

**T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE MAKSİMUM GÜÇ İZLEME  
YÖNTEMLERİ VE MATLAB/SIMULINK UYGULAMASI**

**ÖMER BEKTAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**AĞUSTOS 2019**

**Tezin Başlığı : Rüzgar Türbinlerinde Maksimum Güç İzleme Yöntemleri ve  
Matlab/Simulink Uygulaması**

**Tezi Hazırlayan : Ömer BEKTAŞ**

**Sınav Tarihi : 17.07.2019**

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Sınav Jüri Üyeleri**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ** .....  
İnönü Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Cemal KELEŞ** .....  
İnönü Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi M. İlyas BAYINDIR** .....  
Fırat Üniversitesi

**Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL**

Enstitü Müdürü

## ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Rüzgâr Türbinlerinde Maksimum Güç İzleme Yöntemleri ve Matlab/Simulink Uygulaması” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ömer BEKTAŞ



# ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE MAKSİMUM GÜÇ İZLEME YÖNTEMLERİ VE  
MATLAB/SIMULINK UYGULAMASI

Ömer BEKTAŞ

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

viii + 83 sayfa

2019

Danışman: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

Bu çalışmada rüzgâr türbin sisteminin çalışması incelenmiş ve matematiksel modelleri elde edilmiştir. Enerji dönüşümünü sağlamak için daimî mıknatıslı senkron generatör kullanılmış ve sistemin tüm unsurları Matlab/Simulink ortamında modellenmiştir. Maksimum güç takip yöntemi olarak, sabit kanat ucu hız oranı yöntemi kullanılmıştır. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin benzetimi, maksimum güç takip yöntemi kullanılarak ve kullanılmadan yapılmış sonuçlar kıyaslanmıştır.

Çalışma sonucunda, rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin, sabit kanat ucu hız oranı yöntemiyle maksimum güç noktası takibi yapılarak daha verimli çalıştığı gösterilmiştir. Ayrıca PI ayrık zamanlı hız denetleyicinin oransal ve integral parametreleri değiştirilerek sistemin başarımı üzerine etkileri incelenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Maksimum güç noktası takibi, rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi, daimî mıknatıslı senkron generatör

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **MAXIMUM POWER POINT TRACKING METHODS AND APPLICATION OF MATLAB / SIMULINK IN WIND TURBINES**

Ömer BEKTAŞ

Inonu University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical-Electronics Engineering

viii + 83 Pages

2019

Supervisor: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

In this study, operation of wind turbine system is investigated and mathematical models are obtained. Permanent magnet synchronous generator is used for energy conversion and all elements of the system are modeled in Matlab / Simulink software. For the maximum power point tracking method, fixed tip-speed ratio method is used. The simulation of the wind energy conversion system is made with and without the maximum power point tracking method and the results are compared.

As a result of this study, it has been shown that wind power conversion system works more efficiently by maximum power point tracking by fixed tip-speed ratio method. The proportional and integral parameters of the PI discrete-time speed controller are changed and their effects on the performance of system are investigated.

**KEYWORDS:** Maximum power point tracking, wind energy conversion system, permanent magnet synchronous generator.

## TEŞEKKÜR

Bu alıŐma sırasında bilgisinden ve tecrubesinden yararlandığım tez danışman hocam Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ'a, sevgili aileme, yakın dostum ArŐ. Gör. Abdullah TURAN'a, ve yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi M. İlyas BAYINDIR'a

Teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Yenilenebilir Enerjiye Genel Bakış.....	1
1.2. Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemleri.....	2
1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı.....	9
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	11
3. RÜZGAR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİNİN MODELLENMESİ.....	15
3.1. Rüzgâr Türbininin Modellenmesi.....	15
3.2. Daimî Mıknatıslı Senkron Makine ve Modellenmesi.....	20
3.2.1. Senkron makinelerin yapısı ve çalışması.....	20
3.2.2. Rotoru sargılı senkron generatör (RSSG).....	22
3.2.3. Daimî mıknatıslı senkron generatör (DMSG).....	22
3.2.3.1. DMSG'lerin akı yönüne göre sınıflandırılması.....	23
3.2.3.2. DMSG'lerin rotor ve stator konumlandırmasına göre sınıflandırılması.....	24
3.2.4. Park ve Clark Dönüşümleri.....	28
3.2.5. DMSG'ün matematiksel modeli.....	36
4. DMSG KONTROL YÖNTEMLERİ VE MATEMATİKSEL MODELİ.....	41
4.1. Vektör Kontrolü.....	41
4.2. Gerilim Kaynağı Dönüştürücü (GKD).....	44
4.2.1. Darbe genişlik modülasyonu (DGM).....	44
4.2.2. Uzak vektör darbe genişlik modülasyonu.....	47
4.3. Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK).....	52
4.3.1. Alan Yönlendirmeli Kontrolün temelleri.....	52
4.3.2. Ayrık zaman PI akım denetleyici.....	55
4.3.3. Ayrık zaman PI hız denetleyici.....	58
5. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİ (MGNT).....	61
5.1. Maksimum Güç Noktası Takip Yöntemleri.....	61
5.2. Sabit KHO Kontrolörün Modellenmesi.....	65
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	76
7. KAYNAKLAR.....	78
ÖZGEÇMİŞ.....	83

## SİMGELER VE KISALTMALAR

AA	Alternatif Akım
AYK	Alan Yönlendirmeli Kontrol
DA	Doğru Akım
DMSG	Daimî Mıknatıslı Senkron Generatör
DGM	Darbe Genişlik Modülasyonu
GKD	Gerilim Kaynağı Dönüştürücü
IGBT	Kapıdan Yalıtımlı Bipolar Transistör
KHO	Kanat Ucu Hız Oranı
MG	Maksimum Güç
MGN	Maksimum Güç Noktası
MGNT	Maksimum Güç Noktası Takibi
PI	Oransal İntegral
REDS	Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemi
SDGM	Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyon
SSİ	Sayısal Sinyal İşleme
UVDGM	Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon
ZTA	Zirve Tırmanma Algoritması
A	Rüzgâr türbininde kanatların izdüşüm alanı
C <sub>p</sub>	Güç katsayısı
d	Görev periyodu
B	Sürtünme katsayısı
$i_q, i_d$	q ve d eksen akımları
$J_g, J_t$	generatör ve türbin atalet momenti
$L_q, L_d$	q ve d eksen indüktansları
$L_s$	Stator indüktansı
M	Ortak indüktans
N	mekanik rotor hızı(d/d)
$N_p$	Çift kutup sayısı
P	Güç
r	Türbin kanat uzunluğu
$R_s$	Stator direnci
$T_e$	Elektromekanik moment
$T_g, T_t$	Generatör ve türbin momenti
v	Rüzgar hızı
$\beta$	Kanat açısı
$\theta_e, \theta_m$	Elektriksel ve mekaniksel rotor pozisyon açısı
$\lambda$	Kanat ucu hız oranı
$\rho$	Hava yoğunluğu
$\varphi$	kalıcı mıknatısların oluşturduğu akı
$\omega$	Rotor hızı



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Tarihi bir yel değirmeni.....	3
Şekil 1.2.	Küresel rüzgâr enerjisi kurulu gücü değişimi (2003-2018).....	4
Şekil 1.3.	Ocak 2019’da yayınlanan rapora göre, Türkiye’de kullanılan kaynaklara göre kurulu güç.....	4
Şekil 1.4.	2008-2018 Türkiye’de kurulu rüzgâr gücü değişimi.....	5
Şekil 1.5.	Üç kanatlı rüzgâr türbini.....	6
Şekil 1.6.	Rüzgâr türbini temel bileşenleri.....	7
Şekil 2.1.	Farklı rüzgâr hızlarında, türbin hızı ile türbin gücü değişimi.....	12
Şekil 3.1.	REDS blok şeması.....	15
Şekil 3.2.	$\beta=0$ için $C_p$ ‘nin $\lambda$ değerlerine karşılık değişimi.....	18
Şekil 3.3.	Rüzgâr türbin modeli.....	19
Şekil 3.4.	Senkron generatör çalışma prensibi.....	20
Şekil 3.5.	(a) Radyal akılı makine, (b) Eksenel akılı makine.....	24
Şekil 3.6.	(a) Eksenel akı yolu, (b) Radyal akı yolu.....	24
Şekil 3.7.	(a) Rotoru içeride olan, (b) Dışarıda olan senkron makine.....	25
Şekil 3.8.	Mıknatısları yüzeye monte edilmiş rotor.....	26
Şekil 3.9.	Gömülü mıknatıslı rotor.....	26
Şekil 3.10.	Farklı 6 adet gömülü mıknatıslı rotor.....	28
Şekil 3.11.	(a) Daimî mıknatısları V şeklinde gömülü rotor kesiti, (b) Daimî mıknatısları teğet gömülmüş rotor kesiti.....	28
Şekil 3.12.	abc eksen takımı, durağan $\alpha\beta$ eksen takımı ve senkron hızla dönen dq eksen takımı.....	34
Şekil 3.13.	3-faz referans eksenler.....	35
Şekil 3.14.	Eksen takımları arasında dönüşüm denklemleri.....	36
Şekil 3.15.	DMSG’ün (a) d- eksenini eşdeğer devresi, (b) q- eksenini eşdeğer devresi.....	37
Şekil 3.16.	Rotoru çıkık kutuplu DMSG’de $L_{ab}(\theta)$ değişimi.....	39
Şekil 3.17.	Park ve Clarke dönüşümü blok görünümü.....	39
Şekil 3.18.	$T_e$ , elektromanyetik momentin elde edilmesi.....	40
Şekil 3.19.	Rotor hızı ve rotor açısının elde edilmesi.....	40

Şekil 4.1.	Daimî mıknatısları yüzeye monte rotora sahip DMSG vektör diyagramı, (a) genel vektör diyagramı (b) $I_d=0$ alınarak düzenlenmiş vektör diyagramı.....	43
Şekil 4.2.	Referans ve taşıyıcı sinyallerden tetikleme darbesinin elde edilmesi.....	45
Şekil 4.3	Basit şekliyle simulinkte DGM elde edilmesi.....	46
Şekil 4.4.	3-faz DGM kontrollü doğrultucunun basit temsili.....	47
Şekil 4.5.	Uzay vektör için gerilim faz diyagramı.....	48
Şekil 4.6.	GKD'nün Vao çıkış dalga şekli.....	51
Şekil 4.7.	DMSG'ün normal çalışması ve alan yönlendirmeli kontrol ile çalışması durumlarında ki fazör diyagramı.....	53
Şekil 4.8.	AYK blok şeması.....	54
Şekil 4.9.	q-ekseni akım kontrolü kapalı çevrim blok şeması.....	57
Şekil 4.10.	Hız kontrolörü blok şeması.....	58
Şekil 5.1.	KHO simulink modeli.....	66
Şekil 5.2.	MGNT varken ve yokken REDS'den elde edilen güç.....	68
Şekil 5.3.	MGNT olmadan $v = 12$ km/sa için, zamana göre; rotor hızı ( $\omega_r$ ), KHO ( $\lambda$ ), $C_p$ , $P$ ve türbin momenti ( $T_t$ ) ile generatör momenti ( $T_g$ ) değişimi.....	69
Şekil 5.4.	MGNT uygulanarak $v = 12$ km/sa için, zamana göre; rotor hızı ( $\omega_r$ ), KHO( $\lambda$ ), $C_p$ , $P$ ve türbin momenti( $T_t$ ) ile generatör momenti ( $T_g$ ) değişimi.....	70
Şekil 5.5.	MGNT olmadan değişken rüzgâr hızında zamana göre; rüzgâr hızı ( $v$ ), rotor hızı ( $\omega_r$ ), KHO ( $\lambda$ ), $C_p$ , $P$ ve türbin momenti ( $T_t$ ) ile generatör momenti ( $T_g$ ) değişimi.....	72
Şekil 5.6.	Farklı $PI$ kontrol parametrelerinin sistemden elde edilen güce etkisi.....	74
Şekil 5.7.	$K_p=1$ ve $K_i=5$ parametreleri ile zamana göre; rüzgâr hızı ( $v$ ), rotor hızı ( $\omega_r$ ), KHO ( $\lambda$ ), $C_p$ , $P$ ve türbin momenti ( $T_t$ ) ile generatör momenti ( $T_g$ ) değişimi.....	75

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	Türbin ve generatör parametreleri.....	18
Çizelge 4.1.	UVDGM için her bölgedeki anahtarlama vektörleri ve anahtarlama şeması.....	49
Çizelge 5.1.	Grafikler elde edilirken uygulanan senaryolar.....	67



## 1.GİRİŞ

Bir toplumda ekonomik büyümenin temeli olan endüstriyel faaliyetler elektrik enerjisine dayanır. Dünyada ve ülkemizde nüfus ve endüstriyel gelişmeler arttıkça elektrik enerjisi ihtiyacı da büyük oranda artmaktadır. Bu artış gelişmekte olan ülkelerde çok daha fazladır. Dünyada gittikçe artan elektrik enerjisi talebini karşılamak için yapılan çalışmalar ve yatırımlar arasında en ilgi çekenleri ise yenilenebilir enerji kaynaklarıdır.

### 1.1. Yenilenebilir Enerjiye Genel Bakış

Hâlihazırda dünyanın elektrik enerjisi ihtiyacının çok büyük bir kısmı fosil yakıtlar olarak bilinen kömür, doğalgaz ve petrolün kullanılmasıyla elde edilir. Fosil yakıtlardan elektrik enerjisi üretimi, bu yakıtların yakılmasıyla ortaya çıkan enerjinin bir elektrik generatörünün türbinini çevirmesi mantığına dayanır. Fosil yakıtların yakılmasıyla atmosfere milyarlarca ton karbondioksit salınmaktadır. Aşırı hava kirliliği, dünyanın ortalama sıcaklığının yükselmesi ve buna paralel olarak buzulların erimesi gibi zararlara yol açtığı bilinen sera gazlarından en etkili olanı karbondioksittir. Fosil yakıtların çevresel zararlarının yanı sıra bir diğer dezavantajı ise bu yakıtların tükenmesi ihtimalidir. Fosil yakıtların elektrik enerjisi üretimi haricinde ulaşım araçlarında ve ısınmada kullanılması rezervlerin tükenme hızını arttıran etkenlerdir. Bu yüzyılın ikinci yarısında tükeneceği öngörülen bu yakıtların azalması karşısında enerji ihtiyacındaki yüksek ivmeli artış elektrik enerjisi üretimi için çalışmaları yeni kaynaklara yönlendirmiştir. Bunlar arasında en ilgi çekenleri ise yenilenebilir enerji kaynaklarıdır.

Yenilenebilir enerji; doğada zaten bulunan ve fosil yakıtlar gibi tükenme riski olmayan rüzgâr ve güneş ışığı gibi enerjilerin var olan potansiyellerinin kullanılmasıdır. Bu kaynakların elektrik enerjisi üretiminde kullanılması, bu kaynakları tüketmez ve doğanın işleyişine tesir eden ciddi değişikliklere neden olmaz. Bu kaynakların sürdürülebilir, temiz, çevre dostu ve emniyetli olması yenilenebilir enerjiye ilgiyi ve yatırımları arttırmaktadır. Yakın gelecekte dünyanın enerji ihtiyacının yaklaşık yarısı yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edileceği tahmin edilmektedir [1].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en bilinenleri rüzgâr ve güneştir. Bunların haricinde jeotermal, biokütle, hidrojen enerjisi, okyanus enerjisi, dalga enerjisi, hidroenerji gibi yenilenebilir enerji kaynakları vardır.

Yenilenebilir enerji kaynakları genel olarak temiz olarak bilinir ki bu doğrudur. Fakat az da olsa dezavantajları vardır. Mesela güneş ışığını elektrik enerjisine çeviren panellerin yerleştirilmesi için çok geniş araziler gerektirmesi ve kış aylarında verimin azalması güneş enerjisinin, estetik açıdan görüntüyü bozması ve kuşların göç yollarını bozması sonucu kuş ölümlerine yol açması, bunun yanı sıra haberleşme dalgalarını bozması rüzgar enerjisinin, yerine göre tarımsal alanlarda dahil olmak üzere çok geniş arazileri işgal etmesi, hidroelektriğin, yeryüzüne çıktığı yerde zararlı gazlar salması ve bulunduğu tesisi erken çürütmesi jeotermal enerjinin, ekosistemi bozucu etkisi ve veriminin düşük olması biokütle enerjisinin dezavantajları olarak sayılabilir. Ancak bu sayılan dezavantajlar fosil yakıtların vereceği zararlarla kıyaslanamayacak derecede düşük boyuttadır.

## **1.2. Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemleri**

Yenilenebilir enerji denince ilk akla gelen ve en çok kullanılan kaynaklardan biri rüzgârdır. Rüzgâr birbirine komşu iki bölge arasındaki ısı ve basınç farkından kaynaklanır. Sıcaklığı artan havanın yükselmesi ve oluşan boşluğu soğuk hava kütlelerinin doldurması ile oluşan yer değiştirme hareketliliğine rüzgâr denir. Başka bir ifadeyle rüzgâr; yüksek basınca sahip bir alandan alçak basınca sahip alana doğru hareket eden hava kütlesi hareketliliğidir. Bu hareketliliğin hızını etkileyen faktörler vardır. Basınç ve sıcaklık farklarının büyüklüğü hızı arttıran etkenlerdir. Bölgenin engebeli veya düz bir alan olması, ayrıca bölgenin rakımı da rüzgârın hızını etkiler.

İnsanoğlu tarih boyunca rüzgârın enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek kullanmıştır. Yel değirmenleri vasıtasıyla su pompalama veya buğday öğütme işleri yapılagelmiştir. Şekil 1.1’de tarihi bir yel değirmeni görülmektedir.

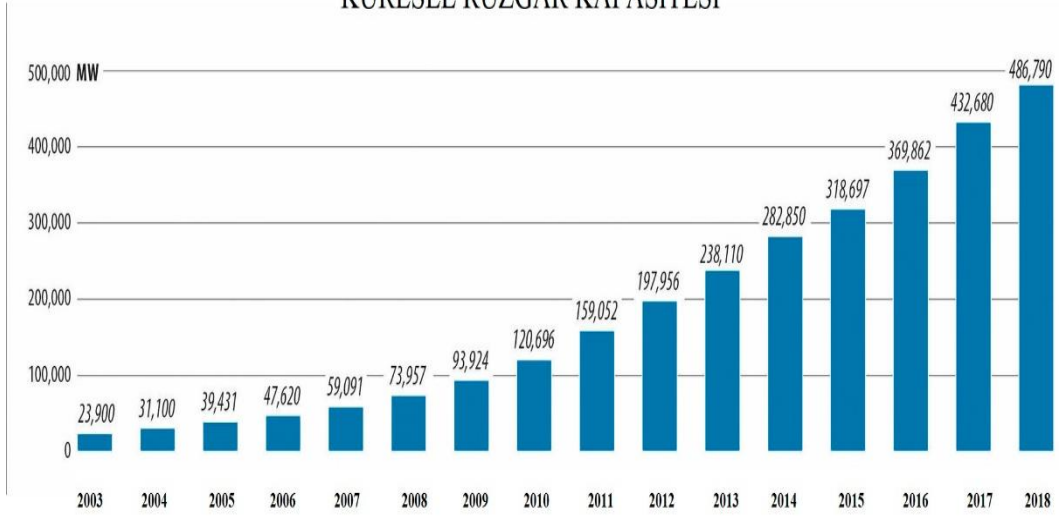


Şekil 1.1. Tarihi bir yel değirmeni [2]

Rüzgâr kullanılarak ilk elektrik üretme çabaları ise 1887 yılında İngiltere de Profesör James Blyth'ın deneyleriyle başlamıştır ve 1891 yılında patentini de almıştır. Charles Francis Brush, Amerika Birleşik Devletleri'nde 1888 yılında rüzgâr enerjisini kullanarak elektrik üretmiş ve yıllarca elektrik ihtiyacını bu şekilde karşılamıştır. Bu konuda diğer bir ilerleme ise Danimarkalı mucit Poul la Cour'un 1890 yılında rüzgâr türbinleri inşa etmeye başlamasıdır. Yakın tarihte rüzgârın bu şekilde kullanılmasına karşın ilk modern rüzgâr türbinlerinin kullanımı Danimarkada Kuriant, Vestas, Nordtank ve Bonus firmalarının 1979 yılında seri üretime geçmesiyle başlamıştır. Üretilen bu türbinler ilk başlarda küçük güçlü olsalar da nihayetinde yüksek güçlerde üretilerek farklı ülkelere yayılmıştır [3].

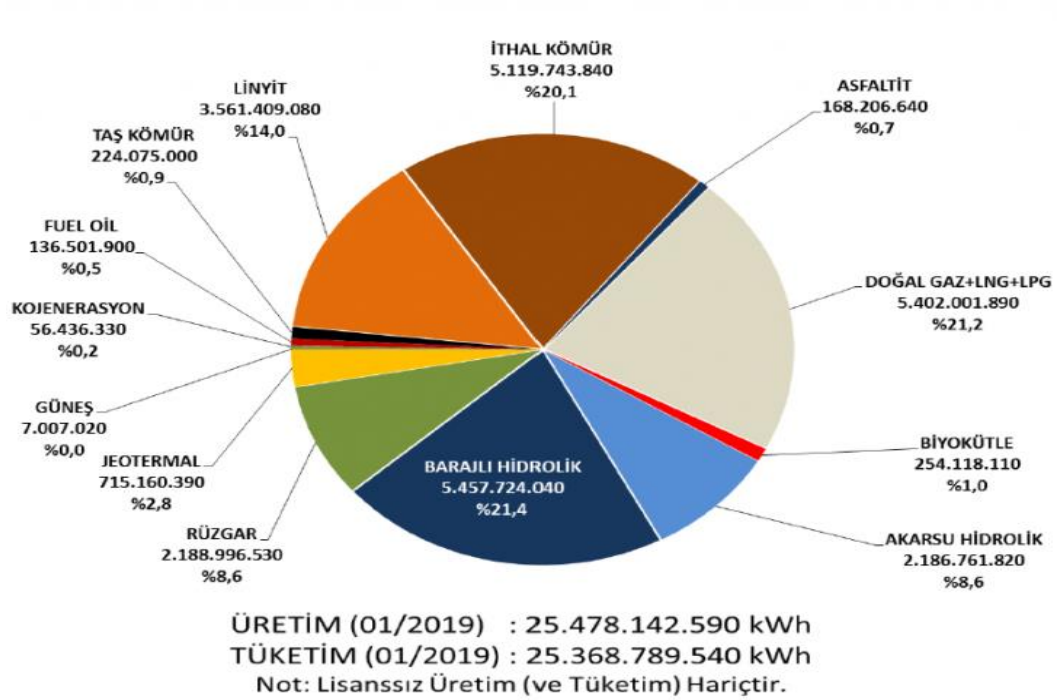
Rüzgârın atmosferde maliyetsiz olarak var olması ve bundan dolayı fiyatının artma riski olmaması bunun yanı sıra tükenme riski taşımaması, çevreyi kirletmemesi ve daha pek çok avantajı rüzgâr enerji santrallerini cazip kılmaktadır. Şekil 1.2'de görüldüğü gibi 2003 yılında tüm dünyada kurulu rüzgâr gücü 24 GigaWatt iken bu rakam 2018 yılında 487 GigaWatt'ı bulmuştur. Tüm dünyada rüzgâra ilgi hızla arttığı gibi ülkemizde de artış görülmektedir [4]. Türkiye'nin gelişmekte olması ve elektrik enerjisi ihtiyacının katlanarak artması enerji sektöründeki yatırımları beraberinde getirmektedir. Ülkemizde enerji ihtiyacının yaklaşık %60'ı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Buna karşın rüzgârdan karşılanan enerji talebi Şekil 1.3'te görüldüğü gibi %5 oranındadır. 2006 yılından itibaren günümüze kadar ülkemizde kurulu rüzgâr enerjisi gücü değişimi Şekil 1.4'de gösterilmiştir [4].

## KÜRESEL RÜZGAR KAPASİTESİ

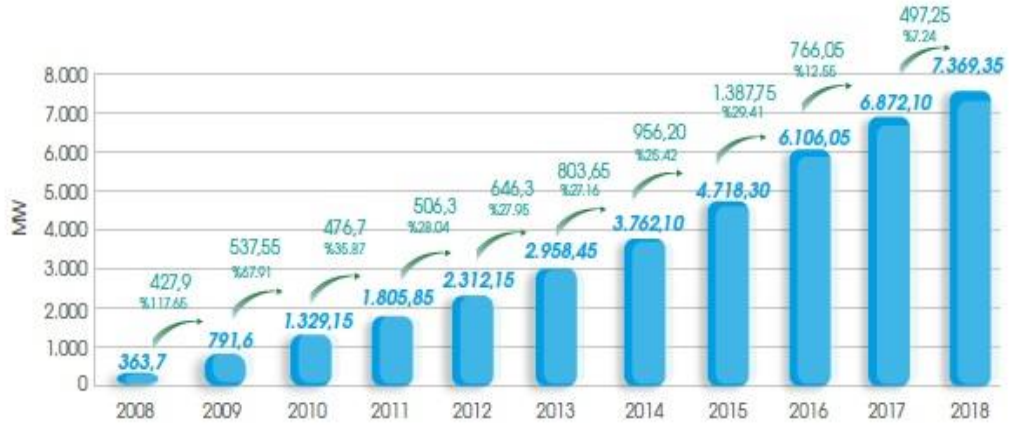


Şekil 1.2. Küresel rüzgâr enerjisi kurulu gücü değişimi (2003-2018) [4]

## TÜRKİYE'DE ELEKTRİK ÜRETİMİ (OCAK - 2019)



Şekil 1.3. Ocak 2019'da yayımlanan rapora göre, Türkiye'de kullanılan kaynaklara göre kurulu güç [5]



Şekil 1.4. 2008-2018 Türkiye’de kurulu rüzgâr gücü değişimi [6]

Rüzgâr enerjisinden elektrik elde etmek için rüzgâr türbinleri kullanılır. Rüzgâr türbinleri rüzgârın kinetik enerjisini önce mekanik enerjiye çevirerek bir elektrik generatörünün miline aktarır. Elektrik generatörü ise rotorundaki bu mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.

Rüzgâr türbinleri dönme eksenlerine göre dikey eksenli ve yatay eksenli olarak ikiye ayrılmaktadır. Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin rotor mili dikeydir ve rüzgârı dik bir açıyla karşılar. Ticari amaçla yaygın kullanılmazlar çünkü bazı dezavantajlara sahiptirler. Dönen kısım yere yakın olduğu için aldığı rüzgârın hızı düşüktür. Ayrıca bir motor tarafından ilk dönüş hareketinin verilmesi gerekir. Genel olarak verimi de düşük olduğu için yaygın olarak kullanılmazlar. Yatay eksenli rüzgâr türbini en yaygın olarak kullanılan türbin şeklidir. Rotor mili yatay eksendedir yani rüzgârın geliş açısıyla paraleldir. Bu sebepten kanatlar rüzgârın geliş açısına diktir. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri genel olarak rüzgârı önden karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Rüzgârın geliş açısı sabit olmadığından rüzgârı önden alması amacıyla bir rüzgâr yönü algılama sistemi ve açı kontrol sistemi gereklidir. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri tek parça kanattan oluşabileceği gibi birden çok parça kanattan da oluşabilir. Ticari amaçla en yaygın kullanılan Şekil 1.5’de görüldüğü gibi, aralarında 120 derece açı farkı olan üç parça kanattan oluşan rüzgâr türbinleridir.



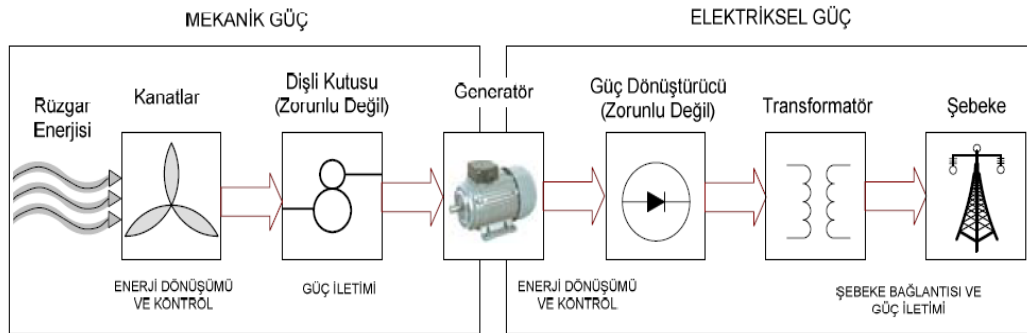


Şekil 1.5. Üç kanatlı rüzgâr türbini [7]

Bir Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemi (REDS)'nin temel bileşenleri Şekil 1.6'da gösterilmiştir. Rüzgârın kinetik enerjisi kanatlar vasıtasıyla mekanik enerjiye dönüşür. Elde edilen dönme hareketi dişli kutusuna aktarılır. Dişli kutusu geleneksel rüzgâr türbinlerinde kullanılmamıştır. Rüzgârın oluşturabileceği devir dakikada 30 ile 50 arasında değişmektedir. Generatörün milinde istenen optimum dönme ise dakikada 1000 devir ile 1500 devir arasında değişmektedir. Aradaki bu farkın kapatılması için dişli kutusuna ihtiyaç duyulur. Maksimum dönüştürme oranı dişlilerde  $1/5$  olduğundan tek dişli sistemi kullanılırsa hız en fazla altı katına çıkarılmış olacaktır. Eğer oranın daha fazla artması gerekiyorsa küçük dişlinin miline bağlanan büyük dişli ikinci bir dişli takımı olarak eklenir ve bu oran  $1/25$ 'e kadar çıkartılabilir. Eğer bu oranı daha fazla arttırmak gerekirse dişli takımı eklenebilir. Dişli takımlarından beklenen bir diğer özellik ise olabildiğince sessiz çalışmasıdır. Türbinin gücüne bağlı olarak uygun dişli sistemi seçilmelidir. Modern rüzgâr türbinlerinde dişli kutusu tercih edilmemektedir. Kanatlar direkt generatörün miline bağlıdır ve kanatlar ile milin dönme hızı aynıdır. Çok kutuplu generatörler kullanılarak ve kanatların uzunluğu arttırılarak düşük devirlerde elektrik üretimi yapılabilmektedir. Türbülans ve fırtına gibi olumsuz iklim koşullarında en olumsuz etkilenen kısım hareketli parçalardır. Dişli kutusunun olmaması sistemin ömrünü uzatma konusunda büyük avantaj sağlar. Hareketli parçaların yarısına yakını bu

modern sistemlerde atıldığından, sistem tonlarca ağırlıktan da kurtulmuş olur ve böylelikle sistemin nakliyesi ve montajı daha kolaylıkla ve düşük maliyetle yapılabilir [7].

Ağırlığı azaltan bir diğer etken ise daimî mıknatıslı generatör kullanılmasıdır. Geleneksel generatörlerde gerekli manyetizma oluşturmak için kullanılan 10 - 15 cm kalınlığında ki bakır sargıların oluşturduğu manyetizma, 15 mm kalınlığındaki daimi mıknatıs ile sağlanabilir [8]. Daimî mıknatıslı generatörler ilerleyen bölümlerde ayrıntılı incelenecektir. Kullanılıyorsa dişli kutusundan veya kullanılmıyorsa direkt kanatlardan alınan mekanik enerji, bir generatör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Kullanılacak generatör bir doğru akım generatörü veya alternatif akım generatörlerinden asenkron veya senkron generatör olabilir. Bu seçim yapılırken sistemin kurulacağı bölgenin rüzgâr özelliği, iklim şartları ve türbin gücü gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca avantaj ve dezavantajları hesaba katılarak seçim yapılmalıdır.



Şekil 1.6. Rüzgâr türbini temel bileşenleri [9]

Rüzgârdan elde edilecek güç değeri birçok faktöre bağlıdır. En etkili faktör ise rüzgârın hızıdır. Elde edilecek güç değeri rüzgârın hızının küpüyle orantılıdır. Örneğin 16 m/h hızla esen rüzgârdan bir saatte elde edilecek gücü, 4 m/h hızla esen rüzgârdan elde etmek için sistemin 64 saat çalışması gerekir. Elde edilecek güç değeri ayrıca kanatların taradığı alan ile doğru orantılıdır. Bu taranan dairesel alanın yarıçapı kanatların uzunluğudur. Dolayısıyla elde edilecek güç değeri kanat uzunluğunun karesiyle doğru orantılıdır. Kanat uzunluğunun üç katına çıkması sistemde elde edilecek gücün dokuz katına çıkması anlamına gelir [9]. Zaten modern rüzgâr türbinlerinde kanat uzunlukları günbegün artmaktadır.

Atmosferik şartların da elde edilecek güce etkisi vardır. Hava yoğunluğu elde edilecek güç ile doğru orantılıdır. Hava yoğunluğu da sıcaklığa ve rakıma bağlı olarak değişmektedir. Sıcaklık veya rakım arttıkça hava yoğunluğu azalır. Ayrıca kule yüksekliği de üretilen gücü etkiler. Bu sebeple kanatlar mümkün olduğu kadar yüksek kuleler üzerine yapılır.

REDS'nin iki ana tipi vardır. Bunlar sabit hızlı REDS'ler ve değişken hızlı REDS'lerdir. Sabit hızlı REDS'leri adından anlaşılacağı gibi belirli bir hızla dönerler. Aynı zamanda Danimarka'da geliştirilmiş "danish konsepti" olarak da bilinir. Sabit hızlı REDS'lerde indüksiyon makineleri yaygın olarak kullanılır. Çünkü bu makinelerde senkron hız ile maksimum güçteki dönüş hızı arasındaki fark çok azdır. Bu makinelerin mekanik karakteristik özelliklerinden ve momentteki değişimden etkilenmemelerinden dolayı sabit hızlı REDS'ler de kullanılan generatörler şebekeye direk bağlıdır. Bu makinalarda rüzgâr hızı ne olursa olsun dönüş hızı şebeke frekansına göre belirlenmiş sabit bir hızda dönmektedir [10]. Sabit hızda dönmesi sadece bir rüzgâr hızında sistemden maksimum güç çıkarımına izin verir. Bu durum sistemin düşük verimle çalışması demektir.

Değişken hızlı REDS'lerde generatör dönüş hızı sabit bir değer değildir. Bu sebeple şebekeye direkt olarak bağlanamazlar. Şebeke ile generatör arasında güç elektroniği devreleri kullanılır. Bu durum farklı rüzgâr hızlarında güç elektroniği devrelerinin kontrol edilmesiyle sistemin maksimum güçte çalışmasına olanak sağlar [11].

Asenkron generatörler rüzgâr türbinlerinde en yaygın kullanılan generatör tipidir. Bu makinelerin en büyük avantajı sağlamlığı ve maliyetinin düşüklüğüdür. Ayrıca büyük güçler için imal edilebilirler. Bu makinelerin diğer bir avantajı ise ani rüzgâr değişimlerinde oluşan titreşimleri sönmümesidir. Bu makineler rotor yapılarına göre sincap kafesli asenkron makine ve bilezikli asenkron makine olarak ikiye ayrılır. Sincap kafesli asenkron makinelerin en büyük avantajı sağlamlığıdır. Basit mekanik yapısı bakımının azalmasını sağlar. Generatör dönüş hızı rüzgâr hızındaki değişimden dolayı çok az değişir. Bu sebeple sabit hızlı REDS'lerinde kullanılır. En büyük dezavantajı ise makine parametrelerinin sıcaklık ile değişerek sistemin kontrolünü karmaşıklaştırmasıdır. Diğer bir asenkron makine çeşidi olan

bilezikli asenkron makinede ise rotor sargıları bilezikler sayesinde dışardan bir kaynağa bağlanabilir ve böylelikle hız ayarı yapılabilir. Ancak bu çeşit makine sincap kafesli asenkron makine kadar sağlam değildir. Bilezikli asenkron makinenin stator sargılarının 3 fazlı sabit frekanslı şebekeye bağlanması ve rotor sargıların iki yönlü konvertör sistemine bağlanmasıyla elde edilen çift beslemeli asenkron makine rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılır. Özellikle off-shore uygulamalarda büyük güçlerde kullanılan bu makine farklı rüzgâr hızı uygulamalarına imkân tanır. Normal bakımların bile zor olduğu off-shore uygulamalarda çokça kullanılan bu makinenin en büyük dezavantajı ise bilezik tertibatının bakımındır.

Alternatif akım üretici olarak kullanılan bir makine türü de senkron generatörlerdir. Manyetik alanı oluşturan kısım rotordur ve rotorun yapısına göre ikiye ayrılır. Bunlar rotoru sargılı senkron generatör ve daimî mıknatıslı senkron generatörlerdir. Daimî mıknatıslı senkron generatörler özellikle yerleşim merkezlerine uzak yerlerde ve şebekeye bağlı olmayan uygulamalarda kısacası küçük güçlü sistemlerde çok yaygın olarak kullanılır [12].

REDS'lerde çok yaygın olmasa bile doğru akım makineleri kullanılmaktadır. Bu makinelerin genel özelliği olarak bakım ihtiyacının fazla olması, rüzgâr türbinlerinin kurulu olduğu yerler göz önünde bulundurulursa önemli bir dezavantajdır. Buna rağmen şebekeye entegre çalışmayan küçük güçlü türbinlerde tercih edilmektedir. Doğru akım makinelerinin kullanılmasındaki en önemli avantaj ise hız kontrolünün kolay olmasıdır. Son dönemlerde komütatör problemlerinin çözülmesi amaçlanarak statordaki alan sargıları yerine daimî mıknatıs kullanılmaktadır [12].

### **1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı**

Bu çalışmanın amacı maksimum güç takip yöntemlerinin temel başlıklar altında ele alınıp, yöntemlerin bir diğerine göre avantaj ve dezavantajlarını değerlendirmek ve sonuç olarak Matlab/Simulink'te bu yöntemlerden birini kullanarak araç kutusunu oluşturmaktır. Değerlendirme yapılan yöntemler, maksimum güç izleme metotlarının literatürde temel olanlarıdır. Bu yöntemlerin temel mantığını değiştirmeden, sistemin maksimum güç kontrolünü sağlayan farklı pek çok çalışma son yıllarda yapılmıştır.

Bir sonraki kaynak özetleri bölümünde, literatürde maksimum güç noktası takibi için kullanılmış yöntemler ve son yıllarda yapılan çalışmalar üzerine bir tarama yapılmış ve sonuçların nasıl değerlendirildiği üzerinde durulmuştur.

Üçüncü ve dördüncü bölümde ise, bir rüzgâr türbini dönüşüm sisteminin rüzgâr türbini, Daimî Mıknatıslı Senkron Generatör (DMSG) ve aktif doğrultucu bileşenlerinin modellenmesi yapılmıştır. Her biri için bir Matlab/Simulink modeli tanımlanmıştır ve tüm sistemin benzetimi yapılmıştır. Rüzgâr türbini modeli için, literatürden spesifik bir rüzgâr türbini özelliği seçilmiştir. Generatör, elektrik stator denklemlerinin senkron referans çatısında ifade edilerek modellenmiştir. Bu sistem, generatör momentini kontrol eden alan yönlendirmeli kontrolün uygulanması için büyük avantajlar sunar. Aktif doğrultucu, altı Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) kontrollü IGBT köprü ile üç fazlı bir voltaj kaynağı dönüştürücüsünden oluşur.

DMSG'ün kontrolü, iki PI kontrol cihazından (senkron referans çatısının her eksenini için bir tane) oluşan bir akım kontrol döngüsü tarafından gerçekleştirilir. Maksimum Güç Noktası Takibi (MGNT) kontrol stratejilerinin temeli olan rotor hızını kontrol etmek için bir PI hız kontrol döngüsü eklenir. Daha sonra ise dört farklı MGNT kontrol stratejisi tanıtılmıştır. İlk olarak, teorik kavramlar tanıtılmış ve matematiksel modelleri çıkarılmıştır.

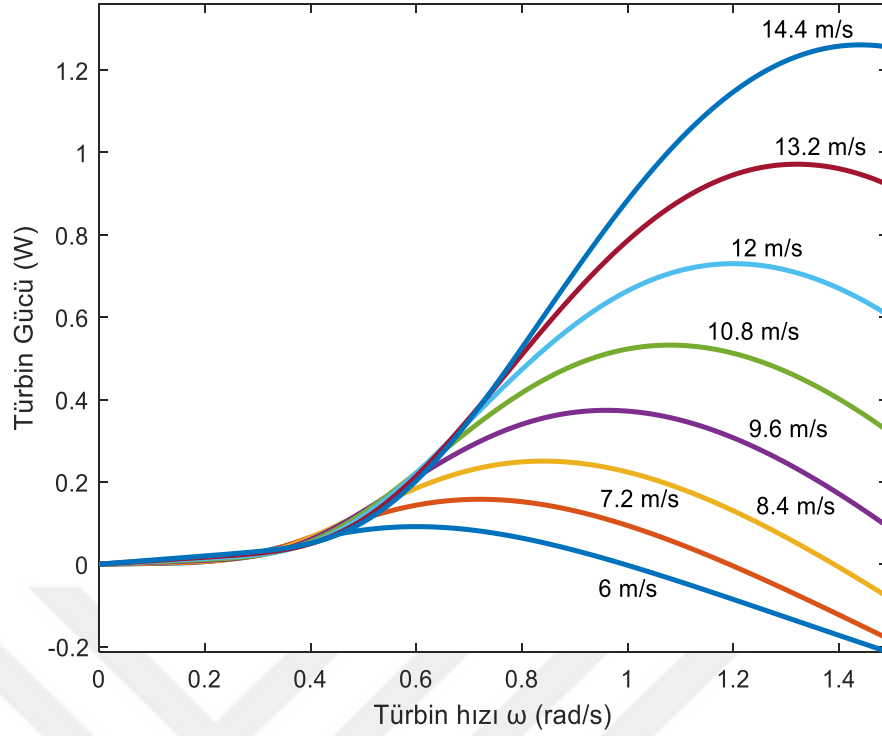
Beşinci bölümde ise, dört farklı senaryo ile sistem benzetimi yapılmıştır. Birinci senaryoda, sabit rüzgâr hızında, hız denetleyici kullanılmadan benzetim yapılmış ve ikinci senaryoda, yine aynı sabit rüzgâr hızında simülasyon modelinde sisteme Kanat ucu Hız Oranı (KHO) yöntemi uygulanmıştır. Üçüncü senaryoda ise değişken rüzgâr hızında hız denetleyici kullanılmamıştır. Dördüncü senaryoda, değişken rüzgâr hızında KHO yöntemi kullanılarak benzetim sonuçları elde edilmiştir. Tüm REDS'nin Sabit ve değişken rüzgâr hızında sistemin rotor hızı ve generatör gücü tepkileri izlenmiştir. MGNT yapılan bir sistemin sonuçları kontrolsüz olan sistemle karşılaştırılmıştır. Sabit KHO kontrolü, rüzgâr türbinini, rüzgâr türbini karakteristiğinden bilinen sabit kanat ucu hızı oranına göre kontrol eder. Bu çalışmada KHO kontrol yönteminin tercih edilmesinin nedeni, tüm maksimum güç noktası izleyicileri içinde en hızlı şekilde tepki veren yöntem olmasındandır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Fosil yakıtların yakın gelecekte tükeneceği endişesi ve çevreye olan zararları gibi nedenlerle yenilenebilir enerjiye ve yenilenebilir enerjiye dahil olan rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerine yönelim artmaktadır [13-21]. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin, daha yüksek verimde çalışması, mekanik aksamının daha az olması, kompakt olması, kayıplarının daha düşük ve bakım masraflarının daha azaltılması üzerine çalışmalar devam etmektedir. Rüzgârdan yakalanan gücün daha fazla olması amacıyla değişken rüzgâr hızlarında çalışan rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin maksimum güç noktasında çalışması istenir [18]. Bunun için MGNT yöntemleri kullanılmaktadır.

Rüzgâr hızı gün boyunca sürekli olarak değişim gösterir. Şekil 2.1'de görüleceği gibi farklı rüzgâr hızı değerleri için sistemden elde edilen maksimum çıkış güçleri de farklıdır. Ayrıca maksimum güç değerlerinin elde edildiği noktaya karşılık gelen rotor dönüş hızları farklı değerlerdir. Rüzgâr hızı değişimlerinde sistemin o andaki rüzgâr hızında elde edilebilecek en yüksek çıkış gücünü üretebilmesi için gerekli rotor devir sayısı, kontrol yöntemleri kullanılarak hesaplanır [9,14-17]. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde kullanılan generatör tipine bağlı olarak ve sistemin gücüne dikkat ederek kullanılan kontrol yöntemleri değişiklik gösterir. Maksimum güç elde etme yöntemleriyle ilgili çalışmalar, küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılan daimî mıknatıslı senkron generatörden ve rüzgâr çiftliklerinde yaygın olarak kullanılan sincap kafesli asenkron generatör ve çift beslemeli indüksiyon generatörlerden maksimum güç elde etme yöntemlerine odaklanmıştır [13]. Bu yöntemler temel olarak üçe ayrılır. Bunlar KHO yöntemi, P-W eğrisi yöntemi ve Tırmanma algoritması yöntemidir [9,14-17].

Daimî mıknatıslı senkron generatörlerin kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Yaygınlaşma sebebi olarak, direkt olarak sürülen uygulamalarda daha küçük kanat uzunluklarına olanak sağlaması ayrıca yüksek verim ve yüksek güç yoğunluğu gösterilebilir [20]. Yukarıda bahsedilen üç yöntemde daimî mıknatıslı senkron generatör kullanılan sistemler için incelenecektir.



Şekil 2.1. Farklı rüzgâr hızlarında, türbin hızı ile türbin gücü değişimi

KHO yöntemi ile maksimum güç elde edebilmek için o andaki rüzgâr hızı bilgisi ve sistemin karakteristik olarak değişen optimum KHO değeri gereklidir. Sabit KHO değerine karşılık gelen rotor hızı hesaplanarak hız kontrolü yapılır. Rüzgâr hızının doğru bir şekilde ölçülmesi gereklidir ve bu ölçüm özellikle büyük ölçekli türbinler için gereksiz bir detay değildir. Ancak rüzgâr hızı ölçümü yapan anemometrenin yakında bulunan diğer türbinlerden dolayı yanlış ölçüm yapması muhtemeldir. Ayrıca rüzgârın hızını algılayan sensörler maliyeti de artırırlar. [21]'de yapılan çalışmada rüzgâr hızı ölçümü yapılmadan, rüzgâr hız tahmini yapılarak KHO yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemin uygulanması için rüzgâr hızını tahmin eden bir algoritma kullanılmıştır. Simülasyon programı kullanılarak konvertör çıkışından elde edilen voltajın giriş voltajından altı kat daha fazla olduğu görülmüştür. Rüzgâr hızını ölçmek yerine hız tahmin etme yönteminin en önemli avantajı sistemin maksimum gücü yakalama hızının artmasıdır. Diğer bir avantajı ise rüzgâr hızı algılayan sensörler kullanılmadığı için maliyetin azalmasıdır.

Generatör akımının dalga şekli ve rüzgâr hızı bilgilerini gerektiren [17]'deki yöntemde KHO tahmin yöntemi ile önceden hesaplanmış optimum KHO değeri kullanılan yöntemler kıyaslanmış ve aradaki farklar değerlendirilmiştir. Rüzgâr

türbini tarafından mekanik enerjiye dönüştürülen rüzgâr enerjisi  $C_p(\lambda)$  ile ifade edilir. Yöntem küçük güçlü rüzgâr türbininde uygulanmıştır. Türbin maliyetini arttıran sensörlerin kullanılmaması için alternatif bir yöntemdir. Yöntemin doğruluğu bir simülasyon programı yardımıyla denenmiştir. Uygulanabilir olduğu ve sistem cevabının daha hızlı olduğu görülmüştür.

Bir diğer maksimum güç elde etme yöntemi tırmanma algoritmasıdır. Bu yöntemin ana stratejisi, rotor hızı ve elektriksel gücü belirli zaman aralıkları ile ölçer ve bu sonuçları karşılaştırır. Sonucun işaretlerini kıyaslayarak sistemin o anda  $C_p(\lambda)$  eğrisinin neresinde çalıştığını belirler. Bu sonuca göre rotor hızını artırıp azaltarak Maksimum Güç Noktası (MGN)'ni yakalamaya çalışır. [18]'de kullanılan ilerlemiş tırmanma kontrol algoritmasının temel ilkesi araştır-hatırla-uygula tekniğidir. Bu metot maksimum noktaları kaydetmek için bir hafıza elemanı kullanır. Algoritma çalışmaya boş bir akıllı hafıza ile başlayacaktır. Bu sebeple başlangıç aşaması olan araştırma kısmında yavaş çalışacaktır. Uygulama boyunca elde edilen maksimum noktalara ait bilgiler akıllı hafızaya kaydedilecektir. Algoritma bu kaydettiği bilgileri uygulama aşamasında çok daha hızlı kullanacak ve sistem cevabı hızlanacaktır. Akıllı hafızanın öğrenme süreci sistem karakteristiği tam kurulana kadar devam edecektir. Bu yöntemde evirici çıkış gücü ve evirici DA gerilim değeri kullanılarak hesaplamalar yapılır. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde generatörden elde edilen alternatif akımı doğru akıma dönüştürmek için köprü doğrultucular kullanılır. Doğrultucunun çıkışındaki  $V_{da}$  gerilimi daimî mıknatıslı senkron generatörün açısal rotor hızı ( $\omega$ ), alan akımı ( $I_f$ ), yük akımı ( $I_L$ ) ile bağlantılıdır. Algoritma türbinin mekanik gücü ( $P_m$ ) ile generatör çıkış gücü ( $P_\zeta$ ) arasındaki ilişkiyi kullanmaktadır.  $B$  sistemin sürtünme katsayısı ve  $J$  ataletidir. Denklem (2,1)'in diferansiyeli alınarak denklem (2,2) elde edilir.

$$P_m = P_{yük} + B\omega + \omega J \frac{d\omega}{dt} \quad (2,1)$$

$$\Delta P_m = \frac{1}{\omega} \Delta P_\zeta + B\Delta\omega + \Delta(\omega J \frac{d\omega}{dt}) \quad (2,2)$$

$\Delta(\omega J \frac{d\omega}{dt})$  değeri  $\Delta(V_{da} J \frac{dV_{da}}{dt})$  değerini temsil etmektedir.  $\Delta P_\zeta$  ve  $\Delta(V_{da} J \frac{dV_{da}}{dt})$  değerlerine bakılarak olması gereken evirici çıkış akımına ( $I_{dm}$ ) karar verilir. Algoritmanın hatırla aşamasında klasik tırmanma algoritması kullanılarak maksimum çıkış gücünü elde edecek çalışma noktasında çalıştırılır. Bu



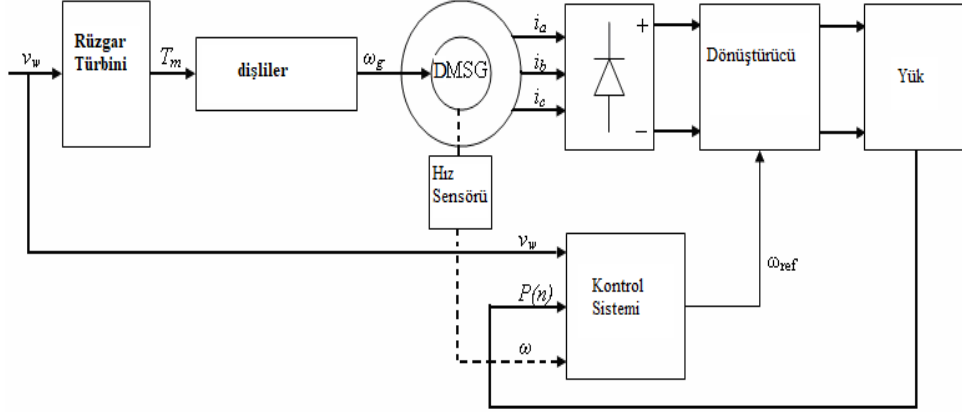
algoritmanın avantajı rüzgâr hızını ölçmeyi gerektirecek bir anemometreye ihtiyaç duymamasıdır. Ayrıca görüldüğü gibi yöntemin farklı aşamalarında çalışma yavaş ve karmaşıktır. Bir diğer dezavantajı ise güç karakteristiğini önemli ölçüde etkileyen hava yoğunluğunu hesaba katmamasıdır.

[19]'da anlatılan yöntemlerin her ikisi de (sensörlü ve sensörsüz KHO yöntemleri) maksimum güç çıkarımı için türbin karakteristiğine ihtiyaç duyar. Gösterilen yöntemler arasındaki fark biri rüzgâr hızını ölçmek için anemometre denen rüzgâr hızı ölçüm cihazını kullanır. Diğer yöntem ise elektriksel çıkış büyüklükleri kullanılarak rüzgâr hızı tahmin edilir. Bu yöntemlerin avantajı çok hızlıdır ve uygulaması kolaydır. Çünkü türbinin tüm fiziksel karakteristikleri programlanmıştır ve basit bir inceleme sonucu maksimum gücü elde edecek çalışma noktası hesaplanır. Bu yöntemlerin dezavantajı ise türbinlere özel programlandıkları için farklı rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde kullanılamazlar. Eğer farklı sistemlerde kullanmak istenirse tekrardan yeni türbin için programlanmalıdır. Bu yöntemlerin diğer bir dezavantajı ise atmosferik değişiklikleri dikkate almaması, hava yoğunluğunu sabit bir değer olarak kabul etmesidir. Hava yoğunluğu ise türbinin çalışmasında önemli rol oynar ve böylece yöntemin doğruluğunu da etkiler.

[20]'de amaçlanan maksimum güç elde etme algoritması, türbin çıkışında maksimum gücü elde etmek için maksimum verim kontrolünü ve maksimum moment kontrolünü kullanır. Seçilmiş bir rüzgâr türbini için fiziksel karakteristiklerini kullanarak optimum generatör momenti ve generatör hızı arasındaki ilişkiyi kullanır. Herhangi bir rüzgâr hızında generatör momenti, mekanik momenti dengeler. Bu yüzden optimum çalışma noktasında eşit olacaktır. Generatörün momenti, moment eğrisi izlenerek kontrol edilebilir. Bu yöntemin avantajı anemometre gerektirmez. Dezavantajı ise generatörün momenti ve hızı arasındaki bağıntıyı sağlayan türbinin karakteristiğine bağlı olarak sabit bir değer belirlenir. Bu nedenle farklı sistemlerde bu yöntem kullanılamaz.

### 3. RÜZGAR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

Şekil 3.1’de blok şeması verilen Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi ve maksimum güç izleme yöntemleri, Matlab/Simulink programı yardımıyla modellenecek her bir blok için araç kutusu (toolbox) oluşturulacaktır.



Şekil 3.1. REDS blok şeması [22]

Matlab programı matematiksel hesaplamalarda ve mühendislik bilimlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Simulink sayesinde modelleme ve benzetim yapılabilmektedir. Matlab/Simulink kullanıcıya analiz ve tasarım olanağı sağlar. Mühendislik çalışmalarında bilgisayar üzerinden testlerin ve analizlerin yapılması önem arz etmektedir. Karmaşık sistemlerin tasarlanmasına ve kontrol yöntemleri denenirken simülasyonların yapılmasına zengin araç kütüphanesine sahip olması nedeniyle imkân tanır.

#### 3.1. Rüzgâr Türbininin Modellenmesi

Belirli bir hıza ve kütleyle sahip hava kütlesi, hareket halinde iken bir kinetik enerjiye sahiptir. SI birim sistemine göre bu enerji ( $E_k$ );

$$E_k = 0.5mv^2 \text{ (joule)} \quad (3,1)$$

Burada ‘m’ hareket eden havanın kütlesi, ‘v’ ise hızıdır. Güç ise birim zamanda akan enerjidir. Bu durumda;

$$P = \frac{d}{dt} (0.5mv^2) = 0.5 \frac{dm}{dt} v^2 \quad (3,2)$$

$P = 0.5(\text{birim zamanda hareketli kütle})v^2$  ifadesi türbin kanatlarının taradığı alanda hareket halinde olan havanın oluşturduğu güç denklemdir. Türbin kanatlarının taradığı alana 'A' dersek 'l' mesafesi boyunca 'v' hızı ile hareket eden 'ρ' yoğunluğundaki havanın kütlesi yoğunluk ve hacim çarpımından elde edilebilir.

$$m = \rho Al \quad (3,3)$$

$$\frac{dm}{dt} = \rho A \frac{dl}{dt} = \rho Av \quad (3,4)$$

Kat edilen mesafenin zamana göre türevi hızı vereceğinden birim zamanda akan hava kütesinin oluşturduğu güç denklem 3.5'de ifade edildiği gibi olacaktır. Bu ifade rüzgârın oluşturduğu gücün, rüzgâr hızının küpü ile orantılı olduğunu gösterir.

$$P_{hava} = 0.5\rho Av^3 \quad (3,5)$$

Rüzgâr türbinlerinde, hareket eden rüzgârın kinetik enerjisi kanatlar aracılığıyla mekanik enerjiye dönüşür. Ancak bu kinetik enerjinin tamamı mekanik enerjiye dönüşmeyecektir. Elde edilen mekanik enerji kanatların girişindeki rüzgârın kinetik enerjisinin kanatların çıkışındaki rüzgârın kinetik enerjisinin farkına eşittir. Bu durumu matematiksel olarak ifade edebiliriz.

$$P_m = 0.5m(v_i^2 - v_o^2) \quad (3,6)$$

$$m = A\rho \frac{(v_i+v_o)}{2} \quad (3,7)$$

İfadelerde geçen  $v_i$  ve  $v_o$  değerleri rüzgârın kanal giriş hızı ile çıkış hızıdır.  $m$  değerini formülde yerine yazarsak ve ifadeyi düzenlersek aşağıdaki eşitliğe ulaşırız.

$$P = 0.5\rho Av_i^3 \frac{(1+\frac{v_o}{v_i})[1-(\frac{v_o}{v_i})^2]}{2} \quad (3,8)$$

$$P_m = 0.5\rho Av_i^3 C_p \quad (3,9)$$

Burada  $C_p$  sistemin mekanik olarak verimini ifade eder.

$$C_p = 0.5(1 + \frac{v_o}{v_i})(1 - (\frac{v_o}{v_i})^2) \quad (3,10)$$

Verimi ifade eden  $C_p$ 'nin maksimum değerini bulmak için ifadenin  $\frac{V_0}{V_i}$ 'ye göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse;

$$\begin{aligned}\frac{dC_p}{dt} &= 0.5 \left[ \left(1 - \left(\frac{V_0}{V_i}\right)^2\right) + \left(1 + \frac{V_0}{V_i}\right) \left(1 - 2\frac{V_0}{V_i}\right) \right] \\ &= 0.5 \left(1 + \frac{V_0}{V_i}\right) \left(1 - 3\frac{V_0}{V_i}\right) = 0\end{aligned}\quad (3,11)$$

Denklem çözülürse  $C_p$  değerini maksimum yapan  $\frac{V_0}{V_i} = 1/3$  olduğu değerdir. Bu değer denklem 3.10'da yerine yazılırsa  $C_p$  değeri 0,5926 olarak hesaplanır. Yani teorik olarak sistemin elde edebileceği maksimum verim %59,25'dir. Bu verim literatürde "Betz Kanunu" olarak geçer ve bu değer uygulamada daha düşük olacaktır [9].

Türbinin performans katsayısı  $C_p$ , kanat açısı( $\beta$ ) ve kanat ucu hız oranının( $\lambda$ ) bir fonksiyonudur.  $C_p(\lambda, \beta)$  fonksiyonunu belirlemek için (3.12) ve (3.13) ile ifade edilen genel bir denklem kullanılır ve Çizelge3.1'de parametreleri verilen [21] sistem için  $c_1=0,5176$ ,  $c_2=116$ ,  $c_3=0,4$ ,  $c_4=5$ ,  $c_5=21$ ,  $c_6=0,0068$  değerleri tanımlanmıştır [21].

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left[ \left(\frac{c_2}{\lambda_i}\right) - c_3\beta - c_4 \right] e^{-c_5/\lambda_i} + c_6\lambda \quad (3,12)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta}\right) = \left(\frac{0.0035}{\beta^3 + 1}\right) \quad (3,13)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left(\pi \frac{\lambda - 3}{15} - 0.3\beta\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (3,14)$$

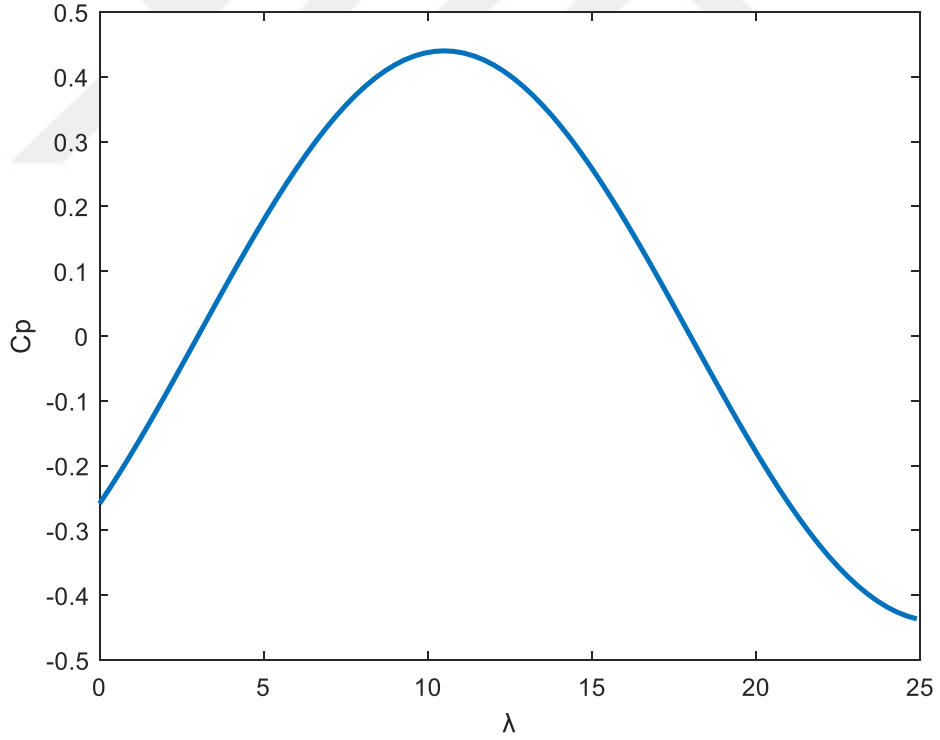
Bu durumda güç eşitliği aşağıdaki gibi yazılır.

$$P_m = 0.5\rho A \left[ 0.5176 \left[ \left(\frac{116}{\lambda}\right) - 5.406 \right] e^{(-21/\lambda) + 0.0735} + 0.0068\lambda \right] v^3 \quad (3,15)$$

$C_p - \lambda$  değişim grafiği Şekil 3.2'de ki gibidir.  $\beta$  değeri sıfır olduğunda  $C_{p_{max}} = 0,44$  olur. Bu değer elde edildiği  $\lambda_{opt}$  değeri ise 10,41'dir.

Çizelge 3.1. Türbin ve Generatör parametreleri

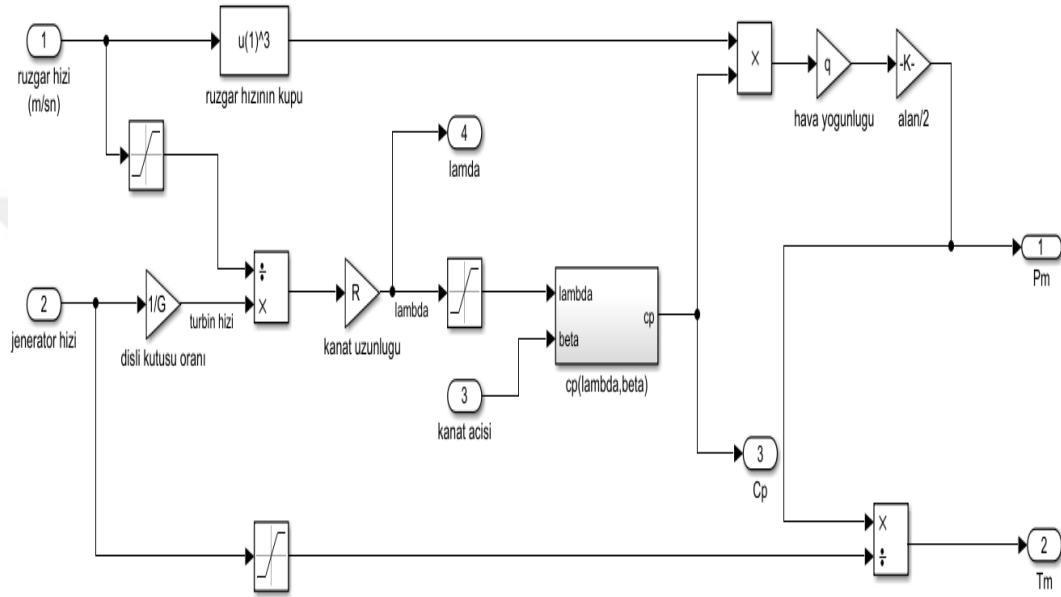
$P_{nom}$	1,5 MW
$C_{p_{max}}$	0,44
$\lambda_{p,opt}$	10,41
REDS	33,05 m
$R_s$	0,006 $\Omega$
$L_d, L_q$	0,3 mH
$\Psi$	1,48 V.s
$J$	35000 kg.m <sup>2</sup>
$B$	0,01 N.m.s
$N_p$	48



Şekil 3.2.  $\beta=0$  için  $C_p$  'nin  $\lambda$  değerlerine karşılık değişimi.

Rüzgâr türbinine ait matematiksel ifadeleri kullanarak türbinin Matlab/Simulink modeli hazırlanmıştır. Bunun için önce simulink'de Şekil 3.3'de

ki çalışma denklem 3,15 kullanılarak hazırlanmıştır. Bu çalışmada giriş ve çıkış değerleri verilen matematiksel ifadelerle hazırlanmıştır. Daha sonra ctrl+A veya edit menüsünden select All seçeneğini işaretleyerek tüm çalışmayı seçiyoruz. Diagram menüsünün altındaki Subsystem & Model Reference sekmesinin altındaki Create Subsystem from Selection işaretlenir. Böylece rüzgâr türbinin bloğu elde edilmiş olur. Çizelge 3.1’de Suzlon S.660 türbin ve generatör parametreleri verilmiştir.



Şekil 3.3. Rüzgâr türbin modeli

Hazırlanan blok kütüphaneye eklenebilir. Bunun için Matlab/Simulink’de “file” menüsünden “new” ardından ise “library” seçilerek boş bir kütüphane sayfası açılır. Sürükleyip bırak yöntemiyle oluşturulan modül boş kütüphane sayfasına eklenir ve klasör içine kaydedilir. Simulink’de View menüsünden “Model Browser” ardından ise “Show Model Browser” seçilir. Matlab komut isteminde, “set\_param(gcs,'EnableLBRepository','on');” komutu EnableLBRepository model özelliğini etkinleştirmek için girilir [23].

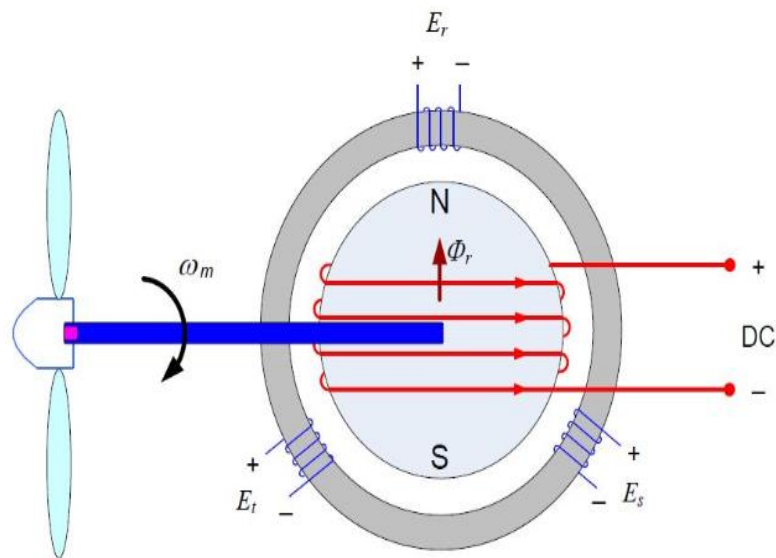
Herhangi bir metin editörüne “slblocks.m” komutları isim ile kaydedilir ve çalıştırılır. Sonraki adım ise Matlab ana ekranında “Set Path” kullanarak kaydedilen dosyanın adres yolunu Matlab programına tanıtmak olacaktır. Kütüphanede toolbox listesine fare yardımıyla sağ klik yapıp “Refresh Library Browser” seçilir. Uyarıda ilgili seçenek seçilince oluşturduğumuz modül kütüphane listesinde

görünecektir. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri için oluşturulan diğer modüller kütüphane listesine eklenirken sırasıyla aynı işlemler kullanılacaktır.

### 3.2. Daimî Mıknatıslı Senkron Makine ve Modellenmesi

#### 3.2.1. Senkron makinelerin yapısı ve çalışması

Rüzgâr enerjili sistemlerde kullanılan makine tiplerine birinci bölümde değinilmişti. Senkron generatörlerde kutup sargıları makinenin hareketli kısmında yani rotorda bulunur. Rotorda kutup sargıları yerine sabit bir mıknatıs da kullanılabilir. Kutup sargıları doğru akımla beslenerek hava aralığında zamana göre değişmeyen ve genliği sabit olan doğru manyetik alan oluşur. Bu manyetik alan, rotorun dışarıdan bir tahrik makinesi ile döndürülmesi sonucu statora yerleştirilmiş üç fazlı sargı düzlemlerinden farklı açılarda geçer ve stator sargılarında bir gerilim indükler. Bu indüklenen gerilim zamana göre değişken yani alternatiftir. Statordaki sargı düzlemlerinden geçen manyetik akının düzleme dik olan normal eksenine yaptığı açı değiştiği için indüklenen gerilim alternatiftir. Bu değişen açı 0 ile 360 derece arasındadır. Böylece rotora tahrik makinesi ile verdiğimiz döndürme enerjisi yani mekanik enerji ile çıkışından alternatif elektrik enerjisi elde edilmiş olur. Yani üretilen elektrik enerjisi statorun alternatif şekilde alınır. Senkron makinenin çalışma prensibi şekil 3.4’de görülmektedir [24].



Şekil 3.4. Senkron generatör çalışma prensibi

Senkron makineler sağladığı pek çok avantajdan dolayı daha fazla tercih edilmektedir. Senkron makineler, endüksiyon makinelerine göre birçok avantaja sahiptir. Bunlardan biri daha yüksek verimdir. Bunun nedeni, mıknatıslanma akımının stator akımının bir parçası olmamasıdır. Endüksiyon makinelerinde rotor uyarma için reaktif güç, stator sargısının yanı sıra dönüşüm için aktif güç ile taşınır. Bu duruma göre, senkron generatörler daha iyi verim ve daha iyi güç faktörüne sahip olacaktır. Değişken hızlı rüzgâr sistemlerinde, genellikle, senkron generatörler şebekeye bir güç elektroniği dönüştürücü ile bağlanır. Senkron Generatörden (SG) elde edilebilecek aktif güç miktarı, volt-amper olarak dönüştürme oranına ve SG'ün güç faktörüne bağlıdır. Böylece, dönüştürme oranının aynı değeri için, güç faktörü bire yaklaştıkça, daha fazla aktif güç elde edilebilir.

Ek olarak, rotor hızı elektriksel yük koşullarına bağlı değildir. Rüzgâr sistemlerinde, sadece rüzgâr hızına bağlı olarak rotor hızını kontrol etmek daha uygundur. Diğer bir avantaj, asenkron makinelere kıyasla daha uzun hava boşluklarına sahip olmalarıdır. Endüksiyon makinelerinde, hava akımı uzunluğu, mıknatıslanma akımını sınırlamak ve güç faktörünü iyileştirmek için küçük tutulur [25]. Öte yandan, senkron makinelerde, armatür reaksiyonunun ve buna bağlı olarak kararlı reaktiviteyi azaltan senkron reaktansın azaltılmasına yardımcı olduğundan daha uzun bir hava boşluğuna sahip olması istenmektedir.

SG'li sabit hızlı rüzgâr sistemleri, indüksiyon generatör (İG) emsallerine göre aynı dezavantajlara sahiptir. Şebekenin ve rüzgâr türbininin dinamikleri, şebekeyle senkronizasyon kaybına neden olabilecek önemli sönümlenme olmadan birbirlerine aktarılır. Dönme hızı, şebekenin frekansı tarafından belirlendiğinden, sistem daha da hassas hale gelir.

Değişken hızlı REDS'lerde kullanılan SG'ün önemi, geniş hız aralığında aerodinamik gereklilikleri yerine getirme yeteneklerinde yatmaktadır. Kanat ucu hızı oranını optimumda tutmak için rüzgâr türbini rotor hızı, rüzgâr hızıyla orantılı olarak değişir. Bu, İG'lerin aksine, rotor hızının yük koşullarından bağımsızlığını sağlar. Sıfırdan nominal hıza kadar geniş çalışma hız aralığı, denetleyici tasarımı için avantajlıdır.



### **3.2.2. Rotoru sargılı senkron generatör (RSSG)**

Senkron makineler rotorun manyetizma özelliğine göre rotoru sargılı senkron generatör (RSSG) ve daimî mıknatıslı senkron generatördür (DMSG). RSSG'ler uzun yıllardır araştırma kapsamı içindedir. RSSG'ün DMSG'e göre en büyük avantajı kendinden reaktif güç üretmesi ve daha sonra gerilimi düzenlemesidir. Böylece güç faktörünü elektrik yükü koşullarına göre kontrol etmek mümkündür. Güç üretiminde RSSG, yüklerin reaktif güç tüketimini telafi etmek için reaktif gücü enjekte eder. Bununla birlikte, RSSG rüzgâr türbini üreticileri arasında popülerlik kazanmamıştır. Bunun nedeni, RSSG'de doğru akım uyarma fırçalarının bakım gerektirmesidir. Rotor sargılarının rotasyondan kaynaklanan mekanik kırılmalıkları, sargı yalıtım hasarına yol açar.

### **3.2.3. Daimi mıknatıslı senkron generatör (DMSG)**

DMSG'de bulunan kendinden uyarım çeşitli faydalar sağlar. Birincisi, rotor bakır kayıplarının ortadan kaldırılmasıdır. Dolayısıyla DMSG'ler, RSSG'ler ile karşılaştırıldığında daha verimlidir. RSSG'den farklı olarak harici bir güç kaynağına ihtiyaç yoktur. Fırça ve kollektörlerin yanı sıra rotor sargılarının çıkarılmasından dolayı bakım ortadan kalkar.

RSSG ile ortak olan sorun, indüklenen frekans ile rotorun mekanik hızı arasındaki ilişkidir. Rüzgâr hızı değiştiğinde, rotor hızı ve dolayısıyla indüklenen voltajın frekansı değişir. Bununla birlikte DMSG'li değişken hızlı uygulamalarda, bu genellikle endişe verici değildir; çünkü generatör, indüklenen voltajın frekansını şebeke frekansına adapte edecek bir dönüştürücü vasıtasıyla şebekeye bağlanır. Diğer bir husus, RSSG'den farklı olarak, mıknatısların sağladığı alanın kontrol edilemez olmasıdır. Böylece gerilimi ve reaktif gücü düzenlemek mümkün değildir. Değişken hızlı rüzgâr sistemlerinde, bu genellikle bir sorun değildir, çünkü şebeke tarafı dönüştürücü çıkış voltajını düzenler ve güç faktörü şebeke tarafından belirlenir. Düşük bakım gereksinimleri ve dolayısıyla düşük maliyet, DMSG'lerin değişken hızlı rüzgâr sistemleriyle önerilmesinin ana nedenleridir.

Göz önünde bulundurulması gereken bir diğer husus da sıcaklık artışından dolayı mıknatısların manyetik özelliğini kaybetme riskidir. Mıknatıslar kısmen ya da tamamen manyetik özelliğini kaybedebilir. Mıknatısların manyetik özellikleri

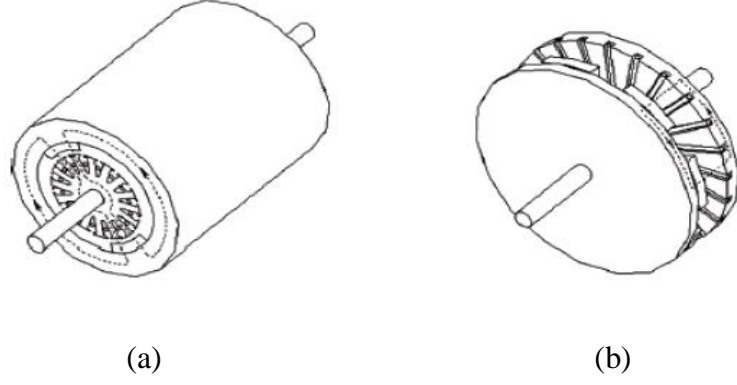
tamamen kaybolursa yeni bir rotor gerekli olacaktır. Bu ise bazı durumlarda imkansızdır. Bu nedenle, mıknatıs çalışma sıcaklığının, her koşulda düşük tutulması gerektiği için bir termal çalışma önerilmektedir. Ek olarak, mıknatısların bazı bölümlerinin yüksek manyetik alanlara maruz kaldığı kısa devre sırasında bir kısmi manyetik yalıtkanlık oluşabilir.

[26] 'de DMSG lerin RSSG'ler ile karşılaştırıldığında dişli kutusu olmayan uygulamalar için daha uygun olduğu gösterilmiştir. DMSG ve RSSG karşılaştırıldığında, kutupların sayısı fazla olursa, RSSG'nin rotor boyunduruğu yüksekliğinin daha kalın hale geldiği görülecektir. Sonuç olarak, RSSG'nin ağırlığı ve ebadı DMSG'nin ağırlık ve boyutlarını aşacaktır.

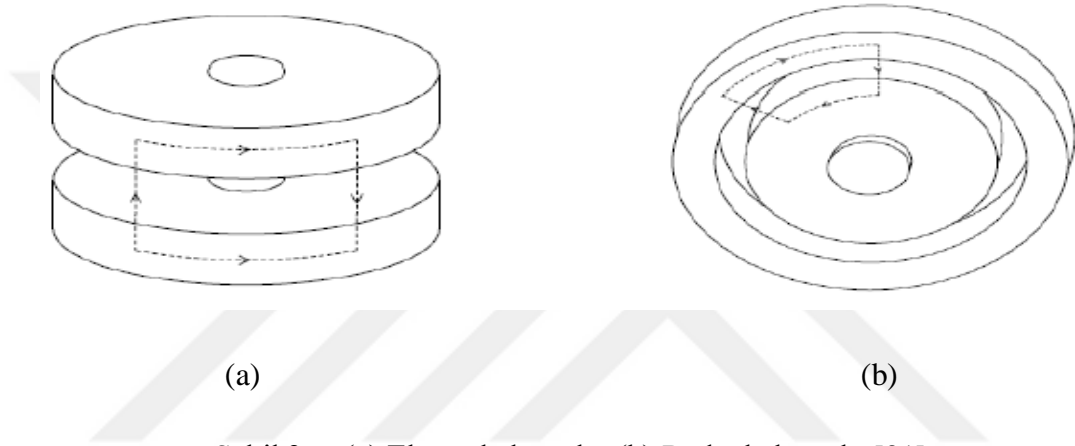
Doğrudan tahrikli rüzgâr enerjisi sistemleri, geleneksel yüksek hızlı (ve düşük momentli) elektrikli makineler kullanamaz [27]. Aynı aktif güç için moment değeri arttığında elektrikli makinelerin ağırlığının ve boyutu artmıştır. Bu nedenle, makine tasarımcısının, ağırlığı ve ebadı en aza indirmek için yüksek moment yoğunluğuna sahip bir elektrikli makineyi göz önüne alması zorunludur. [28] ve [29]'da, DM senkron makinelerin indüksiyon ve anahtarlama relüktans makinelerine kıyasla daha yüksek moment yoğunluğuna sahip olduğu gösterilmiştir. Bu sebepten, bu tezde kullanılacak makine DMSG seçilmiştir. Bununla birlikte, DMSG'in maliyeti önemli bir konu olduğundan, düşük üretim maliyetinin ileriki adımlarda tasarım kriteri olarak kabul edilmesi gerekir. Çok sayıda farklı DMSG topolojisi vardır.

### **3.2.3.1 DMSG'lerin akı yönüne göre sınıflandırılması**

DMSG'ler, akı yönüne göre, eksenel akılı ve radyal akılı generatörler olmak üzere iki bölümde incelenebilir. Manyetik akının yarıçap yönünde akışının sağlanmasıyla imal edilen makineler radyal akılı makinelerdir. Eğer manyetik akı yarıçap yönüne dik bulunan eksen boyunca akışı sağlanırsa oluşan makine eksenel akılı makinelerdir. Şekil 3.5'de eksenel akılı ve radyal akılı DMSG örneği gösterilmiştir. Şekil 3.6'da ise bu iki tip makinedeki akı yolları gösterilmiştir [30].



Şekil 3.5. (a) Radyal akılı makine, (b) Eksenel akılı makine [31]



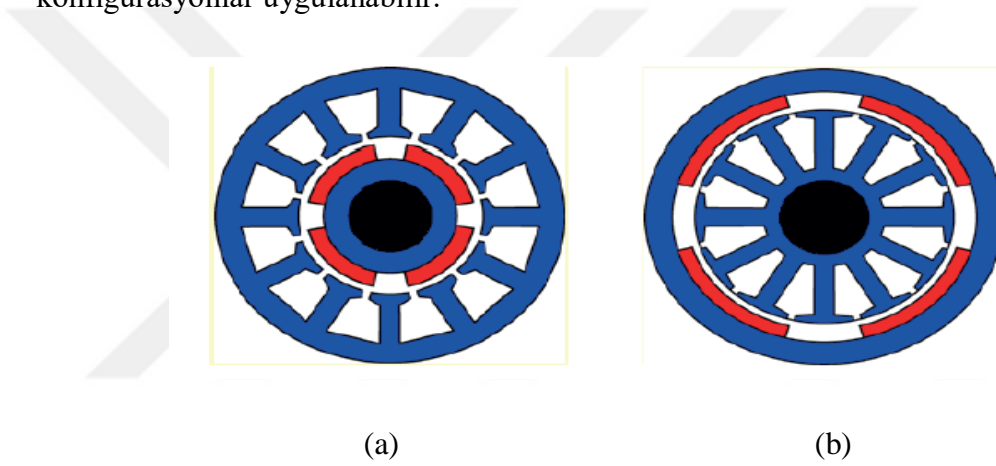
Şekil 3.6. (a) Eksenel akı yolu, (b) Radyal akı yolu [31]

### 3.2.3.2. DMSG'lerin rotor ve stator konumlandırmasına göre sınıflandırılması

DMSG'ler rotor ve stator konumuna göre rotoru içerde senkron makineler ve rotoru dışarda senkron makineler olarak gruplandırılabilir. Rotoru dışarıda olan makinelerinde rotor, statoru çevreler. Bu makinelerde, mıknatıslar genellikle rotorun iç çevresine yerleştirilir. Buna göre, makinenin aynı dış çapı için, rotoru dışarda makinelerde rotor, stator ile karşılaştırıldığında daha yüksek yarıçapa sahiptir ve aynı kutup aralığı için daha fazla sayıda kutup ile donatılabilir [32]. Diğer bir avantaj ise, merkezkaç kuvvetine rağmen mıknatısların iyi desteklenmesidir. Ayrıca mıknatıslar daha iyi soğutulabilir. rotoru dışarda makineler, bazen kanatları taşıyan göbeğin doğrudan rotora sabitlendiği küçük yatay eksenli rüzgar türbin sistemlerinde yaygın olarak kullanılır [33].

Ancak, içten rotorlu makineler bugün piyasada daha yaygın kullanılır. Küçük makinelerde, en fazla olan kayıp bakır kayıplarıdır ve bu nedenle stator sargısı, makinenin aktif malzemesinde en yüksek sıcaklık probleminin yaşandığı yerdir. Bu nedenle, mıknatıslar yerine stator sargısını, soğutma özelliklerinin iyi olduğu mahfazaya daha yakın yerleştirmek daha faydalı olmaktadır. Bu, aynı miktarda kayıp için daha az sıcaklık yükselmesine neden olur. Şekil 3.7, rotoru içerde DMSG ve rotoru dışarda DMSG'yi göstermektedir [34].

DMSG, rotordaki mıknatıs düzenlemesine bağlı olarak sınıflara ayrılabilir. Bunlar yüzeye monte DMSG ve. Bununla birlikte, rotor konfigürasyonlarının sadece bu ikisi ile sınırlı olmadığı belirtilmelidir, örneğin iç mıknatıslarda farklı konfigürasyonlar uygulanabilir.



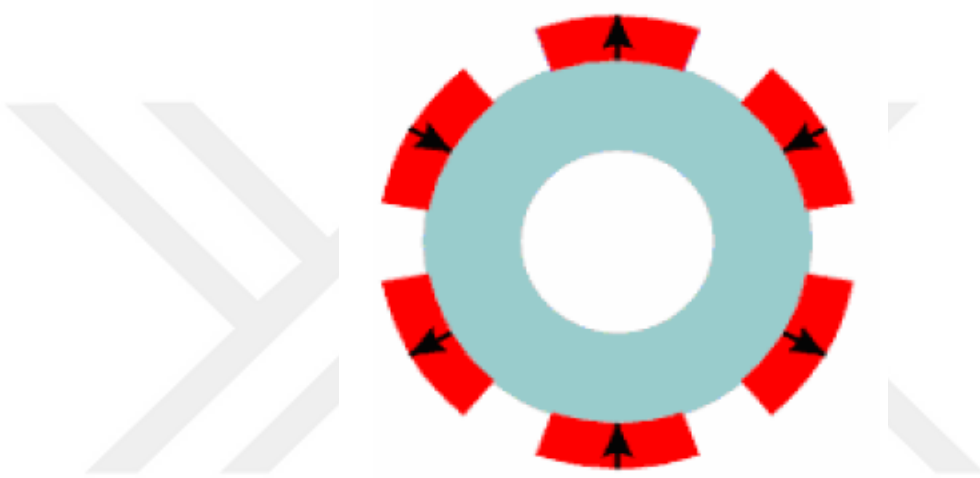
Şekil 3.7. (a) Rotoru içeride olan, (b) Rotoru dışarıda olan senkron makine

Yüzeye monte DMSG, mıknatısların, bazen dış mıknatıs olarak da adlandırılan, ancak yüzeye monte daimi mıknatıs makinesi olarak bilinen rotorun yüzeyine monte edildiği yerdir. Mıknatıslar merkezkaç kuvvetine dayanmak için rotor yüzeyine yapıştırılır veya sarılır. Genellikle, mıknatıslar radyal yönde yönlendirilir veya mıknatıslanır ve daha nadiren çevresel yönde yönlendirilir. Doğrudan ve dörtlü reaksiyonlar neredeyse eşittir. Yüzeye monte DMSG'deki rotor çekirdeğinin yapısı, basit rotor geometrisi nedeniyle farklı DMSG konfigürasyonları arasında en kolay olanıdır. Şekil 3.8, bir DMSG için daimî mıknatısları yüzeye monte rotoru göstermektedir [25, 35].

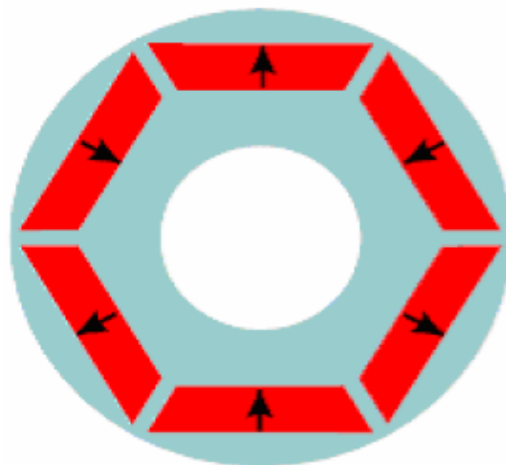
Gömülü mıknatıslı makinelerde, yüzeye monte makinesinin rotor çekirdeği, demir interpoller ile değiştirilir. Demir interpolleri, yüzeyde mıknatıs bulunmayan her yerde, rotor çekirdeğinin çıkıntılarıdır. İnterpoller belirginliğe neden olur ve

doğrudan ve dörtdü yönlerdeki indüktanslar farklıdır. Bu makinelerde, momentin bir kısmı relüktans momentidir ve moment yoğunluğu yüzeye monte makineye kıyasla daha yüksektir. Mıknatıslar radyal olarak mıknatıslanır. Akı kaçağı, düşük güç faktörü ile sonuçlanan yüzeye monte makine'ye kıyasla daha yüksektir.

Bu nedenle, doğrudan tahrik uygulamasında, inverter kullanımı, dişli uygulamalara göre daha düşüktür. Bu topoloji, dişli kutusuz rüzgâr sistemlerinde yaygın değildir. Şekil 3.9 ise DMSG'ler için gömülü mıknatıs rotorunu göstermektedir [25].



Şekil 3.8. Mıknatısları yüzeye monte edilmiş rotor [25]



Şekil 3.9. Gömülü mıknatıslı rotor [25]

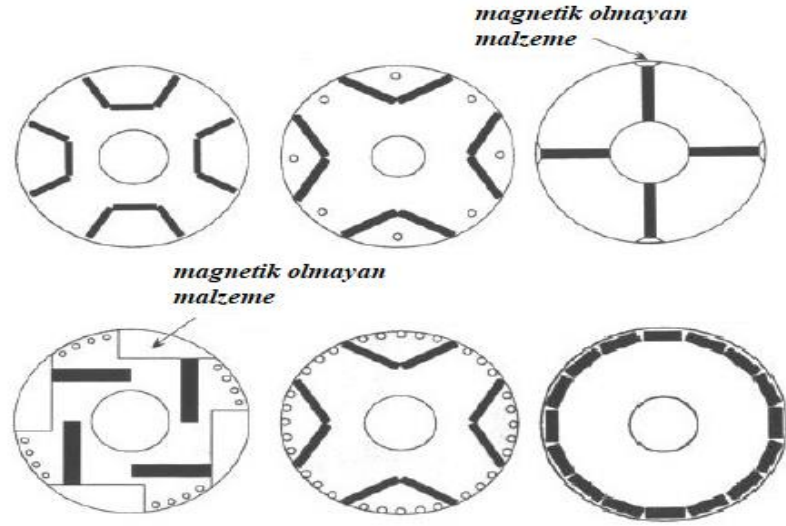
Gömülü mıknatıs yapılandırmasını elde etmenin birçok farklı yolu vardır. Mıknatıslar radyal yönde ve çevresel yönde mıknatıslanabilir. Mıknatıslar arasındaki demir köprülerin kalınlığı doyunluğu önlemek için dikkatlice tasarlanmalıdır. Yine, dörtlü eksenlerdeki endüktans, doğrudan eksen yönünden farklıdır. Şekil 3.10, DMSG'ler için altı farklı gömülü mıknatıs rotorunu göstermektedir.

Bu DM konfigürasyonunun ana avantajı, ferrit gibi zayıf DM malzemelerinin kullanılabilmesidir. Diğer bir avantaj, kısa devre koşullarına karşı manyetik korumadır [25]. Bunun nedeni, hatalı koşullarda mıknatıslar arasındaki demir köprülerin doyun hale gelmesidir, bu da yüksek ters manyetik giderme alanlarının mıknatıslara ulaşmasını önler.

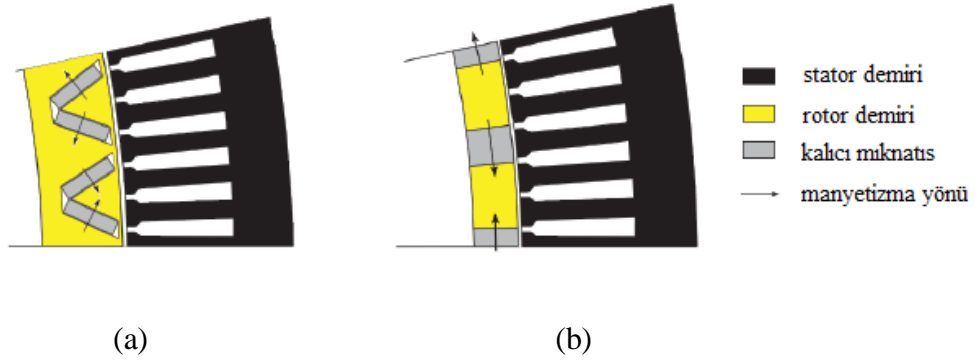
Bu topoloji, rotorun merkezkaç kuvvetine karşı mekanik dayanımı nedeniyle yüksek hızlı uygulamalarda kullanımı uygundur.

Üretim aşamasında mıknatısları gömmek karmaşık bir işlemdir. Üstelik, ferromanyetik olmayan bir şaft hayati önem taşır, aksi halde mıknatısların akısının büyük bir kısmı yakınlardaki şafta nüfuz eder ve bu boşlukların mıknatıslanması için kullanılmayacaktır. Bu makinelerde akı kaçakları da güç faktörünü ve verimliliği azaltır.

[32] 'de, F. Libert iki farklı gömülü mıknatıs topolojisi çalışmakta ve her ikisinin de üretim sorunlarına yol açtığı sonucuna varmaktadır. Bunlardan biri V şeklinde gömülü mıknatıs tasarımı, diğeri teğet olarak mıknatıslanmış gömülü mıknatıs tasarımı olarak adlandırılır. Yazar, kutup sayısı yüksek olduğunda bazı doyma problemlerinden de bahseder. Bu gömülü mıknatıs topolojileri için ortak bir sorundur. Çubukların sayısı artarsa, mıknatıslar arasındaki mesafe azalır (rotor göbeği çapı sabit tutulduğunda). Bu nedenle, dar demir köprüler daha kolay doyun hale gelir. Şekil 3.11, V şeklinde gömülmüş bir mıknatıs tasarımının (a) ve teğet olarak gömülmüş bir mıknatıs tasarımının (b) kutup çiftinin kesitini göstermektedir.



Şekil 3.10. Farklı 6 adet gömülü mıknatıslı rotor



Şekil 3.11. (a) Daimi mıknatısları V şeklinde gömülü rotor kesiti,

(b) Daimi mıknatısları teğet gömülmüş rotor kesiti [24]

### 3.2.4. Park ve Clarke Dönüşümleri

Statorda birbiriyle 120 derece faz farkı olan üç sargı vardır. SG'de rotorun oluşturduğu manyetik alan ile bu sargılarda sinüzoidal akımlar oluşmaktadır. Bu üç stator sargısı ile akımların oluşturduğu anlık manyetik akı vektörüne bire bir eş manyetik alan vektörü, kontrol ve işlem karmaşıklığını çözmek amacıyla sanal olarak birbirine dik iki bobin ve iki akım ile elde edilir fikrinden oluşturulan üç faz referans çatıdan iki faz referans çatıya dönüşüm işlemi geliştirilmiştir.

Clarke ve Park dönüşümü, üç fazlı güç sistemi analizinde yüksek performanslı mimarilerde kullanılmaktadır. Akım ve gerilim, sabit bir referans çatısında gösterilen uzay vektörü olarak temsil edilir. Clarke dönüşümünü kullanarak, gerçek ve sanal akımlar tespit edilebilir. Park dönüşümü, bu gerçek ve sanal akımların durağanlıktan dönen referans çatısına dönüşümünü gerçekleştirmek için kullanılır.

Yukarıda bahsedildiği gibi bu dönüşümlerdeki amaç, makine modelinin basite indirgenmesi ve makine kontrolünün daha rahat ve karmaşık olmadan yapılabilmesidir. Modeldeki denklemler göz önünde bulundurulursa rotor akısının referans eksen olarak belirlenmesi mantıklı olacaktır. Bu durumda geriye kalan parametreler rotor akısına göre belirleneceğinden rotor akısı yönlendirmeli vektör kontrol uygulanmış olacaktır [36]. Bu sistemde rotor akısı d- ekseninde tanımlanacaktır. Geriye kalan parametreler ise yine d- ekseninde ve buna dik olan q- ekseninde yer alacaktır. Ayrıca *abc* eksen takımından dönüşümü yapılan stator akım vektörünün  $d_q$  eksen takımında yatay ve dikey olarak bileşenleri olacaktır. Böylece keyfi bir  $d_q$  eksenine yerine rotor akısının d- ekseninde yer aldığı, geriye kalan parametrelerin ise bu eksen ve bu eksene dik q- ekseninde yer aldığı bir sistem söz konusudur. Bu durumda akımın q- eksen bileşeni sıfıra eşittir. Aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\psi_r = \psi_{rd} \quad (3,16)$$

$$\psi_{rq} = 0 \quad (3,17)$$

Rotor akımının sadece d- ekseninde bileşeni olduğundan rotor akısı, d- ekseninde stator akımıyla kontrol edilecektir.  $I_{sd}$  akımıyla rotor akısı sabit tutulurken moment  $I_{sq}$  akımıyla doğru orantılı olarak değiştirilebilir. Böylece rotor döner alanı içerisindeki bu büyüklükler artık doğru akım büyüklükleridir. Akımın birbirine dik  $d_q$  eksenlerinde bileşenlerine ayrılabilmesi için rotor akımının modül ve açısı bulunmalıdır.

Rotor akısı ölçülebilen bir değişken değildir. Bu sebeple ölçülebilen değişkenler aracılığı ile rotor akısını elde etmeliyiz. Sonuç olarak rotor akısı elde edilince sabit tutulmak istenen bileşeni ve dönüşüm vektörlerinin oluşturacağı açı elde edilecektir. Rotor akımının elde edilmesi için kullanılan yöntemler mevcuttur.



Rotor akısından yönlendirmeli vektör kontrol yapılabilmesi için rotor aksının genlik ve faz açısı elde edilmelidir. Akının genliği vektör kontrolde geri besleme işareti olarak kullanılacaktır. Faz açısı ise Park ( $\alpha/\beta$ ) ve ters Park ( $d_q/\alpha\beta$ ) dönüşümlerinde hesaplamalar için kullanılacaktır.

Rotor akısı, hava aralığı akısının sensörler ile ölçülmesiyle elde edilir. Hava aralığı akısının  $\alpha\beta$  eksenindeki bileşenleri ise birbirine dik olarak yerleştirilmiş akı sensörleri aracılığı ile direkt olarak ölçülebilir. Rotor aksının genlik ve fazını bulabilmek için ölçülen hava aralığı akısı bileşenlerinden başka  $abc$  eksen takımındaki akımların da ölçülmesi gereklidir. Sonrasında ise  $abc$  eksen tamından  $\alpha\beta$  eksen takımına Clarke dönüşümü kullanılarak,  $\alpha\beta$  eksenindeki bileşenler elde edilmelidir. Hava aralığı akı bileşenleri,  $\alpha\beta$  eksen akım bileşenleri ve makine parametreleri kullanılarak rotor aksının genliği ve faz açısı bulunur. Faz açısı dönüşümlerde kullanılmak üzere hesaplanmıştır. Rotor aksının genliği ve stator akımın q- eksenindeki bileşimi kullanılarak moment denklemi yazılabilir.

$$E_{sq} = \omega_s \frac{L_s}{L_m} \psi_{rd} \quad (3,18)$$

$$M_e = p \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} \dot{I}_{sq} \quad (3,19)$$

Burada  $\omega_s$ , eksen takımının ve rotor akı vektörünün açısal hızıdır.

Clarke dönüşümünde, makinenin statorundaki  $abc$  eksen takımı için üç faza ait büyüklükler,  $\alpha\beta$  eksen takımında iki faza ait büyüklüklere dönüştürülür.

$$V_\alpha = V_a \quad (3,20)$$

$$V_\beta = \frac{(2V_b + V_c)}{\sqrt{3}} \quad (3,21)$$

$$\dot{I}_\alpha = \frac{2}{3} \dot{I}_a - \frac{1}{3} (\dot{I}_b - \dot{I}_c) = \dot{I}_a \quad (3,22)$$

$$\dot{I}_\beta = \frac{2}{\sqrt{3}} (\dot{I}_b - \dot{I}_c) = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_a + \frac{2}{\sqrt{3}} \dot{I}_b \quad (3,23)$$

$$\dot{I}_0 = \frac{2}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \quad (3,24)$$

$$(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) = 0 \quad (3,25)$$

$abc / \alpha\beta$  dönüşümünün tersi  $\alpha\beta / abc$  dönüşümü denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{I}_\alpha = \dot{I}_a \quad (3,26)$$

$$\dot{I}_b = -\frac{1}{2}\dot{I}_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{I}_\beta \quad (3,27)$$

$$\dot{I}_c = -\frac{1}{2}\dot{I}_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{I}_\beta \quad (3,28)$$

Senkron makine voltaj denklemi, rotor hızının fonksiyonu olan akı bağlantılarına bağlıdır. Eğer  $\psi_m$  kalıcı mıknatıslar tarafından sağlanan sabit akı ise, rotorun kalıcı mıknatıslar nedeniyle üç fazlı stator sargısındaki akı bağlantıları, 120 derece faz farkıyla şu şekilde verilebilir;

$$\begin{bmatrix} \psi_{am} \\ \psi_{bm} \\ \psi_{cm} \end{bmatrix} = \psi_m \begin{bmatrix} \sin\theta \\ \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3,29)$$

Burada  $\psi_{am}$ ,  $\psi_{bm}$  ve  $\psi_{cm}$ , rotorun kalıcı mıknatısı nedeniyle üç fazlı stator sargısındaki akı bağlantılarıdır ve  $\theta$  rotor pozisyonudur. Bu nedenle, üç faz için toplam hava boşluğu akısı, karşılık gelen faz akımı için akı bağlantısının, diğer fazlardaki akımlar için karşılıklı akı bağlantısının ve rotorun kalıcı mıknatısı nedeniyle üç faz stator sargısındaki akı bağlantılarının toplamıdır. Üç faz için hava boşluğu akımı bağlantısının denklemleri,

$$\begin{bmatrix} \psi_{am} \\ \psi_{bm} \\ \psi_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} + \psi_m \begin{bmatrix} \sin\theta \\ \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3,30)$$

Burada  $\psi_a$ ,  $\psi_b$  ve  $\psi_c$  sırasıyla  $a$ ,  $b$ ,  $c$  fazları için hava aralığı akıları;  $L_{aa}$ ,  $L_{bb}$ ,  $L_{cc}$  öz endüktanslardır ve  $M_{ab}$ ,  $M_{bc}$ ,  $M_{ca}$  ortak endüktanslardır ve  $\theta$  rotor pozisyonudur. Faz gerilimi, her fazdaki gerilim düşümü artı akı bağlantısının değişim hızı nedeniyle oluşan gerilim düşümdür. DMSG'ün üç fazındaki gerilim denklemleri şöyle tanımlanabilir;

$$V_a = \dot{I}_a R_a + \frac{d\psi_a}{dt} \quad (3,31)$$

$$V_b = \dot{I}_b R_b + \frac{d\psi_b}{dt} \quad (3,32)$$

$$V_c = \dot{I}_c R_c + \frac{d\psi_c}{dt} \quad (3,33)$$

$V_a, V_b, V_c$ , üç faz gerilimi,  $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ , üç faz akımları ve  $R_a, R_b, R_c$ , üç faz stator dirençleridir. Bu denklemler matris biçiminde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (3,34)$$

$V_a, V_b, V_c$  rotor pozisyonu  $\theta$ 'nın fonksiyonu olan akı bağıntı bileşenlerine ve dolayısıyla rotor hızı  $\omega$ 'nın fonksiyonudur. Bu nedenle, gerilim denklemlerinin katsayıları, makinenin hareketsiz olduğu durumlar dışında zamana göre değişim gösterir. Hesaplamaların zorluğundan uzak durmak için, tüm denklemlerin, makine denklemlerinin artık rotor pozisyonuna bağlı olmadığı senkronize dönen rotor referans çatisına değiştirilmesi gerekir. Bu dönüşümler, daha önce bahsedilen Clarke ve Park dönüşüm denklemlerini kullanarak iki adımda gerçekleştirilebilir [37]. İlk adımda,  $V_a, V_b, V_c$  üç fazlı sabit abc ekseninden iki fazlı sabit  $\alpha$ - $\beta$  eksenine ve ikinci aşamada, sabit  $\alpha$ - $\beta$  ekseninden senkronize dönen d-q eksenine dönüştürülecektir. Durağan d-q-0 eksenindeki dönüştürülen faz değişkenleri matris biçiminde şöyle yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\beta \\ X_\alpha \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (3,35)$$

Karşıt olarak denklem takımı tersten de yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} X_\beta \\ X_\alpha \\ X_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3,36)$$

Burada  $X_a$ ,  $X_b$  ve  $X_c$  sırasıyla  $a$ ,  $b$  ve  $c$  faz miktarlarıdır, sırasıyla  $X_\alpha$ ,  $X_\beta$  ve  $X_0$ , sırasıyla a-ekseni,  $\beta$ -ekseni ve sıfır bileşenleridir. Matris elemanı  $X$ , voltaj veya akımı temsil edebilir.

Dengeli üç faz için, sıfır bileşeni ( $X_0$ ) yoktur ve q-ekseni bir fazla çakışacak şekilde başlangıç rotor pozisyonunu  $\theta(0) = 0$  ayarlamak uygun olur. Bu koşullar altında denklem (3.35) ve (3.36) sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\beta \\ X_\alpha \end{bmatrix} \quad (3,37)$$

$$\begin{bmatrix} X_\beta \\ X_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3,38)$$

Sabit  $\alpha$ - $\beta$  çatısının ve senkron olarak dönen d-q çatısının nispi konumu Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te gösterilmiştir [38]. Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'ün yardımıyla, sabit  $\alpha$ - $\beta$  çatı, senkron olarak dönen d-q çatısına aşağıdaki gibi dönüştürülebilir. Bu Park dönüşümü adıyla anılmaktadır.

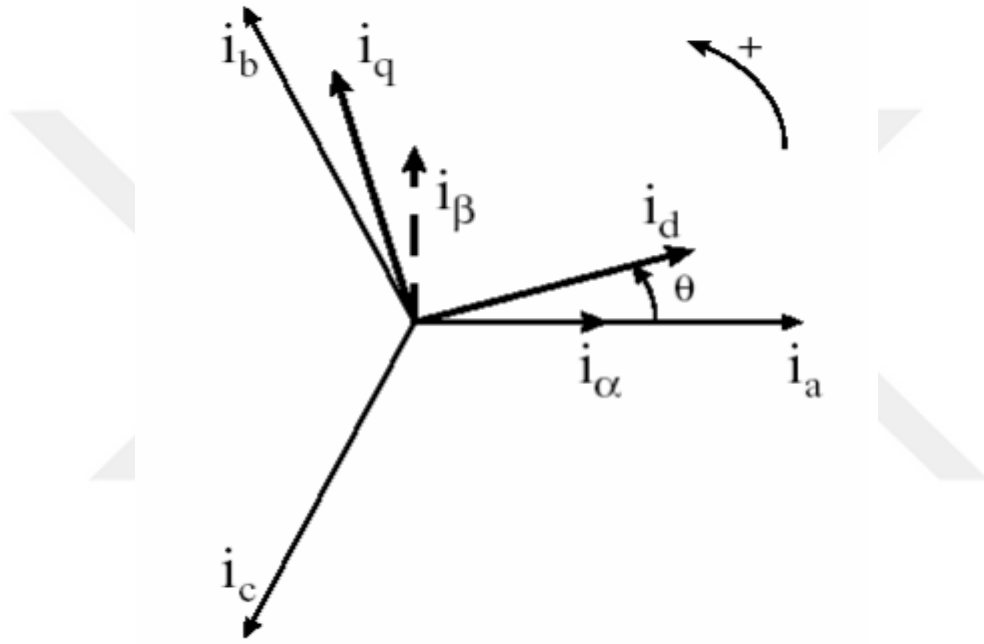
$$\begin{bmatrix} X_q \\ X_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\beta \\ X_\alpha \end{bmatrix} \quad (3,39)$$

Bu denklem takımı ters olarak yazılabilir;

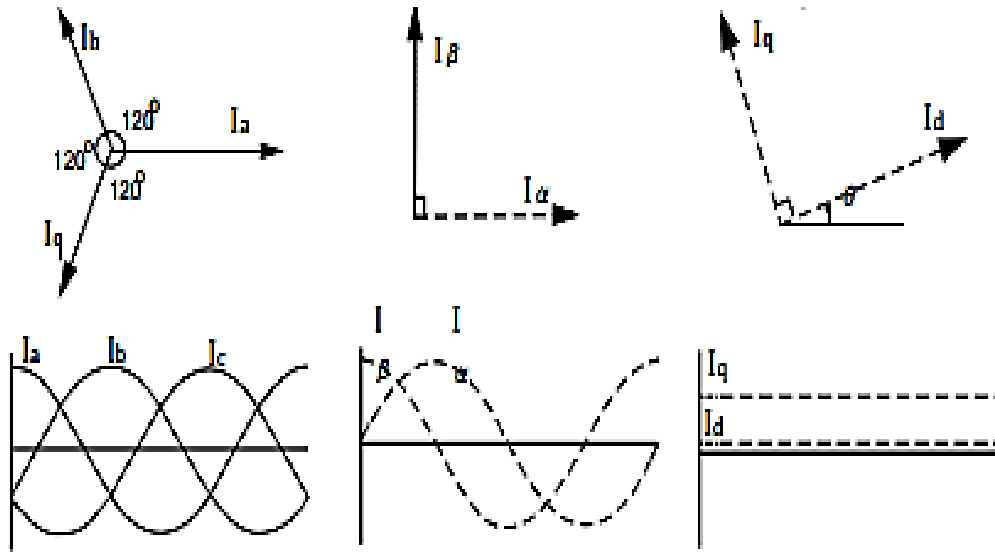
$$\begin{bmatrix} X_\beta \\ X_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_q \\ X_d \end{bmatrix} \quad (3,40)$$

DMSG sürücüsünün d-q eksen modelini türetmek için aşağıdaki dört varsayım yapılmıştır:

- a) Girdap akımı ve histerezis kayıpları ihmal edilebilir.
- b) İndüklenmiş elektromanyetik alan sinüzoidaldir.
- c) Manyetik doyma ihmal edilir.
- d) Üç fazın stator direnci dengelidir.



Şekil 3.12. abc eksen takımı, durağan  $\alpha\beta$  eksen takımı ve senkron hızla dönen dq eksen takımı [38]



Şekil 3.13. 3-faz referans eksenler [38]

Şekil 3.14, yukarıda detaylı bir şekilde anlatılan vektör kontrol için gerekli Park ve Clarke dönüşümlerin bir bütünleşik gösterimidir.  $abc / \alpha\beta$  ve  $\alpha\beta / abc$  dönüşümleri Clarke ve ters Clarke dönüşümlerini ifade etmektedir.  $d_q / \alpha\beta$  ve  $\alpha\beta / d_q$  dönüşümleri ise Park ve ters Park dönüşümlerini ifade etmektedir.

Bu voltaj denklemleri, rotor pozisyonu  $\theta$ 'nın fonksiyonu olan akı bileşenlerine bağlıdır ve voltaj denklemlerinin katsayıları, makinenin hareketsiz olduğu durumlar dışında zamana göre değişir. Hesaplamaların zorluğundan uzak durmak için, tüm denklemlerin, makine denklemlerinin, artık rotor pozisyonuna bağlı olmadığı senkronize döner rotor referans eksenine dönüştürülmesi gerekir. Bu dönüşümler, Park'ın dönüşüm denklemlerini kullanarak iki adımda gerçekleştirilebilir. Önce abc eksen takımından  $\alpha\beta$  eksen takımına daha sonra ise  $dq$  eksen takımına dönüşüm sağlanır.

<b>a, b, c -&gt; <math>\alpha, \beta</math></b>	<b>d, q -&gt; <math>\alpha, \beta</math></b>
$i_\alpha = \frac{2}{3} \cdot i_a - \frac{1}{3} (i_b - i_c)$ $i_\beta = \frac{2}{\sqrt{3}} (i_b - i_c)$ $i_o = \frac{2}{3} (i_a + i_b + i_c)$ $\Rightarrow$ $i_\alpha = i_a$ $i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot i_a + \frac{2}{\sqrt{3}} i_b$ $i_a + i_b + i_c = 0$	$i_\alpha = i_{sd} \cdot \cos(\theta) - i_{sq} \cdot \sin(\theta)$ $i_\beta = i_{sd} \cdot \sin(\theta) + i_{sq} \cdot \cos(\theta)$
<b><math>\alpha, \beta</math> -&gt; d, q</b>	<b><math>\alpha, \beta</math> -&gt; a, b, c</b>
$i_{sd} = i_\alpha \cdot \cos(\theta) + i_\beta \cdot \sin(\theta)$ $i_{sq} = -i_\alpha \cdot \sin(\theta) + i_\beta \cdot \cos(\theta)$	$i_a = i_\alpha$ $i_b = -\frac{1}{2} \cdot i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_\beta$ $i_c = -\frac{1}{2} \cdot i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_\beta$

Şekil 3.14. Eksen takımları arasında dönüşüm denklemleri

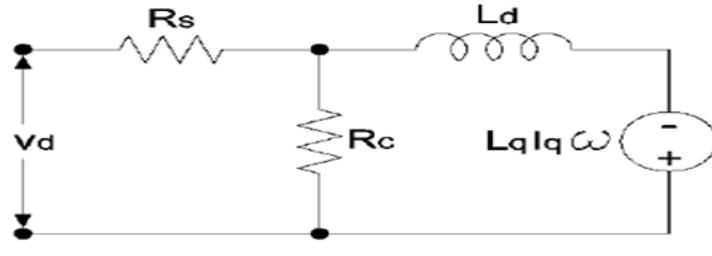
### 3.2.5 DMSG'ün matematiksel modeli

Şekil 3.15'de d- ve q- eksenlerindeki DMSG'ün eşdeğer devresi verilmiştir [39].

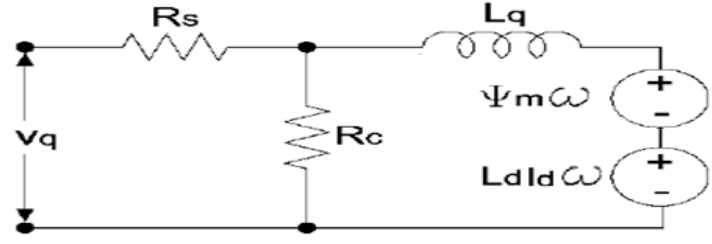
$$V_q = I_q R_s + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d \quad (3,41)$$

$$V_d = I_d R_s + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q \quad (3,42)$$

Burada  $V_d$  ve  $V_q$ , d-q eksenleri voltajları ve  $I_d$ ,  $I_q$ , d-q eksenleri akımları,  $\psi_d$ ,  $\psi_q$ , d-q eksenleri akılarıdır ve  $R_s$  faz başına stator direncidir ve  $\omega$  elektriksel açısal hızdır. Bu durumda  $\psi_d$  ve  $\psi_q$  aşağıdaki gibi yazılabilir.



(a)



(b)

Şekil 3.15. DMSG'ün (a) d- ekseni eşdeğer devresi, (b) q- ekseni eşdeğer devresi

$$\psi_q = L_q \dot{I}_q \quad (3,43)$$

$$\psi_d = L_d \dot{I}_d + \psi_m \quad (3,44)$$

Burada  $L_d$  ve  $L_q$  d- ve q- eksenlerine ait öz indüktanslardır. Denklem (3.43) ve (3.44), denklem (3.41) ve (3.42)'de yerine yazılırsa;

$$V_q = \dot{I}_q R_s + L_q \frac{d\dot{I}_q}{dt} + \omega L_d \dot{I}_d + \omega \psi_m \quad (3,45)$$

$$V_d = \dot{I}_d R_s + L_d \frac{d\dot{I}_d}{dt} - \omega L_q \dot{I}_q \quad (3,46)$$

Bu ifadeler düzenlenerek denklem (3.47) ve (3.48) aşağıdaki gibi yazılır.

$$\frac{d\dot{I}_d}{dt} = \frac{1}{L_d} V_d - \frac{R_s}{L_d} \dot{I}_d + \frac{L_q}{L_d} \omega \dot{I}_q \quad (3,47)$$

$$\frac{d\dot{I}_q}{dt} = \frac{1}{L_q} V_q - \frac{R_s}{L_q} \dot{I}_q - \frac{L_d}{L_q} \omega \dot{I}_d - \frac{1}{L_q} \omega \psi_m \quad (3,48)$$



Rüzgâr türbini generatör şaft sistemi için aşağıdaki denklemde verilen topaklanmış kütle modelini kullanırken, DMSG'ün hareket denklemi şöyle ifade edilebilir;

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_t - T_g - B\omega_r \quad (3,49)$$

Burada  $J$ , rüzgâr sisteminin toplam (türbin ve generatör) atalet momenti ( $\text{Kg.m}^2$ ),  $B$  sürtünme katsayısı ( $\text{Kg.m}^2 / \text{s}$ ),  $T_t$  mekanik momenttir ( $\text{Nm}$ ),  $\omega_r$ , rotor dönüş hızıdır ( $\text{rad/s}$ ).

$$T_t = P_m / \omega_r \quad (3,50)$$

$$\omega_r = 2\omega / P_n \quad (3,51)$$

$P_n$ , DMSG'ün çift kutup sayısını ifade etmektedir.  $\omega$  ise elektriksel açısal hızdır. Bu ifade elektriksel açısal hızın, rotorun açısal hızı ile kutup sayısının çarpımından elde edildiğini bize ifade eder. Elektriksel güç ( $P_e$ ) ve elektriksel moment ( $T_g$ ) ifadesi aşağıdaki gibi yazılacaktır.

$$P_e = \frac{3}{2} \omega \frac{P_n}{2} \{ \psi_m I_q + (L_d - L_q) I_d I_q \} \quad (3,52)$$

$$T_g = \frac{3}{2} \frac{P_n}{2} \{ \psi_m I_q + (L_d - L_q) I_d I_q \} \quad (3,53)$$

$L_q$  ve  $L_d$  indüktansları, rotorun yapısından dolayı faz indüktansı ile rotor pozisyonu arasındaki ilişkiyi temsil eder. Örneğin,  $a$  ve  $b$  fazları arasında ölçülen endüktans (faz  $c$  açık bırakılmış);

$$L_{ab}(\theta) = L_d + L_q + (L_q - L_d) \cos(2\theta + \frac{\pi}{3}) \quad (3,54)$$

$\theta$  elektiriksel açıyı ifade etmektedir. Şekil 3.16, rotoru çıkık kutuplu DMSG için, faz açısının bir fonksiyonu olarak ortak indüktansın ( $L_{ab}$ ) değişimini göstermektedir.

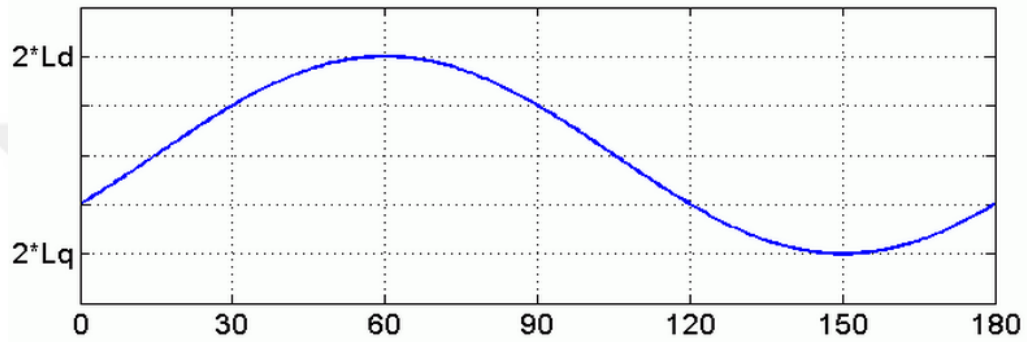
$$L_d = \max(L_{ab})/2 \quad (3,55)$$

$$L_q = \min(L_{ab})/2 \quad (3,56)$$

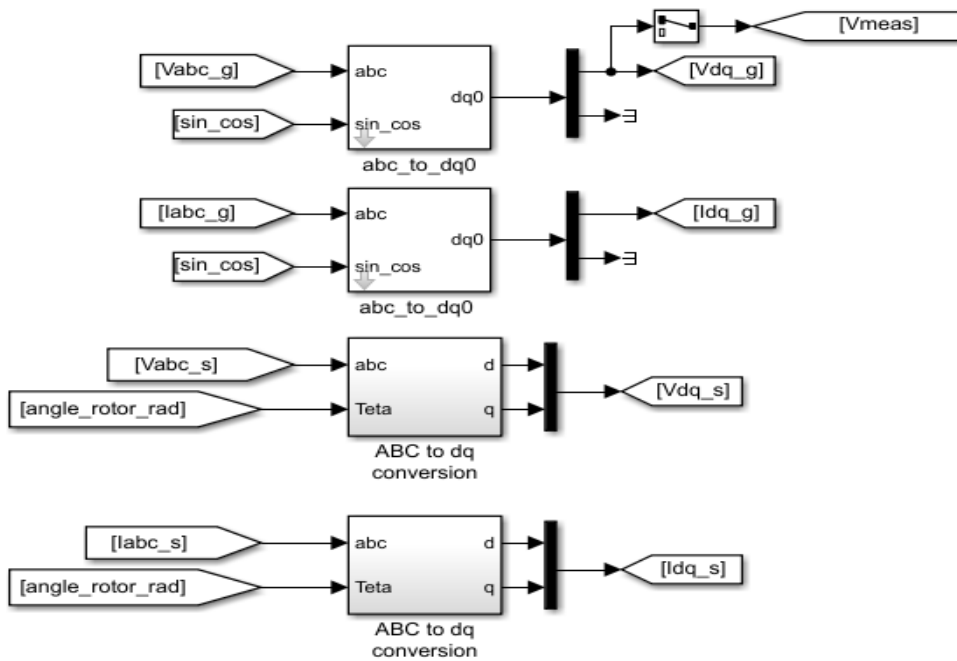
Rotoru yuvarlak kutuplu DMSG için ise q- ve d- eksenli indüktansları farklıdır. Bu durumda;

$$L_d = L_q = L_{ab}/2 \quad (3,57)$$

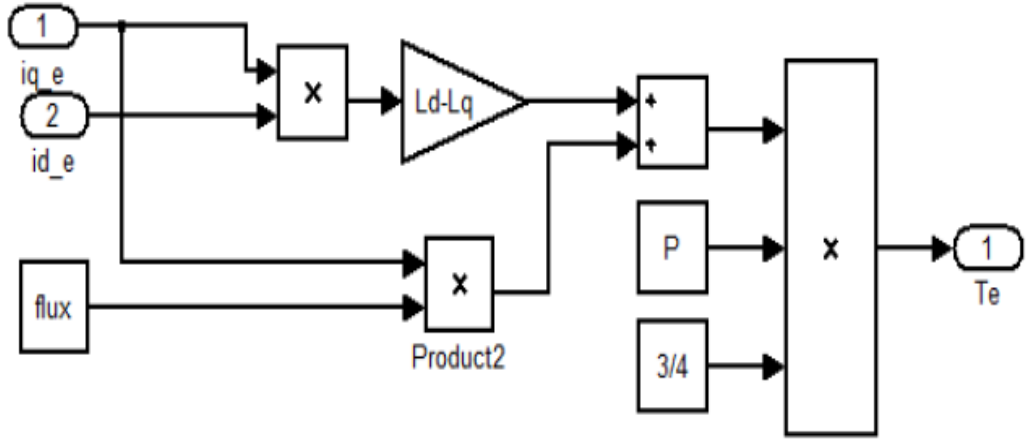
Şekil 3.17, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19 Matlab/Simulink'te gerçekleştirilmiş simülasyonu göstermektedir.



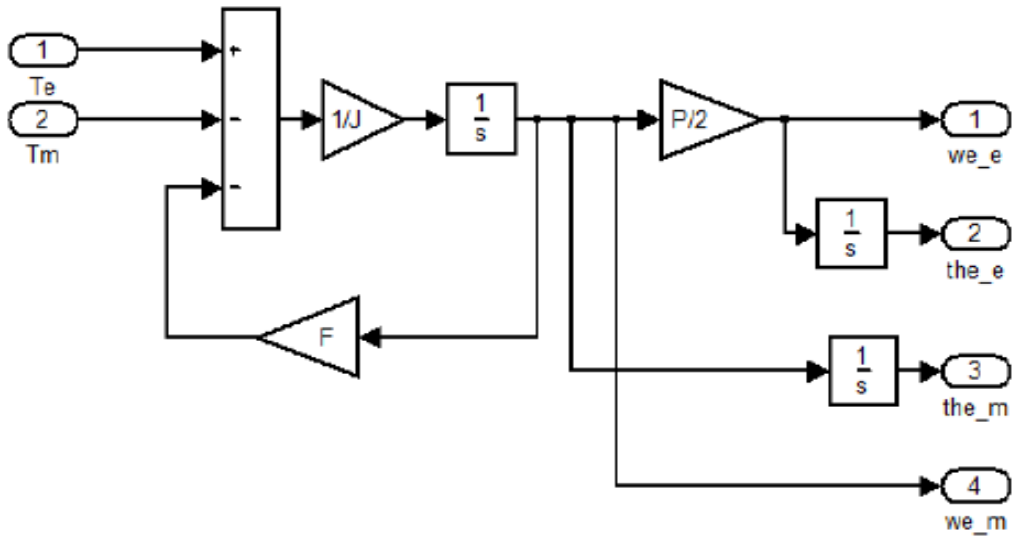
Şekil 3.16. Rotoru çıkık kutuplu DMSG'de  $L_{ab}(\theta)$  değişimi [40]



Şekil 3.17. Park ve Clarke dönüşümü blok görünümü



Şekil 3.18.  $T_e$ , Elektromanyetik momentin elde edilmesi



Şekil 3.19. Rotor hızı ve rotor açısının elde edilmesi

## 4. DMSG KONTROL YÖNTEMLERİ VE MATEMATİKSEL MODELİ

### 4.1. Vektör Kontrolü

Vektör kontrolü AA makinenin en popüler kontrol tekniğidir. d-q referans çatılarında, pürüzsüz hava boşluklu makinenin elektromanyetik momentinin ifadesi, ayrı olarak uyarılan DA makinesinin momentinin ifadesine benzer. Daimî mıknatıs makinesi durumunda kontrol, genellikle rotor akı uzay vektörüne bağlı referans ekseninde (d-q) yapılır. DA motor olması durumunda, geliştirilen moment;

$$T_g = KI_f I_a \quad (4,1)$$

Burada  $I_a$  armatür akımı,  $I_f$  alan akımı ve  $K$  ise sabittir. Hem  $I_a$  hem  $I_f$ , ortogonal ve ayrıştırılmış vektörlerdir.

Denklem 3.53'de moment ifadesi iki terimden oluşmaktadır. Birinci terim daimi mıknatıs akısı ve akımın q- eksenini bileşeni tarafından oluşturulan daimi mıknatıs momentini ifade eder. İkinci terim ise q- ve d-eksenleri indüktansları ( $L_d$ ,  $L_q$ ) ile q- ve d- eksen akımlarının etkileşimi sonucu üretilen relüktans momentini ifade eder. Daimî mıknatısları yüzeye monte rotora sahip DMSG'de  $L_d$  ve  $L_q$  indüktansları eşittir ve dolayısıyla relüktansları eşittir. Bu durumda relüktans momenti sıfır kabul edilir. Ayrıca d- eksen akımı referans olarak sıfır alınmaktadır ( $I_d=0$ ). Böylece moment denklemi  $I_q$  ile doğrusal hale gelir ve kontrol tasarımı daha kolay hale gelir. Başka bir şekilde ifade edilirse DMSG'ün rotorundaki manyetik alan kalıcı mıknatıslar vesilesiyle elde edildiğinden,  $I_s$  stator akım bileşenlerinden rotor manyetik alanını oluşturan d-ekseni bileşeni  $I_{sd}$ 'ye ihtiyaç yoktur. Ayrıca stator bakır kayıplarını azaltmak için, bu akım bileşeni sıfırda tutulur. Bu durumda denklem (4.2) şu şekilde yazılabilir;

$$T_g = \frac{3}{2} \frac{P_n}{2} \psi_m I_q = K_t I_q \quad (4,2)$$

Daimî mıknatıslı senkron makinenin motor olarak veya generatör olarak çalışması, stator akımının q- eksenini bileşeninin işaretine bağlıdır. Akımın q- eksenini bileşeni negatif olursa makine generatör olarak çalışır. Akımın q- eksenini bileşeni pozitif olursa makine motor olarak çalışır. Akımın q- eksenini bileşeninin işareti makinenin elektriksel moment ( $T_g$ ) işaretine bağlıdır.  $T_g$  moment işareti negatif ise

akımın q- eksenini bileşeni negatiftir,  $T_g$  moment işareti pozitif ise akımın q- eksenini bileşeni pozitiftir.

Ancak  $I_d = 0$  varsayımıyla, denklem 4.3'e göre, akı bir DMSG'de kontrol edilemez. Uygun bir akı kontrolü olmadan, makine/dönüştürücü sisteminin nominal kapasitesi içinde voltaj ve akım kontrol edilebilir ancak makine nominal hızın üzerinde çalıştırılmaz. Bu tez çalışmasında, akı, makinenin nominal hızın altında ve üstünde verimli bir şekilde kontrol edilebilmesi için uygun şekilde kontrol edilecektir. Böylece DMSG,  $I_q$ 'nin momenti kontrol ettiği ve  $I_d$ 'nin akıyı kontrol ettiği ayrı ayrı uyarılmış DA motor gibi kontrol edilebilir.

Fazör gösterimi kullanmak için d eksenini referans fazör olarak alınır, kararlı hal faz gerilimi  $V_a$ , denklem (4.4) ve (4.5)'deki gerilim denklemleri kullanılarak sabit hal d-q eksen geriliminden elde edilebilir.

$$V_a = V_d + jV_q \quad (4,3)$$

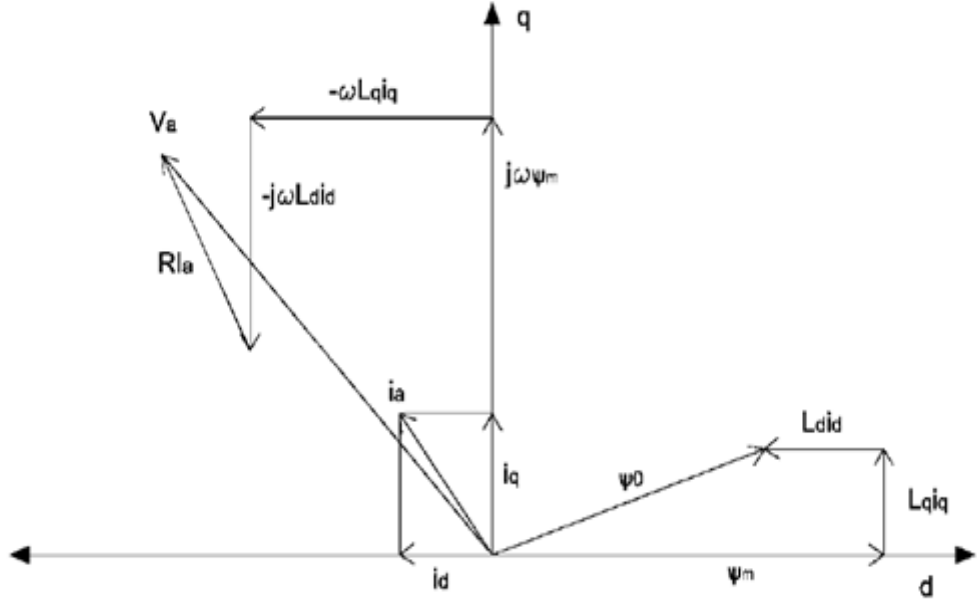
$$V_a = R_s I_a - \omega_r L_q I_q + j\omega_r L_d I_d + j\omega_r \psi_m \quad (4,4)$$

$$I_a = -I_d + jI_q \quad (4,5)$$

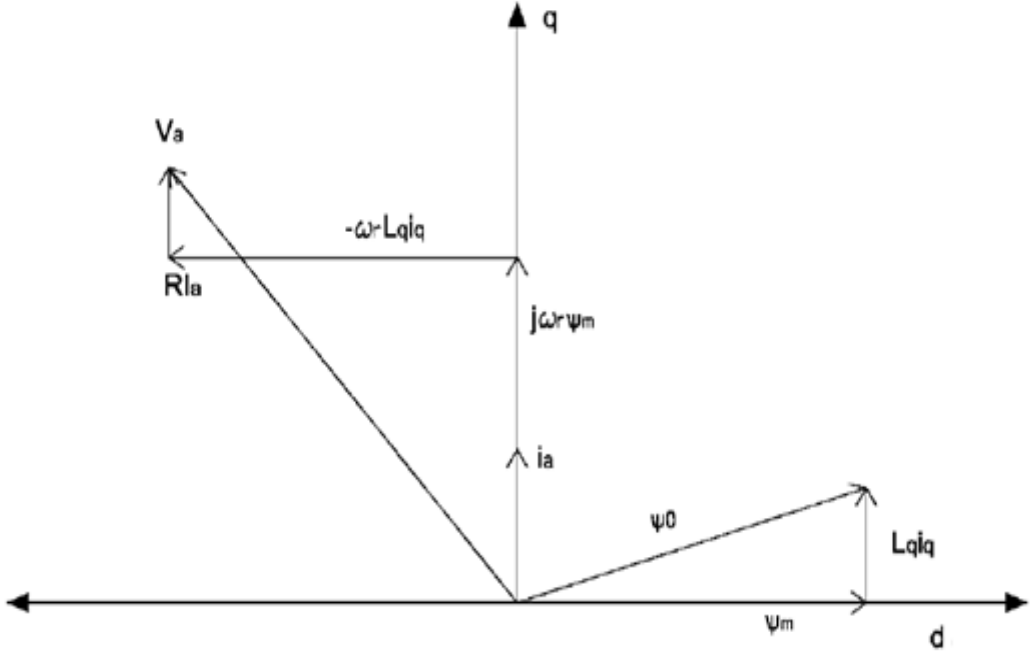
Daimî mıknatısları yüzeye monte rotora sahip DMSG'de, d eksenini akımını negatiftir ve daimî mıknatıslar tarafından sağlanan ana akıyı manyetikten arındırır. Böylece  $I_d$ 'nin mutlak değerini almak için denklemi şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$V_a = R_s I_a - \omega_r L_q I_q - j\omega_r L_d I_d + j\omega_q \psi_m \quad (4,6)$$

Denklem (4.6) baz alınarak, daimî mıknatısları yüzeye monte rotora sahip DMSG'ün temel vektör diyagramı Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Stator akım vektörü, ayrı d-q akım bileşenlerini kontrol edilebilir.



(a)



(b)

Şekil 4.1. Daimî mıknatısları yüzeye monte rotora sahip DMSG vektör diyagramı, (a) genel vektör diyagramı (b)  $I_d=0$  alınarak düzenlenmiş vektör diyagramı [38]

## 4.2. Gerilim Kaynağı Dönüştürücü (GKD)

Generatör çıkışından elde edilen elektrik enerjisi eğer gerekiyorsa bir güç elektroniği sistemi kullanılarak bir trafo üzerinden şebekeye bağlanabilir veya doğrudan bir yükü besleyebilir. Değişken rotor hızlarında rüzgâr enerjisi üreten sistemden elde edilen gücün maksimum olması için yani sistemin kontrolünün yapılabilmesi için güç elektroniği dönüştürücü devreleri kullanılır. Bu güç elektroniği dönüştürücü devreleri aracılığıyla generatör yükü değiştirilerek generatörün hızı kontrol edilir. Dönüştürücü çıkış işaretleri, devredeki yarı iletken elemanlara gönderilen tetikleme sinyalleri ile ayarlanır.

### 4.2.1. Darbe genişlik modülasyonu (DGM)

Darbe genişlik modülasyonu, yük'e uygun voltaj üretmek için darbe genişliğini kullanmaktır. Darbe genişlik modülasyonu elektrik makine sürme devrelerinde, güç elektroniği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kontrol tamamen anahtarlama ile sağlanmaktadır. Genel bir ifadeyle anahtarlama frekansı ne kadar yüksekse DGM ile aktarılan güç o kadar fazla olur. DGM ile beraber görev periyodu terimi sıkça kullanılmaktadır. Görev periyodu, anahtarların iletimde olduğu süre ile ilgilidir. Yine genel bir ifadeyle, görev periyodu ne kadar büyükse aktarılan güç o kadar fazla olur denebilir. Bir gerilim dalgası oluşturmak için çok sayıda anahtarlama yapılmaktadır.

Güç elektroniğinin düzenlenmesi, invertörü kurmak için belirli bir tasarımda yer almaktadır. Eviriciyi istenen çıkışlara göre çalıştırmak için, sırayla düzenlenmiş anahtarları açık duruma getirip kapalı konuma getirmesi gerekir. Yarı iletken anahtarları açık veya kapalı duruma getirmek için tetikleme gerekir. Tetikleme parametrelerine dayanarak, anahtarlar gerekli ihtiyaçları yerine getirir. Tetiklemenin üretilmesi çeşitli yöntemlerle yapılır. Bu yöntemlere tetikleme üretme yöntemleri [41] [42] denir. Eviricideki anahtarların kontrolüne Tetikleme darbe genişliği değiştirilerek darbe genişlik modülasyonu (DGM) denir. Güç elektroniği makine kontrol uygulamalarında kullanılan farklı DGM türleri vardır.

En basit haliyle, diğer modülasyon türlerinde olduğu gibi DGM çıkış darbeleri iki kontrol sinyali, yani bir taşıyıcı sinyal ve bir referans sinyali karşılaştırılarak oluşturulur. Bu taşıyıcı tabanlı DGM olarak bilinir. Taşıyıcı sinyal,

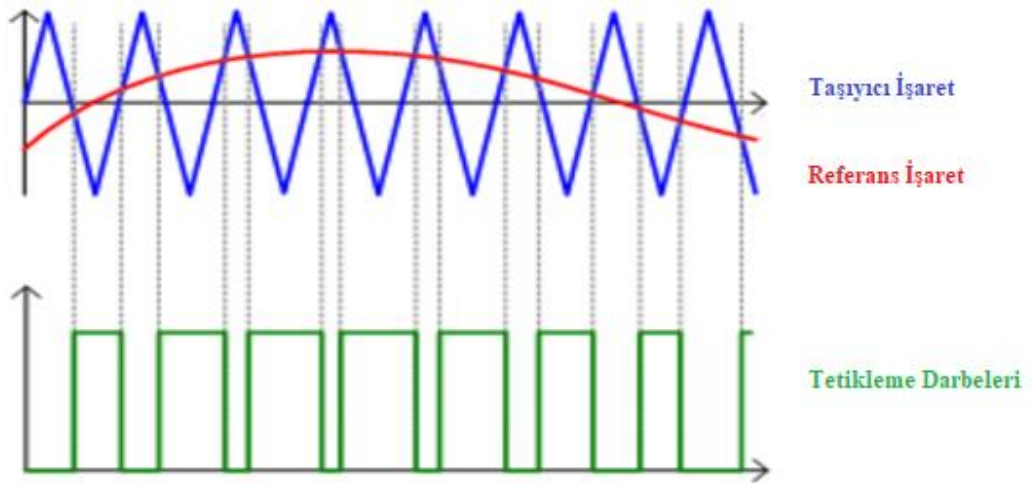
yüksek anahtarlama frekanslı üçgen dalga şeklindedir. Referans sinyali herhangi bir şekilde olabilir. Referans sinyalin büyüklüğü, taşıyıcı sinyalin büyüklüğünden azsa, çıktı, referans sinyalinin şeklini takip edecektir.

Matematiksel olarak fonksiyon şu şekilde ifade edilebilir;

$$f_{DGM}(x) = \begin{cases} f_{ref}(x) > f_{taşıyıcı}(x) & ise & +V_{dc} \\ f_{ref}(x) < f_{taşıyıcı}(x) & ise & -V_{dc} \end{cases} \quad (4,7)$$

Referans sinyalinin anlık büyüklüğü, belirli bir noktada taşınan sinyalden büyükse, inverter bacağına çıkış voltajı, DA bağlantısının pozitif tarafına bağlanmalıdır. Taşıyıcı sinyal modülasyon sinyalinden büyükse, çıkış DA bağlantısının negatifine bağlanmalıdır. Bu yaklaşımı kullanarak, çıkış dalga formu istenen herhangi bir dalga şeklini takip etmek için yapılabilir. Makinelerde sinüzoidal ve trapezoidal en yaygın olanlardır. Şekil 4.2’de bipolar modülasyon dalga şekilleri görülmektedir [43].

Taşıyıcı bazlı DGM'ye bir alternatif, "anında" anahtarlama darbeleri üretmektir. Bu yaklaşımda, bir anahtarlama çevrimi üzerindeki çıkış voltajları istenen anlık düşük frekans çıkış voltajlarına eşit olacak şekilde tasarlanmıştır. Bununla birlikte, önceden bir dizi üç fazlı modüle edici darbe üretmeye gerek yoktur. Bu yaklaşım kavramsal olarak modüle edici ve taşıyıcı sinyal darbeleri üretmekten daha karmaşık olmakla birlikte, genellikle sürücülerde uygulanır.



Şekil 4.2. Referans ve taşıyıcı sinyallerden tetikleme darbesinin elde edilmesi



Çeşitli DGM yöntemlerinin hem çalışmasını analiz etmek hemde verimli düzgün sonuç elde etmek için bazı temel parametreler takip edilmelidir. Bu parametrelerden modülasyon indeksi ( $M_i$ ), modülasyon oranı ( $M_f$ ), DGM yöntemlerinin kilit noktalarıdır.

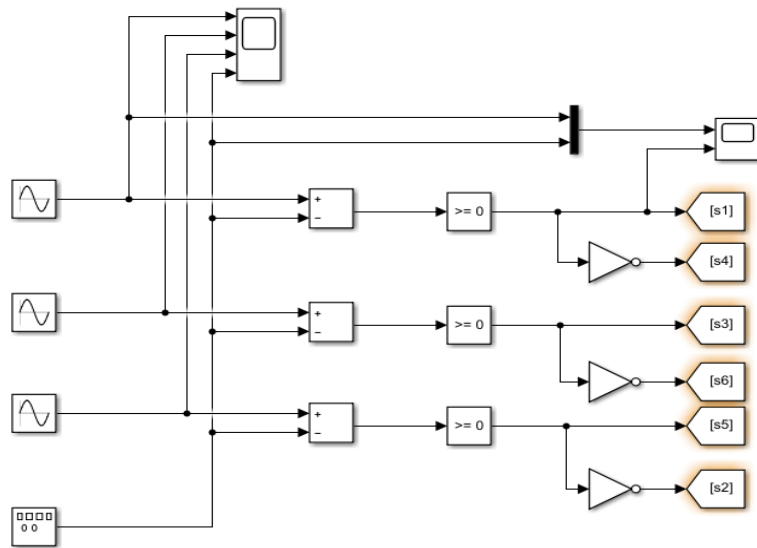
$$M_i = V_r/V_t \quad (4,8)$$

Burada  $V_r$ , referans sinyalin genliği,  $V_t$  ise taşıyıcı sinyalin genliğidir. Bu orana modülasyon indeksi  $M_i$  denir. Modülasyon indeksi ayarlanarak çıkış geriliminin ana harmonik genliği ayarlanır.  $V_t$  sabit tutulurken  $V_r$  artırılıp azaltılarak çıkış gerilim genliği ayarlanabilir.

$$M_f = f_t/f_r \quad (4,9)$$

Burada  $M_f$  oranı, taşıyıcı sinyal frekansının referans sinyalin frekansına oranıdır. Bu oranın minimum 9 olması istenmektedir [44]. Bu oran ne kadar büyükse harmonik bileşenler ana harmonikten o kadar uzaklaşır.  $f_t$ , taşıyıcı sinyal (bu çalışmada testere dişi sinyaldir) frekansı DGM'nun anahtarlama frekansını belirler.  $f_r$ , referans sinyal frekansı ise DGM'nun çıkış frekansını belirlemektedir.

Şekil 4.3'de klasik 3 faz DGM generatör tetiklemeli bir inverter modellenmiştir. Buradaki temel mantık aynı kolda ki anahtarlardan sadece bir tanesinin iletimde olmasıdır. Bu sebeple aynı koldaki anahtarlara verilen darbeler diğerinin değili olacak şekilde modellenecektir.



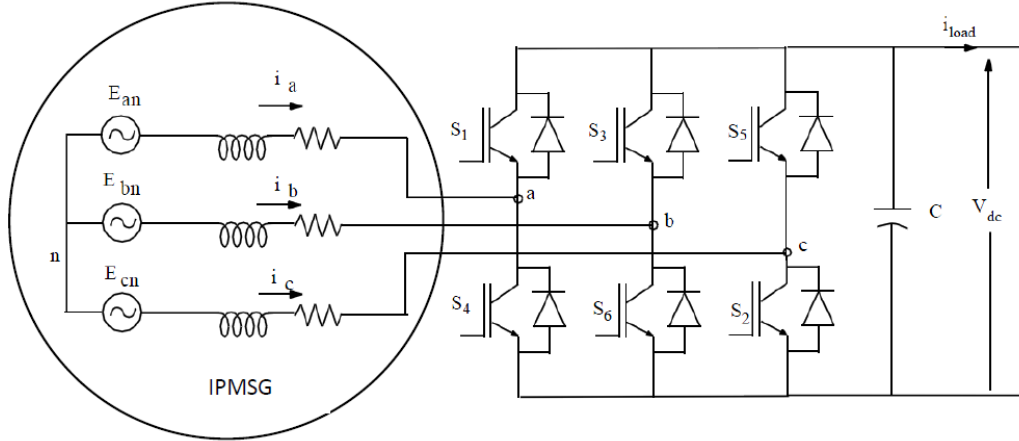
Şekil 4.3 Basit şekliyle simulinkte DGM elde edilmesi

#### 4.2.2. Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu

DMSG'ün AA çıkış voltajını sabit bir DA voltajına dönüştürmek için 3 faz kontrollü bir doğrultucu devresi, Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Doğrultucu anahtarları (S1-S6) iyi bilinen (DGM) kullanılarak kontrol edilebilir.

Darbe genişlik modülasyonu son yıllarda yoğun bir şekilde incelenmiştir. Aşağıdaki amaçları gerçekleştirmek için birçok farklı DGM yöntemi geliştirilmiştir: geniş doğrusal modülasyon aralığı

- düşük anahtarlama kaybı
- anahtarlama dalga şeklindeki düşük toplam harmonik bozulma (THD)
- kolay uygulama
- düşük hesaplama süresi [45].



Şekil 4.4. 3-faz DGM kontrollü doğrultucunun basit temsili [46, 49]

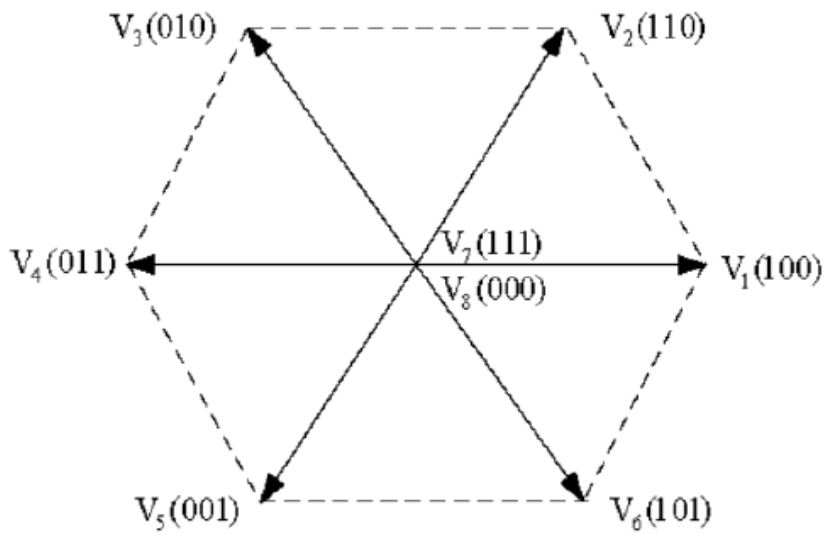
Güç elektroğinde kullanılan birçok DGM tekniği vardır. DGM tekniklerinin sınıflandırması şu şekilde verilebilir;

- Sinüzoidal DGM (SDGM)
- Seçilmiş harmonik eliminasyon (SHE) DGM
- Minimum dalgalanma akımı DGM
- Uzay vektör DGM (UVM)
- Rastgele DGM
- Histerisiz bant akım kontrolü DGM

- Anlık akım kontrolüne sahip sinüsoidal DGM
- Delta modülasyonu
- Sigma-delta modülasyonu

UVDGM yöntemi, gelişmiş, düşük hesaplamalı bir DGM yöntemidir ve değişken frekanslı sürücü uygulamaları için tüm DGM teknikleri arasında muhtemelen en iyisidir. Dönüştürücüler için daha çok tercih edilen sinüzoidal DGM (SDGM) ve harmonik eliminasyonlu DGM gibi DGM teknikleri yerlerini mikroişlemciler ile uygulanması daha kolay olan uzay vektör DGM (UVDGM) tekniğine bırakmıştır [47].

UVDGM anahtarların görev döngüsünü hesaplamak için uzay-vektör kavramını kullanır. Şekil 4.5, tipik üç fazlı DGM doğrultucu devresinin topolojisini, gerilim faz diyagramını göstermektedir. Faz giriş gerilimi açısıyla belirlenen altı anahtarlama bölgesi vardır. Her fazdaki üst ve alt anahtarlar her zaman tamamlayıcı olarak çalıştırılır. İki fazın anahtarları DGM modu tarafından sürülürken, başka bir fazdan olanlar her bölge boyunca her zaman açılır veya kapatılır. Çizelge 4.1, anahtarlama şemalarını ve her bölgedeki mevcut voltaj vektörlerini özetlemektedir. Gerilim uzayı vektör diyagramı ve her gerilim vektörü için üst anahtarların ( $S_1$ ,  $S_3$  ve  $S_5$ ) anahtarlama mantıkları Çizelge 4.1'de görülebilir [48].



Şekil 4.5. Uzay vektör için gerilim faz diyagramı [38, 49]

Çizelge 4.1. Her bölgedeki anahtarlama vektörleri ve anahtarlama şeması

Bölge	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	Mevcut gerilim vektörleri
1	DGM	DGM	KAPALI	AÇIK	DGM	DGM	V <sub>5</sub> ,V <sub>6</sub> ,V <sub>1</sub> ,V <sub>8</sub>
2	AÇIK	KAPALI	DGM	DGM	DGM	DGM	V <sub>6</sub> ,V <sub>1</sub> ,V <sub>2</sub> ,V <sub>7</sub>
3	DGM	DGM	DGM	DGM	KAPALI	AÇIK	V <sub>1</sub> ,V <sub>2</sub> ,V <sub>3</sub> ,V <sub>8</sub>
4	DGM	DGM	AÇIK	KAPALI	DGM	DGM	V <sub>2</sub> ,V <sub>3</sub> ,V <sub>4</sub> ,V <sub>7</sub>
5	OFF	AÇIK	DGM	DGM	DGM	DGM	V <sub>3</sub> ,V <sub>4</sub> ,V <sub>5</sub> ,V <sub>8</sub>
6	DGM	DGM	DGM	DGM	AÇIK	KAPALI	V <sub>4</sub> ,V <sub>5</sub> ,V <sub>6</sub> ,V <sub>7</sub>

Kaskat dönüştürücü iki unsurdan oluşur. Şebeke tarafında, DA-baranın DA akımından bir AA akımı üreten bir gerilim kaynağı dönüştürücüsü (GKD) vardır. Bu bloğa invertör denir. Makine tarafında, AA akımını makineden DA akımına dönüştüren başka bir GKD vardır. Bu unsur ise aktif doğrultucudur. Her iki GKD de, Şekil 4.4’de gösterilenle aynı topolojiye sahiptir, sadece güç yönü farklıdır.

GKD, her iki anahtarla birlikte üç koldan oluşur. Bu anahtarlar IGBT'lerdir (Yalıtımlı Kapı Bipolar Transistörleri) ve orta sınıf güç uygulamaları için güç elektroniğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Küçük tetikleme voltajları uygulanarak nispeten yüksek frekanslarda (maks. 20 kHz) kolayca anahtarlanabilir. Her kol için, aynı anda sadece bir anahtar iletimdedir, aksi takdirde DA-kol’un kısa devresi meydana gelir. Bu nedenle herhangi bir anda, a, b veya c noktalarının her biri DA-kol’un pozitif veya negatif terminaline bağlıdır. Her bir fazın pozitif bir anahtarının bir anahtarlama periyodu  $T_s$  boyunca gerçekleştiği süre, görev periyodu  $d$ , örneğin;  $a$  düğümü için,

$$d_a = T_{s_1}/T_s \quad (4,10)$$

Burada  $T_{S_1}$ ,  $S_1$  anahtarının anahtarlama periyodu boyunca iletimde olduğu süredir. Üç kol, üç fazlı bir pozitif dizi voltajı ortaya çıkacak şekilde  $2\pi/3$  radyan faz açısıyla kaydırılır. Aynı bacaktaki iki anahtarın açılması ve kapanması arasında bir ölü zaman koymak çok önemlidir. Aksi takdirde, DA-kol'un kısa devre olması mümkündür, çünkü anahtarlama frekansı yüksektir. IGBT'nin açılması ve kapanması, sırasıyla belirli bir yükselme ve düşme süresi ile belirlenir. Çoğu zaman,  $2 \mu s$  ölü zaman yeterlidir.

IGBT'lere paralel olarak yerleştirilen diyotlar indüktif yüklerin voltajını değiştirmeye izin verir. IGBT kapandığında, akım, indüktans nedeniyle ters yönde akmayı isteyecektir. Diyot daha sonra bu akım için bir yol sağlar, IGBT ise güvenle kapanabilir.

DA tarafına, bir DA voltaj uygulanır. Generatör yıldız bağlı ve dolayısı ile nötr nokta N'ye sahip olduğundan, makine sargılarındaki voltaj  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ ,  $V_{cn}$ 'dir. DA-kol'da kurgusal bir nokta olarak 'O' (bir DA kaynağının sanal nötr noktası) tanımlanır, böylece aşağıdaki ilişkiler yazılabilir;

$$V_{an} = V_{a0} - V_{n0} \quad (4,11)$$

$$V_{bn} = V_{b0} - V_{n0} \quad (4,12)$$

$$V_{cn} = V_{c0} - V_{n0} \quad (4,13)$$

Kirchoff yasasına göre;

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (4,14)$$

(4.13) ve (4.14) denklemleri ile aşağıdaki eşitliği elde edebiliriz;

$$V_{n0} = (V_{a0} + V_{b0} + V_{c0})/3 \quad (4,15)$$

Bu durumda denklem (4,11, 4,12 ve 4,13) tekrar matris formunda şu şekilde yazılabilir;

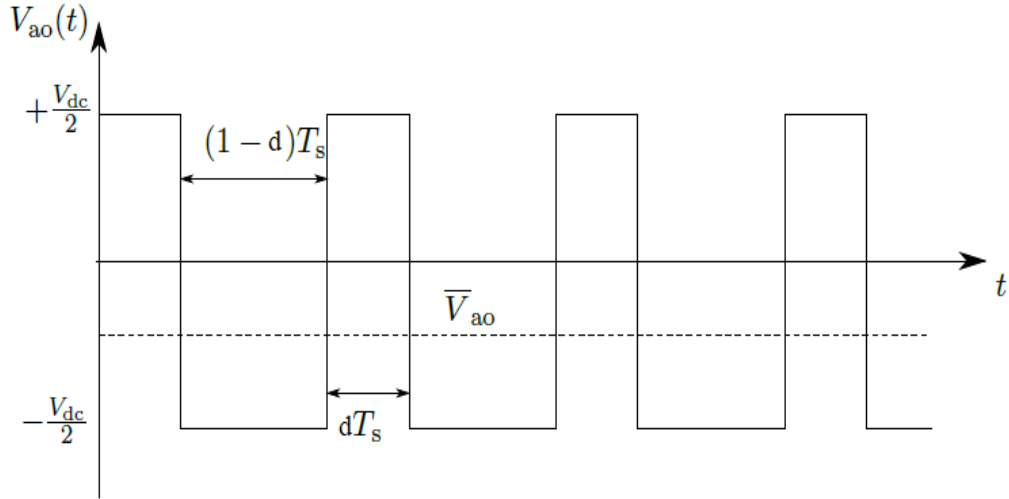
$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} \quad (4,16)$$

Görev periyodu, pozitif anahtarın ( $S_1, S_3, S_5$ ) iletkenlik zamanının anahtarlama periyoduna oranı olarak belirlendiğinden,  $V_{ao}$  ve  $d_a$  arasındaki ilişki Şekil 4.6'dan elde edilebilir.

$$V_{ao} = d_a(V_{dc}/2) + (1 - d_a)(-V_{dc}/2) = (2d_a - 1)V_{dc}/2 \quad (4,17)$$

Diğer fazlarda hesaplama da eşdeğerdır. Bu eşitlikler kullanılarak faz-nötr gerilimleri ve görev periyotları arasındaki ilişki matrisel formda aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} \quad (4,18)$$



Şekil 4.6. GKD'nün  $V_{ao}$  çıkış dalga şekli [49]

### 4.3. Alan Yönlendirmeli Kontrol

#### 4.3.1. Alan yönlendirmeli kontrol'ün temelleri

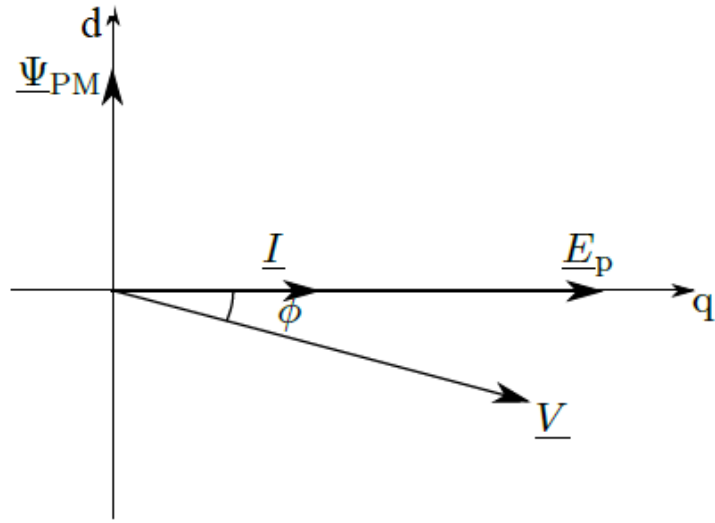
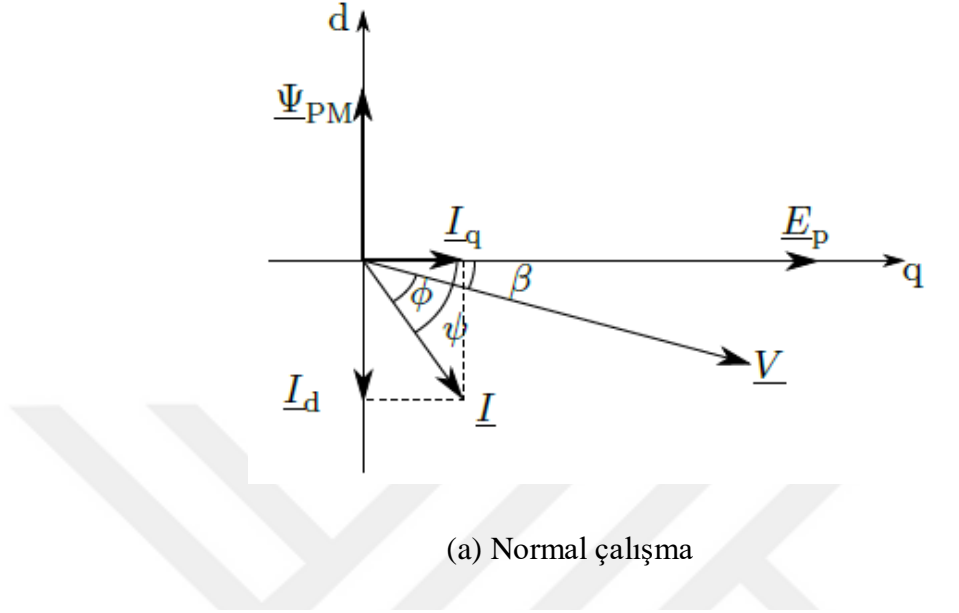
Alan yönlendirmeli kontrol (AYK), bir AA motoru DA motor gibi kabul ederek kontrol eden bir tekniktir. DA makinesinde, eğer manyetik akı sabit tutulursa, endüvi elektromanyetik alanı ile doğru orantılı rotor hızında, endüvi akımı ile orantılı olan sabit bir moment sağlanır. Ek olarak, bu moment, belirli bir armatür akımı için üretilebilecek olanın maksimumudur. Bu, rotordaki akım dağılımının daima alan sargısından kaynaklanan manyetik akı dağılımına dik olmasını sağlayan mekanik komütatör yapısına bağlıdır.

Üç fazlı makinelerde, momenti üretmek için bir sinüzoidal alan dağılımının bir sinüzoidal akım dağılımı ile etkileşmesi gerekir. DA motora benzer şekilde, akım dağılımının maksimum akımı, akı dağılımının maksimumuna denk geldiğinde, moment maksimumdur. Şekil 4.7'deki fazör diyagramında, mevcut fazörün döner manyetik alan nedeniyle stator sargılarında indüklenen geriliminin  $E_p$  ile aynı hizada olması gerektiği anlamına gelir. Daimî mıknatısların bu iki fazör arasındaki açı, yani söz konusu moment açısı, verilen bir akım için azami momenti elde etmek için sıfır olmalıdır.

Bağlantıda gösterilen bir başka açı  $\Phi$ 'dir, gerilim ve güç faktörü  $\cos\Phi$ 'yi belirleyen akım fazörü arasındaki açıdır. Gerilim fazörü, generatör referans çatısındaki akım fazöründen geri fazda ise, bu, makinenin reaktif güç harcadığı anlamına gelir. Diğer durumda, reaktif güç DMSG tarafından üretilir. 90 dereceden büyük bir mutlak değere sahip  $\Phi$  için DMSG motor olarak çalışacaktır.  $\beta = \psi - \Phi$  ise EMF ile voltaj fazörleri arasındaki açıdır.

Daha öncede bahsedildiği üzere, sürekli mıknatısların akısı d- eksenindedir. Bu nedenle  $E_p$  pozitif q-ekseni boyuncaadır. Bu, alan yönelimli kontrol için ayrıca bir q ve d bileşenleri olan akım fazörünün q- eksenine boyunca olması gerektiği anlamına gelir. Böylece d- eksenindeki akım bileşeni  $I_d$  sıfıra eşit olmalıdır. Bu durumda DMSG'nin moment denklemi hatırlanacağı üzere denklem 4,2'de olduğu gibidir. Bu denklemde manyetik akı sabit olduğundan, elektromanyetik moment artık sadece DA motora benzer olarak, q- eksenine akımıyla doğru orantılıdır. Stator akımındaki değişiklik, hızlı moment cevabını sağlayacaktır. Bu durum yüksek

dinamik hız kontrolü de sağlar. Bir başka durum ise, gerilim vektörü her zaman akım vektörünün gerisindedir. Bu, generatörün AYK'de her zaman reaktif güç çekeceği anlamına gelir.



Şekil 4.7. DMSG'ün normal çalışması ve alan yönlendirmeli kontrol ile çalışması durumlarında ki fazör diyagramı [49]

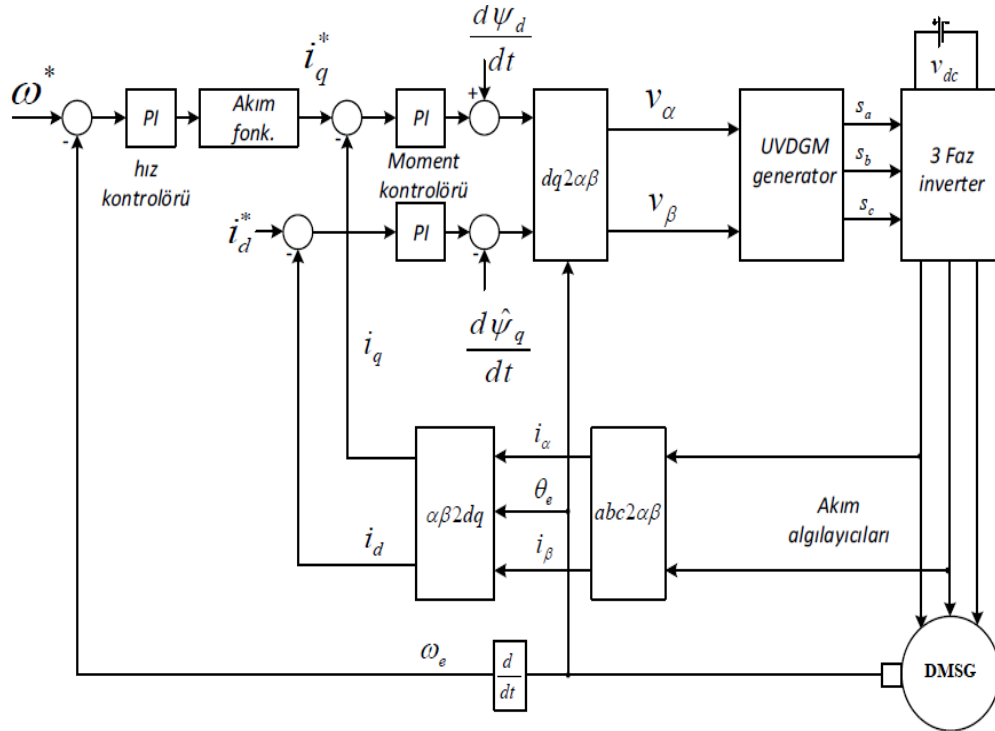
Clarke ve Park dönüşümü sayesinde faz akımları senkron referans sistemine dönüştürülebilir ve bunun tersi de geçerlidir. Bu dönüşümleri kontrol stratejisine dahil edilir.



Kontrol stratejisinin ilk kısmı, generatörün stator akımlarını ölçmektir. Aslında, sadece iki fazın ölçümü, üç akımın toplamı her zaman sıfır olduğu için yeterlidir (yıldız bağlı durumda nötr nokta genellikle bağlı değildir). Rotor konum açısı  $\theta$ 'nın kullanıldığı Clarke ve Park dönüşümleri kullanılarak,  $q$ - ve  $d$ - ekseninde ölçülen akımlar elde edilir. Bu iki akım, referans değerleri  $I_{qref}$  ve  $I_{dref}$  ile karşılaştırılır ve fark, ilgili  $PI$  denetleyicilere gider.

Denetleyici çıkışında elde edilen stator voltajları  $V_q$  ve  $V_d$ , ters Clarke ve Park dönüşümleri kullanılarak tekrar faz gerilimlerine dönüştürülür ve daha sonra bu gerilimler, denklem 4,17 kullanılarak görev periyotlarına dönüştürülür. Bu görev periyotlarını taşıyan darbeler daha sonra GKD'ne tetikleme işaretleri olarak gönderilir.

Hızlı olan akım kontrol döngüsüne, rotor hızını kontrol etmek için, daha yavaş bir hız kontrol döngüsü eklenir. Sonuç olarak Şekil 4.8'de görüldüğü gibi iki çevrim elde edilmiştir. Dışta hız kontrol döngüsü ve içte akım kontrol döngüsü vardır. Generatör momentini  $I_q$  ile belirlenirken, bir  $PI$  denetleyici, referans hız  $\omega_{ref}$  ve ölçülen rotor hızı  $\omega$  arasındaki farktan  $I_{qref}$  referans değerini  $PI$  hız denetleyici ile hesaplar.



Şekil 4.8. AYK blok şeması [50]

$q$ - ve  $d$ - eksenini akımı belirli sınırlar dahilinde kontrol edilebildiğinden, farklı kontrol stratejileri vardır. Bunlar;

Sabit moment açısı kontrolü:

Uygulanması kolay bir stratejidir. Moment açısını sıfır olarak kontrol etmek, amper başına maksimum momente neden olur ve böylece direnç kayıpları en aza iner [51]. Bu kontrolörün dezavantajı ise, Park dönüşümü için gerekli olan rotor konumu bilgisidir. Bu sebeple konum sensörü gereklidir. Bu durum, sistemin güvenilirliğini azaltır ve karmaşıklığını artırır. Bununla birlikte, konum tespitini sensörsüz yapan AYK teknikleri de mevcuttur.

Sabit güç faktörü kontrolü:

Konum sensörü karmaşıklığından kaçınmak için bir başka seçenek, gerilim vektörü  $V_s$  ile akım vektörü  $I_s$  arasındaki açıyı kontrol etmektir. Bu, güç faktörü ile eşittir. EMK ve akım vektörü birbirine dik olmadığından dolayı bu kontrol stratejisine artık AYK adı verilemez [51].

Çekirdek kayıplarını en aza indirerek kontrol:

$d$ -eksenini akımı, stator akısını azaltmak ve demir kayıplarını en aza indirmek için sıfır olmayan bir değere kontrol edilebilir [52]. Bu yöntemde, istenen  $I_d$ 'nin değeri, shaft hızının fonksiyonu olarak gösterilmektedir.

#### 4.3.2. Ayrık zaman PI akım denetleyici

$d$  ve  $q$  eksenini aynı dinamiğe sahip olduğundan yani  $L_d = L_q$  olduğu için,  $PI$  akım denetleyici tasarımı yalnızca  $q$ - eksenini için yapılır. Kontrol, bir SSİ (Sayısal Sinyal İşleme) vasıtasıyla ayrık zamanda gerçekleştirilir, yani tasarım  $z$ -domeninde gerçekleştirilir.

Kontrol döngüsü hem bir indüktans ( $L_q$ ) hem de direnç ( $R_s$ ) içeren DMSG'ün stator sargısı ile belirlenir. Bu birinci dereceden bir sistem gibi davranıldığından, voltajdan akıma transfer fonksiyonu sürekli olarak Laplace domenindedir.

$$F_i(s) = \frac{I_q(s)}{V_q(s)} = \frac{1}{sL_q + R_s} \quad (4,19)$$

Bu sürekli zaman transfer fonksiyonunu ayrık zamana dönüştürmek için, bilineer dönüşüm kullanılır (daha spesifik olarak trapezoidal yaklaşım);

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{z-1}{z+1} \quad (4,20)$$

Burada  $T_s$ , örnekleme aralığını temsil etmektedir. Bu eşitlikteki  $s$  değeri denklem 4.20'de yerine yazılırsa;

$$F_i(s) = \frac{I(z)}{V(z)} = \frac{T_s(z+1)}{z(2L_q+T_sR_s)-(2L_q-T_sR_s)} \quad (4,21)$$

Kontrolörün kendisi, SSİ içindeki hesaplamaları yapmak için gereken zaman, bir örnekleme süresi  $T_s$  gecikmesidir.  $z$ -domeninde bu,  $z^{-1}$  e eşit bir transfer fonksiyonuna karşılık gelir [52].

*PI* denetleyici, girişteki  $E(z)$  hatasının  $V(z)$  çıkış gerilimine dönüştürülmesi olan aşağıdaki transfer fonksiyonu ile ayrık zamanda modellenebilir;

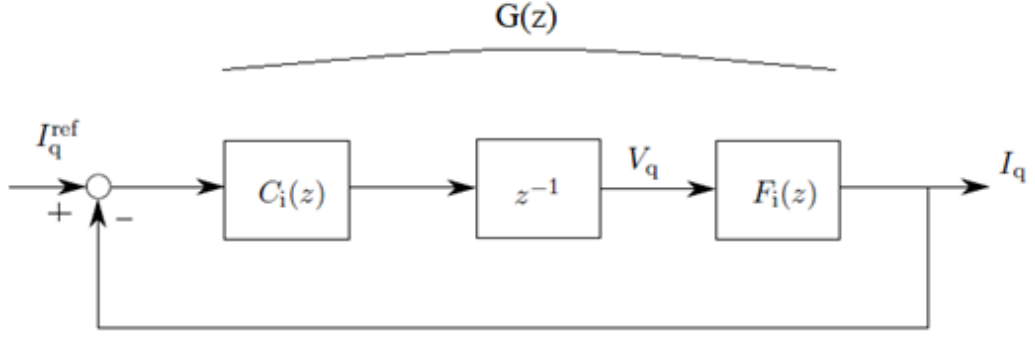
$$C_i(s) = \frac{V(z)}{E(z)} = K_i \frac{z-a_i}{z-1} \quad (4,22)$$

Burada  $K_i$  oransal kazanç parametresi,  $a_i$  ise integral kazanç parametresidir. Bu duruma karşılık gelen fark denklemi ise şöyledir;

$$V(n) = V(n-1) + K_i[e(n) - a_i e(n-1)] \quad (4,23)$$

Bu eşitlik doğrudan SSİ'ye uygulanabilir. Çıkışın gerçek değeri ve hatanın bellekte saklanması gerekir, böylelikle yeni bir çıktı değeri hesaplamak için bir sonraki döngüde kullanılabilir.

Bahsedilen bu üç kontrol bloğu açık çevrim transfer fonksiyonu  $G(z)$  olarak Şekil 4.9'da temsil edilmiştir.



Şekil 4.9. q-ekseni akım kontrolü kapalı çevrim blok şeması [52]

$$G(z) = K_i \frac{z-ai}{z-1} \frac{1}{z} \frac{T_s(z+1)}{z(2L_q+T_sR_s)-(2L_q-T_sR_s)} \quad (4,24)$$

Kapalı çevrim transfer fonksiyonu  $H(z)$  ise;

$$H(z) = \frac{I_q}{I_{qref}} = \frac{G(z)}{1+G(z)} \quad (4,25)$$

GKD'nün girişinde ölçülen stator akımları ve ölçülen rotor hızının integralinin sonucu olan rotor konum açısı mevcut kontrol sisteminin girişleridir.

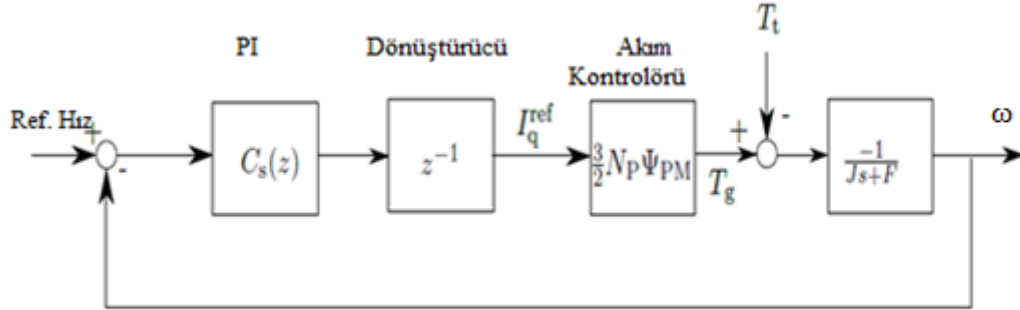
İlk olarak, stator akımları, 25 kHz kesme frekansına sahip bir RC alçak geçiren filtre kullanılarak toplanır. AYK'ü doğru yapmak için yüksek bant genişliğine sahip kesin akım ölçümleri gereklidir. Rotor pozisyonu vasıtasıyla (radyan olarak), filtrelenen akımlar Clarke-Park dönüşümü kullanılarak senkron referans sistemine dönüştürülür. Bu iki değer daha sonra,  $K_i$  ve  $a_i$  parametresiyle ayrık transfer fonksiyonu  $C_i(z)$  içeren kendi  $PI$  bloklarına gider. Ortaya çıkan gerilimler stator referans sistemine geri dönüştürülür ve DGM generatörlerine giden görev oranlarına dönüştürülür. Bu bloğun çıkışları, GKD'ne giden altı anahtarlama darbesidir.

### 4.3.3. Ayrık zaman PI hız denetleyici

Hız denetleyici, tezin konusu olan MGNT kontrol stratejileri tarafından kullanılacak önemli bir unsurdur. Bu denetleyici, rotor hızını bir kod çözücü vasıtasıyla ölçer, bir hız referans değeri ile karşılaştırır ve ardından ayrık zaman PI akım denetleyicisine giden q- eksenli akım referans değerini hesaplar.

Akım denetleyici ile 16 kHz'lik nispeten yüksek bir frekansta hesaplamalar yapılıyor ve akım cevabı oluşuyorken, hız denetleyici çok daha yavaş çalışmaktadır. Bu, hız denetleyicinin tasarımı sırasında, akım denetleyicinin momenti azami hızda kontrol etmesindedir. Belli bir q-eksenli referans akımında ki değişiklik momente ani olarak cevap alınmasını sağlar. Elde edilen kontrol döngüsü Şekil 4.10'da gösterilmiştir [53].

Hızı kontrol etmek için,  $K_s$  oransal kazanç parametresi,  $a_s$  ise integral kazanç parametresi olan  $PI$  denetleyici kullanılacaktır. Giriş, mekanik hız ve onun referans değeri arasındaki hatadır. Çıkış ise, akım kontrolü için girdi görevi gören q-eksenli akımının referans değeridir.



Şekil 4.10. Hız kontrolörü blok şeması [53]

$$C_s(z) = K_s \frac{z - a_s}{z - 1} \quad (4,26)$$

Akım denetleyici gibi, yine bir örnekleme süresi ve bir gecikme hesaplamalar boyunca ilave edilir. Akım kontrolü denklem 4.2 kullanılarak

idealdir. Elektromanyetik moment,  $I_q$  akım'ının referans değeri ile doğrudan orantılıdır. Newton'un hareket denkleminde, denklem 4.2 yerine konulursa;

$$j \frac{d\omega_r}{dt} = T_t - T_g - B\omega_r \quad (4,27)$$

Buradaki  $T_g$  ve  $T_t$  sırasıyla generatör ve türbin torkudur ve Şekil 4.10'da temsil edilmiştir. B ise sürtünme katsayısıdır. Laplace dönüşümü kullanılarak transfer fonksiyonu yazılırsa;

$$F_s(s) = \frac{\omega(s)}{T_g(s) - T_t(s)} = \frac{-1}{Js + B} \quad (4,28)$$

Denklem (4.20) kullanılarak dönüşüm yapılırsa z-domeninde şu şekilde yazılabilir;

$$F_s(z) = \frac{\omega(z)}{T_g(z) - T_t(z)} = \frac{-T_s(z+1)}{z(2J+T_sB) - (2J-T_sB)} \quad (4,29)$$

$T_s$  hız kontrol çevriminin örnekleme periyodudur. Bir dişli kutusunun olmaması nedeniyle, sürtünme çok azdır ve sistem dinamikleri üzerindeki etkisi ihmal edilecek kadar düşüktür. Ayrıca denetleyici, sürtünme varlığını telafi edecek kadar sağlam bir şekilde tasarlanmıştır. Tasarım sırasında türbin momenti da sıfıra ayarlanır [54]:

$$F_s(z) = \frac{\omega(z)}{T_g(z)} = \frac{-T_s(z+1)}{2J(z-1)} \quad (4,30)$$

Akım denetleyicinin son derece hızlı çalıştığı varsayıldığı için,  $q$ - eksenli akımının referans değeri generatör momentinde ani değişimlere neden olur. Denklem 4.2'deki  $K_t$  değeri;

$$K_t = \frac{3}{2} \cdot 48.1,48 = 106,56 \quad (4,31)$$

Hız kontrol sisteminin açık çevrim transfer fonksiyonu  $G(z)$  şu şekilde yazılır;

$$G(z) = C_s(z)z^{-1}K_tF_s(z) \quad (4,32)$$

Hız kontrolü, akım kontrolünden çok daha yavaş çalıştırıldığından, q eksenini akımının referans değeri her 100 akım kontrol çevriminde yeniden hesaplanır. AYK'de örnekleme frekansı 16 kHz'de yürütüldüğü için, hız kontrolü 160 Hz'de gerçekleştirilir;

$$T_s = 1/f_s = 6.25 \text{ ms} \quad (4,33)$$

Mekanik hareket denklemini hız kontrol sistemine ekleyerek bu kontrol sisteminin çalışması tamamlanır. Generatör momentini elde etmek için geçerli referans değeri  $K_t$  ile çarpılır. Türbin momenti sıfıra ayarlanmıştır. Generatör momentini, rotor ataletine bölünür ve rotor hızını elde etmek için integrali alınır, bu ayrık zamanlı *PI* hız denetleyicisine geri besleme olarak kullanılır.

## 5. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİ

### 5.1. Maksimum Güç Noktası Takip Yöntemleri

Gün boyunca rüzgârın hızı ve yönü, basınç ve sıcaklığa bağlı olarak sürekli değişir. Bir rüzgâr sisteminde elde edilen çıkış gücünün miktarı maksimum çıkış gücünü veren mil hızının takibiyle maksimum yapılabilir. Rüzgâr hızının farklı değerleri için sistemin üreteceği maksimum güç farklıdır. Sistemin verimli çalışması, farklı rüzgâr hızları için o rüzgâr hızındaki maksimum güç değerini yakalamasıyla olur. Bu takip ise maksimum güç yakalama yöntemleriyle yapılır. Bu durumu araba örneği ile açıklayabiliriz. Yokuş yukarı çıkan bir arabada vites küçültülerek aracın ürettiği moment artırılabilir. Bu örnekteki gibi rüzgâr sisteminde de rüzgârın hızı arttıkça üretilen güç bir yere kadar artar ama daha sonra rotor hızı arttıkça üretilen güç düşmeye başlar. Maksimum gücü yakalamak için de rotor hızının maksimum gücü üretecek hıza düşmesi sağlanır. Çünkü nominal hızın üstündeki rotor hızlarında kanatlar birbirlerinin rüzgarını etkileyip türbülans etkisi yapar ve üretilen gücün azalmasına sebep olur. Düşük rotor hızlarında ise kanatlarda mekanik enerjiye dönüşmeden zayi olan rüzgâr enerjisi vardır. Sistemin kontrol edilmesini gerektiren bu sebeplerin dışında çok yüksek rüzgâr hızlarında sistemin mekanik aksamını korumak içinde kontrol yöntemine ihtiyaç duyulur. Ayrıca generatörün bilinçli olarak devre dışı kalması veya bir arıza nedeniyle kendiliğinden devre dışı kalması kanatların yükünü boşaltacağından çok yüksek hızlarda dönmeye başlarlar. Kullanılacak kontrol sistemi, böyle bir durumun önüne geçilmesi için gereklidir.

Önceki bölüm aktif bir doğrultucunun kontrolü ile ilgiliydi. Generatör momentini kontrol etmek için alan yönlendirmeli kontrolün nasıl kullanılabileceği açıklandı. Son bölümde, generatörün rotor hızını daha önceden belirlenmiş bir referans değerine kontrol etmek için kullanılan bir hız denetleyici tasarımı ele alınmıştır. Bu hız denetleyici aşağıdaki KHO yöntemiyle MGNT kontrol yönteminde kullanılacaktır.

Burada açıklanacak olan stratejilerin tümünün amacı, rüzgâr hızı, rotor hızı, generatör çıkış gerilimleri ve akım ölçümlerine dayanarak rüzgâr türbininin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlamaktır. Mühendislikte genel bir yargı olarak bir strateji ne kadar fazla ölçüm gerektiriyorsa, o kadar fazla ekipman



kurulmalıdır ki bu da kontrol sisteminin maliyetini ve karmaşıklığını artırır ve güvenilirliğini azaltır. Ek olarak, rüzgâr hızının doğru ölçümlerini elde etmek zordur ve çoğu zaman yeterli filtreleme teknikleri kullanılmalıdır. Bu durumdan sakınmak adına, rüzgâr hızını hesaplamak için daha kolay olan ölçümleri kullanan farklı yöntemler mevcuttur. Wei vd. [55]'de, sistemin kayıplarını ve dinamiklerini göz önünde bulundurarak rüzgâr hızını, elektrik güç çıkışından hesaplanarak tahmin etmektedir. Rüzgâr hızının bu değeri daha sonra KHO yönteminde MGNT'ni gerçekleştirmek için kullanılır.

MGNT denetleyicisi, rüzgâr türbin sistemi için bazı konularda güvenlik de sağlayacaktır. Örneğin, kesme hızı denilen sistemin güç üretebileceği minimum hızdan daha düşük rüzgâr hızları için, kontrol sistemi bileşenlerinin yıpranmasını önlemek için türbini durduracaktır. Ayrıca nominal rüzgâr hızı aşılsa, doğrultucu türbini nominal hızında tutacaktır. Ayrıca rüzgâr hızı, türbülansa neden olacak kadar yüksek olursa, sistem unsurları zarar görmemesi için türbin kapatılacaktır.

Farklı MGNT kontrol stratejileri geliştirilmiştir ve literatürde geniş ölçüde tartışılmıştır. Bu yöntemlerin çoğu, fotovoltaik panellerin kontrolünde kullanılan yöntemlerle benzerdir. Birçok farklı şekilde tasarlanan MGNT yöntemleri temel olarak aşağıdaki dört kategoriden birinde sınıflandırılabilir. Bu yöntemler;

Sabit Kanat ucu Hız Oranı (KHO):

Bu yöntem, rüzgâr hızını ölçer veya hesaplar ve sistemin kendi öz dinamiği olan optimum kanat ucu hız oranını ( $\lambda_{opt}$ ) kullanarak hız denetleyici girişi için referans rotor hızını hesaplar. Bu yöntem diğer tüm stratejilerden daha hızlıdır çünkü o andaki rüzgâr hızı biliniyorsa ona karşılık gelen MGN'nin yeri net olarak bilinmektedir. Doğru ölçümler sağlayan bir rüzgâr hızı sensörüne olan ihtiyaç sabit KHO yöntemini en pahalı yöntem haline getirir. Rüzgâr hızı ölçümü yapan anemometre, yalnızca göbek yüksekliğinde sınırlı rüzgâr hızı ölçümleri sağladığından tüm büyük kanat ağızlarını kapsayamaz. Üstelik, rotor ve rüzgâr arasındaki etkileşime bağlı olarak rüzgâr hızı sensörü çoğu zaman makine bölgesinin üzerine yerleştirildiği için hem rüzgârın kanatların ön yüzünden gelmesi durumunda hem de arka yüzünden gelmesi durumunda kanatların geçmesi nedeniyle yanlış ölçümlere neden olur [56,57]. Ayrıca alçak geçiren filtre kullanılarak gürültü azalır, ancak bu durum kontrol sisteminin reaksiyon süresini

de azaltır. Hatalı rüzgâr hızı ölçümüne neden olan diğer bir problem ise kanat açıklığı boyunca rüzgâr hızındaki değişimin, tek nokta ölçümü ile dikkate alınamamasıdır [58]. Bununla birlikte, bu durum küçük rüzgâr türbinleri için oldukça önemsizdir. Ancak rüzgâr hız sensörü kullanan KHO yönteminin maliyetli olması küçük güçlü türbin sistemlerinde tercih edilmemesine sebep olmaktadır. Bu duruma alternatif olarak hız tahmin yöntemleri kullanılmıştır. Örneğin [59]'da hız tahmin etmek için bir yöntem sunulmuştur. MGNT konusunda daha iyi ve daha hızlı teknikler elde etmek için güncel araştırma girişimleri devam etmektedir [57].

Güç -rotor hızı eğrisi kontrol ( $P-\omega$ ):

Bu yöntemde rüzgâr hızı ve rotor hızı bilgileri giriş olarak alınır. Testler ve simülasyonlar sonucu elde edilmiş olan o sisteme özel  $P-\omega$  eğrisinden referans güç hesaplanır ve sistemin bu yöntemle optimum şartlarda çalışması sağlanır [13]. Rüzgâr türbin sisteminde her rotor hızına karşılık gelen bir optimal çıkış gücü değeri bulunmaktadır. Bu güç eğrisi kontrol cihazının hafızasındaki arama tablosundan hesaplanabilir ve saklanabilir. Rotor hızı ölçüldüğünde, karşılık gelen en uygun güç değeri tablodan bulunabilir. Bu, alan yönlendirmesinden dolayı, moment ve akımın referans değeri doğru orantılı olduğundan doğrudan generatör momentini ve akımın referans değerini belirler. Generatör ve türbin momenti arasındaki fark daha sonra türbini MGN'na yavaşlatır veya hızlandırır. Bu yöntem doğal olarak sabit KHO kontrolünden daha yavaştır çünkü iki moment arasındaki fark, özellikle küçük rüzgâr değişimlerinde oldukça sınırlı kalır. Öte yandan, bu sadece bir kodlayıcı gerektiren kolay bir yöntemdir. Sensörsüz kontrol teknikleri kullanılarak mekanik bir rotor hız sensörünün kullanılması da önlenebilir. Örneğin, [60]'de, bir durum gözlemcisi kullanılarak rotor pozisyonu ve rotor hızının ölçülen akımlardan tahmin edildiği bir kontrol yöntemi kullanılmıştır.

Bu yöntemin başka bir dezavantajı, optimum güç eğrisinin bilinmesini gerektirir. Bu ise rüzgâr türbininin bazı deneysel verilerini gerektirir. Ayrıca üçüncü dereceden bir polinom olduğu için kübik fonksiyon kullanılarak eğri uydurmak gerekir.

Hem güç kontrol hem de KHO kontrolü için de geçerli olan bir diğer dezavantaj ise, türbin karakteristiklerinde meydana gelen değişikliklerin rüzgâr türbini güç katsayısı eğrisini değiştirebilmesidir. Ayrıca hava yoğunluğu, sıcaklık,

generatör verimliliği ve bakımsızlık gibi etkiler arama tablosundaki değerlerin olması gereken MGN'ndan kaymasına neden olur.

Zirve tırmanma algoritması (ZTA) kontrol:

Tepe tırmanma algoritması kontrolü (ZTA kontrolü), çıkış gücünün ve rotor hızının değişimini gözlemler ve rotor referans hızına küçük artışlar veya azalmalar ekleyerek bunlara tepki verir. Bu yöntem, bir anemometrenin kullanımını ve rüzgâr türbini ile ilgili deneysel veya teorik verilerin kullanımını ortadan kaldırır. Bu kontrol stratejisi, literatürde “Perturb and Observe (P&O)” adı ile bilinen yönteme bir örnektir. ZTA kontrol MGN'nin yerini net olarak tespit edemez. Rotor hız referansını sürekli değiştirerek aramaya devam edecektir. Bu, histerezis adı verilen gerçek MGN etrafında bir rotor hız dalgalanmasına neden olur.

MGN net olarak bilinmediği için  $P-\omega$  yöntemindeki gibi, bu yöntem de yapısı gereği yavaştır. Denetleyicinin MGN'yi arama hızı, rotor hızının adım boyutuna göre ayarlanabilir. Yüksek bir artış rüzgâr türbinini MGN'na doğru daha hızlı hareket ettirir, ancak aynı zamanda maksimum güç noktası etrafında daha güçlü bir histerezis ile sonuçlanacaktır.

Elektrik gücü, tepe tırmanma yönteminde giriş olarak kullanılır, çünkü dönüştürücü tarafından kolayca ölçülebilir. Ancak kontrol stratejisi için asıl kullanılması gereken türbin gücüdür. Bu ikisi sadece kararlı durumda eşit olduklarından, generatör gücündeki geçici durum kaybolana kadar beklenmesi gerekir. Ancak o zaman, kontrolün bir sonraki adımını belirlemek için ölçülen elektrik gücü kullanılabilir. Bu yöntemin en önemli avantajı ise rüzgâr türbini verileri gerekmediğinden, dış etkenlerin veya kanat özelliklerinin değişimleri sırasında bile rüzgâr türbininin gerçek MGN'sında çalışacağı garanti edilir.

Hibrit MGNT kontrol:

Önceki üç temel yöntemin hepsinin avantajları ve dezavantajları vardır. Gelişmiş MGNT denetleyicileri, hibrit bir sistem elde etmek için üç yöntemin her birinin en iyi yönlerini birleştirir. Çoğu sistem, rüzgâr hızına, rüzgâr hızındaki değişikliklere bağlı olarak kontrolörün hangi modda çalıştığını belirleyen bir ana kontrol birimine sahiptir. Bu şekilde, kontrol cihazı daha büyük veya daha küçük rüzgâr hızı değişikliklerine farklı tepki gösterebilir veya rüzgâr hızı değişimi ölü

bant sınırını aşmadığı sürece rotor hızını sabit tutabilir. Ayrıca, belirli bir rüzgâr sisteminde gerekli tüm parametreleri elde etmek için ilk önce öğrenme modunda çalışan adaptif kontrolör yöntemi de sunulmuştur [13]. [58]'de, ikili veya değişken adım büyüklüğüne sahip ZTA kontrolü, öğrenme sürecinde MGN'larını bellekte depolayan arama hatırlama algoritmaları gibi başka karma ZTA yöntemlerinden bahsedilmiştir. [14]'de, değişen türbin özelliklerine uyum sağlamak için MGN bölgesinde bir histerezis mekanizması ile bir KHO kontrolör önerilmiştir.

## 5.2. Sabit KHO Kontrolörün Modellenmesi

Bu, basit bir yöntemdir çünkü MGNT denetleyicisi için sadece ölçülen rüzgâr hızı girildiği olarak kullanılır. Referans rotor hızı optimum KHO ( $\lambda_{opt}$ ) ve türbin yarıçapı  $r$  bilgisine dayanarak hesaplanır.

$$\omega_{ref} = \frac{rv_{rüzgar}}{\lambda_{opt}} \quad (5,1)$$

Şekil 3.2'ye görüldüğü üzere  $C_{pmax} = 0,4412$  ve  $\lambda_{opt} = 10,41$ 'dir.

Hız kontrolü işaretinin, yani  $q$  eksen akımının referans değerinin, sınırlandırılması önemlidir. Bu değer, generatör veri sayfasında tanımlandığı şekilde nominal değerle sınırlandırılmalıdır. Normalde, referans akım sadece pozitif olabilir. Bu durum türbin momentinin ters yönünde bir momentle sonuçlanır. KHO çok düşük olduğu için türbinin hızlanması gerekiyorsa, generatör momenti sıfıra ayarlanır. Türbin momenti böylece rotor hızını ayar noktasına getirecektir. MGN'na henüz ulaşılmadan, iki moment optimum KHO'da eşit olana kadar generatör momenti tekrar artar.

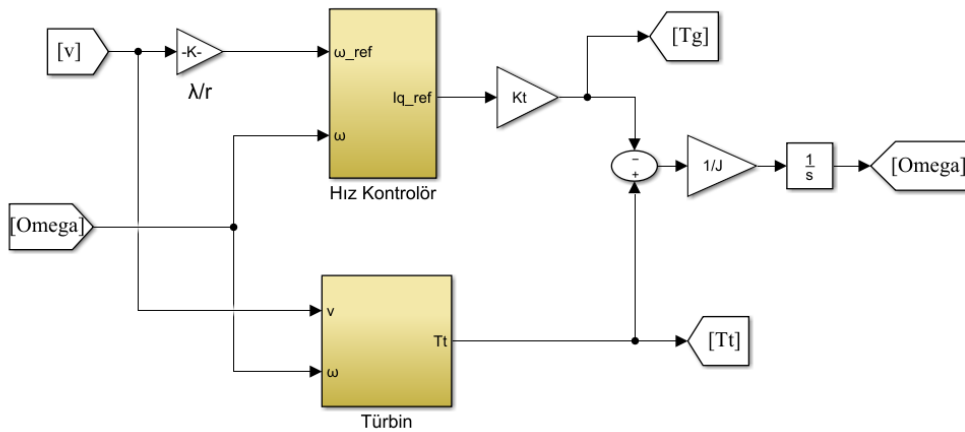
İleri bir yöntem olarak aktif doğrultucuda referans akım, DMSG'nin motor modunda çalıştırılıp türbin momentıyla aynı yönde hareket eden bir motor momentinin oluşturulmasıyla da pozitif olabilir. Bu şekilde generatör, türbin momentinin rotoru hızlandırmasına yardımcı olabilir. Böylece MGN'na daha da hızlı ulaşılır, ancak bu durumda artan ivme için şebekeden elektrik enerjisi çekilir [61].

Bölüm 4.3'te, alan yönelimli kontrolün benzetim modeli oluşturulmuştur. Akım kontrolü hızlı bir işlem olduğundan, benzetim süreleri oldukça küçüktür (milisaniye seviyesi). Hız kontrol döngüsü çok daha yavaş bir işlem (saniye

seviyesi) olduğundan, benzetim süresinin azaltılması için moment kontrolünün oldukça hızlı çalıştığı varsayılmaktadır. Bu, q-ekseni akımının referansının belirli bir değerinin derhal istenen generatör momentine neden olacağı anlamına gelir. Alan yönelimi nedeniyle moment, q eksen akımıyla orantılı olduğu için bu mmatıklı bir yaklaşımdır.

Şekil 5.1’de KHO yöntemiyle simülasyon modeli gösterilmektedir. Alttaki model bloğu rüzgâr türbini modelidir. Belirli bir rüzgâr hızı  $v$  değeri, türbin momentindeki gerçek rotor hızı ile birlikte ortaya çıkacaktır. *PI* hız denetleyici, q-ekseni stator akımının referans değerini ( $I_{q\ ref}$ ) hesaplar. Giriş olarak, ölçülen rotor hızı referans rotor hızı ile karşılaştırılır. Referans rotor hızı,  $\lambda_{opt}$  kullanılarak rüzgâr hızından hesaplanır. Referans akım ile denklem 4,2 baz alınarak yani  $K_t$  moment sabiti kullanılarak generatör momentini oluşturulur. Seçilen sistem parametrelerine ait  $K_t$  değeri eşitlik 4,31’de verilmiştir. ( $K_t=106,56$ ).

Daha sonra, toplam atalet  $J$ 'yi (türbin + generatör) hesaba katarak, rotor hızını elde etmek için mekanik sistem, moment farkı bir integral alıcıya uygulanıp hız bulunur. Rotor hız değeri *PI* hız denetleyiciye ve rüzgâr türbini modeline geri beslenir. Daha önce bahsedildiği gibi doğrudan tahrik konfigürasyonu nedeniyle mekanik sürtünme ihmal edilmiştir.



Şekil 5.1. KHO simulink modeli

KHO yöntemi uygulanarak REDS’den elde edilen verimin nasıl değiştiğini analiz etmek üzere dört farklı senaryo uygulanmıştır. Birinci senaryoda sabit rüzgâr hızı için MGNT yapılmamıştır. İkinci senaryoda ise sabit rüzgâr hızı için REDS’ne KHO yöntemi ile MGNT yapılmış ve birinci senaryodaki sonuçlar ile

kıyaslanmıştır. Üçüncü senaryoda, zamanla değişen rüzgâr hızı için MGNT yapılmadan ve dördüncü senaryoda ise zamanla değişen rüzgâr hızında REDS'ne KHO yöntemiyle MGNT yapılarak benzetim sonuçları alınmış ve MGNT ile REDS'nin veriminin değişimi izlenmiştir. Bu anlatılan senaryolar Çizelge 5.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1. Grafikler elde edilirken uygulanan senaryolar

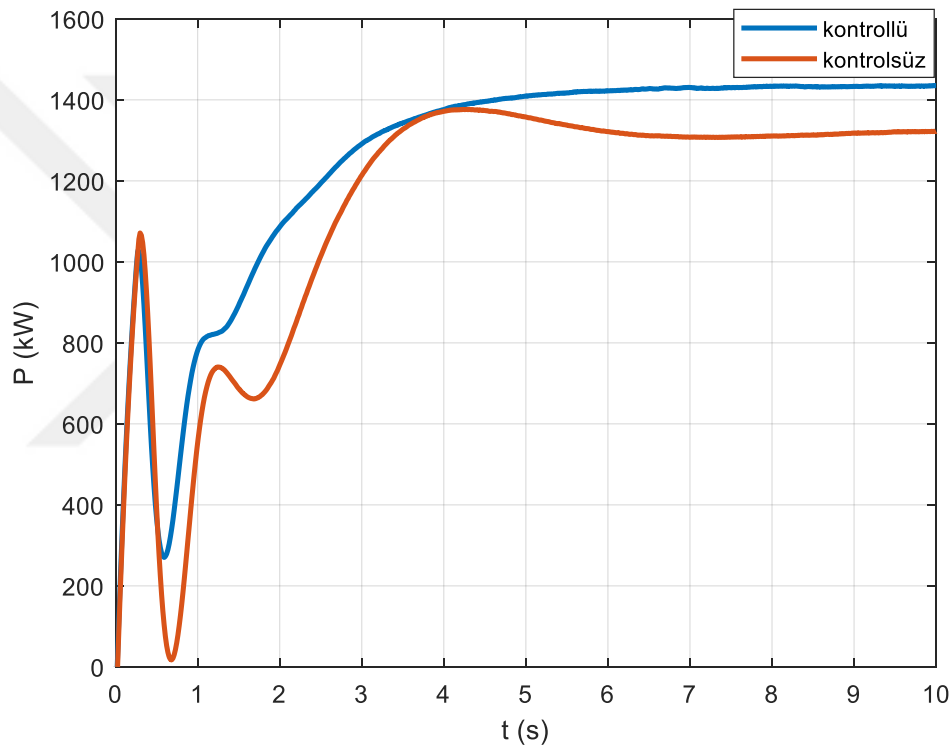
1. Senaryo	Sabit rüzgâr hızı, MGNT yok	Şekil 5.3
2. Senaryo	Sabit rüzgâr hızı, MGNT var	Şekil 5.4
3. Senaryo	Değişken rüzgâr hızı, MGNT yok	Şekil 5.5
4. Senaryo	Değişken rüzgâr hızı, MGNT var	Şekil 5.7

Birinci senaryo olarak  $v = 12$  km/sa sabit rüzgâr hızı ile benzetim yapılmıştır. MGNT kontrolü kullanılmayan REDS için benzetim sonuçları Şekil 5.3'te verilmiştir. Şekil 5.3'de zamana göre, rotor hızı ( $\omega_r$ ), generatör çıkış gücü ( $P$ ), KHO ( $\lambda$ ),  $C_p$  ve türbin momenti ( $T_t$ ) ile generatör momenti ( $T_g$ ) değişimleri verilmiştir.  $v = 12$  km/sa rüzgâr hızına karşılık optimum rotor hızı 3,81 rad/s'ye eşittir. Aynı hız için güç değeri, 1,46MW'dır ( $\rho=1,12$ ). Modellenen rüzgâr türbininin maksimum verimi Şekil 3.2'den hatırlanacağı üzere,  $C_{p_{max}}=0,44$  ve bu değerinde elde edildiği  $\lambda_{opt}$  değeri ise 10,41'dir. Sisteme MGNT uygulanmadığı için sistem  $\lambda_{opt}$  değerinde çalışmamıştır ve buna bağlı olarak sistem verimi düşük olmuştur. Ayrıca sistemin maksimum güç noktasında çalışmadığı gözlemlenmiştir.

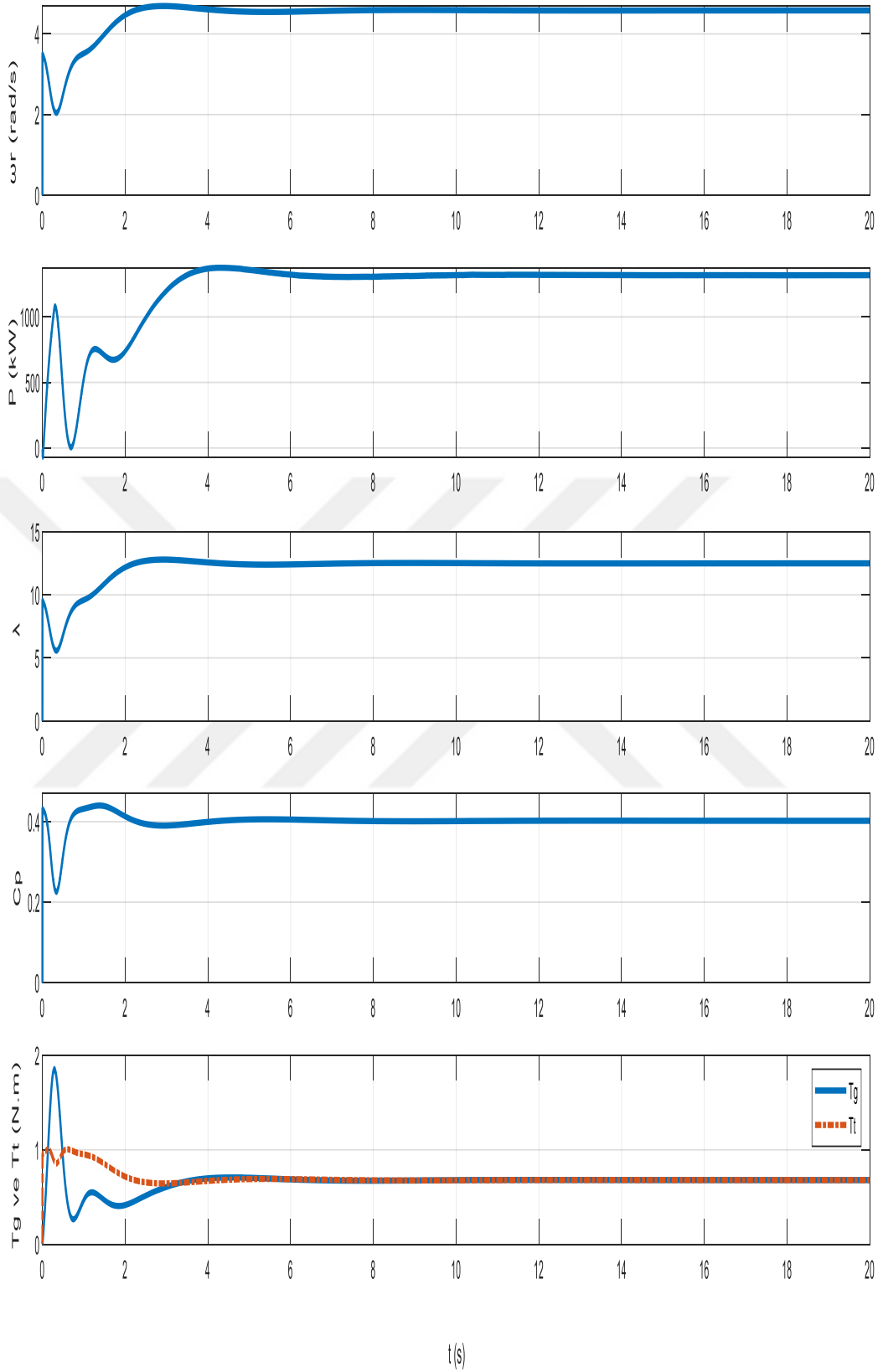
İkinci senaryo olarak  $v = 12$  km/sa rüzgâr hızında, sisteme KHO kontrolü uygulanmış ve sonuçlar Şekil 5.4'de sunulmuştur. Sistem 3 s gibi kısa bir sürede  $\lambda_{opt}$  değerine yaklaşmış ve kararlı duruma geçmiştir. REDS'nin  $\lambda_{opt}$  noktasında çalışması verimi maksimum değerine getirmiş ve sonuç olarak sistem kararlı durumda iken, 12 km/sa hıza karşılık gelen 1,46 MW maksimum güç çıkışını gördüğü gibi sağlamıştır. Şekil 5.4'deki kontrollü ve Şekil 5.3'deki kontrolsüz sistemlerin benzetim sonuçları karşılaştırıldığında dikkat çeken bir husus ise, rotor hızının, kontrolsüz durumda, daha yüksek olmasına rağmen ve  $\lambda$  değerinin aynı şekilde daha yüksek bir değere sahip olmasına rağmen sistem güç çıkışının daha düşük olmasıdır. Bu durum, sistemin o andaki rüzgâr hızına karşılık gelen maksimum gücü elde etmek için, sistemin  $\lambda_{opt}$  noktasında çalışması gerektiğini

göstermektedir. Ayrıca generatör ve türbinin momentinin zamana göre değişimleri gösterilmiştir. Burada türbin ve generatör momentini zıt yönlüdür. Aynı grafik üzerinde kıyaslanabilmesi için türbin momentinin tersi alınmıştır. Türbin momentini değişimi oldukça azdır. Generatör ve türbin momentini eşit olduğunda sistem kararlı haldedir.

Birinci senaryoda elde edilen güç, KHO yöntemi kullanılarak MGNT yapılan ikinci senaryo sonucu elde edilen güçten azdır. Bu durum şekil 5.2’de görülmektedir.

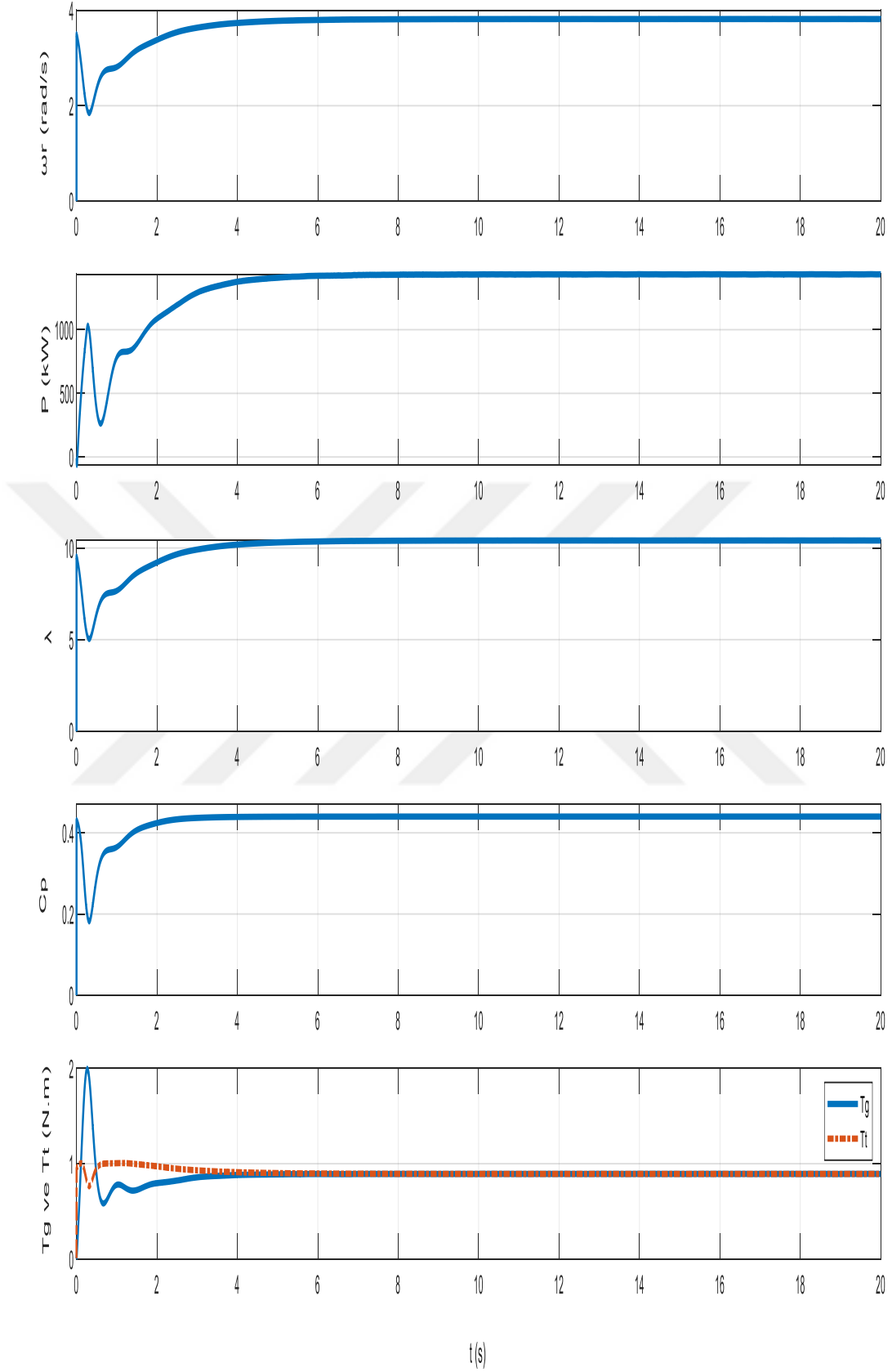


Şekil 5.2. MGNT varken ve yokken REDS’den elde edilen güç



Şekil 5.3. MGNT olmadan  $v = 12$  km/sa için, zamana göre; rotor hızı( $\omega_r$ ), KHO( $\lambda$ ),  $C_p$ ,  $P$  ve türbin moment( $T_t$ ) ile generatör moment ( $T_g$ ) değişimi

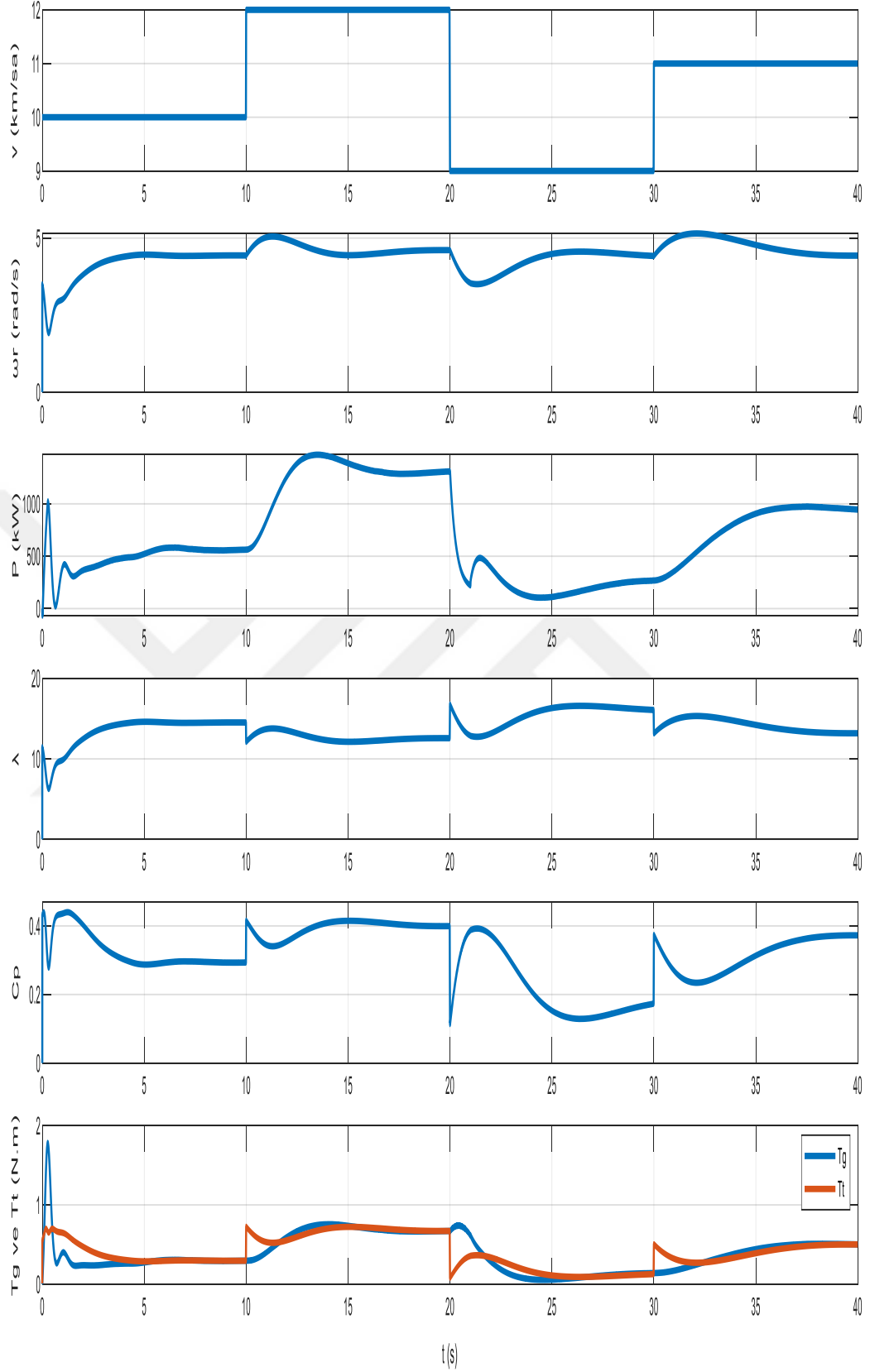




Şekil 5.4. MGNT uygulanarak  $v = 12$  km/sa için, zamana göre; rotor hızı( $\omega_r$ ),  $\text{KHO}(\lambda)$ ,  $C_p$ ,  $P$  ve türbin momenti( $T_t$ ) ile generatör momenti ( $T_g$ ) değişimi

Üçüncü senaryo olarak Şekil 5.5’de zamanla değişen bir rüzgâr hızı girişi uygulanmıştır ve bu girişe karşılık zamana göre, rotor hızı ( $\omega_r$ ),  $\lambda$ ,  $C_p$ , sistemin elde ettiği güç ve türbin momenti ( $T_t$ ) ile generatör momenti ( $T_g$ )’nin değişimi görülmüştür. Sistem herhangi bir MGNT yöntemiyle kontrol edilmemiştir. Birinci senaryoda ortaya çıkan sonuçlarla benzerlik görülmektedir. REDS anlık rüzgâr hızına karşılık çalışması gereken  $\lambda_{opt}$  değerlerini farklı rüzgâr hızlarında yakalayamamış ve rüzgâr hızı değişimiyle moment değişiminden görüleceği gibi sistem daha kararsız bir hale gelmiştir. Bunun sonucu olarak sistemden elde edilen güç ve verim oldukça düşüktür.

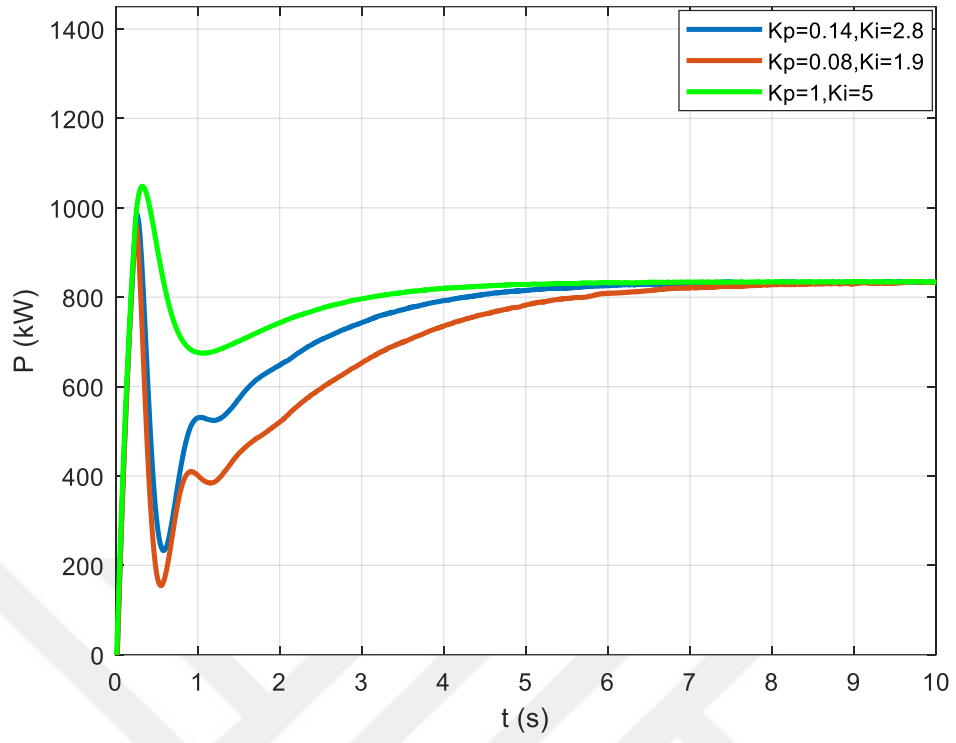




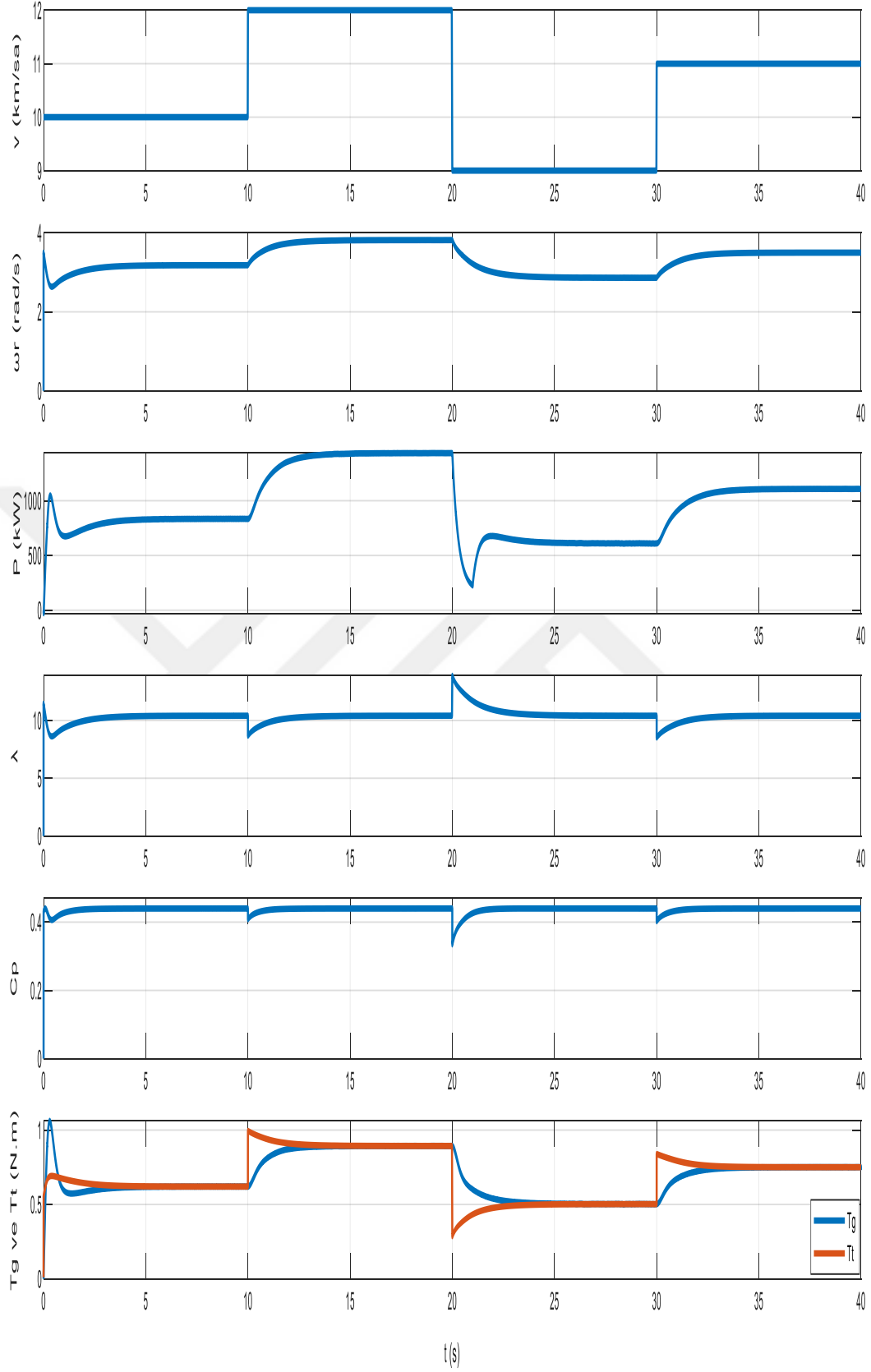
Şekil 5.5. MGNT olmadan değişken rüzgâr hızında zamana göre; rüzgâr hızı ( $v$ ), rotor hızı ( $\omega_r$ ), KHO ( $\lambda$ ),  $C_p$ ,  $P$  ve türbin ( $T_t$ ) ve generatör momentini ( $T_g$ ) değişimi

Dördüncü senaryoda REDS'ne KHO yöntemi uygulanmış ve sonuçlar Şekil 5.6'da sunulmuştur. Rotor hızı, özellikle atalet tarafından belirlenen bir geçici durum ile rüzgâr hızı değişimini izler ve çalışması gereken optimum değeri yakalar. Aynı şekilde  $\lambda$ , rüzgâr hızı değişimlerinde hızlı bir şekilde optimum değerini tekrar yakalamaktadır.  $C_p$  aynı şekilde  $\lambda$ 'ya bağlı olarak maksimum değeri olan 0,44 değerini, yaklaşık 3 s içerisinde tekrar elde etmektedir. Rüzgâr hızının değişmesiyle, REDS, yeni rüzgâr hızına karşılık gelen maksimum gücü hızlı bir şekilde yakaladığı gözlenmiştir. Türbin ve generatör momentinin zamana göre değişimi incelendiğinde, ikinci senaryoda açıklandığı gibi, KHO kontrolü ile türbin ve generatör momentinin eşitlenmesiyle sistem kararlı hale geçmiş ve maksimum gücü elde etmiştir. İkinci senaryoda olduğu gibi değişken rüzgâr hızlarında da sistemin KHO yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde maksimum güçte çalıştığı sonuçlardan görülmektedir.

Dördüncü senaryo ile sonuçlar elde edilirken, ayırık zamanlı  $PI$  hız denetleyici parametreleri değiştirilerek optimize edilmeye çalışılmıştır. Farklı  $PI$  hız denetleyici parametreleri kullanılarak sistemden elde edilen güç çıkışları Şekil 5.6'da verilmiştir. Şekil 5.6'da  $K_p=0,08$  ve  $K_i=1,9$  alınarak elde edilen güç değişimi incelendiğinde yükselme zamanının arttığı görülmüştür. Yerleşme zamanı da artmış, sonuç olarak elde edilen verim azalmıştır.  $K_p=1$  ve  $K_i=5$  alınarak elde edilen güç değişimi için yerleşme zamanı ve yükselme zamanı azalmıştır. Sonuç olarak sistemin verimi daha yüksek olmuştur. Ayırık zamanlı  $PI$  hız kontrol parametreleri  $K_p=1$  ve  $K_i=5$  alınarak Şekil 5.7'deki sonuçlar elde edilmiştir. Parametrelerin değerleri değiştirilirken optimizasyon yöntemleri kullanılmamış, deneme yanılma yoluyla en iyi performans elde edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 5.6. Farklı  $PI$  kontrol parametrelerinin sistemden elde edilen güce etkisi



Şekil 5.7.  $K_p=1$  ve  $K_i=5$  parametreleri ile zamana göre; rüzgâr hızı ( $v$ ), rotor hızı ( $\omega_r$ ), KHO ( $\lambda$ ),  $C_p$ ,  $P$  ve türbin momentini ( $T_t$ ) ile generatör momentini ( $T_g$ ) değişimi

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin bileşenleri ayrı ayrı modellenmiştir. DMSG Park ve Clarke dönüşümleri yapılarak modellenmiş ve alan yönlendirmeli kontrol ile hız denetim sistemi tasarlanmıştır. Akım ve hız kontrolleri için ayrık zamanlı denetleyiciler tasarlanmıştır. Hız denetleyici, giriş olarak, MGNT yöntemiyle elde edilen referans hız değerini alarak, sistemin o andaki rüzgâr değerine karşılık gelen, optimum rotor hızında çalışmasını sağlamıştır.

Kontrol sisteminin başarılı olup olmadığını test etmek için, tüm sistemin modeli Matlab/Simulink programı ile oluşturulmuştur. REDS üzerinde dört senaryo uygulanmış ve mukayese edilmiştir. Sistem öncelikle sabit rüzgâr hızında MGNT yöntemi olmadan denenmiş ve REDS'nin davranışı incelenmiştir. Benzetim sonucunda sistemin düşük verimde çalıştığı ve mevcut rüzgâr hızına karşılık gelen maksimum güce ulaşmadığı görülmüştür. İkinci senaryo olarak aynı sisteme bir MGNT yöntemi olan KHO yöntemi uygulanmış ve bu gözlemlerden kontrol sisteminin maksimum gücü küçük bir hatayla takip ettiği görülmüştür. Üçüncü senaryo olarak ise değişken rüzgâr hızı şartlarında sistemin davranışı bir MGNT yapılmadan incelenmiştir. Kontrol sistemi kullanılmadan yapılan benzetimde, sabit hızda olduğu gibi mevcut rüzgâr hızına karşılık, sistemin üretmesi gereken maksimum gücün çok altında bir güç ürettiği görülmüştür ve rüzgar hızındaki değişimlerden sonra sistem başarımı oldukça düşmüştür. Dördüncü senaryo olarak KHO yöntemi, değişken rüzgâr hızı şartlarında, rüzgâr hızı değişirken, sistemin kısa sürede yeni maksimum güç noktasında çalıştığı gözlemlenmiştir. Son uygulanan senaryo için ayrık zamanlı PI hız denetleyici parametreleri değiştirilerek sistem başarımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sistemin en uygun koşullarda ve en yüksek verimde çalışması amaçlanarak parametreler değiştirilmiş, verimin parametrelere bağlı olarak arttığı veya azaldığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, modellenen rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin, sabit ve değişken rüzgâr hızlarında, KHO kontrol yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde maksimum güçte çalıştığı sonuçlardan görülmektedir.

DeneySEL veriler gerektiren KHO yöntemi hızlı bir şekilde sonuç vermekle beraber, küçük güçlü REDS'lerinde kayda değer bir ek maliyet oluşturmaktadır. Bu

maliyeti azaltmak için rüzgâr hızının mekanik sensörle ölçülmesi yerine, hız tahmin yöntemleri kullanılarak rüzgâr hızı hesaplanması önerilir.

Bu tez çalışmasında PI denetleyici parametreleri deneme yanılma yöntemiyle elde edilmiştir. Parçacık sürü optimizasyonu ve genetik algoritma gibi gelişmiş optimizasyon yöntemleri kullanılarak denetleyici parametreleri belirlenirse denetleyici sayesinde sistemden daha yüksek verim alınabilir.

Alternatif bir kontrol yöntemi olarak bulanık mantık denetleyici, klasik denetim sistemlerinden farklı olarak, denetlenecek sistemin matematiksel modeline gerek duymadan istenilen çıkışı verecek şekilde kontrol işaretini üretebilir. Bu bakımdan yapılacak çalışmalarda PI denetleyici yerine bulanık denetim kullanılarak REDS'nden elde edilen verimin artırılmasına yönelik çalışmalar önerilir.



## 7. KAYNAKLAR

- [1] Anonymous. (2019). [https://www.eia.gov/pressroom/presentations/sieminski\\_07252013.pdf](https://www.eia.gov/pressroom/presentations/sieminski_07252013.pdf) (on-line access on 23 July, 2019).
- [2] Anonymous. (2017). [https://en.m.wiktionary.org/wiki/yel\\_de%C4%9Firmeni](https://en.m.wiktionary.org/wiki/yel_de%C4%9Firmeni) (on-line access on 08 July, 2017).
- [3] Anonymous. (2018). <https://tr.wikipedia.org/> (on-line access on 25 June, 2018).
- [4] Anonymous. (2018). <http://www.windenergy.org.nz/wind-energy/international-success> (on-line access on 25 June, 2018).
- [5] Anonim. (2018). <https://www.teias.gov.tr/tr/i-kurulu-guc> (Eriřim: 1 Eylül, 2018).
- [6] Anonim. (2019). <http://www.tureb.com.tr/turebsayfa/duyurular/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-ocak-2019> (Eriřim: 12 Nisan, 2019).
- [7] J. Earnest, *Wind Power Technology*, PHI Learning Pvt. Ltd., 2013, p.492
- [8] Anonim. (2011). [http://yesilekonomi.com/kose-yazilari/hakan-yildirim/ruzgrin-hizini-artiramayiz-bunun-disinda-her-seyin-bir-cozumu-var\\_](http://yesilekonomi.com/kose-yazilari/hakan-yildirim/ruzgrin-hizini-artiramayiz-bunun-disinda-her-seyin-bir-cozumu-var_) (Eriřim: 21 Temmuz, 2014).
- [9] J. Walker, F.N. Jenkins, *Wind Energy Technology*, John Wiley & Sons Canada, 1997, p.161
- [10] I. Munteanu, A.I. Bratcu, N. Cutululis, E. Ceanga, *Optimal control of wind energy systems towards a global approach*. Springer-Verlag London, 2008, p.248
- [11] T. I. of Electrical and E. E. Inc, "Ieee canadian review: Green power," *Mathematical and Computational Applications*, pp. 10–17, December 2007.
- [12] E. Dursun, A.K. Binark, Generator Types in Wind Turbines, 7.National Clean Energy Symposium, 17-21 December (2008), Istanbul.
- [13] J.S. Thongam, O. Mohand, *MPPT control methods in wind energy conversion systems. Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, (2011) 339-360.
- [14] H. Jeong, R. Seung, K. Lee, *An improved maximum power point tracking method for wind power systems*, **Energies**, 5 (2012) 1339-1354.
- [15] M. Pucci, M. Cirrincione, *Neural Mppt control of wind generators with induction machines without speed sensors*, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 58 (2011) 37–47.

- [16] R. Michał, K. Radosław, M. Mariusz, G. Zbigniew, S.J. Tomasz, *AC/DC converter with maximum power point tracking algorithm for complex solution of small wind turbine*, **Przegląd Elektrotechniczny**, 87:6 (2011) 91-96.
- [17] A. René, A. François, D. Ping, *A new low-cost sensorless Mppt algorithm for small wind turbines*. IEEE First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology, Hammamet, Tunisia, 26-28 March. (2012), pp.108-115
- [18] Q. Wang, L. Chang, *An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems*. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 19:5 (2004) 1242-1249.
- [19] G. Moor, H. Beukes, Power point trackers for wind turbines. Power electronics specialist conference, Aachen, Germany, June 20-25, (2004), pp.2044-2049.
- [20] T. Nakamura, S. Morimoto, M. Sanada, and Y. Takeda, Optimum control of ipmsg for wind generation system, Power conversion conference, Osaka, Japan, April, 2-5, (2002), pp.1435-1440.
- [21] S. Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, John Wiley & Sons Ltd, p.360
- [22] J. Hui, *An adaptive control algorithm for maximum power point tracking for wind energy conversion systems*. Master, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 2008.
- [23] Anonymous. (2019). <https://www.mathworks.com/help/simulink/ug/adding-libraries-to-the-library-browser.html> (on-line access on 01 May, 2019).
- [24] H. Sakarya, *Sürekli mıknatıslı senkron motorlar için alan yönlendirmeli sürücü düzeniği tasarımı ve uygulaması*. Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2009.
- [25] C. Sadarangani, *Electrical machines: Design and analysis of induction and permanent magnet motors*. Royal Inst. of Tech., Stockholm, Sweden, 2006, p.665
- [26] M.R.J. Dubois, *Optimised permanent magnet generator topologies for direct driven wind turbines*. PhD thesis, Delft Univ. of Tech., The Netherlands, 2004.
- [27] M. Hofmann, T. Hartkopf, S. Jockel, *Direct-drive generators for megawatt wind turbines*. In Europ. Wind Energy Conference, Dublin, Ireland Oct. 06–09, 1997, (1997), pp.668-671.
- [28] J.R. Hadji-Minaglou, G. Henneberger, (1999). *Comparison of different motor types for electric vehicle application*. In **EPE Journal**, 8 (1999) 46–55.

- [29] P. Lampola, *Directly driven, low-speed permanent-magnet generators for wind power applications*. PhD thesis, Helsinki Univ. Tech., Finland, 2000.
- [30] Yicheng C., Pillay, P. Axial-flux PM wind generator with a soft magnetic composite core, Industry Applications Conference, Fourtieth IAS Annual Meeting, Kowloon, Hong Kong, China. Oct. 2-6, (2005), pp.231-237
- [31] H. Gör, *Eksenel akıllı generatörlerin tasarımı ve uygulanması*. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2014.
- [32] F. Libert, *Design optimisation and comparison of permanent magnet motors for a low speed direct driven mixer*. Lic. Thesis, Royal Inst. of Tech., Sweden, 2004.
- [33] L.H. Hansen, *Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines*. Technical report, Riso national lab, Roskilde, Denmark, 2001
- [34] Anonymous. (2011). <http://www.eme.ee.kth.se/emotor/emotor.php> (on-line access on 03 July, 2011).
- [35] Y. Öner, *Sürekli mıknatıslı DA motor ile tahrik edilen sürekli mıknatıslı senkron generatörün çıkış geriliminin kontrolü*. Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [36] İ. Alışkan, *Sürekli mıknatıslı senkron motorların hız denetiminde doğal frekans ve bulanık mantık*, **Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi**, 6:2 (2016) 423-431.
- [37] S. Campbell and H.A. Toliyat, *DSP-Based Electromechanical Motion Control*, CRC Press, 2003 p.360
- [38] N.S. Tınığ, İ. Aksoy, Y. Şahin, Rüzgâr türbinlerinde kullanılan sabit mıknatıslı senkron generatörün güç kontrolünde uzay vektörü PWM ve histerezis akım kontrolü tekniklerinin karşılaştırılması. Eleco Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, Kasım 27-29, (2014), pp. 56-61.
- [39] H.Y. Kürüm, E. Akın, *Sabit mıknatıslı senkron motorun parametre tespiti*, **Fırat Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 30:1 (2018) 183-191.
- [40] Anonymous. (2011). <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/permanentmagnetsynchronousmachine.html> (on-line access on 17 March, 2019).
- [41] J. Holtz, *Pulsewidth modulation for electronic power conversion*, **Proceedings of the IEEE**, (1994) 1194-1214.
- [42] J. Sun, *Dynamics and Control of Switched Electronic Systems*. Springer-Verlag London Limited, 2012, p.540.
- [43] A. Ghosh, G. Ledwich, *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*. Springer US, 2002, p.460.

- [44] C. Hou, S. Chih-chung, P. Cheng, A.M. Hava, (2013). *Common-Mode voltage reduction pulsewidth modulation techniques for three-phase grid-connected converters*. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 28:4 (2013) 1971-1979.
- [45] K. Zhou and D. Wang, *Relationship Between Space-Vector Modulation and Three-Phase Carrier-Based PWM, A Comprehensive Analysis*. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 49:1 (2002) 186-196.
- [46] H. Zhao, Q.M. Jonathan Wu, A. Kawamura, *An Accurate Approach of Nonlinearity Compensation for VSI Inverter Output Voltage*. **IEEE Transactions On Power Electronics**, 19:4, (2004) 1029.
- [47] B.K. Bose, *Pulse Width Modulation Techniques, in Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall. 2002, 210-239.
- [48] M. Konghirun, A three-phase space vector based PWM rectifier with power factor control Proc. Power Conversion Conference, Nagoya, Japan, April, 2-5, (2007), pp.57-61.
- [49] H.İ. Yüksek. *Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu yöntemi ile üç faz üç seviyeli doğrultucunun matlab/simulink ortamında modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2019.
- [50] Ö.F. Bay, *Düşük maliyetli 8-bitlik bir mikrodenetleyici kullanarak 3-fazlı indüksiyon motor hız denetleyicisinin tasarımı ve gerçekleştirilmesi*, **Politeknik Dergisi**, 12: 3 (2009) 143-150.
- [51] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*. Springer, New York, USA, 1997, p.353.
- [52] M. Chinchilla, S. Arnaltes, J.C. Burgos, *Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid*, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 21: 1 (2006) 130-135.
- [53] M. Sarvi and S. Azarbara, *A novel maximum power point tracking method based on extension theory for wind energy conversion system*, **International Journal of Computer Science & Engineering Technology**, 3:8 (2012) 2229-3345.
- [54] J. Espina, A. Arias, J. Balcells, C. Ortega, *Speed anti-windup PI strategies review for field oriented control of permanent magnet synchronous machines*, *Compatibility and Power Electronics*, Badajoz, Spain, May. 20-22, (2009) pp. 279-285.
- [55] Q. Wei, Z. Aller and R.G. Harley, *Wind speed estimation based sensorless output maximization control for a wind turbine driving*. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 23:3 (2008) 1156-1169.
- [56] R.D. Shukla and R.K. Tripathi, *Maximum power extraction schemes and power control in wind energy conversion system*, **International Journal of Scientific and Engineering Research**, 3: 6 (2012) 121-136.

- [57] K. Maheswari, T. Porselvi, Comparison of TSR and PSO based MPPT algorithm for wind energy conversion system, National Conference on Innovation Challenges in Electrical Electronics Engineering, Raipur, India, February, 18-21, (2014), pp.160-163.
- [58] R. Datta and V.T. Ranganathan, *A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system*, **IEEE transactions on energy conversion**, 18:1 (2003) 163-168.
- [59] L.F.M. Gevaert, D.M. Jeroen, D. Kooning, T.L. Vandoorn, J.V. Vyver and L. Vandevelde, Evaluation of the MPPT performance in small wind turbines by estimating the tip-speed ratio, Dublin, Ireland, Sept. 2-5, (2013), pp.152-160.
- [60] S. Morimoto, H. Nakayama and M. Sanada, *Sensorless output maximization control for variable-speed wind generation system using ipmsg*, **IEEE transactions on industry applications**, 41:1 (2005) 60-67.
- [61] X. Bracke. *Maximum Power Point Tracking of Small Wind Turbines with a Full Active Rectifier*. Master of Science, Universiteit Gent, Belgium, 2014.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad:** Ömer BEKTAŞ

**Doğum Yeri ve Tarihi:** ELAZIĞ / 18.08.1984

**Adres:** Pertek Sakine Genç M.Y.O. Pertek/TUNCELİ

**E Posta:** omerbektas@munzur.edu.tr

**Lisans:** Fırat Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği

### **Yayın Listesi:**

1. İçel Y., Baran B., Kaygusuz A., Bektaş Ö., “Yenilenebilir Kaynakları İçeren Güç Sistemlerinin PowerWorld Programı ile Analizi”, “Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK2013, 26-28 Eylül 2013, Malatya”
2. Bektaş Ö., Kaygusuz A., “HCS Control Algorithm for the Sensorless MPPT of a Small Power Wind Turbine”, “Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Advances in Natural & Applied Science Ağrı, Turkey, 19-22 June 2019”