gerilim vektörü Denklem (5.86)'da verildiği gibi yazılabilir;

$$\vec{V}_{ref} = |\vec{V}_{ref}| e^{j\omega t} = |\vec{V}_{ref}| [\cos(\omega t) + j \sin(\omega t)] = |\vec{V}_{ref}| (\cos \theta + j \sin \theta) \quad (5.86)$$

Denklem (5.86)'daki gerçek ve sanal terimler, Denklem (5.85)'te verilen $\alpha\beta$ düzlemi gerilimlerinin yerine koyulursa Denklem (5.87) elde edilir;

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}T_s |\vec{V}_{ref}|}{2V_{DA}} \begin{bmatrix} \sin \frac{k\pi}{3} & -\cos \frac{k\pi}{3} \\ -\sin \frac{(k-1)\pi}{3} & \cos \frac{(k-1)\pi}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (5.87)$$

Buradan T_1 ve T_2 sürelerinin en sade hali Denklem (5.88) ve Denklem (5.89)'da verildikleri gibi yazılabilir;

$$T_1 = \frac{T_s \sqrt{3} |\vec{V}_{ref}|}{2 V_{DA}} \left[\left(\sin \frac{k\pi}{3} \cos \theta \right) + \left(-\cos \frac{k\pi}{3} \sin \theta \right) \right] \quad (5.88)$$

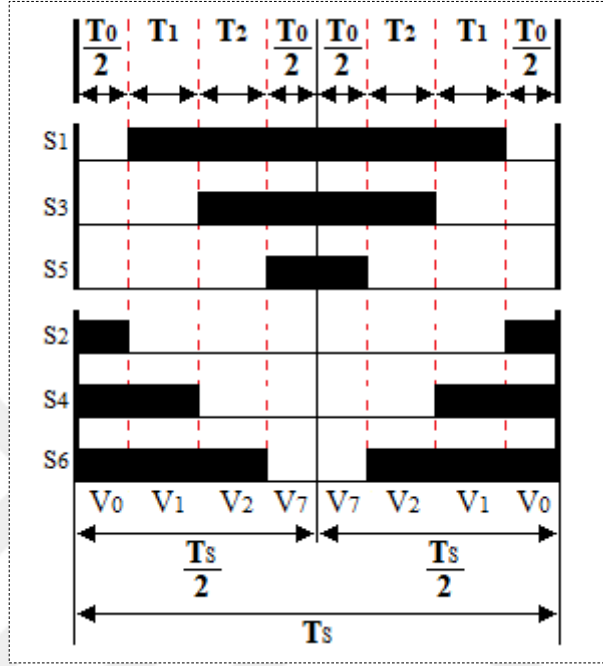
$$T_2 = \frac{T_s \sqrt{3} |\vec{V}_{ref}|}{2 V_{DA}} \left[\left(-\sin \frac{(k-1)\pi}{3} \cos \theta \right) + \left(\cos \frac{(k-1)\pi}{3} \sin \theta \right) \right] \quad (5.89)$$

Burada θ açısı sıfır ile altmış derece arasındadır ($0^\circ < \theta \leq 60^\circ$). Bir tam örnekleme periyodunun (T_s) toplamı olan T_1 , T_2 ve T_0 süreleri için eşitlik Denklem (5.90) ve Denklem (5.91)'de verilmiştir.

$$T_s = T_0 + 2(T_1 + T_2) \quad (5.90)$$

$$T_0 = T_s - 2(T_1 + T_2) \quad (5.91)$$

Şekil 5.26’da birinci bölge için oluşan anahtarlama yapısı verilmiştir. Şekil incelendiğinde örnekleme periyodunun ortasında, simetrik olarak birleştirilmiş uzay vektörlerinin anahtarlama süreleri görülebilir. V_0 vektörü örnekleme periyodunun başında ve sonunda, V_7 vektörü ise örnekleme periyodunun ortasına yerleştirilmiştir.



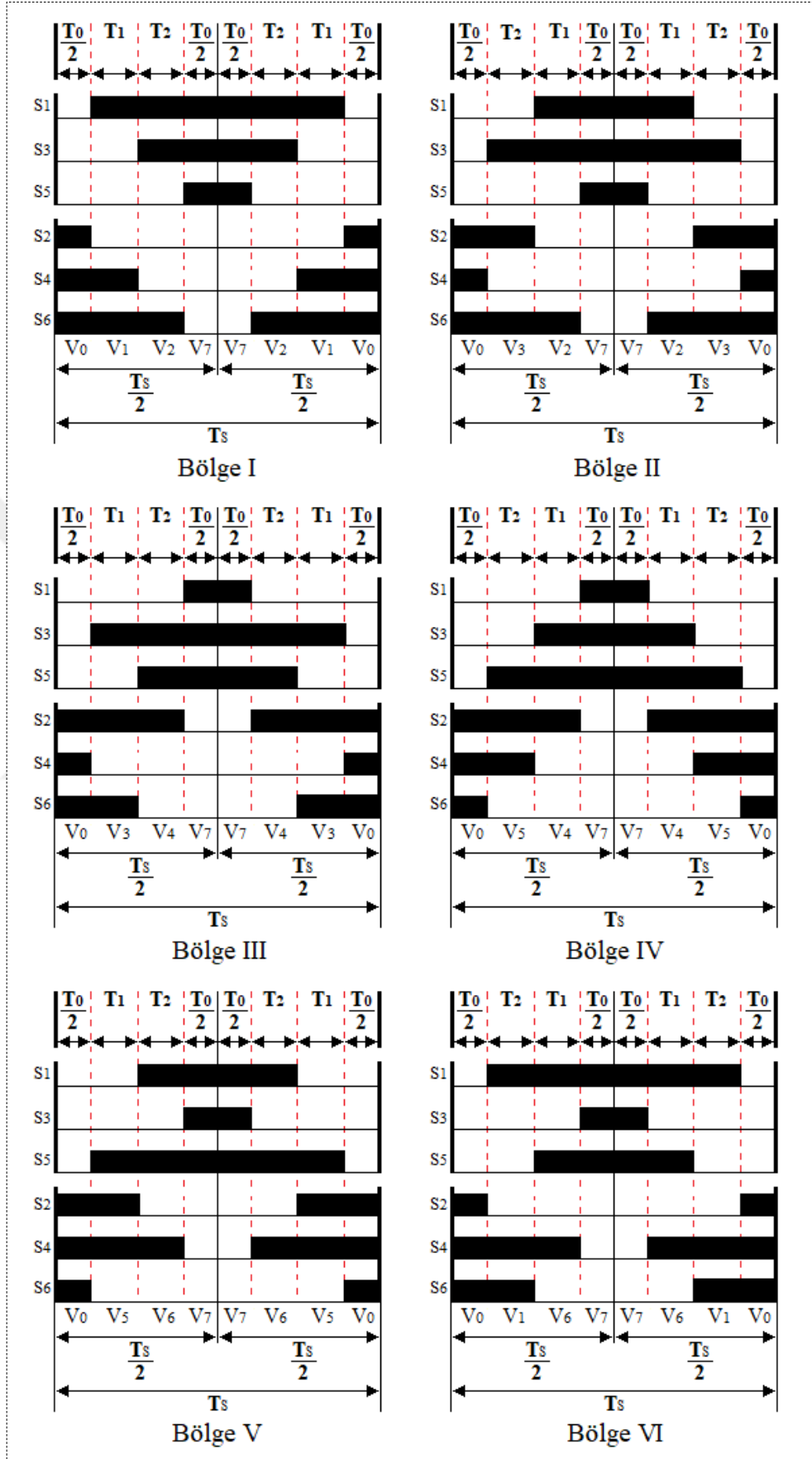
Şekil 5.26. Bölge I için verilen anahtarlama durumu

Anahtarlama sırasının doğru yapılabilmesi için vektörlerin sırası $V_0, V_1, V_2, V_7, V_7, V_2, V_1, V_0$ ve sürelerin sırası $T_0/2, T_1, T_2, T_0/2, T_0/2, T_2, T_1, T_0/2$ Şekil 5.26’da görüldüğü gibi uygulanmalıdır. Bölgelere göre uzay vektörleri ve süreler Tablo 5.5’te verilmiştir.

Tablo 5.5. Referans gerilimin konumuna göre uzay vektörlerinin uygulanma sırası ve süreleri

Referans Gerilimin Bölgesi	Referans Gerilimin Açısı	Uzay Vektörlerinin Sırası	Anahtarlama Sürelerinin Sırası
Bölge I	$0^\circ < \theta \leq 60^\circ$	$V_0-V_1-V_2-V_7-V_7-V_2-V_1-V_0$	$T_0/2-T_1-T_2-T_0/2-T_0/2-T_2-T_1-T_0/2$
Bölge II	$60^\circ < \theta \leq 120^\circ$	$V_0-V_3-V_2-V_7-V_7-V_2-V_3-V_0$	$T_0/2-T_2-T_1-T_0/2-T_0/2-T_1-T_2-T_0/2$
Bölge III	$120^\circ < \theta \leq 180^\circ$	$V_0-V_3-V_4-V_7-V_7-V_4-V_3-V_0$	$T_0/2-T_1-T_2-T_0/2-T_0/2-T_2-T_1-T_0/2$
Bölge IV	$180^\circ < \theta \leq 240^\circ$	$V_0-V_5-V_4-V_7-V_7-V_4-V_5-V_0$	$T_0/2-T_2-T_1-T_0/2-T_0/2-T_1-T_2-T_0/2$
Bölge V	$240^\circ < \theta \leq 300^\circ$	$V_0-V_5-V_6-V_7-V_7-V_6-V_5-V_0$	$T_0/2-T_1-T_2-T_0/2-T_0/2-T_2-T_1-T_0/2$
Bölge VI	$300^\circ < \theta \leq 360^\circ$	$V_0-V_1-V_6-V_7-V_7-V_6-V_1-V_0$	$T_0/2-T_2-T_1-T_0/2-T_0/2-T_1-T_2-T_0/2$

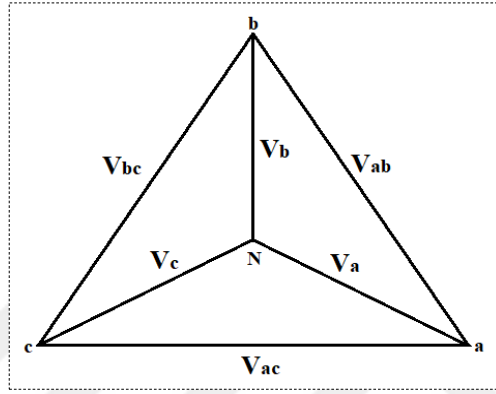
Diğer bölgeler için anahtarlama sinyallerinin yapısı ise Şekil 5.27’de verilmiştir.



Şekil 5.27. Bütün bölgeler için anahtarlama durumları

5.4. Şebeke Modeli

Uzay vektörü darbe genişlik modülasyonu tekniği ile dönüştürücünün güç aktarımını yapacağı şebeke için üç fazlı dengeli bir gerilim kaynağı modeli kullanılmıştır. Şekil 5.28'de şebekeye ait gerilimler vektörleri verilmiştir. Şebeke ile dönüştürücü arasında şebeke kısa devre reaktansı ile filtre devresinin direnç ve reaktansı bulunmaktadır.



Şekil 5.28. Simetrik üç fazlı şebeke gerilimleri

Şebeke faz - nötr gerilimlerinin eşitlikleri Denklem (5.92), Denklem (5.93) ve Denklem (5.94)'teki gibi yazılabilir;

$$V_a = V_m \sin(\omega t) \quad (5.92)$$

$$V_b = V_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5.93)$$

$$V_c = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5.94)$$

Burada; V_a , V_b , V_c (V) faz – nötr gerilimleri, V_m (V) gerilimin tepe değeri, ω (rad/s) elektriksel açısal hızdır.

Şebekenin akımları ise Denklem (5.95), Denklem (5.96) ve Denklem (5.97)'deki gibi ifade edilebilir;

$$I_a = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (5.95)$$

$$I_b = I_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi\right) \quad (5.96)$$

$$I_c = I_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi \right) \quad (5.97)$$

Burada; I_a, I_b, I_c (A) yıldız bağlı şebeke akımları, I_m (A) akımın tepe değeri, φ (rad) gerilim ile akım arasındaki açıdır.

Faz – faz arası gerilimleri, Denklem (5.98), Denklem (5.99) ve Denklem (5.100)'deki gibi ifade edilebilir;

$$V_{ab} = V_a - V_b \quad (5.98)$$

$$V_{bc} = V_b - V_c \quad (5.99)$$

$$V_{ac} = V_a - V_c \quad (5.100)$$

Burada; V_{ab}, V_{bc}, V_{ac} (V) faz – faz arası gerilimlerdir.

Toplam nötrden akan akımın eşitliği ise Denklem (5.101)'deki gibi olur;

$$I_N = I_a + I_b + I_c \quad (5.101)$$

Burada; I_N (A) nötr akımıdır.

Dengeli şebeke durumunda faz – nötr gerilimleri ve nötr akımları toplamı Denklem (5.102) ve Denklem (5.103)'te de verildiği gibi sıfırdır.

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (5.102)$$

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (5.103)$$

Benzetim çalışmasında kullanılan şebeke ve filtreye ait parametreler Tablo 5.6'da verilmiştir. Değerler literatürdeki benzer çalışmalardan alınmıştır.

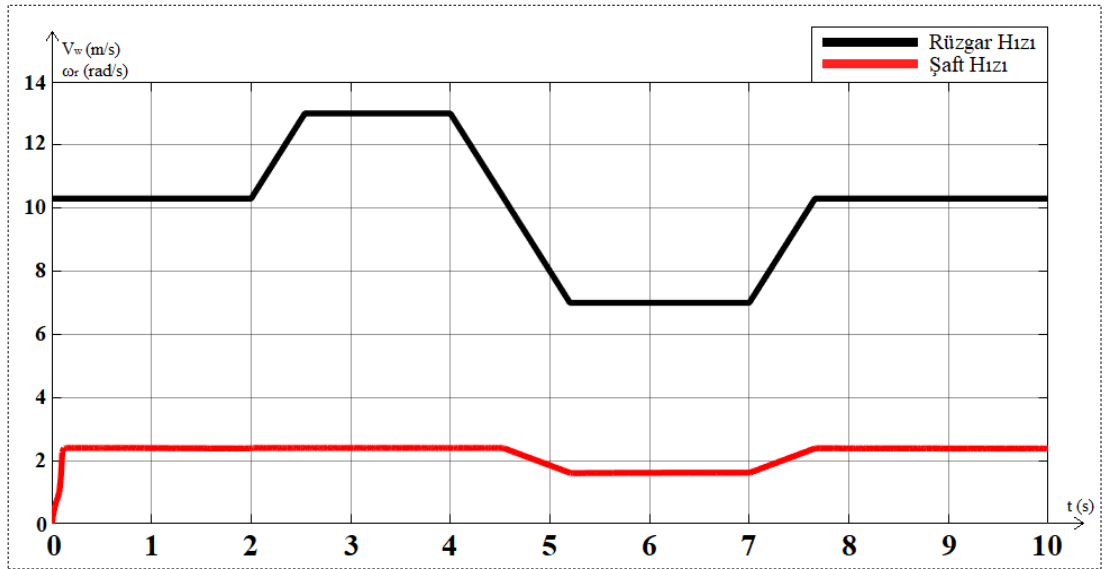
Tablo 5.6. Şebeke ve filtre parametreleri

Parametre	Sembol	Birim	Değer
Faz - Faz arası gerilim	$V_{\text{şebeke}}$	V	690
Frekans	f	Hz	50
Şebeke Direnci	$R_{\text{şebeke}}$	Ω	0,0662
Şebeke Endüktansı	$L_{\text{şebeke}}$	mH	0,3466
Filtre Endüktansı	L_{filtre}	mH	1,1

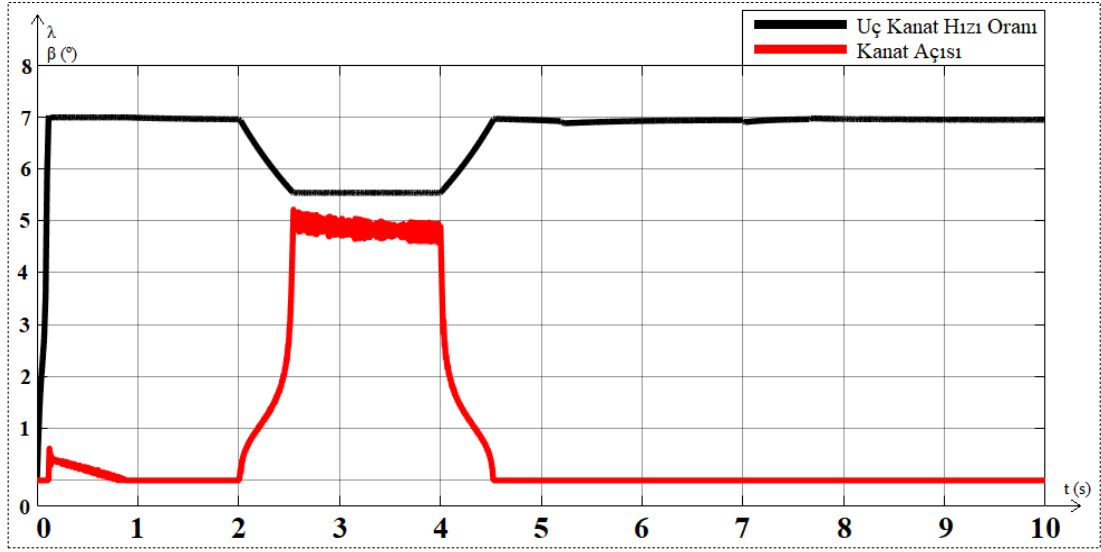
6. BENZETİM ÇALIŞMASI VE SONUÇLARI

Modellemesi yapılan değişken hızlı doğrudan tahrikli mıknatıs uyarmalı senkron generatörlü 800kW'lık rüzgar türbininin değişken rüzgar hızları için şebekeye enerji aktarımının incelendiği benzetim çalışması yapılmıştır.

Benzetim çalışması, Şekil 6.1'de verildiği gibi anma rüzgar hızı olan 10,3 m/s rüzgar hızı ile türbin rotorunun hızı sıfırken başlatılmıştır. Burada şaft hızı düzgün bir ivme ile anma değeri olan 2,38 rad/s hızına kısa bir sürede ulaşmıştır. İkinci saniyenin sonunda rüzgar hızı rampa halinde 13 m/s'ye çıkartılmıştır. Şaft hızında herhangi bir değişim görülmemiştir. Dördüncü saniyenin sonunda rampa halinde rüzgar hızı 7 m/s'ye indirilmiştir. Burada rüzgar hızı anma değeri olan 10,3 m/s'den aşağı düştüğü anda şaftın hızı azalmıştır. Yedinci saniyenin sonunda ise yine rampa halinde tekrar anma rüzgar hızı olan 10,3 m/s hızına çıkartılmıştır. Türbin şaftı rüzgar hızıyla doğru orantılı olarak artmaya başlamış ve tekrar anma değerine ulaşmıştır.

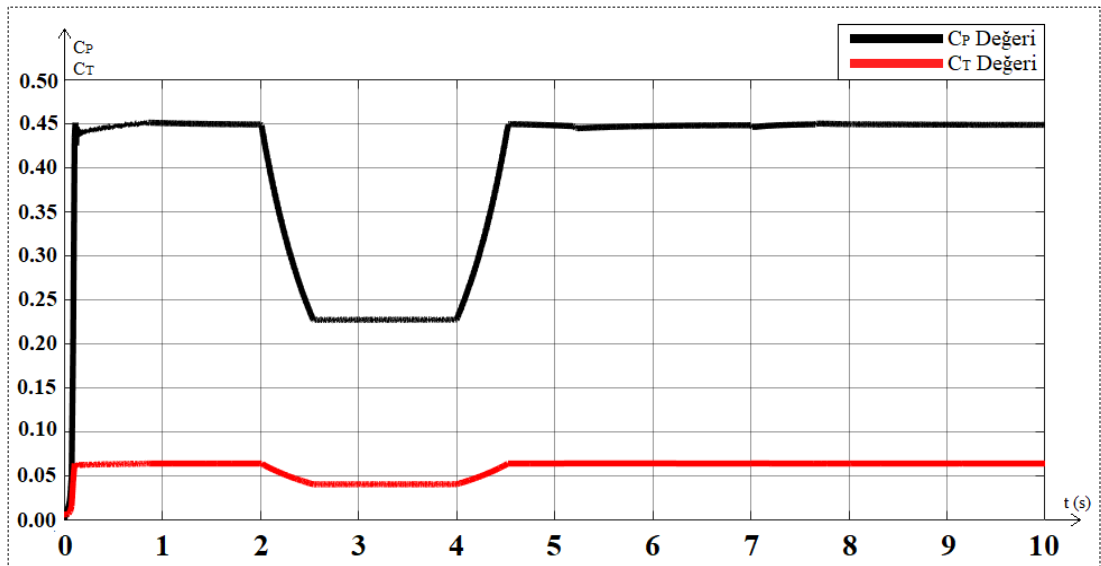


Şekil 6.1. Rüzgar hızı ve şaft hızının zamana bağlı değişimi



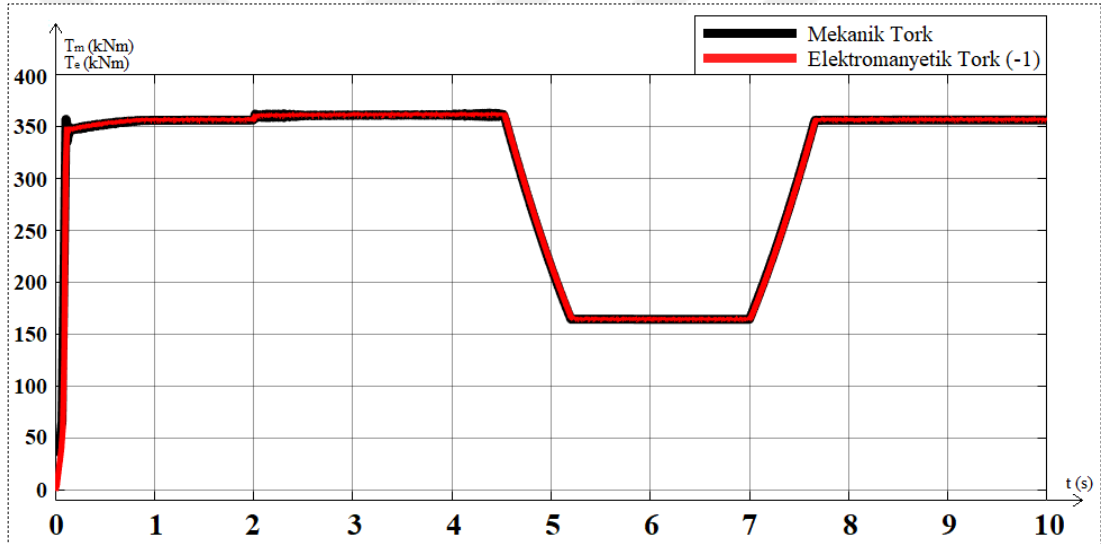
Şekil 6.2. Uç kanat hızı oranı ve kanat açısının zamana bağlı değişimi

Şekil 6.2'de uç kanat hızının rüzgar hızına oranı olan uç kanat hızı oranı grafiği verilmiştir. Bu oran optimum değeri olan 7 değerine çok kısa bir sürede ulaşmış, ikinci saniyenin sonunda artan rüzgar hızında değeri azalmıştır. Yine ikinci saniyenin sonunda rüzgar hızının artmasıyla türbin kanat açısı kontrolü yaparak daha önce Şekil 6.1'de de verildiği gibi shaftın hızı kontrol altında tutulmuştur. Dördüncü saniyenin sonunda rüzgar hızı anma değerinin altına düşmesiyle birlikte uç kanat hızı oranı tekrar artmış ve kanat açısı tekrar 0 değerine ulaşmıştır.



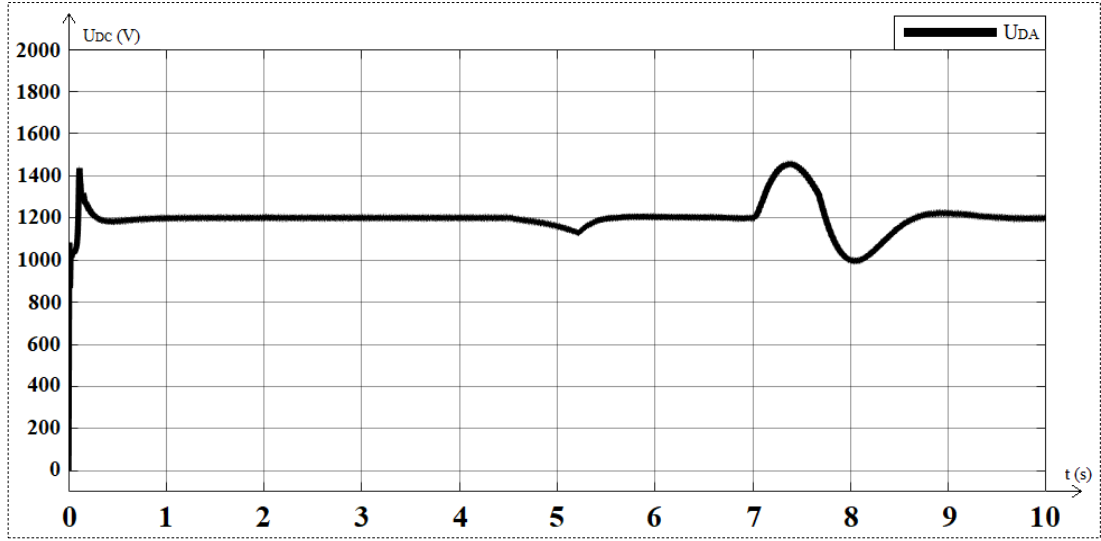
Şekil 6.3. Güç katsayısı ve tork katsayısının zamana bağlı değişimi

Şekil 6.3'te uç kanat hızı oranı ve kanat açısının bir fonksiyonu olan güç katsayısı (C_p), 0,45 değerine çok kısa bir sürede ulaşmıştır. Rüzgar hızının arttığı ikinci saniyenin sonunda uç kanat hızının optimum değerinden uzaklaşmasına ve türbinin kanat açısını arttırmasına bağlı olarak güç katsayısının 0,23'lere kadar düştüğü ve rüzgar hızının anma rüzgar hızı olan 10,3 m/s rüzgar hızından düşük hızlara geldiği anda tekrar maksimum değeri olan 0,45 seviyelerine ulaştığı görülmüştür. Anma rüzgar hızından düşük hızlarda güç katsayısının maksimum ve uç kanat hızı oranının optimum değerinde olmasıyla birlikte türbinin ürettiği gücün sadece mevcut rüzgar hızına bağlı olması sağlanmıştır. Tork katsayısı (C_T) değeri güç katsayısına benzer şekilde rüzgar hızının arttığı ikinci saniyenin sonunda azalmış, anma rüzgar hızı ve altındaki hızlarda tekrar maksimum değerine ulaşmıştır.



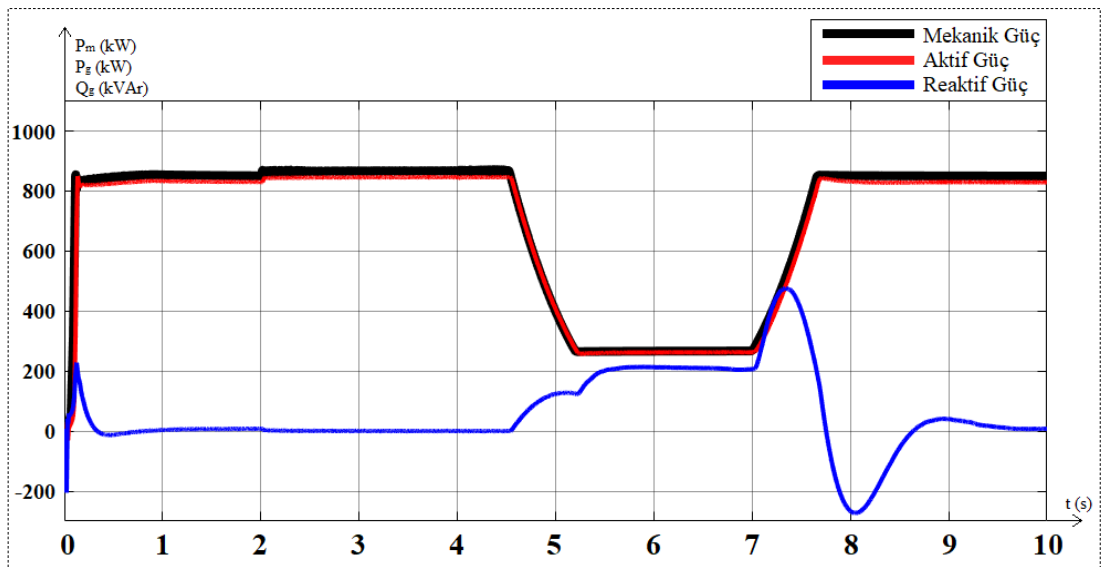
Şekil 6.4. Mekanik tork ve elektromanyetik torkun zamana bağlı değişimi

Şekil 6.4'te generatörde oluşan elektromanyetik torkun değeri, sonucu daha iyi göstermek amacıyla toplama işlemine göre tersi alınmış olup bu sonuca göre türbinin ürettiği mekanik tork ile generatörde oluşan elektromanyetik tork, yaklaşık olarak birbirini eşit olarak takip etmektedir.



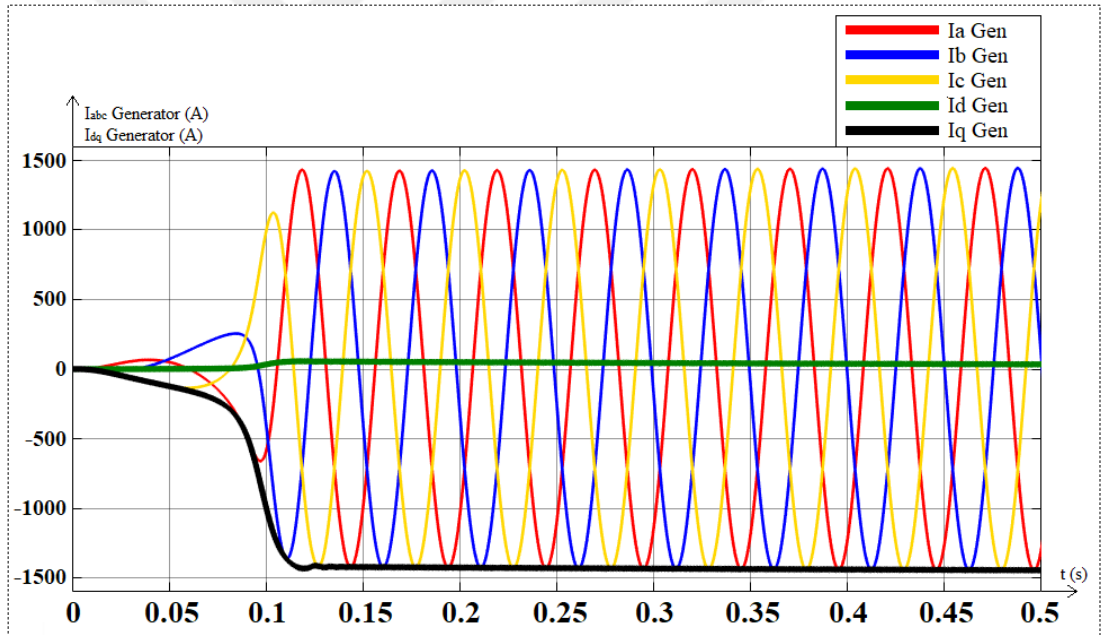
Şekil 6.5. DA barası geriliminin zamana bağlı değişimi

Şekil 6.5'te DA bara geriliminin değişimi görülmektedir. Bara gerilimi sıfırdan başlayarak artmış, bara kondansatörünün şarj olmasıyla 1400V seviyelerine çıkmış daha sonra 1200V seviyelerine inmiştir. Şebeke tarafındaki eviricinin denetiminde hedeflenen bara kondansatör geriliminin sabit tutulması bu şekilde sağlanmıştır. Dördüncü ve beşinci saniyelerin ortasında rüzgar hızının azalmasına dolayısıyla üretilen aktif gücün de azalmasına bağlı olarak, bir miktar azalma göstermiş ve tekrar 1200V seviyelerine çıkmıştır. Yedinci saniyenin sonunda, reaktif güç değişimine bağlı değişen kondansatörün şarj – deşarj durumuna göre gerilim seviyesi bir miktar artış veya azalış göstermiş ve tekrar referans gerilim değerine oturmuştur.



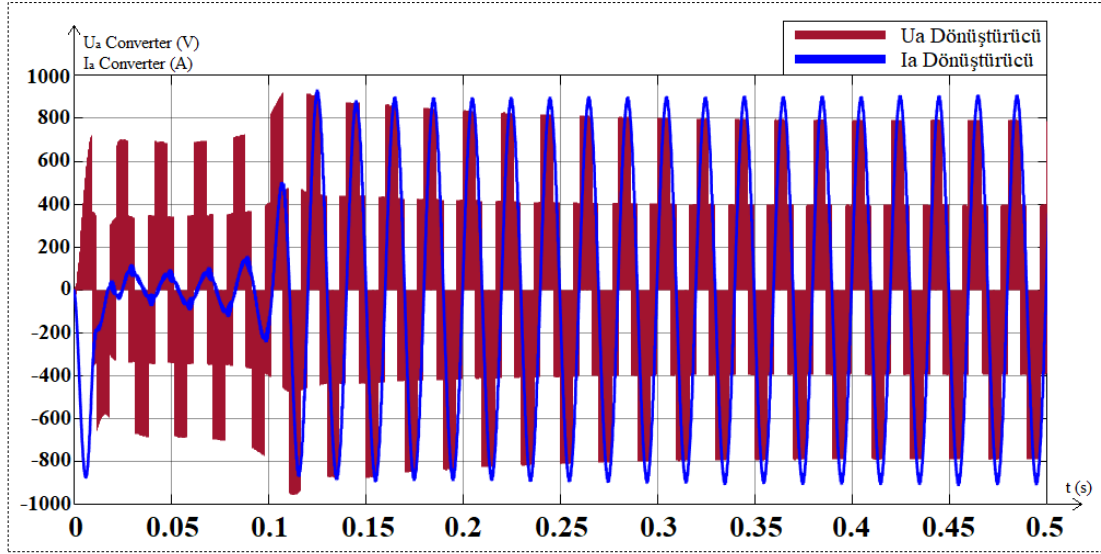
Şekil 6.6. Mekanik güç, şebeke aktif ve reaktif güçlerinin zamana bağlı değişimleri

Şekil 6.6’da generatörde üretilen aktif güç ve türbinin ürettiği mekanik güç eğrileri verilmiştir. Bölüm 5’te 28,15 metre olarak hesaplanan kanat uzunluğunun 30 metre olarak alınmasına bağlı olarak üretilen mekanik gücün ve dolayısıyla aktif gücün anma güç değeri olan 800kW’ın biraz üstünde kaldığı görülmektedir. Gücü 800kW’ta sınırlandırmak için kanat açısı kontrolü yapılabilir. Günümüzde ticari olarak üretilen rüzgar türbinlerinde anma rüzgar hızından daha düşük rüzgar hızlarında, daha fazla güç elde edebilmek için kanatlar daha uzun olarak tasarlanabilmektedir. Ayrıca üretilen bu mekanik güç ve aktif güç değerleri arasında generatörün kayıpları kadar bir fark bulunmaktadır. Bu fark dışında değişimler birbirine yakındır. Ek olarak, sistemin başlangıç bara gerilimi şebeke geriliminden düşük olduğu anlarda şebekeden bir reaktif güç çekmiş, daha sonra reaktif güç değeri sıfır değerine oturmuştur.



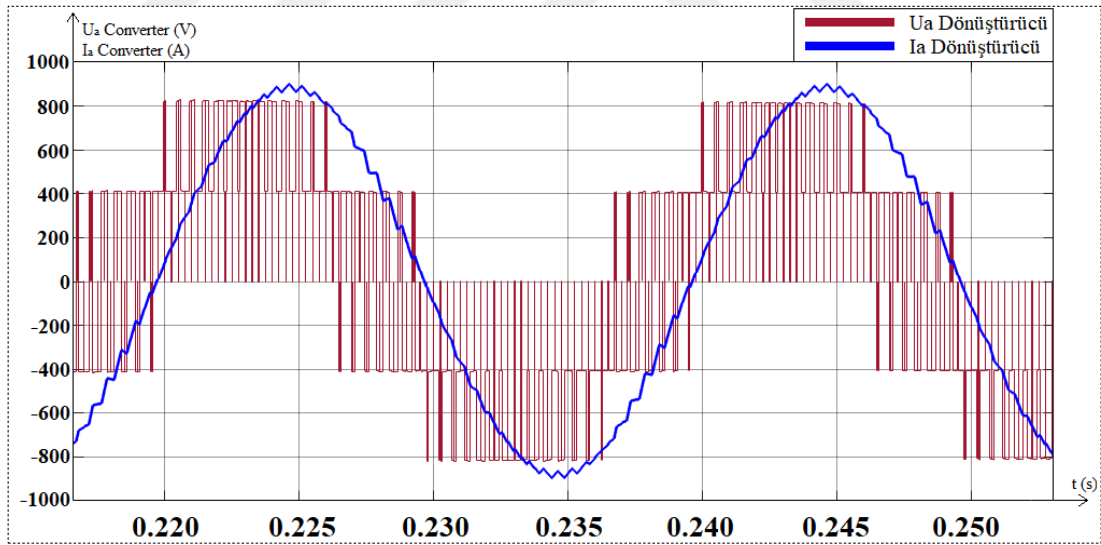
Şekil 6.7. Generatör çıkış akımlarının zamana bağlı değişimi

Şekil 6.7’de ilk 0,5 saniyelik bölüm için generatörün üç faz çıkış akımı ve dq eksenli akımları verilmiştir. Generatörde oluşan akımın frekansı yaklaşık 19,8 Hz olarak ölçülmüştür. Bir faza ait akımın tepe değeri yaklaşık 1433A, etkin değeri ise yaklaşık 1013A olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.8. Dönüştürücü çıkış akım ve geriliminin zamana bağlı değişimi

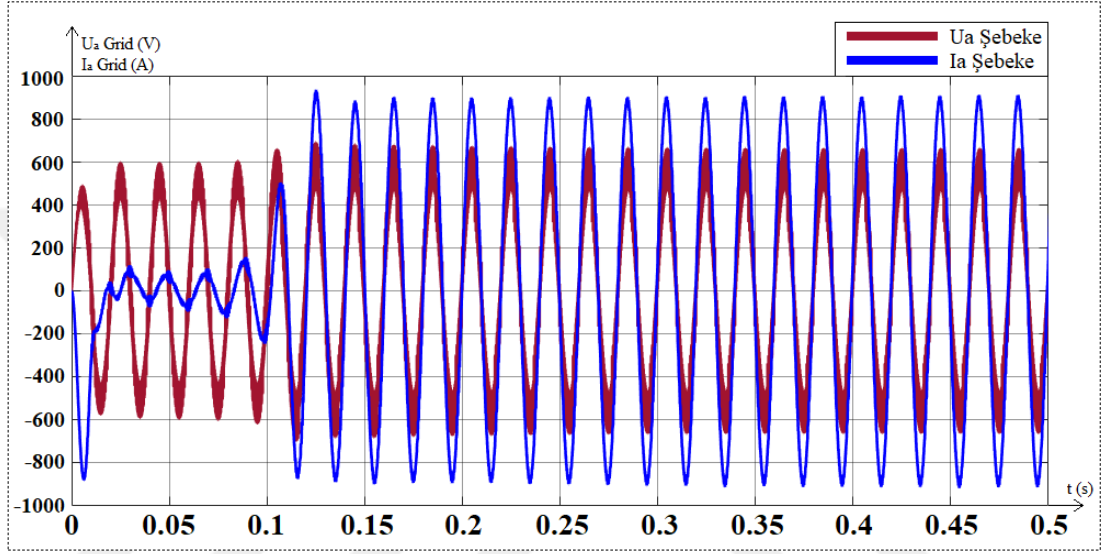
Şekil 6.8’de ilk 0,5 saniyelik zaman için bir faza ait dönüştürücü çıkış gerilimi ve akımı verilmiştir. Ayrıca verilen bu gerilim ve akımın 0,225 ve 0,250 saniyeler arasındaki bir periyodunu içeren zamana bağlı değişimi Şekil 6.9’da verilmiştir.



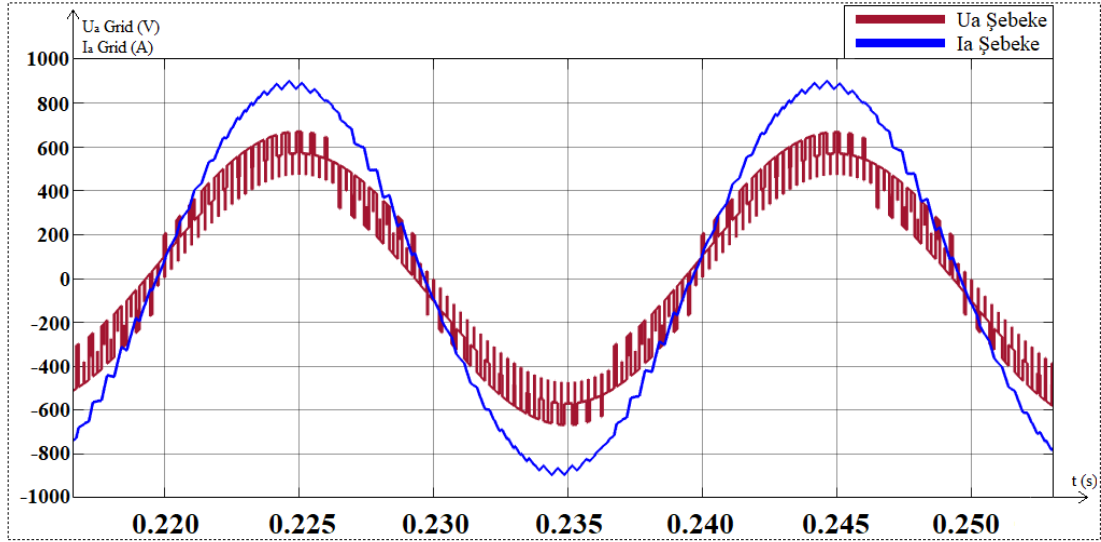
Şekil 6.9. Dönüştürücü çıkış akım ve geriliminin bir periyoduna ait zamana bağlı değişimi

Şekil 6.10’da ilk 0,5 saniyelik zaman için bir faza ait şebeke akım ve gerilimi verilmiştir. Ayrıca verilen bu gerilim ve akımın 0,225 ve 0,250 saniyeler arasındaki bir periyodunu içeren zamana bağlı değişimi Şekil 6.11’de verilmiştir. Şebekeye verilen akımın harmonik değeri THD %1,75 olarak hesaplanmıştır. Esas olarak THD, şebeke tarafı dönüştürücünün anahtarlama frekansı ve filtre reaktanslarına bağlı

olarak değişebilen bir büyüklüktür. Burada standartların öngördüğü limit değerlerinin aşılmaması gerekir. Aksi takdirde Şebeke ile paralel çalışmada sakıncalı bir durum olacaktır. Verilen Şekilde gerilimin saf sinüs dalgası olmamasının nedeni ise modellemede sonsuz Şebekenin elde edilememesidir. Şebeke parametreleri sonsuz Şebeke durumuna yaklaşıkça elde edilecek gerilim, sinüs dalga biçimine daha da yaklaşacaktır.



Şekil 6.10. Şebeke akım ve geriliminin zamana bağlı değişimi



Şekil 6.11. Şebeke akım ve geriliminin bir periyoduna ait zamana bağlı değişimi

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında rüzgar elektrik enerjisi dönüşüm teknolojileri genel olarak incelenmiş, giderek yaygın kullanım alanı bulan doğrudan tahrikli mıknatıs uyarmalı senkron generatör sistemlerinin modellenmesi ve benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 800kW anma gücünde, kanat açısı ayarlanabilen bir rüzgar türbini modellenmiş ve kontrol edilmiştir. Bu işlem, literatürden ve üreticilerden sağlanan veriler yardımıyla MATLAB/Simulink ortamında yapılmıştır.

Sistemin diğer bileşeni olan mıknatıs uyarmalı senkron generatör dq referans düzleminde modellenerek ardışık dönüştürücü köprüleri IGBT anahtarlar ile modellenmiştir. Dönüştürücünün kontrolü literatürden alınan maksimum güç – sabit bara gerilimi mantığı ile yapılmıştır.

Bu şekilde modellenen sistemin rüzgar hızı ve kanat açısı giriş değerlerinde, gerçekçi bir tork değeri oluşturulması sağlanarak anma rüzgar hızında, anma rüzgar hızından düşük ve anma rüzgar hızından büyük rüzgar hızlarında belirli bir süre için yapılmıştır ve verilen tepkilerin çok hızlı gerçekleştiği görülmüştür. Anma rüzgar hızından büyük rüzgar hızında türbin kanat açısı yaparak türbinin uç kanat hızı oranı ve dolayısıyla güç katsayısının azaldığı görülmüştür. Buna karşın güç eşitliğinin, rüzgar hızının küpüyle doğru orantılı olmasından dolayı shaft hızı kontrol altında tutularak maksimum güç elde edilmiştir. Anma rüzgar hızından düşük rüzgar hızında ise dönüştürücünün generatör tarafında alan yönlendirmeli vektör kontrolü stratejisiyle gerçekleştirilen optimum tork kontrolü uygulanmıştır ve generatörün q eksenini akımıyla generatörün rotor hızı kontrol edilmiştir. Bu sayede uç kanat hızı oranının optimum değerinde sabit durduğu ve dolayısıyla maksimum güç katsayısını verdiği gözlemlenmiştir. Dönüştürücünün şebeke tarafı kontrolünde ise gerilim yönlendirmeli vektör kontrolü stratejisi uygulanmıştır ve şebekenin açı, frekans ve hız değerleri faz kilitleme döngüsü bloğuyla elde edilmiştir. Gerilim yönlendirmeli vektör kontrolünde dönüştürücüde bulunan DA bara gerilimi, d eksenini akımı kontrol edilerek sürekli durumda sabit tutulmuştur ve şebekeye verilen aktif gücün kararlılığı yüksek bir dinamikte sağlanmıştır. Şebekeye aktarılan reaktif gücün ise

anma hızının üzerindeki hızlar için istenildiği gibi sıfır değerinde tutulduğu gözlemlenmiştir.

Generatör tarafı ve şebeke tarafı olarak her iki kontrol stratejisinde modülasyon tekniği olarak uzay vektörü darbe genişlik modülasyonu uygulanmıştır ve bu tekniğinin ideal bir seçim olduğu ve kontrol edilebilme kabiliyetinin kolayca uygulanabilir olduğu görülmüştür. Kontrol yapısında kullanılan PI denetleyicilerin parametre kazançları ayarlama metoduyla belirlenmiştir. Altıncı bölümde verilen benzetim çalışması sonuçlarına göre model ve tasarlanan kontrolcünün başarılı olduğu, buna bağlı olarak şebekeye kararlı bir şekilde aktif güç verildiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada sadece değişken rüzgar hızı koşulları altında tek başına çalışan bir miknatis uyarmalı senkron generatör sisteminin şebekeye güç aktarımı modellemesi gerçekleştirilmiştir. Birden çok sistemin etkileşimi, kısa devre, motor devreye alma gibi durumlardaki analiz, kararlılık, güç akışı gibi çalışmalar bu model kullanılarak yapılabilir. Ayrıca modelin doğruluğu ve performansı deneysel olarak doğrulanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Öztürk S., Saygın S., 1973 Petrol Krizinin Ekonomiyle Etkileri ve Stagflasyon Olgusu, *Balkan Sosyal Bilimler Dergisi*, 2017, **6**(12), 1-12.
- [2] http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/ruzgar-ruzgar_enerjisi.aspx (Ziyaret tarihi: 8 Mayıs 2019).
- [3] Li H., Chen Z., Optimal Direct-Drive Permanent Magnet Wind Generator Systems for Different Rated Wind Speeds, *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, 2-5 September 2007.
- [4] Çetin N. S., Yurdusev M. A., Ata R., Özdamar A., Assessment of Optimum Tip Speed Ratio of Wind Turbines, *Mathematical and Computational Applications*, 2005, **10**(1), 147-154.
- [5] Ulu C., Kömürgöz G., Rüzgar Türbini Uygulamaları için 500 kW Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tasarımı, *ELECO '2012 Elektrik – Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 29 Kasım – 01 Aralık 2012.
- [6] Gürkaynak Y., Modeling and Control of Variable-Speed Direct-Drive Wind Power Plant, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 223864.
- [7] Gökalan R., Rüzgar Türbin Uygulamasında Sürekli Mıknatıslı Senkron Jeneratörün Hız Sensörsüz Alan Yönlendirme Kontrolü ve Şebeke Bağlantısı, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2011, 285159.
- [8] Akdoğan Ş., Değişken Hızlı Değişken Kanat Açılı Bir Rüzgar Türbininin Modellenmesi, Simülasyonu ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 290130.
- [9] İnal T. T., Üç Faz IGBT Köprü Doğrultucunun Tasarımı ve Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tabanlı Rüzgar Türbin Sistemlerindeki Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012, 323837.
- [10] Nak H., Değişken Hızlı Değişken Açılı Rüzgar Türbinlerinin Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013, 332966.

- [11] Aydemir M., Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan DA/AA Evirici Modellemesi ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2014, 354589.
- [12] Özsoy E. E., Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinde Kullanıma Yönelik Dayanıklı Çift Beslemeli Asenkron Generatör Kontrol Yöntemi Tasarımı ve Uygulaması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014, 363885.
- [13] Al-Toma A. S. H., Hybrid Control Schemes for Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbines, Doctor of Philosophy Thesis, Brunel University, College of Engineering, London, UK, 2017.
- [14] Huang N., Simulation of Power Control of a Wind Turbine Permanent Magnet Synchronous Generator System, Master of Science Thesis, Marquette University, Faculty of Graduate School, Wisconsin, USA, 2013.
- [15] Hemami A., *Wind Turbine Technology*, 1st ed., Cengage Learning, New York, 2012.
- [16] Schubel P. J., Crossley R. J., Wind Turbine Blade Design, *MDPI Energies*, 2012, 5(9), 3425-3449.
- [17] Aktepe İ., Rüzgar Türbini Kanadının Optimal Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013, 332820.
- [18] Martinez J., Modelling and Control of Wind Turbines, Master of Science Thesis, Imperial College London, Department of Chemical Engineering and Chemical Technology, London, UK, 2007.
- [19] Letcher T. M., *Wind Energy Engineering*, 1st ed., Academic Press, Chennai, 2016.
- [20] Altuğ A. H., Dynamic Modelling and Simulation of a Wind Turbine, Master of Science Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Science, Ankara, 2015, 416714.
- [21] Ackermann T., *Wind Power in Power Systems*, 1st ed., John Wiley & Sons, Ltd, Stockholm, 2005.
- [22] Eriksson S., Direct Driven Generators for Vertical Axis Wind Turbines, Doctor of Philosophy Thesis, Uppsala University, Faculty of Science and Technology, Uppsala, Sweden, 2008.
- [23] Madani N., Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Vertical Axis Wind Turbine, Master of Science Thesis, Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden, 2011.
- [24] Engin Ş. N., Tübitak Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü Rüzgar Enerjisi Çalışma Alanları ve Milres Projesi, *İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi*, İzmir, Türkiye, 23-24 Aralık 2011.

- [25] Sandhya T., Chandan K. S., Control and Operation of Opti-Slip Induction Generator in Wind Farms, *International Conference on Computer, Communication and Electrical Technology (ICCCET)*, Tamilnadu, India, 18-19 March 2011.
- [26] Elibüyük U., Üçgül İ., Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri, *YEKARUM e-Dergi*, 2014, **2**(3), 1-14.
- [27] Chowdhury M. M., Modelling and Control of Direct Drive Variable Speed Wind Turbine with Interior Permanent Magnet Synchronous Generator, Doctor of Philosophy Thesis, University of Tasmania, Tasmania, Australia, 2014.
- [28] Bang D., Polinder H., Shrestha G., Ferreira J. A., Review of Generator Systems for Direct-Drive Wind Turbines, *European Wind Energy Conference and Exhibition (EWEC)*, Brussels, Belgium, 31 March – 3 April 2008.
- [29] Kashyap A. R., Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Generator Design for Hydrokinetic Energy Extraction, Master of Science Thesis, Missouri University of Science and Technology, Faculty of the Graduate School, Missouri, USA, 2013.
- [30] Polinder H., van der Pijl F. A., de Vilder G. J., Tavner P. J., Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for Wind Turbines, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, **21**(3), 725-733.
- [31] Stiebler M., *Wind Energy Systems for Electric Power Generation*, 1st ed., Springer, Berlin, 2008.
- [32] Dursun E., Binark A. K., Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler, *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008*, İstanbul, Türkiye, 17-19 Aralık 2008.
- [33] Domingues J. L. G., Modeling and Control of Squirrel Cage Induction Generator with Full Power Converter Applied to Windmills, Master of Science Thesis, University of Oulu, Oulu, Finland, 2009.
- [34] Tekin K., Rüzgar Santrali İçeren Elektrik Sistemlerinde Etkilenmeler ve Kısa-Devre İncelemesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 223159.
- [35] Marques J., Pinheiro H., Gründling H. A., Pinheiro J. R., Hey H. L., A Survey on Variable-Speed Wind Turbine System, *Group of Power Electronics and Control - GEPOC*, 2003, 732-738.
- [36] Tiwari A. R., Shewale A. J., Gagangras A. R., Lokhande N. M., Comparison of Various Wind Turbine Generators, *Multidisciplinary Journal of Research in Engineering and Technology*, 2014, **1**(2), 129-135.

- [37] Apaydın M., Üstün A. K., Kurban M., Filik Ü. B., Rüzgar Enerjisinde Kullanılan Asenkron Jeneratörler, *5. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Diyarbakır, Türkiye, 19-21 Haziran 2009.
- [38] Thongam J. S., Ouhrouche M., MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems, Editors: Carriveau R., *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, DOI: 10.5772/21657.
- [39] Verma N., Pachori A., Theoretical Approach for Comparison of Various Types of Wind Generator Systems, *International Journal of Recent Research in Electrical and Electronics Engineering (IJRREEE)*, 2015, **2**(2), 29-35.
- [40] Hansen L. H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H. W., Sørensen P. E., Bak-Jensen B., Conceptual Survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines, *Risø National Laboratory*, 2001.
- [41] Leban K. M., Design Tool for Direct-Drive Wind Turbine Generators, Doctor of Philosophy Thesis, Aalborg University, Department of Energy Technology, Aalborg, Denmark, 2014.
- [42] Islam M. R., Guo Y., Zhu J., Power Converters for Wind Turbines: Current and Future Development, Editors: Mendez-Villas A., *Materials and Processes for Energy: Communicating Current Research and Technological Developments*, Energy Book Series-2013, Formatex Research Centre, Spain, 559-571, 2013.
- [43] Coşkun İ., Saygın A., Dursun M., Matris Konverter Uygulaması, *Politeknik Dergisi*, 2008, **11**(3), 193-198.
- [44] Garces A., Molinas M., Comparative Investigation of Losses in a Reduced Matrix Converter for Off-Shore Wind Turbines, *5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, Brighton, UK, 19-21 April 2010.
- [45] Melicio R., Mendes V. M. F., Catalao J. P. S., Power Converter Topologies for Wind Energy Conversion Systems: Integrated Modeling, Control Strategy and Performance Simulation, *Renewable Energy*, 2010, **35**(10), 2165-2174.
- [46] Barakati, S. M., Kazerani M., Aplevich J. D., Maximum Power Tracking Control for a Wind Turbine System Including a Matrix Converter, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, **24**(3), 705-713.
- [47] Inomata K., Hara H., Morimoto S., Fujiii J., Takeda K., Yamamoto E., Application of Modular Matrix Converter to Wind Turbine Generator, *The 2014 International Power Electronics Conference*, Hiroshima, Japan, 18-21 May 2014.
- [48] Ragheb M., Ragheb A. M., Wind Turbines Theory – The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio, Editors: Carriveau R., *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, DOI: 10.5772/21398.

- [49] Manyonge A. W., Ochieng R. M., Onyango F. N., Shichikha J. M., Mathematical Modelling of Wind Turbine in a Wind Energy Conversion System: Power Coefficient Analysis, *Applied Mathematical Sciences*, 2012, **6**(91), 4527-4536.
- [50] Rudion K., Orths A., Styczynski Z., Modelling of Variable Speed Wind Turbines with Pitch Control, *2th International Conference on Critical Infrastructures*, Grenoble, France, 25-27 October 2004.
- [51] Botha C. D., Variable Speed and Torque Control of a Wind Turbine System with Assisted Reluctance Synchronous Generator Technology, Master of Science Thesis, Stellenbosch University, Faculty of Engineering, Matieland, South Africa, 2018.
- [52] Grillo S., Marinelli M., Silvestro F., Wind Turbines Integration with Storage Devices: Modeling and Control Strategies, Editors: Al-Bahadly I. H., *Wind Turbines*, DOI: 10.5772/15101.
- [53] IEC 61400-12, Wind Turbine Generator Systems – Part 12: Wind Turbine Power Performance Testing, *International Electrotechnical Commission*, Geneva, Switzerland, 1998.
- [54] Bhargava V., Krushna B., Sairam K., 2.1 MW Wind Turbine Performance and Dynamic Analysis using Power Curve, *International Journal of Engineering Research*, 2016, **5**(8), 717-720.
- [55] Jansuya P., Kumsuwan Y., Design of MATLAB/Simulink Modeling of Fixed-Pitch Angle Wind Turbine Simulator, *Energy Procedia*, 2013, **34**(2013), 362-370.
- [56] https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/132799-park-inverse-park-and-clarke-inverse-clarke-transformations-mss-software-implementation-user-guide (Ziyaret tarihi: 8 Mayıs 2019).
- [57] <http://www.ti.com/lit/an/bpra048/bpra048.pdf> (Ziyaret tarihi: 8 Mayıs 2019).
- [58] Chowdhury, M. M., Haque M. E., Das D., Gargoom A., Negnevitsky M., Modeling Parameter Measurement and Sensorless Speed Estimation of IPM Synchronous Generator for Direct Drive Variable Speed Wind Turbine Application, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2014, **25**(2015), 1814-1830.
- [59] Ochs D. S., Design of Detailed Models for Use in FAST Aeroelastic Simulations of Permanent-Magnet Direct-Drive Wind Turbines, Master of Science Thesis, Kansas State University, College of Engineering, Kansas, USA, 2012.

- [60] Yassin H. M., Hanafy H. H., Hallouda M. M., Design and Implementation of PI Controllers of Direct Drive PMSG Wind Turbine System Tuned by Linearized Biogeography-Based Optimization Technique, *42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 23-26 October 2016.
- [61] Yang S., Zhang L., Modeling and Control of the PMSG Wind Generation System with a Novel Controller, *2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications*, Hong Kong, China, 16-18 January 2013.
- [62] Errami Y., Ouassaid M., Maaroufi M., Modeling and Optimal Power Control for Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine System Connected to Utility Grid with Fault Conditions, *World Journal of Modelling and Simulation*, 2015, **11**(2), 123-135.
- [63] Wang C. N., Lin W. C., Le X. K., Modelling of a PMSG Wind Turbine with Autonomous Control, *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, **2014**, 1-9.
- [64] Tripathi S. M., Tiwari A. N., Singh D., Optimum Design of Proportional-Integral Controllers in Grid-Integrated PMSG-Based Wind Energy Conversion System, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2015, **26**(5), 1006-1031.
- [65] Belloni F., Chiumeo R., Gandolfi C., Villa A., Simulation Model of a Permanent Magnet Synchronous Generator for Grid Studies, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Cordoba, Spain, 8-10 April 2014.
- [66] Mansour M., Mansouri M. N., Mmimouni M. F., Study and Control of a Variable-Speed Wind-Energy System Connected to the Grid, *International Journal of Renewable Energy Research*, 2011, **1**(2), 96-104.
- [67] Kim Y. S., Chung I. Y., Moon S. I., Tuning of the PI Controller Parameters of a PMSG Wind Turbine to Improve Control Performance under Various Wind Speeds, *MDPI Energies*, 2015, **8**(2), 1406-1425.
- [68] Çiftçi A., Dursun M., Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Sabit Miknatıslı Senkron Generatör ile Maksimum Güç Noktası İzleme Algoritması, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2017, **5**(2), 356-369.
- [69] Hao H., Bo G., Yan R., Hui H., Simulation and Analysis of Direct-Driven Wind Turbine, *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, 2015, **11**(5), 17-23.

- [70] Minh H. Q., Frederic N., Najib E., Abdelaziz H., Control of Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine for Stand-Alone System Using Fuzzy Logic, *Proceedings of the 7th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT-LFA 2011)*, Aix-Les-Bains, France, 18-22 July 2011.
- [71] Mollick S., Design and Implementation of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy Conversion Systems, Master of Science Thesis, Tampere University of Technology, Department of Electrical Engineering, Tampere, Finland, 2018.
- [72] Kılıçaslan M. F., Rüzgar Türbinlerinde Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 2015, 418461.
- [73] Boylu M., Asenkron Motorun Hız Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 384857.
- [74] Petersson A., Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines, Doctor of Philosophy Thesis, Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment, Göteborg, Sweden, 2005.
- [75] Abdelrahem M., Hackl C., Kennel R., Sensorless Control of Doubly-Fed Induction Generators in Variable-Speed Wind Turbine Systems, 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Taormina, Italy, 16-18 June 2015.
- [76] Bin Q., Xuexiang J., Yulin Z., Qing T., The Maximum Power Control of Direct-Drive Wind Turbine, *2014 26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Changsha, China, 31 May-2 June 2014.
- [77] Pidiiti T., Das G. T. R., Power Maximization and Control of PMSG Wind Energy System without Wind Speed Sensors, *International Journal of Control Theory and Applications*, 2017, **10**(25), 253-260.
- [78] Ting N. S., Sahin Y., Effects to System Performance of Different PWM Techniques in Field Oriented Speed Control with Back-to-Back Converter of PMSG, *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 2018, **6**(2), 34-44.
- [79] Tran P. H., MATLAB/Simulink Implementation and Analysis of Three Pulse-Width-Modulation (PWM) Techniques, Master of Science Thesis, Boise State University, College of Graduate, Boise, USA, 2012.

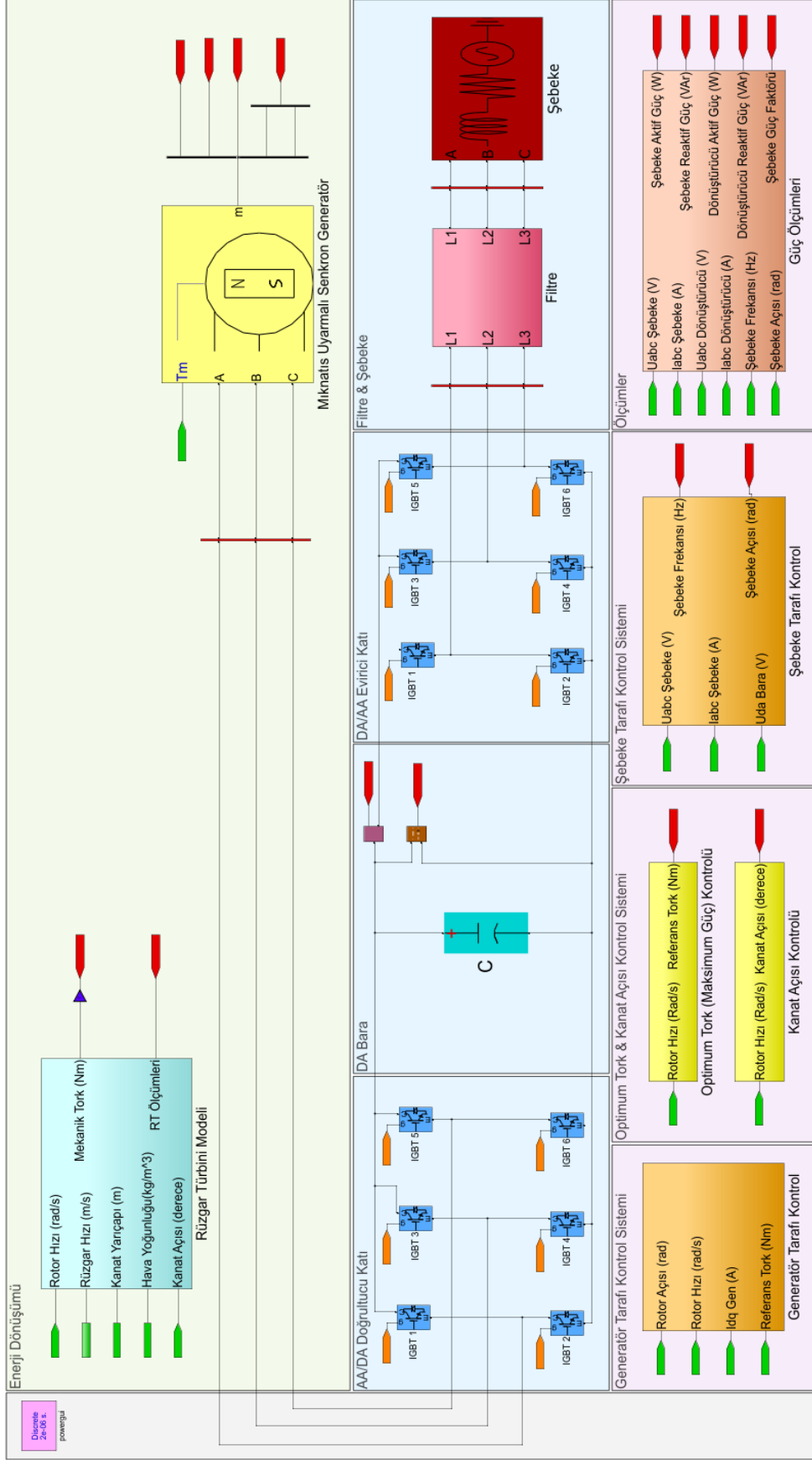


EKLER

800 kW Değişken Hızlı Doğrudan Tahrikli Mıknatıs Uyarmalı Senkron Generatörlü Rüzgar Türbini Modeli

Alper ULUTAŞ
Kocaeli Üniversitesi

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Ulutas A.**, Duru H. T., Variable-Speed Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine Modeling and Simulation, *Kocaeli Journal of Science and Engineering*, 2019, **2**(1), 21-27.



ÖZGEÇMİŞ

Alper Ulutaş 1992 yılında Antalya'nın Serik ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Serik'te tamamladı. 2011 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2013 yılında Prof.Dr. Baki Komsuoğlu Kültür ve Kongre Merkezi'nde düzenlenen Kocaeli Üniversitesi Dans Festivaline katılarak tango gösterisi yaptı. 2014 – 2015 eğitim ve öğretim yılında Elektrik Devreleri Laboratuvarı ve Güç Elektroniği Laboratuvarında asistan öğrenci olarak görev aldı. 2015 yılında Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu ve aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başladı. Yüksek lisans eğitimini sürdürürken çeşitli yabancı firmalarda Saha Mühendisi, Proje Mühendisi ve en son Elektrik Proje Yöneticisi olarak kariyerine devam etti.