

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN DM SENKRON  
GENERATÖRÜN YSA İLE MAKSİMUM GÜÇ TAKİBİNİN  
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**Abdulkakim KARAKAYA**

**KOCAELİ 2012**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**


**RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN DM SENKRON  
GENERATÖRÜN YSA İLE MAKSİMUM GÜÇ TAKİBİNİN  
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**Abdulkakim KARAKAYA**

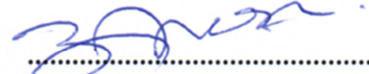
**Doç.Dr. Ercüment KARAKAŞ**  
Danışman, Kocaeli Üniv.

  
.....


**Doç.Dr. Engin ÖZDEMİR**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

  
.....

**Doç.Dr. Erkan MEŞE**  
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniv.

  
.....

**Yrd.Doç.Dr. Metin AYDIN**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

  
.....

**Yrd.Doç.Dr. Kadir YILMAZ**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

  
.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 11.12.2012

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Rüzgâr gücünün kullanılması çok eski dönemlere dayanmaktadır. Rüzgâr gücü, ilk olarak yelkenli gemiler ve yel değirmenlerinde kullanılmıştır. Daha sonra tahıl öğütme, su pompalama, ağaç kesme işleri için de rüzgâr gücü kullanılmıştır. Günümüzde ise yeryüzündeki fosil yakıt rezervlerinin oldukça azalması nedeniyle rüzgâr gücünden elektrik enerjisi elde edilmektedir. Elde edilen bu enerjisinden maksimum düzeyde güç elde edilebilmesi için ulusal ve uluslararası düzeyde birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar içerisinde rüzgâr türbinlerinde kullanılan Daimi Mıknatıslı Senkron Generatör (DMSG)'lere özel bir ilgi vardır. Bunun nedeni, DMSG'lerin dişli kutusu kullanılmadan sürülebilmeleri ve geniş rüzgâr hız aralıklarında iyi bir performansla çalışabilmeleridir.

Yapılan bu çalışmada, laboratuvar ortamında kurulan deney seti ile Yapay Sinir Ağı (YSA) denetleyicisi kullanılarak DMSG'nin maksimum güç takibi yapılmaktadır. Kullanılan dsPIC sürücü kartı ile fazların sıfır geçiş noktaları tespit edilmekte ve YSA tabanlı kontrol algoritmasından elde edilen anahtarlama açılara göre maksimum güç noktalarında sistem çalıştırılmaktadır. Ulusal ve uluslararası çalışmalarda DMSG'nin YSA ile maksimum güç takibi uygulamalı olarak gerçekleştirilmemiştir. Ayrıca tasarlanan yeni kontrol algoritması ile literatüre önemli bir katkı sağlanmaktadır. Karmaşık kontrol algoritmalarına ihtiyaç duyulmadan maksimum güç takibi yaparak, uygulama ve simülasyon sonuçlarının analiz edilmesi hedeflenmiştir.

Tez süresince, gösterdikleri sabır ve hoşgöründen dolayı çok kıymetli eşim Nuran, kızlarım Nurseza ve Eslem Erva'ya, uygulama setinin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen, Öğr. Gör. Yusuf ÇAKIR, Öğr. Gör. İsmail SARI ve Elektrik Eğitimi Bölümü Arş. Gör. arkadaşlarıma, projenin gerçekleşmesinde maddi destek sağlayan Kocaeli Üniversitesi BAP Birimine, özellikle doktora eğitimim süresince bilgi ve desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım, Doç. Dr. Ercüment KARAKAŞ, Doç. Dr. Engin ÖZDEMİR, Doç. Dr. Erkan MEŞE, Yrd. Doç. Dr. Kadir YILMAZ ve Yrd. Doç. Dr. Metin AYDIN'a teşekkür ederim.

Aralık - 2012

Abdulahkim KARAKAYA

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR.....	viii
ÖZET .....	x
ABSTRACT .....	xi
GİRİŞ .....	1
1. GENEL BİLGİLER .....	2
1.1. Önceki Çalışmalar.....	2
1.2. Tezin Amacı ve İzlenen Yöntem .....	19
2. RÜZGÂR TÜRBİNİ KAVRAMLARI VE GENERATÖR TİPLERİ .....	21
2.1. Sabit Hız Kavramı.....	23
2.2. Sınırlı Değişken Hız Kavramı .....	24
2.3. Kısmi Ölçekli Güç Dönüştürücü ile Değişken Hız Kavramı .....	25
2.4. Tam Ölçekli Güç Dönüştürücü ile Değişken Hız Doğrudan Sürme Kavramı .....	27
2.4.1. Elektriksel uyartımlı senkron generatör .....	27
2.4.2. DM senkron generatörler .....	29
2.5. Tam Ölçekli Güç Dönüştürücüsü ile Değişken Hız Tek Kademeli Dişli Kavramı .....	37
2.6. Tam Ölçekli Bir Güç Dönüştürücüsü ile Değişken Hız Çok Kademeli Dişli Kavramı .....	37
3. RÜZGÂR TÜRBİNİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ .....	39
3.1. Rüzgârdan Mekanik Güç Çıkarımı .....	39
3.2. Rotor Güç Karakteristiği .....	44
4. YSA TOPOLOJİLERİ .....	47
4.1. YSA'nın Tanımı .....	47
4.2. Biyolojik Sinir Ağları.....	48
4.3. YSA Yapısı ve İşlem Elemanı.....	49
4.3.1. YSA'nın bağlantı geometrileri .....	50
4.3.2. YSA'nın eşik fonksiyonları.....	51
4.3.3. YSA'nın ağırlık uzayı .....	51
4.4. YSA'da Eğitim .....	53
4.4.1. YSA'da bellek .....	53
4.4.2. YSA'da hata toleransı .....	54
4.5. YSA'da Öğrenme Kuralları.....	54
4.5.1. Almaç (Perceptron).....	55
4.5.2. Çok katmanlı almaç (Multi-Layer Perceptron) .....	55
4.5.3. Geriye yayılma (Back-Propagation) algoritması.....	56
4.5.4. Hatanın geriye yayılım algoritması ve genelleştirilmiş delta kuralı.....	57



5. GENERATÖR PARAMETRELERİNİN TESPİTİ, DMSG'NİN MATEMATİKSEL MODELİ VE MAKSİMUM GÜÇ TAKİBİNİN GERÇEKLEŞTİRİLEREK ELDE EDİLEN SONUÇLARIN İRDELENMESİ ...	62
5.1. Generatör Parametrelerinin Ölçülmesi ve Doğruluğunun Test Edilmesi .....	62
5.2. DMSG'nin Matematiksel Modeli ve Maksimum Güç Takibinin Gerçekleştirilmesi.....	67
5.2.1. DMSG'nin matematiksel modeli.....	67
5.2.2. DMSG'nin vektör diyagramı.....	70
5.2.3. Maksimum güç takip kontrol sistemi.....	71
5.2.4. Maksimum güç takibi kontrol şeması .....	74
5.2.5. YSA algoritması .....	76
5.2.6. Uygulama setinin oluşturulması .....	78
5.2.7. Simülasyon ve deneysel sonuçlar .....	82
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	104
KAYNAKLAR.....	109
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER .....	121
ÖZGEÇMİŞ.....	122

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Dünyada rüzgâr enerjisi kurulu gücünün gelişimi.....	22
Şekil 2.2.	Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı .....	22
Şekil 2.3.	Türkiye’de rüzgâr enerjisi kurulu gücünün yıllara göre gelişimi.....	22
Şekil 2.4.	SKAG sistemi ile sabit hız kavramının şeması .....	23
Şekil 2.5.	RSAG ile sınırlı değişken hız kavramının şeması.....	25
Şekil 2.6.	ÇBAG sistemi ile değişken hız kavramının şeması.....	26
Şekil 2.7.	Doğrudan sürülen bir EUSG sisteminin şeması .....	28
Şekil 2.8.	Doğrudan sürülen DMSG sisteminin blok diyagramı .....	29
Şekil 2.9.	Akı ve akım akışları ile RADM makine .....	30
Şekil 2.10.	İç rotorlu, yüzeye montajlı DM makinenin kesiti .....	31
Şekil 2.11.	Dış rotorlu yüzeye montajlı DM makinenin kesiti .....	31
Şekil 2.12.	Yüzeye gömülü DM makinenin kesiti .....	32
Şekil 2.13.	“V” şeklinde gömülü DM makinenin kesiti.....	33
Şekil 2.14.	Çubuk mıknatıslı DM makinenin kesiti.....	34
Şekil 2.15.	Radyal ve eksenel akı makinaların çok katmanlı şekilleri.....	35
Şekil 2.16.	Yüzeye montajlı enine akı DMSG’nin yapısı .....	36
Şekil 2.17.	Tam ölçek dönüştürücülü tek kademeli sürülen DMSG sisteminin blok diyagramı.....	37
Şekil 2.18.	Tam ölçek dönüştürücülü çok kademeli dişli kutusuyla sürülen DMSG sisteminin blok diyagramı.....	37
Şekil 3.1.	Rüzgâr türbinlerindeki kayıplar ve güç akışının blok diyagramı .....	42
Şekil 3.2.	Rüzgâr türbininin $C_p-\lambda$ karakteristiği .....	43
Şekil 3.3.	Generator hızına göre mekanik güç değişimi.....	44
Şekil 4.1.	Biyolojik sinir ağının basitleştirilmiş yapısı .....	48
Şekil 4.2.	YSA’nın yapay bir sinir modeli .....	49
Şekil 4.3.	Eşik fonksiyonları.....	51
Şekil 4.4.	Çok katmanlı almaç yapısı.....	56
Şekil 5.1.	DMSG parametrelerinin ölçülmesi için kurulan deney düzeneğinin blok diyagramı.....	62
Şekil 5.2.	Kullanılan DMSG’nin rotor resmi.....	63
Şekil 5.3.	Kullanılan DMSG’nin rotor ve stator resmi.....	63
Şekil 5.4.	DMSG parametrelerinin tesbiti için kurulan deney setinin blok diyagramı.....	64
Şekil 5.5.	DC motor hız kontrolü için oluşturulan MATLAB/Simulink® model ..	65
Şekil 5.6.	Uygulama setinin MATLAB/Simulink® modeli .....	66
Şekil 5.7.	Simülasyon sonucu elde edilen Vab gerilim değişimi.....	66
Şekil 5.8.	Uygulama sonucu elde edilen Vab gerilim değişimi.....	67
Şekil 5.9.	Aralarında $90^\circ$ elektriksel açı bulunan d-q eksenleri.....	68
Şekil 5.10.	DMSG’nin d-q eşdeğer devresi.....	69
Şekil 5.11.	DMSG’nin vektör diyagramları. (a) minimum generatör akımı ( $i_d = 0$ ) için. (b) terminal gerilimini azaltmak ( $i_d > 0$ ) için .....	71
Şekil 5.12.	Uygulama setinin blok diyagramı .....	72

Şekil 5.13.	Tristör sürücü kartının blok diyagramı .....	73
Şekil 5.14.	dsPIC'in anahtarlama sinyalleri üretiminin blok diyagramı .....	73
Şekil 5.15.	Tristörlü sürücü kartı .....	74
Şekil 5.16.	Maksimum güç takibi algoritmasının blok diyagramı .....	75
Şekil 5.17.	DMSG hızına göre maksimum güç değişim eğrisi.....	75
Şekil 5.18.	Tristör anahtarlama açısının tahmin algoritmasında kullanılan YSA eğitim şeması.....	76
Şekil 5.19.	Dört katmanlı YSA yapısı .....	77
Şekil 5.20.	DC motor sürücüsünün resmi.....	78
Şekil 5.21.	DC şönt motor, salyangoz fan ve enkoder resmi.....	78
Şekil 5.22.	DMSG resmi .....	79
Şekil 5.23.	Kızak üzerine akuple edilen DMSG ve DC şönt motorun resmi .....	79
Şekil 5.24.	Akım ölçümleri için tasarlanan kartın resmi .....	80
Şekil 5.25.	Gerilim ölçümleri için tasarlanan kartın resmi.....	80
Şekil 5.26.	Akım ve gerilim sensör sinyallerini dSPACE'e aktaran kartın resmi ....	80
Şekil 5.27.	Akım, gerilim ve sinyal işleme kartlarının resmi .....	81
Şekil 5.28.	Dönüştürücü devresinin resmi.....	81
Şekil 5.29.	Kontrol ünitesinin resmi .....	82
Şekil 5.30.	Deney setinin resmi .....	82
Şekil 5.31.	Uygulama sisteminin MATLAB/Simulink® modeli .....	83
Şekil 5.32.	DC motor hız kontrol ünitesinin blok diyagramı .....	84
Şekil 5.33.	DMSG, tristör, kondansatör ve $R_L$ ünitesinin blok diyagramı .....	84
Şekil 5.34.	Maksimum güç takibi kontrol ünitesinin blok diyagramı.....	85
Şekil 5.35.	$V_{abc}$ , $I_{abc}$ , $V_{dc}$ , $I_{dc}$ , $P_{max}$ , $P_e$ , $Q$ , $S$ ve $I_{dq}$ değişim ünitesinin blok diyagramı.....	85
Şekil 5.36.	Gerçek zamanlı uygulamanın yapılması için tasarlanan MATLAB/Simulink® model .....	86
Şekil 5.37.	Konum ve hız algılama ünitesinin blok diyagramı.....	87
Şekil 5.38.	DC motor hız kontrol ünitesinin blok diyagramı .....	87
Şekil 5.39.	Tristörlerin anahtarlama açısını kontrol eden ünitenin blok diyagramı.....	88
Şekil 5.40.	$I_{abc}$ , $V_{abc}$ , $P_e$ , $Q$ , $S$ , $I_{dq}$ , $I_{dc}$ ve $V_{dc}$ ölçüm ünitesinin blok diyagramı .....	88
Şekil 5.41.	Akım-gerilim ölçüm bloğu ve güç hesabı modeli .....	89
Şekil 5.42.	YSA denetleyicisinin MGNT performans değişimi .....	90
Şekil 5.43.	Denetleyicilerin performans analizi için oluşturulan model .....	91
Şekil 5.44.	EU denetleyicisinin MGNT performans değişimi.....	93
Şekil 5.45.	AT denetleyicisinin MGNT performans değişimi.....	93
Şekil 5.46.	Farklı rüzgâr hızlarında (6,31, 9,46 ve 13,05 m/s) DMSG'nin $P_{max}$ , $V_{dc}$ ve $I_{dc}$ uygulama ve simülasyon sonuçları .....	97
Şekil 5.47.	DMSG'nin farklı rüzgâr hızlarındaki (6,31, 9,46 ve 13,05 m/s) $V_{abc}$ ve $I_{abc}$ değişimlerinin uygulama ve simülasyon sonuçları.....	98
Şekil 5.48.	DMSG'nin 9,46 m/s rüzgâr hızında, 43 $\Omega$ yükü beslediğinde $P_{max}$ , $I_{dc}$ ve $V_{dc}$ değişimlerinin uygulama ve simülasyon sonuçları .....	99
Şekil 5.49.	DMSG'nin 9,46 m/s rüzgâr hızında, 43 $\Omega$ yükü beslediğinde $V_{abc}$ ve $I_{abc}$ değişimlerinin uygulama ve simülasyon sonuçları .....	100
Şekil 5.50.	DMSG'nin 9,46 m/s rüzgâr hızında, 21 $\Omega$ yükü beslediğinde $P_{max}$ , $I_{dc}$ ve $V_{dc}$ değişimlerinin uygulama ve simülasyon sonuçları .....	101
Şekil 5.51.	DMSG'nin 9,46 m/s rüzgâr hızında, 21 $\Omega$ yükü beslediğinde $V_{abc}$ ve $I_{abc}$ değişimlerinin uygulama ve simülasyon sonuçları .....	102

Şekil 5.52.	DMSG hızına göre aktif, reaktif ve görünür güç değişimleri .....	103
Şekil 5.53.	DMSG'nin 750 d/dak'daki $I_{dq}$ değişimi .....	103
Şekil 6.1.	DMSG hızına göre tristörlerin anahtarlama açısı değişiminin uygulama ve simülasyon sonuçları.....	106
Şekil 6.2.	DMSG hızına göre $R_L$ yükünün çektiği akım değişiminin uygulama ve simülasyon sonuçları.....	107
Şekil 6.3.	DMSG hızına göre $R_L$ yükündeki gerilim değişiminin uygulama ve simülasyon sonuçları.....	107
Şekil 6.4.	DMSG hızına göre $R_L$ yükü üzerindeki akım-gerilim değişiminin uygulama ve simülasyon sonuçları.....	108

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1.	Güç katsayısı ile uç hız oranı değişiminin değerleri.....	43
Tablo 3.2.	Farklı rüzgâr hızlarındaki generatör hızına göre mekanik güç değişiminin verileri.....	45
Tablo 3.3.	Generatör hızına göre maksimum güç noktalarının verileri .....	46
Tablo 5.1.	DMSG parametreleri.....	63
Tablo 5.2.	Referans hızlara göre elde edilen maksimum güç verileri.....	76
Tablo 5.3.	YSA eğitiminde ve testinde kullanılan veriler .....	77
Tablo 5.4.	YSA test sonuçları .....	90
Tablo 5.5.	Denetleyicilerin işlem performans süreleri .....	91
Tablo 5.6.	EU denetleyicisinin test sonuçları .....	92
Tablo 5.7.	AT denetleyicisinin test sonuçları .....	92
Tablo 5.8.	Maksimum güç takibi sonucu denetleyicilerin performansları .....	94
Tablo 5.9.	Farklı yüklerde DMSG tarafındaki akım, gerilim ve THD değişimlerinin değerleri .....	95
Tablo 5.10.	DMSG hızına göre aktif, reaktif, görünür güç ve güç katsayısının değişimi.....	96
Tablo 6.1.	Uygulama sonucu rüzgâr hızına göre DMSG referans hızı, akımı, gerilimi, gücü ve anahtarlama açısı değişim tablosu .....	105
Tablo 6.2.	Simülasyon sonucu rüzgâr hızına göre DMSG referans hızı, akımı, gerilimi, gücü ve anahtarlama açısı değişim tablosu .....	106

## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

$A_1$	: Türbinden önceki kesit alan
$A_2$	: Türbinden sonraki kesit alan
$B$	: Sönüm katsayısı
$C_p$	: Güç katsayısı
$E$	: Kinetik enerjisi
$\vec{E}$	: Kutup tekerleği gerilim vektörü
$E_p$	: p örüntüsü için toplam karesel hata fonksiyonu
$f$	: Elektriksel frekans
$F$	: Ortalama karesel hata
$I_{abc}$	: Stator a-b-c faz akımları
$I_{dc}$	: DC bara akımı
$i_a, i_b, i_c$	: Stator faz akımları
$I_{arms}$	: Bir faz akımın etkin değeri
$i_d, i_q$	: Rotor referans d-q eksenli stator akımları
$i_{pi}$	: Giriş işaretinin i bileşeni
$J$	: Eylemsizlik momenti
$L_d, L_q$	: Rotor d ve q eksenli endüktansları
$m$	: Giriş örüntüsü
$n$	: Çıkış örüntüsü
$n_{ref}$	: Referans hız (d/dak)
$o_{pj}$	: YSA'ya uygulanan p örüntü setinin ürettiği çıkıştır
$P$	: Kutup çifti sayısı
$P_e$	: Aktif güç
$P_{em}$	: Elektromekanik güç
$P_m$	: Mekaniksel güç
$P_{max}$	: Maksimum güç
$P_{mr}$	: Rotordaki mekanik güç
$P_w$	: Rüzgâr gücü
$Q$	: Reaktif güç
$R$	: Kanatların yarıçapı
$R_L$	: Yük direnci
$r_s$	: Faz başına stator sargı direnci
$S$	: Görünür güç
$T_e$	: Elektromanyetik moment
$T_m$	: Mekanik moment
$t_{pj}$	: Çıkış vektörünün j bileşeni
$\vec{V}$	: Generatör terminal gerilim vektörü
$V_{ab}$	: Stator a-b iki faz gerilimi
$V_{abc}$	: Stator a-b-c faz gerilimleri
$V_a, V_b, V_c$	: Stator faz gerilimleri
$v_d, v_q$	: Rotor referans d-q eksenli stator gerilimleri
$V_{dc}$	: DC bara gerilimi
$V_{arms}$	: Bir faz gerilimin etkin değeri

$V_{rms}$	: Faz-faz gerilim etkin değeri
$V_w$	: Rüzgâr hızı
$v_1$	: Türbinden önceki rüzgâr hızı
$v_2$	: Türbinden sonraki rüzgâr hızı
$w_{ij}$	: İşlem elemanlarının ağırlık vektörleri
$\omega_r$	: Elektriksel rotor hızı
$\omega_{rm}$	: Rotorun açısal hızı
$\alpha$	: Momentum katsayısı
$\varepsilon$	: Öğrenme katsayısı
$\Delta$	: Genelleştirilmiş delta kuralı
$\beta$	: Kanat eğim açısı
$\lambda$	: Uç hız oranı (tip speed ratio)
$\lambda_d, \lambda_q$	: Rotor referans d-q eksenine stator akıları
$\lambda_m$	: Mıknatıs malzemenin stator sargılarında oluşturduğu uyarma akısı
$\dot{m}$	: Birim zamandaki kütle değişimi
$\rho$	: Hava yoğunluğu
$\sigma$	: Bağlantı demetinin seçim fonksiyonu
$\delta$	: Yük açısı
$\theta$	: Tristörlerin anahtarlama açısı
$\theta_j$	: Eşik değeri
$\theta_r$	: q ekseninin stator faz sargısı ile yapmış olduğu açı
$x_i$	: YSA girişleri

### Kısaltmalar

A	: Rüzgâr türbin kanadı süpürme alanı
AC	: Alternating Current (Alternatif Akım)
AT	: Arama Tablosu
ÇBAG	: Çift Beslemeli Asenkron Generatör
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DM	: Daimi Mıknatıs
DMSG	: Daimi Mıknatıslı Senkron Generatör
EADM	: Eksenel Akılı Daimi Mıknatıs
EU	: Eğri Uydurma
EUSG	: Elektriksel Uyarımlı Senkron Generatör
MGNT	: Maksimum Güç Noktası Takibi
PI	: Proportional Integral (Oransal İntegral)
PID	: Proportional Integral Derivative (Oransal İntegral Türev)
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
RADM	: Radyal Akılı Daimi Mıknatıs
RSAG	: Rotoru Sargılı Asenkron Generatör
SKAG	: Sincap Kafesli Asenkron Generatör
THD	: Total Harmonic Distortion (Toplam Harmonik Bozunumu)
YSA	: Yapay Sinir Ağı

# RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN DM SENKRON GENERATÖRÜN YSA İLE MAKSİMUM GÜÇ TAKİBİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

## ÖZET

Günümüzde, küresel ısınma, sera etkisi gibi nedenlerden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi hızla artırmaktadır. Bu kaynaklardan en önemlisi olan rüzgâr enerjisinden, küresel olarak talep edilen enerjinin bir kısmı elde edilebilmektedir. Rüzgâr enerjisinden maksimum düzeyde güç elde edilebilmesi için ulusal ve uluslararası düzeyde birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar içerisinde DMSG'lere özel bir ilgi vardır. Bunun nedeni, DMSG'lerin doğrudan sürülebilmesi ve geniş rüzgâr hız aralıklarında iyi bir performansla çalışabilmeleridir.

Bu çalışmada, rüzgâr generatör sisteminde kullanılan DMSG'nin maksimum güç noktası takibi (MGNT), laboratuvar ortamında kurulan deney seti ile gerçekleştirilmektedir. Oluşturulan set, Matlab/Simulink® ortamında modellenmektedir. Maksimum güç takibi, YSA algoritması ile gerçekleştirilmektedir. MGNT'de kullanılan Arama Tablosu (Lookup Table) ve Eğri Uydurma (Curve Fitting) denetleyicilere göre YSA'nın performans analizi yapılmaktadır. Simülasyon ve deneysel yolla elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Rüzgâr hızına göre elde edilen referans hızlarda eğitilen YSA'nın, farklı hızlarındaki maksimum güç tahmini analiz edilmektedir. Kullanılan dsPIC denetleyici ile fazların sıfır geçiş noktaları tespit edilmekte ve YSA tabanlı kontrol algoritmasından elde edilen anahtarlama açılarına göre maksimum güç noktalarında sistem çalıştırılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Daimi Mıknatıslı Senkron Generatör, Maksimum Güç Noktası Takibi, Rüzgâr Enerjisi, Yapay Sinir Ağı.



# **REALIZATION OF MAXIMUM POWER TRACKING OF PM SYNCHRONOUS GENERATOR USED IN WIND TURBINES BY ANN**

## **ABSTRACT**

Renewable energy sources are collecting attention due to global warming, greenhouse effect nowadays. A part of globally demanded energy can be produced with wind energy as one of the important form of these sources. A lot of national and international works are performed in order to produce maximum power from wind energy. PMSGs are attracting great attention among these works because PMSGs are driven directly and performed in a wide range of wind speeds satisfactorily.

In this study, maximum power point tracking (MPPT) of PMSG used in wind generator system is realized by a prototype installed in laboratory environment. Installed prototype is modeled in Matlab/Simulink® environment. MPPT is realized by ANN. Performance analysis of ANN is accomplished according to Lookup Table and Curve Fitting controllers used in MPPT. Obtained simulation and experiment results are compared. Maximum power in various windmill speeds of trained ANN in determined reference speeds estimation is analyzed according to wind speed obtained. Zero crossing points of phases are determined by dsPIC controller and system is operated according to triggering angels obtained from ANN based control algorithm in maximum power points.

**Keywords:** Permanent Magnet Synchronous Generator, Maximum Power Point Tracking, Wind Energy, Artificial Neural Network.

## **GİRİŞ**

Günümüzde enerjiye olan talebin her geçen gün daha da artması, enerji maliyetlerindeki yükseliş, çevre duyarlılığı gibi nedenler ile yenilenebilir, temiz enerji üretim ve kullanım ihtiyacı artmaktadır. Bu nedenle, alternatif ve yenilenebilir enerji üretim teknolojileri Türkiye'nin öncelikli teknoloji alanları arasında bulunmaktadır. Bu teknolojilerden biri olan rüzgâr generatörleri üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmalar içerisinde DMSG'lere olan ilgi giderek artmaktadır.

Son yıllarda, Daimi Mıknatıs (DM)'lerin kullanımı daha önceki yıllara göre daha caziptir, çünkü DM'lerin performansı gelişmekte ve maliyetleri azalmaktadır. Ayrıca, doğrudan sürülen rüzgâr türbinleri için radyal akılı DM makineler kullanıldığı zaman, rüzgâr generatör sistemi geniş rüzgâr hız aralıklarında iyi bir performansla çalışabilmektedir.

Küçük güçlü rüzgâr türbin sistemlerinin ana maliyeti, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha uygundur. Küçük güçlü bir sistemle, güç şebekesine uzak yerleşim alanlarında kurulum yapılarak daha uygun bir maliyetle elektrik elde edilebilir. Bu uygulamaların kurulum gereksinimleri, yüksek verim, yüksek güvenilirlik, hafiflik, düşük maliyet ve rüzgâr türbin sistemi için küçük veya bakımın minimum olmasını sağlamaktır.

Maksimum güç takip kontrolü, rüzgâr türbin sisteminin optimum rüzgâr enerjisini kullanması ve maksimum aerodinamik verime sahip olmasıyla mümkündür [1]. Maksimum rüzgâr güç çıkarımı uygulaması için, rüzgâr türbin generatörü değişken hız değişken frekans modunda çalıştırılmalıdır.

## 1. GENEL BİLGİLER

Hazırlanan tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; yapılan çalışmanın içeriğine ve amacına değinilmiştir. İkinci bölümde; rüzgâr türbini kavramları ve generatör tipleri anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde; rüzgâr türbini dönüşüm sistemi yer almaktadır. Dördüncü bölümde; YSA topolojilerine yer verilmektedir. Beşinci bölümde; MGNT'nin yapılması için generatör parametrelerinin tespiti, DMSG'nin matematiksel modeli ve maksimum güç takibinin gerçekleştirilmesi bulunmaktadır. Altıncı bölümde; sonuç, öneri ve değerlendirmeler sunulmaktadır.

### 1.1. Önceki Çalışmalar

DMSG'ler ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmaların özetleri aşağıdaki gibidir:

Li ve diğ. (2005): YSA'nın kullanıldığı küçük bir rüzgâr sisteminde, türbin güç katsayısı eğrisinden potansiyel sürüklemeye karşı maksimum güç takip kontrolü ve rüzgâr hızı tahmini gerçekleştirilmektedir. Yeni kontrol sistemi, mekanik sensörlerin olmadığı yüksek güvenilirlik, yüksek verim ve hafiflik ile kullanıcıya maksimum elektrik gücü vereceği öne sürülmektedir [2].

Esmaili ve diğ. (2005): Yükseltici DC-DC dönüştürücü kullanılarak değişken hızlı bir rüzgâr türbininde maksimum güç takibi için yeni ve basit bir kontrol metodu tartışılmaktadır. DM generatörün çıkış gücü, DC-DC dönüştürücü, generatör hızı ve elde edilen hızın takip edilmesi için referans hız değeri kullanılmaktadır. Güç şebekesi tarafındaki aktif ve reaktif güç bağımsız olarak kontrol edilmektedir [3].

Shi ve Helen (2004): Küçük tip rüzgâr generatörü için, YSA temelli rüzgâr hızı tahmini ve maksimum güç çıkarım kontrollü bir sistem geliştirilmektedir. Sistemin simülasyon sonuçlarına göre, türbinin mekaniksel gücü ve rüzgâr hızının kalıcı duruma ulaştığı anlardaki maksimum gücün iyi bir şekilde takip edildiği görülmektedir. Doğrudan sürülen DMSG için YSA temelli küçük rüzgâr üretim

sistemi, yüksek güvenilirlik, yüksek verim ve düşük maliyetle kullanıcıya maksimum elektrik gücü vereceği sonucuna varılmaktadır [4].

Grabic ve diğ. (2004): Seri bağlı dönüştürücü kullanılarak, DMSG rüzgâr türbininin şebekeye bağlanmasındaki kararsızlığın çözümü araştırılmaktadır. Mekanik analogiler ve basitleştirilmiş modeller kullanılarak, önce denetim probleminin çözümü tanımlanmakta ve daha sonra bununla ilgili zorluklar tartışılmaktadır [5].

Fengxiang ve diğ. (2005): 10-50 kW'lık güç aralığındaki değişken hızlı rüzgâr türbinleri ile doğrudan sürülen DM generatörün kontrol sistemi tanıtılmaktadır. Rüzgâr generatörü, ya şebekeye ya da dağıtıcı bir güç kaynağı gibi tek bir sisteme bağlanabileceği vurgulanmaktadır. Doğrudan sürülen 20 kW'lık bir DMSG rüzgâr türbini için, PIC sinyal çipi üzerine temellendirilmiş uygulama metodu, kontrol stratejisi ve sistem tasarımı detaylı olarak anlatılmaktadır. Rüzgâr hız değişimlerinde, dinamik performansın optimum noktada tutulması için tasarlanan modelin simülasyon sonuçları sunulmaktadır [6].

Strachan ve Jovcic (2007): 2 MW değişken hızlı doğrudan sürülen DMSG'li rüzgâr enerji dönüşümü ve depolama sisteminin modellenmesi, simülasyonu ve analizi sunulmaktadır. DMSG, kontrollü tam ölçekli güç dönüşüm sistemi aracılığı ile AC şebeke beslenmektedir. Güç dönüşüm sistemi, ortak bir DC hatta bağlı iki tane arka arkaya üç seviyeli nötr noktalı PWM gerilim kaynağı dönüştürücülerinden oluşmaktadır. Elektrik enerjisi depolama sistemi, güç dönüşüm sistemi ile entegre edilmektedir ve tam köprü DC-DC dönüştürücü yolu ile DC hatta bağlanmaktadır. Güç sistemi dinamik simülasyon yazılımında PSCAD/EMTDC önerilen rüzgâr enerji dönüşümü ve depolama sisteminin gösterimi için bir model sunmaktadır. Rüzgâr hız sensörüne gerek duymadan optimum performans katsayısında çalışması ve düzgün çıkış gücü için sistemin kabiliyetini gösteren değişik rüzgâr hızlarındaki simülasyon sonuçları sunulmaktadır. AC şebeke ağını beslemede kararlılığı artırmak için, entegre edilen elektrik enerjisi depolayıcısının pozitif etkilerini araştırmayı kolaylaştırsın diye rüzgâr enerji dönüşümü ve depolama sistemi modeli geliştirilmektedir [7].

Yang ve Chen (2007): Rüzgâr enerji sistemindeki, farklı çift PWM'li DMSG kontrol metodunun karşılaştırılması üzerine temellendirilmiş ve generatör parametreleri

olmadan yeni bir kontrol metodu sunmaktadır. Sayılabilecek kadar az olan literatür çalışmalarında, generatör parametrelerine gerek duymayan kontrol metotlarının sunulduğu belirtilmektedir. Normalde, tanımlanan bu metotların çoğu: generatör tarafındaki dönüştürücü, alan etkili kontrolü yapılan generatör ve şebeke tarafındaki dönüştürücü kontrollerinin (DC hat gerilimi ve şebeke enerji beslemesi) yapıldığı belirtilmektedir. Generatör parametrelerine güvenip yapılan kontrol metotlarının karmaşık olduğu ve uygulama ile parametre tespitinin zor olduğu belirtilmektedir. Yapılan çalışmada, generatör parametreleri olmadan şebeke tarafındaki dönüştürücü yoluyla dolaylı olarak generatör kontrolünü ve şebeke tarafındaki dönüştürücü yerine generatör tarafındaki dönüştürücü ile DC hat gerilim kontrolü için yeni bir metot sunulmaktadır. Önerilen metot, uygulama aşamasındadır ve şu ana kadar doğruluğu simülasyon sonuçları ile onaylanmaktadır [8].

Haque ve diğ. (2010): Doğrudan sürülen DMSG temelli şebekeden bağımsız değişken hızlı rüzgâr türbininin çalışması için yeni bir kontrol stratejisi sunulmaktadır. Generatör tarafındaki dönüştürücü ile maksimum güç çıkarımı için tasarlanan kontrol algoritması irdelenmektedir. Çıkış gerilim ve frekans denetleyici ile şebekeden bağımsız denetim gerçekleştirilmektedir. Gücün potansiyel fazlalığı, kısıtıcı denetimi ile rezistif yükte harcanmaktadır ve DC hat gerilimi korunmaktadır. DC hat ve küçük sinyal analizlerinin dinamik modeli sunulmaktadır. Simülasyon sonuçları, değişik rüzgâr ve hız durumlarında denetleyicilerin gerilim ayarını ve maksimum güç takibini yapabilmektedir. Denetleyicinin dinamik ve kalıcı durum performansının iyi olduğu görülmektedir [9].

Uehara ve diğ. (2011): DMSG ile rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin açılı kontrolü ve DC hat geriliminin basit bir koordineli kontrolü ile çıkış gücü düzeltim metodu sunulmaktadır. Gerilim kaynağı dönüştürücüleri ile AC-DC-AC dönüştürücü sistemine adapte edilmektedir. DMSG'nin çıkış güç dalgalanmalarına göre DC hat gerilim komutu belirlenmektedir. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin kanat açılı kontrolü ile çıkış güç salınımı, düşük ve yüksek frekans aralıkları düzeltilmekte ve DC hat gerilim kontrolü yapılmaktadır. Önerilen metot kullanılarak, yüksek frekans etkisi kanat açısı ile azaltıldığı için rüzgâr türbini kanat stresi azaltılmaktadır. Buna ek olarak, düşük frekans durumundaki şarj-deşarj eylemi gerçekleşmeden DC hat kapasite değeri azaltılmaktadır. Hat hatası durumunda rüzgâr enerjisi sisteminin

dengeli çalışması için DC hat devresinde bir kıyıcı devresi kullanılmaktadır. Önerilen metodun etkinliği sayısal simülasyonla doğrulanmaktadır [10].

Krishnan ve Rim (1989): DMSG ile değişken hız sabit frekanslı güç dönüşüm şemasının kalıcı durum modeli oluşturulmaktadır. Kalıcı durum modeli, deneysel olarak portatif bir laboratuvar sistemi üzerinde doğrulanarak, geçerliliği sunulmaktadır. Sabit frekans güç dönüşümü, anahtarlama elemanı ile gerçekleştirilmektedir [11].

Yamamura ve diğ. (1999): 2 kW'dan 5 kW'a kadar çıkışı olan DMSG'nin kullanıldığı küçük ölçekli rüzgâr güç üretim sistemi için kontrol yöntemi sunulmaktadır. Hız sensörü veya pozisyon sensörü olmadan birkaç kW'lık çıkışlı rüzgâr güç üretim sistemi için alçaltıcı-yükseltici kıyıcı kullanılarak, uyarma akımına gerek duymayan DMSG'ye uygulanmaktadır. PWM metotla AC/DC dönüştürücünün yerine pahalı olmayan köprü doğrultmaç devresi uygulanmaktadır. Bu metotları kullanarak, basit ve pahalı olmayan bir rüzgâr güç üretim sistemi sunulmaktadır [12].

Esmaili ve Xu (2006): Küçük hacimli değişken hızlı bir rüzgâr türbininde maksimum güç takibi için DMSG ile kullanılabilen yeni ve basit bir hız tahmin edicisi incelenmektedir. Bunun yanında, vektör kontrol yaklaşımı, aktif ve reaktif gücün bağımsız olarak kontrol edilebildiği gibi tek faz gerilim kaynaklı eviricinin akım ve çıkış geriliminin kontrol edilmesi sunulmaktadır. Önerilen hız tahmin edicisi kullanılarak, sistem, sadece maksimum güç takip algoritmasının uygulanması ve generatör hızının tahmin edilmesi için iki ölçüme gerek duymaktadır. Hız tahmininin doğruluğu, simülasyon ve deneysel sonuçlarla doğrulanmaktadır [13].

Higuchi ve diğ. (2000): Var olan rüzgâr güç üretim sistemleri, çoğunlukla yüksek kapasiteli (500 kW üzerinde) ve yüksek fiyatlılırlar. Bu sistemleri inşa etmek için geniş alanlara ihtiyaç vardır. Bu nedenle, küçük ölçekli (yaklaşık 5-10 kW çıkışlı) üretim sistemi önerilmektedir. Rüzgâr gücünün sürekli düzensiz olmasından dolayı AC/DC dönüştürücülü sistem tavsiye edilmektedir. Bu durumda, pozisyon veya hız sensörü olmadan rüzgâr güç üretim sistemi için buck/boost kıyıcı ve uyarım akımına gerek duymayan DMSG kullanılmaktadır. Buna ek olarak PWM metotlu AC/DC dönüştürücü yerine diyotlu köprü doğrultmaç kullanarak pahalı olmayan doğrultmaç yapılmaktadır. Bu metodu kullanarak, basit ve pahalı olmayan bir rüzgâr güç üretim

sistemi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, analog devre ile maksimum güç takip kontrol sistemi önerilmekte ve herhangi bir durumda maksimum güç çıkışının %90'ın üzerinde olması sağlanmaktadır [14].

Amei ve diğ. (2002): DMSG'nin ürettiği enerjinin kontrolünde, yükseltici kıyıcı rüzgâr enerji sistemi kullanılmaktadır. DC çıkış gerilimi ve üretilen güç için karakteristikler, generatör döner frekansı ve yükseltici kıyıcının görev süresinin fonksiyonu ile açıklanmaktadır. Elde edilen maksimum güç için optimum görev süresi, yükseltici kıyıcının görev süresine bağlı olarak generatör gücünün karakteristik denklemi ayrıştırılıp teorik olarak belirlenmektedir [15].

Mirecki ve diğ. (2004): Rüzgâr türbininin güç karakteristikleri doğrusal değildir. Özellikle elde edilen gücün yüke çok duyarlı olduğu Savonius dikey eksen sistemleri için geçerlidir. Bazı kontrol stratejileri maksimum güç noktası takibi (MGNT) enerji dönüşümü için kullanılabilir. Eğer türbin karakteristiği tam olarak bilinirse, moment, hız veya çıkış akımının optimal bir kontrolü kullanılabilir. Aksi takdirde bu karakteristik bilinmiyorsa, bulanık mantık gibi işlem yapma algoritması uygulanmak zorundadır. Basit köprü doğrultucu veya PWM dönüştürücü olabilen AC\_DC dönüştürücü gibi bazı yapılar da kullanılabilir. Yapılan çalışmada, bu kontrol stratejileri ve mimarileri çalışmasının karşılaştırılması sunulmuştur. Analizler, bazı deneyler ve simülasyonlar üzerine temellendirilmektedir [16].

Matsui ve diğ. (2004): Bu çalışmada, köprü diyot doğrultucu ile küçük hacimli rüzgâr türbinli DMSG sistemi için basit bir MGNT kontrol şeması sunulmaktadır. Çıkış DC güç, PWM evirici ve yükseltici kıyıcı ile kontrol edilmektedir. Generatör tarafındaki bilgilere gerek duyulmadan “anlık güç, moment, döner hız gibi” üretilen çıkış güç, sistemin doğal sınırlama çevrim işlemi ile maksimize edilmektedir [17].

Bolognani ve diğ. (2005): Rüzgâr generatörünün çalışma koşulları, hız ve pozisyonun tam tahmininin elde edilmesi için bu çalışmada kullanılan Kalman algoritmasının gerçek gereksinimleri eşleştirilmektedir. Düzgün mekaniksel ve elektriksel geçici durumlarda ve eviricinin aktif hale geldiği durumlarda hassas geçişi sağlamak için yeni bir strateji önerilmektedir [18].

Yaoqin ve diğ. (2002): 350 V'luk DC hat gerilimi üretmek için üç fazlı bir dönüştürücü ile DMSG'yi sürerek, yeni bir MGNT kontrol şeması geliştirilmektedir. Geçmişte kullanılan diğer teknikler ve önerilen MGNT sistemlerinde kullanılan metot arasındaki ana farklar şunlardır: 1) Rüzgâr hız değişimine göre basamak takibi yapılmaktadır; 2) MGNT kontrolünde, dönüştürücünün ölü zaman etkisinden kaçınmak için, generatör dönme hızıyla senkronizasyon sağlanmaktadır; 3) Döner referans hızın dalgalanmasını azaltmak için MGNT denetleyicisinin çıkışında alçak geçiren filtre kullanılmaktadır. Sistem sonuçları, kararlı hız takibi, yüksek verimlilik, hızlı ve düşük maliyete sahiptir. Deneysel sonuçlara göre rüzgâr hızı, 0,2 Hz (5 saniye) kadar hızlı bir şekilde takip edilmektedir ve çıkış rüzgâr gücü %48 artırılmaktadır. Sonuç olarak, üretim verimi geliştirilmektedir [19].

Mokadem ve diğ. (2005): Rüzgâr türbin simülatörü kullanılarak batarya şarj eden bir rüzgâr-dizel sisteminde, maksimum güç takibi yapılmaktadır. MGNT, DM generatörün (moment kontrolü) çıkış akım kontrolü ile alçaltıcı dönüştürücü kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu hedefi gerçekleştirmek için PI akım denetleyicisi kullanılmaktadır. Regülasyonda PWM denetleyici kullanılmaktadır. Çalışmada rüzgâr hız değişimi hesaba katılarak takip işlemi geliştirilmektedir. PI akım denetleyicisi ve rüzgâr türbininin modeli, MATLAB/Simulink® yazılımında uygulanmaktadır ve bunlar rüzgâr türbin simülatörüne entegre edilmektedir. Deneysel sonuçlar, 9700 saniye zaman hatası olan National Instruments Acquisition kartı kullanılarak elde edilmektedir [20].

Dai ve diğ. (2007): DMSG için yeni bir kontrol şeması sunulmaktadır. Yüksek güçlü akım kaynağı dönüştürücüsü, rüzgâr enerjisi uygulamaları için doğrudan sürülen generatör ve şebeke arasında kullanılmaktadır. Orta gerilim yüksek güç aralığı, PWM akım kaynağı eviricisi avantajlarını göstermektedir. Şebekeye bağlandığı zaman: Basit topoloji, küçük filtre, düzgün güç çıkışı ve kısa devre koruması kanıtlanmaktadır. Aynı zamanda denetim şemasını gerçekleştirmek için bazı zorluklar sunulmaktadır. Birim güç faktörünü elde etmek için değişken minimum DC hat akımı ve şebeke tarafında yüke bağlı güç faktörünü, girişteki filtre kondansatörü etkilemektedir. Önerilen kontrol şeması, çıkış güç faktörü kontrolü ve maksimum güç takibini birleştirmek için geliştirilmektedir. Reaktif ve aktif gücün bağımsız olarak kontrol edilmesi ile birim güç faktörü kontrolü, kondansatörler aracılığı ile



şebeke tarafında yapılmaktadır. Mümkün olan en yüksek düzeyde evirici modülasyon dizini kontrol edilerek, önerilen kontrol şeması ile değişik rüzgâr hızlarında DC hat akımını minimum bir değerde tutmaktadır ve bu nedenle daha düşük güç seviyelerinde dönüştürücü güç kaybı büyük oranda azaltılmaktadır. Simülasyon ve deney sonuçları, önerilen kontrol şemasını doğrulamaktadır [21].

Li ve Mi (2007): PWM doğrultucularla doğrudan sürülen DM generatör sistemlerinin avantajları ve değişken hızlı rüzgâr türbin sisteminin kontrol topolojileri analiz edilmektedir. Güç dönüştürücülerinin oranlarına dayanarak, PWM doğrultucu ile doğrudan sürülen DM generatörün çıkış gerilimini sabit tutmak için sınırlayıcı kullanılmaktadır. Bu doğrultuda, değişken rüzgâr türbin hız aralığını genişletmek için DM generatör tasarım kriterleri ayrıntılı olarak tartışılmaktadır. Buna ek olarak, DM generatör prototipi güç dönüşüm sistemleri ile simülasyon yapılmaktadır. Simülasyon sonuçları bu fikirlerin doğruluğunu göstermektedir [22].

Huang ve diğ. (2008): 2 MW doğrudan sürülen DMSG sisteminin en uygun makine tasarımı ve dönüştürücü topolojisi seçilerek, kontrol mühendisliği tasarımı anlatılmaktadır. Generatör, master-slave yapısı olarak paralel bağlanan, tam denetimli iki PWM dönüştürücü yoluyla gücü şebekeye aktarmaktadır. Yük akım paylaşımı kontrol stratejisi, paralel bağlantı için sunulmaktadır. Bazı deneysel sonuçlar, gerçek sistemin performansını göstermek için verilmektedir [23].

Luo ve diğ. (2008): Doğrudan sürülen DM rüzgâr güç sisteminin kontrol stratejisini ele almaktadır ve şebeke ile generatör tarafına uygulanan PWM teknolojisinden olan ard arda PWM dönüştürücü kontrolünü önermektedir. Sistem, şebeke tarafında PWM evirici, ara DC devre ve generatör tarafında PWM doğrultucu ile DMSG'den oluşmaktadır. Sabit bir DC gerilimi sağlamak için iç döngü olarak akım denetleyicisi kullanılırken, dış döngü olarak DC gerilim denetleyicisi kullanılmaktadır. Aktif güç, q eksen akımı ile kontrol edilirken, reaktif güç generatör tarafındaki d eksen akımı ile kontrol edilmektedir. Şebeke tarafında, dış döngü olarak sırasıyla aktif güç ve reaktif güç kontrol edilmektedir. Sistemin uygulanabilirliğini doğrulamak için, deneysel testler yapılmaktadır [24].

Senjyu ve diğ. (2003): DMSG rüzgâr enerji sisteminde, akı bağıntıları kullanılarak rotor pozisyonunu tahmin edilmektedir. Sistem denetleyicisi kullanılarak rüzgâr

generatörü çıkış momenti, hız ve rotor pozisyon tahmini yapılmaktadır. Tahmin edilen değerler kullanılarak rüzgâr hızı elde edilmektedir. Önerilen tekniğin geçerliliğini göstermek için, rüzgâr enerji sisteminin simülasyonu sunulmaktadır. Simülasyon sonuçlarına göre, rotor pozisyon tahmini, hız ve rüzgâr hızı iyi bir şekilde tahmin edilmektedir [25].

Schiemenz ve Stiebler (2001): Değişken hız modunda çalıştırılmak zorunda olan, gecikmeli kontrollü rüzgâr enerjisi dönüşümünden maksimum güç elde etmek amaçlanmaktadır. Generatör tarafındaki evirici ile generatör hızı ve bu nedenle rüzgâr türbininin hızı kontrol edilmektedir. Rüzgâr hız ölçümü yapılmadan optimum çalışma noktasında rüzgâr enerji dönüşümü gerçekleştirilmektedir [26].

Westlake ve diğ. (1996): Rüzgâr türbini ile geleneksel DMSG'nin kullanılması anlatılmaktadır. Generatörün küçük kutup açısı, düşük hızlarda çalışmayı, doğrudan rüzgâr türbinine ve elektrik şebekesine bağlanmasını sağladığı ve bu nedenle generatörün rüzgâr türbinine doğrudan bağlanarak, dişli kutusu gerekliliğini ortadan kaldırdığı söylenmektedir. Ayrıca, geleneksel sönüm sargılarının olduğu bir generatör tasarımı, kullanılabilir alanın oldukça küçük olmasından dolayı elverişli olmadığı vurgulanmaktadır. Yapılan çalışmada stator, mekaniksel sönüm ve yaprak yay vasıtası ile rüzgâr türbin gövdesine bağlanarak dairesel dönme hareketi sınırlandırılması yoluyla alternatif sönüm sistemi anlatılmaktadır. Bu düzenleme, kullanılmakta olan geleneksel sönüm sargılarından daha büyük güç açısı osilasyonlarının sönümünü sağlamaktadır. Generatörün çalışma momentindeki basamak değişimlerine cevabı, böyle bir sistemin verimliliğini anlatmak için kullanılmaktadır. Tasarlanan sistemin uygunluğunu göstermek için, çalışma esnasında rüzgâr değişimi ve senkronlamada generatörün davranışları tartışılmaktadır [27].

Chinchilla ve diğ. (2006): Değişken hızlı rüzgâr generatörlerinden birinin (doğrudan sürülen DMSG) çalıştırılması ve kontrolü ele alınmaktadır. Bu generatör, darbe genişlik modülasyonu (PWM), ara DC devre ve PWM eviriciden oluşan tam kontrollü frekans dönüştürücüsü aracılığıyla güç şebekesine bağlanmaktadır. Generatör, farklı güç şartlarında maksimum verimle değişken hızdan maksimum güç elde etmek için kontrol edilmektedir. Şebeke tarafındaki eviricinin vektör kontrolü,

rüzgâr generatörünün güç faktörünün düzeltilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada, tüm sistemin dinamik performansı gösterilmektedir. Önerilen sistemin yararlarını doğrulamak için, 3 kW'lık bir prototip ile farklı deneysel testler yapılmaktadır [28].

Chen ve Spooner (2003): Değişken hızlı bir rüzgâr enerji dönüşüm sisteminde, doğrudan sürülen DM generatör için güç elektroniği ara yüzünden oluşan bir tristörlü dönüştürücünün şebekeye bağlanması sunulmaktadır. AC/DC/AC güç elektroniği ara yüzü başlıca bir diyot doğrultucu ve tristör dönüştürücüden oluşmaktadır. Optimum güç takibi için, türbin hızı ile eviricinin tetikleme açısı kontrol edilerek ayarlanabildiği ve tristörlü çevirici sisteminin reaktif gücü ile harmonik karakteristikleri, şebekeye bağlama standartlarını sağlayacak şekilde ayarlanmak zorunda olduğu vurgulanmaktadır. Reaktif güç kontrolünü sağlamak ve harmonik bozunumunu minimize etmek için aktif bir kompanzasyon sistemi tartışılmaktadır. Optimum çalışma şartlarında, aktif kompanzasyon için referans akımın kullanıldığı basit bir metot önerilmektedir. Birkaç kompanzasyon şeması dikkate alınmaktadır. Deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçlarının uyumluluğu sunulmaktadır [29].

Dai ve diğ. (2009): DMSG için yeni bir kontrol şeması sunulmaktadır. Yüksek güçlü rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri için generatör ve şebeke arasında köprü olarak akım kaynağı dönüştürücüsü kullanılmaktadır. Kontrol stratejisi, geliştirilen dinamik cevap ile daha iyi performanslar elde etmek için geliştirilmektedir. Önerilen kontrol şeması, dönüştürücü iletim kayıplarını azaltmak için DC hat akımını minimum bir değere düşürmektedir. Generatör tarafındaki güç ileri beslemeli uygulanarak sistemin dinamik performansı daha da geliştirilmektedir. Simülasyon ve uygulama sonuçları ile önerilen kontrol şemasının doğruluğu sunulmaktadır [30].

Barote ve diğ. (2013): DMSG ile bağımsız bir rüzgâr türbin sisteminin çalışması ve rüzgâr hızı ile yük değişimleri esnasında enerji depolama sistemi analiz edilmektedir. Enerji depolama cihazları, bağımsız enerji sistemlerindeki güç kalitesi ve güç ayarı için gerekli olduğu vurgulanmaktadır. İlk olarak, tüm sistemin tam modeli (DMSG, yükselten dönüştürücü ve depolama sistemi) elde edilmektedir. Uygun bir kontrol yöntemi, enerji depolama sistemleri ve önerilen rüzgâr türbini ile elde edilen güç, verimli bir şekilde yüklerle aktarılarak harcanmaktadır. Temel amaç, tek faz evirici ile 230 V/50 Hz ev cihazlarının beslemesini sağlamaktır. Simülasyon sonuçları,

deneysel testlerle doğrulanmaktadır. Kontrol sistemi, dSPACE DS1103 kullanılarak uygulanmaktadır [31].

Xu ve diğ. (2012): Yan yana gerilim kaynağı PWM dönüştürücülü DMSG rüzgâr türbini için geleneksel ve yeni bir kontrol mekanizması araştırılmaktadır. DMSG rüzgâr türbininin makine ve şebeke tarafındaki dönüştürücülerin kontrolü için akım vektör kontrol mekanizması üzerine temellendirilen bir yaklaşım sunulmaktadır. Daha sonra, şebeke gerilim besleme, reaktif güç ve DMSG maksimum güç çıkartım kontrollerini entegre etmek için optimum bir kontrol stratejisi geliştirilmektedir. Sabit ve değişken rüzgâr durumlarındaki DMSG rüzgâr türbini için geleneksel ve önerilen kontrol tekniklerinin performansını araştırmada SimPowerSystem kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışmaya göre, akım vektör kontrol yapısı kullanıldığı zaman, DMSG'nin iyi bir performansa sahip olduğu vurgulanmaktadır. Tasarlanan algoritma, farklı güçlerdeki generatörlerde uygulanarak sonuçları irdelenmektedir [32].

Morimoto ve diğ. (2006): Değişken hızlı içe gömülü DMSG için maksimum güç takibi kontrol algoritması sunulmaktadır. Generatör hızına göre maksimum güç takibi kontrol algoritması kullanılarak, generatör momenti kontrol edilmektedir. İçe gömülü DMSG akım vektörü, dönüştürücü kapasitesi göz önünde bulundurularak minimum generatör kayıpları ve maksimum çıkış gücü için kontrol edilmektedir. Ayrıca, dönüştürücü akım metodu, çıkış gücünü artırmak için yüksek hız bölgesinde sinüzoidal PWM kontrolden kare dalga şekline dönüştürülmektedir. Deneysel sonuçlar, önerilen kontrol metodunun verimliliğini doğrulamaktadır [33].

Nakamura ve diğ. (2002): Rüzgâr enerjisi sistemi için içe gömülü DMSG'nin optimum kontrolü sunulmaktadır. Maksimum güç takibi için, içe gömülü DMSG'nin maksimum verimlilik kontrolü ve MGNT kontrolü ile denetlenmektedir. İçe gömülü DMSG'nin momenti, generatör hızına göre uygun bir şekilde kontrol edilmektedir ve böylece rüzgâr hız algılayıcısı olmadan istenilen MGNT kontrolü ile rüzgâr türbin gücü maksimum güç noktasına ayarlanmaktadır. Ayrıca maksimum moment ve maksimum verimlilik kontrolü kullanılarak, içe gömülü DMSG'nin kayıpları minimum yapılmakta ve maksimum güç elde edilmektedir. Deneysel sonuçlar, önerilen kontrol metodunun verimliliğini göstermektedir [34].

Raju ve diğ. (2003): Güç dönüştürücülerin anahtarlama hesabının azaltılması ile değişken hızlı rüzgâr enerji dönüşüm sistemi şebekeye bağlanarak, çıkış gücün optimal çıkartımı için basit bir kontrol stratejisi sunulmaktadır. Maliyeti azaltıp, verimliliği artırmak için, B4-PWM dönüştürücüler kullanılmaktadır. Sistem, iki B4-PWM dönüştürücüsü ve dişli kutusu yoluyla DM bir senkron generatöre bağlanan değişken hızlı rüzgâr türbininden oluşmaktadır. DMSG'nin çıkış gücü, ilk olarak DC'ye dönüştürülmektedir ve sonra şebekeye aktarılmaktadır. İki güç dönüştürücüsü, güç faktörünü ve DC hat geriliminin sabit kalmasını sağlamaktadır. Sadece türbin çıkış gücünün ölçülmesi ile rüzgâr hızı elde edilerek optimum maksimum güç takibi yapılmaktadır. Tüm sistem değişik rüzgâr hızlarında simülasyonu yapılmaktadır. Kontrol algoritması, TMS320F24 DSP üzerinde uygulanmaktadır ve simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla uyumaktadır [35].

Chen ve diğ. (2002): Bulanık mantık denetleyici üzerine kurulan akıllı bir güç elektronik sistemi, değişken hızlı rüzgâr güç dönüşüm sistemleri için sunulmaktadır. Önerilen sistemde, türbin generatör sisteminin dinamik performans gelişimi ve maksimum güç takibi için elektro manyetik moment kontrolü, bulanık mantık ile yapılmaktadır. Tasarlanan sistem, rüzgâr hızının bilinmesine gerek duymamakta ve güç dalgalanmalarını etkili bir şekilde azaltmaktadır. Simülasyon sonuçları, önerilen metodun verimliliğini göstermektedir [36].

Senjyu ve diğ. (2006): Rüzgâr enerji sisteminin MGNT kontrolünün performansı için, optimum hızda rüzgâr türbininin sürülmesi gerektiği, bu nedenle, rotor pozisyonu ve rüzgâr hız sensörlerinin vazgeçilmez olduğu vurgulanmaktadır. Güvenilirlik bakımından ve maliyetin artması nedeniyle, rotor pozisyon sensörü ve rüzgâr hız sensörü genellikle tercih edilmediği belirtilmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmada, sensörsüz metot önerilmektedir. Buna ek olarak, DMSG'nin veriminin iyileştirilmesi de Powell Metodu ile optimum d eksen akımı kullanılarak gerçekleştirilmektedir [37].

Bai ve diğ. (2007): Küçük türbinle sürülen yüksek hızlı DM generatör, küçük hacimli, yüksek verim ve güç yoğunluğundan dolayı büyük ilgi gördüğü belirtilmektedir. Yüksek hızlı DM generatörün yüksek frekanslı çıkış gücü, AC/DC/AC dönüştürücü kullanılarak sabit frekans ve gerilimle alternatif güce

dönüştürülmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Diyot doğrultucu yoluyla normal AC/DC dönüşüm, generatörün sıcaklığını artıran ve ekstra kayıplara neden olan generatör sargılarındaki harmonik akımlarını ürettiği söylenmektedir. Yüksek hızlı generatörün akım harmoniklerini azaltmak için PWM doğrultucu/evirici birleşiminin yapı ve kontrol stratejisi bu çalışmada sunulmaktadır. Dönüştürücü, ilk olarak mikro türbini başlatmak için PWM evirici olarak generatörü sürmektedir ve daha sonra normal güç dönüşüm esnasında PWM doğrultucu olarak çalışmaktadır. Çift kapalı döngü (akım ve gerilim döngüsü) uygulanmaktadır. Simülasyon ve deneysel sonuçları, kontrol stratejisi ve önerilen tasarım yapısının uygulanabilirliğini göstermektedir [38].

Ryan ve Lorenz (2000): İçten yanmalı motorla sürülen DM generatörün ürettiği güç ile elektronik eviricinin beslendiği değişken hızlı bir güç dönüşüm sistemi incelenmektedir. DM generatörden elde edilen AC gerilim, tipik olarak diyotlarla doğrultulmakta ve evirici vasıtasıyla sabit frekans-sabit gerilim çıkışı elde edilerek kullanılmaktadır. İki kontrol tekniği uygulanarak karşılaştırılmaktadır. Sınırlamalar dışına çıkmayacak şekilde DC hat gerilimi değişimini ayarlayan bir “güç-haritalama” ve sabit DC hat gerilim ayarlama denetleyicisi kullanılmaktadır [39].

Acarney (1988): İnsansız uçak ve uzay gemisi için 10000-100000 d/dak aralığında ve 0,25-10 kW güç aralığındaki popüler konfigürasyonlar karşılaştırılmaktadır. Genel yaklaşım, formal optimizasyon metotlarını kullanarak, güç yoğunluğu değerlerini karşılaştırıp, güç ve hız aralıkları üzerinde her konfigürasyon için benzer şekiller üretilmesi beklenmektedir. Güç yoğunluğunda en iyi olan geleneksel radyal mıknatıs devresi görülmektedir. Rotor mıknatıs devresindeki akı yoğunluğu (2 kW’ın altındaki güç seviyelerinde ve 30000 d/dak üzerindeki hızlarda) daha iyi performans gösterebildiği söylenmektedir. Daha fazla özel konfigürasyonlar, örneğin kelepçeli rotor, daha basit konfigürasyonundan dolayı ekonomik olabildiği, fakat güç yoğunluğu açısından karşılaştırılamayacağı sonucuna varılmaktadır [40].

Ojo ve Omozusi (1997): Sınırlı bir DC kaynaktan beslenen, sürekli olmayan endüktans akım modunda çalışan alçaltıcı ve yükseltici DC-DC dönüştürücülerin kalıcı durum analizleri, bilgisayar simülasyonu ve modellemeden meydana gelmektedir. Sürekli olmayan DC kaynak, içe gömülü üç fazlı DM generatör

tarafından beslenerek üç faz köprü doğrultmalı diyotlardan elde edilmektedir. DC kaynak üzerindeki akım ve gerilim sınırlamaları, deneysel sonuçlar, hesaplama ve simülasyonlarla denetleyici performansı sunulmaktadır [41].

Li ve diğ. (2006): IGBT dönüştürücüden daha ucuz ve güvenilir olan diyot doğrultuculu dönüştürücü yoluyla şebekeye bağlanan rüzgâr türbin generatörünün güç ve hız kontrolü için basit bir strateji sunulmaktadır. Makalede, gereksinimlere göre düşük gerilimde çalışma ve maksimum güç noktası takibini sağlayan bir uygulama yapılmaktadır. Ayrıntılı modeller, sunularak uygulanmaktadır. AC hatta 3 faz toprak kısa devresi gibi uç olasılıklar ve değişken rüzgâr hızlarında rüzgâr türbin generatörünün performansı araştırılmaktadır. Önerilen kontrol stratejisi, performanslı hız cevabı ve düşük parametre duyarlılığı avantajlarına sahiptir. Yapılan çalışma, sistemin olasılık ve normal durumlarında rüzgâr türbin generatörünün iyi bir performansa sahip olduğunu göstermektedir [42].

Raju ve diğ. (2004): Şebekeye bağlı değişken hızlı rüzgâr enerji dönüşüm sisteminden çıkış gücünün optimum değeri için Birleştirilmiş Güç Formatı (Unified Power Format) sunulmaktadır. Sistem, dişli kutusu aracılığı ile değişken hızlı rüzgâr türbinine bağlı olan DMSG'nin, iki PWM güç dönüştürücüsü ve bir maksimum güç takipçisinden oluşmaktadır. İlk olarak DMSG'nin çıkış gücü doğrultularak evirilmekte ve sonra şebekeye aktarılmaktadır. İki güç dönüştürücüsü, güç faktörü ve DC hat gerilimini sabit tutmayı sağlamaktadır. PWM doğrultucu, faz gerilimi gibi faz akımı değişimine göre kontrol edilmekte ve PWM evirici ise histeresis akım denetleyici ile kontrol edilmektedir. Kontrol algoritması, TMS320F243 DSP üzerinde gerçekleştirilmektedir ve algoritmanın geçerliliği deneysel sonuçlarla doğrulanmaktadır. Sistemin simülasyon sonuçları, farklı rüzgâr hızlarına göre analiz edilmektedir [43].

Tan ve diğ. (2007): Diğer kontrol yöntemleri ile karşılaştırılarak, enerji kullanım çarpanını belirlemek için birkaç rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin modeli MATLAB/Simulink® yazılımı kullanılarak geliştirilmektedir. Performanslar değerlendirilerek, farklı kontrol stratejileri karşılaştırılmakta ve şebekeye enerji aktarım miktarı belirlenmektedir. 20 kW'lık bir DMSG için önceki tekniklere göre performans karşılaştırması yapılmaktadır ve farklı çalışma durumlarında maksimum

rüzgâr güç takibi yapılabilen yeni bir prototip kontrol stratejisi önerilmektedir. Bu mekanik sensörsüz kontrol stratejisinin maksimum güç takibi avantajları, deneysel sonuçlar ve sistemin simülasyonu sunulmaktadır [44].

Eskander (2002): DMSG'nin uygulandığı rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi için, çıkış gerilim regülasyonu ve maksimum gücü izlemeyi başarmak için YSA denetleyicisi önerilmektedir. DM generatör, iki buck-boost dönüştürücüsü ve köprü doğrultucu yoluyla DC bir yükü beslemektedir. Birinci buck-boost dönüştürücünün anahtarlama frekansı ayarlanarak maksimum güç takibi sağlanmaktadır. İkinci buck-boost dönüştürücünün anahtarlama frekansı ayarlanarak çıkış gerilim regülasyonu gerçekleştirilmektedir. Rüzgâr hızında veya referans gerilimdeki ani değişimlerin etkilerini YSA kullanılarak denetlenmektedir. Simülasyon sonuçları, geliştirilen YSA denetleyicisi ile eş zamanlı olarak maksimum güç takibi ve çıkış gerilim düzeltiminin mümkün olduğunu göstermektedir[45].

Arkadan ve Demerdash (1988): Çoklu sönüm devreleriyle DM generatörün modellenmesi üzerine iki ortak makaleden 2.si olan bu makalede, bilgisayar destekli yöntemle parametrelerinin belirlenmesi ve geçici performansların modeli sunulmaktadır. Metot, sonlu elemanların manyetik alan hesaplama metotları ve enerji akım yörüngesi birleşiminden belirlenen abc makine sargı parametrelerinin olduğu doğal abc referans düzlemindeki durum metotlarının kullanımı ve geliştirilmesi üzerine temellendirilmektedir. Uygulanan yöntemle, yüklü ve orantılı yüklü şartlarda çalıştırılan generatörün geçici karakteristikleri üzerine çeşitli generatör hatalarının etkileri incelenerek, çoklu sönüm devreleriyle 2 kutuplu, 75 kVA, 208 V, 24000 d/dak DM generatöre uygulanmaktadır. Doğal abc düzlemi durum modellerinden yararlanılmaktadır. Model, makinenin sönüm sargılarının tasarlanması açısından daha fazla araştırma yapmak için kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçların ışığında, elektrik makinelerini modellemede doğal abc referans düzleminin avantajları aydınlatılarak açıklanmaktadır [46].

Arkadan ve diğ. (1989): Elektronik olarak doğrultulmuş yüklü bir DM generatör sistemlerinin dinamik performansını tahmin ve analiz yapabilen bilgisayar temelli modelleme metodu sunulmaktadır. Bu generatörler çoklu sönüm devreleri içermektedir. Bazı sistemlerdeki elektronik anahtarlama, makine sistem ağı



topolojilerinde sürekli bir değişime neden olduğu belirtilmektedir. Bundan dolayı yapılan çalışmada, bazı sistemlerin ağ modellemesi hızlı bir temel üzerine yapılmaktadır. Çalışmada, doğal abc referans düzlemi kullanılmaktadır. Bu metot, generatör yük sistem performansı için çalışmak üzere iki kutuplu 75 kVA, 208 V, 2400 d/dak DM generatöre uygulanmaktadır. Buna ek olarak, doğrultucu ünitesindeki elektronik eleman eksikliğinin etkileri sunulmaktadır [47].

Yukarıda genel özeti verilen çalışmaların çoğu aşağıda belirtilen tasarım felsefelerini dikkate alarak yapılmıştır:

- Düşük maliyet
- Hafiflik
- Düşük hız
- Yüksek moment
- Değişik hızlarda üretim

Bu kriterlere göre DMSG, rüzgâr türbini, DC motor, AC motor, içten yanmalı motorlarla tahrik edilerek kullanılmaktadır ve çeşitli maksimum güç takip yöntemleri ile elde edilen güç şebekeyi, aküyü veya bir yükü beslemektedir. Yapılan araştırmalar içerisinde dişli kutusuz [2-32] ve dişli kutulu [33-37] çalışmalar vardır. İrdelenen çalışmaların [2-10, 36, 37, 45-47]'si simülasyon, [11-35, 38-44]'si uygulamalı çalışmalardır. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi sitesinden yapılan araştırma sonucu, Türkiye'de radyal akılı DMSG'ler ile ilgili yapılan tezlerin özetleri aşağıdaki gibidir:

Birin (2008): Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin şebekeye tam ölçekli güç dönüştürücüsü ile bağlanan daimi mıknatışlı senkron generatörlü ve şebekeye kısmi ölçekli güç dönüştürücüsü ile bağlanan çift beslemeli asenkron generatörlü (Doubly Fed Induction Generator) olmak üzere farklı iki tür modellemesi yapılmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin arıza durumunda çalışmaları ve rüzgâr değişimi sırasındaki dinamik davranışları ile ilgili simülasyonlar yapılarak, generatörlerin ve

türbinlerin performansları incelenmektedir. Mevcut sistemlerin verimleri ve maliyetlerinin karşılaştırmaları yapılmaktadır [48].

Koç (2010): Bu çalışmada ilk olarak farklı tipte değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin detaylı modellenmesi anlatılmaktadır. Daha sonra, rüzgâr sistemlerinin şebekeye bağlantısı için gerekli şebeke yönetmeliklerinin aktif/reaktif güç desteği, arıza sonrası sisteme destek verme yetenekleri gibi önemli kısımları incelenmektedir. Rüzgâr türbinlerinin arıza sonrası destek verme yeteneklerinin incelenmesi bu tezin ana konusudur. Bu problemin farklı tipteki rüzgâr türbinlerinde hangi metotlarla çözümlendiği detaylı bir biçimde anlatılmaktadır. Bunun yanında, çift beslemeli asenkron generatörler ve sabit mıknatıslı senkron generatörlerin kullanıldığı rüzgâr türbin modelleri, bir güç sistemi analiz programı olan PSCAD/EMTDC kullanılarak oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu modellerde yapılan simülasyon sonuçları kullanılarak rüzgâr türbinlerinin arıza sonrası sisteme katkıları, sistemin hata anındaki tepkileri incelenerek karşılaştırılmaktadır [49].

Başar(2009): Bu tezde, rüzgâr türbini uygulamaları için yüzeye montajlı DMSG'lerin Moment Kontrolü için denetleyiciler tasarlanmakta ve test edilmektedir. Önerilen sistem MATLAB/Simulink® ortamında modellenerek simülasyonu yapılmaktadır [50].

Gürkaynak (2006): Geleneksel rüzgâr türbinlerine ve günümüzde kullanılan değişken hızlı rüzgâr türbinleri irdelenmekte ve literatürdeki bazı maksimum güç takibi yapıları anlatılmaktadır. Kontrolsüz tam dalga doğrultucu, türbin, senkron makine ve eviriciye ait modeller oluşturulmaktadır. Oluşturulan sistemin optimum şekilde çalışması için maksimum güç takip algoritması önerilmektedir. Evirici kontrolü histerezis denetleyici ile yapılmaktadır. Tasarlanan denetleyicinin özellikleri, dayanıklı olması, davranışının sistem katsayılarından bağımsız olması, geçici hal davranışı göstermemesi ve güç faktörünü bağımsız olarak değiştirebilmektedir. Oluşturulan topoloji, MATLAB/Simulink® ortamında modellenmektedir [51].

Gökalan (2011): Tez çalışmasında üç faz DMSG tabanlı direkt sürülen değişken hızlı rüzgâr türbin sisteminin kontrolü ve şebeke bağlantısı anlatılmaktadır. Kurulan sistem DC motor, DMSG, tam ölçekli AC-DC ve DC-AC gerilim kaynaklı dönüştürücüden oluşmaktadır. Generatör şebekeye sırasıyla AC-DC ve DC-AC tam

ölçekli gerilim kaynaklı dönüştürücüler ile bağlanmaktadır. Generatörün hızı sensörsüz alan yönlendirme metodu ile kontrol edilmektedir. Generatörün sensörsüz alan yönlendirme kontrolü için gerekli hız ve konum bilgisi kayan tipte gözetleyici (sliding mode observer) kullanımı ile elde edilmektedir. Şebeke tarafındaki üç faz DC-AC evirici güç devresi aracılığı ile DC link gerilimi, generatör ve şebeke arasındaki aktif ve reaktif güç akışı kontrol edilmektedir. Generatör tarafındaki AC-DC kontrollü doğrultucunun kontrolünde olduğu gibi DC-AC eviricinin kontrolünde de senkron referans yapı tercih edilmekte ve evirici güç devresi modülasyonu uzay vektör modülasyon tekniğine göre yapılmaktadır. Şebeke akımları ile şebeke gerilimlerinin senkronizasyonu dq-PLL kontrol ile sağlanmaktadır. dq-PLL kontrolün şebeke harmonik ve gürültülerden etkilenmesini önlemek için şebeke gerilimleri ilk önce ayarlamalı band söndüren (adaptive notch filter) filtreden geçirilip temel bileşen ve harmonik bileşenlerine ayrılmakta ve daha sonra temel bileşenler dq-PLL kontrol yapısında kullanılmaktadır. ACSLX programı ile 1kW çıkış gücü olan sistemin benzetimi yapılmaktadır. Deneysel çalışmalarda ise nominal çıkış gücü 55W olan DMSG kullanılarak generatörün, sensörsüz kontrolü test edilmektedir [52].

Kütük (2011): DMSG tasarımı yapılmaktadır. Elektrik makinesi tasarımı yazılımları desteği ile makine modeli kurularak çeşitli çalışma koşullarında analizi yapılmaktadır. Sonlu elemanlar analizi ile tasarımın manyetik çözümlemesi yapılmaktadır. Makinenin çalışma şartlarındaki ısı analizi yapılmaktadır. Mekanik tasarım ve analizler sonucunda DMSG tasarımı tamamlanmaktadır [53].

Çetin (2006): Bu çalışma, sistem parametrelerinin belirlenmesi ve optimizasyonu için yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Otonom (şebeke bağlantısız) rüzgâr türbinlerinde, sistem optimizasyonu için uygun bir algoritma sunulmaktadır. Bu algoritma, back-propagation (geriye-yayılım) kullanılarak YSA'nın eğitime dayanmaktadır. Yapılan çalışma üç eğitime aşamasından oluşmaktadır. İlk olarak; sistemin kurulacağı yerin yıllık ortalama rüzgâr hızından, yüksekliğe bağlı bir şekilde, rüzgâr türbininin enerji üretebileceği rüzgâr hızlarının esme süreleri tahmin edilmektedir. Bunun için yapılacak eğitimde; farklı yerlere ait yıllık ortalama rüzgâr hızları ve Hellman yükseltme katsayıları kullanılmaktadır. Yapılan eğitim genelleştirilerek, optimizasyonun istenen her hangi bir yere uygulanması

sağlanmaktadır. Daha sonra; her hangi bir yerde kurulu olan ve farklı kanat boyları (farklı güçler) ile birlikte uygun generatör kullanılarak elde edilen ölçüm sonuçlarından; rüzgâr hızı, güç faktörü, elektriksel güç ve uç hız oranı değerleri tahmin edilmektedir. Burada ilave olarak kurulu sistemlerin güç faktörü eğrileri de grafiksel olarak elde edilmiştir. Yapılan bu iki eğitim sonunda elde edilen değerlere bağlı, üçüncü bir eğitim ile de yıllık enerji üretimi ve akümülatör kapasitesi tahmin edilmiştir. Son olarak sistemin birim enerji maliyetinin şebekeyle karşılaştırılması yapılmıştır. Uygulama olarak; önerilen yaklaşımın geçerliliği, Urla'da kurulan 5 kW'lık otonom sistem ile test edilmektedir [54].

Literatür ve Türkiye'de yapılan çalışmalara bakıldığında, YSA ile gerçek zamanlı maksimum güç takibi laboratuvar ortamında uygulamalı olarak gerçekleştirilmemiştir. Bu nedenle yapılan doktora tezi literatüre ve ülkemize yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili önemli bir katkı sağlanacaktır.

## **1.2. Tezin Amacı ve İzlenen Yöntem**

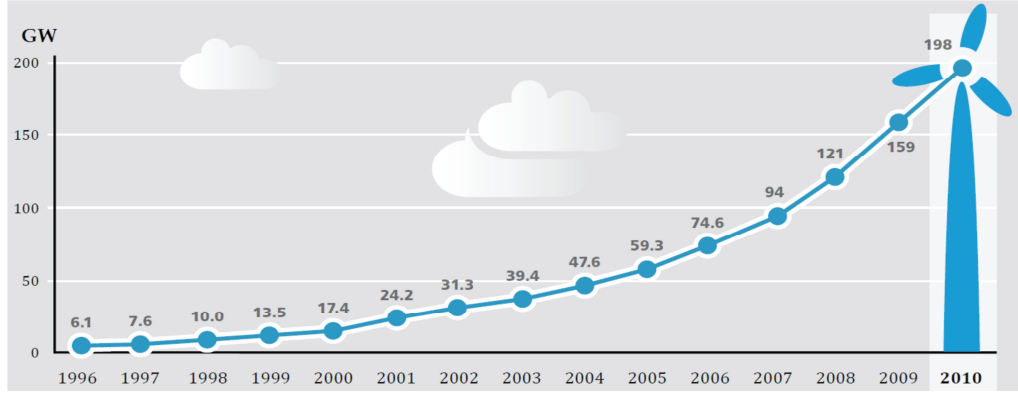
Son yıllarda DMSG'lerde MGNT için YSA ile yapılan çalışmalar [2, 46, 55-58], genellikle simülasyon ağırlıklıdır. Kaynak [2]'de; YSA'nın kullanıldığı küçük bir rüzgâr sisteminde, rüzgâr türbini güç katsayısı eğrisinden potansiyel sürüklemeye karşı maksimum rüzgâr güç takip kontrolü ve rüzgâr hız tahmini ile ilgili simülasyon çalışması yapılmaktadır. Kaynak [46]'da; DMSG sistemi için geliştirilen YSA denetleyicisi ile maksimum güç takibi yaparak, çıkış gerilim düzeltiminin de yapılabileceği simülasyon sonuçları ile birlikte sunulmaktadır. Kaynak [55]'de; YSA ile rüzgâr hız tahmini simülasyonu yapılarak, değişik rüzgâr hızlarındaki maksimum güç takip performans analizi sunulmaktadır. Kaynak [56]'da; Jordan tip YSA ile rüzgâr hız tahmini yapılarak simülasyon sonuçları analiz edilmektedir. Kaynak [57]'de; uyumlu lineer eleman (adaptive linear element) temelli YSA kullanılarak, önerilen gerilim frekans denetleyicisinin kontrolü ile ilgili simülasyon sonuçları analiz edilmektedir. Kaynak [58]'de ise; doğrusal olmayan otoregresif değişken ortalama (Nonlinear Autoregressive Moving Average) YSA modeli kullanılarak rüzgâr ve hız tahmini ile ilgili simülasyon sonuçları analiz edilmektedir. Bununla birlikte, DMSG'lerin kullanımına ilişkin birçok maksimum güç takip kontrol algoritması bulunmaktadır [59-99]. Bu tezin amacı; simülasyon metodu ile birlikte

uygulama metodunu gerçekleştirmek ve sonuçları karşılaştırılarak analiz etmektir. Bu bağlamda yapılan çalışmada, yeni ve basit bir kontrol algoritması ile maksimum güç takibinin yapılabilceği sunulmaktadır. Laboratuvar ortamında kurulan deneysel düzenek ile YSA denetleyici kullanılarak DMSG'nin maksimum güç takibi yapılmaktadır. MGNT'de YSA denetleyicisinin, Arama Tablosu (AT) ve Eğri Uydurma (EU) denetleyicilere göre üstünlükleri irdelenmektedir. Rüzgâr hızına göre elde edilen referans hızlarda eğitilen YSA'nın, eğitimde kullanılmayan hızlardaki MGNT analizi yapılmaktadır. Kullanılan dsPIC sürücü kartı ile fazların sıfır geçiş noktaları tespit edilmekte ve YSA tabanlı kontrol algoritmasından elde edilen anahtarlama açılarına göre maksimum güç noktalarında sistem çalıştırılmaktadır.

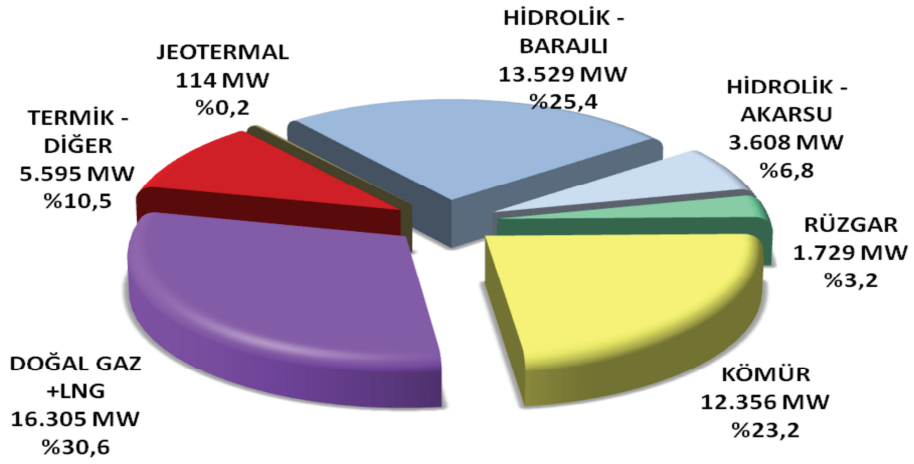
## 2. RÜZGÂR TÜRBİNİ KAVRAMLARI VE GENERATÖR TİPLERİ

Değişik rüzgâr türbin kavramları, dünya çapında kurulan rüzgâr enerji kapasitesinin önemli ölçüde büyümesi ve rüzgâr enerjisi teknolojilerinin hızlı gelişmesi ile artmaktadır. Günümüzde rüzgâr enerjisi, dünyanın en hızlı gelişen yenilenebilir enerji kaynağıdır. 2010 yılında dünya genelinde 39 GW rüzgâr kurulu gücü devreye girmiş, toplam kurulu güç 198 GW'a ulaşmıştır. 2010 yılında devreye alınan kapasitenin 18,9 GW'ı Çin'e aittir. Bunun sonucu olarak Çin, rüzgâr enerjisi kurulu gücünü 44,7 GW'a çıkararak bu alanda birinciliğe yükselmiştir. İkinci sıraya gerileyen ABD'nin rüzgâr enerjisi kurulu gücü 2010 sonu itibariyle 40,2 GW'tır [100]. Rüzgâr enerjisi kurulu gücünde Çin ve ABD'yi Almanya (27,2 GW) ve İspanya (20,7 GW) izlemektedir. 2010 yılında rüzgâr enerjisinden Almanya'da 37 TWh, İspanya'da 43 TWh elektrik üretilmiştir. Avrupa Birliği ülkelerindeki toplam rüzgâr enerjisi kurulu gücü 2010 sonu itibariyle 84 GW'tır [100]. Şekil 2.1'de dünyada rüzgâr enerjisi kurulu gücünün gelişim eğrisi görülmektedir. Şekil 2.1'e göre, rüzgâr türbin generatörleriyle üretilen elektrik gücü için küresel pazar payı, rüzgâr teknolojisini daha fazla rekabetçi bir alan içerisine doğrudan iterek durmadan arttığı açıkça görülmektedir.

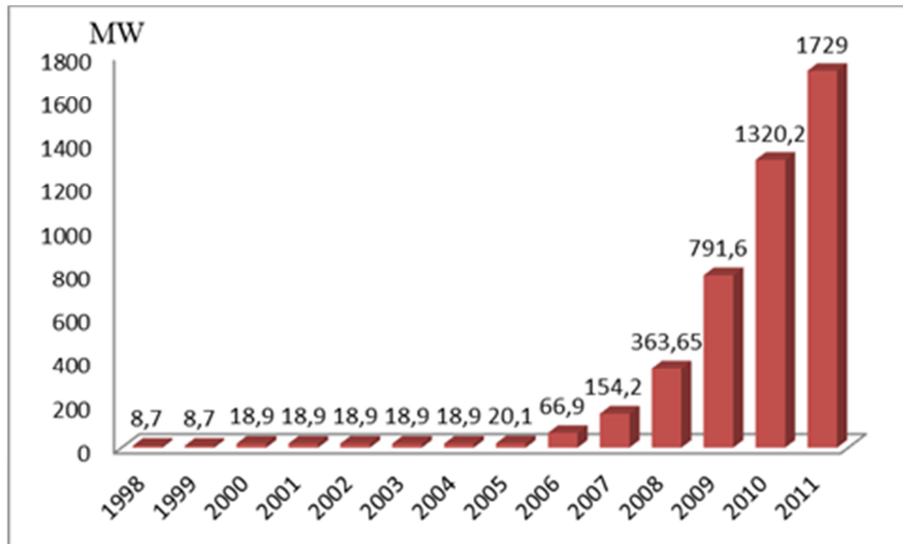
Ocak 2012 elektrik mühendisleri odası enerji verimliliği raporuna göre; Türkiye'de elektrik enerjisi kurulu gücü 2011 sonu itibariyle 53,235 GW'a ulaşmıştır. Elektrik enerjisi kurulu gücünün %30,6'sını doğal gaz ve LNG (Sıvı Doğal Gaz)'ye dayalı, %23,2'sini kömüre dayalı santraller oluşturmaktadır. Buna göre; Şekil 2.2'de Türkiye'de elektrik enerjisi kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı görülmektedir [101]. Şekil 2.3'de ise Türkiye'de rüzgâr enerjisi kurulu gücünün yıllara göre gelişimi görülmektedir [101, 102]. Türkiye'de rüzgâr enerjisine olan ilginin hızlı bir şekilde arttığı Şekil 2.3'de açıkça görülmektedir.



Şekil 2.1. Dünyada rüzgâr enerjisi kurulu gücünün gelişimi [100]



Şekil 2.2. Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı [101]



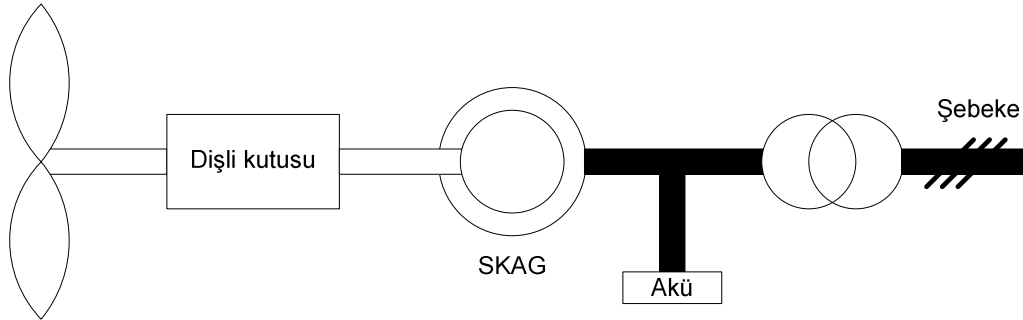
Şekil 2.3. Türkiye’de rüzgâr enerjisi kurulu gücünün yıllara göre gelişimi

Modern rüzgâr enerjisi dönüşüm teknolojisinin gelişimi 1970'lerden beri devam etmektedir. Bu gelişim sürecinde çeşitli rüzgâr türbini kavramları ve farklı rüzgâr generatörleri ortaya çıkmıştır. Dönüş hızına dayanarak, rüzgâr türbini kavramları sabit hız, sınırlı değişken hız ve değişken hız olarak sınıflandırılabilir. Sürücü eğitim bileşenleri göz önüne alınarak, rüzgâr türbini kavramları dişli kutulu ve doğrudan sürülebilir rüzgâr türbinleri olarak sınıflandırılabilirler. Dişli kutulu rüzgâr türbinlerinde konfigürasyon olarak, yüksek hızlı bir generatör ve çok kademeli dişli kutusu bulunmaktadır. Düşük hızlı bir generatörde ise tek kademeli bir dişli kutusu bulunmaktadır [103].

Bu bölümde, çağdaş rüzgâr türbini kavramlarına göre, temel konfigürasyonları ve farklı rüzgâr generatörü sistemlerinin özellikleri açıklanmaktadır. Ortaya çıkan bu kavram ve generatör çeşitleri aşağıdaki gibi özetlenmektedir.

## 2.1. Sabit Hız Kavramı

Sabit hızlı rüzgâr generatör sistemleri, çok kademeli dişli kutulu ve Şekil 2.4'de görüldüğü gibi transformatör yoluyla şebekeye doğrudan bağlanan Sincap Kafesli Asenkron Generatör (SKAG) ile kullanılmaktadır.



Şekil 2.4. SKAG sistemi ile sabit hız kavramının şeması

SKAG, sadece senkron hız aralıklarında generatör olarak çalıştığı için Şekil 2.4'deki tasarım kullanılmaktadır. Bu tip rüzgâr türbini, genellikle sabit hızlı rüzgâr generatörü olarak isimlendirilir. Bu kavramı, Danimarka rüzgâr türbini üreticileri 1980 ve 1990'larda kullanmıştır. Bu tasarım, SKAG ve üç kanatlı rüzgâr türbininden oluşmaktadır [104, 105]. SKAG, şebekeden sürekli reaktif güç çektiği için, 1980'lerde bu kavram reaktif güç kompanzasyonu için kondansatörlerle kullanıldı. Şebekeye daha iyi bir şekilde bağlantıyı sağlamak için yumuşak geçiş elemanları

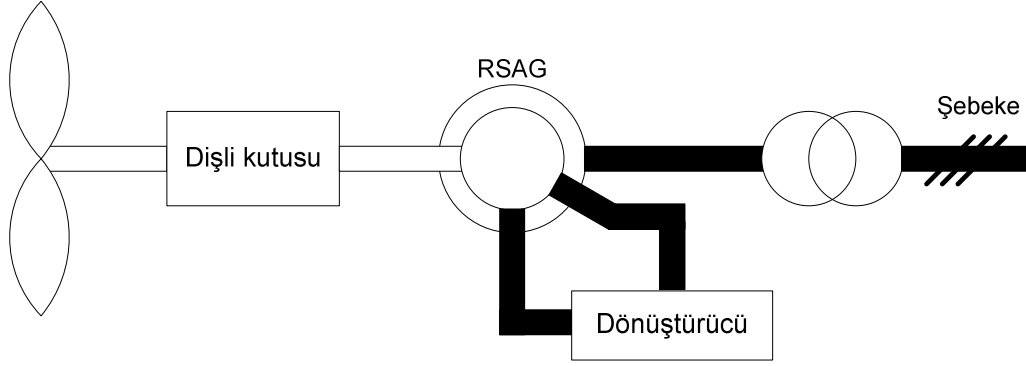


kullanıldı. Ayrıca değişken kutuplu SKAG, çift hızlı olarak kullanılmaktadır. Micon gibi bazı üreticiler (şu anda Vestas olarak birleştirilen), Bonus (şu anda Siemens), Made ve Nordex, bu kavramlara dayalı ürünlere sahiptirler.

SKAG'nin bilinen avantajları, sağlam, kolay ve nispeten seri üretim için maliyeti uygundur. Sabit hız rüzgâr türbini kavramı için SKAG'nin dezavantajları ise şunlardır [104-108]: Hız kontrol edilemez ve değişkendir, sadece senkron hızdan büyük hızlarda çalışması mümkün olan dar bir hız aralığında çalışabilmektedir. Çünkü daha yüksek bir kayma, rotor çubuklarındaki elektrik enerjisinin daha yüksek olması anlamına gelir. Ayrıca, rüzgâr hızı dalgalanmaları doğrudan elektromekanik moment değişimlerine neden olduğundan türbinlerin sabit hızda dönmesi istenmektedir. Hız dalgalanmaları, sistemde yüksek mekanik ve yorgunluk gerilmelerine (türbin kanatları, dişli kutusu ve generatör) neden olur ve türbin ile generatör mili arasında salınım titreşimlerine neden olabilir. Aerodinamik verimlilik optimize etmek için, rüzgâr hızı ile türbin hızı ayarlanamayabilir. Sürücü eğitimindeki üç aşamalı dişli kutusu, bu rüzgâr türbin kavramı için gereklidir. Dişli kutusu, sistemde büyük bir ağırlığa neden olur ve yatırım maliyetlerinin de büyük bir bölümünü oluşturur. SKAG'nin stator sargılarında mıknatıslama akımının elde edilmesi gerekir. Bu ise şebekeyi beslemek için gerilim kontrolünü imkânsız kılar. Çoğu durumda, reaktif güç tüketim kompanzasyonu için generatöre paralel kondansatörler bağlanır.

## **2.2. Sınırlı Değişken Hız Kavramı**

Çok kademeli dişli kutusu ile sınırlı değişken hız kavramı, 1990'ların ortalarından beri Danimarkalı Vestas üreticisi tarafından uygulanan Optislip kavramı olarak bilinmektedir [105]. Bu rüzgâr türbini kavramı, Şekil 2.5'de görüldüğü gibi açı kontrollü yöntem ve bir güç elektroniği dönüştürücüsü yoluyla değişken rotor direnci ile Rotoru Sargılı Asenkron Generatör (RSAG) kullanılmaktadır. Halen Vestas ve Suzlon üreticileri bu kavrama dayalı ürünlere sahiptirler.

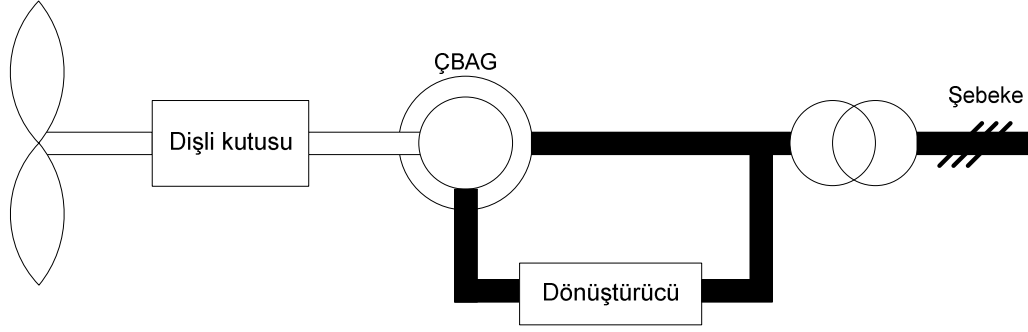


Şekil 2.5. RSAG ile sınırlı değişken hız kavramının şeması

RSAG'nin statoru doğrudan şebekeye ve rotor sargısı kontrollü bir dirence bağlıdır. Değişken hız çalışması, RSAG rotorundan elde edilen enerji kontrol edilerek yapılabilir; ancak, bu güç dış dirençle harcanmalıdır. Değişken hız aralığındaki artış ile daha büyük bir kayma rotor tarafından elde edilen yüksek bir güç ve daha düşük generatör verimi demektir, böylece direnç oranı da yüksek olmalıdır. Bu nedenle dinamik hız kontrol aralığı değişken rotor direncinin büyüklüğüne bağlıdır ve harici direnç ile enerji harcanması da kontrollü rotor direncinde ısı olarak harcanır. Tipik sınırlı değişken hız aralığı, senkron hız üzerindeki hızdan %10 daha azdır [104-106]. Ayrıca, reaktif güç kompanzasyonu ve yumuşak bir yol verici de bu kavram için gereklidir.

### 2.3. Kısmi Ölçekli Güç Dönüştürücü ile Değişken Hız Kavramı

Bu tasarım, rotoru tahrikli asenkron generatörlü değişken hızlı rüzgâr türbinine karşılık gelen Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) olarak bilinmektedir ve rotor üzerindeki kısmi ölçekli güç dönüştürücülü şema Şekil 2.6'da görülmektedir. Stator doğrudan ve rotor ise bir güç elektroniği dönüştürücüsü aracılığıyla şebekeye bağlanmaktadır. Güç dönüştürücü denetimi ile rotor frekansı ayarlanarak, hız kontrolü yapılmaktadır. Bu kavram, frekans dönüştürücünün büyüklüğüne bağlı olarak geniş bir hız aralığında çalışmayı sağlamaktadır. Tipik olarak senkron hız aralığı,  $\pm\% 30$  dolaylarındadır [104-106]. Güç elektroniği dönüştürücüsü oranının generatör kapasitesinin sadece % 25-30'u olması, bu kavramı ekonomik açıdan cazip ve popüler yapmaktadır. Piyasada bu kavramı kullanan Vestas, Gamesa, Repower ve Nordex gibi birçok üretici bulunmaktadır. Repower, ÇBAG ile ticari rüzgâr türbini için, en yüksek (5 MW'dan büyük) kapasiteye sahiptir.



Şekil 2.6. ÇBAG sistemi ile değişken hız kavramının şeması

Optislip kavramı ile karşılaştırıldığında, rotor enerjisi dirençlerle harcanmaktansa, güç elektroniği dönüştürücüleri ile şebeke beslenmektedir. Ayrıca, güç dönüştürücü sistemi reaktif güç kompanzasyonu ve sorunsuz şebeke bağlantısını gerçekleştirebilir. Örneğin şebeke tarafındaki dönüştürücü, generatör çalışmadan bağımsız olarak reaktif gücü kontrol edebilir. Bu ise şebekeye sorunsuz gerilim besleme performansı sağlar. Ancak, ÇBAG sisteminin şu dezavantajları vardır [104-108]:

- ÇBAG için hız aralığı 10-25 d/dak'lık genel bir türbin hızından büyük olduğu için çok kademeli dişli kutusunun kontrolü gerekmektedir. Bir dişli kutusu, sürtünmeden dolayı ısınma, düzenli bakım ve gürültü gibi bazı dezavantajları beraberinde getirmesi kaçınılmazdır.
- Düzenli bir bakım, makine arızalanması ve elektrik kayıplarına neden olabilen kayan halka, kısmi dönüştürücü yoluyla rotor gücünü aktarmada kullanılmaktadır.
- Şebeke hatası durumlarında, diğer bir ifadeyle büyük rotor akımlarında büyük stator akımlarının oluşması, güç elektroniği dönüştürücülerinin yanmaması için önlem almak gerekir. Öte yandan, büyük stator akımları, rüzgâr türbinlerinin sürücü eğitimi üzerinde yüksek moment yüklerine neden olabilir.
- Rüzgâr türbinleri için şebekeye bağlanma şekillerine göre, şebeke bozuklukları durumunda, kontrol stratejileri karmaşık olabilir diye ÇBAG'nin özelliğine göre de sürülmelidir.

## **2.4. Tam Ölçekli Güç Dönüştürücü ile Değişken Hız Doğrudan Sürme Kavramı**

Bu konfigürasyon, tam ölçekli bir güç dönüştürücüsü aracılığıyla şebekeye bağlanan ve doğrudan sürülen generatör ile değişken hızlı bir rüzgâr türbinine karşılık gelebilir. Dişli kutulu rüzgâr türbinleri ve doğrudan sürülen tipler arasındaki en önemli fark, generatör hızıdır. Generatör rotoru, türbin rotoru göbeğine doğrudan bağlandığı için, doğrudan sürülen generatör düşük hızda döner. Düşük hızda belli bir güç aktarımı için daha yüksek bir moment üretmesi gerekmektedir. Daha yüksek moment, generatör hacminin daha büyük olması anlamına gelir. Bu nedenle doğrudan sürülen generatörler için, düşük hız ve yüksek momentle çalışma, çok kutuplu yapıyı gerektirir. Bu ise generatör çapının büyümesine neden olur. Ayrıca, akım yükü ve hava aralığı akı yoğunluğu sınırlamaları göz önünde bulundurularak doğrudan sürülen daha büyük generatörler için, daha yüksek bir moment daha büyük bir makine hacmi gerektirir ki moment yoğunluğu daha fazla artırılamayabilir. Verimliliği artırmak, aktif parçaların ağırlığını azaltmak ve sargı kayıplarını küçük tutmak için, genellikle büyük çaplı ve küçük kutup açılı doğrudan sürülen generatörler tasarlanmaktadır [109, 110]. Ayrıca, dişli kutusunun çıkarılması ile doğrudan sürülen rüzgâr türbinlerinin avantajları; kontrol yönteminin basitliği, yüksek verimlilik ve yüksek güvenilirliktir.

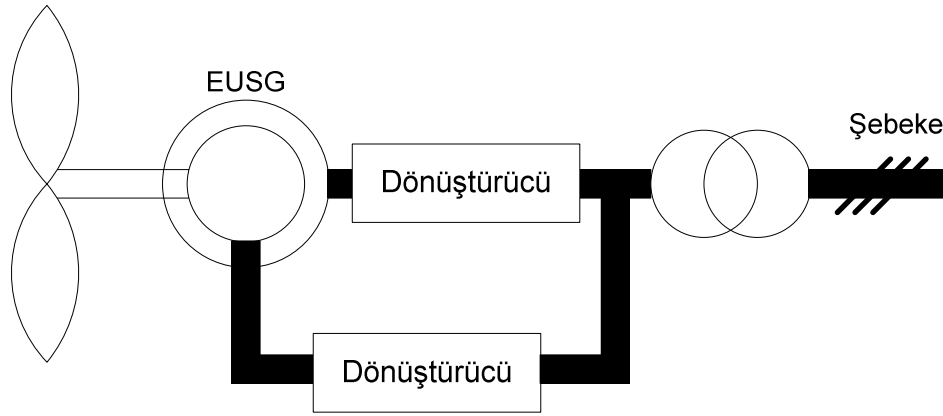
Kısmi ölçekli güç dönüştürücüleri ile değişken hız kavramı karşılaştırıldığında, tam ölçekli güç dönüştürücüsü, tüm hız aralıklarında doğru bir şebeke bağlantısı yapabilir. Ancak, daha yüksek maliyetlidir ve üretilen tüm güç, dönüştürücüden geçmek zorunda olduğu için güç elektroniğindeki kayıplar daha yüksektir.

Temel olarak, piyasada kullanılan doğrudan sürülen generatör tipleri, Elektriksel Uyarımlı Senkron Generatör (EUSG) ve DMSG olarak sınıflandırılabilir. EUSG'nin temel özellikleri Bölüm 2.4.1'de, DMSG'nin farklı topolojideki özellikleri ise Bölüm 2.4.2'de anlatılmaktadır.

### **2.4.1. Elektriksel uyarımlı senkron generatör**

EUSG, genellikle DC uyarımla oluşturulan manyetik alan sistemini taşıyan bir rotordan yapılmaktadır. Statorda, asenkron makineye oldukça benzeyen üç fazlı bir sargı bulunmaktadır. Rotor, çıkık kutuplu veya silindirik olabilir. Çıkık kutuplar,

daha çok düşük hızlı makinelerdir ve doğrudan sürülen rüzgâr türbinleri için en kullanışlı yapı olabilir. Doğrudan sürülen rüzgâr türbinleri için bir EUSG'nin şebekeye bağlantı şekli Şekil 2.7'de görülmektedir. Gerilimin genliği ve frekansı, generatör tarafındaki güç elektroniği ile tamamen kontrol edilebilir. Buna ek olarak, rotor tarafındaki güç dönüştürücüsü aracılığıyla uyarma akımı kontrol edilebildiği için EUSG, farklı güç aralıklarında minimum kayıp için akıyı kontrol etme imkânına sahiptir. Ayrıca, sert atmosferik koşullarda performans kayıplarına neden olan ve generatör maliyetlerinin büyük bir kısmını temsil eden sabit mıknatısların kullanılmasını gerektirmemektedir. Bu nedenle, piyasada en çok kullanılan doğrudan sürülen generatör tipidir [107].



Şekil 2.7. Doğrudan sürülen bir EUSG sisteminin şeması

Dişli kutulu rüzgâr türbinleriyle, doğrudan sürülen rüzgâr türbinleri karşılaştırıldığında, doğrudan sürülen EUSG sistemlerinin bazı dezavantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir [109, 110].

- Kutup ayakları ve uyarma sargılarına yer ayarlamak amacıyla, büyük çaplı özel tasarım için kutup açısı yeteri kadar büyük olmak zorunda. Böylece, parçalar ve sargılar daha çok sayıda olarak, ağırlığın artmasına ve pahalı bir çözüme sebep olacaktır.
- Alan kayıpları, kayan halkalar ve fırçalar kullanılarak DC gerilim ile rotor sargılarının uyarılması gerekir.

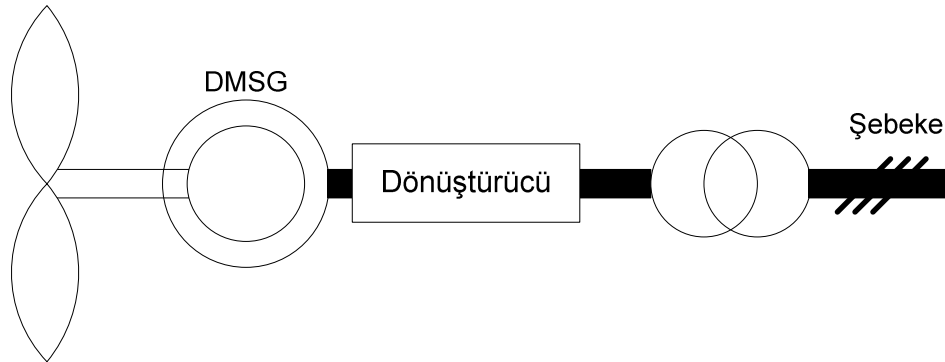
## 2.4.2. DM senkron generatörler

Doğrudan sürülen rüzgâr türbin generatörleri için şebekeye bağlı DMSG'nin blok diyagramı Şekil 2.8'de görülmektedir. DM makinelerin avantajları, literatüre göre aşağıdaki gibi özetlenebilir [109, 111-114]:

- Daha yüksek verimlilik ve enerji verimi,
- Mıknatıs alan uyarımı için ekstra güç kaynağına gerek yoktur,
- Alan kayıplarının olmamasından dolayı DMSG'nin termal özelliklerindeki gelişme,
- Kayma halkaları gibi mekanik bileşenlerinin olmaması nedeniyle daha yüksek güvenilirlik,
- Daha hafif ve bu nedenle ağırlık oranına göre daha yüksek bir güç.

Ancak, DM makinelerin bazı dezavantajları vardır. Bunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- DM malzemelerin yüksek maliyeti,
- Üretimdeki zorluklar,
- Yüksek sıcaklıkta DM'nin mıknatıslama özelliğinin kaybolması.



Şekil 2.8. Doğrudan sürülen DMSG sisteminin blok diyagramı

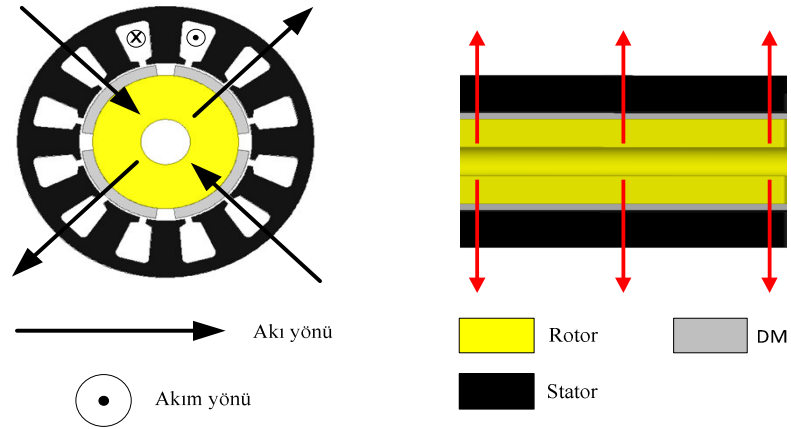
Son yıllarda, DM'lerin kullanımı daha önceki yıllara göre daha caziptir, çünkü DM'lerin performansı gelişmekte ve maliyetleri azalmaktadır. Tam ölçekli güç

dönüştürücü DMSG'ler, doğrudan sürülen rüzgâr türbinleri için daha uygun olduğu kanaati mevcuttur.

DM makineler standart makineler gibi değildir ve geometrilerinde büyük bir esnekliğe imkân tanırırlar, böylece çeşitli topolojileri kullanılabilir. DM makineler şu şekilde sınıflandırılabilirler: Akı yayılımına dayalı radyal akılı (radial-flux), aksel akılı (axial-flux) ve enine akılı (transversal-flux)'dır. Literatürdeki bazı temel yapıları ve özellikleri kısaca anlatılmaktadır ve bunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir [109, 111–117]:

#### 2.4.2.1. Radyal akılı DM senkron makineler

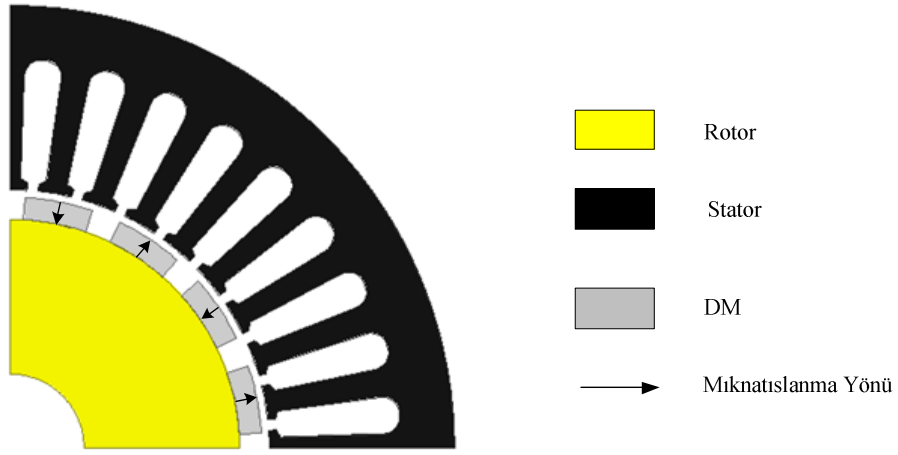
Radyal Akılı DM (RADM) senkron makineler, en çok kullanılan DM senkron makinelerdir. Bunlar yaygın olarak, doğrudan tahrikli uygulamalar için kullanılır. Şekil 2.9, akı ve akım akışlarının yönü ile RADM makinenin iki bakış açısı görülmektedir [110]. Akı radyal olarak akarken, makinedeki akım aksel olarak akmaktadır.



Şekil 2.9. Akı ve akım akışları ile RADM makine

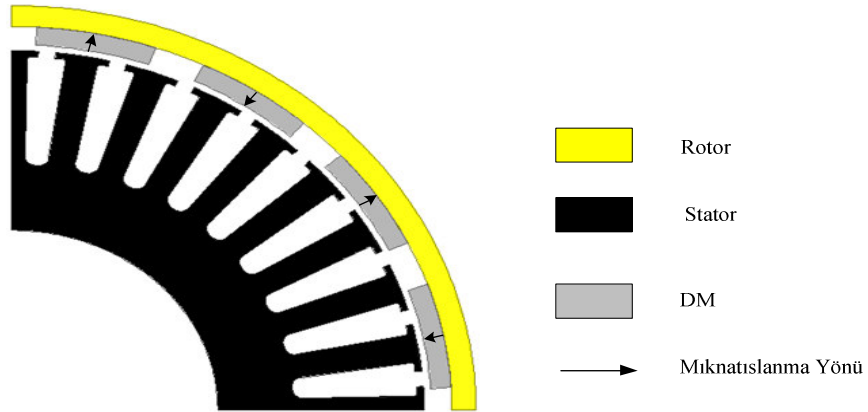
Daha sık kullanılmaktadırlar ve statorları asenkron makinelerinkine benzer olduğu için, RADM makineler, üretimde DM makineler arasında en kolay ve en ucuzudur. Ancak, aktif ağırlık ve aksel uzunluk açısından, aksel akılı ve enine akılı makinelere göre daha büyüktür [118]. RADM makinelerin farklı yapıları aşağıda açıklanmaktadır.

İç rotorlu yüzeye montajlı DM makineler: Bu makineler için, Şekil 2.10’da görüldüğü gibi daimi mıknatıslar, rotor yüzeyine yerleştirilir [110]. Bu en çok kullanılan tasarımdır. Yüzeye montajlı DM makinelerin esas avantajı, basit olması ve bu nedenle diğer DM makinelerle karşılaştırıldığında, üretimi daha ucuzdur. Büyük dezavantajı, mıknatısların mıknatıslama özelliğini etkileyen dış etkenlere maruz kalabilir. Ayrıca, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle mıknatıslar rotordan ayrılabilir. Ancak, bu kuvvetler rotor dönme hızı ile arttığı için, düşük hızlı uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Yüzeye montajlı DM generatörler, doğrudan sürülen rüzgâr türbinlerinde kullanılan ilk DM generatördür [119, 120].



Şekil 2.10. İç rotorlu, yüzeye montajlı DM makinenin kesiti

Yüzeye montajlı dış rotorlu DM makineler: Şekil 2.11’de görüldüğü gibi, rotor iç çeperi boyunca yerleştirilen mıknatıslardan ve merkezine yerleştirilen durağan bir stator oluşmaktadır [110].



Şekil 2.11. Dış rotorlu yüzeye montajlı DM makinenin kesiti

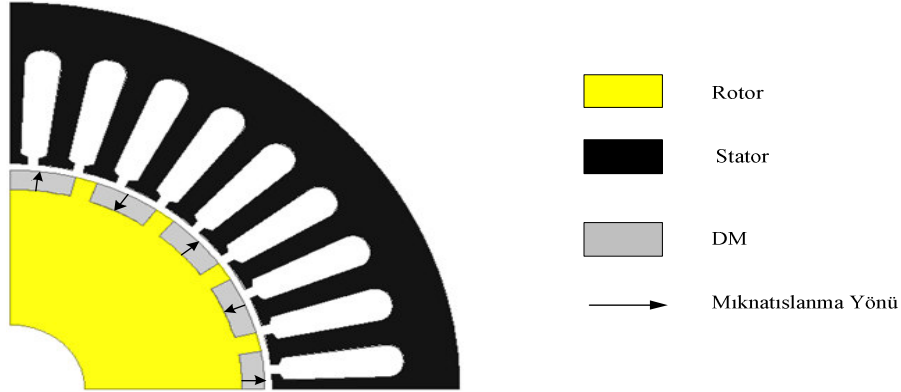


Bu tasarımın bazı avantajları:

- Geleneksel radyal akılı makinelere göre rotor çapı daha büyüktür. Bu ise kutup sayısının daha fazla olmasını sağlamaktadır.
- Dış rotorun dönmesi esnasında, merkezkaç kuvvetinden dolayı mıknatısların deformasyonu çok zordur.
- Kanatlar doğrudan rotora monte edilebildiği için, yapısı rüzgâr türbinlerine daha uygundur.

Makinenin bu tipi J. Chen ve W. Wu tarafından incelenmiştir ve 20 kW'lık 36 ile 48 kutuplu bir prototip tasarlanmıştır [113, 121, 122].

Yüzeye gömülü DM makineler: Yüzeye montajlı DM makineler gibi yüze gömülü DM makineler, rotor yüzeyine yerleştirilen daimi mıknatıslara sahiptir. Fakat Şekil 2.12'de görüldüğü gibi daimi mıknatıslar arasında kısmen demir vardır [110]. Bu tasarıma, yüzeye gömülü DM makine denir. Daimi mıknatıslar arasındaki demir, bir çıkıntı oluşturur ve mıknatıslardan oluşan momente ek olarak relüktans moment oluşur.



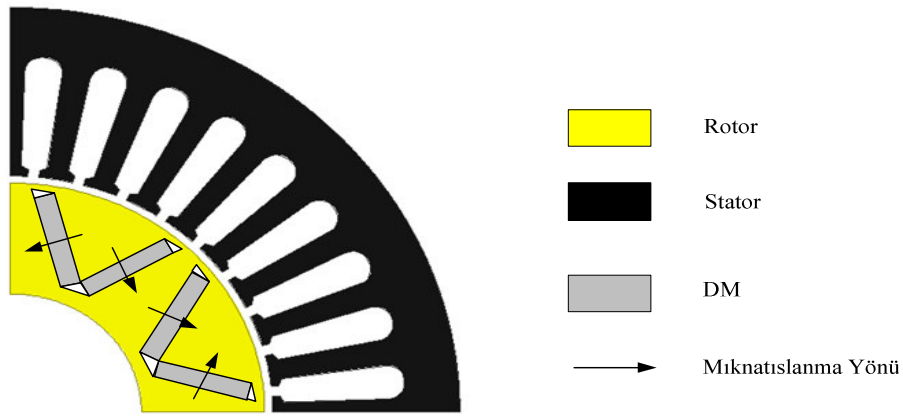
Şekil 2.12. Yüzeye gömülü DM makinenin kesiti

Gömülü DM makineler: Diğer bir ifadeyle, daimi mıknatısların rotor içerisine gömülmesidir. Rotor yüzeyi daimi mıknatıslı makinelerle karşılaştırıldığında, gömülü DM makine tasarımlarının bir avantajı, rotordaki DM'ler ile üretilen akı konsantrasyonunun olabilirliği ve böylece yüksek hava aralığı akı yoğunluğu elde

edilebilmesidir. Ayrıca, gömülen daimi mıknatıslar, mıknatısiyet özelliğini etkileyen ve mekaniksel hasarlara karşı iyi bir şekilde korunmaktadır.

Rotordaki daimi mıknatısların yerleştirilmesinde birçok tasarım var. Fakat örnek olması açısından iki tasarımdan bahsedilecektir.

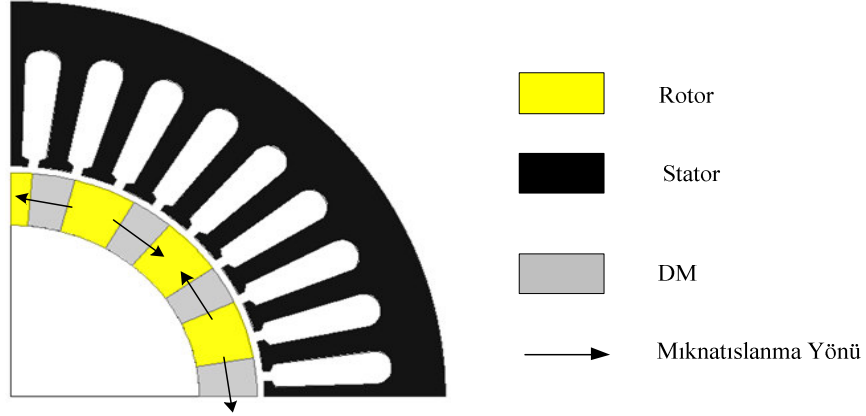
Bunlardan birincisi Şekil 2.13’de görülen tasarımdır. Kutup başına iki daimi mıknatıs, “V” şeklinde belli bir açı ile yerleştirilmektedir [123]. “V” şeklindeki DM’lerin uçları arasında ve hava aralığında iki demir köprü vardır.



Şekil 2.13. “V” şeklinde gömülü DM makinenin kesiti

“V” şeklindeki DM’li rotorların büyük dezavantajları, demir köprülerin varlığıdır. DM akı kaçaklarının büyük bir bölümü momenti artırmak ve hava aralığından akmak yerine, bu köprülerden geçmektedir. Ayrıca, daha çok kutup sayısı, daimi mıknatıslar için alanın küçük olması ve “V” şeklindeki iki mıknatıs arasındaki açının daha küçük olması gibi etkenlerden dolayı “V” şeklindeki rotor, çok kutuplu makineler için tasarımı zordur. “V” şeklindeki DM tasarımının diğer bir dezavantajı ise, kutup sayısının çokluğu maliyeti artırmaktadır.

İkinci tip DM makine şekli ise, Şekil 2.14’de görülen çubuk mıknatıslı DM makinelerdir [110]. Demir ve DM’lerden oluşan rotor, ferromanyetik olmayan mil üzerine birlikte yerleştirilmiştir. Ferromanyetik mil ile DM’ler tarafından üretilen akının büyük bir kısmı, mil yolu ile akmaktadır.



Şekil 2.14. Çubuk mıknatıslı DM makinenin kesiti

Çubuk mıknatıslı DM makinelerin dezavantajı, eğer kutup sayısı artarsa, demir ve mıknatısların titizlikle tasarlanması gerekmektedir. Bu nedenle, bazı üretim zorlukları ortaya çıkabilir. Ancak, bu makine “V” şeklindeki DM tasarımı ile karşılaştırıldığında, herhangi bir demir köprünün olmamasından dolayı akı kaçağı oldukça düşüktür.

#### 2.4.2.2. Eksenel akılı DM makineler

Eksenel Akılı DM (EADM) makine, radyal yön yerine eksenel yönde manyetik akı üreten bir makinedir. RADM makineleri ile karşılaştırıldığında, EADM makinelerinin avantajları şu şekilde özetlenebilir:

- Basit sarım,
- Düşük atalet (cogging) momenti ve gürültü (oluksuz makinede),
- Kısa eksenel uzunluk,
- Daha yüksek moment/hacim oranı.

EADM makinelerin RADM makinelere göre dezavantajları ise şu şekildedir [117]:

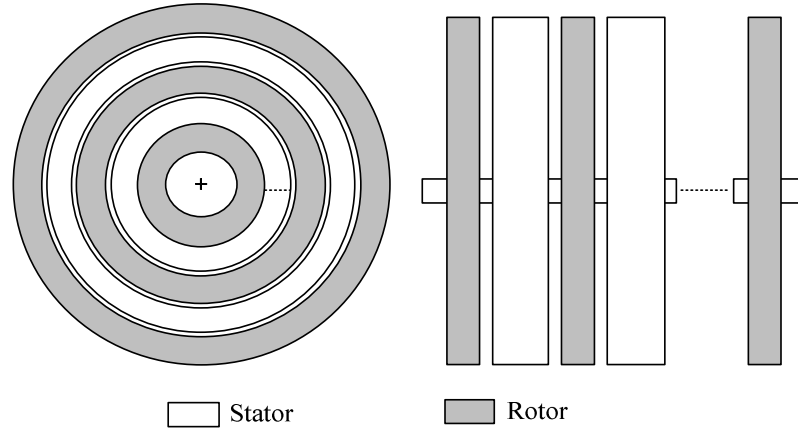
- Daha düşük moment/kütle oranı,
- Dış çapı daha büyük, DM’lerin büyük olması ve yapısal olarak dayanıksız olması (oluksuz makinede),

- Büyük çaplarda hava boşluğunu ayarlamak zordur (oluklu makinede),
- Stator çekirdek üretiminde zorluk (oluklu makinede).

Geleneksel radyal akılı makinelere alternatif olarak, hem askeri savunma sistemleri hem de ev eşyalarında artarak kullanılan disk tip eksenel akılı DM makinelere olan ilgi giderek artmaktadır [114].

Eksenel akılı DM makinelerin radyal akılı DM makinelere göre yapısal avantajlarından bazıları sıralanacak olursa: Daha az çekirdek malzeme ve daha yüksek verimde, ağırlığa göre daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olacak şekilde tasarlanabilmesi, stator ve rotor tasarım şekli disk biçiminde ve hacimleri küçük olmasına rağmen akı yoğunluklarının yüksek olmasıdır. Bu özellik, uygun şekil ve hacmin çok büyük önem arz ettiği elektrikli araçlar gibi alan sınırlamasının olduğu bazı uygulamalar için eksenel akılı makinelerin önemli bir avantajıdır. Düzlemsel ve ayarlanabilir hava aralığına sahiptir. Ayrıca, ana hava aralığı akı yönü, değiştirilebilir ve birçok topolojide sürülebilir [118, 124-127].

Radyal ve eksenel akılı makinelerin her ikisi, Şekil 2.15’de görüldüğü gibi birçok yolla yapılabilir [114]. Tek stator-tek rotor veya çoklu stator-çoklu rotor şeklinde tasarlanabilirler.



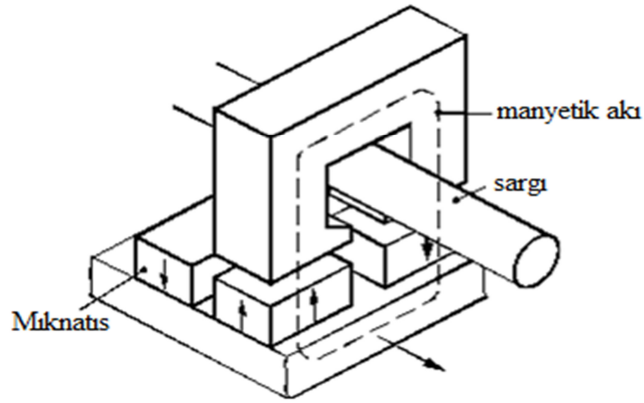
Şekil 2.15. Radyal ve eksenel akılı makinelerin çok katmanlı şekilleri

Eksenel akılı makineler, rotor yapısına göre sınıflandırılabilirler. Rotor yapısı sincap kafesliyse, eksenel akılı asenkron makine; rotor, yüzeye montajlı DM ile yapılırsa,

eksenel akılı yüzeye montajlı DM makine; rotor iç mıknatıslı tasarımla yapılmışsa, eksenel akılı iç DM makine olarak literatürde geçmektedir.

### 2.4.2.3. Enine akılı DM makineler

Enine akı ilkesi şu anlama gelmektedir; manyetik akı yolu rotor dönme yönüne diktir. Ayrıca bu teknoloji için tek taraf akı yoğunluklu ve çift taraf akı yoğunluklu tek taraf yüzey mıknatıslı rotor gibi bir kaç farklı rotor yapısı da vardır. Şekil 2.16, yüzeye montajlı enine akılı DMSG'nin yapısı görülmektedir [109]. Enine akılı DM'li bir makine doğal bir senkron makinedir ve prensip olarak diğer DMSG'lerden herhangi birisine benzer bir işlevi görmektedir. Boyuna makineler (longitudinal machines) ile kıyaslandığında, enine akılı DM makineler daha yüksek güç yoğunluğu, oldukça düşük bakır kayıpları ve basit sarım gibi bazı avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, büyük hava boşluklu enine akılı DM makinenin güç yoğunluğu, biraz yüksek olabilir veya dış çapa daha az bağımlı olabilir [109]. Enine akılı DM makinelerin yapısı boyuna akılı makinelerden daha karmaşıktır.

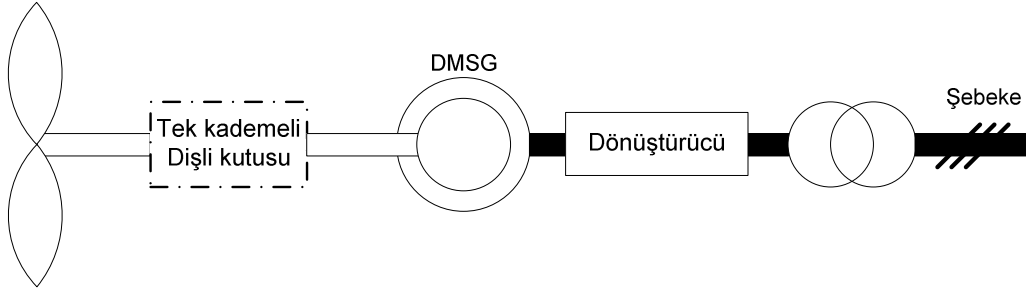


Şekil 2.16. Yüzeye montajlı enine akılı DMSG'nin yapısı [115]

Enine akılı DM makineler, RADM veya eksenel akılı DM makinelerle karşılaştırıldığında, büyük fark şudur; ana akı için gerekli alanı azaltmadan, basit sarımlarla kullanılabilir alanı artırmayı sağlar. Enine akılı DM makineler çok küçük bir kutup açısıyla da yapılabilir, ancak elektromanyetik yapı çok daha karmaşıktır. Enine akılı DM makineler, düşük güç katsayısına da sahiptirler.

## 2.5. Tam Ölçekli Güç Dönüştürücüsü ile Değişken Hız Tek Kademeli Dişli Kavramı

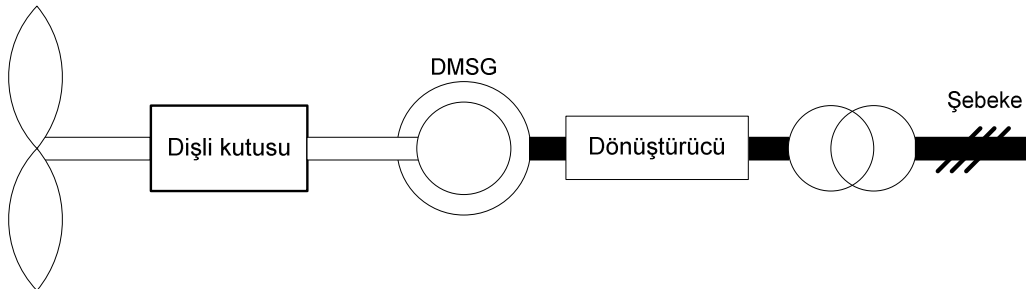
Bu düzenekte; değişken hızlı ve açı kontrollü rüzgâr türbini, DMSG'nin hızını artıran tek kademeli dişli kutusuna bağlanmaktadır. Bu kavramın şebekeye bağlı şeması Şekil 2.17'de görülmektedir. Multibrid olarak tanımlanan bu kavram, dikkat çekmiştir. Çünkü doğrudan sürme kavramından daha yüksek bir hız avantajına sahiptir ve çok kademeli dişli kutusu kavramından daha düşük bir mekanik bileşenden oluşmaktadır. Rüzgâr türbin üreticilerinin, Multibrid ve WinWind gibi, piyasada bu kavram üzerine dayalı ürünleri bulunmaktadır.



Şekil 2.17. Tam ölçek dönüştürücülü tek kademeli sürülen DMSG sisteminin blok diyagramı

## 2.6. Tam Ölçekli Bir Güç Dönüştürücüsü ile Değişken Hız Çok Kademeli Dişli Kavramı

Çok kademeli dişli kutulu bir DMSG sistemi, generatör sesini azaltmak için kullanılmaktadır ve tam ölçekli güç dönüştürücüsü ile değişken hızlı rüzgâr türbin kavramlarında generatör verimini artırmaktır. Şekil 2.18'de bu kavramın şebekeye bağlantı şeması görülmektedir.



Şekil 2.18. Tam ölçek dönüştürücülü çok kademeli dişli kutusuyla sürülen DMSG sisteminin blok diyagramı

Bu rüzgâr generatörü sistemi, ÇBAG sistemi ile karşılaştırıldığında aşağıdaki avantajlara sahiptir.

- Generatör daha iyi bir verime sahiptir,
- Generatör fırçasız olabilir,
- Şebekeye bağlantı açısından daha az karmaşıktır.

Dezavantajları ise aşağıdaki gibidir:

- Daha büyük, daha pahalı dönüştürücü,
- Dönüştürücüdeki kayıplar daha yüksektir, çünkü tüm güçler güç elektroniği dönüştürücüsü tarafından işlenir.

### 3. RÜZGÂR TÜRBİNİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ

Modern rüzgâr türbin sistemlerinin tasarımı ve kontrolünde kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Ancak, bu yöntemleri kullanmadan önce cevap verilmesi gereken en önemli sorulardan birisi rüzgâr türbininden maksimum ne kadar enerji elde edilebileceğidir. Daha fazla enerji elde etmek, güvenilirliği artırmak ve verimli bir çalışma elde etmek için öncelikle rüzgâr türbin sistemi karakteristiklerinin bilinmesi gerekmektedir.

Bu bölümde, rüzgâr dönüşüm sistemleri araştırılmaktadır. Rüzgârdan ne kadar güç elde edilebileceği ve rüzgâr türbininin matematiksel modeli sunulmaktadır. Daha sonra, rotor ve rüzgâr hızına göre güç karakteristikleri verilmektedir.

#### 3.1. Rüzgârdan Mekanik Güç Çıkarımı

Hava akımından dolayı rüzgâr türbin kanatlarında enerji elde edilmektedir. Bu enerji, kanatlar aracılığı ile dönme hareketine dönüşerek generatör milini döndürmektedir. “v” hızıyla hareket eden “m” kütlelerinin havadaki kinetik enerjisi Denklem (3.1)’deki gibidir:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (\text{Nm}) \quad (3.1)$$

Rüzgâr hızı sabit kabul edilirse, rüzgâr gücü Denklem (3.2)’deki gibi elde edilir:

$$P_w = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 \quad (\text{W}) \quad (3.2)$$

Burada,  $\dot{m}$  birim zamandaki kütle değişimidir. Hareketli hava kütlesi, kanat süpürme alanı “A” olan bir rüzgâr türbininin pervanesine dikey yönde çarptığında, rüzgâr gücü Denklem (3.3)’deki gibi elde edilir:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{W}) \quad (3.3)$$



Burada “ $\rho$ ” hava yoğunluğudur. Hava yoğunluğu, atmosfer basıncı ve sıcaklığa göre değişmektedir. Bu nedenle referans olarak  $\rho=1.2 \text{ kg/m}^3$  alınmıştır.

Denklem (3.3)’de rüzgârdan ne kadar güç elde edilebileceği görülmektedir. Fakat bu rüzgâr gücünün ne kadarı mekanik enerjiye dönüştürülebilir? Hava akımından dolayı elde edilen mekanik enerji, önceki ve sonraki rüzgâr güçlerinin farkına eşittir ve Denklem (3.4)’deki gibi ifade edilir:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot v_1^3 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 \cdot v_2^3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (A_1 \cdot v_1^3 - A_2 \cdot v_2^3) \quad (\text{W}) \quad (3.4)$$

Burada,  $A_1$  ve  $A_2$ : sırasıyla türbinden önceki ve sonraki kesit alan,  $v_1$  ve  $v_2$ : sırasıyla türbinden önceki ve sonraki rüzgâr hızını ifade etmektedir. Rüzgâr hızı, kanatların süpürme alanından geçtikten sonra azalmaktadır. Fakat hava kütlesi değişmemektedir. Bunun sonucunda Denklem (3.5) yazılabilir.

$$\rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 \quad (\text{kg/s}) \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)’e göre Denklem (3.4) yeniden düzenlendiği zaman, Denklem (3.6) elde edilmektedir.

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (\text{W}) \quad (3.6)$$

Denklem (3.6) incelendiğinde, maksimum mekaniksel güç elde etmek için  $v_2$ ’nin sıfır olması gerekmektedir.  $v_2$ ’nin sıfır olması hava akımının tamamen durması demektir. Bu ise fiziksel olarak mümkün değildir. Türbinden sonraki rüzgâr hızının sıfır olması için, türbinden önce de rüzgârın (hava akışının) olmaması demektir. Bu nedenle rüzgârdan mekaniksel güç çıkarımı farklı bir denklemle ifade edilmelidir. Momentum korunumu yasası kullanılarak, rüzgâr türbininden güç çıkarım eşitliği Denklem (3.7) deki gibi yazılabilir:

$$F = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2) \quad (\text{N}) \quad (3.7)$$

ve elde edilen mekaniksel güç ise Denklem (3.8)’deki gibidir:

$$P_m = F \cdot v' = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2) \cdot v' \quad (\text{W}) \quad (3.8)$$

Denklem (3.6) ve (3.8) eşitlikleri kullanılarak, türbine gelen rüzgâr hız eşitliği Denklem (3.9)'daki gibi elde edilmektedir:

$$v' = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2) \quad (\text{m/s}) \quad (3.9)$$

Türbin süpürme alanına gelen rüzgâr hızı, giriş ( $v_1$ ) ve çıkış ( $v_2$ ) rüzgâr hızlarının ortalamasına eşit olduğu Denklem (3.9)'da görülmektedir. Dolayısıyla türbin çıkışı mekaniksel güç eşitliği Denklem (3.10)'daki gibi yazılabilir:

$$P_m = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2) \quad (\text{W}) \quad (3.10)$$

Türbinin kanatlarının süpürme alanından akan hava akımındaki mekaniksel gücün, rüzgâr gücüne oranına “güç katsayısı” denir ve Denklem (3.11)'deki gibi ifade edilir:

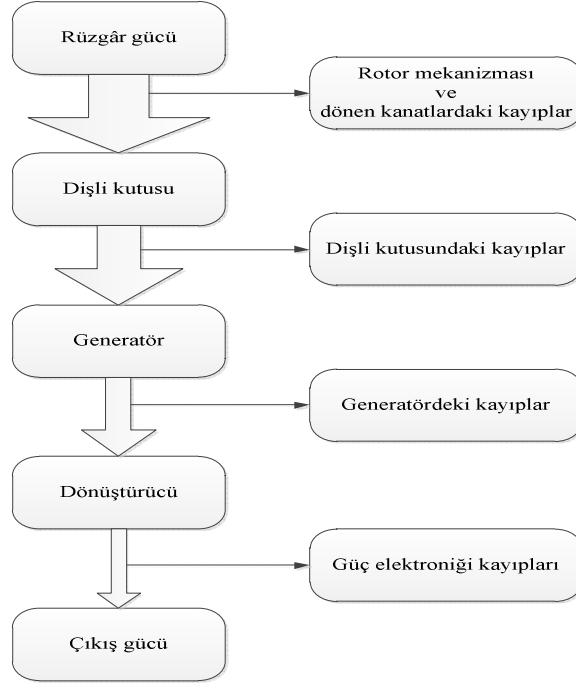
$$C_p = \frac{P_m}{P_w} = \frac{\frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \cdot \left[ 1 + \frac{v_2}{v_1} \right] \quad (3.11)$$

Denklem (3.11)'deki  $v_2/v_1=x$  olarak alınarak yeniden düzenlendiğinde, Denklem (3.12) eşitliği elde edilir:

$$C_p = \frac{1}{2} \cdot (1 - x^2) \cdot (1 + x) \quad (3.12)$$

Güç katsayısının maksimum değerini bulmak için, Denklem (3.12)'nin  $x$ 'e göre türevi alınarak sıfıra eşitlenir. Bu durumda  $C_p$ 'yi maksimum yapan  $x$  değeri 1/3 olarak bulunur. Diğer bir ifadeyle, rüzgâr türbininin giriş hızı, türbin çıkış hızının 3 katı olacak şekilde türbin tasarlanmalıdır. Bu kriter doğrultusunda tasarlanan rüzgâr türbininden elde edilecek maksimum verim, 0,5926 olacaktır. Bu katsayı literatürde, Betz faktörü (Betz factor) ya da Betz Limiti (Betz limit) olarak bilinmektedir [45]. Bu değer, güç katsayısının maksimum teorik değeridir. Teorik olarak verim % 59,26'dır. İdeal bir sistem için bu değer mümkündür. Gerçek bir rüzgâr türbinindeki maksimum güç katsayısı, Betz faktöründen daha küçüktür. Bunun sebebi, rotor ve sistem (kanat sayısı, ağırlık vb.) tasarımına bağlı birçok aerodinamik kayıplardan

kaynaklanmaktadır. Rüzgâr türbin sisteminin güç katsayısı ve verimi farklıdır. Rüzgâr türbininin verimi, mekanik aktarma sistemi, elektrik üretimi, dönüştürücü kayıpları vb. şeylere bağlıdır. Rüzgâr türbin sistemindeki kayıpların blok diyagramı, Şekil 3.1’de görülmektedir.

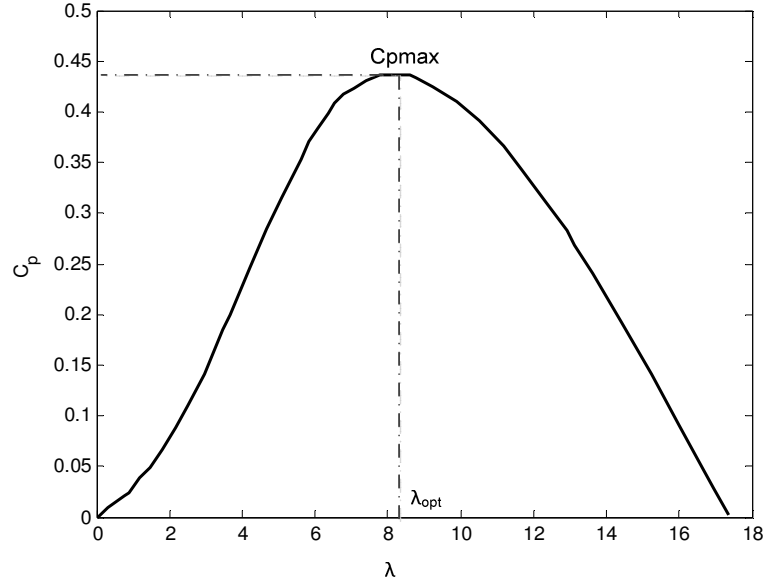


Şekil 3.1. Rüzgâr türbinlerindeki kayıplar ve güç akışının blok diyagramı

Güç katsayısı genellikle uç hız oranı (tip speed ratio)’nın bir fonksiyonu  $\lambda$  ve kanat eğim açısı  $\beta$  olarak verilmektedir. Bir rüzgâr türbininin uç hız oranı, Denklem (3.13)’deki gibidir:

$$\lambda = \frac{\omega_{rm} \cdot R}{V_w} \quad (3.13)$$

Burada, R: kanatların yarıçapı,  $V_w$ : rüzgâr hızı ve  $\omega_{rm}$ : rotorun açısal hızıdır. Şekil 3.2’de satın alınan DMSG için üretici firma tarafından tasarlanmış rüzgâr türbininin  $C_p$ - $\lambda$  eğrisi görülmektedir. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi  $\lambda_{opt}$ ’da,  $C_p$  değeri optimum nokta olan  $C_{pmax}$ ’değerine sahiptir.  $C_{pmax}$  değeri türbin üretici firmanın vermiş olduğu rüzgâr hızına göre mekanik güç değişimi verileri kullanılarak Denklem (3.14)’den elde edilmiştir [128]. Şekil 3.2’deki  $C_p$ - $\lambda$  eğrisinin verileri Tablo 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.2. Rüzgâr türbininin  $C_p$ - $\lambda$  karakteristiği

Tablo 3.1. Güç katsayısı ile uç hız oranı değişiminin değerleri

$\lambda$		$C_p$	
0	7,06538	0	0,41976
0,29196	7,41573	0,00945	0,42733
0,75909	7,76608	0,0208	0,433
0,87587	7,99965	0,02458	0,433
1,16783	8,35	0,03782	0,433
1,45979	8,58357	0,04916	0,433
1,81014	8,75874	0,06618	0,42922
2,16049	9,22587	0,08698	0,42166
2,51084	9,86818	0,10967	0,40653
2,97797	10,51049	0,13992	0,38762
3,4451	11,1528	0,18341	0,36304
3,67867	11,67832	0,19854	0,34035
4,2042	12,32063	0,24392	0,30821
4,67133	12,90455	0,28173	0,27984
5,08007	13,13811	0,31199	0,26661
5,37203	13,60524	0,33279	0,23824
5,60559	14,42273	0,3498	0,19097
5,83916	15,24021	0,36682	0,13992
6,07273	15,9993	0,38006	0,09076
6,36469	16,64161	0,39518	0,04727
6,53986	16,93357	0,40464	0,02836
6,77343	17,34231	0,41409	0,00189

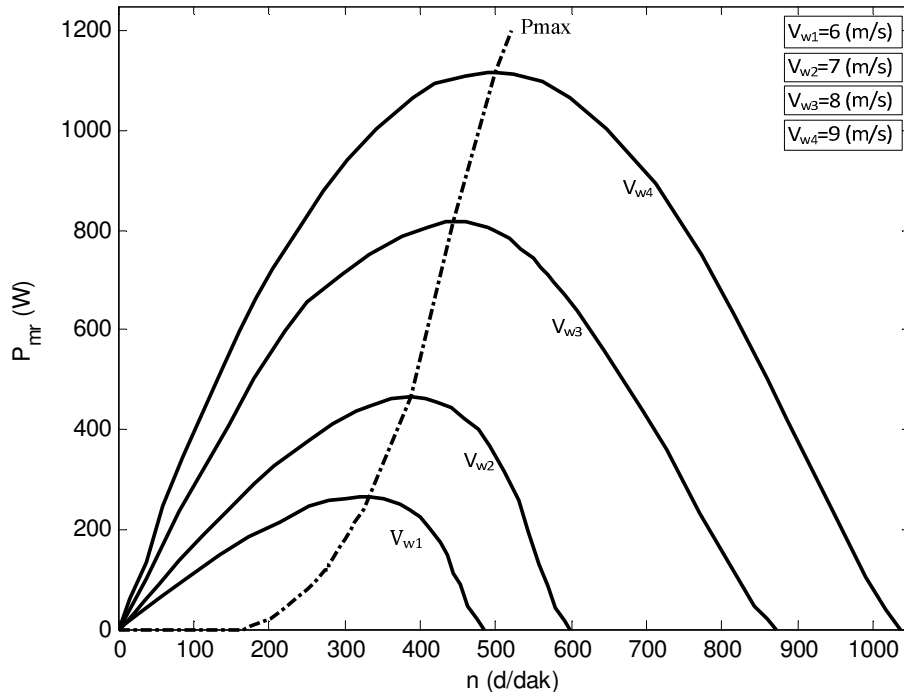
### 3.2. Rotor Güç Karakteristiği

Rüzgâr enerjisi çevrim sistemlerinde, rüzgârdan elde edilen gücün tamamının kullanılmadığı önceki bölümde nedenleri ile açıklandı. Bu nedenle rotordaki mekanik güç, güç katsayısı kullanılarak hesaplanabilir. Rotordaki mekanik güç eşitliği Denklem (3.14)'deki gibidir:

$$P_{mr} = C_p \cdot P_w = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3 \quad (W) \quad (3.14)$$

Burada,  $P_{mr}$ : rotordaki mekanik güç,  $\rho$ : hava yoğunluğu ( $\text{Kg/m}^3$ ),  $A$ : pervanenin süpürme alanı ( $\text{m}^2$ ),  $C_p$ : güç katsayısı ve  $V_w$ : rüzgâr hızı ( $\text{m/s}$ )'ni ifade etmektedir.

Rotordaki maksimum mekanik güç, rüzgâr ve generatör milinin dönme hızına bağlı olarak değişmektedir. Tezde kullanılan generatör için üretici firma tarafından tasarlanan türbinin, farklı rüzgâr hızlarındaki generatör hızı ve çıkış gücü arasındaki değişim Şekil 3.3'de görülmektedir. Şekil 3.3'deki farklı rüzgâr hızlarındaki generatör hızı ve güç değişimi verileri Tablo 3.2'de,  $P_{max}$  değişim eğrisinin verileri ise Tablo 3.3'de görülmektedir.



Şekil 3.3. Generator hızına göre mekanik güç değişimi

Tablo 3.2. Farklı rüzgâr hızlarındaki generatör hızına göre mekanik güç değişiminin verileri

$V_{w1}$		$V_{w2}$		$V_{w3}$		$V_{w4}$	
$P_{mr}$ (W)	d/dak	$P_{mr}$ (W)	d/dak	$P_{mr}$ (W)	d/dak	$P_{mr}$ (W)	d/dak
0	0	0	0	0	0	0	0
8,45	8,89	12,8	11,53	100,31	37,36	62,08	16,67
29,58	26,66	34,13	23,07	235,72	81,52	133,72	36,66
63,39	57,77	55,46	34,6	305,94	108,69	248,33	60
105,65	93,33	89,59	53,82	406,24	146,06	343,85	86,66
147,92	133,32	136,51	80,74	501,53	180,02	515,77	136,66
185,95	173,32	187,71	111,49	596,83	220,78	596,96	159,99
215,54	213,32	238,9	146,09	657,01	251,35	663,81	183,32
245,12	253,32	290,09	180,69	712,18	295,51	721,12	203,32
257,8	279,98	328,49	207,61	752,3	332,87	807,08	239,98
262,02	302,2	379,68	253,74	787,41	377,03	878,72	273,31
266,25	319,98	409,54	284,5	807,47	410,99	940,8	303,31
266,25	333,31	435,14	315,25	817,5	434,77	1002,88	343,31
262,02	351,09	447,94	334,48	817,5	444,96	1064,97	389,97
249,35	373,31	460,73	361,39	817,5	461,94	1093,62	419,97
240,89	386,64	465	388,3	807,47	489,12	1107,95	459,96
223,99	399,97	460,73	407,52	797,44	499,31	1117,5	489,96
202,86	413,3	456,47	422,9	782,39	519,69	1117,5	499,96
173,27	426,64	443,67	442,12	762,33	533,27	1112,72	523,29
147,92	435,53	422,34	457,5	742,27	550,26	1098,4	563,29
109,88	444,41	401,01	476,72	727,22	560,45	1064,97	599,95
88,75	453,3	366,88	492,1	712,18	570,64	1002,88	646,61
46,49	462,19	315,69	511,33	697,13	577,43	893,04	713,28
21,13	475,52	255,96	530,55	672,06	591,02	749,78	773,27
0	484,41	196,24	542,08	636,95	608	630,38	816,6
		127,98	557,46	556,7	645,36	501,44	859,93
		85,32	568,99	436,33	696,31	420,26	886,6
		42,66	580,53	361,1	726,88	234,01	946,59
		17,06	592,06	230,71	771,04	105,06	989,92
		0	599,75	45,14	842,37	38,21	1016,59
				20,06	859,35	0	1036,58
				0	872,94		

Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'deki veriler, rüzgâr türbini üretici firmasının katalog bilgilerinden elde edilmiştir [128]. DMSG'nin hızına göre mekaniksel gücünün değişimine örnek olması için 6, 7, 8 ve 9 m/s'deki rüzgâr hızları referans alınarak Şekil 3.3'deki grafik elde edilmiştir.

Tablo 3.3. Generatör hızına göre maksimum güç noktalarının verileri

d/dak	Pmax (W)	d/dak	Pmax (W)
0	0	283,31	142,5
166,65	0	290,53	157,5
174,98	3,75	295,53	168,75
201,1	18,75	300,53	180
211,09	30	309,42	198,75
221,65	41,25	314,42	213,75
224,98	45	321,09	228,75
238,86	63,75	324,97	240
251,09	78,75	333,31	266,25
259,42	93,75	388,3	465
274,98	120	444,96	817,5
278,31	120	499,96	1117,5
278,31	131,25	522,17	1200

#### **4. YSA TOPOLOJİLERİ**

Yapay sinir ağı, insan beyninin çalışma sistemine dayanılarak ortaya çıkmıştır. Bu nedenle YSA, insan beynindeki birçok nöronun ya da yapay olarak basit işlemcilerin birbirine değişik etki seviyeleri ile bağlanmasıyla meydana gelen karmaşık bir sistem olarak düşünülebilir. İlk zamanlar temel tıp bilimlerinde, insan beynindeki nöronların matematiksel modellenmesi şeklinde başlayan çalışmalar, son yıllarda disipline bir şekil almıştır. Günümüzde YSA fizik, matematik, elektrik-elektronik ve bilgisayar mühendisliği gibi birçok farklı bilim dallarında araştırma konusu haline gelmiştir. YSA'nın kullanımı, genel olarak çok farklı yapıda ve formda bulunabilen enformasyon verilerini hızlı bir şekilde tanımlama ve algılama üzerinedir. YSA'nın mühendislik uygulamalarında geniş çaplı kullanılmasının en önemli nedeni, klasik tekniklerle çözümü zor problemler için etkili bir alternatif oluşturmasıdır.

##### **4.1. YSA'nın Tanımı**

YSA paralel dağılmış bir bilgi işleme sistemidir. Bu nedenle YSA'nın temelinde, zekâ gerektiren işlemlerden oluşan bilgi işleme işlevi vardır. YSA sistemi, tek yönlü işaret kanalları (bağlantılar) ile birbirine bağlanan işlem elemanlarından oluşur. Çıkış işareti bir tane olup isteğe göre artırılabilir. YSA yaklaşımının temel düşüncesiyle, insan beyninin fonksiyonları arasında benzerlikler bulunmaktadır. Bu nedenle YSA sistemine insan beyninin modeli denilebilir. YSA çevre şartlarına göre davranışlarını şekillendirebilir. Araştırmacıların dikkatini üzerine çeken en önemli öğelerden bir tanesi, YSA'nın öğrenme özelliğidir. Çünkü herhangi bir olay hakkında elde bulunan mevcut örneklerden genellemeler yaparak, girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkiyi ortaya koymak ve daha önce hiç karşılaşılmamış olayları, önceki örneklerden çağrışım yaparak çözümler üretebilmek oldukça önemlidir.

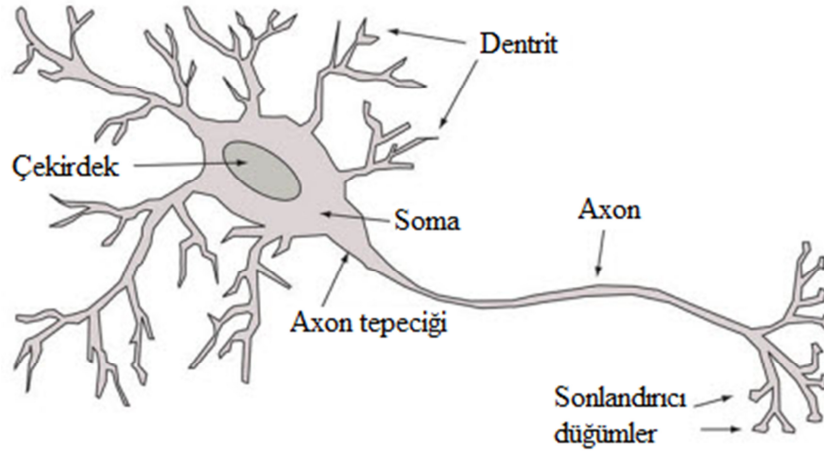
Günümüze kadar geliştirilen YSA, biyolojik fonksiyonların temel nöronlarını örnek alan kompozite elemanlardır. Aynı şekilde biyolojik beyin, tecrübe ile öğrenme, bilgiyi kendi kendine yorumlama ve eksik bilgilerden sonuçlar çıkartma yeteneğine sahiptir. Bu özellikler, biyolojik sistemlerin hücreler üzerinde dağıtılmış bilgiyi



paralel olarak işleme özelliğinden kaynaklanmaktadır. Hücreler birbirine bağlı ve paralel çalıştıkları için bazılarının işlevini yitirmesi halinde, diğer hücreler çalıştıkları için sinir sistemi fonksiyonunu tamamen yitirmez. YSA, bu özellikleri bünyesinde toplayacak şekilde tasarlanmıştır.

#### 4.2. Biyolojik Sinir Ağları

Biyolojik sinir sistemi, merkezinde sürekli olarak bilgiyi alan, yorumlayan ve uygun bir karar üreten beynin (merkezi sinir ağı) bulunduğu 3 katmanlı bir sistem olarak açıklanmaktadır. Bilindiği üzere bilgi işleme olayı beyinde gerçekleşmektedir. En karmaşık yapıya sahip sinir ağı Cerebral Cortex denilen “beyin” dir. Beyinde yaklaşık  $10^{11}$  sinir hücresi bulunmaktadır. Hücre başına bağlantı sayısı ise  $10^4$  mertebesinde. Beyin için çalışma frekansı 100 Hz’dir. Fiziksel olarak, yaklaşık 1,3 kg ve  $0,15 \text{ m}^2$  kesitlidir. Şekil 4.1’de basit bir nöron hücresi görülmektedir.



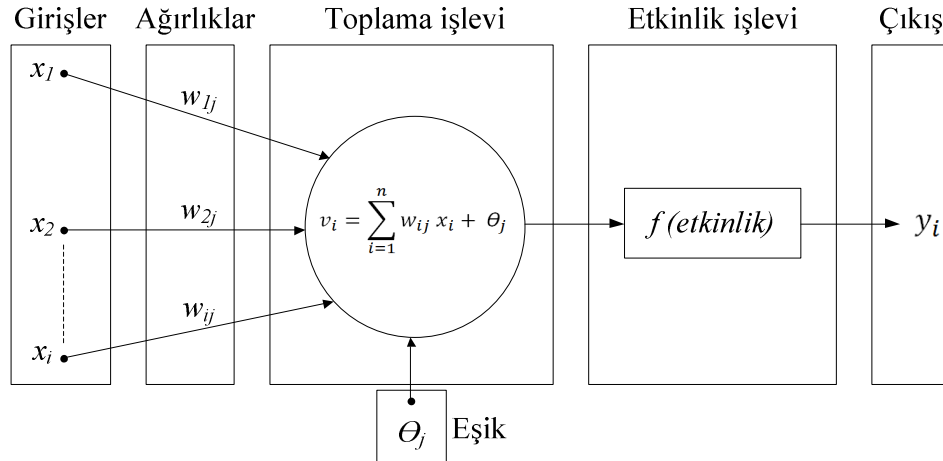
Şekil 4.1. Biyolojik sinir ağının basitleştirilmiş yapısı [129]

Şekil 4.1’de şematik diyagramı gösterilen tipik sinir hücresi üç ana bölümden oluşur. Soma olarak adlandırılan hücre gövdesi (çekirdek), darbelerinin üretildiği ve elektriksel olarak aktif gövde uzantısı olan akson ve diğer hücrelerden gelen işaretleri toplayan ve elektriksel olarak pasif hücre kodları olan dendrit’tir. Dendritler dendritik ağaç biçimindedir, nöron gövdesi civarında uzun çalılar görünümündedirler. Dendritler üzerinden girişler alınır, soma tarafından girişler işlenir. Nörondaki sinyalleri taşıyan uzun bir sinirsel bağlantı halindeki akson ise, işlenen girişleri çıkışa aktarır. Akson dendrit bağlantısı ise synapse olarak adlandırılır. Synapse nöronlar arasında elektrokimyasal bağlantıyı sağlamaktadır.

### 4.3. YSA Yapısı ve İşlem Elemanı

YSA, birbirine bağlı çok sayıda işlem elemanlarından oluşan ve genellikle paralel işleyen yapılar olarak adlandırılabilir. Her bir düğüm, hücre denilen n. dereceden doğrusal olmayan bir devredir. Düğümler, işlem elemanı olarak tanımlanır. Düğümler arasında bağlantılar vardır ve her bağlantı tek yönlü işaret iletim yolu olarak görev yapar. Her işlem elemanı, istenildiği sayıda giriş bağlantısı ve tek bir çıkış bağlantısı alabilir. Ayrıca bu çıkış birçok hücreyi besleyebilir.

YSA'nın görevlerini gerçekleştirmede, sahip oldukları fiziksel yapısı da önemlidir. Günümüzde farklı yapıda birçok model görülmekte ve bu sayı her geçen gün artmaktadır. Bunun nedeni, işlem elemanlarının birbiriyle olan bağlantılarından ve uygulanan öğrenme kuralından kaynaklanmaktadır. İşlem elemanının çıkışı istenilen matematiksel tipte olabilir. Giriş işaretleri YSA'ya bilgi taşır, sonuç ise çıkış işaretlerinden elde edilir. Şekil 4.2'de YSA'nın yapay bir sinir modeli görülmektedir [130].



Şekil 4.2. YSA'nın yapay bir sinir modeli

Girişler  $x_i$  sembolüyle gösterilmektedir. Bu girişlerin her biri, ağırlıklar  $w_{ij}$  ile çarpılmaktadır. Elde edilen sonuç, eşik değeri  $\theta_j$  ile toplanmaktadır. Elde edilen değer, etkinlik işlevine tabi tutularak çıkış üretilmektedir. Tüm YSA'lar bu temel yapıdan türetilmektedir. Bu yapıdaki farklılıklar, YSA'nın sınıflandırılmasına neden olmaktadır.

### 4.3.1. YSA'nın bağlantı geometrileri

Bağlantılarda taşınan işaret verisinin cinsi tanımlanmalıdır. Bağlantı geometrisi YSA için çok önemlidir ve bağlantı işareti her cinsten olabilir. Bağlantının nerede başlayıp nerede bittiğini YSA'nın bilmesi gerekir. 1'den n'e kadar olan bir işlem elemanı kümesinin bağlantıları Denklem (4.1)'de tanımlandığı gibi nxn boyutlu matris biçiminde gösterilebilir.

$$[w_{ij}] = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdot & \cdot & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdot & \cdot & w_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdot & \cdot & w_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$w_{ij} = w_{ji} = 1$  ise i. işlem elemanı, j. işlem elemanına bağlıdır.

$w_{ij} = w_{ji} = 0$  ise i. işlem elemanı, j. işlem elemanına bağlı değildir.

En fazla  $n^2$  kadar bağlantı oluşturulabilir. Bağlantılar çeşitli geometrik bölgeler arasında demetler halinde düşünülebilir. Bu bağlantı demetlerinin uyması gereken kurallar aşağıdaki gibidir:

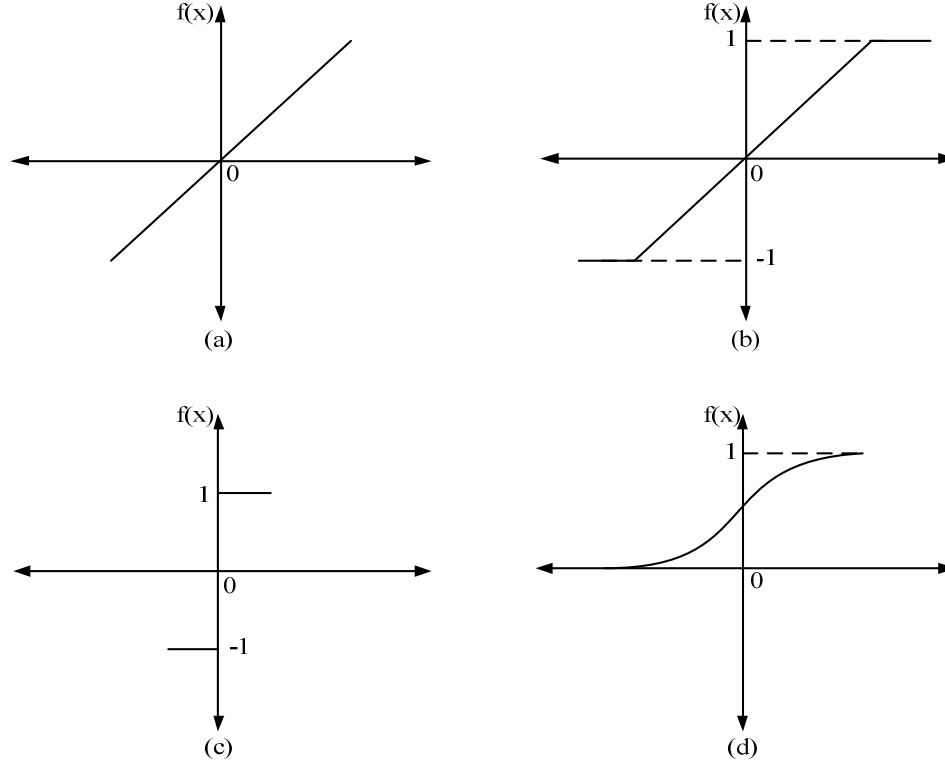
- Bağlantı demetini oluşturan işlem elemanları aynı bölgeden çıkmalıdır.
- Bağlantı demetinin işaretleri aynı matematiksel tipte olmalıdır.
- Bağlantı demetinin işaretleri aynı sınıftan olmalıdır.
- Bağlantı demetinin bir seçim fonksiyonu ( $\sigma$ ) olmalıdır.

$\sigma : T \rightarrow 2^S$  ; T: Hedef bölgesi, S: Kaynak bölgesidir.

Hedef bölgesinin her işlem elemanı kaynak bölgesindeki her elemana giderse “tam” bağlıdır (örnek, çok katmanlı almaç). Eğer, her hedef bölgesi elemanı n kaynak bölgesi elemanına bağlı ise “düzgün dağılmış” (uniform) olasıdır. Ayrıca her bir elemana, yine bir kaynak elemanı bağlı ise buna “bire-bir” bağlı denir [49].

### 4.3.2. YSA'nın eşik fonksiyonları

Esik fonksiyonları, transfer veya işaret fonksiyonları olarak da adlandırılmaktadırlar. Dört tane yaygın olarak kullanılan eşik fonksiyonu vardır. Bunlar Şekil 4.3'de görüldüğü gibi sırasıyla; (a) lineer, (b) rampa, (c) basamak ve (d) sigmoid fonksiyonlarıdır. Yapılan bu çalışmada lineer ve sigmoid fonksiyon kullanılmaktadır.



Şekil 4.3. Eşik fonksiyonları

### 4.3.3. YSA'nın ağırlık uzayı

Birçok YSA öğrenme işlemi, işlem (process) elemanlarının ağırlığı değiştirilerek sağlanır. Ağırlıklar, öğrenmede iyi bir model kullanılarak değiştirilmesi esastır. Basit bir matematiksel model olarak, her bir işlem elemanının "n" adet gerçek ağırlığı olduğu düşünülerek ve "N" adet işlem elemanı göz önüne alınırsa Denklem (4.2)'deki eşitlik yazılabilir.

$$w = (w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1n}, w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2n}, \dots, w_{N1}, w_{N2}, \dots, w_{Nn})^T \quad (4.2)$$
$$w = (w_1^T, w_2^T, \dots, w_N^T)$$

$w_1, w_2, \dots, w_N$ : İşlem elemanlarının ağırlık vektörleridir Denklem (4.3)'deki gibi yazılabilir.

$$w_1 = \begin{bmatrix} w_{11} \\ w_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ w_{n1} \end{bmatrix} \dots \dots \dots w_N = \begin{bmatrix} w_{N1} \\ w_{N2} \\ \cdot \\ \cdot \\ w_{Nn} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

YSA ağırlık vektörü  $N, n$  boyutlu Öklid uzayında yayılır [49]. YSA'nın enformasyon işleme performansı, ağırlık vektörünün belirli bir değeri ile bulunmaktadır. Hata değişimini inceleyen, hata düzeltme ve gradyen kuralları olmak üzere iki çeşit kural bulunmaktadır.

Hata düzeltme kuralları, her bir giriş örüntüsündeki ağırlıkları yeniden ayarlayarak, çıktı hatası en aza indirilir. Gradyen kurallarında ise, ağırlıklar yeniden ayarlanarak ortalama karesel hata en aza indirilir.

Ağırlık vektörü ile çalışan YSA'da önemli noktalardan birisi de, bir öğrenme kuralını geliştirip, enformasyon bölgesi kullanarak (esik fonksiyonu ile) ağırlık vektörü "w"yi istenilen YSA performansını verecek noktaya yöneltmektir. Genellikle öğrenme kuralı için bir performans veya maliyet fonksiyonu tanımlanır. Minimizasyon veya maksimizasyon ile "w" vektörü bulunur. Bir performans çeşidi olarak bilinen ortalama karesel hata Denklem (4.4)'deki gibi ifade edilir [49];

$$F(w) = \int_A |f(x) - G(x, w)|^2 \cdot \rho(x) \cdot dv(x) \quad (4.4)$$

Buradaki amaç  $F$ 'i küçülterek hatayı minimize etmektir.

- $y = G(w, x)$  : Sistemin giriş çıkış fonksiyonu.
- $y$  : Çıkış işareti vektörü.
- $w$  : Ağırlık vektörü.
- $\rho(x)$  : Olasılık yoğunluğu fonksiyonu.

#### 4.4. YSA'da Eğitim

Yapay sinir ağının önemli parçalarından biri eğitim algoritmalarıdır. Eğitim algoritması, eldeki problemin özelliğine göre öğrenme kuralının YSA'ya nasıl adapte edileceğini belirler.

Yaygın olarak üç çeşit eğitime algoritması kullanılmaktadır:

- Eğiticili öğrenme (supervised training)
- Skor ile eğitime (graded training)
- Kendini düzenleme ile eğitime (self-organization training)

Eğiticili öğrenme, elimizde gerçek örnekler vardır. Yani  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  şeklindeki giriş vektörünün.  $(y_1, y_2, \dots, y_n)$  şeklindeki çıkış vektörü, tam ve doğru olarak bilinmektedir. Her bir  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  çifti için ağ, doğru sonuçları verecek şekilde seçilen bir öğrenme kuralı ile beraber eğitilir.

Skor ile eğitimde, giriş verilerine karşılık gelen çıkış verileri tam olarak bilinmektedir. Çıkış işareti yerine skor verilir ve ağın değerlendirilmesi yapılır. Özellikle kontrol uygulamaları için idealdir.

Kendini düzenleyen ağ, giriş verisine göre kendini ayarlayarak organize eder. Olasılık yoğunluk fonksiyonlarına, sınıflandırma ve şekil tanıma problemlerine uygulanabilir [49].

Ne tür eğitime yöntemi kullanılırsa kullanılsın, her hangi bir ağ için gerekli karakteristik özellik, ağırlıkların verilen eğitime örneğine nasıl ayarlanacağını belirtilerek öğrenme kuralının oluşturulmasıdır. Öğrenme kuralının oluşturulması için bir örneğin ağa defalarca tanıtılması gerekebilir. Öğrenme kuralı ile ilişkili parametreler, ağın zaman içinde gelişme kaydetmesiyle değişebilir.

##### 4.4.1. YSA'da bellek

YSA'nın önemli özelliklerinden biri de bilgiyi saklama şeklidir. YSA'da bellek dağıtılır ve bağlantı ağırlıkları YSA'nın bellek formatlarını oluşturur. Ağırlıkların değerleri, o anki bilgi durumunu temsil eder. Örneğin; bir "giriş/istenilen çıkış" çiftini belirtilen bilgi parçası, ağın içinde birçok bellek biçimine dağıtılmıştır. Bellek

üniteleri ile diğer saklı bilgiler, bu bilgiyi paylaşırlar. Öyle ki eğitilen ağa bir kısmı uygulanırsa, ağ bu giriş belleğindeki en yakın çıkışı, bu giriş için seçer ve tam girişe bağlı çıkış ortaya çıkar. YSA belleğinin yapısı; eksik, gürültülü ve tam seçilemeyen bir iris uygulandığı zaman bile mantıklı çıkış üretmeye uygundur. Bu kurala “genelleme” adı verilmektedir. Bir genellemenin kalitesi ve anlamı, uygulama çeşidine, ağın tipine ve karmaşıklığına dayanır. Lineer olmayan çok katmanlı ağlar (özellikle geriye yayılım ağları) gizli katmandaki özelliklerden öğrenirler ve bunları çıkışlar üretmek için birleştirirler. Gizli katmandaki bilgi, yeni giriş örüntülerine akılcı çözümler oluşturmak için kullanılabilir [49].

#### **4.4.2. YSA’da hata toleransı**

Klasik hesaplama sistemleri çok az bir zarardan bile etkilenir. YSA için ise durum farklıdır. Bu farklılık, YSA’nın hata toleranslı olmasından kaynaklanmaktadır. İşlem elemanlarının az da olsa zarar görmesi sistemin bütününe etkiler. YSA, paralel dağılmış parametrelili bir sistem olduğundan, her bir işlem elemanı izole edilmiş bir ada olarak düşünülebilir. Genelde işlem elemanının zarar görmesi ile sistemin davranışı biraz daha değişir ve performans düşer fakat sistem hiçbir zaman durma noktasına gelmez. YSA sistemlerinin hata toleranslı olmasının sebebi; bilginin tek bir yerde saklanmayıp, sisteme dağıtılmasıdır. Bu özellik, sistemin durmasının önemli bir zarara neden olacağı uygulamalarda önem kazanır [49].

#### **4.5. YSA’da Öğrenme Kuralları**

Bilginin kurallar şeklinde açıklandığı klasik sistemlerin tersine, YSA; gösterilen örnekten öğrenerek kendi kurallarını oluşturur. Öğrenme; giriş örneklerine veya bu girişlerin çıkışlarına bağlı olarak ağın bağlantı ağırlıklarını değiştiren ya da ayarlayan “öğrenme kuralı” ile gerçekleştirilir [49]. Günümüzde kullanılan birçok öğrenme kuralından yaygın olarak kullanılanları şunlardır:

- Rastlantısal (Hebb) öğrenme kuralı
- Performans (Window ve Adaline) öğrenme kuralı
- Kompetif (Kohonen) öğrenme kuralı
- Filtreleme (Grossberg) öğrenme kuralı
- Spotitemporal öğrenme kuralı

- Genelleştirilmiş delta öğrenme kuralı

Yapılan bu çalışmada “Genelleştirilmiş Delta Kuralı” öğrenmesi kullanılmaktadır.

#### **4.5.1. Almaç (Perceptron)**

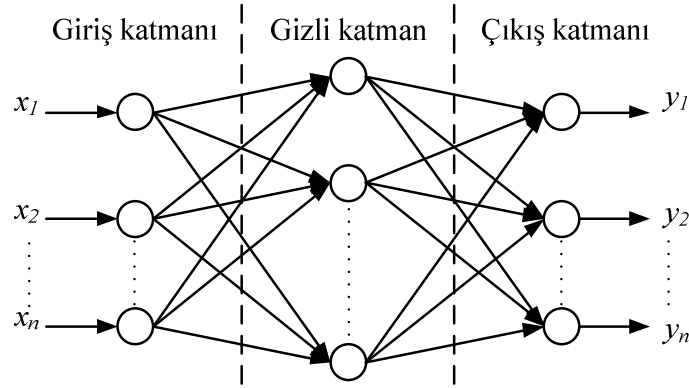
Almaç ağı, ilk olarak 1943 yılında Mc Culloch ve Pitts tarafından saptanmıştır. İlk almaç modeli, giriş bilgisinin mevcut iki sınıftan hangisine eşit olabileceğini bulacak şekilde eğitilen basit bir ağıdır. Daha sonra 1960’lı yıllarda F. Rosenblatt yukarıdaki ağ tipini biraz daha geliştirdi (Hebb, 1969). Ama Minsky ve Papert bu tek katmanlı almaçın XOR (ayrıcılık veya) işlemini gerçekleştiremediğini ispatladılar. XOR gibi 3 veya daha fazla sınıfa ihtiyaç duyulan problemleri çözmek için yapılması gereken işlem, YSA’ya yeni katmanlar eklemektir. Eşik bağlarıyla oluşturulan karar bölgesi şeklinin karmaşıklığı sadece eklenmiş olan katmanların sayısı ile sınırlıdır. Bilgi lineer yayılmıyorsa, 2. katmanın çıkışı konveks bölgededir, bunun sonucu olarak 3. katmandan gelecek olan çıkış bilgisinin şekli, herhangi bir bölgenin şeklinde olabilir. Bu sebeple, ihtiyaç duyulan katman sayısı üç olmaktadır. Üç-katmanlı almaçın 2. katmanında ihtiyaç olan düğümlerin sayısı, bir karar bölgesinin birleştirilmemiş hali veya bir ağ gözünün, bir dışbükey alandan meydana gelmediği birinden büyük olması gereklidir. İkinci katmandaki düğüm sayısı en kötü durumda, giriş bilgilerinin dağılımını yapan bölgenin bağlanmamış sayısına eşit olması gerekir. Birinci katmandakilerin sayısı, her iki katmandaki değişim ile 3 ya da 4 köşeli dışbükey bir alan oluşturmak için yeterli seviyede olmalıdır. Bunun tipik bir sonucu olarak da en az birinci katmandakinden üç kat fazla miktarda olması gerekmektedir. Tek katmanlı almaç uygulanan her eğitim seti modelinin en önemli özelliği, lineer biçimde dağılmak zorunda olmasıdır [49].

#### **4.5.2. Çok katmanlı almaç (Multi-Layer Perceptron)**

Çok katmanlı almaca ait giriş ve çıkış katmanları arasında birden fazla katmanın kullanıldığı YSA sistemleridir. Gizli katman (hidden layer) olarak isimlendirilen bu katmanlarda, düğümleri aracısız giriş olmayan ve aracısız çıkış vermeyen üniteler vardır. Sekil 4.4’de çok katmanlı almaçın genel yapısı verilmiştir [49].



İki katmanlı ağlarda veriler, giriş katmanı tarafından kabul edilirler. Ağ içinde yapılan işlemler sonucunda çıkış katmanında oluşan sonuç işlenen cevapla karşılaştırılır. Bulunan cevap ile istenen cevap arasındaki herhangi bir fark varsa, ağırlıklar bu farkı azaltacak şekilde yeniden düzenlenir. Girişteki değer, ağırlıklar uygun noktaya ulaşana kadar değişmez. Hesaplanan çıkışlar istenilen cevaplarla karşılaştırılarak hata tespit edilir. Hata işareti, gizli birimlerden çıkış birimine olan ağırlıkları değiştirmekte kullanılır. Fakat bunu yaparken giriş katmanından, gizli katmana gelenin değiştirilip değiştirilmediğini düşünmek gerekir. Gizli düğümlerden ne tür bir çıkış istendiği bilinemeyeceği için gizli birimlerin çıkışında hata işareti verilmesi kolay bir şey değildir. Bunun yerine, her bir birimin çıkış biriminin hatalarına olan etkisi bilinmelidir. Bu işlem, hatalı birim için gizli birime bağlı olan çıkış birimlerinin hata işaretlerinin ağırlıkları toplamı alınarak yapılır.



Şekil 4.4. Çok katmanlı almaç yapısı

Gizli katman sayısı çok olan YSA'daki her bir sistemin hata işareti, bir önceki katmanın düzeltilmiş işaretlerinden çıkartılarak işlem tekrarlanır. Sonuç olarak ağırlık düzeltme işlemi çıkış seviyesine bağlı ağırlıklardan başlar ve işlem ters yönde, giriş seviyesine varana kadar devam eder. Sonuçta, sistem hatalar yapar, ama hatalardan bir şeyler öğrenip isteneni bulana kadar işleme devam eder. Bu yöntemle "hatanın geriye yayılma algoritması" (Back-propagation algorithm) denir [49].

#### 4.5.3. Geriye yayılma (Back-Propagation) algoritması

Örnek olarak üç katmanlı bir YSA'nın geriye yayılma algoritması ile eğitilmesini inceleyelim. Her bir düğüm, tek bir işlem elemanıdır. Daha önce de belirtildiği gibi, genelde düğümler katmanlarda düzenlenir. Veri girişleri ise düğümlerden yapılır.

Giriş düğümleri pasiftir ve hesaplanabilir değildir. Giriş ile çıkış katmanı arasında kalan “gizli” düğümlere, ağırlıklı veri değerleri bu katmandan iletilir. Her geriye yayılma düğümü için ayrıca bir eşik değer girişi de bulunmaktadır. Bu girişler düğümün referans seviyesi olarak adlandırılır. Bütün gizli düğümler, tüm giriş verilerini alır. Fakat her biri farklı ağırlık kümesine sahip olduğu için, değerler kümesi de farklıdır. Her bir gizli düğüm kendisine gelen girişleri işleyerek sonucu çıkış düğümüne aktarır. Çıkışlar da farklı ağırlık kümesine sahiptir. Geriye yayılma için gizli ve çıkış düğümleri kendisine giren girişleri iki aşamada işlerler. Her giriş kendisinin ağırlığı ile çarpılıp, çarpımlar toplanır ve sonra bu toplam bir fonksiyon üzerinde çıkış elde edebilmek üzere bir sonraki katmana aktarılır. Bu transfer fonksiyonuna “Sigmoid Fonksiyonu” denir. Sigmoid fonksiyonu bir doğrusalsızlık oluşturur. Bu nonlineerlik, ağın yeteneğinin güvenilirliğini daha fazla artırır. Geriye yayımlı öğrenme algoritmasının en büyük özelliği, hatalara karşı verdiği cevapta, ağırlıklarının değerini değiştirebilmesidir.

Geriye yayımlı eğitim sırasında ağ, her giriş örneğini çıkış düğümlerinde, sonuç üretmek üzere gizli katmanlardaki düğümlere aktarır. Sonra, çıkış katmanındaki hataları bulabilmek için amaçlanan hedef sonuçtan gerçek sonucu elde eder. Bu işlemden sonra ağ, çıkış hatalarının türevini, çıkış katmanından geriye doğru gizli katmanlara aktarırlar. Bunu yaparken de gerçek ağırlık bağlantılarını kullanırlar. Hataların geriye doğru yayılması özelliğinden dolayı “geriye yayılma algoritması” ismi verilmiştir.

Her giriş-çıkış düğümlerinin hata değerleri bulduktan sonra düğümler, kendi hatalarını azaltmak için ağırlıklarını ayarlamaktadırlar. Ağırlık değiştirme denklemleri, ağdaki hataların kareleri toplamını minimize edecek şekilde düzenlenir. Bu söylenenlerin denklemsel gösterimleri Bölüm 4.5.4’de verilmiştir [49].

#### **4.5.4. Hatanın geriye yayılım algoritması ve genelleştirilmiş delta kuralı**

Hatanın geriye yayılma algoritması, karesi alınmış hata fonksiyonunu minimize eden bir algoritma olup ve genelleştirilmiş delta kuralını eğitime amaçlı kullanılır. Algoritmaya göre her bir  $j$  biriminin çıkışı  $o_j$  Denklem (4.5)’deki gibi tanımlanır.

$$o_j = f(\text{net}_j) = f(x) \text{ ise, } \text{net}_j = \sum_i^j w_{ji} \cdot o_i + \theta_j \quad (4.5)$$

Burada,  $o_i$ ; i. biriminin çıkışı,  $w_{ji}$ ; i biriminden j birimine bağlantının ağırlığı,  $\theta_j$ ; j biriminin kutbu (bias),  $\sum_i^j$ ; çıkışı j birimine akan her i biriminin toplamıdır.  $f(x)$ , monoton artan ve türevi alınabilen bir fonksiyondur. Pratikte bir aktivasyon fonksiyonu olarak  $f(x)=1/(1+e^{-x})$  (sigmoid) daha çok kullanılmaktadır.

m boyutlu giriş örüntüleri set edildiğinde,  $\{i_p = (i_{p1}, i_{p2}, \dots, i_{pm})\}; p \in P\}$ 'dir. Benzer şekilde istenilen n boyutlu çıkış örüntülerini  $\{t_p = (t_{p1}, t_{p2}, \dots, t_{pn})\} p \in P\}$  belirtir. Burada, P; YSA'ya uygulanan işaret, şekil gibi örüntüler verir.

Bir örüntü için karesel hata fonksiyonu  $E_p$  Denklem (4.6)'daki gibi tanımlanır.

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j \in \text{çıkış katmanı}} (t_{pj} - o_{pj})^2 \quad (4.6)$$

Burada amaç, uygun  $w_{ji}$  ve  $\theta_j$  seçimiyle toplam karesel hatayı yeterince küçük yapmaktır. Bu nedenle, giriş örüntüsü ardı ardına ve rasgele biçimde seçilir. Daha sonra  $w_{ji}$  ve  $\theta_j$  şu şekilde değiştirilir:

$i_{pi}$  : Giriş işaretinin i bileşeni

$t_{pj}$  : Çıkış vektörünün j bileşeni

$o_{pj}$ : YSA'ya uygulanan p örüntü setinin ürettiği çıkıştır. Buna göre Denklem (4.7), (4.8) ve (4.9) eşitlikleri yazılabilir.

$$\delta_{pj} = (t_{pj} - o_{pj}) \quad (4.7)$$

$$\Delta_p \cdot w_{ji} = -\varepsilon \cdot \left( \frac{\partial E_p}{\partial w_{ji}} \right) \quad (4.8)$$

$$\Delta_p \cdot \theta_j = -\varepsilon \cdot \left( \frac{\partial E_p}{\partial \theta_j} \right) \quad (4.9)$$

Burada,  $\varepsilon$ ; öğrenme oranı adı verilen küçük pozitif bir sabit sayıdır. Eğer gizli katman yok ise, Denklem (4.8) ve (4.9)'un sağ tarafı hesaplanarak Denklem (4.10), (4.11), (4.12) ve (4.13) eşitlikleri yazılabilir.

$$\frac{\partial E_p}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial E_p}{\partial o_{pj}} \cdot \frac{\partial o_{pj}}{\partial w_{ji}} \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial o_{pj}} = -(t_{pj} - o_{pj}) = -\delta_{pj} \quad (4.11)$$

$$o_p = \sum_i w_{ji} \cdot i_{pi} \quad (4.12)$$

ise;

$$\frac{\partial o_{pj}}{\partial w_{ji}} = i_{pi} \quad (4.13)$$

elde edilir. Denklem (4.11) ve (4.13) ifadelerini Denklem (4.10)'da yerine koyarsak Denklem (4.14)'deki eşitlik elde edilir.

$$-\frac{\partial E_p}{\partial w_{ji}} = \delta_{pj} \cdot i_{pi} \quad (4.14)$$

Öğrenmede en küçük hataya ulaşmak istenir. Bu durumda j. düğümün doğrusal olmayan çıkışı Denklem (4.15)'deki gibi ifade edilir.

$$o_{pj} = f_j(\text{netp}_j) \text{ ise, } \text{netp}_j = \sum_i w_{ji} \cdot o_{pi} \quad (4.15)$$

Denklem (4.15) kullanılarak, Denklem (4.16) ve (4.17) eşitlikleri yazılabilir.

$$\frac{\partial E_p}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial E_p}{\partial \text{netp}_j} \cdot \frac{\partial \text{netp}_j}{\partial w_{ji}} \leftrightarrow \frac{\partial \text{netp}_j}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial}{\partial w_{ji}} \sum_k w_{jk} \cdot o_{pk} = o_{pi} \quad (4.16)$$

$$\delta_{pi} = -\frac{\partial E_p}{\partial \text{netp}_j} = -\frac{\partial E_p}{\partial o_{pj}} \cdot \frac{\partial o_{pj}}{\partial \text{netp}_j} = -\frac{\partial E_p}{\partial o_{pj}} \cdot f'_j(\text{netp}_j) \quad (4.17)$$

Denklem (4.16) ve (4.17)'de iki durum vardır.

- $o_{pj}$  YSA'nın çıkışı ise; Denklem (4.11)'deki eşitliği, Denklem (4.17)'de yerine konduğunda Denklem (4.18) elde edilir.

$$\delta_{pj} = (t_{pj} - o_{pj}) \cdot f'_j(\text{netp}_j) \quad (4.18)$$

- Eğer gizli katmanların çıkış işaretlerinden bahsediliyorsa (eleman çıkış elemanı değilse) Denklem (4.19) yazılabilir.

$$\sum_k \frac{\partial E_p}{\partial \text{netp}_k} \cdot \frac{\partial \text{netp}_k}{\partial p_j} \quad (4.19)$$

Bu durumda Denklem (4.20) eşitliği yazılabilir.

$$\sum_k \frac{\partial E_p}{\partial \text{netp}_k} \cdot \frac{\partial}{\partial o_{pj}} \cdot \sum_i w_{ki} \cdot o_{pj} = - \sum_k \delta_{pk} \cdot w_{kj} \quad (4.20)$$

Elde edilen Denklem (4.20), Denklem (4.17)'de yerine konduğunda Denklem (4.21) elde edilir.

$$\delta_{pj} = f'_j(\text{netp}_j) \cdot \sum_k \delta_{pk} \cdot w_{kj} \quad (4.21)$$

Denklem (4.20)'deki (-) işareti, ağırlıkların ters yönde değiştiğini belirtir. Bütün işlemler özetlenecek olursa;

- Genelleştirilmiş  $\Delta$  (delta) kuralı:  $(\Delta_p \cdot w_{ji} = \varepsilon \cdot \delta_{pj} \cdot i_{pi})$
- Çıkış katmanı elemanları için:  $(\delta_{pj} = (t_{pj} - o_{pj}) \cdot f'_j(\text{netp}_j))$
- Gizli katman elemanları için:  $(\delta_{pj} = f'_j(\text{netp}_j) \cdot \sum_k \delta_{pk} \cdot w_{kj})$

olur. İşlem elemanında, transfer (esik) fonksiyonu olarak “Sigmoid” fonksiyonu kullanılarak türevi alınır ve gerekli kısaltmalar yapılırsa Denklem (4.22) elde edilir.

$$\frac{\partial o_{pj}}{\partial \text{netp}_j} = o_{pj} \cdot (1 - o_{pj}) \quad (4.22)$$

Denklem (4.22)'deki eşitliği Denklem (4.18)'de yerine koyarsak, çıkış elemanı için Denklem (4.23) elde edilir.

$$\delta_{pj} = (t_{pj} - o_{pj}) \cdot o_{pj} \cdot (1 - o_{pj}) \quad (4.23)$$

Denklem (4.22)'yi Denklem (4.21)'de yerine koyarsak, gizli katman elemanı için Denklem (4.24) elde edilir.

$$\delta_{pj} = o_{pj} \cdot (1 - o_{pj}) \cdot \sum_k \delta_{pk} \cdot w_{kj} \quad (4.24)$$

Yukarıda toplam içerisinde gösterilen k'nın, j çıkış birimine akan her birim k olduğuna dikkat edilmelidir. Hesaplamayı hızlandırmak için momentum terimleri ( $\alpha$ ) eklenirse, en genel halde çıkış ve gizli katman eşitlikleri Denklem (4.25) ve (4.26)'daki gibi ifade edilir.

$$\Delta_p \cdot w_{ji} (n+1) = \varepsilon \cdot \delta_{pj} \cdot o_{pi} + \alpha \cdot \Delta_p \cdot w_{ji} (n) \quad (4.25)$$

$$\Delta_p \cdot \theta_j (n+1) = \varepsilon \cdot \delta_{pj} + \alpha \cdot \Delta_p \cdot \theta_j (n) \quad (4.26)$$

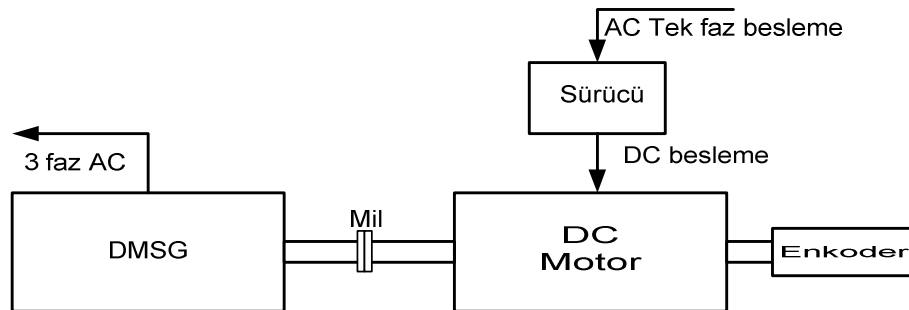
Burada; n, öğrenme saykılarının sayısını gösterir,  $\alpha$  ise küçük bir pozitif sayıdır.

## 5. GENERATÖR PARAMETRELERİNİN TESPİTİ, DMSG'NİN MATEMATİKSEL MODELİ VE MAKSİMUM GÜÇ TAKİBİNİN GERÇEKLEŞTİRİLEREK ELDE EDİLEN SONUÇLARIN İRDELENMESİ

Bu bölümde, öncelikle DMSG'nin MATLAB/Simulink® simülasyonunun yapılabilmesi için gerekli olan parametreler deneysel olarak tespit edilmektedir. Tespit edilen parametrelerin doğruluğu uygulama sonuçları ile karşılaştırılarak analiz edilmektedir. Daha sonra DMSG'nin matematiksel modellemesi ile ilgili temel bilgiler verilmektedir. Maksimum güç takibi ile ilgili kontrol sistemi hakkında özet bilgi verilmektedir. Maksimum güç takip şeması da sunulduktan sonra, maksimum güç takibinde kullanılan YSA ile ilgili bilgiler verilmektedir. Uygulama için oluşturulan deney seti anlatılmaktadır ve en sonunda kontrol algoritması olarak YSA, EU ve AT karşılaştırılarak, YSA denetleyicisinin uygulama ve simülasyon sonuçları analiz edilmektedir.

### 5.1. Generatör Parametrelerinin Ölçülmesi ve Doğruluğunun Test Edilmesi

DMSG'nin simülasyonu için gerekli olan parametreler; kutup çifti sayısı ( $P$ ), faz başına stator sargı direnci ( $r_s$ ), rotor d-q eksenli endüktansları ( $L_d, L_q$ ) ve uyarma akısı ( $\lambda_m$ )'dir. Bu parametrelerin ölçülebilmesi için Şekil 5.1'de görülen deney düzeneği kurulmuştur. DMSG'nin miline DC motor akuple bağlanarak, sürücü ile DC motorun hız ayarı yapılmaktadır. DMSG hızı enkoder ile ölçülmektedir.



Şekil 5.1. DMSG parametrelerinin ölçülmesi için kurulan deney düzeneğinin blok diyagramı

DMSG simülasyonu için gerekli olan parametreler, kaynak [131] ve [132]'de kullanılan yöntemler ile elde edilmiştir. Tespit edilen DMSG parametreleri Tablo 5.1'de verilmektedir.

Tablo 5.1. DMSG parametreleri

P	8
$r_s$ ( $\Omega$ )	1,35
$L_d$ (mH)	6,93
$L_q$ (mH)	6,93
$\lambda_m$ (Wb)	0,3946

Parametreleri tespit edilen 1 kW'lık generatörün rotor ve stator resimleri sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de görülmektedir. Şekil 5.4'deki blok diyagramına göre uygulama seti hazırlandı. DC motor hız kontrolü için Şekil 5.5'deki MATLAB/Simulink® modeli oluşturuldu.



Şekil 5.2. Kullanılan DMSG'nin rotor resmi

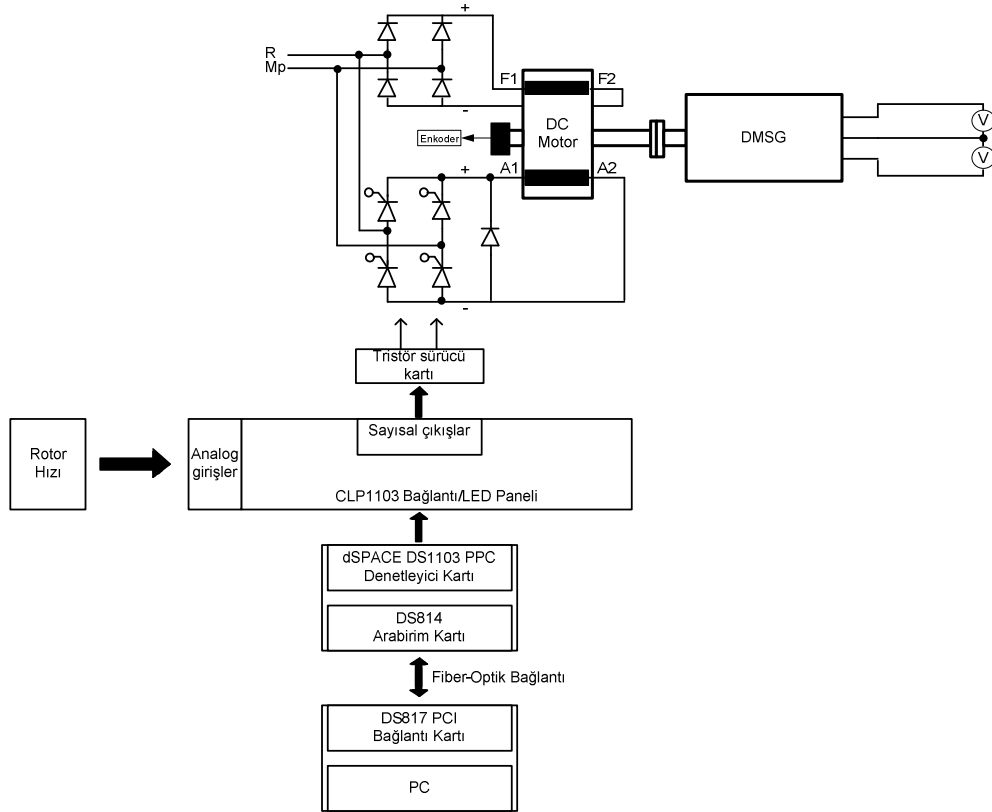


Şekil 5.3. Kullanılan DMSG'nin rotor ve stator resmi

Şekil 5.4'de DMSG parametrelerinin tespiti için kurulan deney seti blok diyagramı görülmektedir. Bilgisayar ortamında oluşturulan MATLAB/Simulink® model kullanılarak dSPACE aracılığı ile DC motor hızı kontrol edilmektedir. DC motor

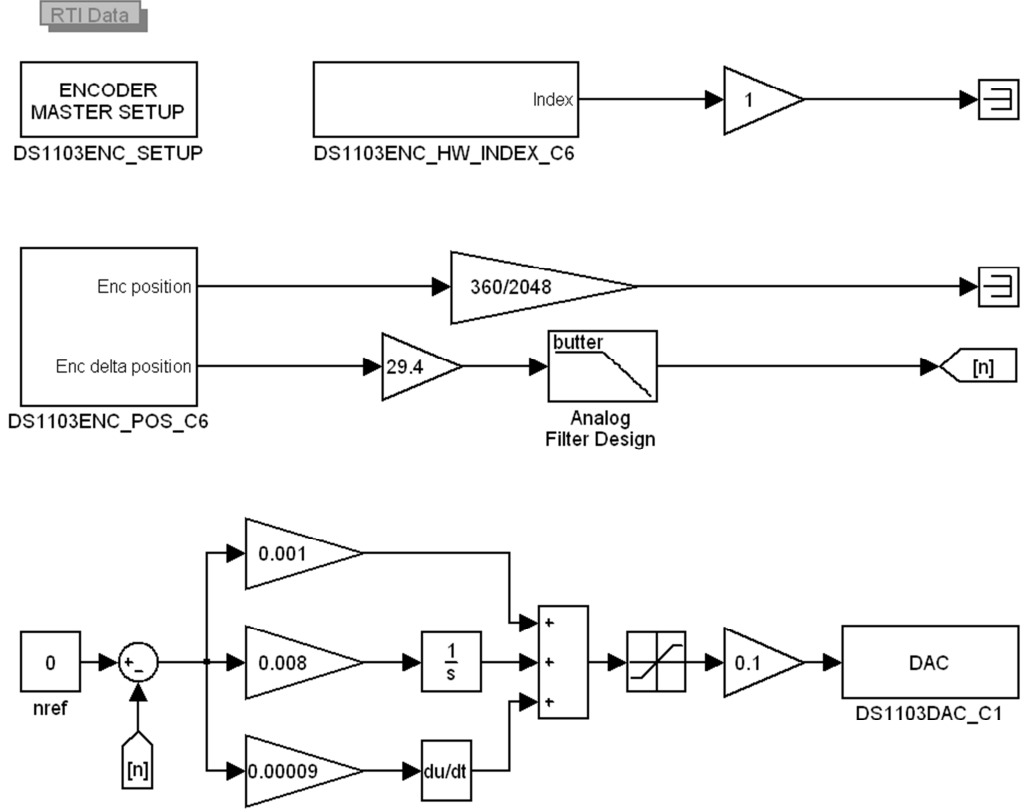


miline akuple edilmiş enkoderden alınan konum ve hız bilgisi, dSPACE aracılığı ile bilgisayar ortamına aktarılmakta ve bu bilgiye göre hız denetimi yapılmaktadır. DC motor kutup sargısı (F1-F2) 200 Volt tam dalga DC gerilimle ve endüvi sargısı (A1-A2) ise dSPACE'den gelen analog kontrol sinyaline göre tam denetimli tristörler ile beslenmektedir.



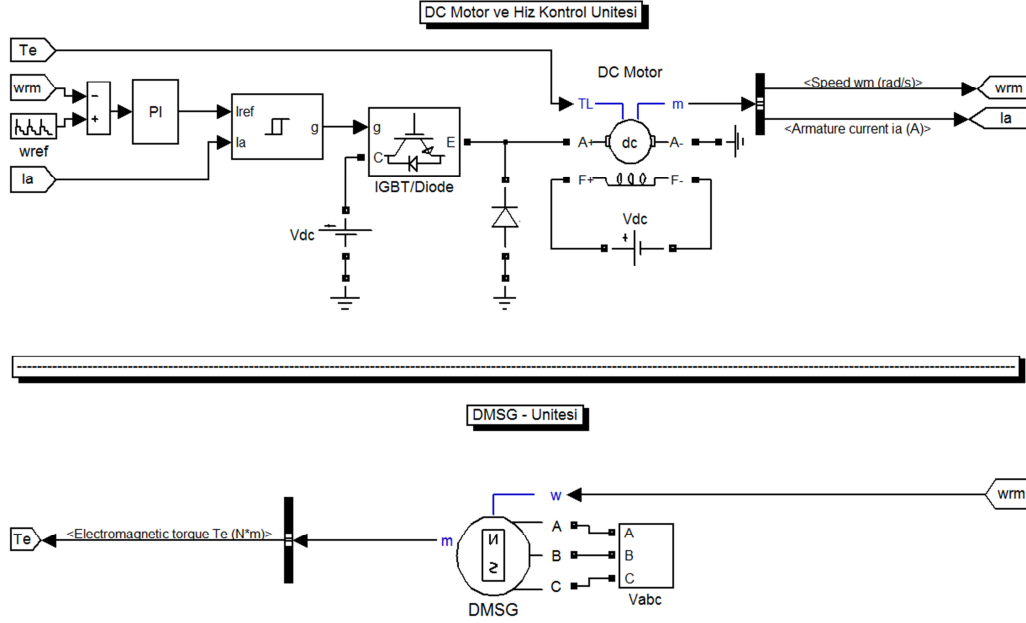
Şekil 5.4. DMSG parametrelerinin tesbiti için kurulan deney setinin blok diyagramı

Şekil 5.5'de DC motor hız kontrolü için oluşturulan MATLAB/Simulink® model görülmektedir. Şekil 5.5'deki blokların işlevi şu şekildedir: DS1103ENC\_SETUP bloğu; dSPACE enkoder kanalları için parametreleri ayarlamaktadır, DS1103ENC\_HW\_INDEX\_C6; donanım tarafından gecikme olmadan pozisyon tespiti yapmada enkoder indeksini çağırmak için kullanılmaktadır, DS1103ENC\_POS\_C6; altıncı enkoder kanalından pozisyon değişimi ve pozisyonu okumak için kullanılmaktadır ve DS1103DAC\_C1; birinci D/A çıkışıdır. DS1103DAC\_C1 çıkışına göre DC motor hızı ayarlanmaktadır. DC motor hız kontrolü için PID denetleyici kullanılmaktadır.



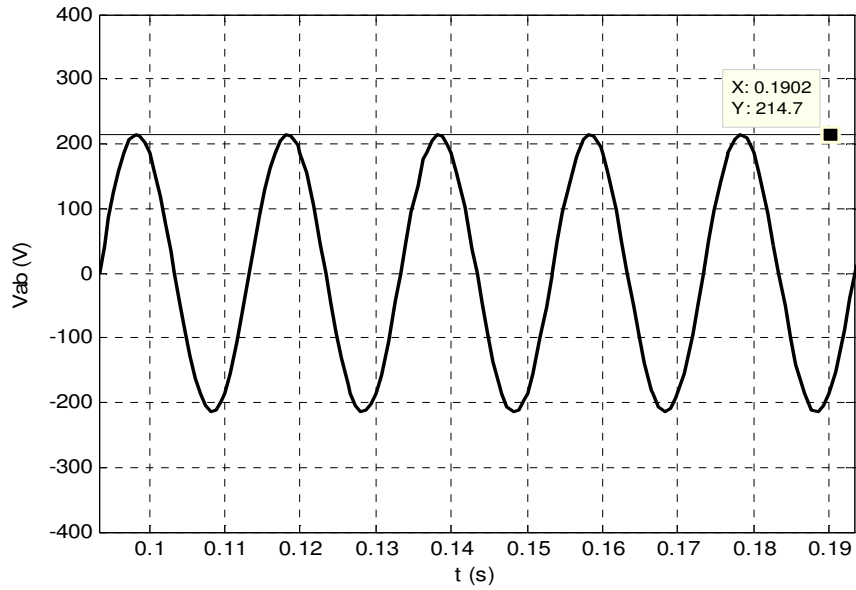
Şekil 5.5. DC motor hız kontrolü için oluşturulan MATLAB/Simulink® model

Şekil 5.6’da tespit edilen parametrelerin analizi için MATLAB/Simulink® ortamında oluşturulan model görülmektedir. DC motor kontrolü PI denetleyici ile gerçekleştirilmektedir. DMSG mili, DC motor mekanik hızı ( $\omega_{m}$ ) ile dönmektedir. DMSG’nin B (Nm/(rad/s)) ve J (kg m<sup>2</sup>) parametreleri ihmal edildiği için DC motor elektromanyetik moment ( $T_e$ ) kadar yüklenmektedir. Elde edilen DMSG parametreleri kullanılarak yapılan simülasyon sonucu Şekil 5.7’deki Vab gerilim değişimi elde edilmiştir.

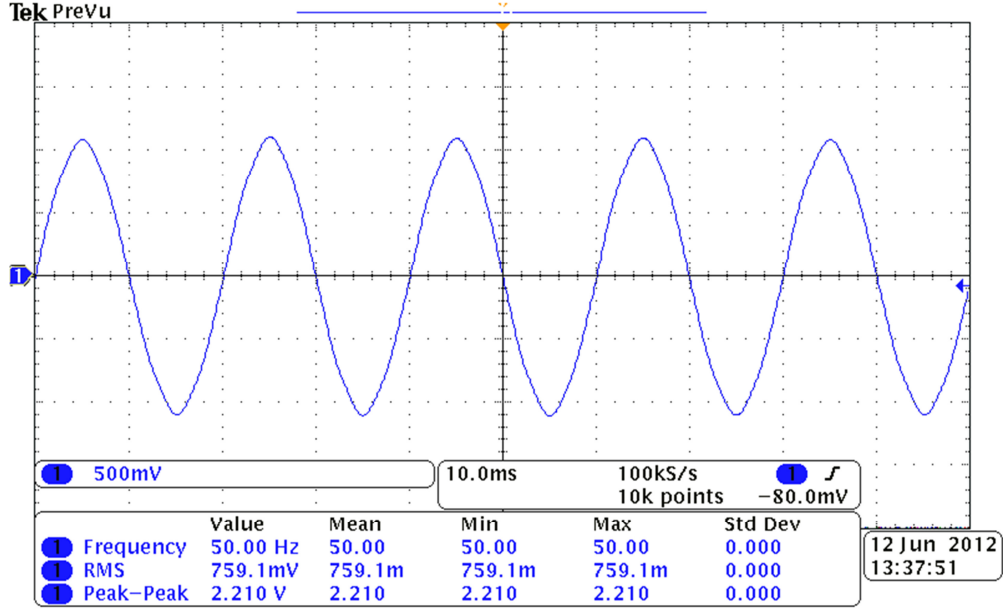


Şekil 5.6. Uygulama setinin MATLAB/Simulink® modeli

Şekil 5.5’de görülen model ve Şekil 5.4’de blok diyagramı görülen uygulama seti kullanılarak DC motor hız kontrolü gerçekleştirilmektedir. Uygulama ve simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’deki gibi elde edilmektedir. İki şekil incelendiğinde elde edilen gerilimlerin (uygulama sonucu  $V_{abmax}=214,71$  Volt ) örtüştüğü görülmektedir. Sonuç olarak elde edilen parametrelerin ve oluşturulan modelin doğruluğu tespit edildi.



Şekil 5.7. Simülasyon sonucu elde edilen Vab gerilim değişimi



Şekil 5.8. Uygulama sonucu elde edilen Vab gerilim değişimi

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'in toplam harmonik bozunumu (THD) analizleri yapıldığında, simülasyon sonucuna göre DMSG'nin boş çalışmadaki gerilimlerin ortalama THD değeri yaklaşık % 0,93 ve uygulama sonucuna göre ise yaklaşık % 1,48 olarak tespit edildi.

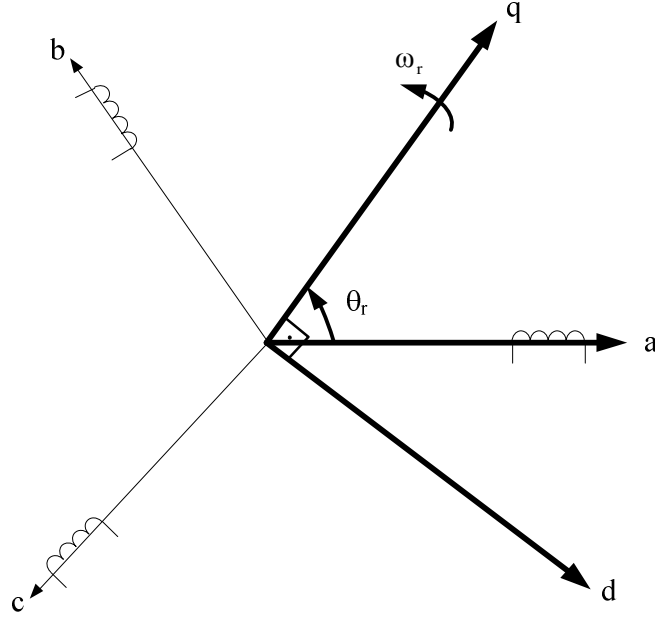
## 5.2. DMSG'nin Matematiksel Modeli ve Maksimum Güç Takibinin Gerçekleştirilmesi

Bu bölümde DMSG'nin matematiksel modeli ve vektör diyagramı, maksimum güç takibi kontrol sistemi, YSA algoritması ve modeli, uygulama setinin tasarlanması ve son olarak sistemin simülasyon ve uygulama sonuçları irdelenmektedir.

### 5.2.1. DMSG'nin matematiksel modeli

DMSG için, d-q eksenli senkron rotor referans düzlemindeki matematiksel eşitlikler aşağıdaki gibidir [27, 30]. Şekil 5.9'da aralarında  $90^\circ$  elektriksel açı bulunan d-q eksenleri ve Şekil 5.10'da DMSG'nin d-q sistemindeki eşdeğer devresi görülmektedir.

Şekil 5.9’da,  $\theta_r$ ; q ekseninin stator faz sargısı ile yapmış olduğu açığı,  $\omega_r$ ; elektriksel rotor hızını (senkron hızı) ifade etmektedir. Stator sargıları için “d-q” gerilim eşitlikleri, Denklem (5.1) ve (5.2)’de görülmektedir.



Şekil 5.9. Aralarında 90° elektriksel açı bulunan d-q eksenleri

$$v_q = -r_s \cdot i_q + \frac{d(\lambda_q)}{dt} + \omega_r \cdot \lambda_d \quad (5.1)$$

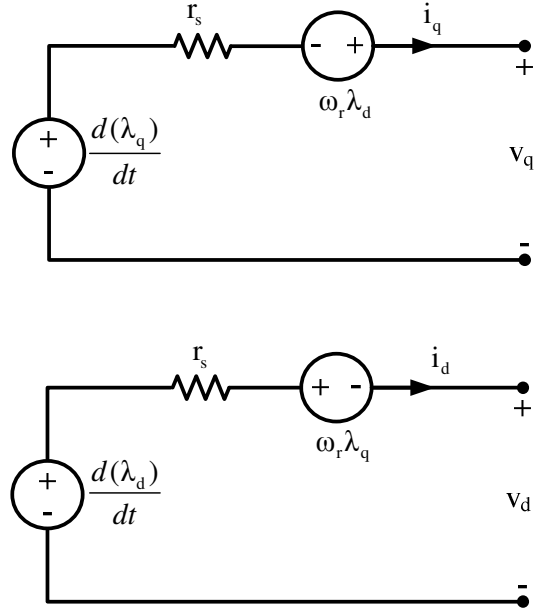
$$v_d = -r_s \cdot i_d + \frac{d(\lambda_d)}{dt} - \omega_r \cdot \lambda_q \quad (5.2)$$

Denklem (5.1) ve (5.2)’de,  $\lambda_d$  ve  $\lambda_q$ :

$$\lambda_d = -L_d \cdot i_d + \lambda_m \quad (5.3)$$

$$\lambda_q = -L_q \cdot i_q \quad (5.4)$$

olarak alınmaktadır. Burada,  $v_d$  ve  $v_q$ ; d-q eksen stator gerilimlerini,  $i_d$  ve  $i_q$ ; d-q eksen stator akımlarını temsil etmektedir.  $L_d$  ve  $L_q$ ; d-q eksen endüktanslarını ve  $r_s$ ; faz başına stator direncini göstermektedir.  $\lambda_m$ ; mıknatıs malzemenin stator sargılarında oluşturduğu uyarma akısını ifade etmektedir.



Şekil 5.10. DMSG'nin d-q eşdeğer devresi

DMSG'nin mekanik enerji eşitliği Denklem (5.5)'de görülmektedir:

$$P_{em} = \omega_{rm} \cdot T_e = \frac{3}{2} \cdot \omega_r \cdot (\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d) \quad (5.5)$$

burada,  $P_{em}$ ; elektromekanik gücü,  $\omega_{rm}$  rotorun mekaniksel hızını ve  $T_e$ ; elektromanyetik momenti ifade etmektedir.  $\omega_r$  ve  $\omega_{rm}$  arasındaki bağıntı Denklem (5.6)'da görülmektedir:

$$\omega_r = \frac{P}{2} \cdot \omega_{rm} \quad (5.6)$$

olmaktadır.  $P$ ; kutup çifti sayısıdır. d-q değişkenlerine göre DMSG için elektromanyetik moment  $T_e$  Denklem (5.7)'de verilmektedir.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d) \quad (5.7)$$

ile ifade edilmektedir. Denklem (5.3) ve (5.4) kullanılarak, Denklem (5.7) yeniden düzenlenecek olursa, elektriksel büyüklükler ile tanımlanan elektromanyetik moment eşitliği Denklem (5.8)'deki gibi elde edilir:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q + \lambda_m \cdot i_q] \quad (5.8)$$

DMSG'nin mekanik açısal hız (rad/s) eşitliği Denklem (5.9)'daki gibidir:

$$\frac{d(\omega_m)}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (T_m - T_e) \quad (5.9)$$

olarak yazılabilmektedir.  $T_m$ ; mekanik momenti ve  $J$ ; eylemsizlik momentini ( $\text{kg m}^2$ ) ifade etmektedir.

DMSG'nin aktif-reaktif-görünür gücü “power variant” dönüşümü ile yapıldı. aktif-reaktif-görünür gücü eşitlikleri sırasıyla Denklem (5.10), (5.11) ve (5.12)'de görülmektedir [133].  $f_{abc}$  gerilim ve akım değişkenleri  $f_{dq0}$  eksen takımına göre Denklem (5.13)'deki gibi ifade edilmektedir [134].

$$P_e = \frac{3}{2} \cdot (v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q) \quad (5.10)$$

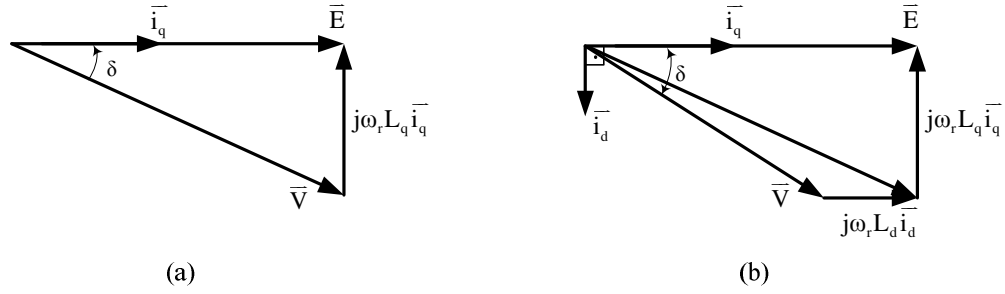
$$Q = \frac{3}{2} \cdot (v_q \cdot i_d - v_d \cdot i_q) \quad (5.11)$$

$$S = \sqrt{P_e^2 + Q^2} \quad (5.12)$$

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

### 5.2.2. DMSG'nin vektör diyagramı

İncelenen DMSG'nin vektör diyagramı Şekil 5.11'de görüldüğü gibidir. Fazör diyagramı d ve q eksen bileşenlerine göre çizilmiştir [30].



Şekil 5.11. DMSG'nin vektör diyagramları. (a) minimum generatör akımı ( $i_d = 0$ ) için. (b) terminal gerilimini azaltmak ( $i_d > 0$ ) için

Şekil 5.11'de, d-q düzlemindeki DMSG'nin vektör diyagramları görülmektedir. Şekil 5.11'de,  $\vec{E}$ ; kutup tekerleği gerilim vektörünü,  $\vec{V}$ ; generatör terminal gerilim vektörünü ve  $\delta$ ; yük açısını ifade etmektedir. Üretilen kutup tekerleği gerilim vektörü ve DMSG sargı direnci ihmal edildiğinde generatör terminal gerilim eşitlikleri sırasıyla Denklem (5.14) ve (5.15)'de görülmektedir.

$$\vec{E} = \omega_r \cdot \lambda_m \quad (5.14)$$

$$\vec{V} = \vec{E} - j\omega_r \cdot L_d \cdot \vec{i}_d - j\omega_r \cdot L_q \cdot \vec{i}_q \quad (5.15)$$

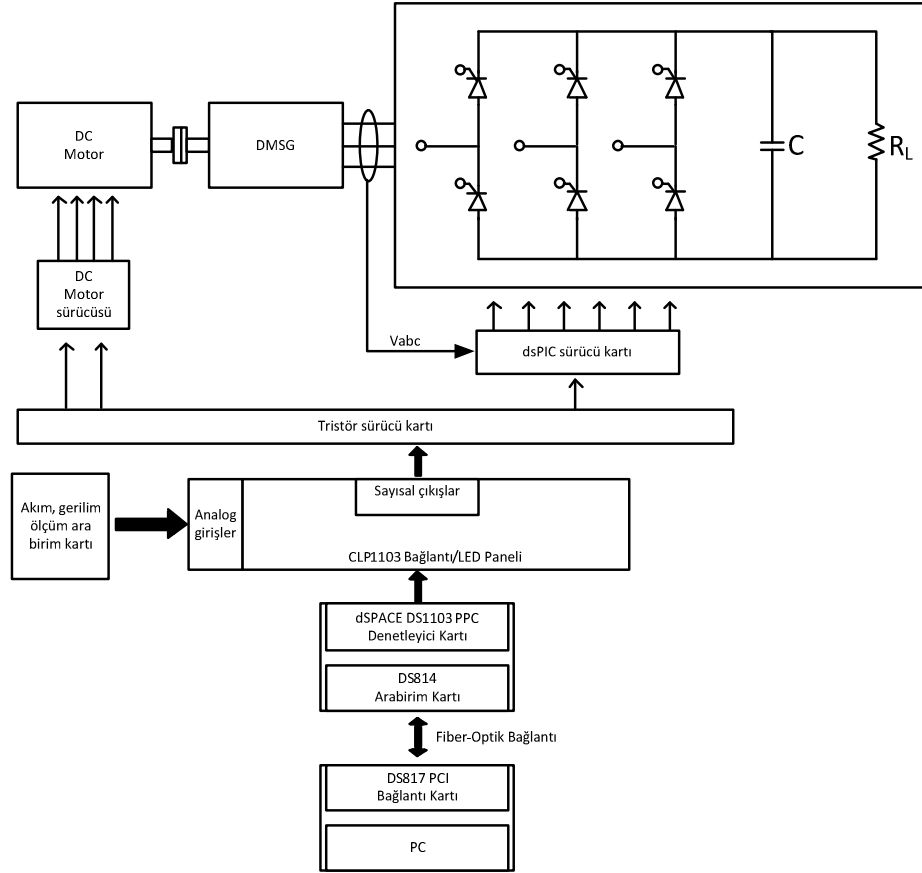
Normal çalışma durumlarında, generatör akımını minimum yapmak ve dolayısıyla bakır kayıplarını azaltmak için denetim algoritmalarında Şekil 5.11. (a)'da görüldüğü gibi  $i_d = 0$  olarak alınır. Fakat generatör istenilen ortalama hızdan daha yüksek hızlarda çalışması durumunda, generatör terminal uçlarında yüksek gerilimlere neden olacaktır. İstenmeyen bu gerilim salınımlarını minimize etmek için kondansatörler kullanılmaktadır. Şekil 5.11. (b)'de  $i_d > 0$  yapılarak generatör terminal gerilimi ayarlanmaktadır.

### 5.2.3. Maksimum güç takip kontrol sistemi

Şekil 5.12'de görüldüğü gibi DC motorla DMSG akuple bağlanmaktadır ve DC motor aracılığıyla DMSG tahrik edilmektedir. DMSG'den elde edilen gerilim, tristörlü dönüştürücü ile doğrultulmaktadır. Doğrultulan gerilim filtrelenerek DC bir yük beslenmektedir. dsPIC sürücü kartının kontrolü için MathWorks şirketinin ürettiği MATLAB/Simulink/Real-Time Workshop ve dSPACE'in Real-Time Interface (RTI) ve ControlDesk yazılımları kullanılmaktadır. Uygulamaların



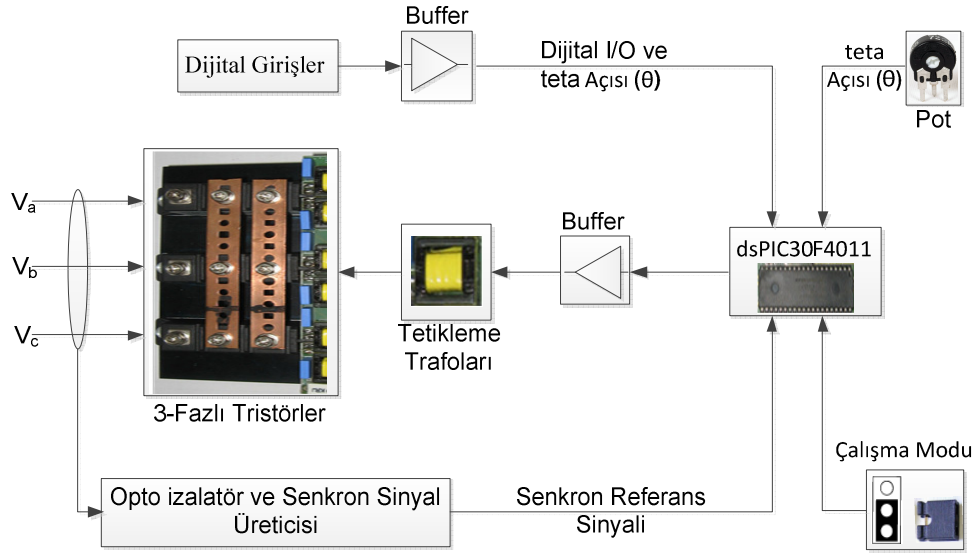
yapılmasında ve verilerin gerçek zamanda toplanmasında kullanılan, dSPACE' in sunduğu RTI ve ControlDesk programlarından yararlanılmaktadır. RTI herhangi bir programlamaya gerek kalmadan Simulink modellerini gerçek zamanlı donanım üzerinde çalıştırmak için kullanılan bir gerçekleştirme yazılımıdır. Deneysel sonuçların bilgisayar ortamına alınıp incelenmesi, analizi ve kaydedilmesi için dSPACE'in ControlDesk yazılımı kullanılmaktadır.



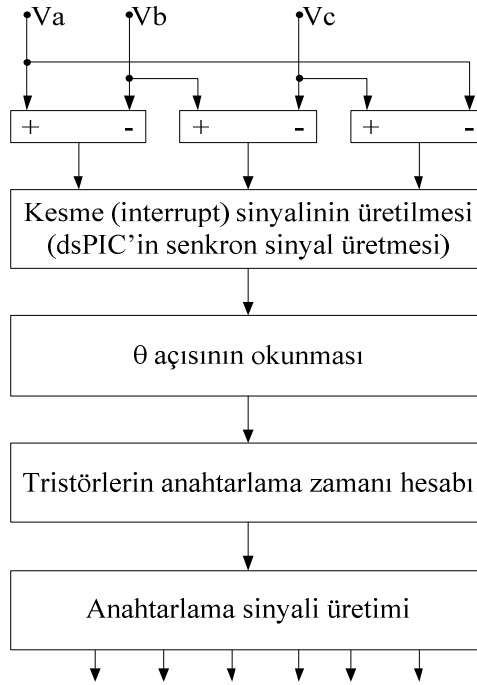
Şekil 5.12. Uygulama setinin blok diyagramı

Şekil 5.13'de çok amaçlı tristör sürücü devresi blok diyagramı görülmektedir. Microchip firmasının dsPIC30F4011 sayısal işaret denetleyicisi (DSC) motor kontrol uygulamaları için geliştirdiği bir çekirdektir. Bu denetleyici 30 MHz hızında, 16 bit mimaride, yüksek çözünürlüklü ADC ve PWM ara yüzleri ve motor kontrol ailelerinin tüm özelliklerine sahip, düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir denetleyicidir.  $V_a$ ,  $V_b$  ve  $V_c$  fazlarından alınan referans sinyallerin yalıtımı opto-izolatörle sağlanmakta ve kaynak gerilimi ile senkron sıfır geçiş sinyalleri elde edilmektedir. Senkron sıfır geçiş sinyali aracılığı ile tristör tetikleme sinyallerinin

süre ve zamanı belirlenmektedir. Şekil 5.14’de kullanılan dsPIC’in fazların sıfır geçiş noktalarını nasıl tespit ettiğine dair blok diyagramı görülmektedir. Tristör sürücü kartının hangi modda çalışacağı mod seçme anahtarı ile belirlenmektedir. Bu uygulamada dijital mod kullanılmaktadır. Senkron sıfır geçiş sinyali aracılığı ile tristörler maksimum güç noktalarında anahtarlanmaktadır.

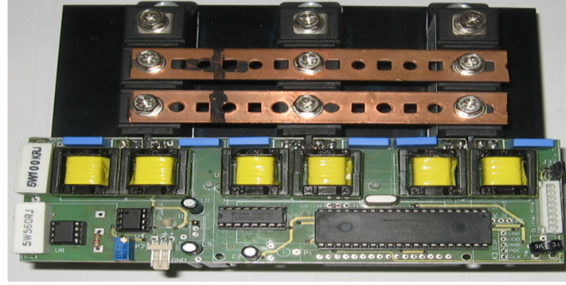


Şekil 5.13. Tristör sürücü kartının blok diyagramı



Şekil 5.14. dsPIC'in anahtarlama sinyalleri üretiminin blok diyagramı

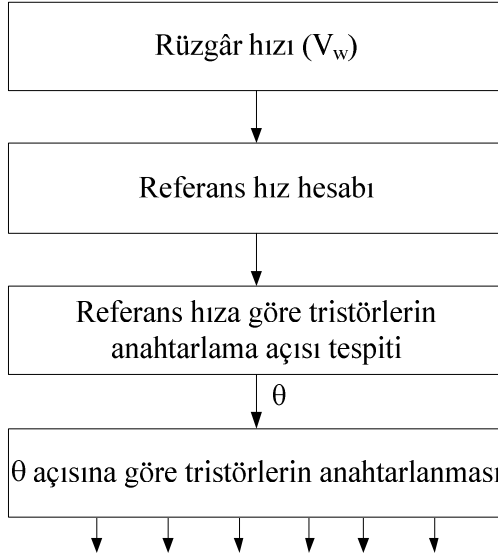
dsPIC30F4011 mikro denetleyici tabanlı tasarlanan genel amaçlı tristör sürücü kartı, 3-fazlı veya 1-fazlı tam denetimli doğrultucu olarak, 3-fazlı veya 1-fazlı AC gerilim denetleyicisi olarak veya 3-fazlı veya 1-fazlı statik anahtar olmak üzere üç farklı durumda çalışabilmektedir [135]. Çok amaçlı sürücü kartı Metin ve arkadaşları tarafından tasarlandı. Bu çalışmada ise, dsPIC yazılımı güncellenerek 3 fazlı rüzgâr generatör sistemlerinde kullanılabilir doğrultucuya dönüştürüldü. Şekil 5.15’de tasarlanan tristör sürücü kartının fotoğrafı görülmektedir.



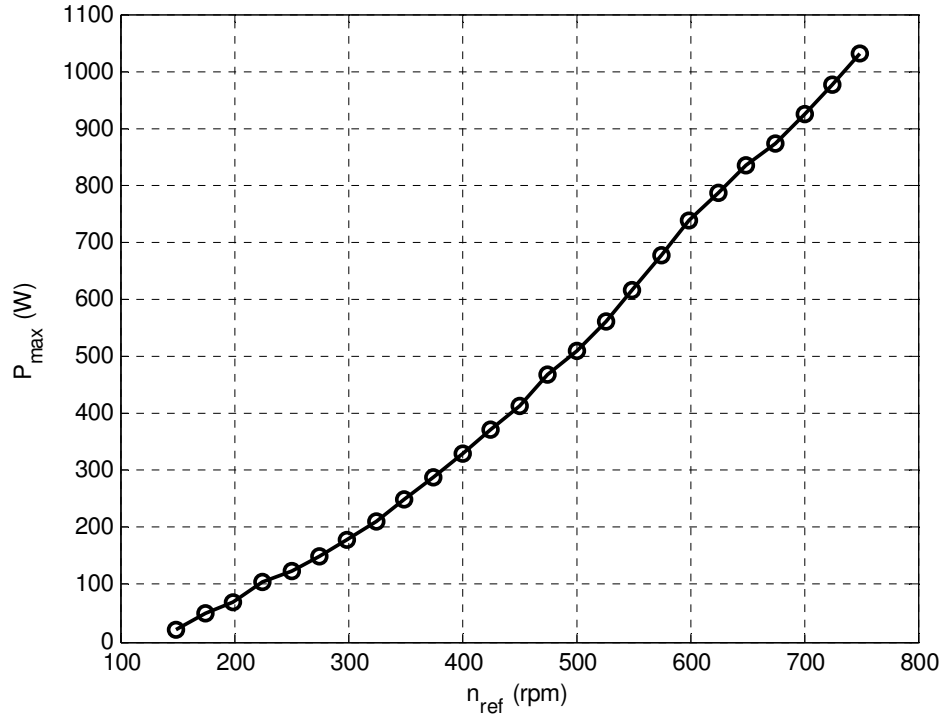
Şekil 5.15. Tristörlü sürücü kartı

#### 5.2.4. Maksimum güç takibi kontrol şeması

Maksimum güç takibi için izlenen yöntem şu şekildedir: Şekil 5.12’de blok diyagramı görülen, uygulama seti kullanılarak maksimum güç noktaları tespit edilmektedir. DC şönt motorun kutup sargısı tam dalga DC gerilimle (200 V) beslenmektedir. DC motor hızını kontrol etmek için, endüvi gerilimi kontrollü tristör doğrultucu ile ayarlanmaktadır. DC motor aracılığı ile DMSG tahrik edilmektedir. Rüzgâr hızına göre Denklem (5.16)’dan elde edilen DMSG referans hızı için tristörlerin anahtarlama açısı değiştirilerek maksimum güç noktaları ( $P_{max}$ ) elde edilmektedir. Şekil 5.16’da maksimum güç takibi algoritmasının blok diyagramı görülmektedir. Tablo 5.2’de deneysel sonuçlara göre elde edilen maksimum güç verileri görülmektedir. Bu verileri, belirlenen rüzgâr hızlarına göre DC baradan maksimum güç elde etmek için DMSG’nin tahrik edilmesi gereken hızlardaki maksimum güç değişimleridir. Şekil 5.17’de ise bu verilerin grafiksel değişimi görülmektedir. Şekil 5.17 incelendiğinde, maksimum güç DMSG hızı ile doğrusala yakın bir şekilde arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, DC barada kullanılan  $R_L$  yükünün yaklaşık olarak sabit tutulmasıdır.



Şekil 5.16. Maksimum güç takibi algoritmasının blok diyagramı



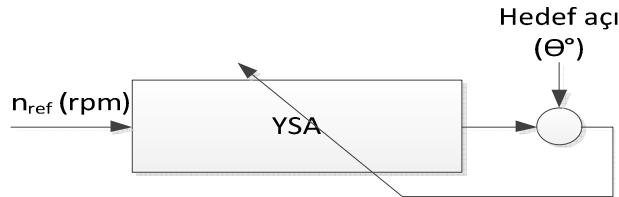
Şekil 5.17. DMSG hızına göre maksimum güç değişim eğrisi

Tablo 5.2. Referans hızlara göre elde edilen maksimum güç verileri

$n_{ref}$ (d/dak)	Elde edilen $P_{max}$ (W)	$n_{ref}$ (d/dak)	Elde edilen $P_{max}$ (W)
150	21,566	475	467,56
175	51,248	500	510,129
200	69,174	525	562,771
225	103,902	550	609,367
250	123,132	575	670,982
275	147,246	600	738,321
300	177,244	625	786,872
325	209,907	650	835,212
350	249,821	675	874,433
375	288,084	700	925,904
400	328,431	725	975,106
425	370,781	750	1030,674
450	413,253		

### 5.2.5. YSA algoritması

Şekil 5.18’de görülen tristör anahtarlama açısının tahmin algoritması 2-D lineer olmayan ters fonksiyon üzerine kurulmaktadır. Tan ve Islam (2004), doğrudan veya dolaylı olarak rüzgâr hız tahmini için güç haritalaması ve güç katsayısının iki boyutlu (2-D) AT’sini kullanmaktadır [136]. 2-D AT ile ters fonksiyon uygulaması, karmaşık ve hesaplamada zaman aşımına neden olduğu için sistemin performansı düşmektedir. YSA bu problemi çözmeye uygun bir teknik olduğu için kullanılmaktadır.



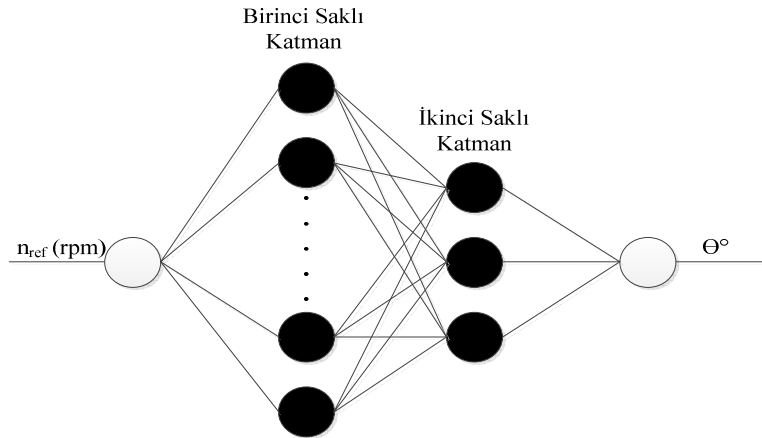
Şekil 5.18. Tristör anahtarlama açısının tahmin algoritmasında kullanılan YSA eğitim şeması

YSA denetleyicisi, maksimum güç noktalarını en hassas bir şekilde tespit etmek için kullanıldı. Tristörlerin anahtarlama açılarının tahmini için önerilen YSA eğitim şeması Şekil 5.18’de görülmektedir. Bu şemada, rüzgâr hızına göre elde edilen referans hızı ve bu hıza karşılık gelen tristörlerin anahtarlama açı değerleri Tablo 5.3’de görülmektedir. Tristörlerin anahtarlama açıları her hız için deneme yanılma yöntemi ile tespit edilmiştir. Bu yöntem ile tristörlerin anahtarlama açıları,

DMSG'nin her referans hızı için değiştirilerek DC baradan maksimum güç elde edilecek şekilde ayarlandı. Hız örnekleri kullanılarak, Şekil 5.19'da görülen dört katmanlı ağ ile eğitim yapılmaktadır. Kullanılan bu ağın birinci saklı katmanında sekiz tan-sigmoid nöron, ikinci saklı katmanında üç tan-sigmoid nöron ve çıkış katmanında bir lineer nörondan oluşmaktadır. Giriş ağ parametresi; generatör hızı ve çıkış ağ parametresi ise tristörlerin anahtarlama açısı  $\theta$ 'dır. Eğitim işlemi, Tablo 5.3'de görüldüğü gibi 13 giriş-çıkış örüntüsü kullanılarak 200 döngüde yapıldı.

Tablo 5.3. YSA eğitiminde ve testinde kullanılan veriler

YSA Eğitiminde kullanılan veriler		YSA testinde kullanılan veriler	
$n_{ref}$ (d/dak)	$\theta^\circ$	$n_{ref}$ (d/dak)	$\theta^\circ$
150	91	175	86
200	80	225	76
250	72	275	67
300	61	325	53
350	46	375	38
400	34	425	30
450	25	475	19
500	17	525	13
550	11	575	8
600	2	625	2
650	2	675	2
700	2	725	2
750	2		



Şekil 5.19. Dört katmanlı YSA yapısı

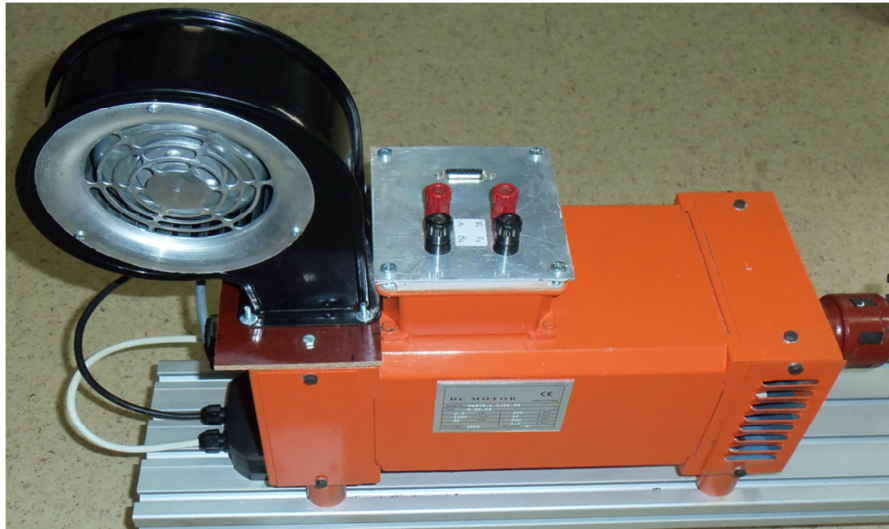
### 5.2.6. Uygulama setinin oluşturulması

Őekil 5.20’de DC motor sűrűcűsű gűrűlmektedir. Satın alınan sűrűcű baėlantıları modűler hale getirildi ve endűvi gerilim ayarı dSPACE aracılıėı ile otomatik yapılacak Őekilde tasarlandı.



Őekil 5.20. DC motor sűrűcűsűnűn resmi

Őekil 5.21’de DC Őont motor, salyangoz fan ve enkoder gűrűlmektedir. Satın alınan DC Őont motor ve ona akuple olarak baėlı enkoder uęları alűminyum levha űzerine tařınarak modűler hale getirildi. DC motoru soėutmak için salyangoz fan kullanıldı.



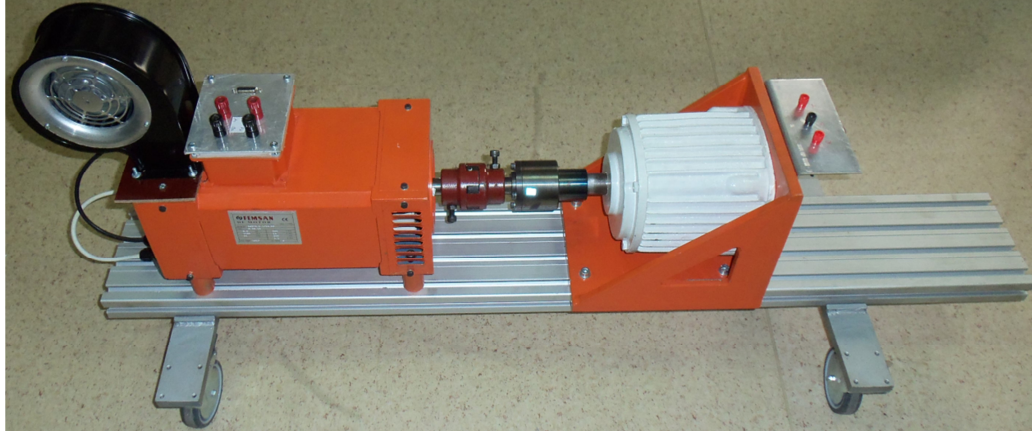
Şekil 5.21. DC Őont motor, salyangoz fan ve enkoder resmi

Şekil 5.22’de DMSG ve bağlantı uçları görülmektedir. Satın alınan generatör uçları alüminyum levha üzerine taşınarak modüler hale getirildi.



Şekil 5.22. DMSG resmi

Şekil 5.23’de DMSG ve DC şönt motorun akuple seti görülmektedir. Oluşturulan bu setle DC şönt motor DMSG ile akuple bağlanarak istenilen veriler alınmaktadır. Oluşturulan set, 360° dönebilen tekerlekler aracılığı ile rahatlıkla istenilen yere taşınabilmektedir.



Şekil 5.23. Kızak üzerine akuple edilen DMSG ve DC şönt motorun resmi

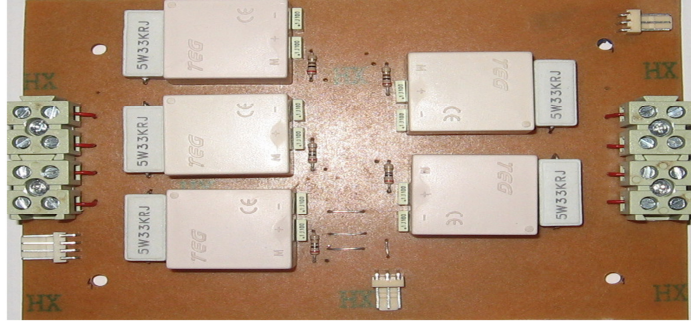
Şekil 5.24’de generatörden ve DC baradan çekilen akımların ölçümü için oluşturulan kart görülmektedir. 1, 2 ve 3 nolu sensörler generatör akımlarını ölçmekte, 4 nolu sensör DC bara akımını ölçmektedir. 5 ve 6 nolu sensörler ise yedek sensörlerdir.





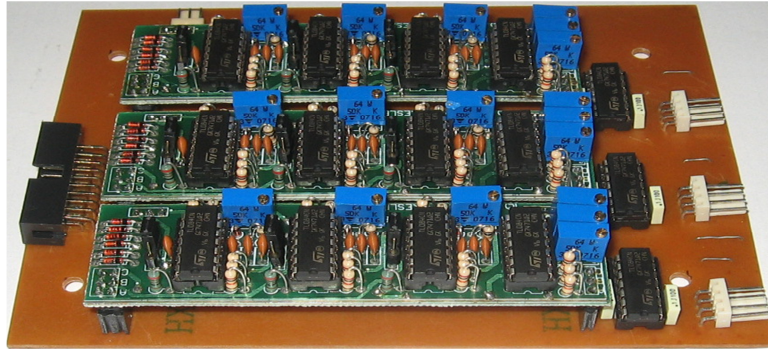
Şekil 5.24. Akım ölçümleri için tasarlanan kartın resmi

Şekil 5.25’de generatör ve DC bara gerilimleri ölçümü için oluşturulan kart görülmektedir. Bir tane de yedek sensör bulunmaktadır.



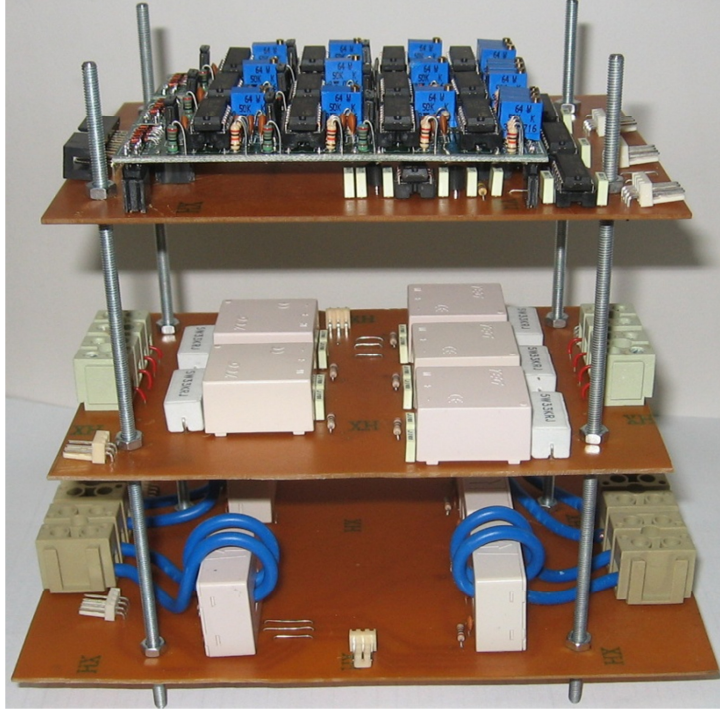
Şekil 5.25. Gerilim ölçümleri için tasarlanan kartın resmi

Şekil 5.26’da akım ve gerilim sinyallerini işleyerek dSPACE’e aktaran kart görülmektedir.



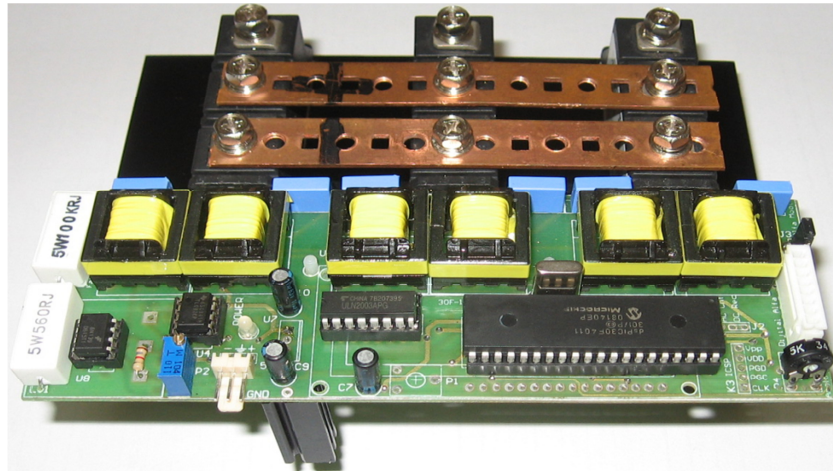
Şekil 5.26. Akım ve gerilim sensör sinyallerini dSPACE’e aktaran kartın resmi

Şekil 5.27’de akım, gerilim ve sinyal işleme kartları görülmektedir. Kartlar saplamalarla üst üste yerleştirilmiştir.

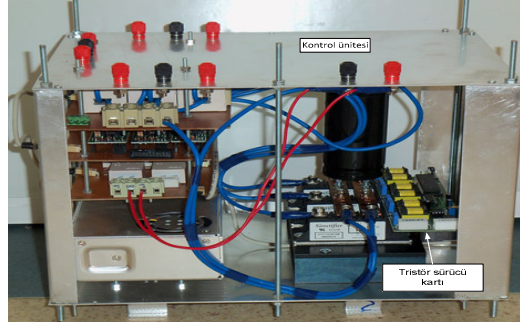


Şekil 5.27. Akım, gerilim ve sinyal işleme kartlarının resmi

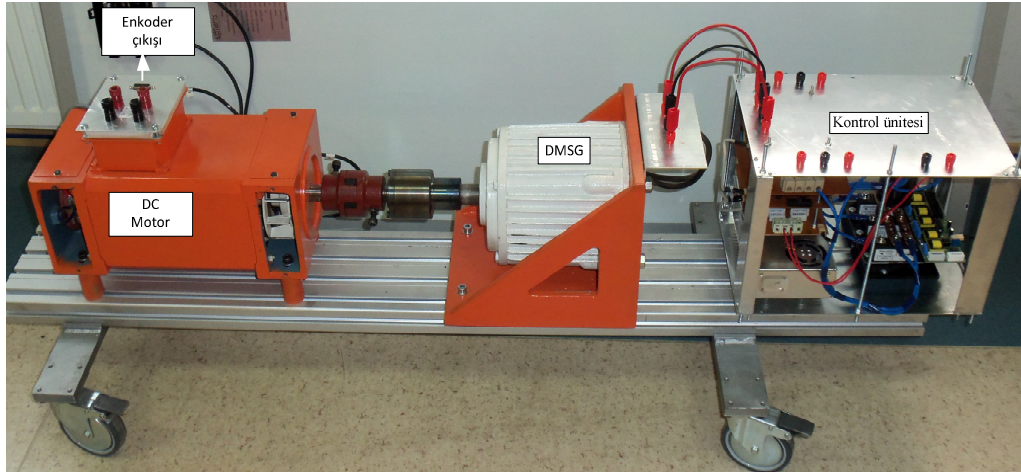
Şekil 5.28’de dönüştürücü devresi görülmektedir. Dönüştürücü ve Şekil 5.27’deki kartlar birleştirilerek Şekil 5.29’daki modül oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modül Şekil 5.30’daki gibi kızağa takılıp çıkarılabilmektedir. Dolayısıyla bu modül farklı uygulamalar için de rahatlıkla kullanılabilir.



Şekil 5.28. Dönüştürücü devresinin resmi



Şekil 5.29. Kontrol ünitesinin resmi

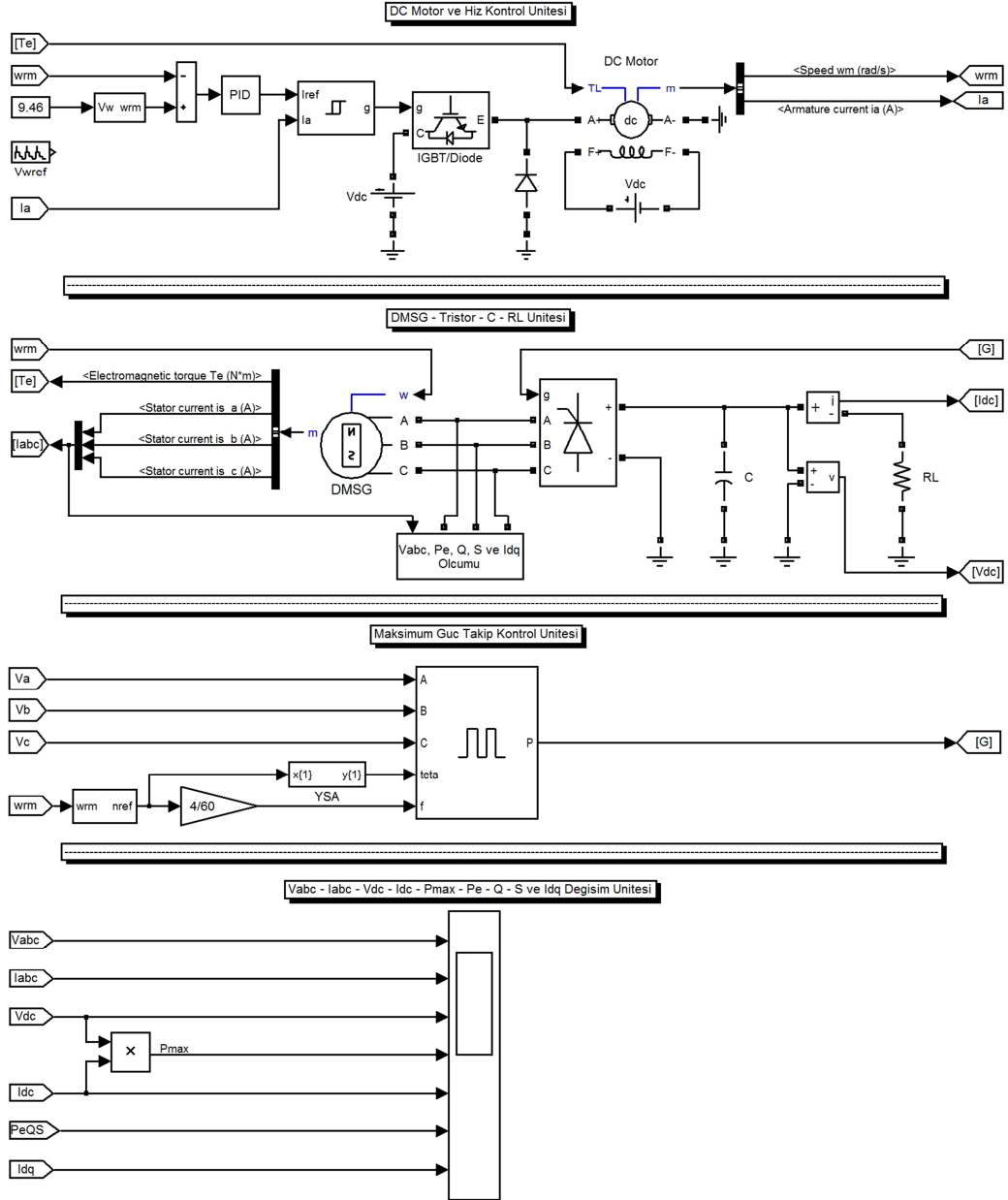


Şekil 5.30. Deney setinin resmi

### 5.2.7. Simülasyon ve deneysel sonuçlar

Bu bölümde DMSG'nin simülasyon ve uygulama sonuçları irdelenmektedir. Öncelikle uygulama setinin MATLAB/Simulink® modeli anlatılmaktadır. PC ile uygulama setinin kontrolü ve dSPACE aracılığı ile istenilen ölçümlerin yapılabilmesi için MATLAB/Simulink® model anlatılmaktadır. Son olarak simülasyon ve uygulama sonuçları karşılaştırılmaktadır.

Şekil 5.31'de uygulama setinin MATLAB/Simulink® modeli görülmektedir. Tasarlanan model dört üniteden oluşmaktadır. Oluşturulan model, MATLAB/Simulink® kütüphanesindeki hazır bloklar kullanılarak tasarlanmıştır. Bu üniteler detaylı olarak aşağıda anlatılmaktadır.



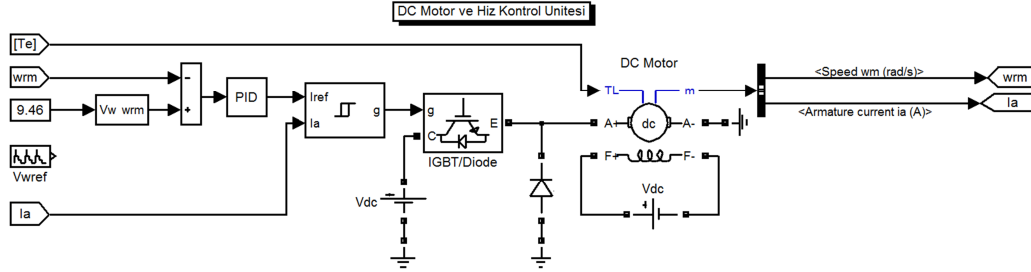
Şekil 5.31. Uygulama sisteminin MATLAB/Simulink® modeli

Şekil 5.32’de DC motor hız kontrol ünitesinin blok diyagramı görülmektedir. DC motor hız kontrolü PID denetleyici ile gerçekleştirilmektedir. Rüzgâr türbini üreticisi firmanın vermiş olduğu katalog verilerine göre Denklem (3.13) kullanılarak optimum uç hız oranı ( $\lambda_{opt}=8,14$ ) tespit edilmiştir. Bu değer kullanılarak Denklem (5.16)’dan referans  $\omega_{rm}^*$  değeri üretilerek generatör hız ayarı DC motor aracılığı ile bu değere set edildi. Herhangi bir rüzgâr hızına göre elde edilen referans  $\omega_{rm}^*$  değerinde generatör mili döndürülerek ve uygun açılarda dönüştürücü anahtarlanarak maksimum güç



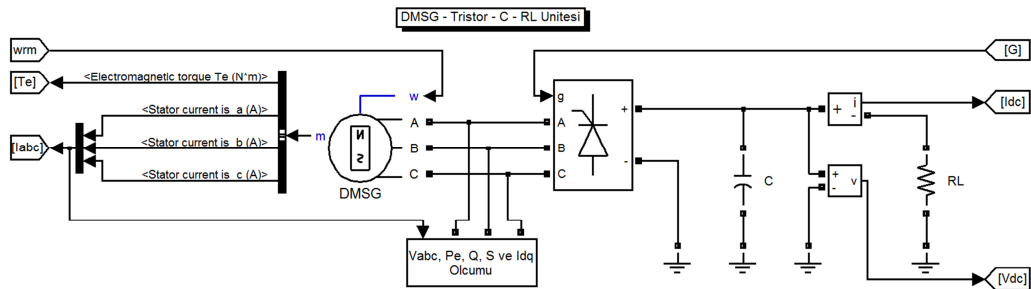
takibi gerçekleştirilmektedir [2, 4]. DMSG'nin B (Nm/(rad/s)) ve J (kgm<sup>2</sup>) parametreleri ihmal edildiği için DC motor elektromanyetik moment (T<sub>e</sub>) kadar yüklenmektedir.

$$\omega_{rm}^* = \frac{V_w \cdot \lambda_{opt}}{R} \quad (\text{rad/s}) \quad (5.16)$$



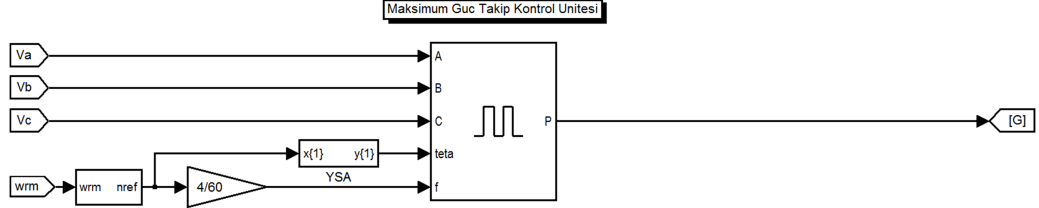
Şekil 5.32. DC motor hız kontrol ünitesinin blok diyagramı

Şekil 5.33'de DMSG, tristör, kondansatör (C) ve yük direnci (R<sub>L</sub>) ünitesi görülmektedir. DMSG mili, DC motor mekanik hızı (ω<sub>rm</sub>) ile dönmektedir. Maksimum güç takip kontrol ünitesinden elde edilen anahtarlama sinyallerine göre tristörler sürülmektedir. Elde edilen DC gerilim kondansatörle (1500 μF) filtrelenerek, R<sub>L</sub> yükünde harcanmaktadır. V<sub>abc</sub>, P<sub>e</sub>, Q, S ve I<sub>dq</sub> ölçüm bloğu ile DMSG'nin üç faz gerilimi, aktif gücü, reaktif gücü, görünür gücü ve dq eksenli akımlarının değişimleri ölçülmektedir.



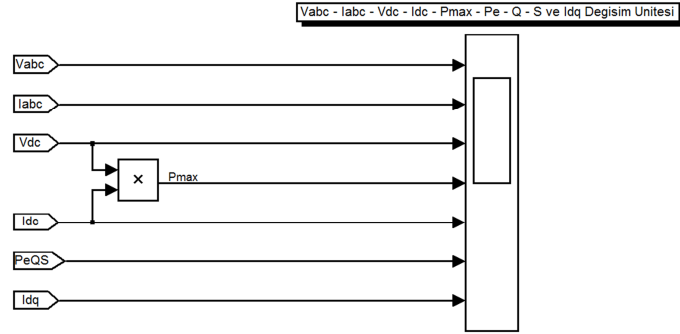
Şekil 5.33. DMSG, tristör, kondansatör ve R<sub>L</sub> ünitesinin blok diyagramı

Şekil 5.34'de maksimum güç takip kontrol ünitesinin blok diyagramı görülmektedir. DMSG'den elde edilen gerilimler ve frekansa (f) göre fazların sıfır geçiş noktaları tespit edilmektedir. DC motor dolayısıyla DMSG hızına göre YSA denetleyicisi maksimum güç açısını üretmektedir. YSA'nın ürettiği açığa göre ise tristörlerin tetikleme sinyalleri üretilmektedir.



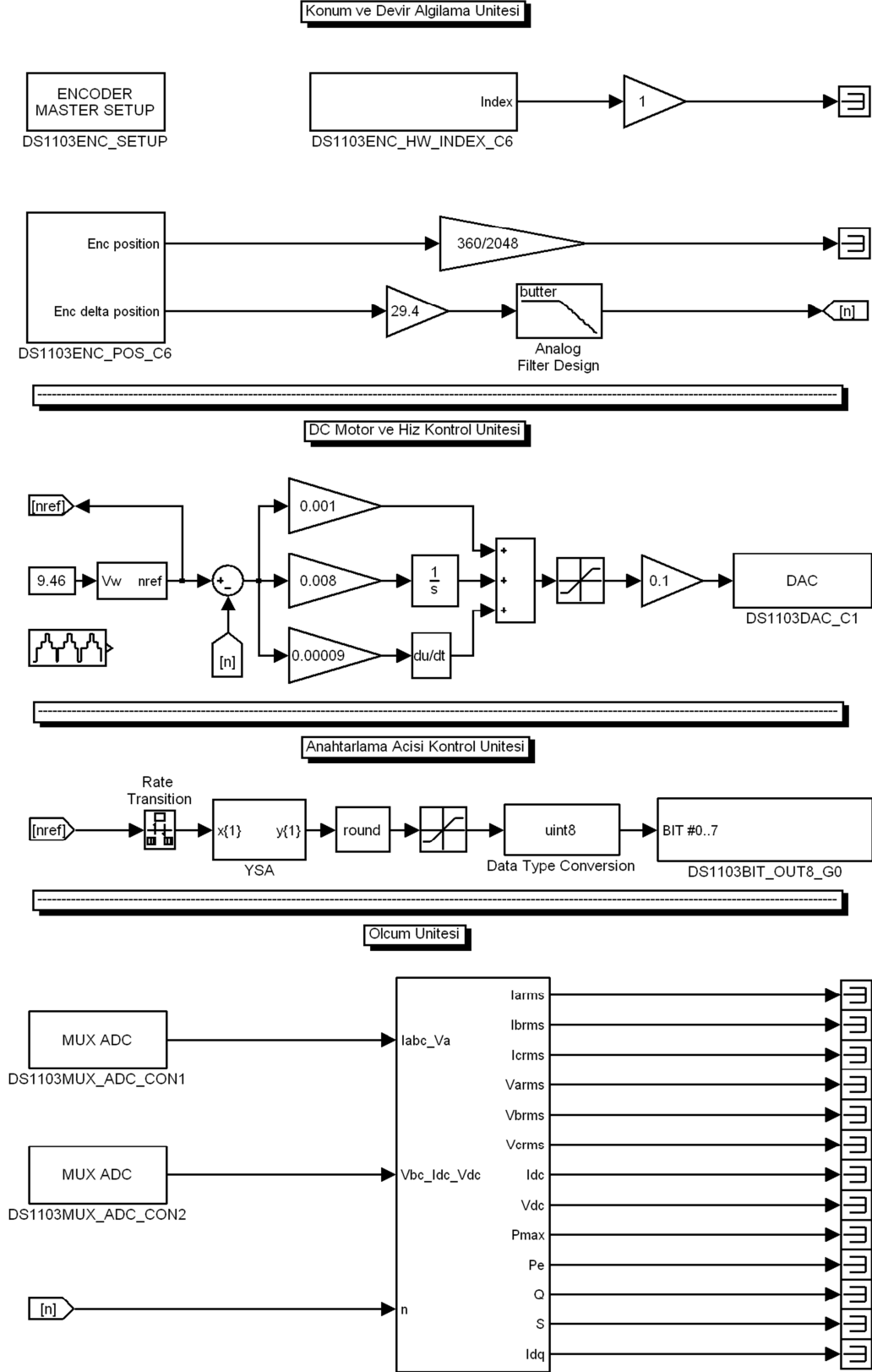
Şekil 5.34. Maksimum güç takibi kontrol ünitesinin blok diyagramı

Şekil 5.35’de  $V_{abc}$ ,  $I_{abc}$ ,  $V_{dc}$ ,  $I_{dc}$ ,  $P_{max}$ ,  $P_e$ ,  $Q$ ,  $S$  ve  $I_{dq}$  değişim ünitesinin blok diyagramı görülmektedir. Bu ünite ile DMSG’nin üç faz gerilim ( $V_{abc}$ ) ve akım ( $I_{abc}$ ) değişimi, DC baranın gerilim ( $V_{dc}$ ), akım ( $I_{dc}$ ),  $R_L$  yükünde harcanan güç,  $P_e$ - $Q$ - $S$  ve  $I_{dq}$  değişimleri incelenebilmektedir.



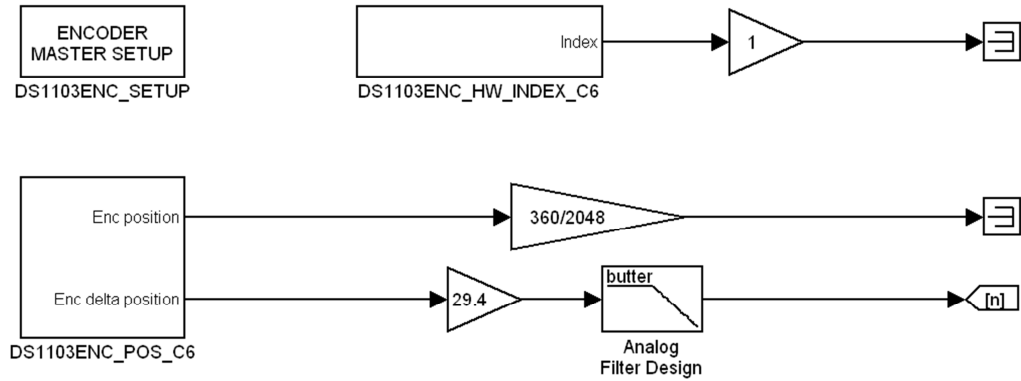
Şekil 5.35.  $V_{abc}$ ,  $I_{abc}$ ,  $V_{dc}$ ,  $I_{dc}$ ,  $P_{max}$ ,  $P_e$ ,  $Q$ ,  $S$  ve  $I_{dq}$  değişim ünitesinin blok diyagramı

Şekil 5.36’da gerçek zamanlı uygulamanın yapılması için tasarlanan MATLAB/Simulink® model görülmektedir. Bu model, dSPACE’in ControlDesk yazılımına aktarılarak MGNT gerçekleştirilmektedir. Tasarlanan bu model dört ünitelerden oluşmaktadır. Bu ünitelerin işlevleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.36. Gerçek zamanlı uygulamanın yapılması için tasarlanan MATLAB/Simulink® model

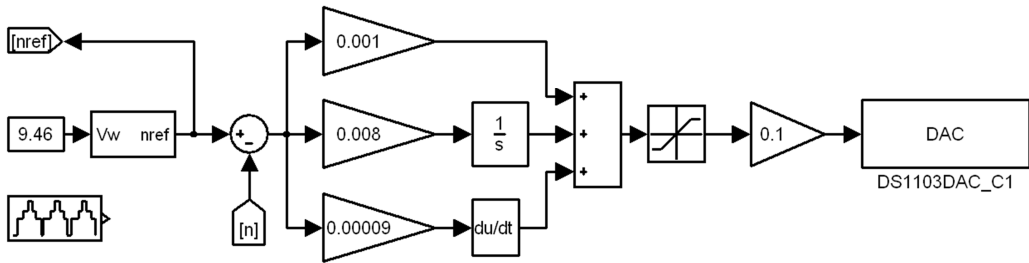
Şekil 5.37’de konum ve hız algılama ünitesinin blok diyagramı görülmektedir. Bu ünite ile DMSG hızı ve konumu rahatlıkla tespit edilebilmektedir. Konum algılamak için kullanılan artımlı enkoder (incremental encoder)’in çözünürlüğü 2048’dir.



Şekil 5.37. Konum ve hız algılama ünitesinin blok diyagramı

Şekil 5.38’de DC motor hız kontrol ünitesinin blok diyagramı görülmektedir. Rüzgâr hızına göre referans hız ( $n_{ref}$ ) Denklem (5.17)’deki gibi elde edilmektedir. Elde edilen referans hıza göre DC motor hız kontrolü PID denetleyicisi ile yapılmaktadır.

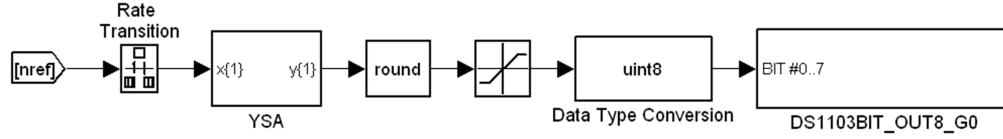
$$n_{ref} = \frac{60 \cdot \lambda_{opt} \cdot V_w}{2 \cdot \pi \cdot R} \quad (5.17)$$



Şekil 5.38. DC motor hız kontrol ünitesinin blok diyagramı

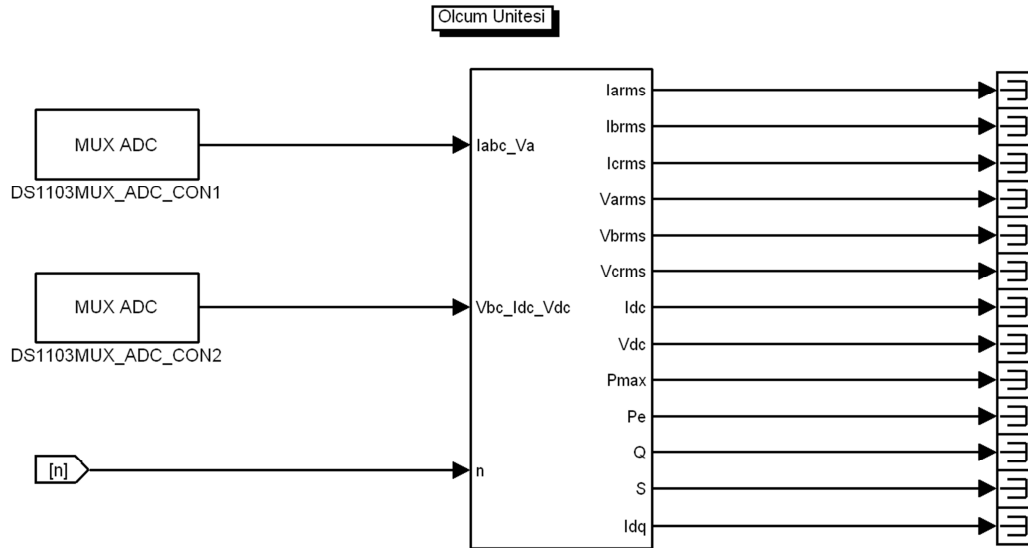
Şekil 5.39’da maksimum güç takibi için oluşturulan tristör anahtarlama açısı kontrol ünitesinin blok diyagramı görülmektedir. Referans hıza göre YSA denetleyici bloğu maksimum güç takibi için tristörlerin anahtarlama açılarını tahmin etmektedir. Tahmin edilen açı altı bitlik dijital veriye dönüştürülmektedir. Elde edilen dijital veri, dSPACE aracılığı ile tristör sürücü kartına aktarılarak maksimum güç takibi gerçekleştirilmektedir.



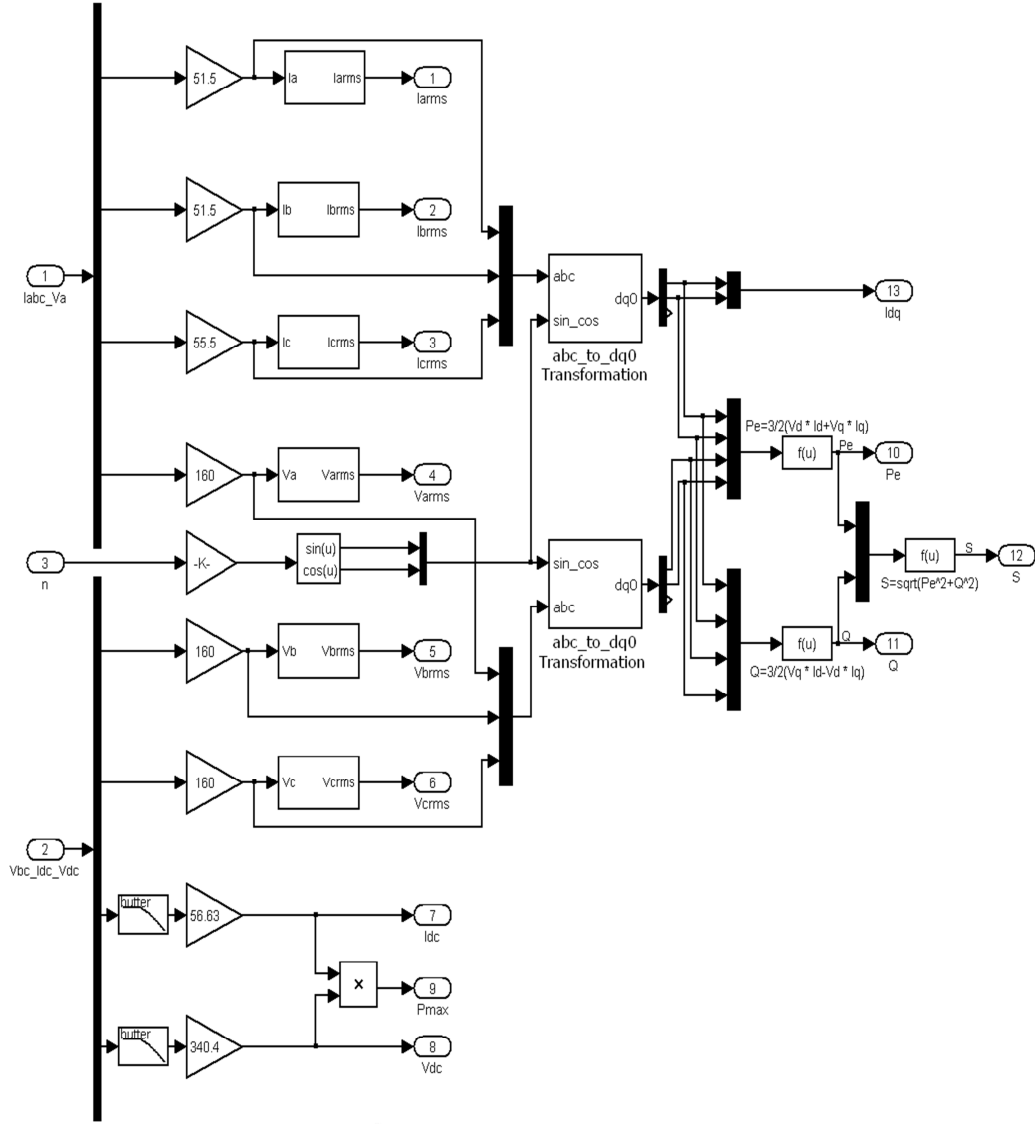


Şekil 5.39. Tristörlerin anahtarlama açısını kontrol eden ünitenin blok diyagramı

Şekil 5.40'da DMSG'nin üç faz akım ( $I_{abc}$ ), gerilim ( $V_{abc}$ ), aktif güç ( $P_e$ ), reaktif güç ( $Q$ ), görünür güç ( $S$ ) ve dq eksen akım ( $I_{dq}$ ) değişimleri, DC bara akım ( $I_{dc}$ ), gerilim ( $V_{dc}$ ) ve güç ( $P_{max}$ ) ölçümü ünitesinin blok diyagramı görülmektedir. dSPACE'in ADC dönüştürücü kartı aracılığı ile bu değerler ölçülmektedir. Ölçülen değerler dSPACE'in ControlDesk yazılımı ile kaydedilerek Matlab ortamında analiz edilmiştir. Şekil 5.41'de akım-gerilim ölçüm bloğu ve güç hesabı modeli görülmektedir.



Şekil 5.40.  $I_{abc}$ ,  $V_{abc}$ ,  $P_e$ ,  $Q$ ,  $S$ ,  $I_{dq}$ ,  $I_{dc}$  ve  $V_{dc}$  ölçüm ünitesinin blok diyagramı

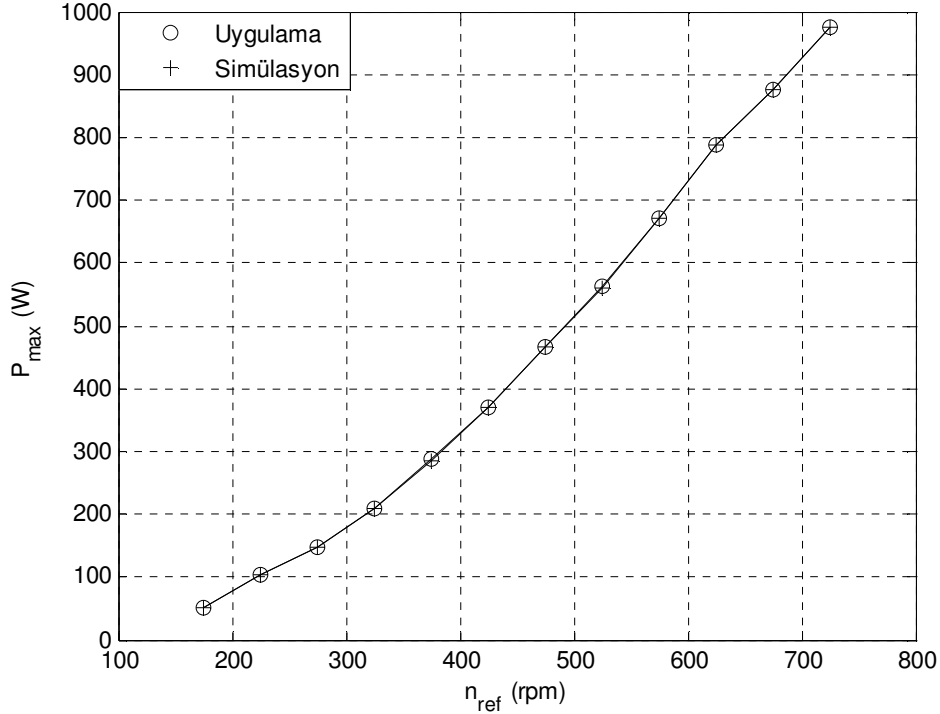


Şekil 5.41. Akım-gerilim ölçüm bloğu ve güç hesabı modeli

Şekil 5.30'daki uygulama seti ve Şekil 5.36'daki model kullanılarak uygulamalar gerçekleştirildi. Eğitilen YSA denetleyicisi Tablo 5.3'deki 12 test verisi ile Matlab/Simulink'te analiz edildi. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.4'de verilmektedir. Tablo 5.2'deki uygulama ve Tablo 5.4'deki simülasyon sonuçlarının grafiksel değişimi Şekil 5.42'de görülmektedir. Tablo 5.4'deki test sonuçları analiz edildiğinde, YSA % 0.17 hata ile maksimum güç transferi yaptığı görülmektedir. Şekil 5.42 incelendiğinde ise istenilen maksimum güç noktalarının çok küçük bir hata ile takip edildiği görülmektedir.

Tablo 5.4. YSA test sonuçları

$n_{ref}$ (d/dak)	YSA'nın tahmin ettiği açı ( $\theta^\circ$ )	Elde edilen güç $P_{max}$ (W)
175	86	51,248
225	76	103,902
275	67	147,246
325	53	209,907
375	40	283,74
425	30	370,781
475	19	467,56
525	15	559,922
575	8	670,982
625	2	786,872
675	2	874,433
725	2	975,106



Şekil 5.42. YSA denetleyicisinin MGNT performans değişimi

Literatürde YSA'nın, maksimum güç takibinde kullanılan EU ve AT denetleyicilere göre daha iyi performansla çalıştığı belirtilmektedir [136]. Fakat YSA'nın yüzde ne kadar daha iyi performansla çalıştığı ile ilgili bir bilgiye rastlanmamıştır. Bu nedenle YSA, EU ve AT denetleyicileri karşılaştırılarak performans analizi yapılmıştır. Bu analiz sonuçları aşağıdaki gibidir.

Şekil 5.43'deki model oluşturuldu. Tablo 5.3'deki YSA eğitiminde kullanılan veriler kullanıldı. Bu veriler YSA'ya öğretildi, AT denetleyicisine girildi ve EU yapılarak Denklem (5.18) elde edildi. Tablo 5.3'deki YSA testinde kullanılan veriler kullanılarak tüm denetleyiciler aynı şartlarda, istenen sonucu vermesi beklendi. Simülasyon sonucu denetleyicilerin işlem süreleri profiller'dan elde edildi. Bu sonuçlar Tablo 5.5'de görülmektedir. Tablo 5.5 incelendiğinde, YSA denetleyicisi AT denetleyiciden % 244,27, EU denetleyiciden ise % 274,05 daha iyi işlem performansına sahip olduğu görülmektedir. AT denetleyici ise EU denetleyiciden % 8,65 daha iyi performansa sahip olduğu tespit edilmiştir.

$$p1 = -1,207e-013$$

$$p2 = -2,262e-010$$

$$p3 = 9,332e-007$$

$$p4 = -0,000705$$

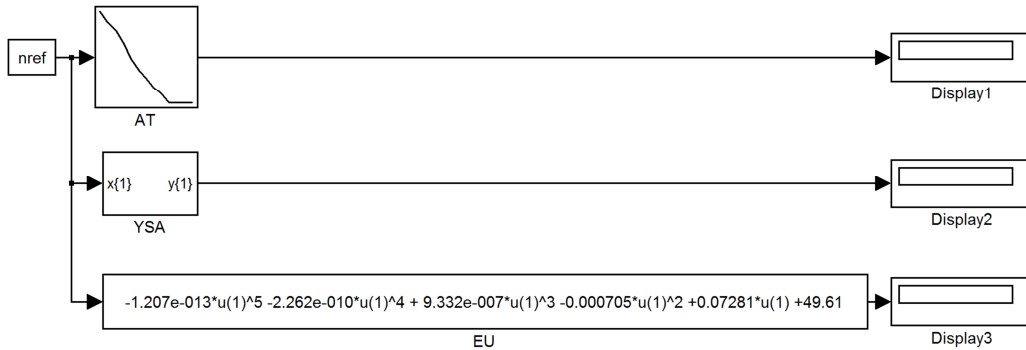
$$p5 = 0,07281$$

$$p6 = 49,61$$

$$f(x) = p1 \cdot x^5 + p2 \cdot x^4 + p3 \cdot x^3 + p4 \cdot x^2 + p5 \cdot x + p6 \quad (5.18)$$

Tablo 5.5. Denetleyicilerin işlem performans süreleri

	YSA	AT	EU
İşlem süreleri (s)	2,0436131	7,0356451	7,644049



Şekil 5.43. Denetleyicilerin performans analizi için oluşturulan model

Tablo 5.4'deki DMSG hızlarında AT ve EU denetleyicilerin cevapları da incelenerek performans analizleri yapıldı. Buna göre yapılan uygulama sonuçları Tablo 5.6 ve Tablo 5.7'de görülmektedir.

Tablo 5.6. EU denetleyicisinin test sonuçları

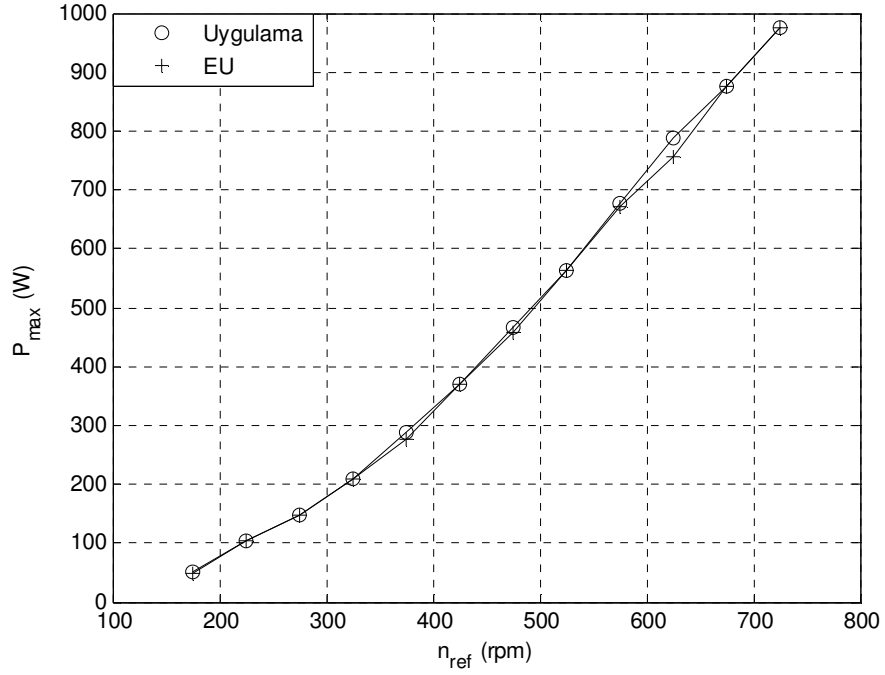
$n_{ref}$ (d/dak)	EU'nun tahmin ettiği açı ( $\theta^\circ$ )	Elde edilen güç $P_{max}$ (W)
175	88	49,039
225	76	103,902
275	65	147,935
325	53	209,907
375	42	276,761
425	30	370,781
475	21	457,315
525	13	562,771
575	6	671,144
625	4	754,989
675	2	874,433
725	2	975,106

Tablo 5.7. AT denetleyicisinin test sonuçları

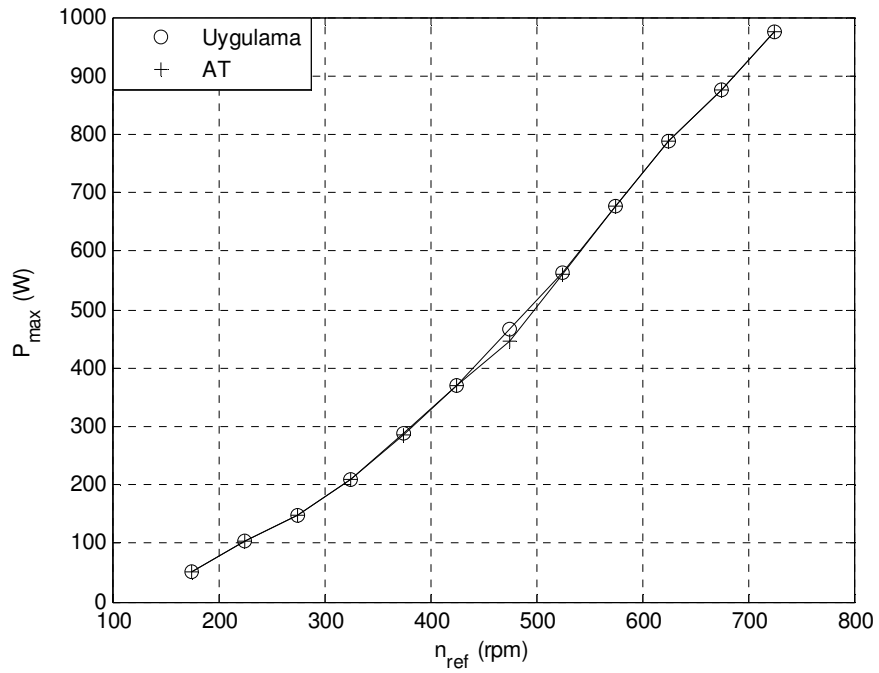
$n_{ref}$ (d/dak)	AT'nin tahmin ettiği açı ( $\theta^\circ$ )	Elde edilen güç $P_{max}$ (W)
175	86	51,248
225	76	103,902
275	67	148,767
325	53	209,907
375	40	283,74
425	30	370,781
475	21	446,4
525	15	559,922
575	8	676,895
625	2	786,872
675	2	874,433
725	2	975,106

Tablo 5.2'deki uygulama sonuçlarına göre Tablo 5.6 ile Tablo 5.7'deki EU ve AT denetleyicilerin simülasyon sonuçlarının değişimi sırasıyla Şekil 5.44 ve Şekil 5.45'de görülmektedir. Bu iki tablo ve şekiller incelendiğinde AT denetleyicisinin

istenilen maksimum güç noktalarını EU denetleyicisine göre daha iyi takip ettiği görülmektedir.



Şekil 5.44. EU denetleyicisinin MGNT performans değişimi



Şekil 5.45. AT denetleyicisinin MGNT performans değişimi

Tablo 5.8’de, maksimum güç takibi ile ilgili tüm denetleyicilerin % hata oranları görülmektedir. Tablo 5.8 incelendiğinde, Tablo 5.3’deki 12 test verisine göre YSA denetleyicisinin maksimum güç takibinde diğer denetleyicilerden üstün olduğu görülmektedir. Ayrıca, Tablo 5.3’deki toplam 25 farklı DMSG hızında, denetleyicilerin maksimum güç takip performansları görülmektedir. Bu durumda EU denetleyicisinin hata oranı artarken, diğer denetleyicilerde bu oranın azaldığı görülmektedir.

Tablo 5.8. Maksimum güç takibi sonucu denetleyicilerin performansları

	12 test verisine göre % hata	Toplam 25 veriye göre % hata
YSA	0,17	0,08
AT	0,56	0,27
EU	1,37	4,87

Denetleyicilerin performans analizleri dikkate alınarak, DMSG’nin maksimum güç takibinde YSA denetleyicisi kullanılmıştır. YSA denetleyicisi kullanılarak elde edilen sonuçlar aşağıda irdelenmektedir.

Şekil 5.46 ve Şekil 5.47’de, üç farklı rüzgâr hızda (6.31, 9.46 ve 13.05 m/s) DMSG’nin akım, gerilim ve güç eğrileri görülmektedir. DMSG’den elde edilen maksimum güç Şekil 5.12’deki  $R_L$  yükünde harcanmaktadır. Şekil 5.46’da,  $R_L$  yükünde harcanan güç ( $P_{max}$ ), gerilim ( $V_{dc}$ ) ve akım ( $I_{dc}$ ), Şekil 5.47’de ise DMSG’den çekilen üç faz gerilim ( $V_{abc}$ ) ve akım ( $I_{abc}$ ) değişimlerinin uygulama ve simülasyon sonuçları görülmektedir. Şekil 5.46 incelendiğinde, uygulama ve simülasyon sonuçlarının birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Uygulama ve simülasyon sonuçları arasındaki küçük farkın nedeni, gerçek sistemdeki  $R_L$  yük değerinin sıcaklığa bağlı olarak değişmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 5.47 incelendiğinde ise, benzer genliklerde akım ve gerilim değişimleri görülmektedir. Fakat hız değişim noktalarındaki akım ve gerilim salınımları, uygulama sonuçlarında daha yüksektir. Bunun nedeni, kullanılan setin mekanik aksamı, DC motor sürücüsü gibi nedenlerden kaynaklanabilir.

Şekil 5.48, Şekil 5.49, Şekil 5.50 ve Şekil 5.51’de, DMSG’nin 9.46 m/s rüzgâr hızında elde edilen sonuçlar görülmektedir. Şekil 5.48 ve Şekil 5.49’da DMSG’nin ürettiği güç, yaklaşık 43  $\Omega$ ’luk  $R_L$  yükünde, Şekil 5.50 ve Şekil 5.51’de ise yaklaşık

21  $\Omega$ 'luk  $R_L$  yükünde harcanmaktadır. Şekil 5.48 ve Şekil 5.50'de,  $R_L$  yükünde harcanan güç ( $P_{max}$ ), gerilim ( $V_{dc}$ ) ve akım ( $I_{dc}$ ), Şekil 5.49 ve Şekil 5.51'de ise DMSG'den çekilen üç faz gerilim ( $V_{abc}$ ) ve akım ( $I_{abc}$ ) değişimlerinin uygulama ve simülasyon sonuçları görülmektedir. Sabit rüzgâr hızında yapılan bu testteki amaç, Şekil 5.46 ve Şekil 5.47'deki uygulama ve simülasyon sonuçlarını daha detaylı irdelemek ve farklı yüklerde DMSG'nin tepkisini analiz etmektir. Sabit rüzgâr hızında yapılan uygulama ve simülasyon sonuçları incelendiğinde, DC bara gücü, gerilimi ve akımı değerlerinin birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. DMSG tarafındaki akım, gerilim ve THD değişimleri Tablo 5.9'daki gibidir. Tablo 5.9 incelendiğinde uygulama ve simülasyon sonuçlarının birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir.

Tablo 5.9. Farklı yüklerde DMSG tarafındaki akım, gerilim ve THD değişimlerinin değerleri

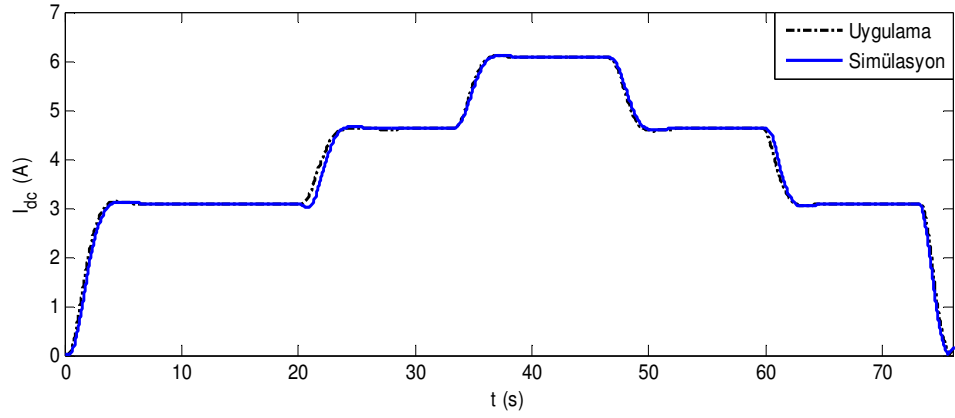
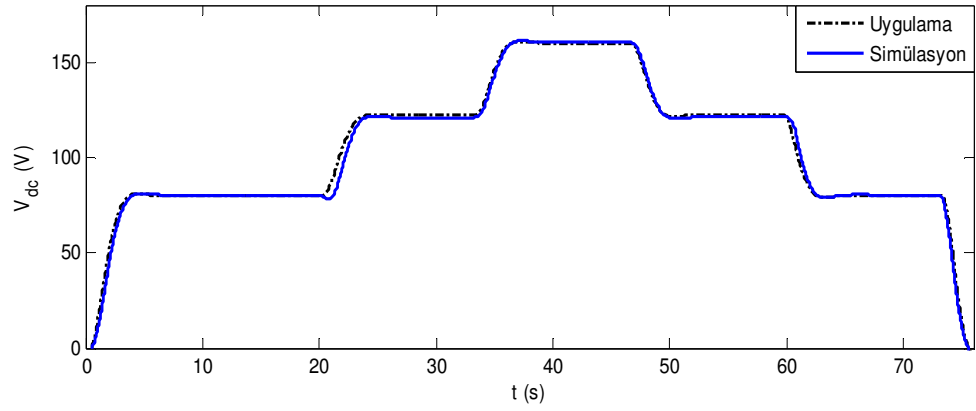
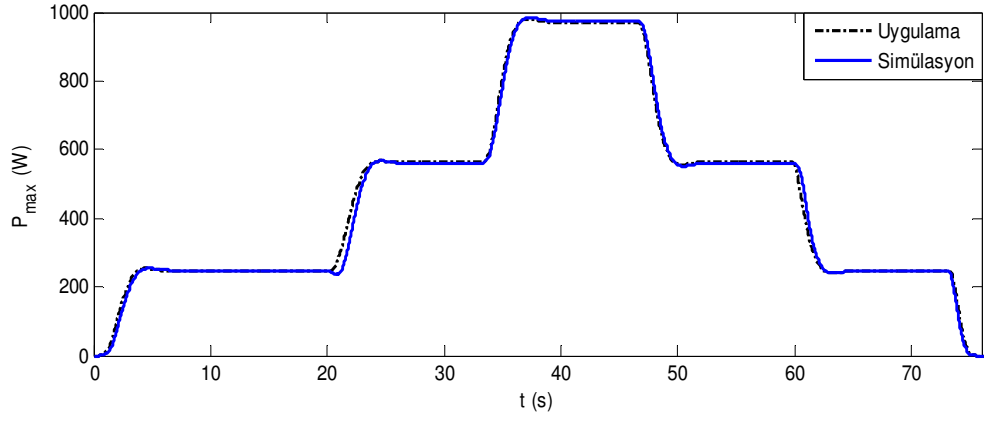
Yük $R_L$ ( $\Omega$ )	Simülasyon				Uygulama			
	Iarms (A)	Varms (V)	THD (%)		Iarms (A)	Varms (V)	THD (%)	
			Akım	Gerilim			Akım	Gerilim
43	1,872	52,02	27,93	10,21	1,874	52,13	27,05	9,49
21	3,487	49,8	21,9	15,8	3,508	49,95	21,28	15,51

Tablo 5.10'da DMSG hızına göre aktif, reaktif, görünür güç ve güç katsayısı değerleri görülmektedir. Tablo 5.10 incelendiğinde 275 d/dak'nın altındaki hızlarda güç katsayısı 1'den küçük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, DC barada kullanılan kondansatördür. DMSG hızına göre uygun kondansatör kullanılarak bu kararsızlık giderilebilir [21]. Şekil 5.52'de bu değerlerin grafiksel değişimi görülmektedir. Bu değişimler incelendiğinde aktif ve görünür gücün DMSG hızı ile orantılı bir şekilde arttığı ve reaktif güç ortalama 16,72 VAR güçte sabit kaldığı görülmektedir. Şekil 5.53'de ise DMSG 750 d/dak ile tahrik edildiğinde elde edilen  $I_{dq}$  değişimi görülmektedir. Şekil 5.53 incelendiğinde  $I_q$  akımı 4,62 ve  $I_d$  akımı ise yaklaşık 4,5 değerine sahip olduğu görülmektedir.

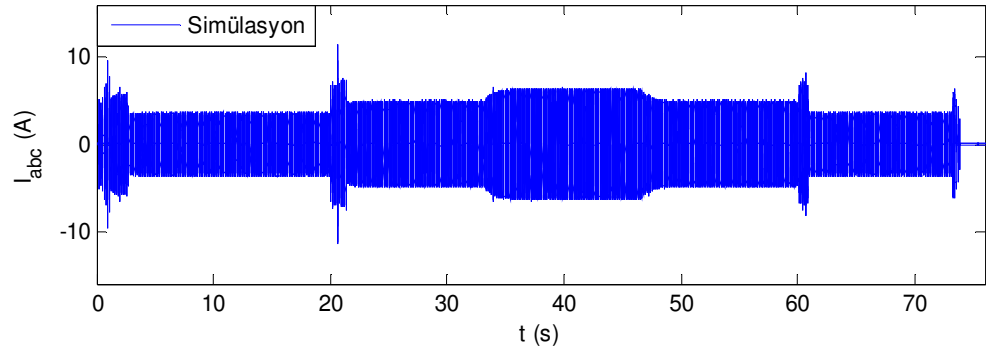
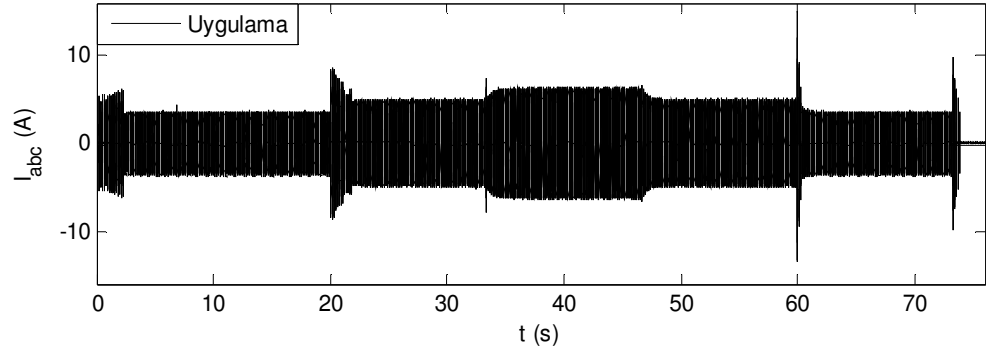
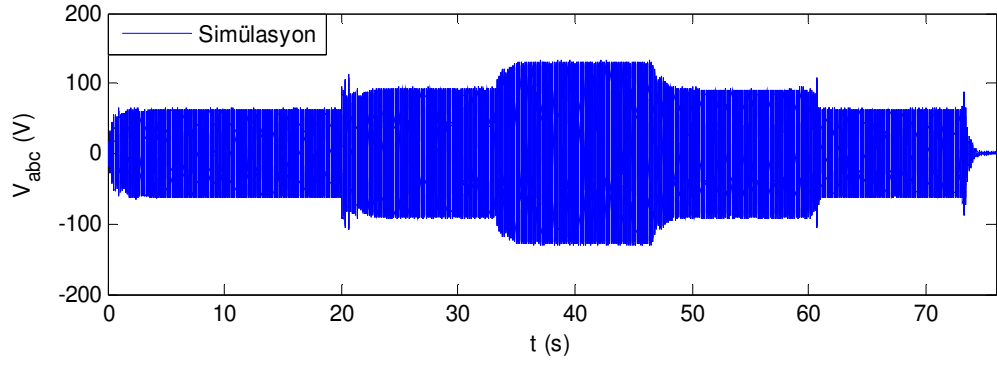
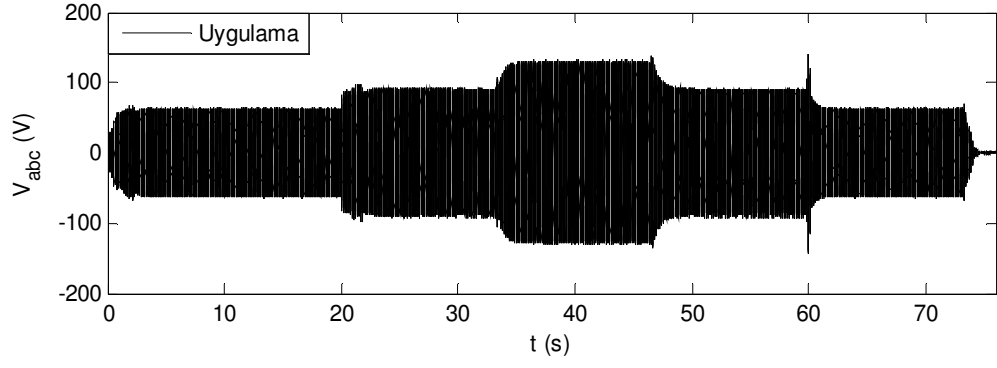


Tablo 5.10. DMSG hızına göre aktif, reaktif, görünür güç ve güç katsayısının değişimi

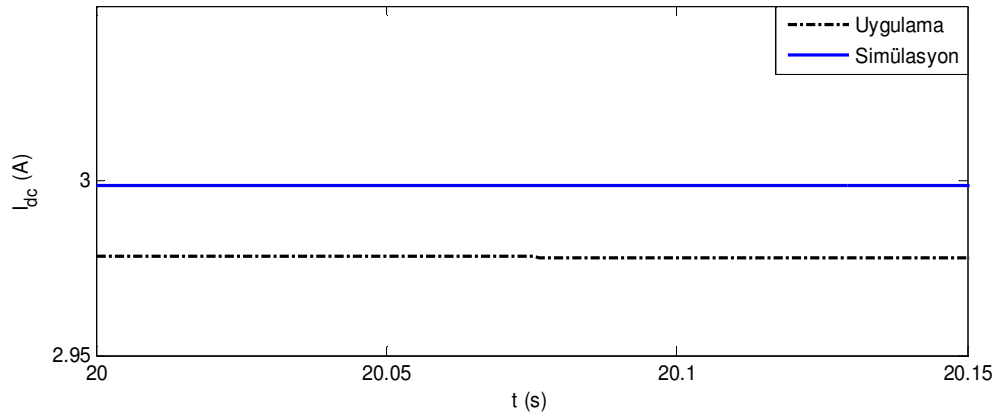
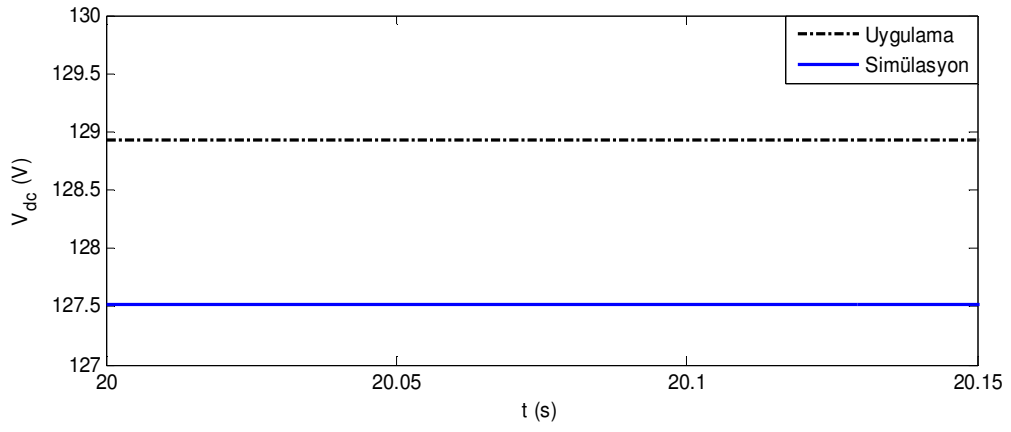
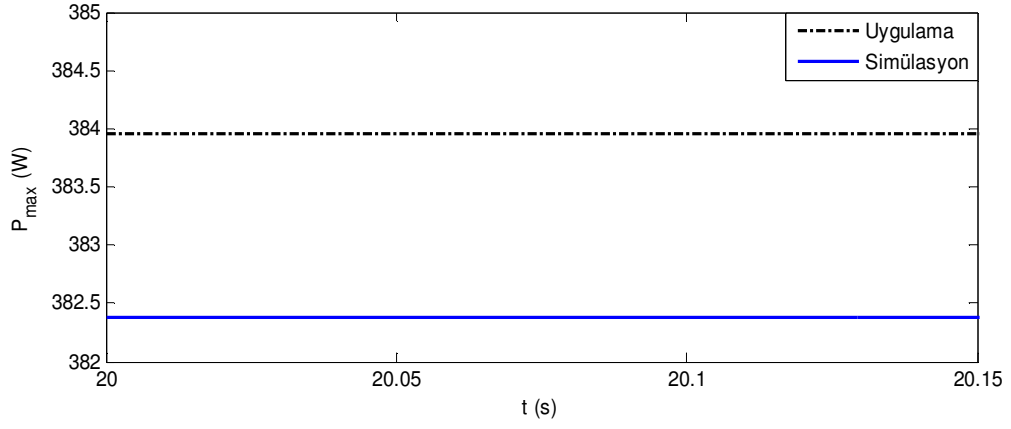
$n_{ref}$ (d/dak)	$P_e$ (W)	$Q$ (VAr)	$S$ (VA)	$\cos(\Theta)$
150	49,291	18,805	52,756	0,93
175	69,845	23,895	73,82	0,95
200	102,361	20,842	104,461	0,98
225	115,282	28,655	118,79	0,97
250	136,925	31,567	140,517	0,97
275	159,966	15,876	160,752	1
300	186,304	15,738	186,967	1
325	225,286	11,53	225,581	1
350	261,471	10,741	261,691	1
375	300,35	9,263	300,493	1
400	339,456	8,291	339,557	1
425	381,504	7,212	381,572	1
450	426,525	9,585	426,633	1
475	475,402	11,943	475,552	1
500	521,965	14,316	522,161	1
525	574,863	16,814	575,109	1
550	623,225	17,512	623,471	1
575	681,233	14,082	681,378	1
600	745,687	10,19	745,757	1
625	785,967	9,617	786,026	1
650	859,961	14,261	860,079	1
675	909,155	20,288	909,381	1
700	970,613	27,65	971,006	1
725	1033,639	24,911	1033,94	1
750	1099,59	24,452	1099,86	1



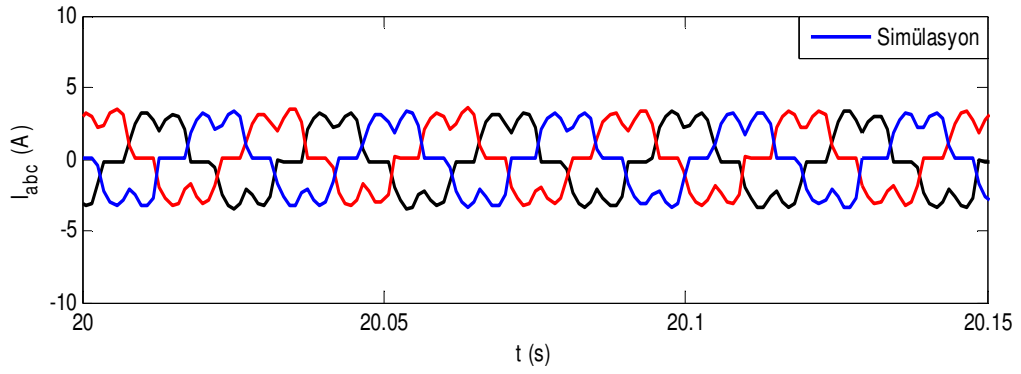
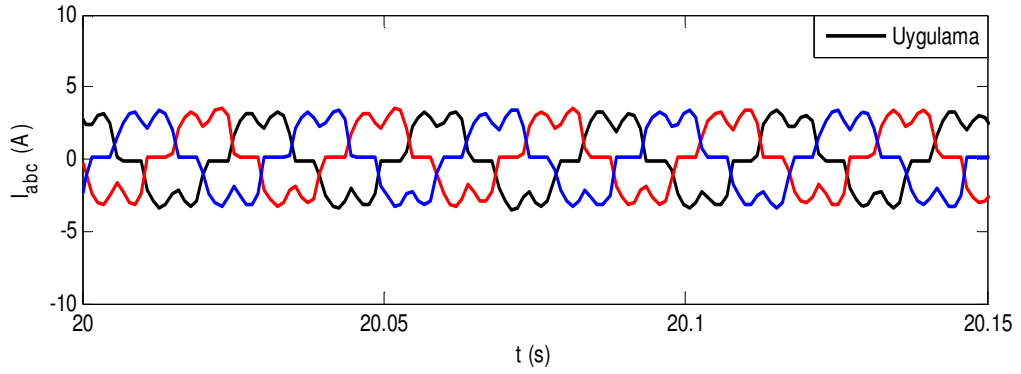
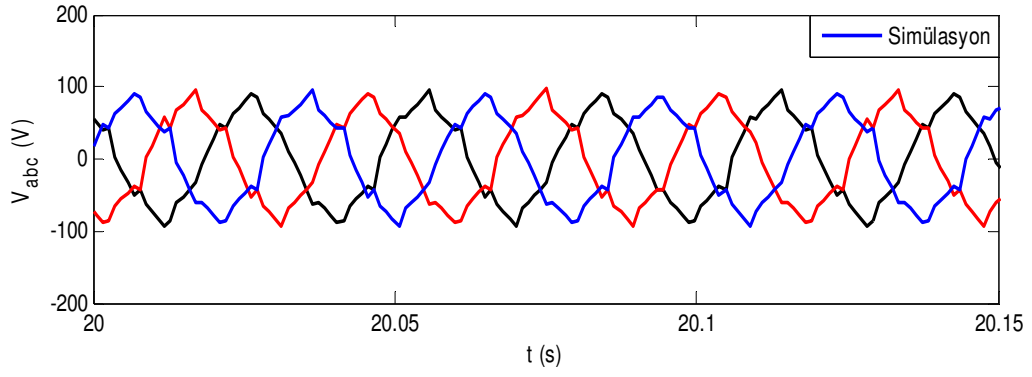
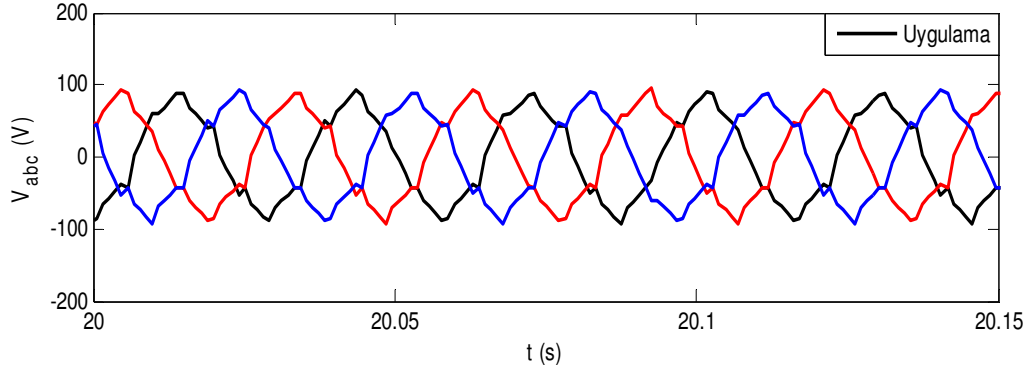
Şekil 5.46. Farklı rüzgâr hızlarında (6,31, 9,46 ve 13,05 m/s) DMSG'nin  $P_{max}$ ,  $V_{dc}$  ve  $I_{dc}$  uygulama ve simülasyon sonuçları



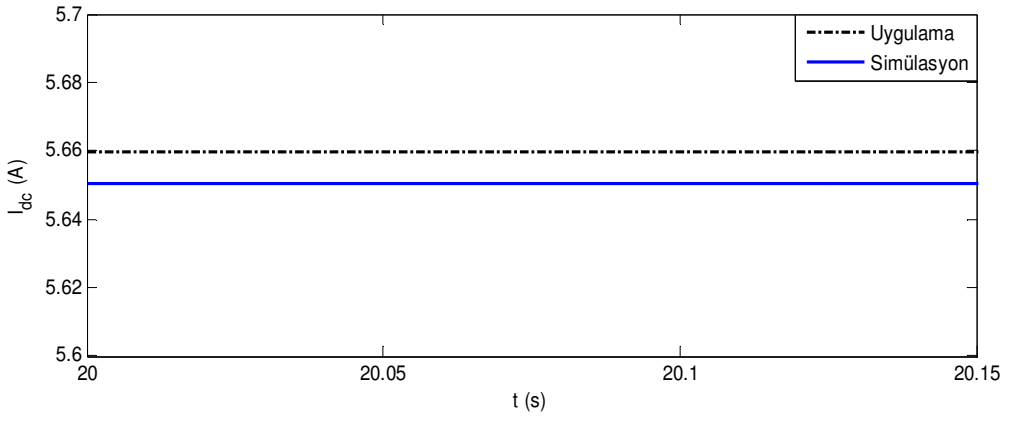
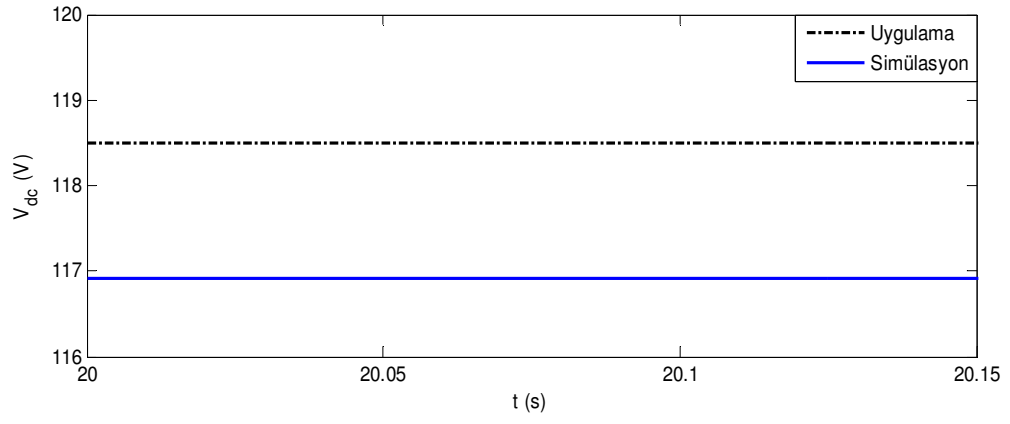
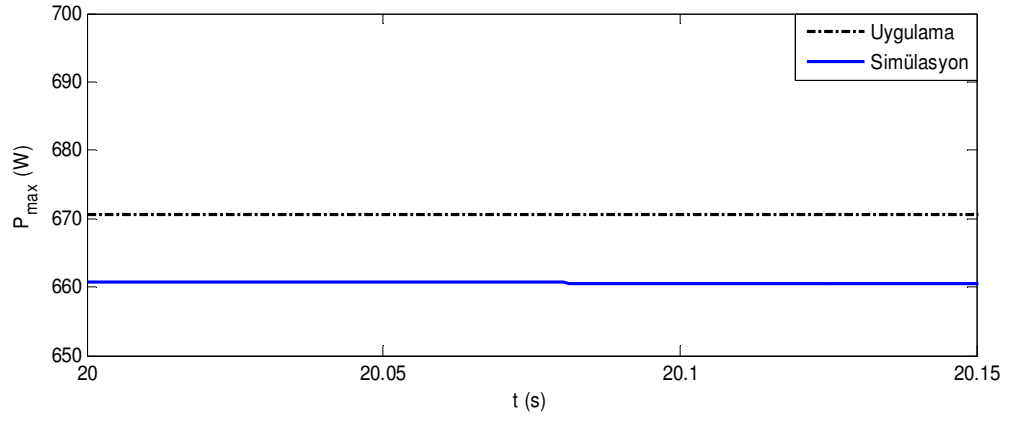
Şekil 5.47. DMSG'nin farklı rüzgâr hızlarındaki (6,31, 9,46 ve 13,05 m/s)  $V_{abc}$  ve  $I_{abc}$  değişimlerinin uygulama ve simülasyon sonuçları



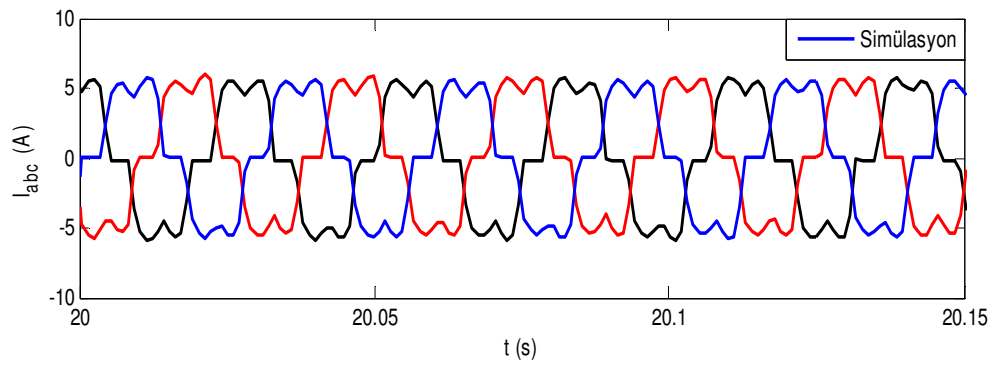
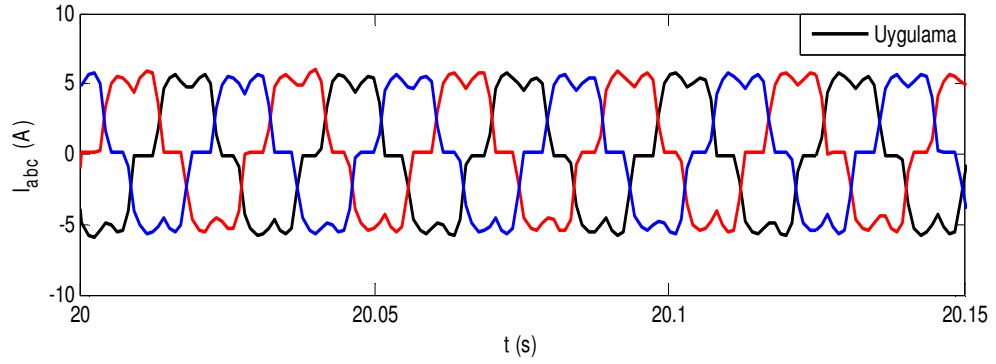
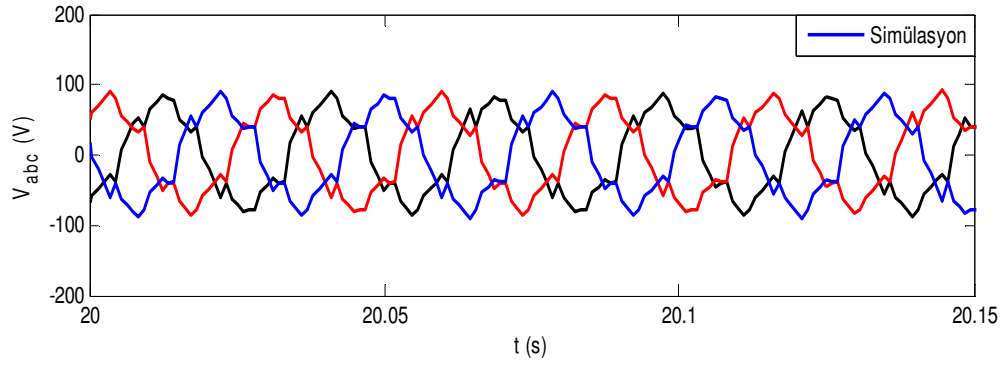
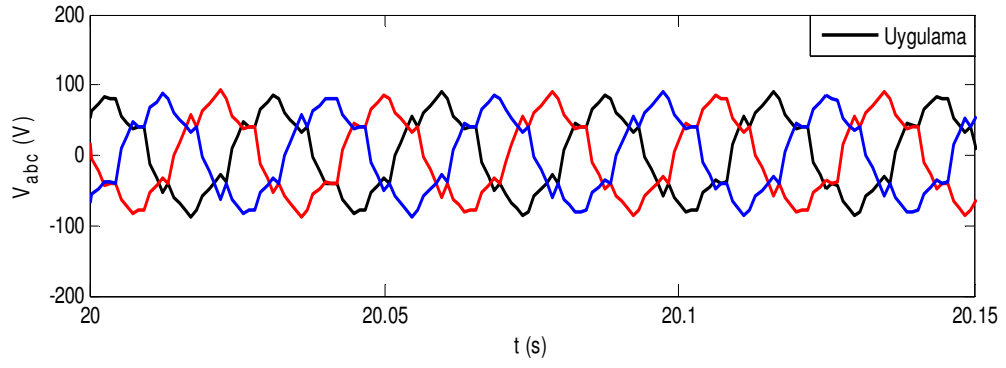
Şekil 5.48. DMSG'nin 9,46 m/s rüzgâr hızında, 43  $\Omega$  yükü beslediğinde  $P_{max}$ ,  $I_{dc}$  ve  $V_{dc}$  değişimlerinin uygulama ve simülasyon sonuçları



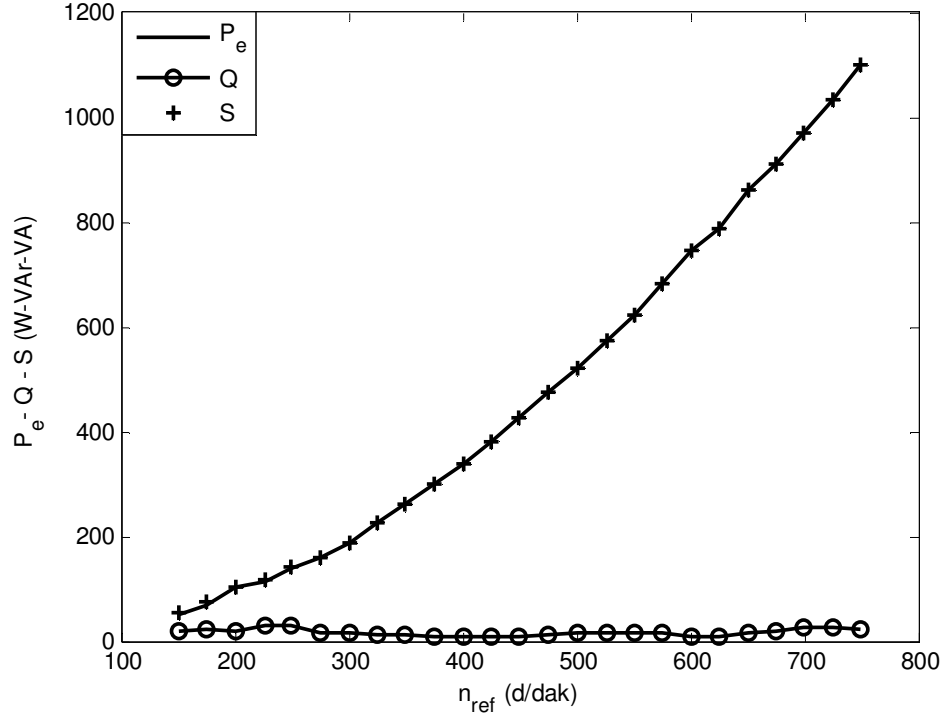
Şekil 5.49. DMSG'nin 9,46 m/s rüzgâr hızında, 43  $\Omega$  yükü beslediğinde  $V_{abc}$  ve  $I_{abc}$  değişimlerinin uygulama ve simülasyon sonuçları



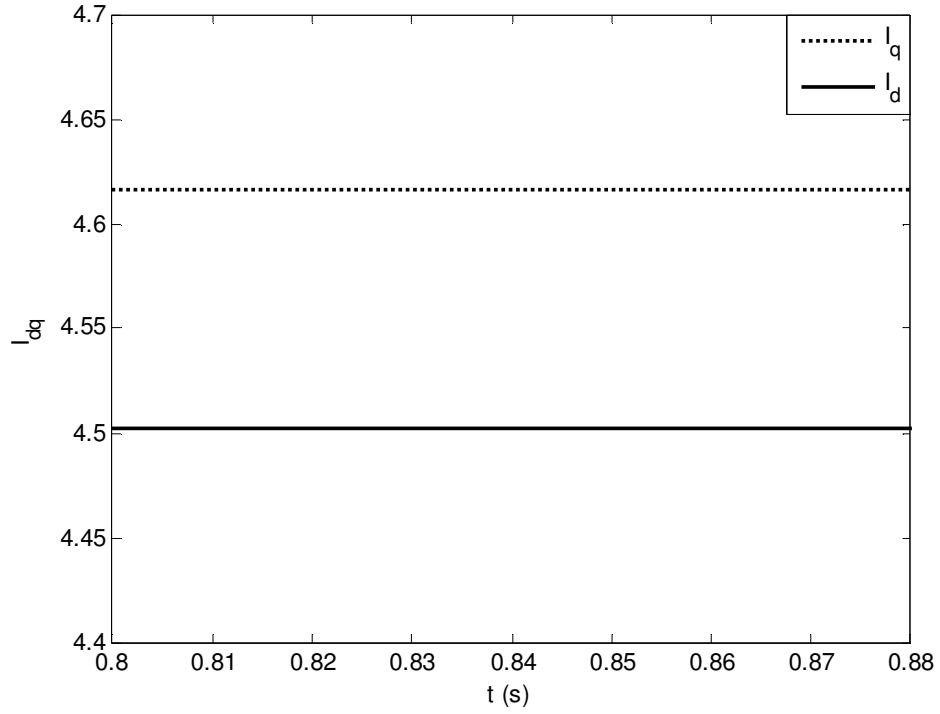
Şekil 5.50. DMSG'nin 9,46 m/s rüzgâr hızında, 21  $\Omega$  yükü beslediğinde  $P_{max}$ ,  $I_{dc}$  ve  $V_{dc}$  değişimlerinin uygulama ve simülasyon sonuçları



Şekil 5.51. DMSG'nin 9,46 m/s rüzgâr hızında, 21  $\Omega$  yükü beslediğinde  $V_{abc}$  ve  $I_{abc}$  değişimlerinin uygulama ve simülasyon sonuçları



Şekil 5.52. DMSG hızına göre aktif, reaktif ve görünür güç değişimleri



Şekil 5.53. DMSG'nin 750 d/dak'daki  $I_{dq}$  değişimi



## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1 kW DMSG'nin maksimum güç takibi, laboratuvar ortamında kurulan deney seti kullanılarak YSA denetleyicisi ile gerçekleştirilmektedir. Uygulama ve simülasyon sonuçlarına göre YSA denetleyicisinin verimliliği test edilmektedir. YSA'nın diğer denetleyicilere göre (AT ve EU) maksimum güç takibinde iyi bir performansa sahip olduğu tespit edilmiştir. Ulusal ve uluslararası yapılan çalışmalara bakıldığında, DMSG'nin YSA ile gerçek zamanlı maksimum güç takibi uygulamalı olarak gerçekleştirilmemiştir. Buna ek olarak yeni bir MGNT kontrolü tasarlanmıştır. Bu nedenle yapılan çalışma, yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili ulusal ve uluslararası çalışmalara önemli bir katkı sağlamaktadır. Yüksek dereceli matematiksel işlemlere gerek duyulmadan, basit bir kontrol stratejisi ile MGNT minimum hata ile gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada, simülasyon metodu ile birlikte uygulama metodu da gerçekleştirilmektedir ve sonuçları karşılaştırılarak analiz edilmektedir. Şekil 5.12'de blok diyagramı görülen yeni bir kontrol algoritması ile MGNT yapılmaktadır. Rüzgâr hızına göre elde edilen referans hızlarda eğitilen YSA'nın, farklı rüzgâr hızlarındaki maksimum güç tahmin analizi yapılmaktadır. Kullanılan dsPIC sürücü kartı ile fazların sıfır geçiş noktaları tespit edilmektedir ve YSA tabanlı kontrol algoritmasından elde edilen anahtarlama açılarına göre maksimum güç noktalarında sistem çalıştırılmaktadır.

Maksimum güç takibi için yapılan uygulama sonucu Tablo 6.1'deki veriler elde edilmiştir. Tablo 6.1'de rüzgâr hızına göre elde edilen referans hızda DMSG mili DC motor aracılığı ile tahrik edilmektedir. Her referans hız için maksimum güç noktaları deneme yanılma yöntemi ile tespit edilmektedir. Deneme yanılma yönteminde tristörlerin anahtarlama açıları, DMSG'nin her referans hızı için değiştirilerek DC baradan maksimum güç elde edilecek şekilde ayarlanmaktadır. Üretilen güç yaklaşık 25.71  $\Omega$ 'luk  $R_L$  DC yükte harcanmaktadır ve her hız için çekilen akım ve gerilim değerleri Tablo 6.1'de görülmektedir. Tablo 6.2'de ise simülasyon sonucu elde edilen veriler görülmektedir. Bu tabloda sadece iki hız için sonuçlar görülmektedir.

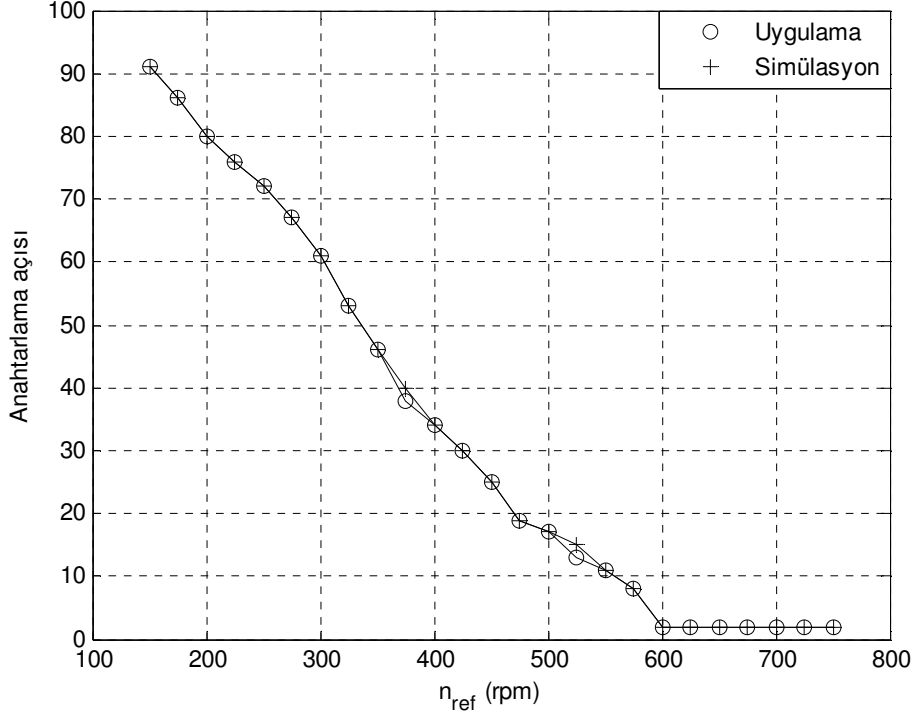
Bunun sebebi YSA denetleyicisi bu iki hızda istenilen tristör anahtarlama açısını tam olarak tahmin edememesidir. Diğer hızlarda hedef açı tahmin edildiği için elde edilen sonuçlar Tablo 6.1'deki gibidir. Bu verilere göre Şekil 6.1'de, DMSG hızına göre tristörlerin anahtarlama açı değişiminin uygulama ve simülasyon sonuçları görülmektedir.

Tablo 6.1. Uygulama sonucu rüzgâr hızına göre DMSG referans hızı, akımı, gerilimi, gücü ve anahtarlama açısı değişim tablosu

$V_w$	$n_{ref}$	Akım	Gerilim	DC bara gücü	Anahtarlama açısı
m/s	(d/dak)	(A)	(V)	(W)	$\theta^\circ$
2,69	150	0,953	22,628	21,566	91
3,15	175	1,413	36,27	51,248	86
3,62	200	1,671	41,396	69,174	80
4,05	225	2,039	50,97	103,902	76
4,52	250	2,184	56,372	123,132	72
4,95	275	2,397	61,43	147,246	67
5,41	300	2,662	66,594	177,244	61
5,85	325	2,872	73,09	209,907	53
6,31	350	3,145	79,44	249,821	46
6,74	375	3,359	85,777	288,084	38
7,21	400	3,576	91,835	328,431	34
7,64	425	3,815	97,193	370,781	30
8,1	450	3,986	103,67	413,253	25
8,54	475	4,256	109,856	467,56	19
9	500	4,444	114,786	510,129	17
9,46	525	4,595	122,464	562,771	13
9,9	550	4,826	126,268	609,367	11
10,36	575	5,073	132,273	670,982	8
10,79	600	5,316	138,877	738,321	2
11,26	625	5,48	143,585	786,872	2
11,69	650	5,653	147,748	835,212	2
12,15	675	5,787	151,095	874,433	2
12,59	700	5,946	155,72	925,904	2
13,05	725	6,104	159,741	975,106	2
13,52	750	6,266	164,478	1030,67	2

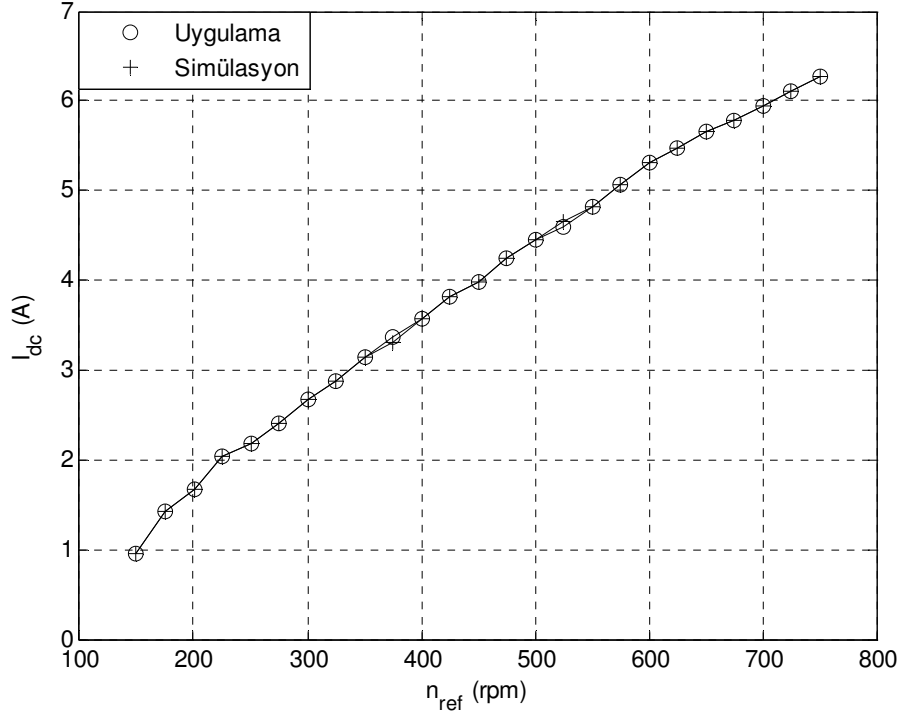
Tablo 6.2. Simülasyon sonucu rüzgâr hızına göre DMSG referans hızı, akımı, gerilimi, gücü ve anahtarlama açısı değişim tablosu

$V_w$	$n_{ref}$	Akım	Gerilim	DC bara gücü	Anahtarlama açısı
m/s	(d/dak)	(A)	(V)	(W)	$\theta^\circ$
6,74	375	3,296	86,092	283,74	40
9,46	525	4,651	120,392	559,922	15

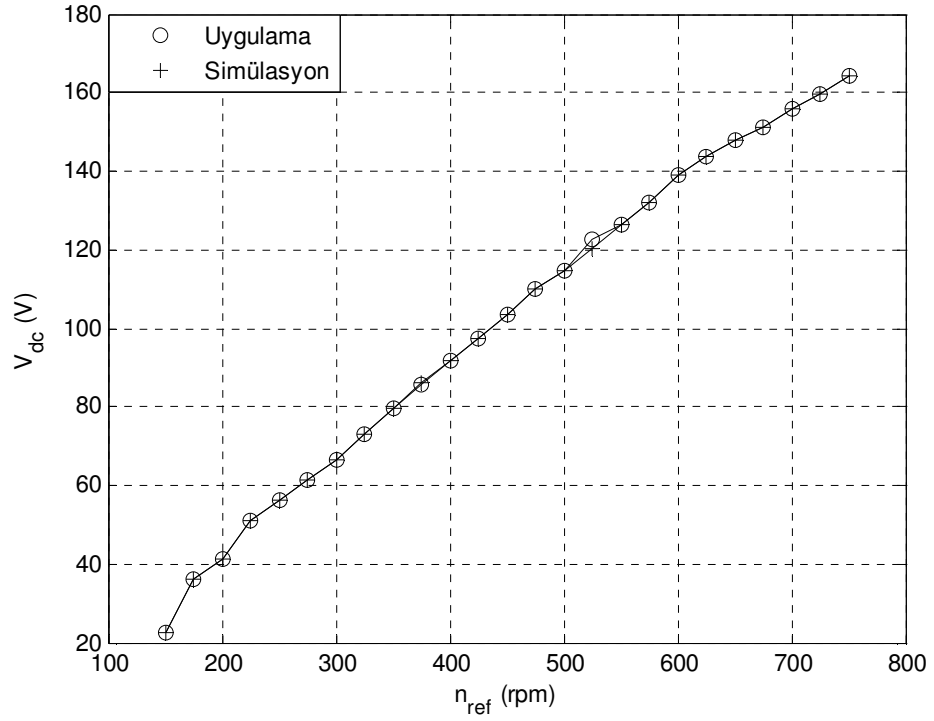


Şekil 6.1. DMSG hızına göre tristörlerin anahtarlama açısı değişiminin uygulama ve simülasyon sonuçları

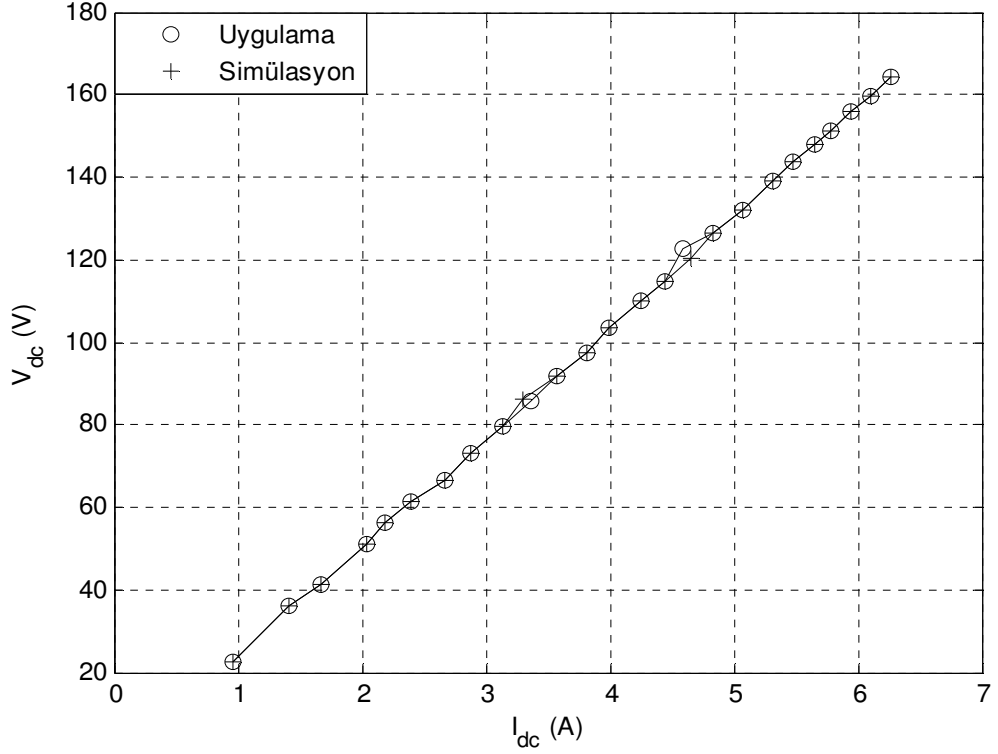
Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’de sırasıyla DMSG hızına göre  $R_L$  yükünün çektiği akım ve gerilim değişimlerinin uygulama ve simülasyon sonuçları görülmektedir. Şekil 6.4’de ise DMSG hızına göre  $R_L$  yükü üzerindeki akım-gerilim değişiminin uygulama ve simülasyon sonuçları görülmektedir. Bu grafikler, Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’deki verilere göre çizildi. Tüm bu şekiller incelendiğinde YSA denetleyicisinin, istenilen hedefi iyi bir performansla tahmin ettiği görülmektedir.



Şekil 6.2. DMSG hızına göre  $R_L$  yükünün çektiği akım değişiminin uygulama ve simülasyon sonuçları



Şekil 6.3. DMSG hızına göre  $R_L$  yükündeki gerilim değişiminin uygulama ve simülasyon sonuçları



Şekil 6.4. DMSG hızına göre  $R_L$  yükü üzerindeki akım-gerilim değişiminin uygulama ve simülasyon sonuçları

Yapılan uygulama ve simülasyon sonuçlarına göre karşılaştırılan üç denetleyiciden biri olan YSA denetleyicisinin, DMSG'nin maksimum güç takibinde kullanılarak elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Yapılan uygulama ve simülasyon sonuçlarına göre; YSA denetleyicisi % 0,17, AT denetleyicisi % 0,56 ve EU denetleyicisi ise % 1,37'lik hata ile maksimum güç takibi yapabildikleri tespit edilmiştir. Ayrıca YSA denetleyicisi AT denetleyicisinden % 244,27 ve EU denetleyicisinden % 274,05 daha iyi işlem performansına sahip olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre YSA denetleyicisinin, maksimum güç takibinde kullanılmasının daha verimli olduğu uygulama ve simülasyon sonuçları ile doğrulanmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] De Broe A. M., Drouilhet S., Gevorgian V., A peak power tracker for small wind turbines in battery charging applications, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1999, **14**(4), 1630-1635.
- [2] Hui L., Shi K. L., McLaren P. G., Neural-network-based sensorless maximum wind energy capture with compensated power coefficient, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, **41**(6), 1548-1556.
- [3] Esmaili R., Xu L., Nichols D. K., A new control method of permanent magnet generator for maximum power tracking in wind turbine application, *Power Engineering Society General Meeting*, California, USA, 12-16 June 2005.
- [4] Shi K. L., Li H., A novel control of a small wind turbine driven generator based on neural networks, *Power Engineering Society General Meeting*, Colorado, USA, 6-10 June 2004.
- [5] Grabic S., Celanovic N., Katie V., Series converter stabilized wind turbine with permanent magnet synchronous generator, *Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, 20-26 June 2004.
- [6] Fengxiang W., Qingming H., Jianlong B., Jian P., Study on control system of low speed PM generator direct driven by wind turbine, *Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems*, Nanjing, China, 29-29 September 2005.
- [7] Strachan N. P. W., Jovcic D., Dynamic modelling, simulation and analysis of an offshore variable-speed directly-driven permanent-magnet wind energy conversion and storage system (WECSS), *OCEANS*, Aberdeen, Scotland, 18-21 June 2007.
- [8] Yang E., Chen G., Research on direct-drive wind generation power converter control without PMSG parameters, *Industrial Electronics Society, 33rd Annual Conference of the IEEE*, Taipei, Taiwan, 5-8 November 2007.
- [9] Haque M. E., Negnevitsky M., Muttaqi K. M., A novel control strategy for a variable-speed wind turbine with a permanent-magnet synchronous generator, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, **46**(1), 331-339.
- [10] Uehara A., Pratap A., Goya T., Senjyu T., Yona A., Urasaki N., Funabashi T., A coordinated control method to smooth wind power fluctuations of a PMSG-Based WECS, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, **26**(2), 550-558.

- [11] Krishnan R., Rim G. H., Performance and design of a variable speed constant frequency power conversion scheme with a permanent magnet synchronous generator, *IEEE International Conference*, California, USA, 1-5 October 1989.
- [12] Yamamura N., Ishida M., Hori T., A simple wind power generating system with permanent magnet type synchronous generator, *Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Hong Kong, China, 27-29 July, 1999.
- [13] Esmaili R., Longya Xu, Sensorless control of permanent magnet generator in wind turbine application, *Industry Applications Conference*, Florida, USA, 8-12 October 2006.
- [14] Higuchi Y., Yamamura N., Ishida M., Hori T., An improvement of performance for small-scaled wind power generating system with permanent magnet type synchronous generator, *Industrial Electronics Society, 26th Annual Conference of the IEEE*, Nagoya, Japan, 22-28 October, 2000.
- [15] Amei K., Takayasu Y., Ohji T., Sakui M., A maximum power control of wind generator system using a permanent magnet synchronous generator and a boost chopper circuit, *Power Conversion Conference*, Osaka, Japan, 2-5 April, 2002.
- [16] Mirecki A., Roboam X., Richardeau F., Comparative study of maximum power strategy in wind turbines, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Ajaccio, France, 4-7 May 2004.
- [17] Matsui M., Xu D., Kang L., Yang Z., Limit cycle based simple MPPT control scheme for a small sized wind turbine generator system-principle and experimental verification, *Power Electronics and Motion Control Conference*, Xi'an, China, 14-16 August 2004.
- [18] Bolognani S., Tomasini M., Tubiana L., Zigliotto M., Start-up strategy for a sensorless direct drive PM generator for wind turbines, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Dubrovnik, Croatia, 20-23 June 2005.
- [19] Yaoqin J., Zhongqing Y., Binggang C., A new maximum power point tracking control scheme for wind generation, *International Conference on Power System Technology*, Kunming, China, 13-17 October 2002.
- [20] Mokadem M. E., Nichita C., Reghem P., Dakyo B., Development of a maximum power tracking unit integrated in wind turbine Simulator, *European Conference on Power Electronics and Applications*, Dresden, Germany, 11-14 September 2005.
- [21] Dai J., Xu D., Wu B., A novel control system for current source converter based variable speed PM wind power generators, *Power Electronics Specialists Conference*, Florida, USA, 17-21 June 2007.

- [22] Li Y., Mi C., Analysis, design and simulation of direct-drive PM wind power generators with PWM rectifiers, *Industrial Electronics Society, 33rd Annual Conference*, Taipei, Taiwan, 5-8 November 2007.
- [23] Huang S., Long X., Cai L., Huang K., Gao J., An engineering design of a 2MW direct-drive permanent-magnet wind-power generation system, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, China, 17-20 October 2008.
- [24] Luo D., Sun Y., Huang S., Huang K., Control of direct-prive permanent-magnet wind power system connected to grid, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, China, 17-20 October 2008.
- [25] Senjyu T., Tamaki S., Urasaki N., Uezato K., Funabashi T., Fujita H., Wind velocity and position sensorless operation for PMSG wind generator, *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Singapore, 17-20 November 2003.
- [26] Schiemenz I., Stiebler M., Control of a permanent magnet synchronous generator used in a variable speed wind energy system, *Electric Machines and Drives Conference*, Massachusetts, USA, 17-20 June 2001.
- [27] Westlake A. J. G., Bumby J. R., Spooner E., Damping the power-angle oscillations of a permanent-magnet synchronous generator with particular reference to wind turbine applications, *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, 1996, **143**(3), 269-280.
- [28] Chinchilla M., Arnaltes S., Burgos J. C., Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2006, **21**(1), 130-135.
- [29] Chen Z., Spooner E., Current source thyristor inverter and its active compensation system, *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, 2003, **150**(4), 447-454.
- [30] Dai J., Xu D., Wu B., A novel control scheme for current-source-converter-based PMSG wind energy conversion systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, **24**(4), 963-972.
- [31] Barote L., Marinescu C., Cirstea, M. N., Control structure for single-phase stand-alone wind-based energy sources, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, **60**(2), 764 – 772.
- [32] Xu Z., Li R., Zhu H., Xu D., Zhang C. H., Control of parallel multiple converters for direct-drive permanent-magnet wind power generation systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, **27**(3), 1259-1270.
- [33] Morimoto S., Kato H., Sanada M., Takeda Y., Output maximization control for wind generation system with interior permanent magnet synchronous generator, *Industry Applications Conference*, Florida, USA, 8-12 October 2006.



- [34] Nakamura T., Morimoto S., Sanada M., Takeda Y., Optimum control of IPMSG for wind generation system, *Power Conversion Conference*, Osaka, Japan, 2-5 April, 2002.
- [35] Raju A. B., Chatterjee K., Fernandes B. G., A simple maximum power point tracker for grid connected variable speed wind energy conversion system with reduced switch count power converters, *Power Electronics Specialist Conference*, Acapulco, Mexico, 15-19 June 2003.
- [36] Chen Z., Gomez S. A., McCormick M., A fuzzy logic controlled power electronic system for variable speed wind energy conversion systems, *Eighth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives*, London, England, 18-19 September 2002.
- [37] Senjyu T., Tamaki S., Muhando E., Urasaki N., Kinjo H., Funabashi T., Fujita H., Sekine H., Wind velocity and rotor position sensorless maximum power point tracking control for wind generation system, *Renewable Energy*, 2006, **31**(11), 1764-1775.
- [38] Bai H., Wang F., Xing J., Control strategy of combined PWM rectifier/inverter for a high speed generator power system, *2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Harbin, China, 23-25 May 2007.
- [39] Ryan M. J., Lorenz R. D., A “power-mapping” variable-speed control technique for a constant-frequency conversion system powered by a IC engine and PM generator, *Industry Applications Conference*, Rome, Italy, 8-12 October 2000.
- [40] Acarnley P., Permanent magnet generators for aerospace applications, *IEE Colloquium on Permanent Magnet Machines*, London, England, 15 June 1988.
- [41] Ojo O., Omozusi O., Modeling and analysis of an interior permanent-magnet DC-DC converter generator system, *Power Electronics Specialists Conference*, Missouri, USA, 22-27 June 1997.
- [42] Li W., Abbey C., Joos G., Control and performance of wind turbine generators based on permanent magnet synchronous machines feeding a diode rectifier, *Power Electronics Specialists Conference*, Jeju, South Korea, 18-22 June 2006.
- [43] Raju A. B., Fernandes B. G., Chatterjee K., A UPF power conditioner with maximum power point tracker for grid connected variable speed wind energy conversion system, *First International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, Hong Kong, China, 9-11 November 2004.
- [44] Tan K., Islam S., Masoum M. A. S., A comparative study of sensor-less control strategies in PMSG wind turbine system, *Power Engineering Conference*, Singapore, 3-6 December 2007.
- [45] Eskander M. N., Neural network controller for a permanent magnet generator applied in a wind energy conversion system, *Renewable Energy*, 2002, **26**(3), 463-477.

- [46] Arkadan A. A., Demerdash N. A., Modeling of transients in permanent magnet generators with multiple damping circuits using the natural abc frame of reference, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 1988, **3**(3), 722-731.
- [47] Arkadan A. A., Hijazi T. M., Demerdash N. A., Computer-aided modeling of a rectified DC load-permanent magnet generator system with multiple damper windings in the natural abc frame of reference, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 1989, **4**(3), 518-525.
- [48] Biriç S. G., Değişken hızlı rüzgar santrallerinin dinamik modellenmesi ve karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 245102.
- [49] Koç E., Değişken hızlı rüzgar türbinlerinin modellenmesi ve arıza sonrası sisteme katkı yeteneklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010, 268247.
- [50] Başar M. S., Kalıcı mıknatıslı senkron generatörlerin sensörsüz direkt tork kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2009, 252948.
- [51] Gürkaynak Y., Değişken hızlı doğrudan sürürlü rüzgar enerjisi santralının modellenmesi ve kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 223864.
- [52] Gökalan R., Rüzgar türbin uygulamasında sürekli mıknatıslı senkron jeneratörün hız sensörsüz alan yönlendirme kontrolü ve şebeke bağlantısı, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2011, 285159.
- [53] Kütük O., Rüzgar türbinleri için doğrudan sürürlü sürekli mıknatıslı senkron generatör tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011, 295461.
- [54] Çetin N. S., Şebeke bağlantısız PM generatörlü rüzgar türbinlerinin YSA ile sistem optimizasyonu, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2006, 197361.
- [55] Ren Y. F., Bao G. Q., Control Strategy of Maximum Wind Energy Capture of Direct-Drive Wind Turbine Generator Based on Neural-Network, *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Chengdu, China, 28-31 March 2010.
- [56] Thongam J. S., Bouchard P., Beguenane R., Fofana I., Neural network based wind speed sensorless MPPT controller for variable speed wind energy conversion systems, *Electric Power and Energy Conference (EPEC)*, Nova Scotia, Canada, 25-27 August 2010.

- [57] Sheeja V., Jayaprakash P., Singh B., Uma R., Neural network theory based voltage and frequency controller for standalone wind energy conversion system, *International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, New Delhi, India, 20-23 December 2010.
- [58] Narayana M., Putrus G., Optimal control of wind turbine using neural networks, *Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Wales, United Kingdom, 31 August – 3 September 2010.
- [59] Tang T., Chen K., Han J., A new WECS of Half-Direct Coupling structure and its MPPT control strategy on back to back PWM converters, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Seoul, Korea, 5-8 July 2009.
- [60] Han K., Chen G. Z., A novel control strategy of wind turbine MPPT implementation for direct-drive PMSG wind generation imitation platform, *Power Electronics and Motion Control Conference*, Wuhan, China, 17-20 May 2009.
- [61] Castillo O. C., Amoros E. F., Sanfeliu G. G., Morales L., Average current mode control of three-phase boost rectifiers with low harmonic distortion applied to small wind turbines, *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*, Cuernavaca, Morelos, 22-25 September 2009.
- [62] Singh M., Chandra A., Control of PMSG based variable speed wind-battery hybrid system in an isolated network, *Power & Energy Society General Meeting*, Alberta, Canada, 26-30 July 2009.
- [63] Margaris I. D., Papathanassiou S. A., Hatzigiorgiou N. D., Hansen A. D., Sorensen P., Frequency control in autonomous power systems with high wind power penetration, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012, **3**(2), 189-199.
- [64] Zeng R., Nian H., Quan Y., Liu J., Improved load-adaptive control strategy for PMSG based stand-alone wind energy generation system, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Tokyo, Japan, 15-18 November 2009.
- [65] Diaz S. A., Silva C., Juliet J., Miranda H. A., Indirect sensorless speed control of a PMSG for wind application, *Electric Machines and Drives Conference*, Florida, USA, 3-6 May 2009.
- [66] Li M., Smedley K., One-cycle control of PMSG for wind power generation, *Power Electronics and Machines in Wind Applications*, Lincoln, Nebraska, 24-26 June 2009.
- [67] Deng F., Chen Z., Power control of permanent magnet generator based variable speed wind turbines, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Tokyo, Japan, 15-18 November 2009.

- [68] Liu J., Nian H., Li J., Zeng R., Sensorless control of PMSG for wind turbines based on the on-line parameter identification, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Tokyo, Japan, 15-18 November 2009.
- [69] Brahmi J., Krichen L., Ouali A., Sensorless control of PMSG in WECS using artificial neural network, *6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, Djerba, Tunisia, 23-26 March 2009.
- [70] Orlando N. A., Liserre M., Monopoli V. G., Dell'Aquila, A., Speed sensorless control of a PMSG for small wind turbine systems, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Seoul, Korea, 5-8 July 2009.
- [71] Fan S., Wang P., Wen C., A new sensorless control strategy used in direct-drive PMSG wind power system, *2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Hefei, China, 16-18 June 2010.
- [72] Muyeen S. M., Takahashi R., Murata T., Tamura J., A variable speed wind turbine control strategy to meet wind farm grid code requirements, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, **25**(1), 331-340.
- [73] Leon A. E., Mauricio J. M., Gomez-Exposito A., Solsona J. A., An improved control strategy for hybrid wind farms, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2010, **1**(3), 131-141.
- [74] Kang Y. K., Jung H. G., Lee K. B., Control method in a wind turbine driven by 3-parallel back-to-back converters using PQR power transformation, *Power Electronics Conference (IPEC)*, Sapporo, Japan, 21-24 June 2010.
- [75] Xu Z., Li G., Xu D., Control of parallel multi-converters for permanent magnet wind power generation systems, *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Incheon, South Korea, 10-13 October 2010.
- [76] Xu Z., Ge P., Xu D., Zhang C. H., Direct torque and flux control of the converters for a permanent magnet wind power generation system, *Electric Power and Energy Conference (EPEC)*, Nova Scotia, Canada, 25-27 August 2010.
- [77] Melicio R., Catalao J., Mendes V., Fractional-order control and simulation of wind turbines with full-power converters, *15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, Valletta, Malta, 26-28 April 2010.
- [78] Melicio R., Mendes V. M. F., Catalao J. P. S., Harmonic assessment of variable-speed wind turbines considering a converter control malfunction, *Renewable Power Generation*, 2010, **4**(2), 139-152.
- [79] Chiu C. S., Chiang T. S., Lee Y. T., Maximum power control of wind energy conversion systems via a T-S fuzzy model-based approach, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ)*, Barcelona, Spain, 18-23 July 2010.

- [80] Thongam J. S., Bouchard P., Beguenane R., Fofana I., Neural network based wind speed sensorless MPPT controller for variable speed wind energy conversion systems, *Electric Power and Energy Conference (EPEC)*, Nova Scotia, Canada, 25-27 August 2010.
- [81] Sheeja V., Jayaprakash P., Singh B., Uma R., Neural network theory based voltage and frequency controller for standalone wind energy conversion system, *Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, New Delhi, India, 20-23 December 2010.
- [82] Rizo M., Rodriguez A., Bueno E., Rodriguez F. J., Robustness analysis of Wind Turbines based on PMSG with sensorless vector control, *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Arizona, USA, 7-10 November 2010.
- [83] Hussein M. M., Orabi M., Ahmed M. E., Sayed M. A., Simple sensorless control technique of permanent magnet synchronous generator wind turbine, *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 29 November - 1 December 2010.
- [84] Xiao L., Huang S., Huang K., Chen Z., Xiong S., Tan J., Space vector modulation based on constant switching frequency direct power control for direct-drive permanent magnet synchronous generator, *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Incheon, South Korea, 10-13 October 2010.
- [85] Nishida K., Ahmed T., Nakaoka M., A cost-effective high-efficiency power conditioner with simple MPPT control algorithm for wind-power grid integration, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, **47**(2), 893-900.
- [86] Mansour M., Mansouri M. N., Mimouni M. F., Comparative study of fixed speed and variable speed wind generator with pitch angle control, *International Conference on Communications, Computing and Control Applications (CCCA)*, Hammamet, Tunisia, 3-5 March 2011.
- [87] Rodrigues J. M., Resende F. O., Moreira C. L., Contribution of PMSG based small wind generation systems to provide voltage control in low voltage networks, *2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe)*, Manchester, United Kingdom, 5-7 December 2011.
- [88] Thongam J. S., Bouchard P., Beguenane R., Okou A. F., Merabet A., Control of variable speed wind energy conversion system using a wind speed sensorless optimum speed MPPT control method, *37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, Australia, 7-10 November 2011.

- [89] Benelghali S., Benbouzid E. H. M., Charpentier J. F., Ahmed-Ali T., Munteanu I., Experimental validation of a marine current turbine simulator application to a permanent magnet synchronous generator-based system second-order sliding mode control, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, **58**(1), 118-126.
- [90] Qiu Z., Zhou K., Li Y., Modeling and control of diode rectifier fed PMSG based wind turbine, *4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Weihai, China, 6-9 July 2011.
- [91] Errami Y., Maaroufi M., Ouassaid M., Modelling and control strategy of PMSG based variable speed wind energy conversion system, *International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, Ouarzazate, Morocco, 7-9 April 2011.
- [92] Huang K., Zheng L., Huang S., Xiao L., Li W., Sensorless control for direct-drive PMSG wind turbines based on sliding mode observer, *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Beijing, China, 20-23 August 2011.
- [93] Aguilar D., Candela I., Munoz-Aguilar R. S., Luna A., Rodriguez P., Sensorless control of PMSG-based wind energy conversion systems using a FLL-based synchronization technique, *37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Victoria, Australia, 7-10 November 2011.
- [94] Mansour M., Mansouri M. N., Mimouni M. F., Study of performance of a variable-speed wind turbine with pitch control based on a permanent magnet synchronous generator, *8th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices (SSD)*, Sousse, Tunisia, 22-25 March 2011.
- [95] Geng H., Yang G., Xu D., Wu B., Unified power control for PMSG-Based WECS operating under different grid conditions, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, **26**(3), 822-830.
- [96] Wen C., Lu G., Wang P., Li Z., Liu X., Fan Z., Vector control strategy for small-scale grid-connected PMSG wind turbine converter, *2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe)*, Manchester, United Kingdom, 5-7 December 2011.
- [97] Chen C. H., Hong C. M., Ou T. C., WRBF network based control strategy for PMSG on smart grid, *16th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP)*, Hersonissos, Greece, 25-28 September 2011.
- [98] Delfino F., Pampararo F., Procopio R., Rossi M., A feedback linearization control scheme for the integration of wind energy conversion systems into distribution grids, *Systems Journal*, 2012, **6**(1), 85-93.

- [99] Li S., Haskew T. A., Swatloski R. P., Gathings W., Optimal and direct-current vector control of direct-driven PMSG wind turbines, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, **27**(5), 2325-2337.
- [100] REN21, Global Status Report, *Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century*, 1-116, 2011.
- [101] TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, *Enerji Verimliliği Raporu*, 1-83, 2012.
- [102] TEİAŞ, Türkiye Elektrik Üretim – İletim İstatistikleri, 2010.
- [103] Siegfriedsen S., Böhmeke G., Multibrid technology – a significant step to multi-megawatt wind turbines, *Wind Energy*, 1998, **1**(2), 89-100.
- [104] Hansen A. D., Hansen L. H., Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995– 2004), *Wind Energy*, 2007, **10**(1), 81-97.
- [105] Hansen L. H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P., Bak-Jensen B., Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines, *Riso National Laboratory Technical Report Riso-R-1205(EN) Roskilde*, 2-108, 2001.
- [106] Dubois M. R., Polinder H., Ferreira J. A., Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines, *Proc. Nordic Countries Power and Industrial Electronics Conf. (NORPIE)*, Aalborg, Denmark, June 2000.
- [107] Bywaters G., John V., Lynch J., Mattila P., Norton G., Stowell J., Northern power systems windPACT drive train alternative design study report, *NREL, Golden, Colorado, Report no. NREL/SR-500-35524*, 1-404, 2004.
- [108] Soens J., Impact of wind energy in a future power grid, PhD dissertation, Katholieke Universiteit Leuven Faculteit Toegepaste Wetenschappen Department, Elektrotechniek (Esat) Afdeling Elektrische Energie En Computerarchitecturen (ELECTA), Leuven, 2005.
- [109] Dubois M. R. J., Optimized permanent magnet generator topologies for direct-drive wind turbines, PhD dissertation, Delft University Technology Delft, The Netherlands, 2004.
- [110] Grauers A., Design of direct-driven permanent-magnet generators for wind turbines, PhD dissertation, Chalmers University of Technology, Goteburg, 1996.
- [111] Versteegh C. J. A., Hassan G. & Partners NL, Design of the Zephyros Z72 wind turbine with emphasis on the direct drive PM generator, *NTNU, Trondheim, Norway*, 14-16 June 2004.
- [112] Chen Y., Pillay P., Khan A., PM wind generator topologies, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, **41**(6), 1619-1626.

- [113] Chen J., Nayar C., Xu L., Design and finite-element analysis of an outer-rotor permanent-magnet generator for directly coupled wind turbines, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, **36**(5), 3802-3809.
- [114] Aydin M., Lipo T. A., Axial flux permanent magnet disc machines: A review, *SPEEDAM*, Capri, Italy, 16-18 June 2004.
- [115] Li H., Chen Z., Overview of different wind generator systems and their comparisons, *Renewable Power Generation*, 2008, **2**(2), 123-138.
- [116] Parviainen, A., Design of axial-flux permanent magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines, PhD dissertation, Acta universitatis Lappeenrantaensis, Finland, 2005.
- [117] Lampola P., Directly driven, low-speed permanent magnet generators for wind power applications, PhD Thesis, Helsinki University of Technology, Finland, 2000.
- [118] Sitapati K., Krishnan R., Performance comparisons of radial and axial field, permanent-magnet, brushless machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2001, **37**(5), 1219-1226.
- [119] Spooner E., Williamson A. C., Direct coupled, permanent magnet generators for wind turbine applications, *Electric Power Applications*, 1996, **143**(1), 1-8.
- [120] Lampola P., Perho J., Electromagnetic analysis of a low-speed permanent-magnet wind generator, *International Conference on Opportunities and Advances in International Electric Power Generation*, Durham, United Kingdom, 18-20 March 1996.
- [121] Chen J. Y., Nayar C. V., A direct-coupled, wind-driven permanent magnet generator, *International Conference on Energy Management and Power Delivery*, Singapore, 3-5 March 1998.
- [122] Wu W., Ramsden V. S., Crawford T., Hill G., A low speed, high-torque, direct-drive permanent magnet generator for wind turbines, *IEEE Industry Applications Conference*, Rome, 08-12 October 2000.
- [123] Rahman M. A., Advances of interior permanent magnet (IPM) wind generators, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, China, 17-20 October 2008.
- [124] Huang S., Aydin M., Lipo T. A., Low noise and smooth torque permanent magnet propulsion motors: Comparison of non-slotted and slotted radial and axial flux topologies, *IEEE International Aegean Electrical Machine and Power Electronic Conference*, Kusadasi, Turkey, 27-29 June 2001.
- [125] Huang S., Aydin M., Lipo T. A., Torque quality assessment and sizing optimization for surface mounted PM machines, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Chicago, USA, 30 September – 4 October 2001.



- [126] Aydin M., Huang S., Lipo T. A., Torque quality and comparison of internal and external rotor axial flux surface-magnet disc machines, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2001, **53**(3), 1-7.
- [127] Cavagnino A., Lazzari M., Profumo F., Tenconi A., A comparison between the axial flux and the radial flux structures for PM synchronous motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, **38**(6), 1517-1524.
- [128] <http://www.neoenerji.com/> (Ziyaret tarihi: 01 Temmuz 2010).
- [129] <http://cdn.chip.gen.tr/images/content/20100108215029.jpg> (Ziyaret tarihi: 03 Ekim 2012).
- [130] Çetin E., *Yapay sinir ağları (Kuram, Mimari, Eğitim, Uygulama)*, Seçkin Yayıncılık A.Ş., Ankara, 2003.
- [131] Karakaya A., Karakas E., Performance analysis of pm synchronous motors using fuzzy logic and self tuning fuzzy PI speed controls, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2008, **33**(1B), 153-177.
- [132] Ohm D. Y., Brown J. W., Chava W. B., Modeling and parameter characterization of permanent magnet synchronous motor, *Proceeding of the 24th Annual Symposium of Incremental Motion Control Systems and Devices*, San Jose, California, June 1995.
- [133] Lorduy A., Lazaro A., Barrado A., Fernandez C., Quesada I., Lucena C., Simplified Synchronous Reference Frame Control of the three phase grid connected inverter, *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, California, USA, 21-25 February 2010.
- [134] Sgarbossa L., Advance topics on motor drives for emerging mechatronic applications, PhD dissertation, Università Degli Studi di Padova Dipartimento di Ingegneria Elettrica. Ingegneria Industriale, Padova, Italia, 2008.
- [135] Kesler M., Karabacak M., Özdemir E., Genel amaçlı tristör sürücü eğitim setinin tasarımı ve uygulaması, *Otomasyon Dergisi*, İstanbul, Türkiye, Mart 2011.
- [136] Tan K., Islam S., Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, **19**(2), 392-399.

## **KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER**

- [1] **Karakaya A.**, Karakaş E., Maximum power tracking with neural network control in wind energy conversion system, *III. International Conference on Nuclear & Renewable Energy Resources*, Istanbul, Turkey, 20-23 May 2012.
- [2] **Karakaya A.**, Karakaş E., Implementation of neural network based maximum power tracking control for wind turbine generator, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, DOI: 10.3906/elk-1201-70.

## **ÖZGEÇMİŞ**

1980 yılında Erzurum’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 1997 yılında Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü’nü kazandı. 2002 yılında bu bölümden bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. 2005 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı’nda yüksek lisansını tamamladı. 2005 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı’nda doktora öğrenimine başladı. 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü Elektrik Makineleri Anabilim Dalı’na Araştırma Görevlisi olarak girdi ve halen Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.