



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

**DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN
SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRÜN VEKTÖR
KONTROLÜ**

AYŞE ÇİFTÇİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK ve BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. MUSTAFA DURSUN**

DÜZCE, 2017

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

20 Temmuz 2017

Ayşe Çiftçi



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Mustafa Dursun'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen hocalarım Doç. Dr. Bilal Saraçođlu ve Yrd. Doç. Dr. Murat Karabacak'a da şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

20 Temmuz 2017

Ayşe Çiftçi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİL LİSTESİ.....	VII
ÇİZELGE LİSTESİ.....	IX
KISALTMALAR.....	X
SİMGELER.....	XI
ÖZET.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
1. GİRİŞ.....	1
1.1. LİTERATÜR İNCELEMESİ.....	3
2. RÜZGÂR GÜCÜNDEN ELEKTRİK ÜRETEN SİSTEMİN MODELLENMESİ.....	10
2.1. RÜZGÂR GÜCÜ.....	10
2.2. YATAY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNİ.....	11
2.2.1. Rotor Kanatları.....	11
2.2.2. Türbin Kulesi.....	18
2.2.3. Dişli Kutusu.....	18
2.2.4. Yaw Sistemi.....	19
2.2.5. Fren Sistemleri.....	19
2.2.6. Generatör.....	22
2.2.7. Güç Dönüştürücü Sistemler.....	24
2.3. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR.....	27
2.3.1. Matematiksel Model.....	30
2.4. MSG'LERİN KONUM ALGILAYICI SİNUSOİDAL DALGA GENİŞLİK MODÜLASYONLU (SDGM) VEKTÖR KONTROLÜ.....	31
2.4.1. Akım Denetleyici ve D-q Düzlemde Kuplajlama.....	33
2.4.2. Moment Denetleyicinin Tasarımı.....	36
2.4.3. Generatör Tarafı Sinus Dalga Genişlik Modülasyonu.....	38
2.5. ŞEBEKE VEKTÖR KONTROLÜ.....	42

2.5.1. Şebeke Akım ve Konum Açısını Algulama	42
2.5.2. Akım Bilgilerinin Elde Edilişi ve Gerilim Yönlendirmeli Kontrol.....	43
2.5.3. Akım Denetleyici ve Kapı Sinyalleri Üretimi	45
3. MAKSİMUM GÜÇ İZLEMESİ	50
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	55
5. SONUÇLAR	69
6. KAYNAKLAR.....	71
7. EKLER	78
7.1. EK-1. PARK DÖNÜŞÜMÜ	78
ÖZGEÇMİŞ	81



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Kanat profil karakteristikleri	12
Şekil 2.2. Rüzgâr türbini kinetik enerji ekstraksiyonunu gösteren akış tüneli	16
Şekil 2.3. Güç katsayısı eğrileri.	18
Şekil 2.4. Aktif durdurma kontrolü blok diyagramı	20
Şekil 2.5. Hücum açısının değişimi ile kanat profili etrafındaki akış	21
Şekil 2.6. Alan sargılı senkron generatör.	23
Şekil 2.7. Sabit mıknatıslı senkron generatör.	23
Şekil 2.8. Rotor rezistans dönüştürücülü alan sargılı indüksiyon generatör	25
Şekil 2.9. Tam ölçekli güç dönüştürücülü rüzgâr türbini sistemleri	26
Şekil 2.10. Radyal akılı sürekli yüzey mıknatıslı makine	28
Şekil 2.11. Hava boşluğu sargıları olan eksenel akılı SMSG.	29
Şekil 2.12. Akı yoğunluğu olan çapraz (enine) akılı SMSG'nin üç kutbu.	29
Şekil 2.13. Konum algılayıcı kontrol tasarımı.	32
Şekil 2.14. Generatör tarafı faz kilitleme döngüsü bloğu	32
Şekil 2.15. Çapraz kuplajlama terimlerinin dâhil olduğu blok diyagramı	35
Şekil 2.16. Dekuplaj (ayırışım) kontrollü akım PI denetleyicileri	37
Şekil 2.17. İki seviyeli üç fazlı bir anahtarlama modeli.	38
Şekil 2.18. İki farklı seviyede anahtarlama modeli.	38
Şekil 2.19. İki seviyeli üç fazlı evirici faz nötr ve fazlar arası gerilim ilişkisi.	40
Şekil 2.20. SDGM sinyallerinin elde edilmesi.	42
Şekil 2.21. Şebeke tarafı faz kilitleme döngüsü bloğu	43
Şekil 2.22. Gerilim yönlendirmeli kontrol bloğu	44
Şekil 2.23. Şebeke bağlantılı evirici fazör diyagramı	45
Şekil 2.24. Aktif, reaktif ve görünür güç ilişkisi.	46
Şekil 2.25. $V_E < V_S$ iken evirici fazör diyagramı	47
Şekil 2.26. Güç faktörünün 1 yapılabilmesi için evirici çıkış akımı referansı	47
Şekil 2.27. Şebekeye bağlı eviricinin vektör kontrolü.	48
Şekil 3.1. Maksimum güç izlemesi yöntemini sağlayan optimum moment eğrisi	52
Şekil 3.2. Maksimum güç noktası oluşumu.	53
Şekil 3.3. Maksimum güç izlemesi algoritması.	54
Şekil 4.1. Türbin referans rüzgâr hızı.	55
Şekil 4.2. Lamda-Cp grafiği.	56
Şekil 4.3. Rüzgâr türbini tarafından oluşturulan güç.	56
Şekil 4.4. Rüzgâr türbini mekaniksel momenti.	57
Şekil 4.5. Rüzgâr türbini generatörü anlık & referans mekaniksel açısal hızı	58
Şekil 4.6. Rüzgâr türbini elektriksel açısal hızı.	59
Şekil 4.7. Rüzgâr türbini generatörü akı ve moment bileşenleri.	60
Şekil 4.8. Rüzgâr türbini generatörü reaktif güç gerilim bileşeni	61
Şekil 4.9. Rüzgâr türbini generatörü aktif güç gerilim bileşeni	61
Şekil 4.10. Rüzgâr türbini generatör tarafı kontrolünde üretilen aktif ve reaktif güç	62
Şekil 4.11. DA bara gerilimi	63
Şekil 4.12. Şebeke aktif ve reaktif güç akım bileşenleri	64
Şekil 4.13. Şebeke-d ekseni aktif güç gerilim bileşeni	64
Şekil 4.14. Şebeke -q ekseni reaktif güç gerilim bileşeni	65
Şekil 4.15. Şebeke tarafı kontrolünde üretilen aktif ve reaktif güç.	66

Şekil 4.16. Aynı fazdaki şebeke eviricisi çıkış akımı & Şebeke gerilimi.....	67
Şekil 8. 1. D-q bileşenleri ile abc bileşenleri arasındaki ilişki.....	78
Şekil 8. 2. Durağan d-q çerçevesi ile döner d-q çerçevesi arasındaki ilişki.	79



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. İki seviyeli üç fazlı anahtarlama durumları.	39
Çizelge 2.2. Üç fazlı iki seviyeli evirici faz nötr ve faz-faz arası gerilimi.	41
Çizelge 4.1. Rüzgâr türbini parametreleri.....	67
Çizelge 4.2. Sürekli mıknatıslı senkron generatör parametreleri.....	67
Çizelge 4.3. DA bara ve şebeke parametreleri.....	68



KISALTMALAR

DGM	Dalga Genişlik Modülasyonu
FKD	Faz Kilitleme Döngüsü
GKD	Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü
GKE	Gerilim Kaynaklı Evirici
KHO	Kanat Uç Hız Oranı
MGİ	Maksimum Güç İzlemesi
PI	Proportional-İntegral
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generatör
SDGM	Sinusoidal Dalga Genişlik Modülasyonu
SMSG	Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör
MGN	Maksimum Güç Noktası
MPT	Maximum Power Tracking

SİMGELER

A	Rotorun taradığı alan
B	Türbin sistemi sürtünme faktörü
C_D	Kanat sürüklenme kuvveti katsayısı
C_L	Kanat kaldırma kuvvet katsayısı
C_p	Türbin güç katsayısı
$C_{p_maks.}$	Maksimum türbin güç katsayısı
E	Rüzgâr kinetik enerjisi
F_D	Kanat sürüklenme kuvveti
F_L	Kanat kaldırma kuvveti
G_r	Dişli kutusu çevrim oranı
i_a	Stator a fazı akımı
i_b	Stator b fazı akımı
i_c	Stator c fazı akımı
i_d	D-q düzlemdeki stator –d eksenli akımı
i_d^*	D-q düzlemde rotor akısını barındıran referans –d eksenli akımı
$i_{d_ş}$	D-q düzlemde şebeke aktif güç akım bileşeni
$i_{dref_ş}$	D-q düzlemde şebeke aktif gücü referans akım bileşeni
i_q	D-q düzlemdeki stator –q eksenli akımı
$i_{q_ş}$	D-q düzlemde şebeke reaktif güç akım bileşeni
i_{qref}	D-q düzlemdeki referans stator –q eksenli akımı
$i_{qref_ş}$	D-q düzlemde şebeke reaktif gücü referans akım bileşeni
$i_ş$	Şebeke akımı
i_{e_ref}	Şebeke tarafı referans evirici çıkış akımı
J	Türbin ve generatör sisteminin toplam ataleti
L	Rotor alanında kat edilen hava kütlesi uzunluğu
L_{ab}	Stator ab fazı ortak indüktansı
L_{ac}	Stator ac fazı ortak indüktansı
L_{ba}	Stator ba fazı ortak indüktansı
L_{bc}	Stator bc fazı ortak indüktansı
L_{ca}	Stator ca fazı ortak indüktansı
L_{cb}	Stator cb fazı ortak indüktansı
L_{aa}	Stator a fazı öz indüktansı
L_{bb}	Stator b fazı öz indüktansı
L_{cc}	Stator c fazı öz indüktansı
L_d	D-q düzlemdeki stator –d eksenli endüktansı
$L_ş$	Şebeke endüktans değeri
L_q	D-q düzlemdeki stator –q eksenli endüktansı
m	Hava kütlesi
m_{maks}	Modülasyon indeksi maksimum değeri
n	Rotor kanat sayısı
P	Aktif güç
p	Generatör kutup çifti sayısı
P_{aero}	Aerodinamik kontroldeki türbin anlık gücü
P_{aero}^*	Aerodinamik kontroldeki türbin nominal gücü

P_m	Rüzgâr türbini tarafından elde edilen güç
P_{ref}	Referans aktif güç
P_{turbin_tepe}	Rüzgâr türbini maksimum gücü
P_w	Rüzgâr gücü
ρ	Hava yoğunluğu
Re	Reynolds sayısı
R_s	Stator sargı direnci
R_φ	Şebeke rezistans değeri
S	Görünür güç
T_w	Dengesiz havanın önceki dengesini kurabilme süresi
T_s	Rotor kanadının bulunduğu önceki konumuna gelme süresi
T_m	Türbin mekaniksel momenti
T_e	Generatör elektriksel momenti
Q	Reaktif güç
Q_{ref}	Referans reaktif güç
α	Şebeke tarafı evirici gerilimi ile şebeke gerilimi arasındaki açı
α_h	Türbin kanat hücum açısı
β	Türbin kanat açısı
β_{aero}^*	Aerodinamik kontroldeki türbin nominal kanat açısı
β_{aero}	Aerodinamik kontroldeki türbin anlık kanat açısı
μ	Rüzgârın dinamik viskozitesi
λ	Kanat uç hız oranı
λ_{opt}	Optimum kanat uç hız oranı
λ_a	Stator a fazı akı bağı
λ_b	Stator b fazı akı bağı
λ_c	Stator c fazı akı bağı
λ_{ds}	Rotor referans düzlemdeki -d eksenli akısı
λ_{qs}	Rotor referans düzlemdeki -q eksenli akısı
λ_r	Rotor akı bağı
ω_e	Generatör elektriksel açısal hızı
ω_r	Generatör mekaniksel açısal hızı
ω_r^*	Generatör referans mekaniksel açısal hızı
ω_{r_opt}	Optimum türbin rotoru mekaniksel açısal hızı
ω_φ	Şebeke açısal hızı
ω_t	Türbin rotorunun dönme hızı
θ_{gen}	Durağan çerçeve ile döner çerçeve arasındaki açı
θ_φ	Şebeke gerilimi ve akımı arasında oluşan faz farkı açısı
V_a	Stator a fazı gerilimi
V_b	Stator b fazı gerilimi
V_c	Stator c fazı gerilimi
V_{abc_φ}	Şebeke tarafı 3 faz evirici anahtarlama gerilimi
V_{abc}	Generatör tarafı 3 faz evirici anahtarlama gerilimi

$V_{b_rüzgâr}$	Rotor kanadındaki ortalama rüzgâr hızı
$V_{d_rüzgâr}$	Türbin rotorundan ayrılan rüzgâr hızı
$V_{u_rüzgâr}$	Türbin rotoruna doğru gelen rüzgâr hızı
V_{ed}	D-q düzlemindeki -d eksenli evirici gerilim bileşeni
V_{eq}	D-q düzlemindeki -q eksenli evirici gerilim bileşeni
V_d	D-q düzlemindeki stator -d eksenli gerilimi
$V_{d_ş}$	D-q düzleminde şebeke aktif güç gerilim bileşeni
V_q	D-q düzlemindeki stator -q eksenli gerilimi
$V_{q_ş}$	D-q düzleminde şebeke reaktif güç gerilim bileşeni
V_{DA}	DA bara anlık gerilimi
V_{DA_min}	DA bara minimum gerilim değeri
V_{DA_ref}	DA bara referans gerilimi
V_E	Şebeke tarafı evirici gerilimi
V_L	Şebeke endüktans gerilimi
$V_ş$	Şebeke gerilimi
V_d^*	Senkronize dönen rotor referans düzlemindeki -d eksenli referans gerilimi
V_q^*	Senkronize dönen rotor referans düzlemindeki -q eksenli referans gerilimi

ÖZET

DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRÜN VEKTÖR KONTROLÜ

Ayşe ÇİFTÇİ

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mustafa DURSUN

Temmuz 2017, 80sayfa

Bu çalışmada maksimum güç izleme (MGİ) yöntemi, maksimum düzeyde enerji elde etmek amacıyla değişken hızlı rüzgâr türbini enerji sistemine vektör kontrol tekniği de kullanılarak uygulanmıştır. Sistem bir rüzgâr türbini ile önce değişken bir rüzgâr hız referansı ve devamında 9 m/s nominal rüzgâr hızı altında analiz edilmiş, sistemden elde edilen elektrik enerjisi şebekeye aktarılmıştır. Rüzgâr türbininin değişken genlik ve frekanstaki akım-gerilim değerlerinin, şebekenin sabit genlik ve frekanstaki akım-gerilim değerlerine uyumunu sağlamak için generatör ve şebeke arasında bir DA bara kullanılmıştır. Şebeke tarafı ve generatör tarafı kontrolü sağlamak amacıyla üç fazlı gerilim kaynaklı eviriciler kullanılmıştır. Generatör olarak değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde yüksek verimlilik sağlaması nedeniyle sürekli mıknatıslı senkron generatör (MSG) tercih edilmiştir. Generatör tarafı eviricide MGİ algoritması olarak kanat uç hız oranı (KHO) yöntemi kullanılmış ve bu yöntem ile rüzgârın anlık olarak izlenmesi sağlanmıştır. Şebeke tarafı eviricisinde rüzgâr türbini tarafından yakalanan enerjinin etkili bir şekilde şebekeye aktarılması için alan yönlendirmeli kontrol olarak da adlandırılan vektör kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Kullanılan MGİ yöntemi ile değişken rüzgâr hızlarında sistemin maksimum gücü takip etmesi sağlanmıştır. Böylece hem MGİ yöntemi hem de vektör kontrolü ile rüzgâr gücünden maksimum verim elde edilmiştir. Sistemin MATLAB/Simulink programında bir benzetimi hazırlanmış, sistem bu benzetim üzerinde oluşturulmuş ve denenmiştir. Sistem çalışması bu benzetim programından alınan grafiksel sonuçlar ile izlenmiş ve doğrulanmıştır. Bu tez ile son yıllarda değişken hızlı rüzgâr türbinleri ile yapılan çalışmalara pozitif yönde bir katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Anahtar sözcükler:Değişken hızlı rüzgâr türbini, Maksimum güç izlemesi, PI kontrol, Sürekli mıknatıslı senkron generatör, Vektör kontrol

ABSTRACT

VECTOR CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRON GENERATOR USED IN VARIABLE SPEED WIND TURBINES

Ayşe ÇİFTÇİ

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electric-Electronic
and Computer Engineering

Master Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mustafa DURSUN

July 2017, 80pages

In this study, the maximum power tracking (MPT) method was applied to the variable speed wind turbine energy system using the vector control method technique in order to obtain maximum energy. The system was analyzed with a wind turbine first under a variable wind speed reference and then at a nominal wind speed of 9 m/s and electrical energy obtained from the system were transferred to the network. In order to ensure that the wind turbine's variable amplitude and freewheeling current-voltage values match the network's constant amplitude and freewheeling current-voltage values, a busbar is used between the generator and the mains. In order to provide control of the grid side and the generator side, three phase voltage sources inverters are used. As a generator, permanent magnet synchronous generator (PMSG) is preferred because of its high efficiency in variable speed wind turbines. As a generator algorithm, the tip speed ratio (TSR) method is used as the MPT algorithm and this method provides instantaneous monitoring of the wind. The vector control method, which is also referred to as field-directed control, is preferred in order to effectively transmit the energy captured by the wind turbine in the grid side inverter to the grid. The maximum power of the system was monitored at variable wind speeds by used the MPT method. Thus, maximum efficiency was obtained from wind power by both MPT method and vector control. The system has been simulated in the MATLAB / Simulink program and the system has been created and tested on this simulation. System operation was monitored and verified with graphical results from this simulation program. It is aimed to provide a contribution to the positive work done with variable speed wind turbines in recent years..

Keywords: Variable speed wind turbine, Maximum power management, Permanent magnets synchronous generator, PI control, Vector control

1. GİRİŞ

Rüzgâr enerjisi, yeryüzünde Güneş enerjisinin değişik bir formu olarak karşımıza çıkan bir enerji türüdür. Güneş ulaştırdığı ışınlar ile yeryüzünün farklı farklı sıcaklık, basınç ve nem değerlerine sahip olmasına sebep olur. Yeryüzünün sahip olduğu bu farklı değerler rüzgârların oluşma sebebidir. Güneş, Dünya'ya saatte 1018 W'lık bir enerji göndermekte ve bu enerjinin %1-2'si rüzgâr kinetik enerjisine dönüşmektedir [1].

Rüzgâr, eski çağlardan beri insanoğlunun enerji arayışına bir cevap olmuştur. İnsanoğlu gemileri hareket ettirmek için en az 5500 yıldan beri rüzgârın gücünden faydalanmaktadır. Kullandıkları yel değirmenleri, gerçekleştirdikleri çeşitli sulama işlemleri, elde ettikleri tahılların öğütülmesi vs. insanoğlu için rüzgârdan faydalanılan diğer alanlar olmuştur. M.Ö. 3000 yıllarında Mısır'da İskenderiye'de rüzgâr çarkları kurulmuş, bu rüzgâr çarkları Nil Vadisi'nde toprakların sulanmasını sağlamaya yardımcı olmuştur. M.Ö. 250 yıllarında İran'da kurulan ilk düşey eksenli rüzgâr çarkları tahıl öğütülmesinde kullanılmış ve daha sonra tüm İslam ülkelerine ve Akdeniz'e kıyısı olan ülkelere yayılmış, oralarda kullanılmaya başlanmıştır. Avrupa'ya 13.yüzyılda haclı seferleri esnasında Anadolu'dan götürülmüş, Avrupa'nın da rüzgâr çarkları ile tanışması sağlanmıştır. 1887 yılı Temmuz ayında İskoç Akademisyen Profesör James Blyth rüzgâr gücü ile elektrik üreten ilk değirmeni inşa etmiş, 1891 yılında İngiltere'de patent almıştır. 1887-88'de Amerika Birleşik Devletleri'nde Charles Francis Brush, James Blyth'in değirmeninden daha büyük ve üzerinde daha fazla mühendislik işlemi yapılmış bir rüzgâr değirmeni ile elektrik üretmiş, 1900 yılına kadar evinin ve laboratuvarının elektrik enerjisini bu değirmenden ürettiği enerji ile sağlamıştır. 1890 yılında Danimarka'da Fransız Paul La Cour tarafından 9 KW'lık iki generatör ile ilk rüzgâr enerjisi uygulamaları başlatılmıştır. Rusya'da 1931 yılında 100 KW'lık bir rüzgâr türbini icat edilmiştir. 1932 yıllarında ABD'de 15 m/s rüzgâr hızında çalışabilen 20 MW'lık bir türbin tasarlanmış, ancak bu çalışma ne yazık ki sadece kâğıt üzerinde kalabilmiştir. Yine ABD'de ilk büyük rüzgâr generatörü 1941 yılında S. Morgan Smith Co. ile General Electric Co. tarafından Vermont eyaletinde kurulmuştur. Bu eyaletin Rutland şehri yakınlarında Grandpa's Knob adında bir tepede kurulan Putnam rüzgâr türbini, 1250 KW'lık gücü ile dönemin en büyük rüzgâr makinesi kabul edilmiştir.

Modern rüzgâr türbinleri ise ilk defa 20-30 KW'lık güçleri ile 1970'lerdeki fosil yakıt haricindeki enerji kaynaklarına sahip olma isteğinin artması sebebiyle Danimarka'da üretilmeye başlanmıştır. 1985 yılında ise 1000'den fazla türbinden oluşan California Rüzgâr Çiftliği kurulmuştur. 1983-1987 yılları arasında Kuzey Denizi kıyısında 300 KW'lık Voith-Hütter türbini kurulmuş, daha sonraları buzlu ve soğuk coğrafyalar için rotor kanadı siyah renkte yapılmaya başlanmıştır. 1998'e gelindiğinde Almanya'da, 1,5 MW'lık Enercon E66 rüzgâr türbinlerinden oluşan 52 MW güçlü, Avrupa'nın en büyük rüzgâr çiftliği kurulmuştur. 2015 itibariyle 7 MW'lık rüzgâr türbinleri prototip olarak geliştirilmeye, ilk uygulamaları ise Avrupa'nın çeşitli yerlerinde yapılmaya başlanmıştır. Modern düşey eksenli rüzgâr türbinleri üzerindeki ilk çalışmalar Savonius ve Darrieus tarafından yapılmıştır. İlk yatay eksenli hesaba dayalı olarak yapılan yatay eksenli rüzgâr türbinleri ise 1930'lu yıllarda Betz tarafından yapılmış, bu türbinlerin teorik verimlerinin %59 civarında olduğu saptanmıştır [1],[2]. Bu gün hala rüzgâr türbinleri Betz limiti olarak bilinen bu değerden daha fazla maksimum verim elde edememektedirler.

Rüzgâr türbinlerinden elektrik üretilirken bir taraftan da bu üretimden maksimum düzeyde verim almak, yine insanoğlunun geçmişten günümüze üzerinde çalıştığı bir alan olmuştur. Bu çalışmalar maksimum güç izlemesi (MGİ) kavramını ortaya çıkarmıştır. MGİ ile nominal olmayan çalışma koşullarında dahi o çalışma koşulları dahilinde elde edilebilecek maksimum enerji elde edilmeye çalışılır. Literatüre bakıldığında ilk MGİ yöntemi 1960'larda yayınlandığından bu yana 15'in üzerinde MGİ yönteminden bahsedilmektedir. Bu yöntemler dolaylı kontrol yöntemi ve direkt kontrol yöntemi olarak sınıflandırılabilir [3].

Son yıllarda bu sınıflandırmaya yapay zeka yöntemi de dâhil edilmiştir. Dolaylı kontrol yönteminde temel olarak çeşitli algoritmalar, deneysel veriler veya matematiksel denklemler kullanılarak etkileşimsiz kullanılan maksimum güç noktaları öngörülmüştür. Bu yöntem hızla değişen çevresel koşullara ve kısmi bölgelendirme koşullarına uygun değildir. Doğrudan kontrol yöntemi, değişen atmosferik koşullara karşı maksimum güç noktalarını etkileşimli olarak bulan algoritmalar içerir. Yapay zekâ yöntemi ise, yapay zekâ algoritmaları ile oluşturulan MGİ yöntemlerini içermektedir [4].

Yine literatüre bakıldığında rüzgâr türbinlerinin de çeşitli sınıflandırmalar altında kategorize edildiği görülmektedir. Günümüzde en çok kullanılan sınıflandırma biçimi, rotor ekseninin yeryüzüne göre konumunu dikkate almaktadır. Buna göre rüzgâr

türbinleri yatay eksenli rüzgâr türbinleri, dikey eksenli rüzgâr türbinleri, eğik eksenli rüzgâr türbinleri olmak üzere üç başlık altında incelenmektedir [5].

Bu tezde şebeke bağlantılı sabit mıknatıslı senkron generatör (SMSG)'li bir yatay eksenli rüzgâr türbini ile çalışmış, doğrudan kontrol yöntemlerinden olan kanat uç hız oranı (KHO) yöntemi ile MGİ sağlanmış, son yıllarda hızla gelişen değişken hızlı rüzgâr türbini sistemlerinden maksimum güç verimi elde etmek için yapılan çalışmalara pozitif katkı sağlanması amaçlanmıştır. Çalışma deneysel ve belgesel araştırma türleri ile gerçekleştirilmiştir. Belgesel araştırma yöntemi ile ön literatür taraması gerçekleştirildikten sonra veri toplama aracı ile veriler elde edilmiştir. Toplanan veriler analizi ile çalışmanın bilgilerine ulaşılmıştır. Bu bilgiler çalışmaya aktararak, yapay canlandırma yöntemi ve MATLAB/Simulink benzetim aracı ile görsel olarak tasarlanmıştır. Sisteme değişken değerlerinin girilmesi, bu değerlerin istenilen sistem sonucuna ulaşmaya kadar değiştirilmesi ve nihayetinde istenilen sistem sonucuna ulaşılmasıyla başarı sağlanmıştır.

1.1. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Başlangıçta rüzgâr enerjisinden faydalanılmasında büyük kurulumlar için sadece büyük yel değirmenleri mevcuttu. Günümüzde artık küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde (10 KW'ın altında) kullanılmak üzere tasarlanan genel birkaç türbin tipi vardır ve bunlar aynı temel ilkeler altında çalışırlar. Bununla birlikte, düşük boyut ve düşük maliyet nedeniyle oluşan özel hususlar vardır. Boyut ne olursa olsun rüzgâr türbininden elektrik enerjisi üretimi başlangıç maliyeti önemlidir. Rüzgâr hızı da değişken olduğundan, verimliliği artırmak için mevcut gücün maksimuma çıkarılması zorunludur. Bir rüzgâr türbininin dinamiklerinin incelenmesine göre, her rüzgâr hızında ulaşılabilir maksimum gücün elde edilmesini sağlayan yalnızca bir rotor hızı olduğu görülmektedir, bu maksimum güç noktası (MGN) olarak bilinir. İşin püf noktası bu maksimum güç noktasını izleyebilmektir. MGİ, generatörün herhangi bir rüzgâr hızı için çalışabileceği optimum devir sayısı ile çalıştırılarak mevcut rüzgâr enerjisi potansiyelinden maksimum faydalanılmasıdır. Rüzgâr türbini farklı hızlarda döndüğünde bu hızlardan maksimum verim alabilmek için bir MGİ algoritması ile generatorü optimum hız veya moment referansında çalıştırmak gerekir. MGİ sistemleri optimum rüzgâr hızında optimum mekaniksel açısal hızını sağlayabilmelidir. Ayrıca herhangi bir rüzgâr hızında bu hıza özgü maksimum güç sağlanabilecek tek bir optimum mekaniksel açısal hız ile bu açısal

hızda rüzgârdan maksimum fayda sağlamayı da mümkün kılmalıdır. Bunun için değişen rüzgâr hızı ile maksimum gücü temin edebilecek optimum mekaniksel açışal hız kontrolünün sürekli yapılması gerekmektedir. Bu kontrol yapılırken AA makinelerini DA makineleri gibi kolayca denetlenebilir kılan bir de vektör kontrolü gerçekleştirilmektedir. Vektör kontrol yöntemiyle AA makinelerin moment ve hız kontrolleri dolaylı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir [6]-[8].

Aşağıdaki literatür incelemesinde enerji dönüşüm sistemlerinde uygulanan MGİ yöntemleri ve vektör kontrol teknikleriyle yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Literatürde enerji dönüşüm sistemlerine uygulanan çok sayıda MGİ yöntemi bulunmaktadır. Bunlar look-up-table tekniği, gerilim kontrol tekniği, akım kontrol tekniği, denklem tabanlı teknik, Değiştir & gözle tekniği (P&O), Bulanık mantık tabanlı teknikler, Sinir ağı tabanlı teknik, Parçacık-sürü optimizasyonu tabanlı teknik, Uç hız oranı kontrolü, Güç sinyali geri besleme kontrolü vb. bunlardan sadece birkaçıdır [7],[9].

El-Shibini ve arkadaşları, look-up-table tekniği ile fotovoltaik sistemde çalışan DA iletim sistemi için maksimum güç noktası izleyicisi olarak kullanılan düşüren regülatör kontrollü bir mikrobilgisayar üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu ucuz ve verimli bir maksimum güç noktası izleyicisi tasarımını, bir pilot modülün gerilim denetleyicisi yazılımı tarafından kontrol edilen gerilim düşürücü bir kıyıcının çalışma döngüsünü değiştirerek gerçekleştirmişlerdir [10].

Nagao ve arkadaşları, gerilim kontrol tekniğini kullanarak bir yükü veya ticari bir AA sistemi besleyen Güneş enerjisi radyasyonundaki Güneş ışınım miktarında yaşanan değişiklikler gibi olumsuzluklara karşı dayanıklı bir fotovoltaik gerilim kontrol cihazı tasarlamışlardır [11].

Noguchi ve arkadaşları, akım kontrol tekniğini kullanarak, çoklu fotovoltaik ve dönüştürücü modül sistemi için kısa akım darbesi tabanlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sistemlerinde optimum işletme akımını, kısa devre akımı darbe genişliğinin ve oransal sabit parametresinin çarpımını alarak tespit etmişlerdir [12].

Vitorino ve arkadaşları, denklem tabanlı tekniği önermişlerdir ve tekniği kullanarak Güneş radyasyonunun ölçülmesine gerek duymadan sıcaklık verim bilgisine ulaşılabilen bir PV sistem çalışması gerçekleştirmişlerdir. Önerdikleri tekniğin sistem sonuçlarını sezgisel bir teknik ile karşılaştırmışlar, laboratuvarında benzetimini yapmış ve

uygulamışlardır [13].

Lin ve arkadaşları, hill climbing tekniğini rüzgâr hızına dayalı olarak motor yer değiştirme kontrol algoritmasının benzetimini yaparak, düşük devirli bir iletimle esnek pin planet dişli iletimini kombinleyen rüzgâr türbini sistemlerinde hibrid bir güç iletim şeması önermek için kullanmışlardır [14].

Thongam ve arkadaşları, P&O tekniği ile girişinde sadece anlık aktif gücü kullanarak rotor akı yönelimli, vektör kontrollü makine tarafı dönüştürücü kontrol sisteminin hız kontrol döngüsü için optimum hız komutu üreten bir MGİ denetleyicisi tasarlamışlardır. Tasarımın benzetimi yapılmış, benzetim sonuçlarına göre önerilen kontrol algoritmasının tepe güç noktalarını izleyebilme yeteneğine sahip olduğu görülmüştür [15].

Xia ve arkadaşları, modifiyeli adaptif P&O tekniği ile küçük ölçekli bir rüzgâr enerjisi dönüştürme sisteminin, doğru gerilim ve doğru akım arasındaki doğrusal bir ilişkiyi temel alarak maksimum güç noktasını izleyebileceğini önermişlerdir [16].

Yu ve arkadaşları, yalnızca rüzgâr enerjisi sistemi tarafından üretilen gerilimi ve akımı yönlendirerek, farklı sistemler için parametre ayarını düzenlemeye gerek duymadan kontrol edilebilecek kademeli dizi artımlı iletkenlik algoritması ile oluşturulan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Önerdikleri kademeli dizi artımlı iletkenlik algoritmasının maksimum güç izleme denetleyicisinin hızının yüksek ve iyi bir kararlı durum yanıtına sahip olduğunu vurgulamışlardır [17].

Zhao ve arkadaşları, bir gün sonrasına dair saatlik rüzgâr hızı tahminleri için doğrusal olmayan, dış kaynaklı, doğrusalsızlığını modellemek için genel uyumlama sinir ağı kullanılan bir model geliştirmişlerdir. Bu modelin etkinliği, Çin'de gerçekleştirilen dört adet rüzgâr türbininde doğrulanmıştır [18].

Simoës ve arkadaşları, bulanık mantık ilkelerinin verimlilik optimizasyonu ve performans artırma kontrolü için kullanılan bir değişken hızlı rüzgâr enerjisi üretim sistemi tasarlamışlardır. 3.5 KW rüzgâr enerjisi üretim sistemi tüm kontrol stratejilerini doğrulamak ve ardından sistemin performansını değerlendirmek için PC-SIMNON programı ile benzetimi yapılmış, elde edilen sonuçlar laboratuvar ortamında doğrulanmıştır [19].

Kariniotakis ve arkadaşları, bir rüzgâr santralinin güç çıkış profilini tahmin etmek için tekrarlayan, yüksek dereceli sinir ağlarına dayanan modern bir tahmin modeli

geliştirmişlerdir. Geliştirilen model, Yunanistan'ın Lemnos adasındaki rüzgâr türbinli güç sistemi için örnek kontrol sisteminde çevrimiçi kullanım için hayata geçirilmiştir [20].

Piperagkas ve arkadaşları, parçacık sürü optimizasyonunu kullandıkları çalışmalarında kombine edilmiş ısı ve güç (combined heat and power dispatch) ünitelerinden gelen ısı ve güç ile rüzgâr enerjisini içeren, ekonomik dağıtım için genişletilmiş rastgele, çok amaçlı bir model önermişlerdir. Rastgele ve belirleyici yaklaşımı karşılaştırarak, güç ve ısı talebinin belirsizlikleri ile rüzgâr enerjisi üretimini kapsayacak şekilde toplam maliyetin sonuç aralığını ortaya çıkarmışlardır [21].

Catalão ve arkadaşları, Portekiz'de kısa süreli rüzgâr enerjisi tahmini için parçacık sürüsü optimizasyonunu ve adaptif ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemini birleştiren yeni bir hibrid yaklaşım önermektedirler. Parçacık sürü optimizasyonu daha az bir hata elde etmek için gerekli üyelik işlevlerini ayarlayarak adaptif ağ tabanlı bulanık çıkarım sisteminin performansını iyileştirmesi için kullanılmıştır [22].

Kimball ve arkadaşları, analog dalgalanma-korelasyon kontrol tekniğinin dijital alana yayılmasını sağlayan ayrık dalgalanma-korelasyon kontrol tekniği ile çalışan bir sistem tasarlamışlardır. Dalgalanma-korelasyon kontrol yöntemini örnekleme problemine indirgemişler, uygun değişkenlerin doğru zamanda örneklenmesiyle ayrık zamanlı dalgalanma korelasyon algoritmasının optimum çalışma noktasını hızlı bir şekilde bulabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca bu yöntemi fotovoltaik panellerde MGİ uygulamasında göstermişlerdir. Sistemin deneysel sonuçlarının, 1 Khz' den daha yüksek bir güncelleme oranıyla, izleme doğruluğunun % 98'den fazla olduğunu doğruladığını ifade etmişlerdir [23].

Hawkins, yüksek lisans tezinde, doğru tahmin, doğrusal olmayan kontrol ve Lyapunov tabanlı maksimizasyon kavramlarını kullanarak bir rüzgâr türbininin güç eldesini en üst düzeye çıkarmak için bir kontrol teorisi yaklaşımını ele almıştır. Bu kontrol stratejisinin bir benzetimi yapılmış ve zamanla değişen rüzgâr koşulları ve ölçüm gürültüsü altında test edilmiştir. Benzetimi yapılan sistem, gerçekçi bir ortamda çalışan ticari bir rüzgâr türbinini taklit etmek için tasarlanmıştır [24].

Park ve arkadaşları, küçük ölçekli çift modül fotovoltaik sistemler için gelişmiş bir maksimum güç noktası (MGN) izleme kontrol yöntemi sunmuşlardır. Önerilen yöntemi, MGN denetleyicisi ile şebekeye bağlı çift modüllü fotovoltaik sistemlerinin bir donanım

prototipi ile doğrulamışlardır. Önerilen MGN yönteminin 60 W'lık çift modüllü prototipini basit bir devreye uygulamışlardır. Elde edilen deneysel sonuçlar, analiz ve tasarımı doğrulamakta ve tatmin edici MGİ performansını göstermektedir [25].

Riahy ve arkadaşları, rüzgâr hız tahmini için doğrusal tahmine dayanan, doğrusal bir diferansiyel denklemini veri dalga formuna uydurarak doğru bir modelleme gerçekleştiren yeni bir yöntem önermişlerdir. Yöntemin çıktısı ile gerçek rüzgâr hızı verileri arasında yüksek korelasyona sahip olan doğrusal tahmin yöntemi, rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri gibi rüzgâr uygulamalarında rüzgâr hızı tahmini için kabul edilebilir bir seçenek olarak bulunmuştur [26].

Hong ve arkadaşları, yaptıkları bir çalışmada optimum denetleyici uygulamasıyla kullandıkları indüksiyon generatörünün tahriklenmesini, önerdikleri genel yayımlı sinir ağı denetleyicisi ve adaptif karınca koloni optimizasyonu yöntemlerini kullanarak kontrol etmişlerdir. Önerilen kontrolörü, rüzgârdan maksimum güç çıkarmak ve güç uyumlamasıyla paralellik sağlaması için türbin hızını tahrik edecek şekilde tasarlamışlardır. Sonuç olarak kullanılan genel yayımlı sinir ağının adaptif karınca koloni optimizasyonu ile optimal bir denetleyici kombinasyonuna dayalı yaklaşımlarının, parametre değişiklikleri ve model belirsizliklerinin varlığında bile sistemin istenen performansa ulaşabileceğini öngörmüşlerdir [27].

Dhanalakshmi ve arkadaşları, bir optimum eşleme tasarımı olan beta yöntemini, global optimuma erişme kabiliyetine sahip olan bulanık mantık üzerinde geliştirmişler ve beta-bulanık denetleyicili bir güneş-rüzgâr hibrid sisteminin sabit güç çıkışı için bir tek uçlu birincil indüktif dönüştürücüsü tasarlamışlardır. Rüzgâr ve güneş kombinasyonu yapmadan önce kaynaklardan gelen gücü, tek uçlu birincil-indüktif dönüştürücü kullanarak düzenlemişlerdir. Güneş dönüştürücüsünün anahtarlarına yapılan anahtarlama darbelerini, beta algoritması kullanarak MGİ teknolojisi ile düzenlemişlerdir. Rüzgâr tarafı dönüştürücüsündeki anahtarları PID denetleyici kullanarak düzenlemişlerdir. Çalışmada değerlendirilen yöntemler arasında beta yöntemini, kararlı durumda düşük ve küçük dalgalanma gerilimi, iyi bir geçici performans ve uygulanmanın orta karmaşıklığı ile ilgili iyi bir çözüm olarak sunmuşlardır. Değişen hava koşullarında hibrid güç üretim sistemlerinin güç kaynağı güvenilirliğinin benzetimini MATLAB benzetim programı kullanarak analiz etmişlerdir [28].

Öztürk ve arkadaşları, sincap kafesli indüksiyon generatörü kullanarak ve rotor hızını genetik oransal-integral yöntemi ile kontrol ederek bir MGİ yöntemi gerçekleştirmişlerdir. Referans rotor hızında generatörün çalışmasını sağlayan PI katsayılarının belirlenmesini, genetik algoritma optimizasyonu ile elde etmişlerdir. Rotor hızının sensörsüz kontrolünü alan odaklı kontrol ile gerçekleştirmişler, bu amaçla indüksiyon generatörünün rotor hız kontrolünün transfer fonksiyonunu benzetim modelinde oluşturmuş ve kullanmışlardır. Kontrollerinde kullanılan PI katsayıları Ziegler-Nichols yöntemi olarak adlandırılan ve genetik algoritma ile elde edilen klasik bir yöntemle elde edilmiştir. Matlab/Simulink ile oluşturulan rüzgâr türbini modelini, PI katsayılarını belirleyen bu farklı yöntemler için sistem benzetiminin çalışmasında kullanmışlardır. Ziegler-Nichols yöntemi ve genetik algoritma sonuçlarının sistem benzetimini karşılaştırmışlar, genetik algoritma tarafından hesaplanan PI katsayılarıyla işletilen sonuçların, referans hızına ve belirleme süresine göre diğerlerinden daha iyi olduğunu belirtmişlerdir [29].

Yokoyama ve arkadaşları, seri bağlı iki rüzgâr türbini / generatörü ve bir akım kaynağı tristör dönüştürücüden oluşan bir rüzgâr türbini üretim sisteminin kanat uç hız oran kontrolünün deneysel ve simüle edilmiş bir çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Rüzgâr hızları değiştiğinde, türbinlerin her birinin ayrı ayrı uç hız oranlarının neredeyse sabit tutulabileceğini doğrulamışlar ve böylece sistemin etkin bir şekilde çalışmasının mümkün olduğunu belirtmişlerdir [30].

Barakati doktora tezinde, rüzgâr hızını veya türbin şaft hızını ölçmeden maksimum rüzgâr enerjisini yakalamak için matris denetleyici kontrol değişkenlerini kontrol etmek üzere bir rüzgâr türbini sistemi geliştirmiştir. Matris denetleyicide anahtarlamayı kontrol etmek için, alan vektörü darbe genişlik modülasyonu tekniğini kullanmıştır. Kullandığı güç sinyali geri besleme yönteminde maksimum gücün yalnızca mil hızı ölçümü ile izleneceğini ve hiçbir rüzgâr hız ölçümünün gerekmeyeceğini belirtmiştir. Bu yöntemin rüzgâr türbininin maksimum güç eğrisine ihtiyaç duyduğunu ifade etmiş, yöntemi geliştirmek için çalışma altındaki rüzgâr türbini sistemi için, hız sensörsüz güç sinyali geri beslemesi olarak adlandırılan gelişmiş bir güç sinyali geri besleme yöntemini önermiştir. MATLAB benzetim sonuçlarını elde ettiği sisteminin, rüzgâr hızı varyasyonlarını takip ettiğini ve denetleyicinin ortalama rüzgâr hızına dayalı olarak sistemi maksimum güç noktasına doğru yönlendirdiğini vurgulamıştır [31].

Kemmetmüller ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri bir çalışmada manyetik eşdeğer devre

modelleri tarafından tanımlanan sürekli mıknatıslı senkron makineler için optimal bir moment kontrolü sunmuşlar ve deneysel bir kurulum üzerinde test etmişlerdir. Aynı zamanda bir harici açısal hız kontrol devresinde bu moment kontrolünün kullanılmasının faydalı olduğunu da kanıtlamışlardır [32].

Zhang ve arkadaşları, bir çalışmalarında moment ve akı hatalarını en aza indirerek gerilim vektör seçimini ve süresini aynı anda optimize eden, görev döngüsü denetimine sahip olan geliştirilmiş bir model tahminli moment kontrolü önermektedirler. Görev çevrimi kontrolü ile önceki model tahminli moment kontrolünde gerilim vektörü ilk önce değer fonksiyonu küçültme ilkesine dayanarak seçilmiş ve daha sonra seçilen vektörün görev oranı elde edilmiştir. Her bir gerilim vektörü için değer fonksiyonunu değerlendirirken görev oranı tespitini dikkate alarak bir geliştirilmiş model tahminli moment kontrolü oluşturmuş ve önerilmişlerdir. Geleneksel model tahminli moment kontrolü ile görev döngüsü kontrollü geliştirilmiş model tahminli moment kontrolünün karşılaştırmalı bir çalışmasını yapmışlar, benzetim ve deney sonuçlarının önerilen yöntemin etkililiğini doğruladığını belirtmişlerdir [33]. [34]-[49] nolu kaynaklarda ise MGİ'li ve MGİ'siz çalışma örnekleri sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda MGİ'li ve MGİ'siz sistemlerin performans analizi yapılmıştır. Sistemlerin ürettiği gerilim, güç vb. değerleri arasındaki farklar sunulmuştur.

2. RÜZGÂR GÜCÜNDEN ELEKTRİK ÜRETEN SİSTEMİN MODELLENMESİ

2.1. RÜZGÂR GÜCÜ

Rüzgâr gücü, rüzgârın atmosferde hareket halinde dolaşırken meydana getirdiği kinetik enerjisinin ortaya çıkarmış olduğu güçtür. Rüzgârın kinetik enerjisi Denklem (2.1) ile verilmektedir.

$$E = \frac{1}{2} mV^2 \text{ joule} \quad (2.1)$$

Burada m; hava kütlesi (kg), V, rüzgâr hızı (m/s)'dir. Denklem 2.2, 'm' hava kütlesinin formülünü vermektedir.

$$m = A \cdot V \cdot t \cdot \rho \text{ (kg)} \quad (2.2)$$

Burada A, ele alınan ρ yoğunluklu hava kütlesinin içinde bulunduğu rüzgâr doğrultusuna dik alan (m^2); t, V rüzgâr hızında bu alanın kat edilme süresidir. Yine rüzgâr doğrultusunun uzunluğundan ele alınan V rüzgâr hızında t sürede kat edilen hava kütlesinin uzunluğu L(m), $L=V \cdot t$ formülü ile ifade edilirse, A alanında ilerleyen havanın hacmi ($A \cdot V \cdot t$) formülü ile hesaplanabilir. İlerleyen havanın birim hacim başına kinetik enerjisi ise Denklem (2.3) ile verilmektedir.

$$E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \text{ joule} \quad (2.3)$$

Buna göre belirli bir A alanında V rüzgâr hızıyla t zamanda ilerleyen rüzgârın toplam enerjisi Denklem (2.4)'te aşağıdaki gibi belirtilmektedir.

$$E = \frac{1}{2} A \cdot V \cdot t \cdot \rho \cdot V^2 = \frac{1}{2} A \cdot t \cdot \rho \cdot V^3 \text{ joule} \quad (2.4)$$

Denklemden görülebileceği üzere, rüzgâr gücü rüzgâr hızının küpüyle bağlantılı olarak artmaktadır. Bu bağlamda denklem, rüzgâr hızının her artışıyla, rüzgâr gücünün bu artan hız değerinin küpü kadar arttığını ifade etmektedir [2],[50].

Rüzgâr türbinlerinde rüzgâr kinetik enerjisi önce mekanik enerjiye dönüşür. Sonra da bu mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülerek rüzgâr gücünden faydalanılmaktadır.

Yukarıda bahsedilen rüzgâr kinetik enerjisinin rüzgâr türbinlerinde mekanik enerjiye dönüşümünü incelemek için çalışmada tercih ettiğimiz türbin çeşitlerinden yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin genel yapısını incelemek gerekmektedir.

2.2. YATAY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİNİ

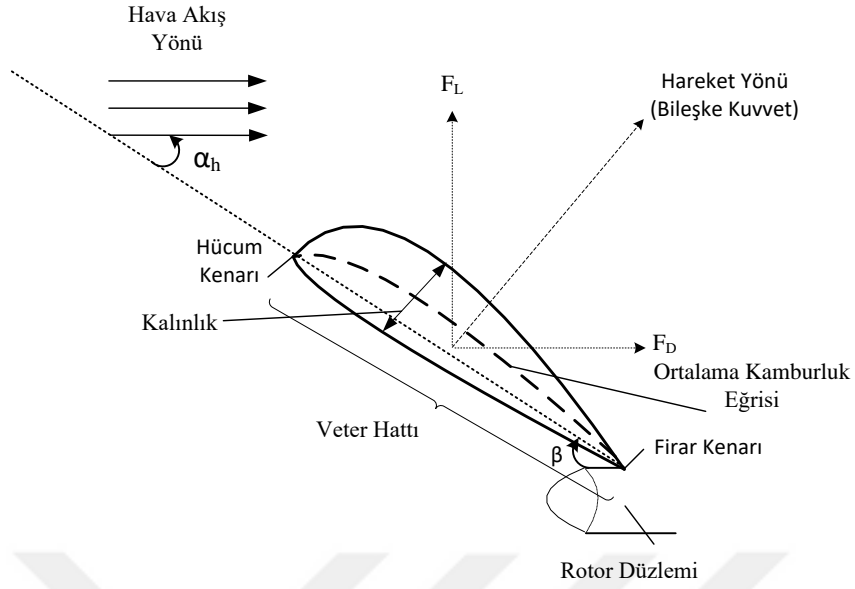
Rüzgârın aerodinamik gücünün rüzgâr türbinlerinde önce mekaniksel enerjiye daha sonra da elektriksel enerjiye dönüşmesi türbinin rotor kanatlarında başlamaktadır. Bir yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin bileşenleri genel olarak; rotor kanatları, düşük hızlı şaft, (varsa) dişli kutusu, yüksek hızlı şaft, fren sistemi, yaw (döndürme) sistemi, generatör, güç dönüştürücü sistemler, kule olarak sıralanabilir.

2.2.1. Rotor Kanatları

Rüzgâr türbininin en önemli parçası sayılabilecek rotor kanatları, aerodinamiğin prensiplerine göre tasarlanmakta ve çalışmaktadırlar. Bir rüzgâr türbinini en önemli parçası sayılabilecek rotor kanatlarından başlayarak incelemek yerinde olacaktır. Bunun için önce aerodinamiğin prensiplerine bir göz atılmalıdır. Bu sayede kanat yapıları ve çalışma prensipleri daha iyi anlaşılacaktır.

Aerodinamik, havanın hareket halinde olan katı cisimlere temas etmesiyle cisimler üzerinde oluşturduğu etkiyi inceleyen, bunun sonucunda birtakım evrensel yasalar ortaya koyan bir bilim dalıdır. Aerodinamiğe göre bir rotor kanadına etki eden rüzgâr, kanadın farklı bölgelerinde farklı basınçsal özellikler göstermektedir. Kanada gelen rüzgâr, kanadın üst yüzeyi düşey kavis özelliği gösterdiği için hızlıca, alt yüzey ise üste nazaran daha kavissiz özellik gösterdiği için biraz daha ağır bir şekilde ilerler. Bu durum kanatların altında bir yüksek basınç oluşumuna neden olur ve bir kaldırma kuvveti meydana gelir.

Bu kaldırma kuvvetinin etkisi ile kanadın alt tarafından üst tarafına doğru bir dönüş gerçekleşmektedir. Bu dönüşsel hareketler kanatların aerofil denilen özel profil özelliklerinden etkilenmektedir. Bu profil özellikleri kanadın rüzgârı karşılayan ön kısmı olan hücum kenarı, kanadın son kısmı olan firar kenarı, hücum ve firar kenarlarını birleştiren doğrultu olan kanat veter hattı, kanat kalınlığı, kanadın alt ve üst kısmını kanadın oval yapısına göre ikiye ayıran ortalama kamburluk eğrisi, rüzgâr akım doğrultusu ile veter hattı arasında kalan hücum açısı vb. olarak verilebilir [51].



Şekil 2.1. Kanat profil karakteristikleri [51].

Yüksek basıncın neden olduğu kaldırma kuvvetinin yanında yine hava akışı sebebiyle meydana gelen, kanada etki eden bir de sürüklenme kuvveti vardır. Kaldırma kuvveti kanat yüzeyine dik, sürüklenme kuvveti ise paraleldir. Kanat bu iki kuvvetin bileşkesinin doğrultusu yönünde hareket etmektedir [5].

Kanat aerodinamik verimini sağlamak hususunda, kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranı bir hayli önem arz etmektedir. Kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranını maksimuma çıkararak maksimum aerodinamik verim elde edilmeye çalışılır. Bu da sürüklenme kuvvetinin minimum değer alması gerektiği anlamına gelmektedir. Kaldırma kuvveti F_L ve sürüklenme kuvveti F_D ile gösterilecek olursa, bu kuvvetlerin formülleri şöyle verilebilir:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A V^2 \quad (2.5)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A V^2 \quad (2.6)$$

Burada A , rüzgâr türbininin taradığı alan; R , rotor yarıçapı yani kanat uzunluğudur. Denklem (2.7) ile verilir.

$$A = \pi(R)^2 \quad (2.7)$$

C_L ve C_D ise sırasıyla kaldırma kuvvet katsayısı ve sürüklenme kuvveti katsayısıdır. Bu katsayılar özgün bir Reynolds sayısı ve hücum açıları (α_h) ile Denklem (2.8) ve

Denklem (2.9)'daki gibi belirlenmektedir.

$$C_L = f(\alpha_h Re_t) \quad (2.8)$$

$$C_D = f(\alpha_h Re_t) \quad (2.9)$$

Renolds sayısı akışkanların eylemsizlik kuvvetlerinin viskozite kuvvetlere oranı olarak tanımlanabilen boyutsuz bir sayıdır, Denklem (2.10) ile gösterilir [52], [53].

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = \frac{\text{Eylemsizlik Kuvveti}}{\text{Viskozite Kuvveti}} \quad (2.10)$$

Burada daha önce verilen bileşenlere ek olarak μ bileşeninden bahsedilmektedir. μ , ele alınan rüzgârın dinamik viskozitesidir. Bir havanın yüzeyindeki moleküller, havanın içindeki moleküllerden farklı özellik gösterir. Hava içerisindeki bir molekül kendini çevreleyen öteki moleküllerin etkisine uğramış olduğundan, simetrik birleşim nedeniyle kuvvetlerinin bileşkesi sıfırdır. Bunun sonucu olarak molekül hiçbir kuvvetin etkisinde değildir. Hava yüzeyindeki bir molekül ise akışkanın içindeki fiziksel yapıdan farklı bir formdadır, simetrik kararlılığa sahip değildir, denkleşmemiş kuvvet alanları barındırır ve bileşkesi sıfır olmayan kuvvetlerin etkisi altındadır. Viskozite kuvveti burada havanın bu düzensiz yapıya geçmeye karşı gösterdiği direnç kuvvetidir [54]. Yine eylemsizlik kuvveti burada, havanın ρ yoğunluğunda, L uzunluğunda, V hızıyla hareket etmemesinin etkisidir. Hücum açısı ise $\frac{C_L}{C_D}$ ifadesinin maksimum sonuç verebildiği durumdaki açı olarak belirlenmeye çalışılır [55]. Maksimum sonuç alınabilen değerde belirlenen bu hücum açısı nominal hücum açısıdır ve kanat tasarımları, her türbinin kendine özgü olan bu hücum açısıyla yapılır.

Yine kanat aerodinamik verimini sağlamak hususunda kanat uç hız oranı (KHO) kavramı da oldukça önemlidir. Bu kavram rotor dönüş hızının rüzgâr hızı ile arasındaki ilişki olarak bilinir. Literatürde genelde lamda(λ) olarak bilinen boyutsuz bir faktör ile karakterize edilir. Denklem (2.11) ile gösterilmektedir.

$$\text{Kanat uç hız oranı} = \lambda = \frac{\text{Rotor mekaniksel açısal hızı}}{\text{Rüzgâr Hızı}} = \frac{\omega_r}{V} \quad (2.11)$$

KHO aynı zamanda, kanatlar sebebiyle dengesi bozulan hava akımının tekrar eski dengesine kavuşması için geçen süre T_w 'ye, bir rotor kanadının eski konumuna gelmesi için gereken süre T_s 'ye, ön rüzgârda ya da arka rüzgârda rotor kanatlarının

dengeleştirildiği hava akımının uzunluğu L 'ye, rotor kanat sayısı n 'e ve rotor yarıçapı R ' ye bağlı olarak da ifade edilebilmektedir.

Bir n kanatlı rotor için, kanadın önceki konumuna geçmesi için gereken zaman periyodu Denklem (2.12) ile verilir:

$$T_s = \frac{2\pi}{n\omega_r} \text{ (sn)} \quad (2.12)$$

Burada ω_r , rotorun radyan cinsinden mekaniksel açısal hızıdır. n kanatlı bir makine için deneysel olarak L , rotor yarıçapı R 'ye yaklaşık olarak eşittir.

$$\frac{L}{R} \approx \frac{1}{2} \quad (2.13)$$

Yani (L/R) oranı değeri yaklaşık olarak 0.5'tir ve optimum uç hız oranı λ_{opt} , Denklem (2.14) ile ifade edilebilir.

$$\lambda_{opt} \approx \frac{2\pi}{n} \left(\frac{R}{L} \right) \approx \frac{4\pi}{n} \quad (2.14)$$

Rüzgârın normale dönmesi için zaman periyodu aşağıdaki denklemle verilmektedir.

$$T_w = \frac{L}{V} \text{ (sn)} \quad (2.15)$$

$T_s > T_w$ ise, o zaman bazı rüzgârlar etkisizdir. Eğer $T_w > T_s$ ise rüzgârın rotordan akıp gitmesi zorlaşır. Maksimum güç eldesi, bu iki zaman periyodu yaklaşık olarak eşit olduğunda gerçekleşir.

$$T_s \approx T_w \quad (2.16)$$

$$\frac{2\pi}{n\omega_r} \approx \frac{L}{V} \Rightarrow \frac{n\omega_r}{V} \approx \frac{2\pi}{L} \quad (2.17)$$

Optimum mekaniksel açısal hız ise Denklem (2.19) ile verilmektedir.

$$T_w = \frac{L}{V} \text{ (sn)} \quad (2.18)$$

$$\omega_{r_opt} \approx \frac{2\pi V}{nL} \quad (2.19)$$

Sonuç olarak, optimal güç eldesi için rotor kanadı, gelen rüzgârın hızına göre bir açısal hızda dönmelidir. Bu rotor mekaniksel açısal hızı, rotor yarıçapı arttıkça azalır ve

optimum uç oranının hesaplanmasıyla karakterize edilebilir. Bu durum aşağıdaki denklemler ile verilmektedir.

$$\lambda_{\text{opt}} = \frac{\omega_{r,\text{opt}} R}{V} = \frac{2\pi}{n} \left(\frac{R}{L} \right) \quad (2.20)$$

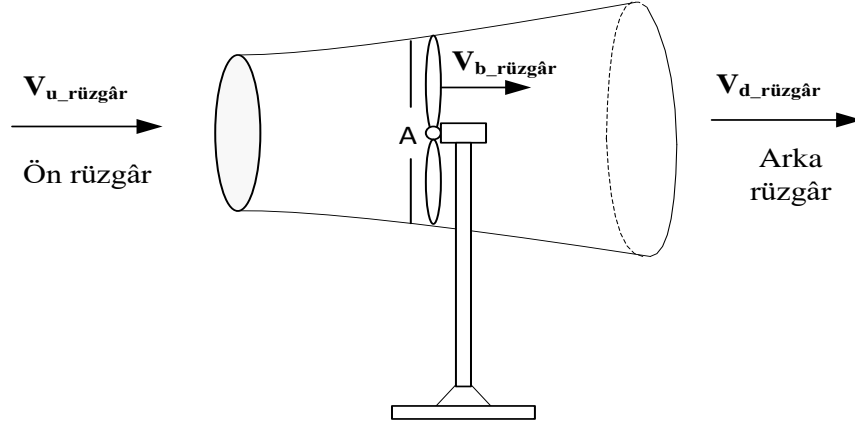
$$\omega_{r,\text{opt}} = \frac{\lambda_{\text{opt}} V}{R} \quad (2.21)$$

Rüzgâr türbinleri, rüzgâr akışından mümkün olduğunca fazla güç çıkarmak için optimum rüzgâr uç hızı oranında çalışacak şekilde tasarlanmalıdırlar. Üç rotor kanadına sahip şebekeye bağlı rüzgâr türbinleri için optimum rüzgâr türbin hızı oranı 6-8 aralığındaki değerlerle 7 olarak bildirilir [56].

A alanına t zamanında ilerleyen havanın rüzgâr enerjisi, ancak bir rüzgâr türbininin ilerleyen rüzgârın hızını sıfıra düşürmesi ile tamamen ele geçirilebilir. Gerçekte ise bu mümkün değildir çünkü türbine ulaşan havanın bir kısmının türbinden belli bir hız ile ayrılması gerekir. Türbine ulaşan hava miktarının bu kısmı türbin üzerinden akıp gideceği için bu ulaşan hava miktarının tamamından faydalanılamayacak, karşılaşılan rüzgâr enerjisinin ancak bir kısmı verimli olabilecektir. Bu durum literatürde Betz yasası olarak kabul bulmuş, bu yasaya göre bir rüzgâr türbininin kanatlarından elde edilebilecek maksimum kinetik rüzgâr enerjisinin, atmosferde bulunan toplam rüzgâr enerjisinin %59.3' üne eşit olabileceği belirtilmiştir [2]. Bu miktar ise rüzgâr türbininin, rüzgâr hızını giriş değerinin üçte biri oranında düşürdüğü zamanlarda gerçekleşmektedir. $V_{u_rüzgâr}$ türbine doğru gelen rüzgârın hızı ve $V_{d_rüzgâr}$ türbinden akıp giden rüzgâr hızı olarak düşünüldüğünde $V_{d_rüzgâr} = \lambda V_{u_rüzgâr}$ ve $V_{u_rüzgâr} = \frac{V_{b_rüzgâr}}{1 + \lambda}$ çarpımına eşittir; rotor kanadındaki ortalama rüzgâr hızı $V_{b_rüzgâr}$ ise Denklem (2.22) ile verilebilir.

$$V_{b_rüzgâr} = \frac{(1 + \lambda)}{2} V_{u_rüzgâr} \quad (2.22)$$

Şekil 2.2'de ise yukarıda bahsedilen rüzgâr hızları gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Rüzgâr türbini kinetik enerji ekstraksiyonunu gösteren akış tüneli [57].

Daha sonra rüzgâr türbini tarafından elde edilen güç P_m , Denklem(2.23) ile verilen rüzgârdaki kinetik enerjinin azalmasına eşittir. Denklem(2.23) ve Denklem (2.24) birleştirildiğinde türbin tarafından elde edilen güç, Denklem (2.25) ile verilir. Burada C_p , türbin güç katsayısı ve P_w , rüzgâr gücüdür. Maksimum verimlilik, Denklem (2.26) ile verilen genel yöntem kullanılarak hesaplanabilir. Maksimum güç elde etme oranı teorik olarak C_p' nin maksimum değerini bularak Denklem(2.27)deki gibi elde edilir.

$$P_m = \frac{1}{2} m (V_{u_rüzgâr}^2 - V_{d_rüzgâr}^2) = \frac{1}{2} m V_{u_rüzgâr}^2 (1 - \lambda^2) \quad (2.23)$$

$$m = \rho A V_b = \rho \cdot A \cdot V_{u_rüzgâr} \frac{1 + \lambda}{2} \quad (2.24)$$

$$P_m = \left[\frac{1}{2} \rho A V^3 \right] \cdot \left[\frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda^2) \right] = P_w \cdot C_p \quad (2.25)$$

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = 0 \Rightarrow \frac{d\left[\frac{1}{2}(1 + \lambda)(1 - \lambda^2)\right]}{d\lambda} = (1 + \lambda)(1 - 3\lambda) = 0 \Rightarrow \lambda = \frac{1}{3} \quad (2.26)$$

$$C_{p,max} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{3}\right) \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2\right) = 0.593 = 59.3\% \quad (2.27)$$

Görüldüğü gibi Betz limit değeri %59.3 olarak elde edilmektedir. Yalnız bu ideal maksimum verimlilik gerçekte elde edilebilir değildir çünkü rüzgârın bir kısmı yakalanmadan rotor kanadından geçip gidecektir. Gerçekte bir türbin 45-50% verimlilikle çalışmaktadır. Yani atmosferdeki mevcut rüzgârın ancak 45-50%'si rüzgâr türbini tarafından yakalanıp türbin kinetik rüzgâr enerjisine dönüştürülebilecektir [57].Rüzgâr türbini mekaniksel güç formülü ayrıca Denklem (2.28) ile verilebilmektedir.

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A V^3 \quad (2.28)$$

Rüzgâr türbininden maksimum güç elde ederken C_p değerini bir de bu mekaniksel güç formülü ile ele alalım. Burada daha önce bahsedilen bileşenlere ek olarak β ; türbin kanadının veter hattı ile rotor düzlemi arasında kalan kanat açısıdır. C_p güç katsayısı bir de Denklem (2.29)'a göre formüle edilebilir.

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1(c_2/\lambda_i - c_3\beta - c_4)e^{-c_5/\lambda_i} + c_6\lambda \quad (2.29)$$

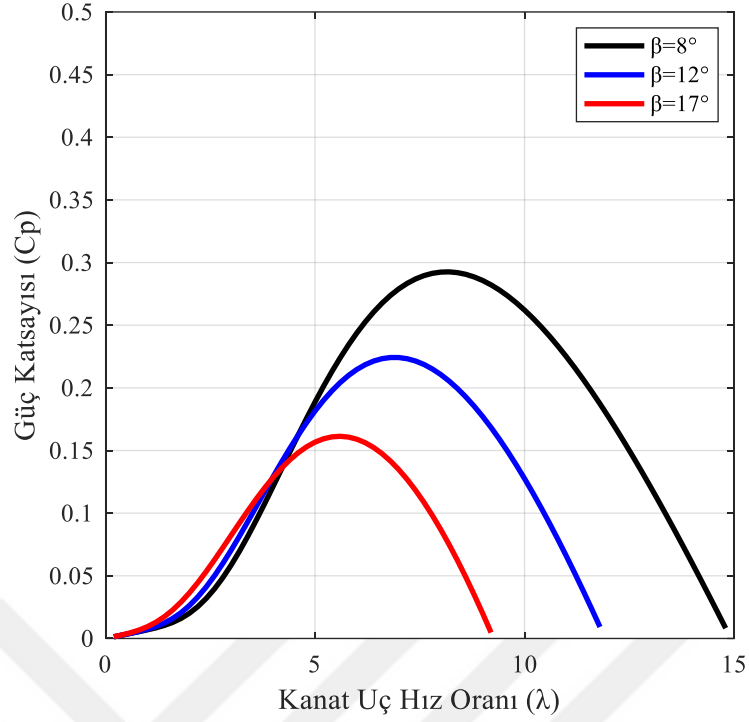
Formülde görüldüğü üzere C_p değeri λ ve β bileşenlerinin bir fonksiyonudur. λ_i değeri Denklem (2.30) ile verilir. λ ve β değerlerine göre değişmektedir.

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.30)$$

Diğer bileşenler olan c_1 - c_6 sayıları C_p güç katsayısını oluşturan, türbinden türbine değişiklik gösteren katsayı faktörleridir [58]. C_p , aynı zamanda türbin tarafından elde edilen gücün mevcut rüzgâr akışındaki güce oranı olarak da ilişkilendirilir, Denklem (2.31)'de görülmektedir.

$$C_p = \frac{P_m}{P_w} = \frac{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3}{P_w} \quad (2.31)$$

Burada P_w ; türbine doğru gelen rüzgârın gücü, P_m ise türbin tarafından bu rüzgârdan elde edilen güçtür. Denklem (2.29)'daki formül gereği optimum KHO, performans katsayısı C_p 'nin de optimum yani maksimum değerini alabilmesini sağlar. Maksimum C_p değeri de istenilen türbin mekaniksel gücünü yani P_m 'yi vermektedir [56]. Çalışmada optimum lamda değerinin sağlanmasıyla ve türbin kanat açısının değerinin maksimum güç elde edebilmek amacıyla '0' derecede tutulmasıyla C_p güç katsayısının maksimum değeri elde edilmektedir. Şekilde farklı kanat açısı değerleri ile hesaplanan örnek güç katsayısı eğrileri görülmektedir.



Şekil 2.3. Güç katsayısı eğrileri.

2.2.2. Türbin Kulesi

Rüzgâr türbini kulesi, türbinin nasele ve rotor kanatlarını taşıyan kısmıdır. Yüksek seviyelerde rüzgâr daha kuvvetli estiği için rüzgârdan daha fazla verim alabilmek adına boyları yüksek seçilebilir [59].

2.2.3. Dişli Kutusu

Dişli kutusu, rüzgâr türbinlerinde düşük hızlı milin açısal hızını generatöre bağlanan yüksek hızlı mil hareketine dönüştürmede kullanılırlar. Dişli takımlarının çalışma prensibinde sürücü dişli karşı dişli ile temas yapmadan önce bir açı boyunca döner, bu giriş dişlisinin açısal dönüşü gerçekleşene kadar çıkış dişlisinin açısal dönüşü gerçekleşmez. Dişli kutusu için giriş parametreleri rotoru dişli kutusuna bağlayan düşük hızlı mil için açısal hız ve momenttir. Çıkış parametreleri ise, dişli kutusunu generatöre bağlayan yüksek hızlı mil için açısal hız ve momenttir. Rotorun şaft hızının generatörü hareket ettirmede yeteri kadar hızlı olmadığı durumlarda dişli takımları kullanılması tercih edilmektedir. Dişli takımları bu tür sistemlerde hızı artırmak amacıyla mekaniksel artış ya da yavaşlatmak amacıyla mekaniksel azalış meydana getirebilirler [5].

2.2.4. Yaw Sistemi

Yaw sistemi ise, rüzgâr yönü değiştiğinde rotorun yönünü rüzgâra dik hale getirmek için türbini yöneltir. Rüzgâra dik olunamayan durumlarda rüzgâr türbinin bir yaw hatası taşıdığı varsayılır. Yaw hatası, rotor kanatlarının az bir miktar rüzgâr enerjisine maruz kalabilmesi anlamına gelmektedir. Rotoru rüzgârın kuleyi terk ettiği tarafta olan türbinler kendiliğinden rüzgârdan uzaklaştırdığı için yaw sürücüsüne ihtiyaç duymazlar. Yaw mekanizmasına ihtiyaç duyan türbinlerde rüzgârgülü denilen bir algılayıcı vardır. Bu algılayıcı rüzgârın yönünü tespit eder ve türbini rüzgâra uygun şekilde yönlendirmek için yaw mekanizmasına komut verir [51].

Generatör ve dişli kutusu kullanılarak rotoru elde edilmek istenen açı pozisyonunda tutan yaw mekanizması hareket ederek, türbinin sürekli rüzgâra karşı bir konumda kalmasını sağlamaya çalışmaktadır [1], [60].

2.2.5. Fren Sistemleri

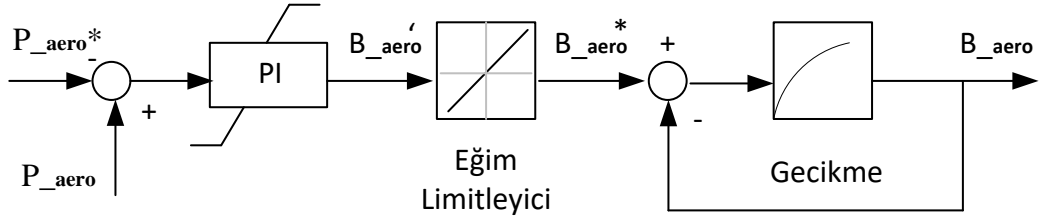
Fren sistemleri, kanat pozisyonu denetim sistemlerinin etkisinde çalışmaktadırlar. Bu açıdan türbin fren sistemlerini, kanat pozisyon kontrolü denetimi olarak incelemek daha doğru olacaktır. Bu denetim iki kontrol yöntemine ayrılarak şöyle incelenebilir:

1) Açı (Pitch) Kontrolü

2) Durma (Stall) Kontrolü (Pasif Hız Kesme Kontrolü)

1) Açı (Pitch) Kontrolü: Bu tür türbin denetimlerinde kanatlar rotora sabitlenmiş değildirlir ve yüksek rüzgâr hızlarında kendi eksenleri etrafında döndürülerek kontrol edilmektedirler.

Denetimleri üretmiş oldukları güç miktarına dayanmaktadır. Üretilen güç miktarı kanadın açısal kontrollerle kontrol edilmesiyle nominal değere çekilmeye çalışılır. Bunun için de kanatların açısal pozisyon bilgisine ihtiyaç vardır. Bir otomasyon sistemi kontrol algoritması ile çalışan bu fren sistemlerinde üretilen güç sürekli kontrol edilir. Gerektiğinde kanat açı pozisyonu değiştirilerek üretilen gücün nominal değerinde tutulması sağlanmaya çalışılır.

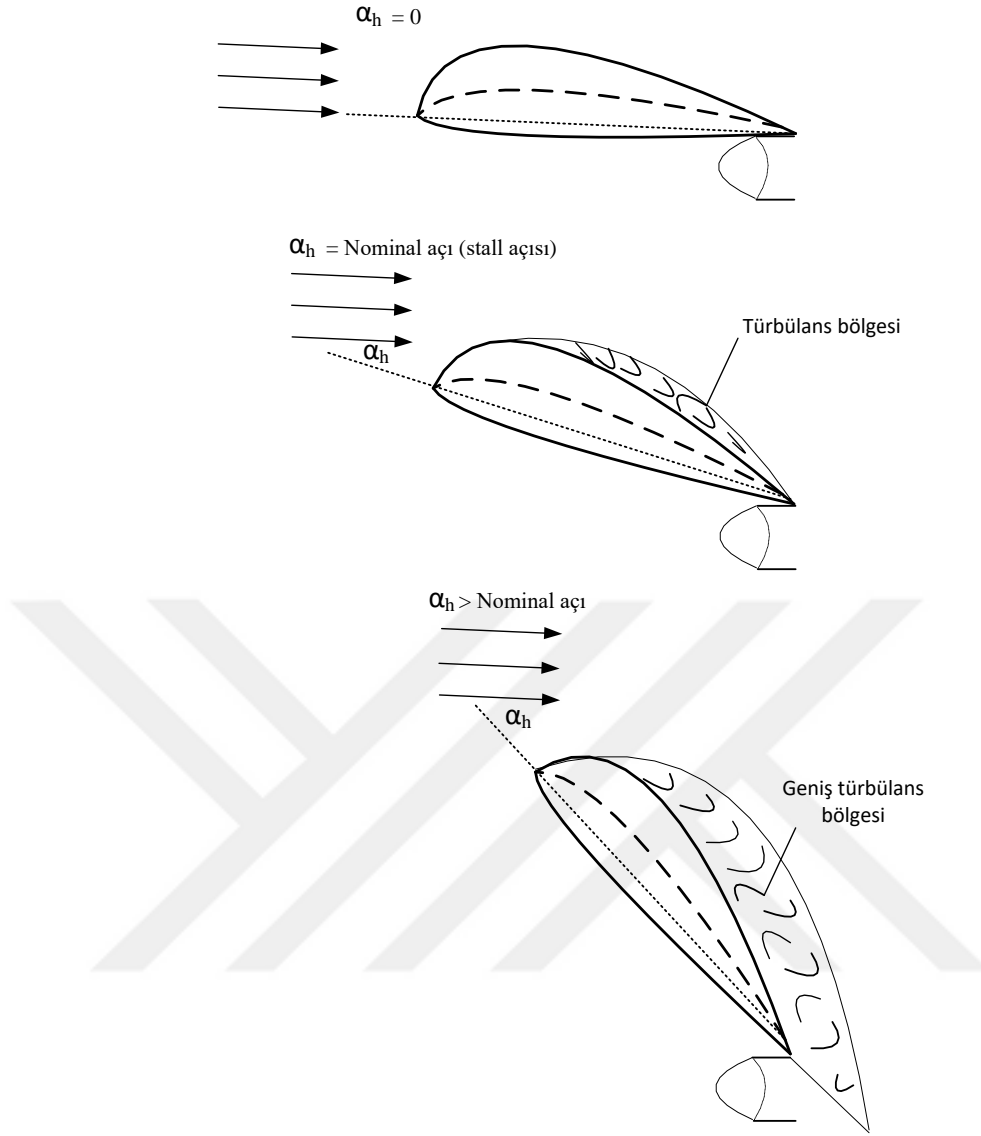


Şekil 2.4. Aktif durdurma kontrolü blok diyagramı [61].

Şekilde açı kontrol yöntemi ile kontrol edilen bir sistem örneği görülmektedir. Bu otomasyon sisteminde türbin gücü devamlı P_{aero}^* ile gösterilen nominal güce çekilmeye çalışılmaktadır. Bu da kanadın açılal pozisyon bilgisinin sürekli denetimi ile sağlanmaktadır. β_{aero}^* kanatların referans açı değeri, β_{aero} sistemin anlık kanat açısı değeridir. P_{aero} ise sistemin anlık üretmiş olduğu gücü simgelemektedir. Sistemde sürekli olarak anlık güç-referans güç ile anlık açı-referans açı karşılaştırılması yapılmaktadır. Bu karşılaştırmalardan elde edilen hata değerleri referans değerlerden eksiltilerek ya da referans değerlere eklenerek optimum açı ve güç değerleri elde edilmektedir [62].

Kanatların açılal pozisyonunu değiştirerek kendi eksenleri etrafında döndürülmelerindeki amaç, kanatların kaldırma kuvvetini artıran hücum açısını küçültmek, böylece düşük kaldırma kuvveti ile çalışan kanatların ürettiği güç verimini azaltarak türbinin yüksek hızlarda çok daha fazla güç üretip sisteme zarar vermesini önlemektir.

2) Durma (Stall) Kontrolü: Bu kontrol yönteminde, rotor kanadının kaldırma kuvveti ve sürtünme kuvveti bileşenlerinin özelliklerinden yararlanılarak, bu bileşenlerin belirli durumlarda belirli değerler almasıyla bir nevi otomatik kontrol sağlanmaktadır. Türbin hücum açısı nominal değerine kadar artırılırken bu esnada kanadın kaldırma kuvveti de artmaktadır. Hücum açısı nominal değerine geldiğinde kanadın firar kenarında türbülans hava akımları oluşmaktadır.



Şekil 2.5. Hücüm açısının değışimi ile kanat profili etrafındaki akış [51].

Hücüm açısı daha da artırılıp nominal değerdinden daha büyük değerdler aldığında bu türbülans hava akımları artmakta, kanadın kaldırma kuvvetini azaltma eğilimi göstermekte ve kanat sürüklenme kuvvetini artırmaktadır. Bu ise rotorun yavaşlamasını, gerektiği takdirde de durmasını sağlamaktadır. Oluşan türbülans aynı zamanda bir sonra gelen kanadın hava yoğunluğunu azaltır bu da verim düşmesinin bir diğerd nedenidir [51], [63].

Bu tür kontroller aerodinamik kontrol olarak adlandırılmaktadır. Aerodinamik kontrolün yanında türbinin acil durum freni olarak adlandırılan bir de mekanik fren kontrolü vardır. Bu kontrol rüzgâr türbinini çok hızlı esintilerle karşılaştığında devreye girerek bozulmayakarşı korumaktadır. Ayrıca türbin bakımı esnasında veya kanat ayarlanmasını engelleyen bir açı mekanizması hatasıyla karşılaştığında da devreye girer. Mekanik

frenin yapısı, düşük ya da yüksek hızlı şaftta monte edilmiş bir fren diskinin üzerinde sürtünmeyi sağlayan fren kaliperleri içerir. Bu fren kaliperleri diskin mekanik olarak durdurmasıyla mekanik fren sağlanır.

Çalışmada rüzgâr türbininin stall kontrolle denetlendiği varsayılmaktadır. Kullanılan rüzgâr türbininin bu tür özellikler altında incelenmesine gerek görülmemiş, bu kısmın sadece ön bilgi olarak verilmesi yeterli görülmüştür.

2.2.6. Generatöfr

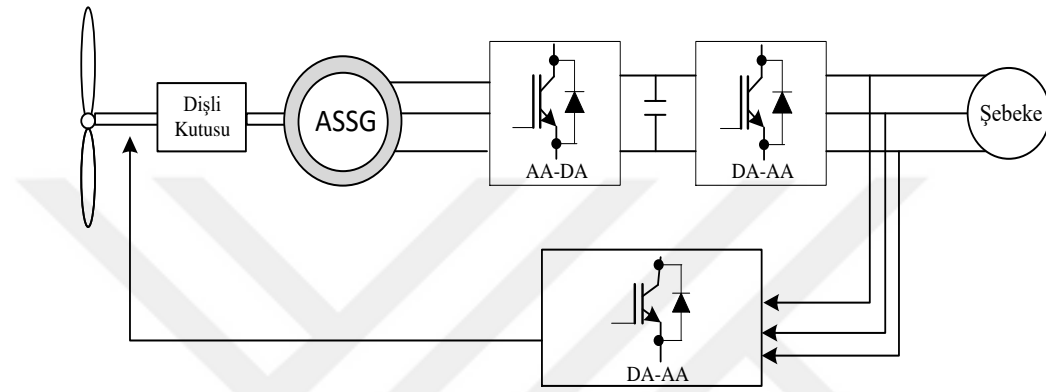
Diğer bir türbin bileşeni olan generatörler, doğru akım generatörleri, senkron generatörler, asenkron generatörler olarak üç farklı kategoriye ayrılabilirler. Doğru akım generatörleri mekanik enerjiyi doğru akım şeklinde elektrik enerjisine dönüştüren generatörlerdir. Çoğunlukla düşük ölçekli rüzgâr türbinlerinde ve akü bağlantılı sistemlerde kullanılmaktadırlar. Günümüzde nadiren kullanılmakta olup teknolojik gelişimleri çok fazla yapılamamaktadır.

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılan bir diğer generatör türü olan asenkron generatörler rüzgâr türbinleri rotorlarına bağlandığında motor olarak çalışmaya başlayıp, senkron çalışma hızını yakalayınca kadar sürekli hızını artırma eğilimi gösteren, senkron hızı yakalamasına rağmen hızları daha da artırıldığında, stator 3 faz akımı ile oluşan stator akısıyla rotorda indüklenen akım arasındaki etkileşim sonucu oluşan momentin ters moment değeri taşımaya başlamasıyla generatör olarak işlevine devam eden makinelerdir. Bu makinelerde stator ve rotor herhangi bir elektriksel etkileşime maruz kalmazlar. Statorlarında 3 faz stator akımı vardır ve bu akım dönen rotor etrafında bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alanın hızı makinenin senkron hızını oluşturur. Asenkron makinelerde stator ile rotor arasında elektriksel bir bağlantı olmayıp, tamamen elektromanyetik endüksiyon prensibine göre çalışır. Asenkron makine statorunda AA uyartım akımına ihtiyaç duyar. Eğer makine şebeke ile paralel çalışıyor ise, bu akım şebekeden temin edilir, generatör çalışma moduna geçince de şebeke beslenmeye başlar. Bu çalışmanın yanı sıra makineye bir kondansatör bağlanarak da uyartım akımı sağlanabilir [64], [65].

Senkron generatörler, rotorlarına yerleştirilmiş mıknatısların oluşturduğu manyetik alanın stator manyetik alanıyla senkronize olması sonucunda eşit manyetik hızlarla dönen generatörlerdir. Rotor manyetik alanı sabit mıknatıslardan oluşturulabildiği gibi sargılarla üretilmiş rotordan akan doğru akımla da oluşturulabilir. Bu sebeple senkron

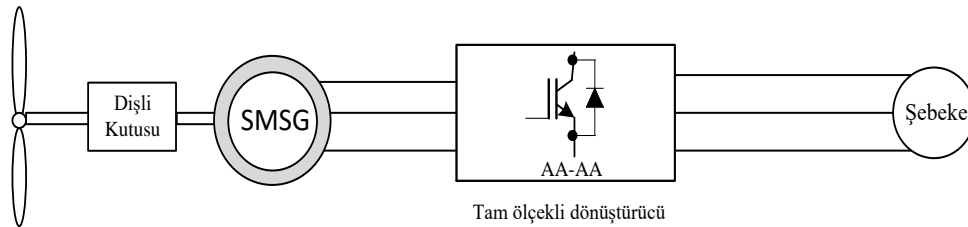
generatörler, uyarım bakımından alan sargılı senkron generatörler (ASSG) ve sabit mıknatıslı senkron generatörler (SMSG) olarak sınıflandırılabilir [66].

Alan sargılı senkron generatörler yukarıda bahsedildiği gibi rotorları mıknatıs yerine sargılardan oluşan generatörlerdir. Rotor manyetik akısını bu sargılar oluşturur. Stator sargısı üzerinden şebekeye bağlanırlar. Stator uyarımlarını şebeke akımı sağlamaktadır. Şekil 2.6’da bir ASSG’nin bir güç dönüştürücü sistemiyle şebekeye bağlanması görülmektedir.



Şekil 2.6. Alan sargılı senkron generatör [64].

Sabit mıknatıslı senkron generatörün statoru sargılıdır ve rotoruna sürekli mıknatıslar yerleştirilmiştir, rotorun manyetik akısı sabit mıknatıslar tarafından üretilmektedir. SMSG herhangi bir enerji kaynağına gerek duymadan kendinden uyarımlı olması nedeniyle rüzgâr türbini uygulamalarında önerilmektedir. En büyük artısı herhangi bir hızda güç üretebilmesidir. Onlar da stator sargısı üzerinden şebekeye bağlanmaktadır. Şekil 2.7’de dişli kutulu bir SMSG örneğinin güç dönüştürücü sistemi kullanılarak şebekeye bağlanması görülmektedir.



Şekil 2.7. Sabit mıknatıslı senkron generatör [64].

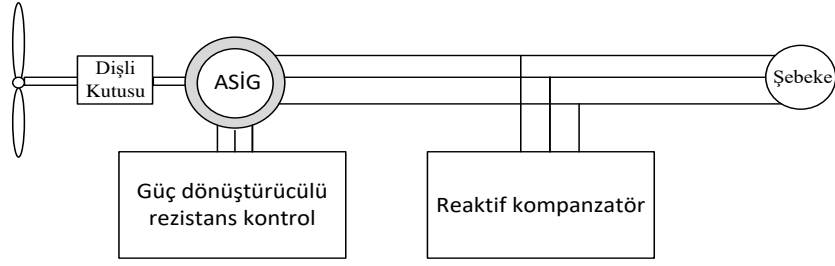
Senkron generatörler, kutup sayılarına bağlı olarak çok kutuplu veya geleneksel senkron generatörler olarak sınıflandırılmaktadır. Çok kutuplu senkron generatörler, genellikle mekanik enerjiyi doğrudan kanatlardan almaktadır. Geleneksel senkron generatörler ise

mekanik enerjiyi bir dişli kutusu aracılığı ile almaktadır. Senkron generatörler reaktif güce ihtiyaç duymazlar, bu sebeple daha kaliteli bir güç akışından söz edilebilmektedir [64],[67]-[69].

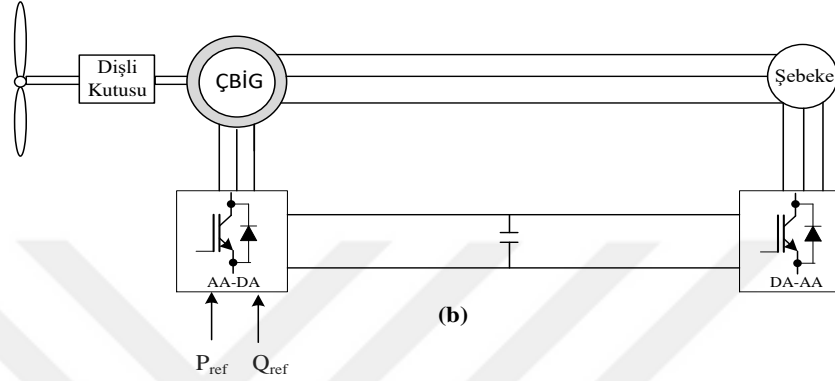
2.2.7. Güç Dönüştürücü Sistemler

Güç dönüştürücüleri, rüzgâr sistemlerinde yük/generatör/şebeke arasındaki arabirimi oluşturmaktadır. Generatör ve şebeke arasındaki rüzgâr enerjisi dönüştürücüleri iki tarafta da ihtiyaçlara cevap verebilmelidir. Generatör taraflı kontrolü için, generatörün stator akımı, devir sayısını ayarlamak için kontrol edilmelidir [70]. Dönüştürücü, generatör çıkış gücünün değişen frekans ve gerilimini modifiye edebilmelidir. Şebeke taraflı kontrol için dönüştürücü, rüzgârın hız değerinden etkilenmeden şebeke isteklerine göre çalışmasını ayarlayabilmelidir yani şebekenin gereksinimlerine göre talep edilen ya da sağlanan reaktif ve aktif güç tepkisini verebilmelidir. Şebeke tarafındaki frekans ve gerilimi, nominal güç sağlama durumlarında neredeyse sabitleyebilmeli ve toplam akım harmonik bozulmasını minimum düzeye çekebilmelidir [71]. Bazı uygulamalarda, bir generatör tarafından sağlanan tüm güç tam ölçekli güç dönüştürücüsünden tamamen geçerken, kısmi ölçekli güç dönüştürücüsünden bu gücün sadece bir kısmı geçer.

Tüm çalışma noktalarında aktif ve reaktif gücün eksiksiz olarak kontrol edilebildiği sistemler, kısmi ölçekli güç dönüştürücü veya tam ölçekli güç dönüştürücüsü sistemleri olarak incelenebilmektedir. Kısmi ölçekli dönüştürücü kullanan değişken hızlı rüzgâr türbini sistemleri, devresindeki kısmi ölçekli güç dönüştürücüsü bulunan alan sargılı asenkron(indüksiyon) generatör (ASİG) ile çift beslemeli asenkron (indüksiyon)generatörü (ÇBAG) konsepti olarak da literatürde yer bulmaktadır. Şekil 2.8’de bu iki generatörü ve güç dönüştürücü sistemlerini özetlemektedir.



(a)



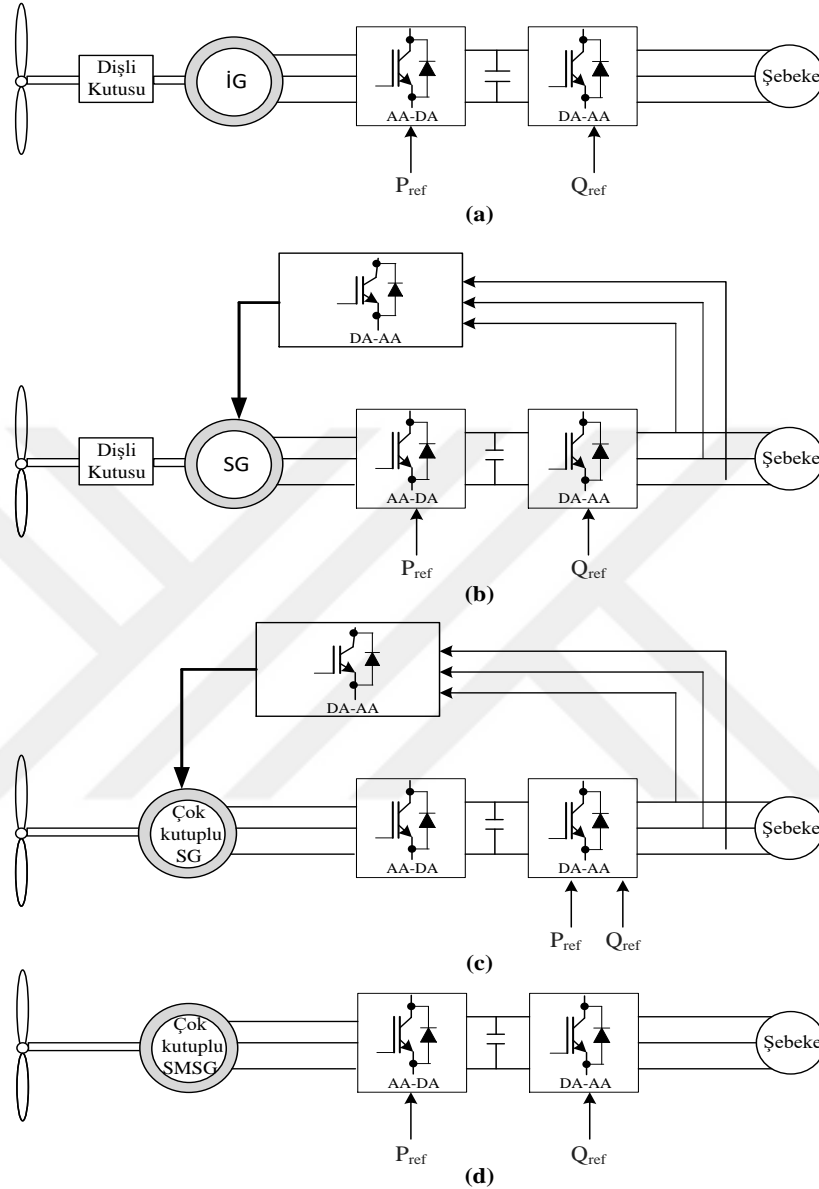
(b)

Şekil 2.8. Rotor rezistans dönüştürücülü alan sargılı indüksiyon generatör (a), Çift beslemeli indüksiyon generatör (b), Kısmi güç dönüştürücülü ve limitli hız aralıklı rüzgâr türbini topolojileri [72].

Bu tasarımda stator doğrudan şebekeye bağlanırken kısmi ölçekli bir güç dönüştürücü rotor frekansını dolayısıyla rotor hızını kontrol etmektedir. Bu kısmi ölçekli dönüştürücünün verim oranı, hız aralığını tanımlamaktadır. Şekil 2.8(a)'da rotor sargılı bir asenkron generatöre ait bir rüzgâr türbini sistemi görülmektedir. Bu dönüştürücü reaktif güç dengelemesi yapabilmekte ve düzgün bir şebeke bağlantısının oluşturulmasını mümkün kılabilir. Rotoru sargılı bir asenkron generatör ile orta ölçekli bir güç dönüştürücüsü kullanan ikinci bir çözüm Şekil 2.8(b)'de gösterilmektedir. Generatör senkron üstü olarak çalışırsa elektrik gücü hem rotor hem de stator üzerinden iletilir. Generatör senkron altı çalışırsa elektrik gücü şebekeden rotora teslim edilir. Senkron devir etrafında $\pm\% 30$ 'luk bir hız değişimi, nominal güçte $\% 30$ 'luk bir güç dönüştürücü kullanılarak elde edilebilir. Ayrıca, hem aktif (P) hem de reaktif gücü (Q) kontrol etmek mümkündür. Güç elektroniği, rüzgâr türbinini şebekeye daha dinamik bir güç kaynağı olarak etkinleştirir.

Tam ölçekli güç dönüşümlü bir değişken hızlı rüzgâr türbini yapılandırması, tam değişken hız kontrolü sağlanabilen rüzgâr türbini sistemlerine karşılık gelmektedir. Bu sistemlerde generatörler asenkron, senkron, çok kutuplu senkron yada sürekli mıknatıslı

senkron generatörler olabilmektedirler. Şekil 2.9’da bu generatörler ile güç dönüştürücüleri bağlantıları özetlenmektedir.



Şekil 2.9. Tam ölçekli güç dönüştürücülü rüzgâr türbini sistemleri [72].

- Dişli kutulu indüksiyon generatör (a),
- Dişli kutulu senkron generatör (b),
- Çok kutuplu senkron generatör (c),
- Çok kutuplu sürekli mıknatıslı senkron generatör (d).

Şebeke tarafı güç dönüştürücü, sistemin aktif ve reaktif güçlerini çok hızlı kontrol etmesini sağlar. Tam ölçekli güç dönüştürücüler kontrol performansı bakımından daha hızlıdır ancak üretilen gerçek güç mevcut rüzgâra bağlıdır. Şebekede bir arıza görüldüğünde ve şebeke gerilimini tekrar oluşturmak için ihtiyaç duyulduğunda aktif

olabilirler, rüzgârda daha fazla güç olmasına rağmen güç üretimini düşürme olanağına sahiptirler ve dolayısıyla güç sistemi için kapasite belirlemede rol oynamaktadırlar.

Değişken hızlı rüzgâr türbini sisteminde en yaygın dönüştürücü konfigürasyonu doğrultucu evirici çiftidir. Arka arkaya bağlı üç fazlı bir güç elektroniği çevirici sistemi, iki adet geleneksel darbe genişlik modülasyonlu (DGM) gerilim-kaynaklı dönüştürücülerden (GKD) oluşan çift yönlü bir güç dönüştürücüsüdür. Dönüştürücülerden biri doğrultma işlemi yaparken, diğer dönüştürücü alternatif gerilime çevrime işlemi yapar. Bu iki dönüştürücü, bir kapasitörden oluşan bir DA-bağlantısı vasıtasıyla birbirine bağlıdır. DA bara gerilimi şebekeye enjekte edilen akımın tam kontrolünü elde etmek için şebeke-hat geriliminin genliğinden daha yüksek bir seviyede tutulacaktır. Generatör tarafı dönüştürücü, azami rüzgâr gücünün DA yoluna yönlendirilmesine izin vermek için generatörün uyarılmasından ve generatörün kontrolünden sorumluyken, güç akışı DA-bara gerilimini sabit tutmak için şebeke tarafı dönüştürücü tarafından kontrol edilir. DA-bara enerji depolama elemanı dönüştürücü ve invertör arasında ayrıştırma sağlar. Bununla birlikte, DA-bara kondansatörü ağırdır ve hantaldır, maliyeti arttırır ve sistemin genel ömrünü azaltır [31],[72],[73].

2.3. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR

Sürekli mıknatıslı senkron generatörler rotorunda uyarım sargısı yerine sabit mıknatıslar barındıran generatör türleridir. Bu mıknatıslar rüzgâr türbininin mekanik güç ile hareket ettirdiği rotorda bir manyetik alan oluştururken, güç dönüştürücüleri vasıtasıyla statora ulaşan şebeke akımı da mıknatıslar ile etkileşime girerek statorda bir manyetik alan oluşturmaktadır. Bu iki manyetik alan generatörün optimum hızla dönmesi sonucu kilitlenip bir senkronizasyon oluşturmaktadırlar. SMSG'ler değişken rüzgâr hızlarında yüksek verimlilikte çalışma sağlayabilmelerinden ötürü rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminde sıkça tercih edilmektedirler.

İstenilen her hızda güç sağlayabilmesi önemli özellikleri arasındadır. Bu tür generatörlerin kutupları sürekli mıknatıslardan oluştuğu için çok kutuplu olarak tasarlanmaya oldukça elverişlidir. Çok kutuplu generatörler sayesinde dişli kutusu kullanımı elimine edilebilir ve generatör rüzgâr türbinine direkt bağlanabilir. Ancak dişli kutusu ile kullanılan çok kutuplu generatörlü türbin modelleri de bulunmaktadır.

SMSG'lerin avantajları ve dezavantajları şöyle verilebilir:

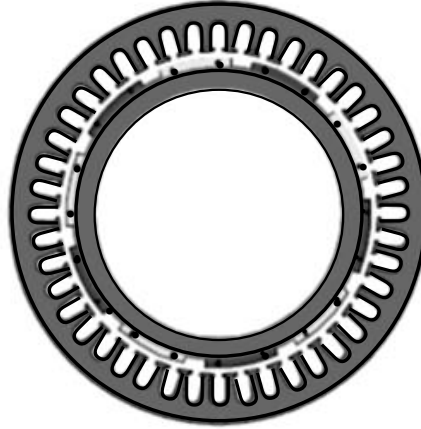
Avantajları;

- DA uyartım sargılarına, bilezik ve fırça sistemlerine ihtiyaç duyulmaz.
- Teknolojik gelişmelerle beraber ASSG'lerden çok daha kullanışlı çok kutuplu senkron generatörler kullanılabilir.
- Üretim için tercih edilen malzeme sayısı, ASSG'lerin üretimi için kullanılan malzeme sayısından az olduğu için daha hafiftir.

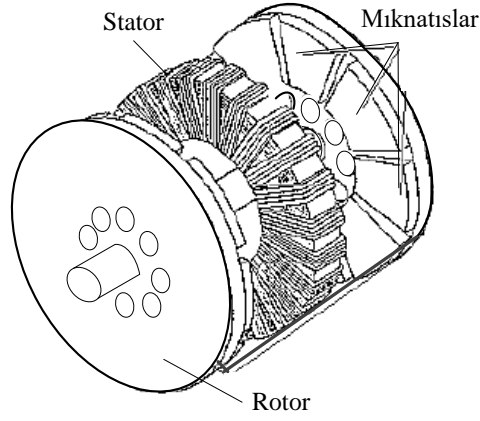
Dezavantajları;

- Generatör uyartımına bağlı olarak güç katsayısı kontrol edilemez. Bu sebeple generatörün şebekeye doğrudan bağlandığı sabit hızlı rüzgâr türbinleri için bu yöntem uygun değildir. Bu sorun hibrid uyartımlı sistemler ile aşılmaya çalışılmaktadır.
- Bu tür generatörlerin anma gücü yüksek olduğundan güvenlik için ek frenleme sistemlerine ihtiyaç duyulabilir.

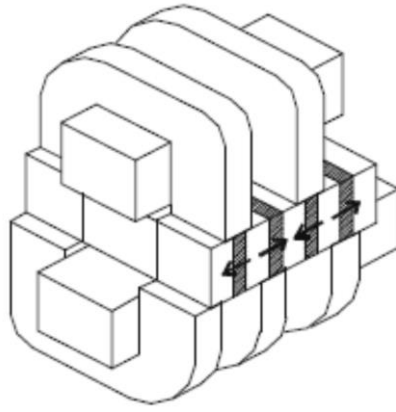
SMSG'ler akısal harekete göre genel başlık altında üç türe ayrılmaktadır. Bunlar radyal (yarıçapsal) akılı generatörler, aksel akılı generatörler ve çapraz (enine) akılı generatörler olarak sınıflandırılabilir. Şekil 2.10, Şekil 2.11 ve Şekil 2.12'de bu türlere ait model kesitleri görülmektedir.



Şekil 2.10. Radyal akılı sürekli yüzey mıknatıslı makine.



Şekil 2.11. Hava boşluğu sargıları olan eksenel akılı SMSG.



Şekil 2.12. Akı yoğunluğu olan çapraz(enine) akılı SMSG'nin üç kutbu.

Radyal (yarıçapsal) akılı generatörlerin stator ile rotoru iç içedir. Radyal akılı generatörlerde manyetik akı hareket yönüne dik olduğundan sonlandırma sargılarına gerek duyulmaz ve değerlendirilebilir kuvvet yoğunluğu 250 kN/m^2 seviyesine erişebilir. Bu nicelik sürekli miknatısların yüksekliğine bağlı olarak daha fazla olabilir.

Eksenel akılı generatörler eksenel yönde akı üretmektedirler ve hava aralığı da eksenel yönde olmaktadır. Rotor ve stator iç içe değil yan yana bulunmaktadır. Hava aralığı manyetik akısının dönüş yönü mil eksenine paraleldir. Birden fazla rotor yada stator yan yanadizayn edilebildiğinden geleneksel radyal akılı generatörle kıyaslandığında daha fazla manyetik akı üretirler.

Son tür olan çapraz akılı generatörler ise yine manyetik akış yönlerinin rotorun dönüş yönüne dik olduğu generatörlerdir. Bu tür generatörlerde, tek taraflı akış konsantrasyonlu tek taraflı yüzey miknatıslı rotor ve çift taraflı akış konsantrasyonlu rotor gibi bazı farklı rotor yapıları da bulunmaktadır.

SMSG'ler stator ve rotorun birbirlerine göre konumu dikkate alınarak da sınıflandırılabilir. Rotorun statorun içine yerleştirildiği generatörlere iç rotorlu SMSG, dışına yerleştirildiği generatörlere dış rotorlu SMSG adı verilmektedir. İç rotorlu generatörlerde üretilebilecek moment rotor uzunluğuyla orantılı olarak artmaktadır. Rotor çapıyla ise karesel değerde artış göstermektedir. Dış rotorlu generatörlerde ise rotor statoru içine almaktadır ve mıknatıslar rotorun iç kısmına konumlandırılır. Rotoru yüksek eylemsizliğe sahiptir ve bu moment harmoniklerinde azalma eğilimi gösterir [74]-[77].

2.3.1. Matematiksel Model

Aşağıda SMSG'nin dinamik modeli stator referans düzleminde matematiksel denklemlerle gösterilmektedir [78].

Denklem (2.32) sırasıyla 3 fazlı stator referans düzlemindeki anlık stator gerilimlerini, stator direncini, faz akımlarını, faz akımları ile mıknatısların oluşturduğu akı bağlarını vermektedir.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Burada V_a , V_b , V_c üç faz stator gerilimleridir ve i_a , i_b ve i_c üç faz stator akımlarıdır. R_s stator sargı direncini temsil etmektedir. Akı bağları durağan çerçeve ile döner çerçeve arasındaki θ_{gen} açısının fonksiyonu olarak, öz indüktanslar ve ortak endüktanslar ele alınarak Denklem (2.33)'deki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_r \cos(\theta_{gen}) \\ \lambda_r \cos(\theta_{gen} - \frac{2\pi}{3}) \\ \lambda_r \cos(\theta_{gen} + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

L_{aa} , L_{bb} , L_{cc} 3 faz öz indüktansları; L_{ab} , L_{ac} , L_{ba} , L_{bc} , L_{ca} , L_{cb} bu fazların ortak indüktansı; λ_r , rotor akı bağı olarak verilmektedir.

Stator referans düzlemde denklemlerin doğrusal olmaması ve bileşenlerin birbirine bağlı olması, SMSG dinamik modelinin bu düzlemde incelenmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle dinamik model bir başka düzleme aktarılır. Çalışmada rotor referans düzlemi tercih edilmiştir. Rotor referans düzleminde 3 faz stator gerilimleri park dönüşüm ile d-

q referans çerçevesinde stator akımlarına veya akı bağlantılarına dönüşür. Aşağıda rotor referans düzlemindeki SMSG dinamik model denklemleri görülmektedir [6].

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{gen}) & \cos(\theta_{gen} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{gen} + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_{gen}) & -\sin(\theta_{gen} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{gen} + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

SMSG'nin d-q referans çerçevesindeki gerilim fonksiyonları Denklem (2.35) ve Denklem (2.36) ile verilir. L_d ve L_q düzlemdeki stator endüktansları; V_d ve V_q , anlık stator gerilimleri; i_d ve i_q , anlık stator akımları; ω_e , generatör elektriksel açısal hızıdır.

$$V_q = (R_s i_q) * L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \lambda_r \quad (2.35)$$

$$V_d = (R_s i_d) * L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (2.36)$$

Ters park dönüşümü ile tekrar 3 fazlı stator düzlemine geçilir.

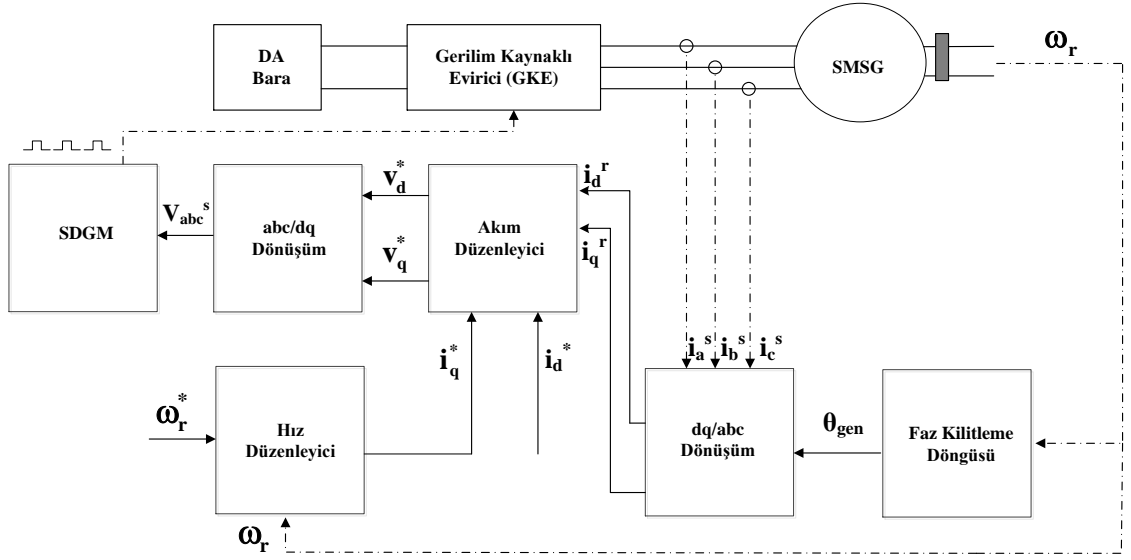
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{gen}) & -\sin(\theta_{gen}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta_{gen} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{gen} - \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta_{gen} + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{gen} + \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Aşağıdaki denklem ise generatör elektriksel moment değerini vermektedir. p, kutup çifti sayısı olarak kullanılmıştır.

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_r i_q + (L_d - L_q) i_q i_d) \quad (2.38)$$

2.4. SMSG'LERİN KONUM ALGILAYICI SİNUSOİDAL DALGA GENİŞLİK MODÜLASYONLU (SDGM) VEKTÖR KONTROLÜ

Vektör kontrolü AA makinelerini DA makineler gibi kolayca kontrol edilebilir kılmaktadır. Şekil 2.13'de SMSG, gerilim kaynaklı evirici (GKE), DA bara ile akım ve gerilim algılayıcılarından oluşan, konum algılayıcı tabanlı vektör kontrol tasarımı uygulanan bir SMSG sürücü sisteminin genel blok diyagramı verilmektedir.

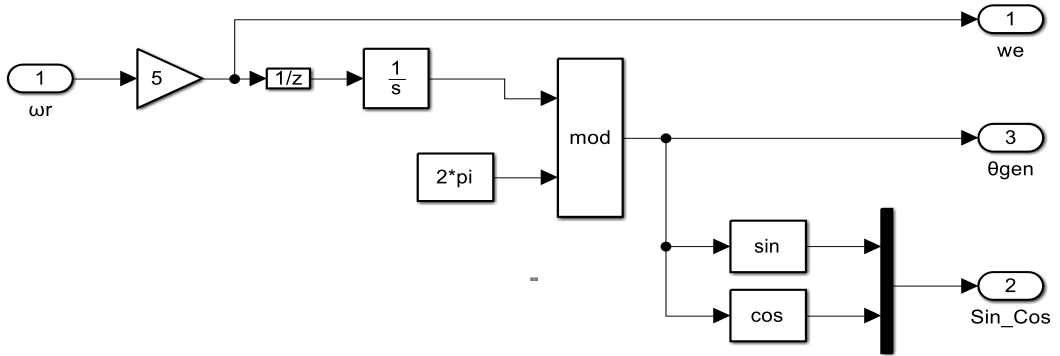


Şekil 2.13. Konum algılayıcılı kontrol tasarımı.

Vektör kontrolü verilen şu basamaklar ile gerçekleştirilir:

Akım ve rotor konumunu algılamak:

1. Akım dönüştürücüleri kullanarak, SMSG'un faz akımları bilgisi elde edilir.
2. Faz kilitleme döngüsü (FKD) ile rotor konum bilgisine ulaşmak için, elektriksel açısal hız değerleri ölçülür. Şekil 2.14'te generatör tarafı FKD bloğu gösterilmektedir.



Şekil 2.14. Generatör tarafı faz kilitleme döngüsü bloğu.

3. Stator faz akımları, elde edilen rotor konum bilgisi kullanılarak senkronize dönen (rotor) referans düzlemdeki i_d ve i_q akımlarına dönüştürülür.

Moment ve akım bilgilerinin üretimi:

1. Bir hız düzenleyici kontrol ile referans rotor hızı ω_r^* ve anlık rotor hızı ω_r arasındaki izleme hatasına dayanan moment bilgisi i_q^* , üretilir.

2. i_d , rotor mıknatıs akısını taşıyan akım bileşenidir, mıknatıs akısı kontrol edilemeyeceğinden o da kontrol edilemez. Moment değerinin maksimum değerini alması amacıyla '0' değerinde tutulur. Yine generatör tarafı reaktif güç kontrolünde reaktif gücün oluşmaması amacıyla referans reaktif güç bileşeni i_d^* '0' değerini alır.

Akım düzenleyici ve kapı sinyalleri üretimi:

1. İki adet akım düzenleyici kontrol ile, ayrışım temelli kontrol (dekuplaj) yapılır. Ayrışım temelli bu kontrol ile stator akımlarının moment ve akıyı üreten bileşenleri, i_q ve i_d , ayrı ayrı kontrol edilir. Bu kısımdan, senkron döner referans düzlemindeki V_d^* ve V_q^* referans gerilimleri elde edilir.

2. V_d^* ve V_q^* temelli sinusoidal dalga genişlik modülasyonu (SDGM) yapılır ve GKE anahtarlama sinyalleri elde edilir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi vektör kontrol tasarımında V_d^* ve V_q^* referans gerilimleri elde etmek için, iki adet akım düzenleyici ve i_q^* moment bileşeni bilgisini üretmek için, bir adet hız düzenleyici bulunmaktadır. Bu düzenleyiciler, PI (Proportional-Integral) denetleyicilerden oluşmaktadır. Bu bölümde vektör kontrol ve PI akım ve hız denetleyici tasarımları ile SDGM prensiplerine değinilecektir.

2.4.1. Akım Denetleyici ve D-q Düzlemde Kuplajlama

Rotor referans düzlem gerilim denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$V_{qs}^r = -R_s i_{qs}^r - L_q \frac{di_{qs}^r}{dt} - \omega_e L_d i_{ds}^r + \omega_e \lambda_r \quad (2.39)$$

$$V_{ds}^r = -R_s i_{ds}^r - L_d \frac{di_{ds}^r}{dt} - \omega_e L_q i_{qs}^r \quad (2.40)$$

D-q eksen akıları λ_{ds}^r ve λ_{qs}^r ise,

$$\lambda_{ds}^r = L_d i_{ds}^r - \lambda_r \quad (2.41)$$

$$\lambda_{qs}^r = L_q i_{qs}^r \quad (2.42)$$

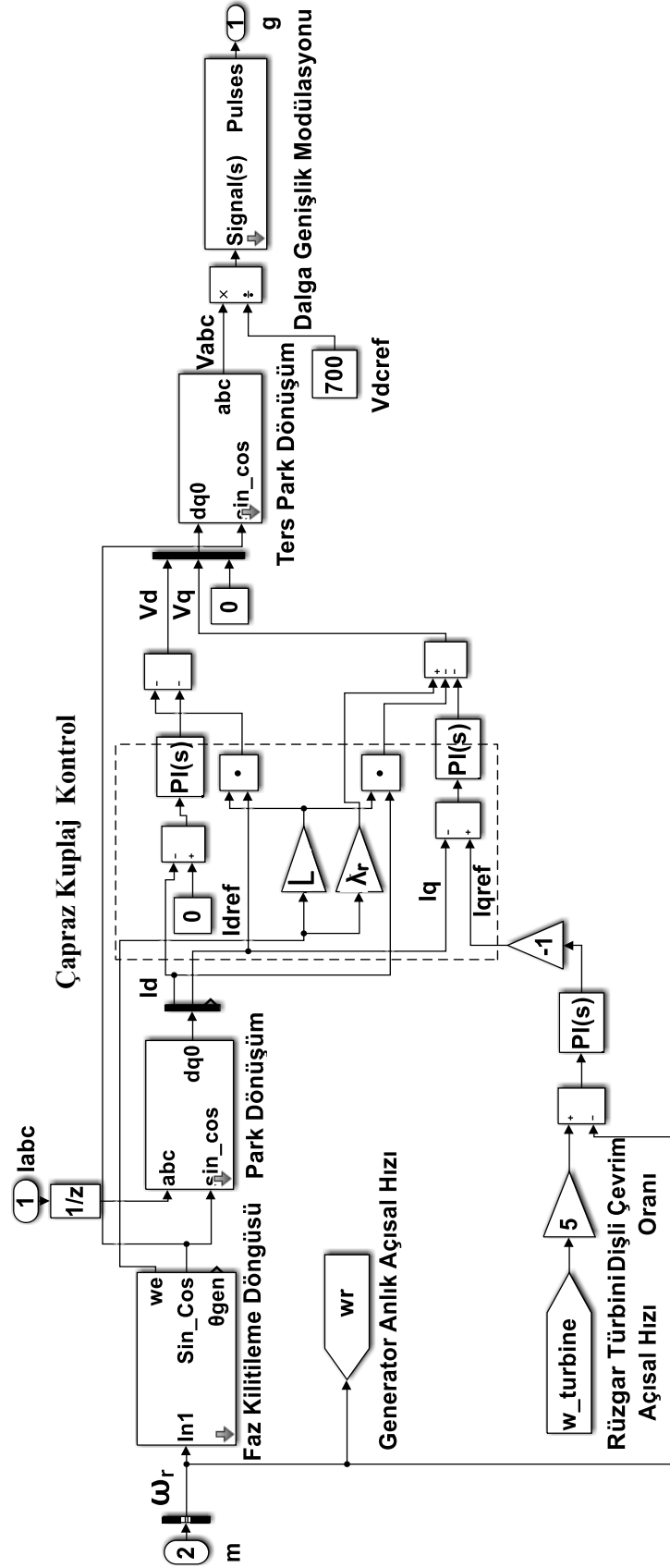
olarak verilir. Yukarıdaki gerilim denklemleri bir de d-q eksen akıları cinsinden yazılırsa aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$V_{qs}^r = -R_s i_{qs}^r - L_q \frac{di_{qs}^r}{dt} - \omega_e \lambda_{ds}^r \quad (2.43)$$

$$V_{ds}^r = -R_s i_{ds}^r - L_d \frac{di_{ds}^r}{dt} - \omega_e \lambda_{qs}^r \quad (2.44)$$

Burada L_d ve L_q düzlemdeki stator endüktansları; R_s , stator rezistansı; V_{ds}^r ve V_{qs}^r , anlık stator gerilimleri; i_{ds}^r ve i_{qs}^r , anlık stator akımları; ω_e , generatör elektriksel açısal hızı; λ_r , rotor akı bağı; λ_{ds} ve λ_{qs} bu rotor akı bağlarının düzlemdeki bileşenleridir. Bu iki sabit referans düzlem rotor gerilim denklemleri, Şekil 2.15’de gösterildiği gibi, blok diyagram formunda ifade edilebilir. Bu blok diyagramda, gerilimler çıkış olarak ele alınmış, bu çıkışı sağlayan giriş değerleri gösterilmiştir.





Şekil 2.15. Çapraz kuplajlama terimlerinin dâhil olduğu blok diyagramı.

Generatör tarafı vektör kontrolü, park dönüşüm ile d-q eksen çerçevesine dönüşüm sonucu oluşan $-d$ eksen rotor akım bileşeni ve $-q$ eksen moment akım bileşeni ile gerçekleştirilir. Bu eksenler rotor akı yönüyle uyumlu bir şekilde $-d$ eksen rotor elektriksel açısal hızında döner. Bu nedenle akı üreten akım bileşeni ve moment üreten akım bileşeni d-q eksenlerinde sırasıyla bulunmaktadır. Böylece d-q eksen akımları, SMSG'lerin moment ve hızını dolaylı olarak kontrol eden vektör kontrolü yaklaşımındaki 2 kapalı döngü ile bağımsız olarak kontrol edilebilir.

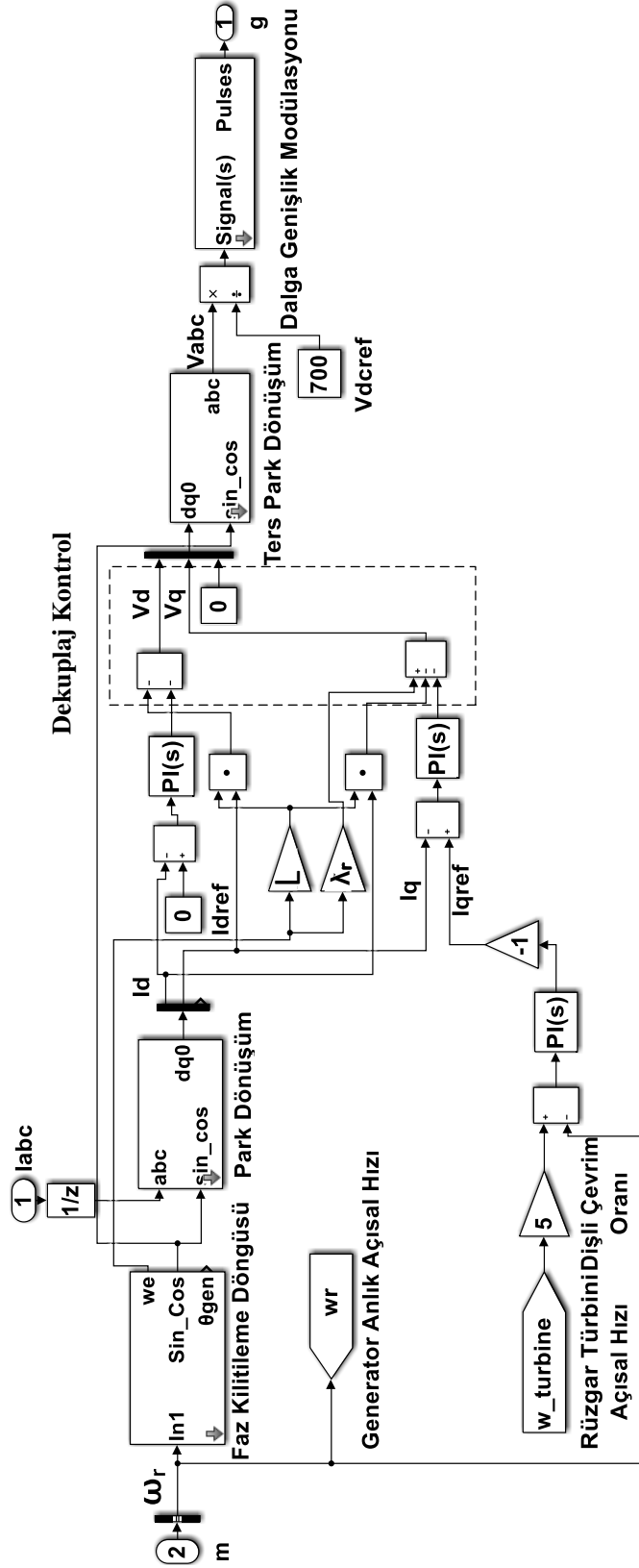
Makine momenti park dönüşüm ile stator akımının 3 fazlı stator düzleminde -dq referans düzlemine geçişi ile dolaylı olarak kontrol edilir. Bu kontrolde SMSG'nin anlık mekaniksel açısal hızı referans olarak verilen sabit bir mekaniksel açısal hız ile karşılaştırılır. Oluşan hata değeri PI denetleyiciye gönderilir ve generatörün hızını denetleyen bu PI denetleyici iki hız arasındaki hataya göre referans i_q akımı olan i_{qref} akımını üretir. PI kontrol stratejisinde üç PI denetleyici kullanılmaktadır. Bu PI kontrol yöntemi doğrusal kontrol fikirlerine dayanır; doğrusal olmayan herhangi bir öge, kontrol döngüsünde ihmal edilir. Sistemin dinamik davranışını iyileştirmek için dekuplaj ögeleri eklenir. Şekil 2.16, d-q eksen akımlarını kapalı döngü ile kontrol eden PI denetleyicilerinin kontrol döngüsüyle gerçekleştirilen vektör kontrolünü ve dekuplaj işlemini göstermektedir.

PI denetleyici parametrelerinde maksimum güce karşılık gelen optimal değeri kontrol etmek için stator $-d$ eksen akımı sıfıra, $-q$ eksen akımı optimum moment değerine ayarlanır [50].

2.4.2. Moment Denetleyicinin Tasarımı

Sabit referans düzlemindeki rotor akımları, kararlı durumlarda DA değerleri alır. Bu sayede, girişleri kalıcı durumda sabit değerler alan PI denetleyiciler, kalıcı durum hatasının sıfıra indirgenebilmesiyle bu akımları kontrol etmede kullanılabilir [79],[80].

Çapraz kuplajlamada sebebiyle rotor d,q akımları, ayrı ayrı kontrol edilemezler. V_{ds}^f değiştirildiği takdirde, \dot{I}_{ds}^f akım istenildiği gibi değiştirilebilir, ancak bu V_{qs}^f gerilim bileşeninin değişimine, devamında \dot{I}_{qs}^f değişimine sebebiyet verir ve bu akım denetleyicisinin performansını düşüren, istenmeyen bir durumdur. Akım kontrolünden maksimum düzeyde faydalanabilmek için \dot{I}_{ds}^f ve \dot{I}_{qs}^f bağımsız olarak kontrol edilmelidir. Bu da dekuplaj işlemi ile sağlanmaktadır [79]-[82].Dekuplaj terimleri aşağıdaki modelde görülebilir.



Şekil 2.16. Dekuplaj (ayrışım) kontrollü akım PI denetleyicileri.

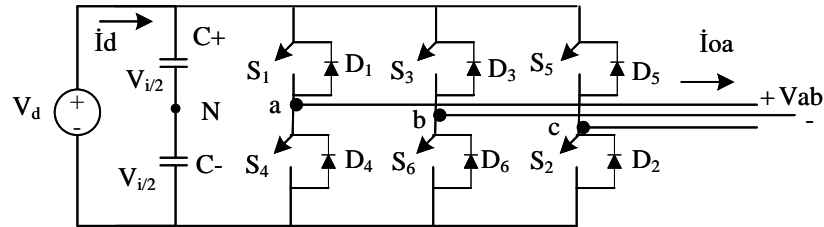
Hız hatası ve anlık stator akımları hatalarının giriş olarak verildiği PI denetleyicilerinin çıkışına, makine parametreleri ile $\omega_e \lambda_{rve}$ ve $\omega_e L$ dekuplaj terimleri eklenir [83]. Bu

çalışmada olduğu gibi SMSG türlerine bağlı olarak stator endüktans değerleri eşit alınabilir ($L_d=L_q=L$). Ayrıca Şekil 2.16' ile verilen q-ekseni ve d-ekseni akım denetleyicilerinin PI tasarımları da aynıdır.

2.4.3. Generatör Tarafı Sinus Dalga Genişlik Modülasyonu

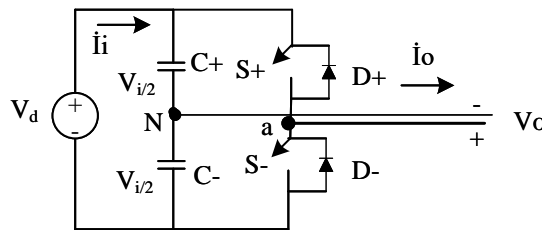
Rüzgâr türbini arabirim dönüştürücüleri olarak doğrultucu, evirici vb. cihazlar kullanılmaktadır. Bazı rüzgâr türbinlerinde arabirim dönüştürücüsü olarak gerilim kaynaklı eviriciler tercih edilmektedir. Bu eviriciler histeresiz band akım kontrol DGM, uzay vektör DGM, seçmeli harmonik bastırmalı DGM, sigma delta modülasyonu, üçüncü harmonik ilaveli DGM vb. birçok anahtarlama yöntemi kullanabilmektedir [84].

Sinusoidal dalga genişlik modülasyonu yöntemi (SDGM) de bunlardan bir tanesidir. SDGM yöntemine değinmeden önce anahtarlama işlevine şöyle bir değinmek yerinde olacaktır. Aşağıda iki seviyeli üç fazlı bir anahtarlama modeli görülmektedir.



Şekil 2.17. İki seviyeli üç fazlı bir anahtarlama modeli.

Bu yapıda her bir anahtar giriş gerilimi tepe değerine maruz kalmaktadır. Ayrıca faz-nötr çıkış noktası referans alınarak, iki farklı seviyede olabilir. Çalışma yöntemleri gerilimi bara kondansatörü orta bir faz bacağı incelenerek şöyle anlatılabilir:



Şekil 2.18. İki farklı seviyede anahtarlama modeli.

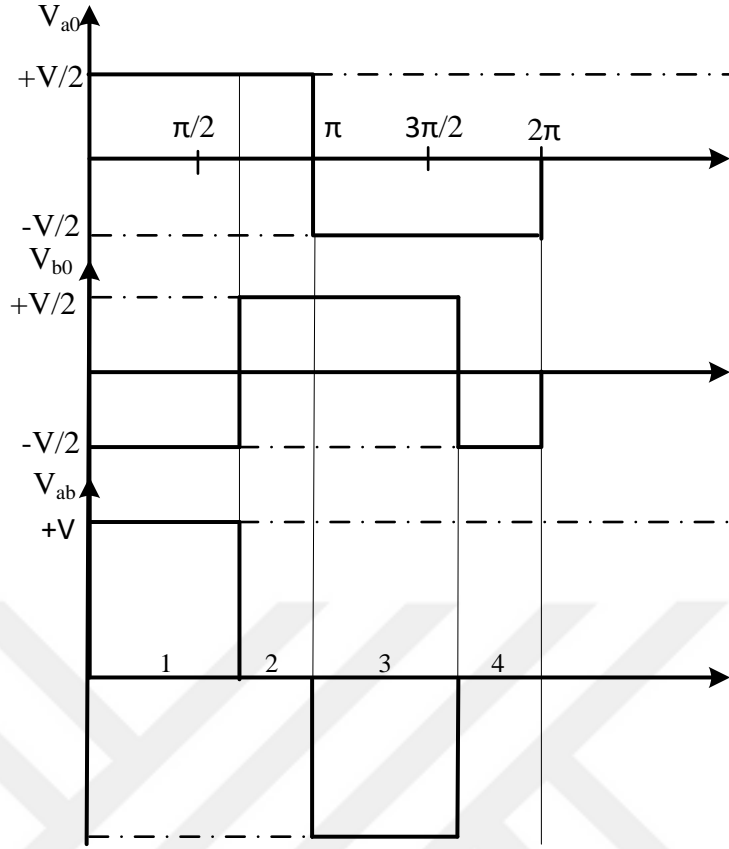
S+ anahtarı iletimde ve S- kesimde iken çıkış gerilimi $+V_{i/2}$ ve S+ kesimde S- iletimde iken $-V_{i/2}$ değerlerini almaktadır. S+ anahtarı iletimde iken S- anahtarının üst ucu giriş gerilim kaynağının pozitif ucuna alt ucu ise negatif ucuna bağlanmaktadır. Bu durumda S- anahtarı giriş gerilimi tepe değerine maruz kalır. Benzer durum S+ için de geçerlidir. Çizelge 2.1'de üç fazlı iki seviyeli ölçüm için tüm anahtarlama elemanlarının çeşitli

durumları görülmektedir [66].

Çizelge 2.1. İki seviyeli üç fazlı anahtarlama durumları.

Durum	Anahtarlama Durumu (S_n)	V_{AB}	V_B	V_A
1	1,2 ve 6 iletimde	V_d	0	$-V_d$
2	2,3 ve 1 iletimde	0	V_d	$-V_d$
3	3,4 ve 2 iletimde	$-V_d$	V_d	0
4	4,5 ve 3 iletimde	$-V_d$	0	V_d
5	5,6 ve 4 iletimde	0	$-V_d$	V_d
6	6,1 ve 5 iletimde	V_d	$-V_d$	0
7	1,3 ve 5 iletimde	0	0	0
8	4,6 ve 2 iletimde	0	0	0

Bu eviricinin faz-nötr gerilimi iki seviyeli olmasına rağmen, faz-arası gerilimde üç farklı seviye görülür. Şekil 2.19’da 180° iletimli evirici çıkışı faz-nötr gerilimleri ve faz-faz arası gerilimleri görülmektedir [85].



Şekil 2.19. İki seviyeli üç fazlı evirici faz nötr ve fazlar arası gerilim ilişkisi.

Evirici faz gerilimleri arasında 120° derece faz farkı olduğu için, fazların vektörel toplamı nedeniyle faz arası gerilim seviyesi faz nötr geriliminden daha yüksek genlikli ve seviyeli hale gelmiştir. Faz arası gerilimi Denklem (2.45) ile hesaplanır.

$$V_{ab} = V_{a0} - V_{b0} \quad (2.45)$$

Şekil 2.19’da 1. aralık incelendiğinde V_{a0} pozitif, V_{b0} ise negatif ve eşit genliktedir. 1. aralık için V_{ab} çıkış gerilimi Denklem (2.46) ile hesaplanır.

$$V_{ab} = +\frac{V}{2} - \left(-\frac{V}{2}\right) \quad (2.46)$$

$$V_{ab} = V \quad (2.47)$$

Diğer aralıklar için hesaplamalar Çizelge 2.2 ile verilmiştir [85].

Çizelge 2.2. Üç fazlı iki seviyeli evirici faz nötr ve faz-faz arası gerilimi.

Aralık	V_{a0}	V_{b0}	İfade	V_{ab}
1	$+V/2$	$-V/2$	$+V/2 - (-V/2)$	V
2	$+V/2$	$+V/2$	$+V/2 - (+V/2)$	0
3	$-V/2$	$+V/2$	$-V/2 - (+V/2)$	$-V$
4	$-V/2$	$-V/2$	$-V/2 - (-V/2)$	0

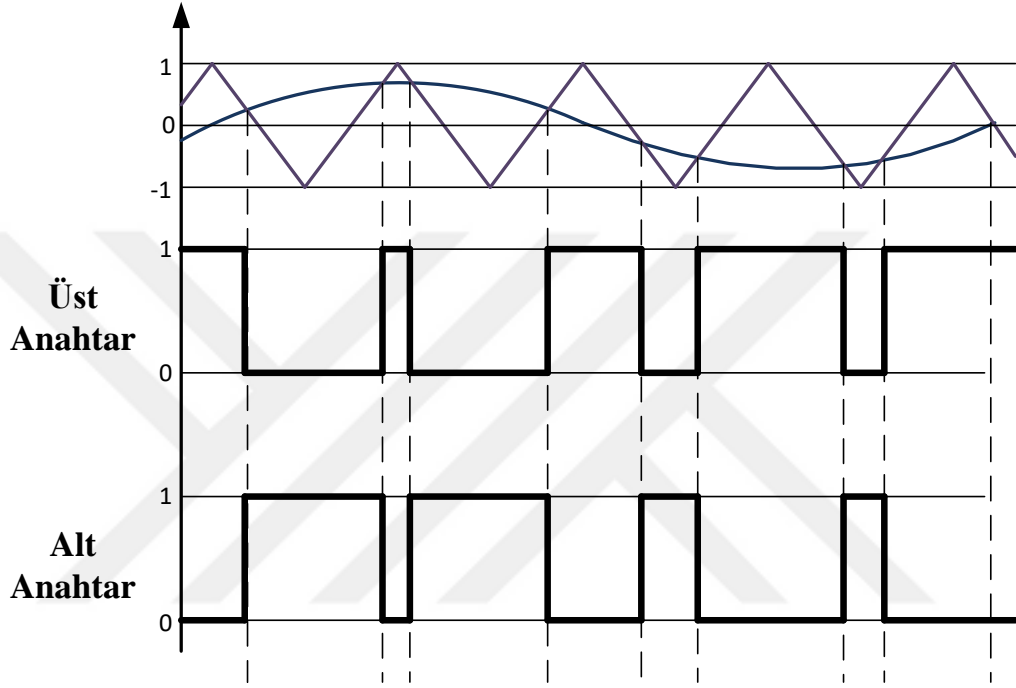
DGM yöntemi, yukarıda örnek olarak gösterilen bir anahtarlama türünün bir referans dalga ve bir taşıyıcı dalga ile gerçekleştirilmesidir. Genliği ve frekansı sabit taşıyıcı bir dalganın (genliği ve fazı sabit kalmak şartıyla) genişliğinin referans sinyal ile değiştirilmesidir. Taşıyıcı sinyalin genliği, frekansı ve genişliği sabittir. DGM için taşıyıcı dalganın genliği sabit kalmak şartıyla genişliği yani eni modüle edici referans sinyaline göre değiştirilir. Modüle edici sinyal sıfır iken darbe değişmez. Pozitif yönde artarken darbenin genişliği artar. Modüle edici sinyalin negatif yöndeki değeriyle orantılı olarak darbenin genişliği azalır [86].

DGM tekniğinde amaç kare şeklinde darbeler oluşturmak ve bu darbelerin genişliğini değiştirmek suretiyle çıkıştaki dalganın ana harmoniğini değiştirmektir. Darbelerin yarı periyottaki sayılarının artırılması ile anahtarlama harmoniklerinin frekansı yükseltilir. Böylece yük endüktansının harmonik akımlarını sınırlaması sağlanır. Referans dalga olarak kare dalga ve sinüs dalgası seçilebilir. DGM tekniğini uygulamanın en kolay ve eniyi yolu bir üçgen dalga ile sinüs dalgasını bir komparatorde karşılaştırmaktır. SDGM’de sinüs tepe değerinin (V_R), üçgen taşıyıcı dalganın tepe değerine (V_C) oranına modülasyon indeksi denir ve Denklem (2.48) ile gösterilir. Modülasyon indeksinin değiştirilmesi çıkış gerilimi ana harmonik genliğini ayarlar [50].

$$M_a = \frac{V_R}{V_C} \quad (2.48)$$

SDGM yönteminde referans alınan dalga formu sinusoidal olduğu için yönteme sinusoidal dalga genişlik modülasyonu yöntemi denilmiştir. Referans alınan bu sinusoidal dalga taşıyıcı bir dalga ile karşılaştırılarak iki dalganın kesişimi olan yeni bir kare dalga oluşturulmakta, güç dönüştürücüleri bu kare dalga formu ile anahtarlansızdır. Üç fazlı bir sistemde her bir faz için aynı taşıyıcı sinyal kullanılır

ve referans işaretin taşıyıcı işaretten küçük olduğu durumda üst anahtar iletme geçer, aksi durumda ise alt anahtar iletme geçer [87]. Vektör kontrolü sonucu elde edilen V_{abc} gerilim değerleri, SDGM yöntemi kullanılarak taşıyıcı üçgen dalga ile karşılaştırılır. Bu karşılaştırmada üçgen dalgalar ile bu dalgalardan genlik olarak küçük ya da eşit boyda olan sinüs şeklindeki V_{abc} dalgalarının kesişimi yeni bir kare dalga şekli oluşturmaktadır, Şekil 2.20’de gösterilmektedir.



2.20. Şekil SDGM sinyallerinin elde edilmesi.

Üretilen bu kare dalgalar da eviriciye anahtarlama kapı darbeleri olarak uygulanır ve evirici generatörden gelen AA akım ve gerilimleri DA bara akım ve gerilimlerine dönüştürür [88].

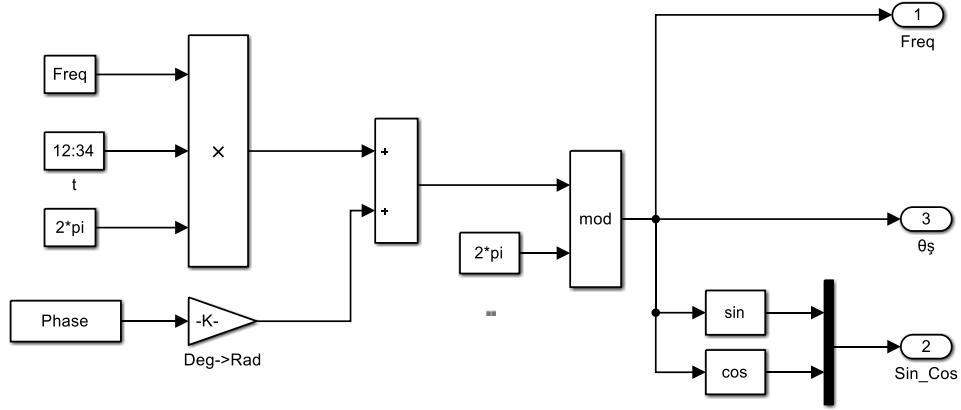
2.5. ŞEBEKE VEKTÖR KONTROLÜ

Şebeke tarafı vektör kontrolünde şebekeye verilecek olan gücün kalitesini denetlenirken, gerilim kontrolü ile şebekeye verilecek olan aktif ve reaktif güç denetlenmektedir.

2.5.1. Şebeke Akım ve Konum Açısını Algılama

Şebeke senkronizasyonunda kullanılan FKD denetleyicisi şebeke gerilimini denetleyerek bir konum açısı oluşturur ve böylece şebeke gerilim ve akımı abc eksen

düzleminden d-q eksen düzlemine dönüştürülebilir. Aşağıda şebeke FKD modeli gösterilmektedir.

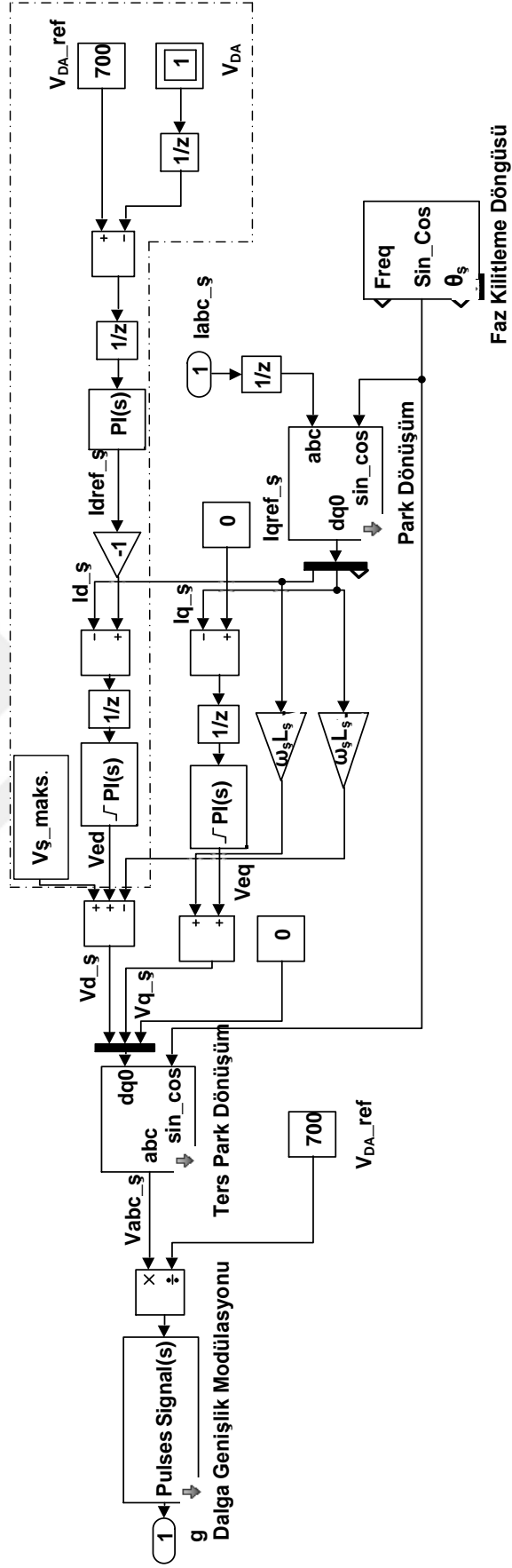


Şekil 2.21. Şebeke tarafı faz kilitleme döngüsü bloğu.

2.5.2. Akım Bilgilerinin Elde Edilişi ve Gerilim Yönlendirmeli Kontrol

Doğru gerilim denetimi, DA bara kondansatörünü istenen değerde sabit tutarak şebekeye verilecek aktif gücü üretmek için eviriciye akacak aktif akım referansını ($I_{dref_ş}$) elde etmek için kullanılmaktadır. Bu işlem anlık olarak ölçülen doğru gerilim değerinin (V_{DA}) referans olarak alınan bir doğru gerilim (V_{DA_ref}) ile karşılaştırılıp hatanın bir PI kontrolden geçmesiyle yapılır. PI kontrol çıkışından şebeke tarafı referans aktif güç kontrol bileşeni $I_{dref_ş}$ elde edilir. Aşağıda gerilim yönlendirmeli kontrol bileşenleri görülmektedir.

Gerilim Yönlendirmeli Kontrol



Şekil 2.22. Gerilim yönlendirmeli kontrol bloğu.

2.5.3. Akım Denetleyici ve Kapı Sinyalleri Üretimi

PI denetleyici parametrelerinde reaktif güç 0 değerinde tutulmak istenebilir. Reaktif güç kontrolü, şebekeden alınan akımın FKD bloğunun sağladığı konum bilgisine de başvurularak d-q referans çerçevesine dönüştürülmesiyle gerçekleştirilir. Reaktif akım 0 değerinde tutulmak istendiği için şebeke akımı reaktif bileşeni (I_{q_s}), 0 değerli bir referans akımla ($I_{qref_s} = 0$) karşılaştırılır ve gerilimin aktif bileşeni V_{d_s} ve reaktif bileşeni V_{q_s} elde edilir. Bu bileşenler de bir ters park dönüşümü ile yine abc 3 fazlı eksen takımına (V_{abc_s}) dönüştürülür [88]. Oluşan bu üç fazlı şebeke gerilimine SDGM uygulanarak şebeke tarafı evirici kapı darbeleri üretilir.

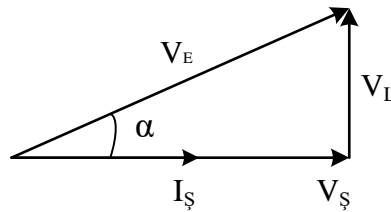
Şebeke bağlantılı evirici sistemlerinin görevi bara girişi tarafından alınan gücün şebekeye ulaştırılmasıdır. Ulaştırılma esnasında anahtarlama sebebiyle harmonikler oluşmakta, şebeke tarafındaki endüktanslar ile bu harmonikler filtrelenmekte ve daha net bir güç sağlanmaktadır. Bu endüktanslar ayrıca şebeke ile evirici arasında güç kontrolü yapılmasını mümkün kılmaktadırlar. Şebeke tarafında gerilimin frekansı ve genliği sabittir. Bu frekans ve gerilim şebekeden tayin edilir. Sistemin güç kontrolünü gerçekleştirebilmek için şebekeye ulaştırılan akım denetlenmelidir. Aşağıda şebeke sistem denklemleri verilmektedir.

$$V_E = V_L + V_S \quad (2.49)$$

$$V_E = J_s \cdot \omega_s \cdot L_s \cdot I_s + V_S \quad (2.50)$$

$$I_s = \frac{V_E - V_S}{J_s \cdot \omega_s \cdot L_s} \quad (2.51)$$

Burada ω_s , L_s , J_s gibi parametreler sabit, evirici gerilimi V_S bağımsız bir parametre gibi değerlendirilebilir. Burada evirici çıkış gerilimi vektörü V_E 'nin genlik ve fazı kontrol edilerek, şebekeye ulaştırılan akımın genlik ve fazı kontrol edilebilir [85]. Şekil 2.23'de sistemin çalışmasına dair bir fazör diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.23. Şebeke bağlantılı evirici fazör diyagramı.

V_E evirici çıkış gerilimi, V_S şebeke gerilimi, V_L endüktans gerilimi ve şebekeye

ulaştırılan I_s akımından oluşturulan fazör diyagram, güç faktörünün 1 değerini alacağı gibi ayarlanmıştır. Şebeke gerilimi ve evirici gerilimi arasındaki açı ile evirici çıkış gerilimi vektörünün genliği ayarlanarak, şebekeye sadece aktif gücün ulaştırılması sağlanabilir. Bu durumda şebekeye ulaştırılan akım ve şebeke gerilimi arasında faz farkı bulunmamalıdır. Bu durum aynı zamanda şebekeye reaktif güç iletilmesi istenmesi halinde evirici çıkış akımı ile şebeke gerilimi arasında faz farkı oluşturulabileceğine de işaret etmektedir [89].

Aktif (P) ve reaktif (Q) bileşenlerden şebeke görünür gücü elde edilmektedir.

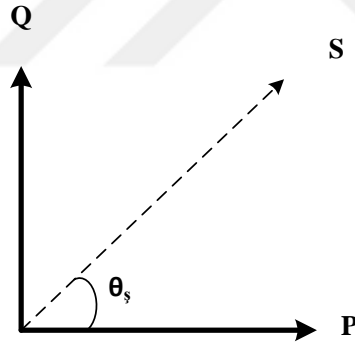
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.52)$$

$$S = V_s \cdot I_s \quad (2.53)$$

$$P = S \cdot \cos\theta_s \quad (2.54)$$

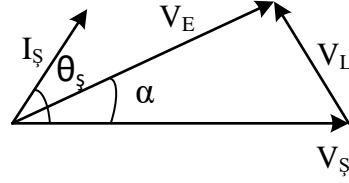
$$P = V_s \cdot I_s \cdot \cos\theta_s \quad (2.55)$$

$$\text{Güç faktörü} = \frac{P}{S} = \cos\theta_s \quad (2.56)$$



Şekil 2.24. Aktif, reaktif ve görünür güç ilişkisi.

Güç iletimi konusunda şebeke gerilimi ile şebeke akımı arasında 180° faz farkı oluşturulduğunda güç faktörü 1 değerini almış olur. Bu sayede aktif gücün değeri negatiftir, güç iletimi artık şebekeye doğru olmaktadır. Şebeke gerilimi ve şebekeye ulaştırılan akım arasında oluşan faz farkı açısı θ_s , şebeke tarafı eviricinin reaktif güç kompanzasyonu amacıyla kontrol edilebilir.



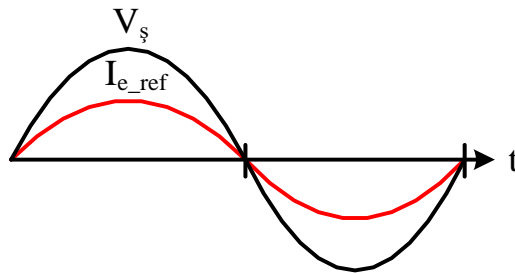
Şekil 2.25. $V_E < V_S$ iken evirici fazör diyagramı.

Şebekeye iletilen aktif güç durumunda evirici çıkış gerilimi vektör büyüklüğünün, şebeke gerilimi vektörü büyüklüğü ile mukayesesi oldukça önem arz etmektedir. Evirici çıkış gerilimi vektörünün şebeke gerilimi vektöründen daha küçük olması durumunda evirici çıkış akımı şebeke gerilimi ile aynı faza getirilemediği için güç faktörü 1 yapılamamaktadır. Bu durum Şekil 2.25'te gösterilen fazör diyagramla anlatılmaya çalışılmaktadır. Böylesi bir sorunla karşılaşmamak için evirici girişindeki DA bara gerilim genliği, şebeke gerilim genliğinden daha büyük değerde alınır. Eviricinin çıkış gerilimi değeri, referans dalganın taşıyıcı dalgaya oranı olarak bilinen modülasyon indeksinden dolayı DA bara gerilimine de paralel olarak farklılık gösterebilmektedir.

Eviricinin güç faktörü değerini 1 yapabileceği şekilde şebekeye güç ulaştırabilmesi için gereken minimum DA gerilimi Denklem (2.57)'ye göre bulunabilir.

$$V_{DA_min} = \frac{2 \cdot V_{s_maks.}}{m_{maks.}} \quad (2.57)$$

Denklemden evirici çıkış gerilimi vektörü genliğinin olabildiğince büyük tutulup, ihtiyaç duyulan V_{DA_min} değerinin olabildiğince küçük alınabileceği görülmektedir. Bunun için modülasyon indeksinin maksimum değeri $m_{maks.}$, olabildiğince 1 değerine yaklaştırılmalıdır. Şekil 2.26'da elde edilmek istenen referans evirici çıkış akımı ve bu akımın faz derecesini izlemesi istenen şebeke geriliminin sinyal formları örneklendirilmektedir.

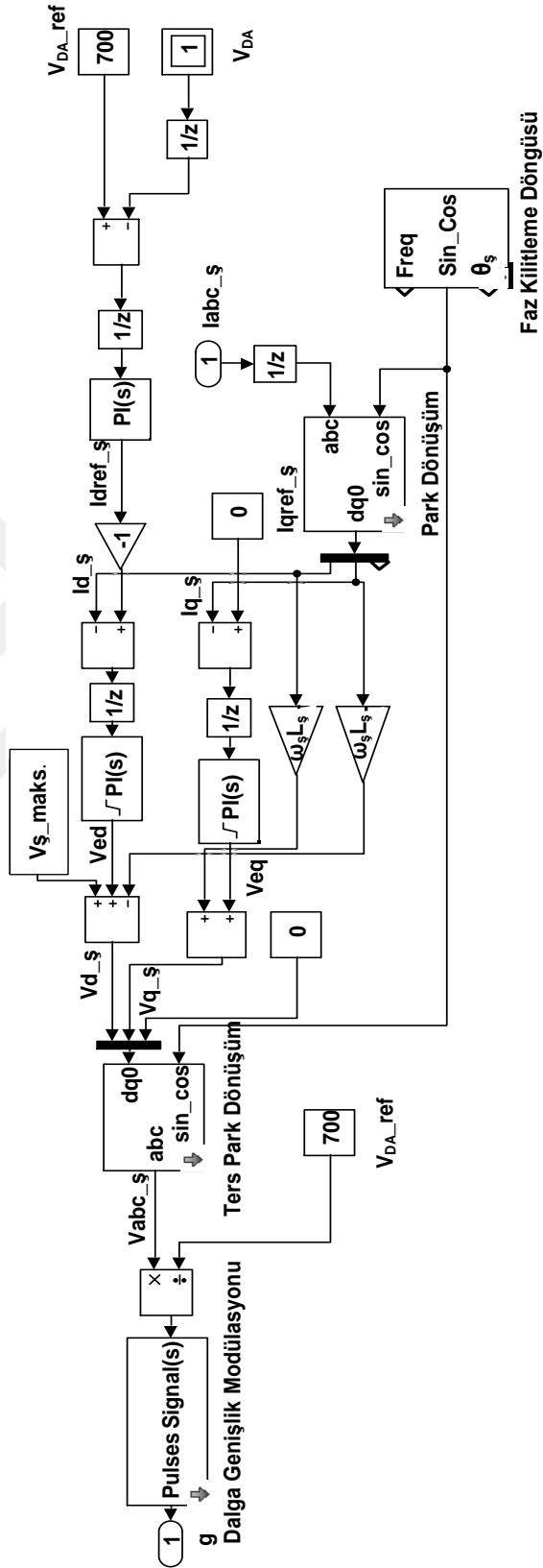


Şekil 2.26. Güç faktörünün 1 yapılabilmesi için evirici çıkış akımı referansı.

Evirici çıkış gerilimi bu referans akımı takip edeceğinden, bu işaretin düzgün bir şekilde üretilmesi sistemin verimi açısından oldukça önemlidir. Bu referans işaretlerini FKD

birimi gerçekleştirmektedir [85].

Aşağıda çalışmada kullanılan şebeke taraflı vektör kontrolü şekli görülmektedir.



şekil 2.27. şebekeye bağlı e

viricinin vektör kontrolü.

Aşağıdaki denklemler şebeke bağlantısının dinamik modelini göstermektedir. V_{d_s} ve V_{q_s} , şebeke gerilim bileşenleri; V_{ed} ve V_{eq} evirici gerilim bileşenleri; i_{d_s} , aktif güç üreten şebeke akım bileşeni; i_{q_s} , reaktif güç üreten şebeke akım bileşeni; L_s ve R_s , sırasıyla şebeke endüktans ve direncini, ω_s , şebeke açısal hızını temsil etmektedir [90].

$$V_{d_s} = V_{ed} - R_s i_{d_s} - L_s \frac{di_{d_s}}{dt} - \omega_s L_s i_{q_s} + V_{s_maks.} \quad (2.58)$$

$$V_{q_s} = V_{eq} - R_s i_{q_s} - L_s \frac{di_{q_s}}{dt} + \omega_s L_s i_{d_s} \quad (2.59)$$

Aktif ve reaktif güç ise aşağıdaki denklemler ile verilir.

$$P = \frac{3}{2} V_{d_s} i_{d_s} \quad (2.60)$$

$$Q = \frac{3}{2} V_{d_s} i_{q_s} \quad (2.61)$$

$$V_{s_maks.} = V_s * \sqrt{2} \quad (2.62)$$

3. MAKSİMUM GÜÇ İZLEMESİ

Türbin farklı hızlarda döndüğünde bu hızlardan maksimum verim alabilmek için bir MGİ algoritması ile generatörü optimum hız veya moment referansında çalıştırmak gerekir. Bunun için yapılan denetime MGİ tabanlı denetim denmektedir. MGİ sistemleri optimum rüzgâr hızında optimum generatör mekaniksel açısal hızını sağlayabilmelidir. Ayrıca herhangi bir rüzgâr hızında bu hıza özgü maksimum güç sağlanabilecek tek bir optimum mekaniksel açısal hız ile bu açısal hızda rüzgârdan maksimum verim de elde etmelidir. Bunun için değişen rüzgâr hızı ile maksimum gücü temin edebilecek optimum mekaniksel açısal hız kontrolünün sürekli yapılması gerekmektedir. Optimum mekaniksel açısal hız (ω_{r_opt}) değeri Denklem 2.21'deşöyle verilmiştir:

$$\omega_{r_opt} = \frac{\lambda_{opt} V}{R} \quad (3.1)$$

Rüzgâr enerjisi sistemlerinde enerji dönüşümünü en verimli şekilde gerçekleştirebilmek için sistem maksimum güç noktasında çalıştırılmalıdır. Uygun bir MGİ algoritması sistemi izleyip, onu maksimum güç noktasında çalıştıracak şekilde kontrol eder. Generatörün hız ve moment karakteristiği göz önüne alındığında, sistemden alınan güç bu iki bileşenin çarpımı ile belirlenir. Bu durumda MGİ algoritması generatör hızını en yüksek gücün alındığı noktada çalışacak şekilde ayarlamalıdır. MGİ, rüzgâr enerjisi sistemlerinde rüzgâr hızına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle MGİ algoritmaları bu değişimlere karşı sistemi sürekli olarak kontrol edecek şekilde tasarlanırlar. MGİ sisteme aktarılacak güce karar vermektedir. Örneğin rüzgâr hızının artması durumunda, generatör de hızlanacak ve eğer generatör hızı maksimum güç noktasını aşarsa, MGİ eviricinin şebekeye daha fazla güç aktarmasını sağlayacaktır. Böylece generatörden çekilen güç arttığı için türbin yavaşlayacak ve generatör hızı maksimum güç verebileceği hıza düşürülecektir. Rüzgâr hızının azalması durumunda ise generatör yavaşlayacak, eğer hız maksimum güç noktasındaki hızın altına düşerse, MGİ algoritması şebekeye aktarılan gücü azaltarak, türbinin hızlanmasını sağlayacak ve bu şekilde sistem maksimum güç noktasında tutulmaya çalışılacaktır.

Rüzgâr türbininden elde edilen mekaniksel güç türbin açısal hızına bölünerek, generatörün tahrik edilmesini sağlayan türbin mekaniksel moment bileşeni elde

edilmektedir, Denklem 3.2 ile gösterilmektedir.

$$T_m = \frac{P_t}{\omega_t} \quad (3.2)$$

Üretilen bu moment değeri generatör rotorunun mekaniksel olarak uyarılmasını sağlamaktadır. Generatörün anlık mekaniksel açısal hızının, referans alınan sabit değerli mekaniksel açısal hız değerine çekilmesiyle MGİ sağlanmış olur. Bazı sistemlerde rüzgâr türbini anlık açısal hızı bu sabit referans değerinin yerine kullanılabilir. Ancak bu durumda eğer sistemde dişli kutusu kullanılıyorsa rüzgâr türbini anlık açısal hızı önce dişli çevrim oranı ile çarpılmalı sonra ortaya çıkan değer referans olarak alınmalıdır. SMSG mekaniksel rotor açısal hızı, türbin açısal hızı ve dişli oranına bağlı olarak Denklem 3.3 ile verilir.

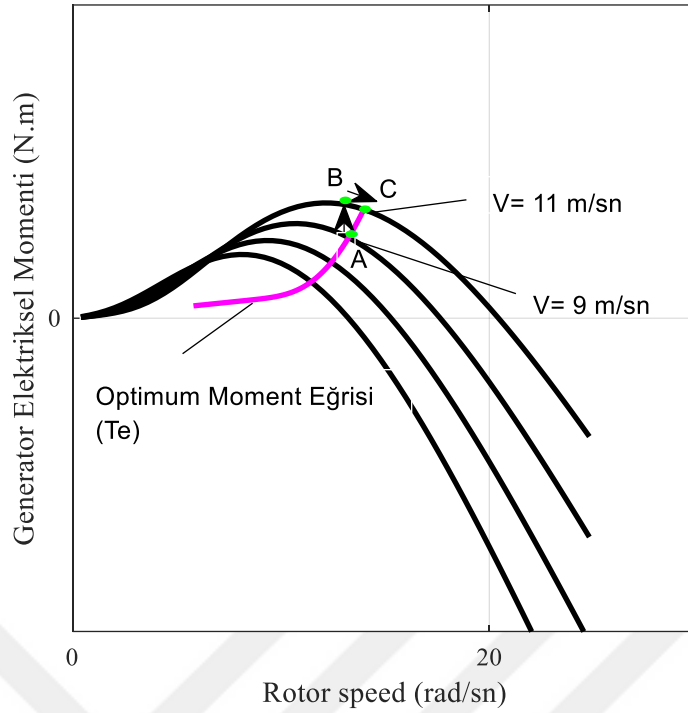
$$\omega_r = \omega_t G_r \quad (3.3)$$

Dişli kutusu kullanmayan sistemlerde G_r değeri 1 olarak alınır. Yani türbin açısal hızı, generatör mekaniksel açısal hızına eşittir. Bazı rüzgâr sistemlerinde MGİ, rüzgâr hız algılayıcısız olarak uygulanmaktadır. En iyi durum, generatör momenti optimum moment eğrisini izlediğinde elde edilir, bu nedenle generatör hızı generatör moment kontrolü vasıtasıyla yönetilir.

Tipik bir generatör için hareket denklemi aşağıdaki gibi verilir.

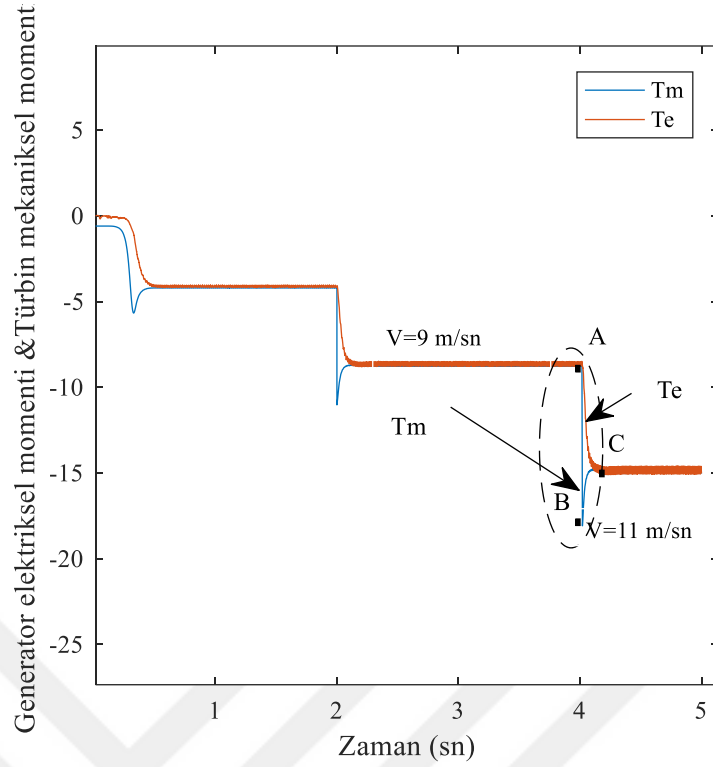
$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e - B\omega_r \quad (3.4)$$

Burada J , türbin ve generatör dahil olmak üzere tüm sistemin ataletidir (Kg/m^2), B sürtünme faktörüdür (N m s). Aşağıda farklı rüzgâr hızlarında generatör hızına karşı generatör ve türbin momenti görülmektedir.



Şekil 3.1. Maksimum güç izlemesi yöntemini sağlayan optimum moment eğrisi.

9 m/s rüzgâr hızında, generatörün moment T_e ve türbin moment T_m 'nin optimum çalışma noktasında (A noktası) karşılaştırılır. $T=2$ s'de rüzgâr hızı 11 m/s'ye değiştiğinde, T_m aniden değişir ve B noktasına geçer. Bununla birlikte, rotor hızındaki değişim, rotor ataletiyle engellenmektedir. Generatörün moment T_e , rotor hızı ile yönetildiğinden elektromanyetik moment biraz geciktirilir. Buna bağlı olarak $T_m - T_e$ moment farkı azalacağından generatör hızı artar. Yukarıdaki şekilde türbin moment değerlerinin optimum generatör moment eğrisine çekilerek MGI yapılması gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Maksimum güç noktası oluşumu.

Öte yandan türbin momentini generator hızının artmasıyla düşer, böylece Şekil 3.2'deki gibi T_m ve T_e sonunda C noktasında aynı değere ulaşır. Bu nokta, yeni rüzgâr hızındaki (11 m/s) maksimum güç noktasıdır [8],[85],[90]-[93].

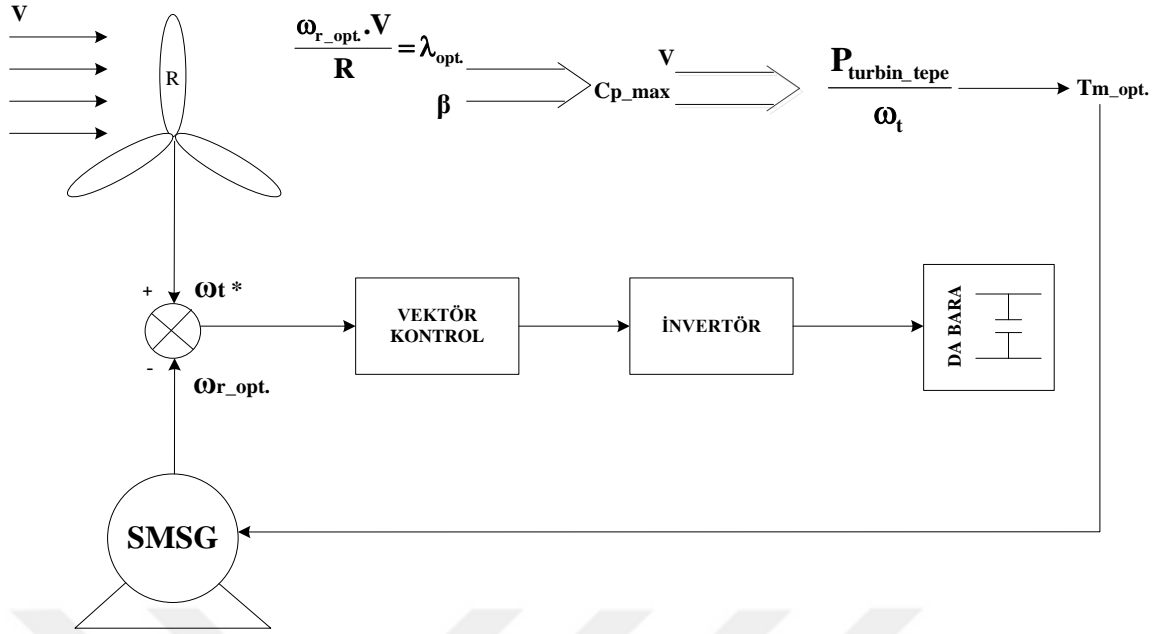
MGİ sağlayabilmek amaçlı generatörü optimum mekaniksel açısal hızda tutmanın yanı sıra, daha önce de bahsedildiği gibi Denklem (3.5) ile verilen lamda değerinin optimum ve Denklem (3.6) ile verilen güç katsayısının maksimum değeri taşıması gerektiği de unutulmamalıdır. Bu sayede Denklem (3.7) ile verilen türbin mekaniksel gücünün de maksimum değerini alması sağlanmalıdır.

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega_{r_opt} \cdot R}{V} \quad (3.5)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1(c_2/\lambda_i - c_3\beta - c_4)e^{-c_5/\lambda_i} + c_6\lambda \quad (3.6)$$

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A V^3 \quad (3.7)$$

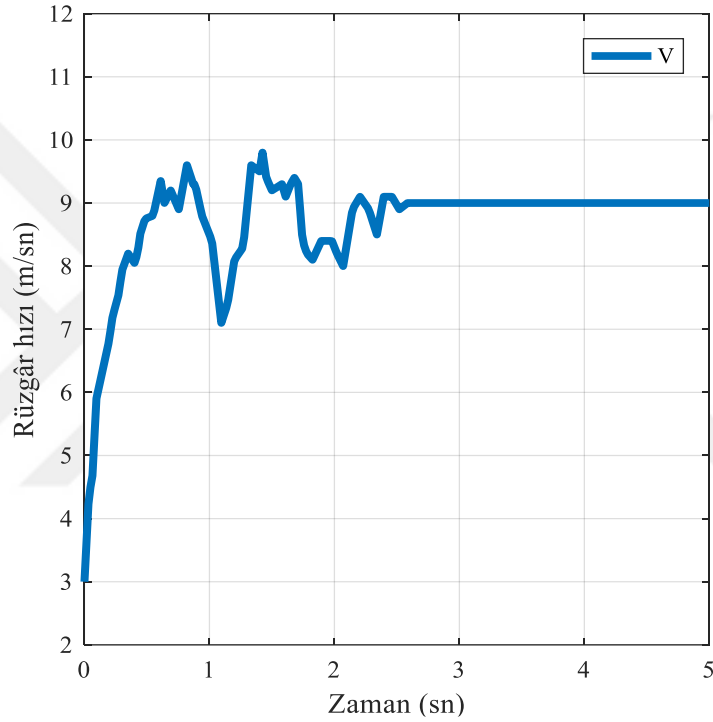
Aşağıda tez çalışmasında kullanılan MGİ algoritması verilmiştir.



Şekil 3.3. Maksimum güç izlemesi algoritması.

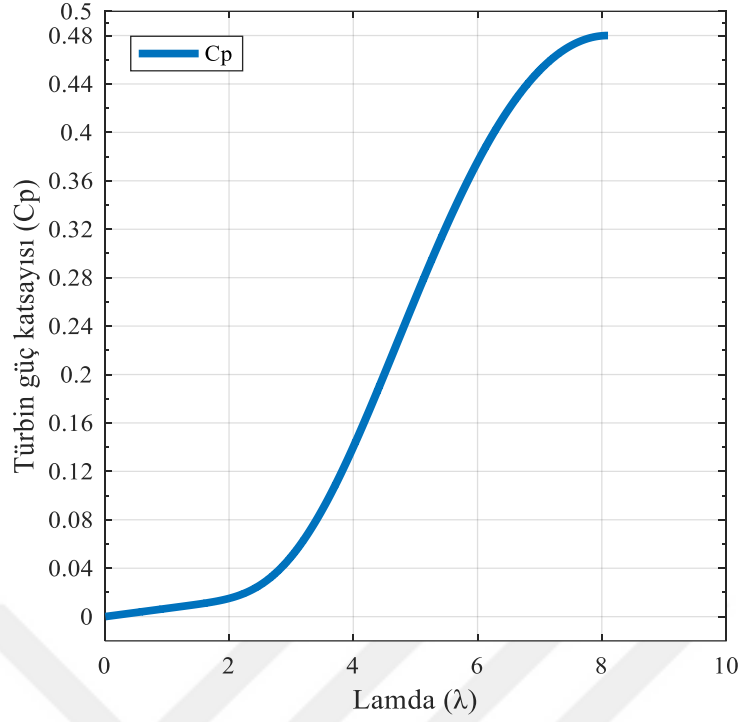
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Gerçekleştirilen benzetim çalışması ilk olarak değişken, daha sonra 9 m/sn sabit referans rüzgâr hızında incelenmiştir. Benzetim süresi 5 Sn olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.1’de 2.6 Sn’ye kadar değişken, bu süreden sonra benzetim çalışmasının sonuna kadar sabit alınan rüzgâr hızı görülmektedir.



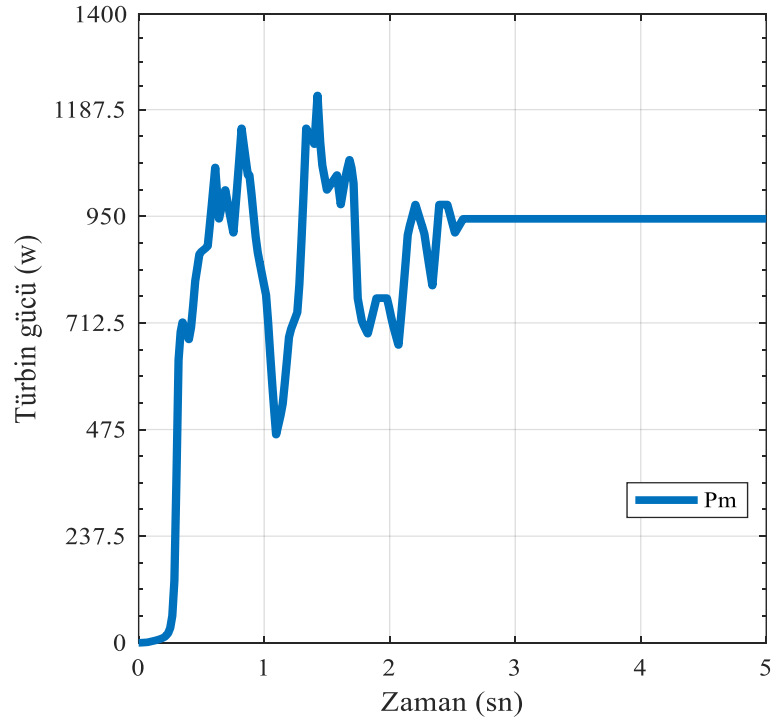
Şekil 4.1. Türbin referans rüzgâr hızı.

Rüzgâr hızı, 1.3 m rotor yarıçapı ve rotor anlık açısal hızı ile sabit lamda değerinden oluşturulmuştur. Çalışmada optimum lamda değeri $\lambda_{opt}=8.1$, kanat açısı $\beta=0^\circ$, türbin katsayı faktörleri $c_1=0.5176$, $c_2=116$, $c_3=0.4$, $c_4=5$, $c_5=21$, $c_6=0.0068$ olarak elde edilmiştir. Optimum lamda değeri ve 0 derecede tutulan kanat açısı (β) değeri ile maksimum türbin güç katsayısı ($C_{p_maks.}$) 0.48 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.2’de farklı lamda değerlerinde elde edilen türbin güç katsayısı değerleri görülmektedir.



Şekil 4.2. Lamda-Cp grafiği.

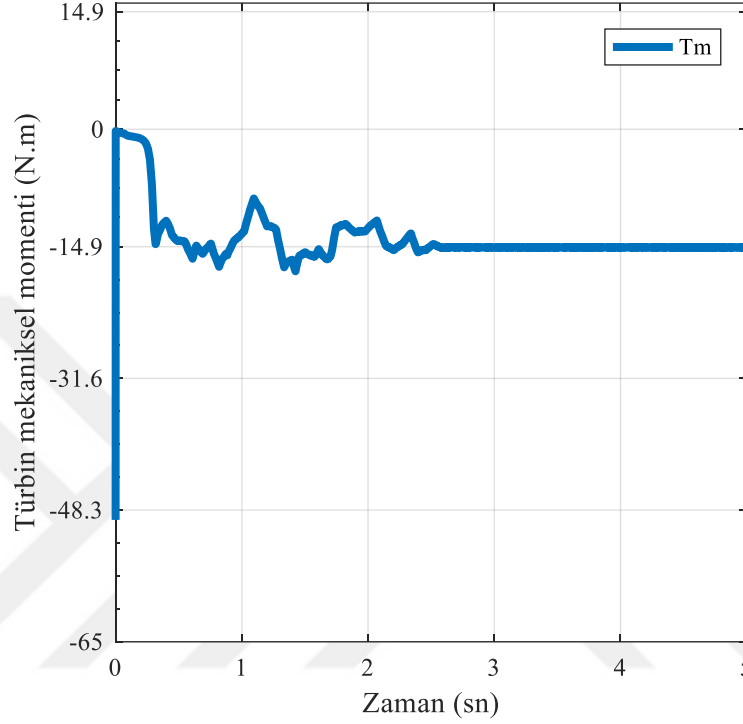
Optimum rüzgâr hızı ve maksimum türbin güç katsayısı ile maksimum türbin gücü (P_m) elde edilmiştir. Şekil 4.3'te değişken ve sabit alınan rüzgâr hız referanslarına göre oluşmuş türbin gücü değerleri görülmektedir.



Şekil 4.3. Rüzgâr türbini tarafından oluşturulan güç.

Türbin gücü 1.4 Sn'de tepe değerine ulaşmış, 2.6 Sn'de rüzgârın kararlı duruma

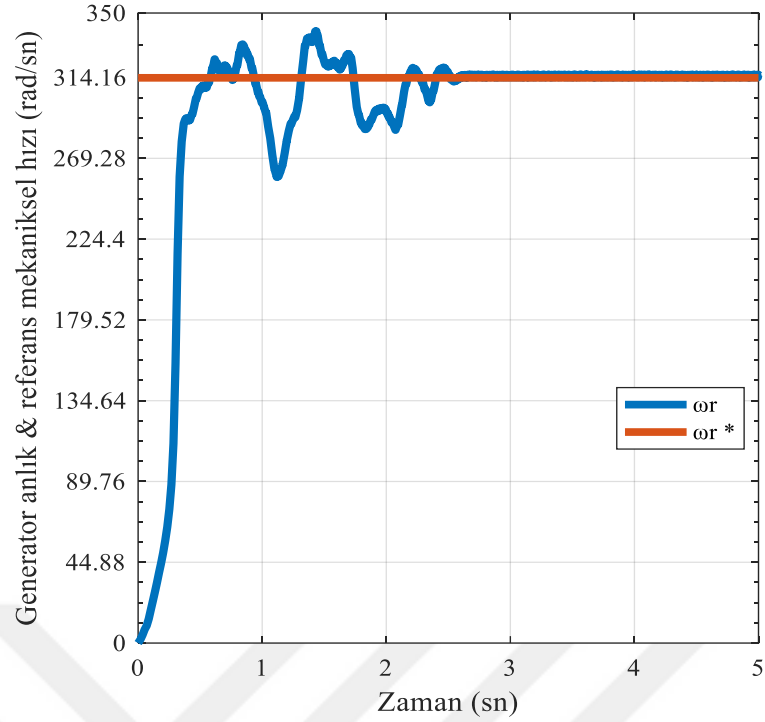
geçmesiyle kararlı halini almıştır. 9 m/sn rüzgâr hızında, optimum lamda ve maksimum türbin güç katsayısı ile türbin gücü maksimum 950 W olarak elde edilmiştir. Bu maksimum türbin gücü ve optimum türbin anlık açısal hızının yakalanması ile -14.9 N.m değerindeki optimum türbin momenti (T_m) elde edilmiştir. Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Rüzgâr türbini mekaniksel momenti.

Generatörün mekanik uyarılmasını sağlayan türbin mekaniksel momentinin optimum değerine ulaşmasıyla generatör mekaniksel açısal hızı (ω_r) da optimum değerini almıştır. Elde edilen bu anlık generatör mekaniksel açısal hızı, MGİ sağlayacak optimum elektriksel moment eğrisi değerlerini yakalayabilmek amacıyla 314 rad/sn referans açısal hızında tutulmaya çalışılmıştır.

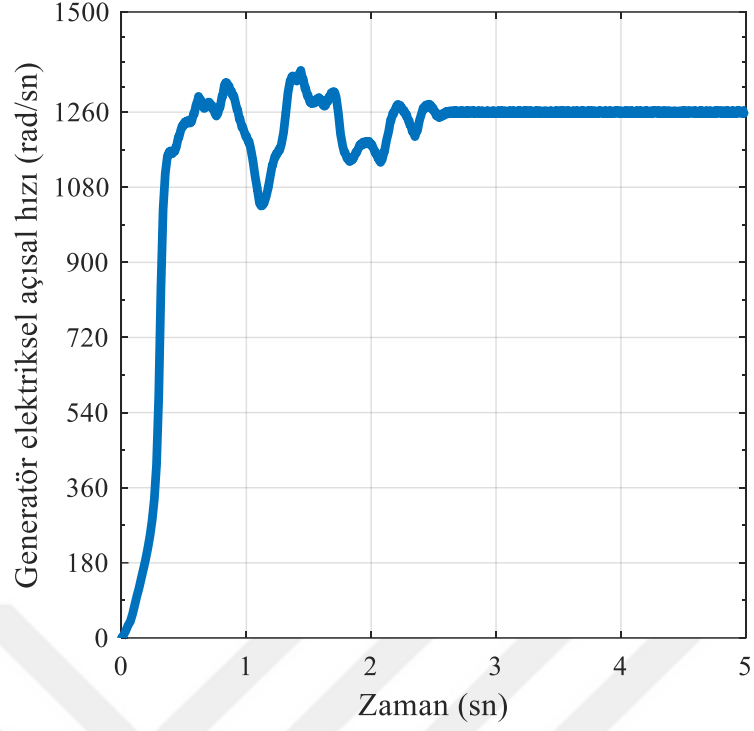
Şekil 4.5'te 314 rad/sn optimum referans değeri ve bu değeri yakalayan anlık açısal hız değeri görülmektedir.



Şekil 4.5. Rüzgâr türbini generatörü anlık & referans mekaniksel açısal hızı.

Anlık mekaniksel açısal hız değeri yine değişken hızlı rüzgâr sebebiyle önce değişken değerler almış, 1.4 Sn'de tepe değerine ulaşmıştır. Daha sonra rüzgârın optimum değerini almasıyla yine 2.6 Sn'de referans değer olan 314.16 rad/sn değerini yakalamış ve kararlı bir şekilde referans değerinde kalabilmiştir. Generatör tarafı FKD kullanılarak bu generatör mekaniksel açısal hızından generatör elektriksel açısal hızı (ω_e), rotor açısal konumunu veren rotor açısı θ_{gen} , park ve ters park dönüşümde kullanılan $\sin(\theta_{gen})$ ve $\cos(\theta_{gen})$ değerleri elde edilmiştir.

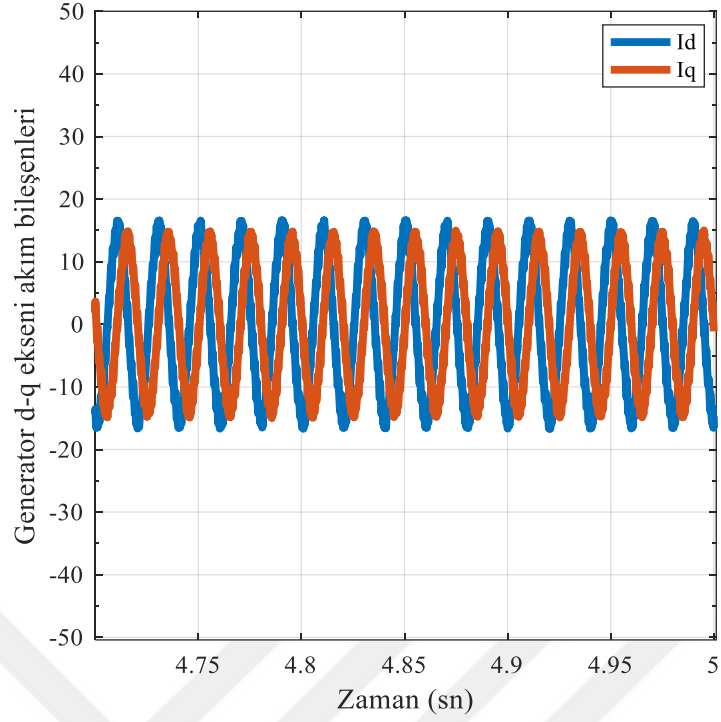
Şekil 4.6'da referans rüzgâr hızlarına göre elde edilen anlık generatör elektriksel açısal hız değerleri görülmektedir.



Şekil 4.6. Rüzgâr türbini elektriksel açısal hızı.

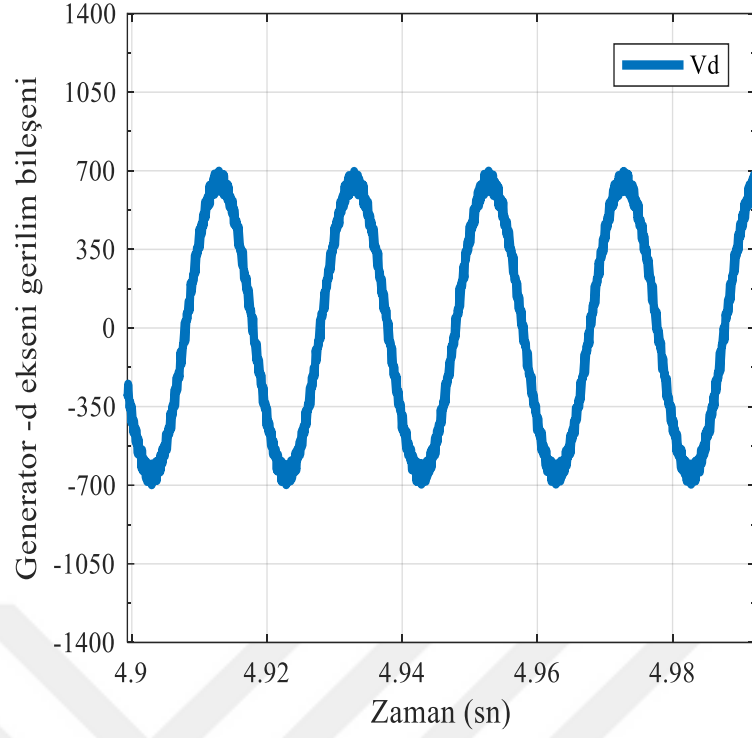
Generatör elektriksel açısal hız değeri de diğer parametre değerleri gibi rüzgâr hızına bağlı olarak değişmektedir. 1.4 Sn'deki tepe değerine ve 2.6 Sn'deki oturma zamanına yine bu grafikte de rastlanmaktadır. Sistemde optimum rüzgâr hızında generatör elektriksel açısal hız değeri 1260 rad/sn olarak elde edilmiştir.

Generatör akımı FKD bloğundan elde edilen $\sin(\theta_{gen})$ ve $\cos(\theta_{gen})$ değerleri ile park dönüşüm sağlanarak d-q düzleme geçilmiştir. Bu düzlemde Şekil 4.7'de gösterilen akı bileşeni I_d akımını ve moment bileşeni I_q akımını değerleri elde edilmiştir.

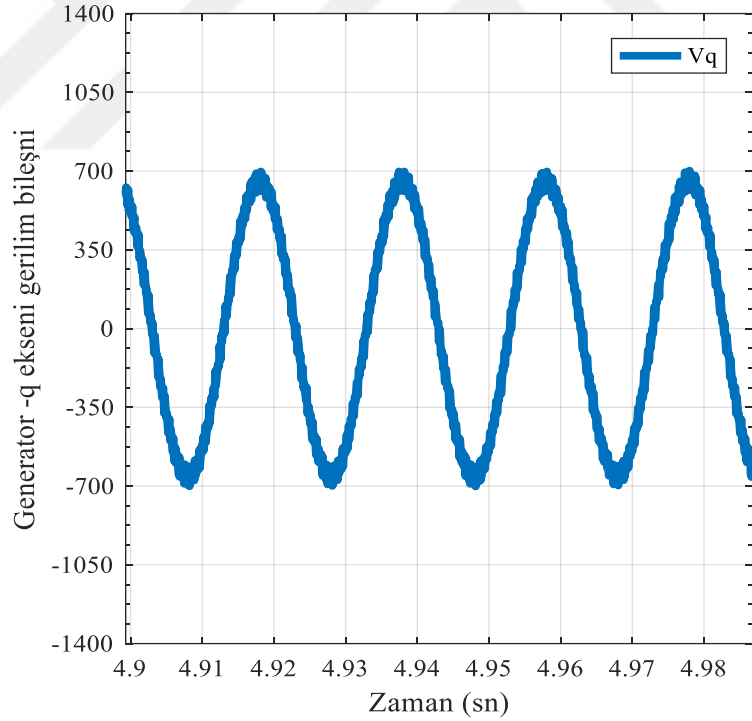


Şekil 4.7. Rüzgâr türbini generatörü akı ve moment bileşenleri.

Generatör tarafı kontrolünde aynı zamanda i_d reaktif güç akım bileşeni, i_q aktif güç akım bileşeni olmaktadır. Bu akım bileşenleri bir dizi çapraz kuplajlama ve ayrışım kontrolleri işlemlerinden sonra d-q eksenindeki gerilim bileşenlerine dönüşmektedir. V_d reaktif güç gerilimi ve V_q aktif güç gerilim bileşenini oluşturmuştur. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 bu gerilim bileşenlerinin değerlerini göstermektedir.



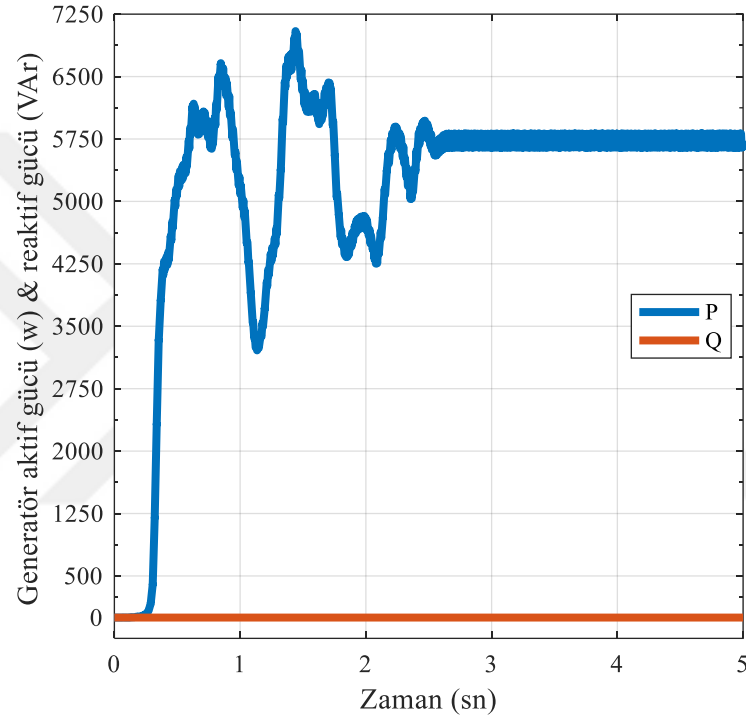
Şekil 4.8. Rüzgâr türbini generatörü reaktif güç gerilim bileşeni.



Şekil 4.9. Rüzgâr türbini generatörü aktif güç gerilim bileşeni.

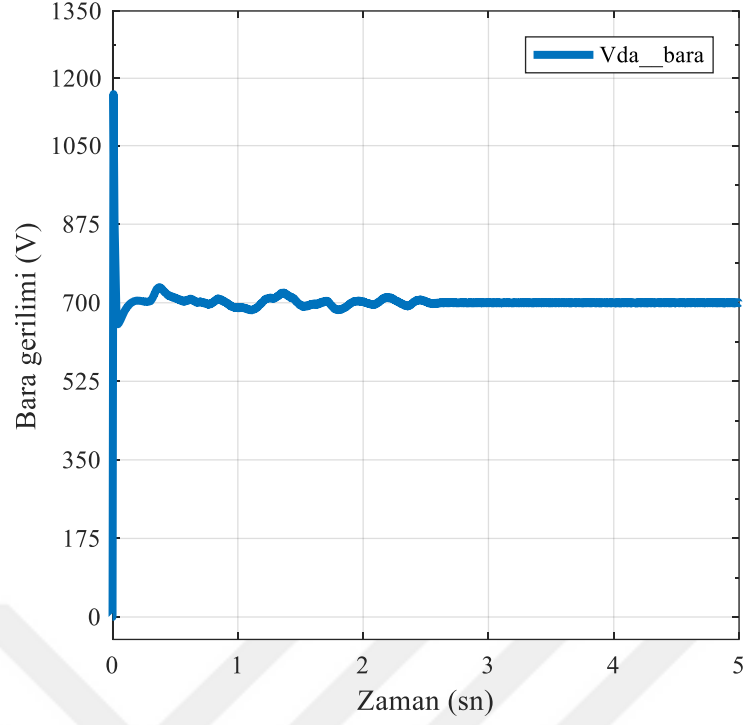
Oluşan bu gerilim bileşenleri ters park dönüşüm bloğunda yine $\sin(\theta_{gen})$ ve $\cos(\theta_{gen})$ trigonometrik değerleri ile abc düzlemine dönüştürülerek generatör tarafı 3 faz evirici anahtarlama gerilimi V_{abc} elde edilmiştir. Bu gerilim sabit referans değeri olarak alınan 700 V DA bara gerilimi ile birlikte evirici anahtarlama sinyallerini oluşturmak

için DGM bloğuna giriş olarak verilmiştir. DGM bloğunda taşıyıcı üçgen dalga sinyali ile karşılaştırılan sinüs şeklindeki evirici gerilim sinyalleri karşılaştırma sonucu elde edilen, kesişmiş sinyallerden oluşan anahtarlama kare sinyallerine dönüştürülmüş ve SDGM gerçekleştirilmiştir. Oluşan kare sinyaller evirici anahtarlama sırasında kullanılmıştır. Generatör tarafı eviricisi rüzgâr türbinin sağladığı elektriksel gücü DA bara aracılığıyla şebeke tarafına aktarmaktadır. Şekil 4.10’da generatör tarafı eviricisi ile sağlanan aktif ve reaktif güç değerleri gösterilmektedir. Bu çalışmada oluşması istenmediği için reaktif güç 0 VAR değerine ve aktif güç 5750 W değerine sahiptir.



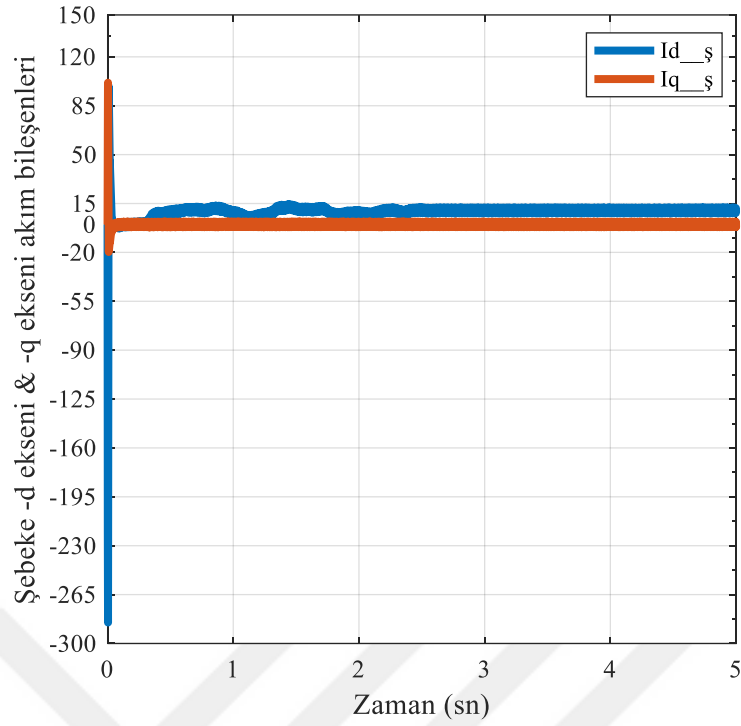
Şekil 4.10. Rüzgâr türbini generatör tarafı kontrolünde üretilen aktif ve reaktif güç.

Dalga genişlik modülasyonu konusunda anlatılan nedenlerden ötürü DA referans bara gerilim değeri 700 V olarak tercih edilmiştir. Şekil 4.11’de bu referans değeri yakalayan DA bara gerilim değeri görülmektedir.



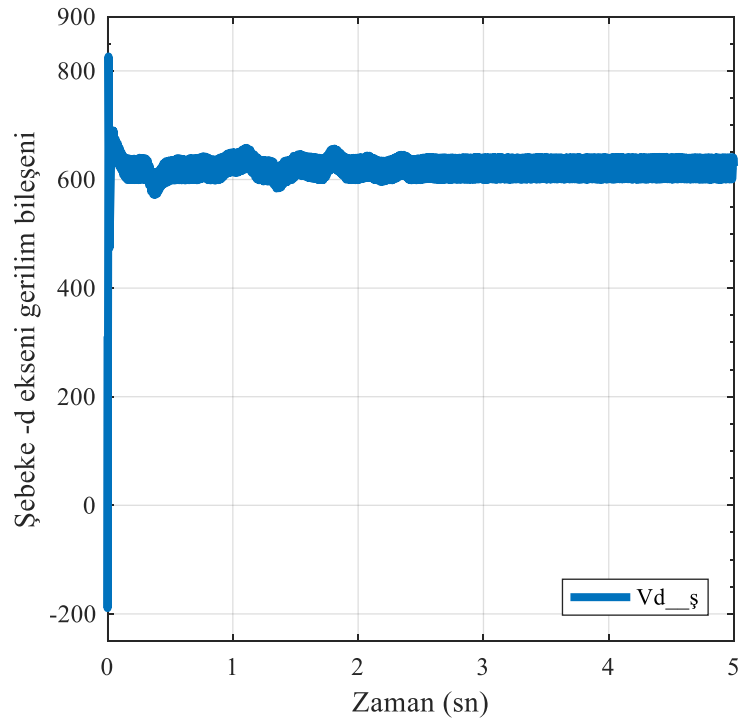
Şekil 4.11. DA bara gerilimi.

Bu gerilim şebeke tarafı eviricisi tarafından sabit tutulmaya çalışılmaktadır. Evirici anlık DA bara gerilimini 700 V sabit referans gerilim değerine çekmek istemektedir. Bu iki değer arasındaki hata PI bloğuna giriş olarak verilmekte, PI çıkışından şebeke tarafı referans aktif güç bileşeni I_{dref_s} elde edilmektedir. Evirici çıkış akımı I_{abc_s} ve FKD bloğundan sağlanan $\sin(\theta_s)$ ve $\cos(\theta_s)$ trigonometrik değerleriyle gerçekleştirilen park dönüşüm sonucunda, şebeke anlık aktif güç akım bileşeni I_{d_s} ve reaktif güç akım bileşeni I_{q_s} elde edilmektedir. Şekil 4.12’de bu akım bileşenlerinin aldığı değerler gösterilmektedir. Reaktif güç oluşması istenmediği için reaktif güç akım bileşeninin ‘0’ değerinde tutulabildiği açıktır.



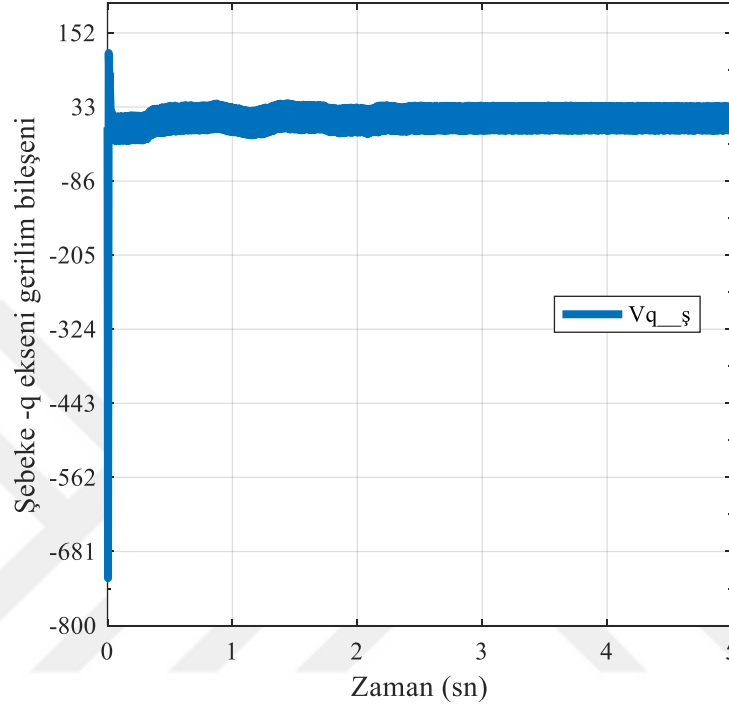
Şekil 4.12. Şebeke aktif ve reaktif güç akım bileşenleri.

Anlık aktif güç bileşeni $I_{d_ş}$ değeri ile referans $I_{dref_ş}$ değerinin karşılaştırılmasından oluşan hata değeri yine diğer bir PI bloğuna sokularak çapraz kuplaj ve ayrışım kontrolleri ile şebeke aktif güç gerilim bileşeni $V_{d_ş}$ oluşturulmuştur. Şekil 4.13'te bu aktif güç gerilim bileşeni değeri gösterilmektedir.



Şekil 4.13. Şebeke-d eksenli aktif güç gerilim bileşeni.

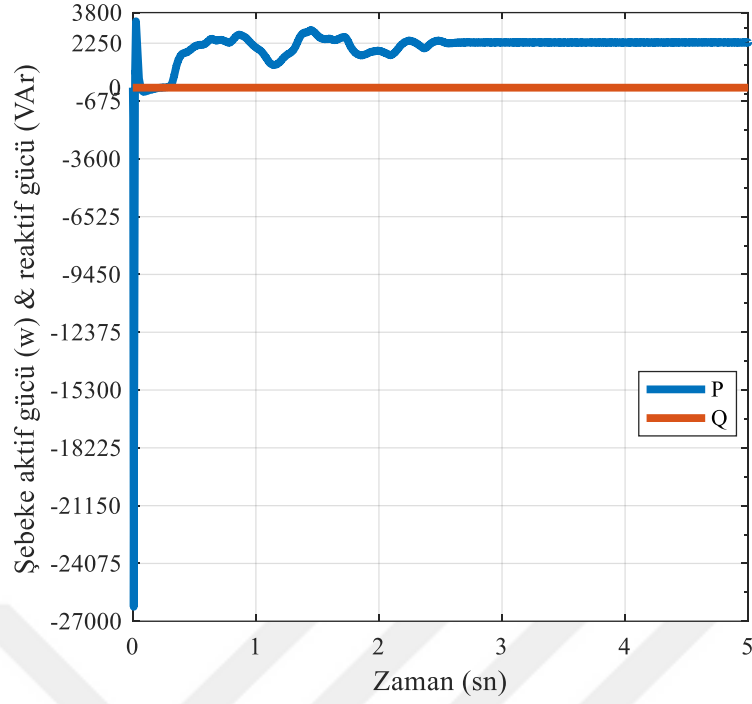
Anlık reaktif güç akımı I_{q_s} ve referans reaktif güç akımı I_{qref_s} karşılaştırmasında oluşan hata değeri PI bloğunun girişine verilmiş, bu kontrolün çıkışından $-q$ ekseni evirici gerilim bileşeni V_{eq} değeri sağlanmıştır. Bu V_{eq} değeri de çapraz kuplaj ve ayrışım kontrolü ile şebeke reaktif güç gerilim bileşeni V_{q_s} değerini oluşturmaktadır. Şekil 4.14’de bu reaktif güç gerilim bileşeni değeri görülmektedir.



Şekil 4.14. Şebeke -q ekseni reaktif güç gerilim bileşeni.

V_{q_s} ve V_{d_s} değerleri ile FKD bloğundan sağlanan $\sin(\theta_s)$ ve $\cos(\theta_s)$ trigonometrik değerleri, ters park dönüşüm bloğunda V_{abc_s} şebeke tarafı evirici anahtarlama gerilimini oluşturmaktadır. Bu gerilim değeri de generatör tarafı kontrolünde olduğu gibi referans 700 V DA bara gerilimi ile birlikte SDGM oluşturmak için DGM bloğuna giriş olarak verilmiştir. SDGM yöntemi generatör tarafı kontrolü ile aynı olarak sağlanmıştır. SDGM sonucu oluşan kare sinyaller evirici anahtarlamasında kullanılmıştır. Şebeke tarafı eviricisi ile aktif ve reaktif güç kontrolü sağlanmıştır.

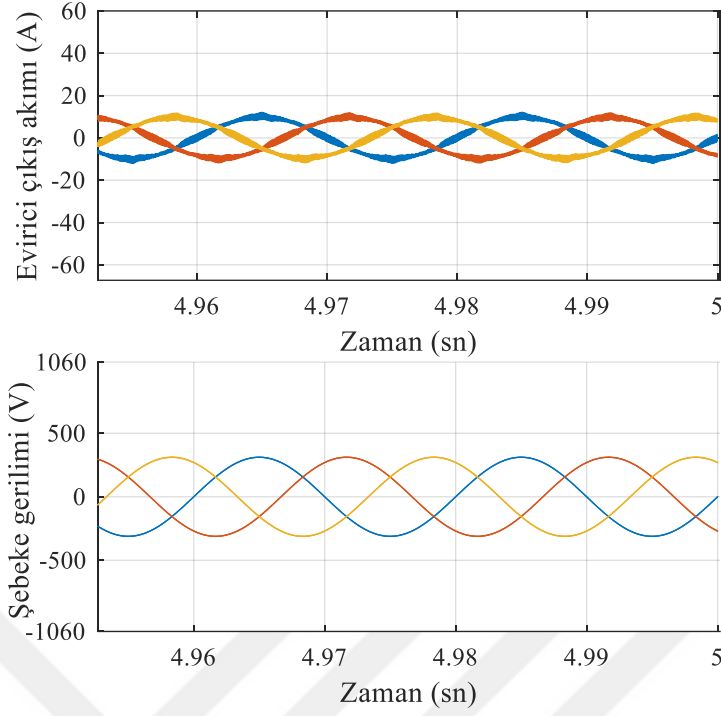
Şekil 4.15’te şebeke tarafı evirici kontrolünden sağlanan aktif ve reaktif güç değerleri gösterilmektedir. Yine şebeke tarafı kontrolde de oluşması istenmediği için reaktif güç 0 VAR değerine sahiptir ve aktif güç 2250 W olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.15.Şebeke tarafı kontrolünde üretilen aktif ve reaktif güç.

Şebeke tarafı eviricisinin aktif ve reaktif güç kontrolünün haricinde bir diğer görevi de generatörün ürettiği değişken genlik ve frekanstaki akım ve gerilim değerlerini, sabit genlik ve frekans değerlerine sahip şebekeye uygun hale getirmektir. Bu da şebeke eviricisi çıkış akımının şebeke gerilimi ile aynı faza getirilmesi ile sağlanmaktadır. Şebeke tarafı FKD bloğu şebeke geriliminin faz ve frekans değerleri ile konum açısı θ_s değerini oluşturmakta, sonrasında evirici çıkış akımı da konumunu bu değere göre ayarlamaktadır. Bu şekilde düzenlenen evirici çıkış akımı referans görevi görüp evirici çıkış gerilimi fazını kendi fazına getirmektedir. Böylece evirici çıkış gerilimi fazı şebeke gerilimi ile aynı faza getirilmiş, şebeke sabit genlik ve frekans değerleri yakalanmıştır.

Şekil 4.16'da evirici çıkış akımı ve onun fazını referans alan şebeke gerilimi görülmektedir.



Şekil 4.16. Aynı fazdaki şebeke eviricisi çıkış akımı & Şebeke gerilimi.

Aşağıdaki çizelgelerde ise tez çalışmasında tercih edilen sistem parametre değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Rüzgâr türbini parametreleri.

Nominal rüzgâr hızı:	9 m/sn
Kanat uzunluğu:	1.3 m
Nominal kanat uç hız oranı:	8.1
Maksimum güç katsayısı:	0.48
Güç katsayısı karakteristikleri:	$c_1= 0.5176, c_2= 116, c_3= 0.4, c_4=5,$ $c_5= 21, c_6= 0.0068,$

Çizelge 4.2. Sürekli mıknatıslı senkron generatör parametreleri.

Stator rezistansı:	0.22 Ohm
Stator endüktansı ($L_d=L_q$):	0.003 H
Mıknatıs akısı:	0.17867 V.s
Kutup çifti sayısı:	5

Çizelge 4.3. DA bara ve Şebeke parametreleri.

Bara gerilimi:	700 V
Bara kapasitansı:	1000e-6 F
Şebeke frekansı:	50 Hz
Şebeke endüktansı:	2.5e-3 H

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Disiplinler Arası Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'na bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada deneysel ve belgesel araştırma türlerinden yararlanılmıştır. Belgesel tarama yöntemi ile ön literatür taraması yapılmış, üzerinde çalışılmak istenen konu hakkında doküman veri toplama aracı ile veri toplanmıştır. Toplanan veriler analiz edilerek çalışmaya dair bilgiler elde edilmiştir. Elde edilen bu bilgiler çalışmaya aktarılmış, yapay canlandırma deney yöntemine başvurularak MATLAB/Simulink benzetim aracı ile görsel olarak tasarlanmıştır. Sistem değişken değerleri girilmiş ve bu değerlerin istenilen sistem sonucuna ulaşılıncaya kadar gözlenip gerektiğinde değiştirilmesiyle istenilen başarı sağlanmıştır. Çalışma evreni olarak şebeke bağlantılı SMSG'li yatay eksenli rüzgâr türbinlerinden elektrik enerjisi üretimi seçilmiştir. Örnekleme yöntemi olarak bir grup, demet, küme vb. topluluğun örnekleme birimi olarak ele alındığı yöntem olan küme örnekleme yöntemi kullanılmış, bu yöntem gereği evren kümelere ayrılmıştır. Bu kümelere de çalışmamızda kullandığımız şebeke bağlantılı SMSG'li üç kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbinlerinden elektrik enerjisi üretimi seçilmiş, örneklem olarak belirlenmiştir. Çalışmada bir sistem bileşeninin özelliği bir diğer sistem bileşenini etkilediği için, bir özelliğin değiştirilmesi durumunda diğer sistem bileşenlerinin özellik ve değerlerinin değiştirilmesi gerektiği zorluğuyla karşılaşmıştır. Bu sorunları aşmak için sistemden istenilen çıktı değerleri elde edilinceye kadar, sistem defalarca kez yeni baştan kurulmuştur. Literatürdeki kaynaklarda sisteme uygun rüzgâr türbinleri araştırılmış, ancak uygun parametrelere ulaşılamamıştır. Sonuç olarak sisteme uygun yeni bir rüzgâr türbini tasarlama zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Tüm bu zorluklar başarıyla çözümlenerek sistem başarılı bir şekilde ortaya konulmuştur.

Sistemde rüzgâr türbininden elde edilen elektriksel gücün tam ölçek dönüşümlü eviriciler ile şebekeye aktarılması amaçlanmıştır. Bu eviricilerde sistem performansından maksimum verim elde edebilmek için hem generatör tarafına hem de şebeke tarafına vektör kontrol yöntemi uygulanmıştır. Sistemin daha etkili bir şekilde kontrol edilebilmesi ve harmonik etkilerinin azaltılabilmesi amacıyla vektör kontrolüne

çapraz kuplaj ve ayrışım kontrolleri eklenmiştir. Vektör kontrolünün haricinde yine sistemden maksimum düzeyde verim alabilmek amacıyla sisteme bir de MGİ yöntemi uygulanmış ve bu yöntemden de hedeflenen verim elde edilebilmiştir. Bu kontrol ve yöntem ile generatörden elde edilen gücün bir kısmı sistem iç kaybı olarak harlandıktan sonra geriye kalan elektriksel güç şebekeye aktarılmıştır.

Yukarıda da bahsedildiği gibi çalışmada rüzgâr türbinin ürettiği güç sadece şebekeye iletebilmektedir. Gelecek çalışmalarda sisteme üretilen elektrik enerjisini depolama cihazları, otonom tüketici sistemleri vb. eklenmesi, bu şekilde çalışmanın geliştirilmesi beklenmektedir. Çalışmanın bu tür konularda baz alınabileceği, literatüre ışık tutabilen faydalı, temel bir kaynak olabileceği öngörülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- [1] B.Çakır, E.Helvacı, “Rüzgâr türbini kanat tasarımı ve analizi,” Bitirme tezi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2016.
- [2] Anonim, (20 Kasım 2016). [Online]. Erişim: https://tr.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCzg%C3%A2r_g%C3%BCc%C3%BC.
- [3] S.Latreche, M.Khemliche and M.Mostefai, “Design of the MPPT in PV System Based on PIC18F4550 Microcontroller,” *2ème conférence Internationale des énergies renouvelables*, CIER, Tunisia, 2014.
- [4] D.Verma, S.Nema, A.M.Shandilya and S.K.Dash, “Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp.1018-1034, 2016.
- [5] B.Avcı ve T.B.Yılmaz, “ Rüzgâr türbini kanat tasarımı ve analizi,” Bitirme Projesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2012.
- [6] N.Huang, “Simulation of power control of a wind turbine permanent magnet synchronous generator system,” M.s.thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Marquette University, Wisconsin, ABD, 2013.
- [7] J.C.U.Peña, M.A.G.Brito, G.A.Melo and C.A.Canessin, “A comparative study of MPPT strategies and a novel single phase integrated buck-boost inverter for small wind energy conversion systems,” *Power Electronics Conference*, Brazilian, 2011, pp.458-465.
- [8] E.K.Yaylacı ve İ.Yazıcı, “Rüzgâr Enerji Sistemlerinde Kullanılan Maksimum Güç Noktası Takibi Yöntemleri,” *EEB 2016 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, Tokat, 2016, s.115-119.
- [9] R.Rawat and S.Chandel, “Review of Maximum-Power-Point Tracking Techniques for Solar-Photovoltaic Systems,” *Energy Technology*, vol.1, no.8., pp. 458-465, 2013.
- [10] H.S.A.Ibrahim, F.F.Houssiny, H.M.Z.El-Din and M.A.El-Shibini, “Microcomputer Controlled Buck Regulator for Maximum Power Point Tracker for Dc Pumping System Operates from Photovoltaic System,” *IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings*, Seoul, Korea, 1999, pp. 406-411.
- [11] Y.Nagao, K.Fukae and N.Takehara, “Voltage control apparatus and method for power supply” Japan. Patent5 892 354, Apr. 6, 1999.
- [12] T.Noguchi, S.Togashi, and R.Nakamoto, “Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system,” *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 217-223, 2002.

- [13] M.A.Vitorino, L.V.Hartmann, A.M.N.Lima and M.B.R.Corrêa, "Using the model of the solar cell for determining the maximum power point of photovoltaic systems," *Power Electronics and Applications 2007 European Conference*, Aalborg, Denmark, 2007.
- [14] Y.Lin, L.Tu, H.Liu and W.Li, "Hybrid Power Transmission Technology in a Wind Turbine Generation System," *IEEE /Asme Transactions On Mechatronics*, vol. 20, no. 3, pp. 1218-1225, 2015.
- [15] J.S.Thongam and M.Ouhrouche, (2011, July 5). [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advanced-topics-in-wind-power/mppt-control-methods-in-wind-energy-conversion-systems>.
- [16] Y.Xia, K.H.Ahmed and B.W.Williams, "Wind Turbine Power Coefficient Analysis of a New Maximum Power Point Tracking Technique," *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, vol.60, no.3, pp.1122-1132, 2013.
- [17] K.N.Yu and C.K, "Liao,Applying novel fractional order incremental conductance algorithm to design and study the maximum power tracking of small wind power," *Journal of Applied Research and Technology*, vol.13, pp.238-244, 2015.
- [18] W.Zhao, Y.M.Weï and Z.Su,"One day ahead wind speed forecasting: A resampling-based approach," *Applied Energy*, vol. 178, pp. 886-901, 2016.
- [19] M.G.Simoes,B.K.Boseand R.J.Spiegel, "Fuzzy Logic Based Intelligent Control of a Variable Speed Cage Machine Wind Generation System," *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol.12, no.1, 1997.
- [20] N.Kariniotakis, G.S.Stavarakakis and E.F.Nogaret, "Wind Power Forecasting Using Advanced Neural Networks Models," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.11, no.4, pp.762-767, 1996.
- [21] G.S.Piperagkas, A.G.Anastasiadis and N.D.Hatziargyriou,"Stochastic PSO-based heat and power dispatch under environmental constraints incorporating CHP and wind power units," *Electric Power Systems Research*, vol.81, pp. 209–218, 2011.
- [22] H.M.I.Pousinho,V.M.F.Mendes and J.P.S.Catalão, "A hybrid PSO–ANFIS approach for short-term wind power prediction in Portugal,"*Energy Conversion and Management*, vol.52, pp. 397-402, 2011.
- [23] J.W.Kimball and P.T.Krein, "Discrete Time Ripple Correlation Control for Maximum Power Point Tracking," *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol.23, no.5, pp.2353-2362, 2008.
- [24] T.Hawkins, "Maximization of power capture in wind turbines using robust estimation and lyapunov extremum seeking control," M.s. thesis, Department of Mechanical Engineering, Kansas State University, U.S., 2007.
- [25] J.H.Park, J.Y.Ahn, B.H. Cho, and G.J. Yu, "Dual-Module-Based Maximum Power Point Tracking Control of Photovoltaic Systems," *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1036-1047, 2006.
- [26] G.H.Riahy and M.Abedi, "Short term wind speed forecasting for wind turbine applications using linear prediction method," *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 35–41, 2008.

- [27] C.M.Hong, F.S.Cheng and C.H.Chen, "Optimal Control for Variable-Speed Wind Generation Systems Using General Regression Neural Network," *Electrical Power and Energy Systems*, vol.60, pp.14–23, 2014.
- [28] S.Dhanalakshmi, A.A.Nisha and B.J.Poornima, "Beta-fuzzy Optimization of Coupled Sepic for Solar and Wind Hybrid System," *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, no.10, pp. 211-219. 2015.
- [29] A.Öztürk, S.Tosun, S.Alkan, E.Avci and R.Bilir, "Speed Control of Wind Turbine Rotor Using Genetic Algorithm," *9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Duzce, Turkey, 2015, pp.822-826.
- [30] H.Yokoyama, F.Tatsuta and S.Nishikata, "Tip Speed Ratio Control of Wind Turbine Generating System Connected in Series," *2011 International Conference*, Tokyo, Japan, 2011.
- [31] S. M.Barakati, "Modeling and controller design of a wind energy conversion system including a matrix converter," Ph.D dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2008.
- [32] W.Kemmetmüller, D.Faustner and A.Kugi, "Optimal torque control of permanent magnet synchronous machines using magnetic equivalent circuits," *Mechatronics*, vol.32, pp.22-33, 2015.
- [33] Y.Zhang and H.Yang, "Model Predictive Torque Control of Induction Motor Drives with Optimal Duty Cycle Control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.29, no.12, pp.6593-6603, 2014.
- [34] J.Azevedo and F.Mendonça, "Small scale wind energy harvesting with maximum power tracking," *AIMS Energy*, vol.3, no.3, pp.297-315, 2015.
- [35] P.Acharya, "Small scale maximum power point tracking power converter for developing country application," M.S thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2013.
- [36] M.Bezza, B.E.Moussaoui and A.Fakkar, "Sensorless MPPT fuzzy controller for DFIG wind turbine," *Energy Procedia*, vol.18, pp.339–348, 2012.
- [37] O.Elbeji, M.B.Hamed and L.Sbita, "PMSG Wind Energy Conversion System: Modeling and Control," *Scientific Research*, vol.3, pp.88-97, 2014.
- [38] M.Pucci and M.Cirrincione, "Neural MPPT Control of Wind Generators with Induction Machines without Speed Sensors," *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, vol.58, no. 1, pp.37-47, 2011.
- [39] A.Yasin, G.Napoli, M.Ferraro and V.Antonucci, "Modelling and Control of a Residential Wind/PV/Battery Hybrid Power System with Performance Analysis," *Journal of Applied Sciences*, vol.11, no.22, pp.3663-3676, 2011.
- [40] A.Soetedjo, A.Lomi and W.P.Mulayanto, "Modeling of Wind Energy System with MPPT Control," *2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, Bandung, Indonesia, 2011, pp.17-19.
- [41] K.R.Dubal and D.S.Chavan, "Maximum Power Point Tracking System for Wind Generator Using MATLAB.," *International Journal Of Engineering And Computer Science*, vol.4, no.1, pp.10043-10050, 2015.

- [42] R.Kotti and W.Shireen, "Maximum Power Point Tracking of a Variable Speed SMSG Wind Power System with Dc Link Reduction Technique," *2014 IEEE PES General Meeting*, National Harbor, USA, 2014.
- [43] N.S.Jayalakshmi and D.N.Gaonkar, "Maximum Power Point Tracking for Grid Integrated Variable Speed Wind based Distributed Generation System with Dynamic Load," *International Journal Of Renewable Energy Research*, vol.4, no.2, pp.464-470, 2014.
- [44] D.Sahu, "Maximum Power Extraction for Direct Driven Variable Speed Wind Turbine System Using PMSG and Fixed Pitch Angle," *2013 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials*, Uttar Pradesh, Allahabad, 2103.
- [45] K.R.Dubal, D.S.Chavan, "Hill Climbs Searching Method for Wind Generator of Maximum Power Point Tracking System" *International Journal of Advanced Engineering Research and Technology*, vol. 2, no. 7, pp.257-264, 2014.
- [46] S.N.Thanh, H.H.Xuan, C.N.The, P.P.Hung, T.P.Van, "Fuzzy Logic Based Maximum Power Point Tracking Technique For a Stand-Along Wind Energy System," *2016 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*, Vietnam, 2016, pp.320-325.
- [47] A.Venkatarama, A.I.Maswood, S.N.Rahman and H.P.Gabriel, "A Novel Maximum Power Point Tracking Algorithm for a Stand-Along Unity Power Factor Wind Energy Conversion System," *International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, Madrid, Spain, 2013, pp.109-114.
- [48] Y.Xia, K.H.Ahmed and B.W.Williams, "A New Maximum Power Point Tracking Technique for Permanent Magnet Synchronous Generator Based Wind Energy Conversion System," *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol.26, no.12, pp. 3609-3620, 2011.
- [49] Y.Y.Hong, S.D.Lu and C.S.Chiou, "MPPT for PM wind generator using gradient approximation," *Energy Conversion and Management*, vol.50, pp.82-89, 2008.
- [50] M.Zhang, "Maksimum power point tracking control of the permanent magnet synchronous generator based wind turbine," M.S. thesis, Electrical Engineering and Electronic Department, University of Liverpool, Australia, 2012.
- [51] Ç.Cengiz, "Slatlı Kanat Profilinin Etrafındaki Düşük Reynolds Sayılı Hava ve Su Akışlarının İncelenmesi ve Aerodinamik Performans Analizleri," Yüksek lisans tezi, Enerji Mühendisliği Bölümü, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.
- [52] Anonim, (12 Aralık 2016). [Online]. Erişim: https://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_number.
- [53] N.Alkan. (2015, 23 Mart). [Online]. Erişim:<https://www.slideshare.net/NaciKalkan1/boyutsuz-sayilar-ve-fiziksel-anlamlar>.
- [54] Anonim, (16 Aralık 2016). [Online]. Erişim: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Akmazl%C4%B1k>.

- [55] F.E.Weick, R.Sanders, "Wind-Tunnel Tests on Combinations of a Wing With Fixed Auxiliary Aerofoils Having Various Chords and Profiles," United State, Rap. NACA-TR-472, Jan.01.1934.
- [56] M.Ragheb and A.M.Ragheb, (2011, July 5). [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advanced-topics-in-wind-power/wind-turbines-theory-the-betz-equation-and-optimal-rotor-tip-speed-ratio#article-front>.
- [57] G.M.Masters, Renewable and efficient electric power systems, *Lecture Notes*, New Jersey, 2004.
- [58] The MathWorks Inc, (2016, Feb 10). [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/windturbine.html?s_tid=srchtitle.
- [59] Ecoenerji,(12 Aralık 2016). [Online]. Erişim: http://ecoenerji.net/haber_detay.asp?haberID=37.
- [60] Energy.gov, (17 Aralık 2016). [Online]. Erişim: <https://energy.gov/maps/how-does-wind-turbine-work>.
- [61] I.Munteanu, A.I.Bratcu, N.A.Cutululis, E.Ceanga, *Optimal Control of Wind Energy Systems - Towards a Global Approach*, 1st ed., Londra, United Kingdom: Springer-Verlag London, 2008, ss. 286.
- [62] Ş.Fidan, "Değişken Hızlı - Değişken Kanat Açılı Rüzgâr Türbinlerinin Tork ve Kanat Açısı Kontrolü," Yüksek lisans tezi, Elektrik Eğitimi Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, 2010.
- [63] M.Yerebakan, *Mikro Enerji Santralleri*, 1. Baskı, İstanbul, Türkiye. İstanbul Ticaret Odası Yayınları, 2008, ss. 295.
- [64] M.S.Ayaz, "Rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör tiplerinin akıllı şebekeler üzerindeki etkileri," Yüksek lisans tezi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2016.
- [65] Megep, Res Elektrik Sistemlerinin İzlenmesi, *Ders Notları*, Ankara, 2015.
- [66] İ.Çolak ve E.Kabalıcı, "Evirici Topolojileri ve Gelişimleri Üzerine Bir İnceleme", *EMO Elektrik- Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO)*, Bursa, Türkiye, 2008, ss. 291-295.
- [67] O.Kıncay, Z.Yumurtacı, N.Bekiroğlu, Rüzgâr Enerjisi, *Ders Notları*, İstanbul, 2009.
- [68] A.Hepbaslı ve Ö.Özgener, "A review on the development of wind energy in Turkey," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 8, no. 3, p.p. 257-276, 2004.
- [69] S.Demirbaş, Rüzgâr türbinlerinde enerji dönüşümü, *Ders notları*, Ankara, 2015.
- [70] A.D.Hansen, F.Iov, F.Blaabjerg, L.H.Hansen, "Review of contemporary wind concepts and their market penetration", *Journal of Wind Engineering*, vol. 28, no. 3, pp. 247-263, 2004.
- [71] F.Blaabjerg, R.Teodorescu, M.Liserre and A.V.Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1398-1409, 2006.

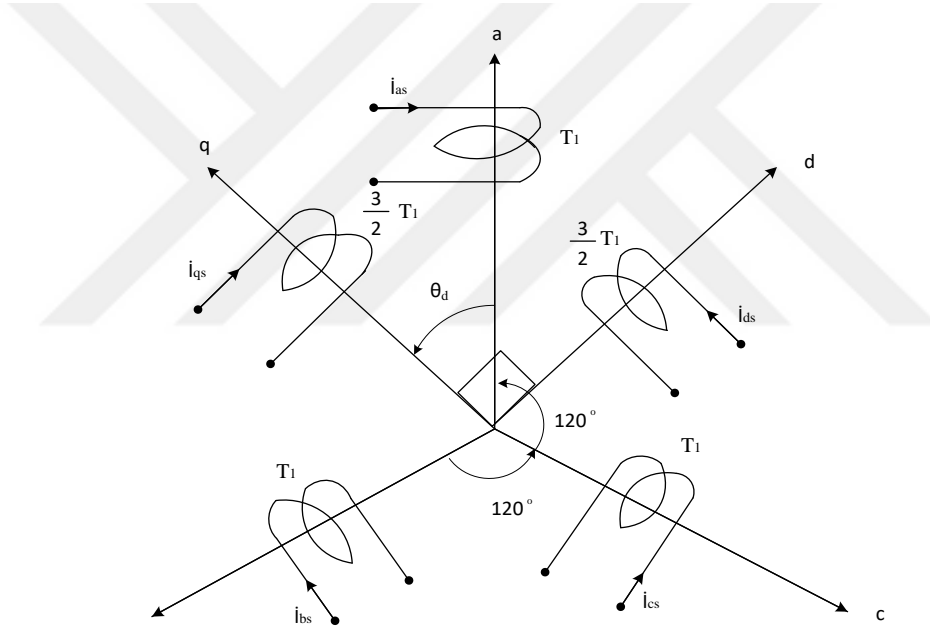
- [72] F.Blaabjerg, Z.Chen, R.Teodorescu, F.Iov, “Power Electronics in Wind Turbine Systems,” *2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Aalborg East, Denmark, 2016, pp. 1-11.
- [73] F.Blaabjerg, M.Liserre, K.Ma, “Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no.2, pp.708 – 719, 2012.
- [74] M.Dubois, H.Polinder, J.A.Fereira, “Comparison of Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbines,” *Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics*, New York, 2000, pp. 22–26.
- [75] M.R.Dubois, “Review of Electromechanical Conversion in Wind Turbines,” Group Electrical Power Processing, Nederland, Report EPP00.R03, 2000.
- [76] O.Kütük, “Rüzgâr türbinleri için doğrudan sürürlü sürekli mıknatıslı senkron generatör tasarımı,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [77] R.Ramesh, R.Vetrivel and P.M, “Permanent Magnet Synchronous Generator Configuration in Wind Turbines – Technological status review, survey and market trends,” *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 6, no. 2, pp. 23-31, 2015.
- [78] A.E.Fitgerald, J.C.Kingsley, and S.D.Umans, *Electric Machinery*, 7.Baskı, New York, America: McGraw-Hill, 2013, pp. 689,
- [79] R.E.Betz, Synchronous Reluctance and Brushless Doubly Fed Reluctance Machines, *Lecture Notes*, Denmark, 1998.
- [80] D.Y.Ohm and R.J.Oleksuk, “On Practical Digital Current Regulator Design for PM Synchronous Motor Drives,” *Proceedings of APEC’98*, Anaheim, USA, 1998, pp. 56-63.
- [81] S.Morimoto, M.Sanada and Y.Takeda, “Wide-Speed Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with High-performance Current Regulator,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, no. 4, pp. 920-926, 1994
- [82] R.D.Lorenz, Dynamics of Controlled Systems, *Lecture notes*, ABD, 1998.
- [83] M.Dursun, “Hibrit adaptasyon mekanizması ile sabit mıknatıslı senkron motorun algılayıcısız hız kontrolü,” Yüksek lisans tezi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2015.
- [84] H.Fidanboy, “Farklı darbe genişlik modülasyon teknikleri ile sürekli mıknatıslı senkron motorun performans analizi,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Eğitimi Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2011.
- [85] C.Köseoğlu, “Yenilenebilir enerji sistemleri için çok seviyeli eviricinin gerçekleştirilmesi,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2014.
- [86] Milli Eğitim Bakanlığı, Sayısal Modülasyon, *Ders Notları*, Ankara, 2012.
- [87] A.Kocalmış, “Uzay vektör pwm kontrollü çok seviyeli inverterin modellenmesi ve benzetimi,” Yüksek lisans tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2005.

- [88] M.E.Topal and L.T.Ergene, "Designing a Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Machine," *Iu-Jeee*, vol. 11, no. 1, pp. 1311-1317, 2011.
- [89] S.Khajehoddin, A.Bakhshai and P.Jain, "The Application of the Cascaded Multilevel Converters in Grid Connected Photovoltaic Systems," *Canada Electrical Power Conference*, Canada, 2007, pp. 296-301.
- [90] A.H.K.Alaboudy, A.A.Daoud, S.S.Desouky, S.A.Salem, "Converter Controls and Flicker Study of PMSG-Based Grid Connected Wind Turbines," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 75–91, 2013.
- [91] S.M.Muyeen, R.Takahashi, T.Murata, J.Tamura, "A variable speed wind turbine control strategy to meet wind farm grid code requirements," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.25, no.1, pp.331-340, 2010.
- [92] S.Morimoto, T.Nakamura, Y.Takeda, "Power maximization control of variable-speed wind generation system using permanentmagnet synchronous generator,". *Electrical Engineering in Japan*, vol. 150. no. 2, pp. 1573-1579, 2005.
- [93] W.Qiao, L.Qu, R.G.Harley, "Control of IPM Synchronous Generator for Maximum Wind Power Generation Considering Magnetic Saturation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 3, pp. 1095 – 1105, 2009.
- [94] D.W.Novotny and T.A.Lipo, *Vector control and dynamics of AC drives*, 4th ed., Oxford, England: Oxford University Press, 2000, pp. 435.
- [95] C.M.Ong, *Dynamic simulation of electric machinery:using MATLAB/SIMULINK*, 1st ed., Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1997, pp. 688.

7. EKLER

7.1. EK-1. PARK DÖNÜŞÜMÜ

Park dönüşümü, senkron makinelerin analizinde çok yaygın olan üç fazdan iki faza dönüşüm araçlarından biridir. Bir senkron makinenin stator bileşenlerini rotorun sabit d-q referans çerçevesine dönüştürmek için kullanılır. Bu çerçevenin pozitif q-ekseni generatör hareketinde q-ekseninin 90 derece ileri yönlendirilmesi iken pozitif d-ekseni alan sargısının manyetik eksenine ile hizalanması olarak tanımlanır. Şekil 8.1'de abc düzleminde d-q düzlemine geçiş görülmektedir.



Şekil 8. 1. D-q bileşenleri ile abc bileşenleri arasındaki ilişki [50].

Dönüşüm aşağıdaki denklemlerle tanımlanmaktadır [94].

$$[f_{dq0}] = [T_{dq0}(\theta_c)] [f_{abc}] \quad (8.1)$$

$$[T_{dq0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_d & \cos(\theta_d - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_d + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta_d & -\sin(\theta_d - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_d + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (8.2)$$

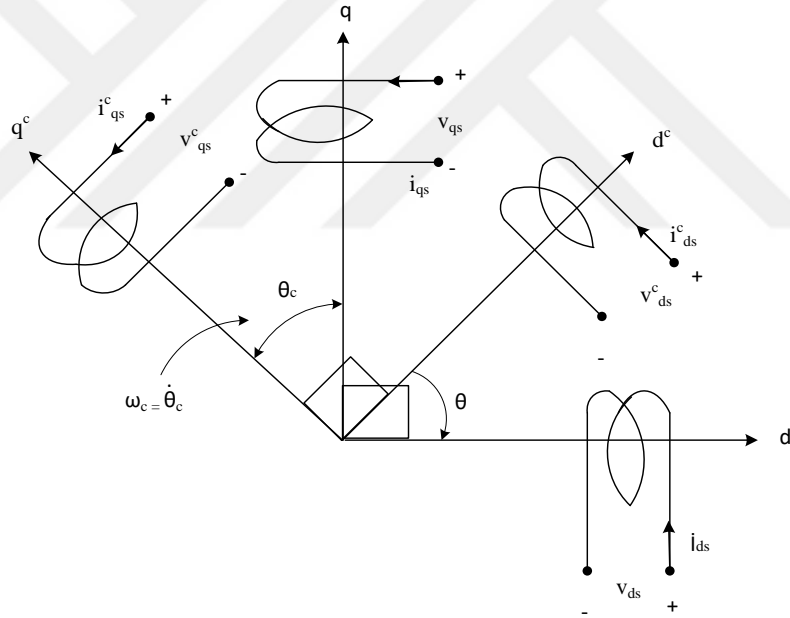
Ters park dönüşümü ise şöyle verilir:

$$[T_{dq0}]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_d & -\sin\theta_d & 1 \\ \cos(\theta_d - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_d - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_d + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_d + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (8.3)$$

Burada θ_d , Şekil 8.1'de gösterilen üç boyutlu a-b-c fazı çerçevesi ile iki boyutlu d-q çerçevesi arasında tanımlanan açıdır. Bazı özel uygulamalarda sabit dq çerçeve bileşenleri başka bir döner çerçeveye dönüştürülmek durumunda kalır. 3 faz değişkenleri Şekil 8.1'de durağan i_{ds} ve i_{qs} olarak görülen dq eksen çerçevesine dönüştürüldükleri için, durağan çerçeveyi döner çerçeveden ω hızında izlersek, stator akımları örnek alındığında döner referans çerçevesi şöyle bir denklemlerle yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_c & -\sin\theta_c \\ \sin\theta_c & \cos\theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} \quad (8.4)$$

Şekil 8.2'de ise durağan d-q eksenini ile döner d-q eksenini arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 8. 2. Durağan d-q çerçevesi ile döner d-q çerçevesi arasındaki ilişki.

θ_c açısı, Şekil 8.2'de gösterildiği gibi dönen q eksenini çerçevesi ile sabit q eksenini çerçevesi arasındaki açıdır. Bu açı, dönen referans çerçevesinin açısal hızının (ω_c) ve başlangıç açısının Denklem 8.5 ile gösterilebilen bir fonksiyonudur.

$$\theta_c(t) = \int_0^t \omega_c(t) dt + \theta(0) \quad (8.5)$$

Başlangıç açısı $\theta(0)$, 0 zamanında ölçülen açıdır. Dönme hızını ve başlangıç açısını

seçmek basitleştirme türüne bağlıdır ve uygulamaya uymanın en iyi yoludur [50],[95].

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Ayşe Çiftçi
Doğum Tarihi ve Yeri: 15/07/1985-Akçakoca
Yabancı Dili: İngilizce
E-posta: ayseciftci81@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Y.
Y. Lisans:	Elektrik-Elektronik ve Bilg. Müh.	Düzce Üniversitesi	2017
Lisans:	Bilişim Teknolojileri ve Öğrt.	Abant İzzet Baysal Ü.	2012
Lise:	Bilgisayar-Yazılım	Kdz. Ereğli Anadolu Tekn. Lis.	2004