

**YATAY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİN SİSTEMLERİ İÇİN BİR
BENZETİM ARACI TASARIMI**

Serkan İŞCAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2012

ANKARA

Serkan İŞCAN tarafından hazırlanan “YATAY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİN SİSTEMLERİ İÇİN BİR BENZETİM ARACI TASARIMI” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Şevki DEMİRBAŞ

.....

Tez Danışmanı, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ramazan BAYINDIR

.....

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Şevki DEMİRBAŞ

.....

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin POLAT

.....

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih 25 / 07 / 2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Serkan İŞCAN

**YATAY EKSENLİ RÜZGÂR TÜRBİN SİSTEMLERİ İÇİN BİR BENZETİM
ARACI TASARIMI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Serkan İŞCAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2012**

ÖZET

Bu çalışmada, yatay eksenli rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan generatörler ve güç elektroniği devrelerinin bilgisayar ortamında oluşturulan modelleri bir araya getirilerek sanal bir laboratuvar oluşturulmuştur. Oluşturulan bu laboratuvar da mekanik bileşenler, elektrik makinaları, güç elektroniği, kaynak ve ölçüm, kontrol ve yük adı altında 6 adet kütüphane içerisinde 22 adet model bulunmaktadır. Matlab/Simulink programı yardımıyla oluşturulan modeller birbirlerinden bağımsız olarak çalıştırılabilmektedir. Laboratuvar kullanıcısı, kullanmak istediği Simulink modelini ait olduğu kütüphaneden seçerek boş bir Simulink sayfasına taşıyarak ve gerekli parametreleri girerek modellerin çalışma durumlarını gözlemleyebilmektedir. Gerçekleştirilen çalışma yatay eksenli rüzgâr türbin sistemlerinin benzetimi ve analizi için kullanılabileceği gibi rüzgâr türbin sistemlerinin eğitiminde yardımcı araç olarak ta kullanılabilmektedir.

Bilim Kodu : 703.3.012
Anahtar Kelimeler : Rüzgâr türbinleri, generatör, güç elektroniği, benzetim aracı.
Sayfa Adedi : 84
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Şevki DEMİRBAŞ

**DESIGN OF A SIMULATION TOOL FOR HORIZONTAL AXIS WIND
TURBINE SYSTEMS**

(M.Sc. Thesis)

Serkan İŞCAN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

July 2012

ABSTRACT

In this study, a virtual laboratory which consists of generators and power electronics circuit models used in horizontal axis wind turbine systems has been developed. The laboratory have 6 toolboxes named mechanical components, electric machinery, power electronics, source and measurements, control and load with 22 models. Models have been designed with the help of Matlab/Simulink program and they can be used independently from each other. In order to observe simulation results, user select the required models in the library and move them to new simulink page, then enter the parameter by using parameter dialog boxes. Implemented study can be used not only for simulation and analyzing of horizontal axis wind turbine systems but also as a auxiliary tool for education of wind turbine systems.

Science Code : 703.3.012

Key Words : Wind turbines, generator, power electronics, simulation tool.

Page Number : 84

Adviser : Assoc. Prof. Dr. Şevki DEMİRBAŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince bilgi ve tecrübeleri ile beni destekleyen, yardım ve katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen ve beni yönlendiren değerli Hocam Doç. Dr. Şevki DEMİRBAŞ'a, yine tecrübelerinden faydalandığım değerli arkadaşlarım Öğr. Gör. Sertaç BAYHAN, Öğr. Gör. Hikmet FİDANBOY'a ve Teknoloji Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde görevli tüm hocalarıma, sabır ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan eşim Hatice İŞCAN ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ VE MODELLENMESİ.....	7
2.1. Rüzgâr Enerjisi ve Oluşumu	7
2.2. Rüzgâr Türbinleri	7
2.3. Rüzgâr Türbini Çeşitleri.....	9
2.3.1. Sabit hızlı sistemler	11
2.3.2. Değişken hızlı sistemler	12
2.4. Rüzgârdan Elde Edilen Gücün Matematik Modeli	14
3. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖRLER VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ DEVRELERİ	17
3.1. 3-Fazlı Asenkron Makinalar	17
3.1.1. 3-Fazlı asenkron makinaların yapısı	17
3.1.2. 3-Fazlı asenkron makinanın dq -eksen gerilim eşitlikleri	19
3.1.3. 3-Fazlı asenkron makinanın dq -eksen tork eşitlikleri	24
3.2. 3-Fazlı Senkron Makinalar.....	25
3.2.1. 3-Fazlı senkron makinaların yapısı	25
3.2.2. 3-Fazlı alan sargılı senkron makina dq -eksen gerilim eşitlikleri	26

Sayfa

3.2.3. 3-Fazlı senkron makina <i>dq-eksen</i> tork eşitlikleri	33
3.2.4. 3-Fazlı daimi mıknatıslı senkron makina <i>dq-eksen</i> gerilim eşitlikleri	33
3.2.5. 3-Fazlı daimi mıknatıslı senkron makine <i>dq-eksen</i> tork eşitlikleri	33
3.3. Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Güç Elektroniği Devreleri.....	34
3.3.1. Güç elektroniği tanımı	34
3.3.2. Güç elektroniği devreleri	34
3.3.3. Gerilim kontrollü eviriciler	35
3.3.4. Yıldız bağlı bir generatöre bağlı GKE çıkışı DA bara gerilim eşitlikleri	37
3.3.5. Üçgen bağlı bir generatöre bağlı GKE çıkışı DA bara gerilim eşitlikleri	38
3.3.6. Darbe genişlik modülasyon teknikleri	39
3.3.7. Sinüsoidal darbe genişlik modülatörüne ait matematik model	40
3.3.8. Çift beslemeli asenkron generatör için gerilim denetiminin yapısı	41
4. TASARLANAN BENZETİM ARACI	44
4.1. Mekanik Bileşenler Kütüphanesi	45
4.1.1. Yatay eksenli rüzgâr türbin modeli	45
4.1.2. Dişli kutusu modeli	47
4.2. Elektrik Makinaları Kütüphanesi	48
4.2.1. Rotoru sargılı asenkron makina (RSASM) modeli	48
4.2.2. Sincap kafesli asenkron makina (SKASM) modeli	50
4.2.3. Rotoru sargılı senkron makina (RSSM) modeli.....	51
4.2.4. Kalıcı mıknatıslı senkron makina modeli	53
4.3. Güç Elektroniği Kütüphanesi	54
4.3.1. 3 Fazlı doğrultucu modeli	55

Sayfa

4.3.2. Gerilim kontrollü dönüştürücü (GKE) modeli.....	56
4.3.3. Çift beslemeli asenkron generatör rotor tarafı evirici modeli.....	58
4.3.4. Çift beslemeli asenkron generatör şebeke tarafı evirici modeli.....	58
4.4. Kaynak ve Şebeke Kütüphanesi.....	59
4.4.1. Kaynak modeli	59
4.4.2. Şebeke akım-gerilim ölçüm modeli	60
4.4.3. Faz-Faz akım-gerilim ölçüm modeli.....	61
4.4.4. Ölçüm izleme modeli	61
4.5. Kontrol Kütüphanesi	62
4.5.1. Sinüsoidal darbe genişlik modülatörü (SDGM) modeli	63
4.5.2. ÇBAG rotor ve şebeke tarafı evirici denetleyicileri.....	64
4.5.3. ÇBAG rotor ve şebeke tarafı PWM üreteçleri	64
4.6. Yük Kütüphanesi.....	65
4.6.1. Omik yük modeli	65
4.6.2. Endüktif yük modeli.....	66
4.6.3. Kapasitif yük modeli	66
5. KALICI MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRLÜ (KMSG) RÜZGÂR TÜRBİNİ ÖRNEK UYGULAMASI.....	67
5.1. Simülasyon Sonuçları	70
6. SONUÇLAR	78
KAYNAKLAR	80
ÖZGEÇMİŞ	84

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bir rüzgâr türbininin yapısı (Vestas V82-1.65 MW)	8
Şekil 2.2. Rüzgâr Türbinleri a) Dikey eksenli rüzgâr türbini, b) Yatay eksenli rüzgâr türbini.....	10
Şekil 2.3. Sincap kafesli asenkron generatörlü sistem	11
Şekil 2.4. Çift beslemeli asenkron generatörlü sistem.	13
Şekil 2.5. Daimi mıknatıslı senkron generatörlü sistem	13
Şekil 2.6. Rotoru sargılı senkron generatörlü sistem	14
Şekil 3.1. 3 Fazlı asenkron makinanın qd0 eşdeğer devre şemaları a) q-eksen, b) d-eksen, c) 0-eksen.....	20
Şekil 3.2. 3 Fazlı senkron makinanın qd0 eşdeğer devre şemaları a) q-eksen, b) d-eksen, c) 0-eksen.....	28
Şekil 3.3. Doğrultucu ve gerilim kontrollü evirici devre şeması	35
Şekil 3.4. Çift taraflı çalışabilen 2 GKE şeması.....	36
Şekil 3.5. Gerilim kontrollü eviricili yıldız bağlı asenkron generatör	37
Şekil 3.6. Gerilim kontrollü eviricili üçgen bağlı asenkron generatör	38
Şekil 3.7. Çok katlı evirici kontrol şemaları	39
Şekil 3.8. Rotor tarafı evirici denetim modeli.....	43
Şekil 4.1. Rüzgâr türbin laboratuvarı (RTLAB) ekran görüntüsü	44
Şekil 4.2. Mekanik bileşenler kütüphanesi ekran görüntüsü.....	45
Şekil 4.3. Yatay eksenli rüzgâr türbini simulink modeli.....	46
Şekil 4.4. YERT parametre giriş ekranı	46
Şekil 4.5. Dişli kutusu simulink modeli	47
Şekil 4.6. Dişli kutusu parametre giriş ekranı	47

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7. Elektrik makinaları kütüphanesi ekran görüntüsü	48
Şekil 4.8. RSASM simulink modeli.....	49
Şekil 4.9. RSASM parametre giriş ekranı.....	49
Şekil 4.10. SKASM simulink modeli.....	50
Şekil 4.11. SKASM parametre giriş ekranı.....	51
Şekil 4.12. RSSM simulink modeli.....	52
Şekil 4.13. RSSM parametre giriş ekranı.....	53
Şekil 4.14. KMSM simulink modeli	53
Şekil 4.15. KMSM parametre giriş ekranı	54
Şekil 4.16. Güç elektroniği kütüphanesi ekran görüntüsü	55
Şekil 4.17. 3 fazlı kontrolsüz doğrultucu	55
Şekil 4.18. 3 fazlı kontrolsüz doğrultucu simulink modeli	56
Şekil 4.19. GKE simulink modeli	57
Şekil 4.20. GKE simulink model blokları.....	57
Şekil 4.21. CBAG rotor tarafı evirici simulink modeli.....	58
Şekil 4.22. ÇBAG şebeke tarafı evirici modeli.....	58
Şekil 4.23. Kaynak ve şebeke kütüphanesi ekran görüntüsü	59
Şekil 4.24. 3 Fazlı gerilim kaynağı simulink modeli	60
Şekil 4.25. Şebeke akım-gerilim ölçümü simulink modeli.....	60
Şekil 4.26. Faz-faz akım-gerilim ölçümü modeli.....	61
Şekil 4.27. Ölçüm izleme (scope) modeli	62
Şekil 4.28. Kontrol kütüphanesi ekran görüntüsü.....	62
Şekil 4.29. SDGM simulink modeli.....	63

Şekil	Sayfa
Şekil 4.30. SDGM parametre giriş ekranı	63
Şekil 4.31. ÇBAG rotor ve şebeke tarafı evirici denetim modelleri	64
Şekil 4.32. ÇBAG rotor ve şebeke tarafı evirici denetim modelleri	64
Şekil 4.33. Yük kütüphanesi ekran görüntüsü	65
Şekil 4.34. Omik yük modeli parametre giriş ekranı	65
Şekil 4.35. Endüktif yük modeli parametre giriş ekranı	66
Şekil 4.36. Kapasitif yük modeli parametre giriş ekranı.....	66
Şekil 5.1. Simülasyonu gerçekleştirilen sistem.....	67
Şekil 5.2. Maske edilmiş olan yatay eksenli rüzgâr türbin (YERT) modeli	68
Şekil 5.3. YERT modeli için parametre giriş ekranı.....	68
Şekil 5.4. KMSG simulink modeli.....	69
Şekil 5.5. KMSG modeli için parametre giriş ekranı.....	69
Şekil 5.6. DGM maske edilmiş modeli	70
Şekil 5.7. Rüzgâr hız grafiği	72
Şekil 5.8. Generatöre uygulanan açısal hız grafiği	72
Şekil 5.9. Generatör 3 fazına ait gerilim grafiği.....	73
Şekil 5.10. 0-0.1 saniye arası generatör 3 fazına ait gerilim grafiği	74
Şekil 5.11. DA bara gerilim grafiği.....	74
Şekil 5.12. Eviriciye ait filtresiz çıkış gerilimi grafiği.....	75
Şekil 5.13. Eviriciye ait çıkış gerilimi grafiği	76
Şekil 5.14. Yük akımları grafiği.....	76
Şekil 5.15. Eviriciye uygulanan darbe genişlik modülasyonu sinyal grafiği a) 1 nolu, b) 2 nolu, c) 3 nolu, d) 4 nolu, e) 5 nolu, f) 6 nolu	77

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. 3 Fazlı 4 kW sincap kafesli bir asenkron makina	18
Resim 3.2. 3 Fazlı 1 kW Rotoru sargılı senkron makina	25

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
E	Kinetik Enerji (Joule)
m	Kütle (Kg)
V	Hız (m/s)
T_p	1 Yıllık Peryot
ρ	Hava Yoğunluğu (kg/m ³)
A	Türbin Kanat Süpürme Alanı (m ²)
P_r	Rüzgârdan Elde Edilen Güç (Watt)
P_m	Rüzgâr Türbini Mekanik Gücü (Watt)
V_r	Rüzgâr Hızı (m/s)
C_p	Türbin Performans Katsayısı
λ	Uç Hız Oranı
λ_i	Gerekli λ değeri
β	Kanat Açısı (Derece)
R	Kanat Uzunluğu, Yarıçap (Metre)
k_p	Güç Kazancı
c_1-c_6	Türbin Katsayıları
ω_{rt}	Açısal Hız (rad/s)
n_{gen}	Generatör devir sayısı (devir/dakika)
f	Frekans (Hertz)
p	Makina kutup sayısı

Kısaltmalar	Açıklama
AA	Alternatif Akım
ASM	Asenkron Makina
DA	Doğru Akım
DAM	Darbe Genlik Modülasyonu
DERT	Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini
DGM	Darbe Genişlik Modülasyonu
DHS	Değişken Hızlı Sistem
HB	Harmonik Bastırma
KMSG	Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör
KMSM	Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makina
RSAG	Rotoru Sargılı Asenkron Generatör
RSASM	Rotoru Sargılı Asenkron Makina
RSSM	Rotoru Sargılı Senkron Makina
RTLAB	Rüzgâr Türbin Laboratuvarı
SDGM	Sinüsoidal Darbe Genişlik Modülasyonu
SG	Senkron Generatör
SHB	Sinüsoidal Harmonik Bastırma
SHS	Sabit Hızlı Sistem
SKAG	Sincap Kafesli Asenkron Generatör
SKASM	Sincap Kafesli Asenkron Makina
SM	Senkron Makina
UVDGM	Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu
YERT	Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini

1. GİRİŞ

Günümüzde elektrik enerjisi, üretim, iletim ve dağıtımının kolay olması, diğer enerji türlerine kolayca dönüştürülebilmesi gibi özelliklerinden dolayı en yaygın olarak kullanılan enerji çeşididir. Elektrik enerjisi birçok alanda ısı, ışık, kimyasal veya mekanik enerjiye dönüştürülerek kullanılmaktadır. Elektrik enerjisi depolanabilir bir enerji türü olmadığından dolayı üretiminde süreklilik ve yeterlilik gerekmektedir. Ayrıca elektrik enerjisinin üretiminde kalite, maliyet ve çevreye olan etkiler bir bütün olarak değerlendirilmelidir. Elektrik enerjisi üretimini iki bölümde incelemek mümkündür. Bunlardan birincisi elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynaklardır. Günümüzde kullanılan kaynaklar sürdürülebilirlik bakımından yenilenemez ve yenilenebilir enerji kaynakları olarak iki kısma ayrılmaktadır. Yenilenemez kaynaklar fosil yakıtlar ve nükleer kaynaklardır. Fosil kaynaklı enerji teknolojileri günümüzde hayat kalitesini artırmaya devam etmektedir. Ancak aynı zamanda, fosil kaynaklı enerji üretimi maliyetleri de artırmaktadır. Ayrıca fosil enerji kaynakları çevre üzerinde geri dönüşü olmayan kalıcı hasarlar bırakabilmektedir. Fosil kaynakların tüketiminde ortaya çıkan sera gazlarının küresel ısınmaya neden olduğu da bilinmektedir. Tüm bu olumsuzluklar sağlık sorunlarına ve ülke ekonomisinde büyük meblağların harcanmasına neden olmaktadır. Fosil yakıtlar için verilen amansız mücadeleler politik çekişmeleri de beraberinde getirmeye devam etmektedir. Günümüzde bağımlı bulunduğumuz bu enerji kaynağı artan enerji talebine karşılık verememekte ve tükenmektedir. Doğal gaz, petrol ve kömür gibi fosil kaynakların yerine alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçilmesi, çevre güvenliği ve insan açısından büyük önem taşımaktadır. Alternatif bir enerji kaynağı olarak bilinen nükleer kaynaklar verimlilik bakımından fosil yakıtlara göre daha üstündür. Ancak nükleer yakıtlar fosil yakıtlar gibi doğrudan kullanılamamaktadır. Nükleer yakıtların kullanılması sonucunda nükleer atıklar meydana gelmektedir. Ancak nükleer atıkların depolama ve imhası kararlılıkla devam ettirilmez ise çevre ve canlılar olumsuz etkilenecektir. Ayrıca nükleer kaynakların kullanımında yeterli güvenlik önlemlerinin alınmayışı kalıcı ve geri dönüşü olmayan problemlere neden olmaktadır. Bu nedenle daha temiz, zararsız, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç artmaktadır [1]. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları

sera gazı etkisi oluşturmamaları, bedelsiz, zararsız ve sürdürülebilir olmaları nedeniyle daha tercih edilir duruma gelmiştir [2]. Yenilenebilir enerji kaynakları olarak hidrolik, güneş kaynaklı enerjiler (ısı, ışık enerjisi, deniz dalga, rüzgâr enerjisi) jeotermal ve biokütle kaynakları kullanılmaktadır [3]. Güneş ışınları sonucu doğada meydana gelen ve sürekli devam eden hidrolik çevrim su kaynaklarının enerji üretiminde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca temel enerji kaynağı olan güneş ışınları ile doğrudan ve dolaylı olmak üzere elektrik enerjisi üretimi yapılabildiği gibi güneş ışınlarının dünya üzerinde farklı basınç ve ısı değerleri oluşturması sonucu oluşan rüzgâr enerjisi ile de enerji üretimi yapılmaktadır. Rüzgâr enerjisi, aslında insanoğlunun M.Ö. 2800'lerden beri kullandığı en eski enerji kaynaklarından biridir. Bu enerji, son yıllara kadar daha çok su pompalama ve kırsal alanda elektrik enerjisi elde etme amaçları ile kullanım alanı bulmuştur. Günümüzde ise yenilenebilir bir enerji üretim kaynağı olarak enerji sektöründe yerini almıştır. Bu enerjinin kullanılabilmesi, rüzgâr rejimine, rüzgâr türbininin yerleştirildiği yüksekliğe ve enerji üretim sisteminin boyutlarına bağlıdır [4-5].

Elektrik enerjisi üretiminin ikinci bölümü ise kullanılan kaynaklar ile elektrik enerjisinin üretiliş aşamasıdır. Fosil, biokütle ve nükleer kaynaklı yakıt kullanan termik santrallerde temel prensip kaynakların kullanımı sonucu açığa çıkan ısı enerjisinin kullanımınıdır. Elde edilen ısı enerjisi ile su basınçlı buhar haline getirilir ve basınçlı sıcak buhar, buhar türbin kanatçıklarına çarptırılarak mekanik enerji elde edilir. Hidrolik santrallerde ise ısı enerjisi yerine suyun potansiyel ve kinetik enerjisinden faydalanılmaktadır. Barajlarda suyun depolanması sonucu elde edilen potansiyel enerji cebri borular vasıtasıyla türbine iletilir. Hareketli olan suyun kinetik enerjisi türbin kanatçıklarında mekanik enerjiye dönüştürülür. Mekanik enerji generatöre aktararak elektrik enerjisi elde edilir. Güneş santrallerinde güneş ışınlarından faydalanılmaktadır. Güneş enerjisi kullanan santraller iki farklı prensipte çalışmaktadır. Bunlardan ilkinde güneş ışınlarını tek bir noktaya toplayan yansıtıcı aynalar, o noktadaki suyu basınçlı buhar haline getirirler. Tıpkı bir termik santral gibi çalışırlar. İkincisinde ise fotovoltaik piller kullanılmaktadır. Yarıiletken malzeme teknolojisi ile üretilen fotovoltaik piller üzerine düşen güneş ışınları sayesinde herhangi bir enerjiye ihtiyaç duymaksızın elektrik enerjisi üretilmesini sağlarlar.

Diğer bir yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgâr enerjisi kullanan santrallerde rüzgâr direkt olarak rüzgâr türbin kanatlarına çarparak sahip olduğu kinetik enerji mekanik enerjiye dönüştürülür. Elde edilen mekanik enerji generatöre aktararak elektrik enerjisi elde edilir. Rüzgâr türbin teknolojisi yenilenebilir enerji teknolojilerinin en hızlı gelişenlerindendir. Geçmişte rüzgâr türbinleri ile üretilen elektrik enerjisi sınırlı iken günümüzde kayda değer güç değerlerine ulaşmıştır. Yapılan literatür taramasında son yıllarda gelişen teknoloji ve güç elektroniği devreleri ile üretilen elektriğin kontrolünün daha etkin bir biçimde yapılabildiği, rüzgâr santrallerinin sayısının hızla arttığı, çeşitlendiği ve bu teknolojinin daha da gelişeceği belirlenmiştir [6]. Literatürde yapılan çalışmalar tek tek incelendiğinde, Blaabjerg ve arkadaşları rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan güç elektroniği devreleri ve bu devrelerin kontrolü üzerine bir araştırma yapmışlardır [7]. Krystkowiak ve arkadaşları güç elektroniği devrelerinde kullanılmak üzere rüzgâr türbin sistemlerine uyumlu 3 fazlı diyotlu doğrultucu devre topolojisini kullanarak akım ayarlamalı kontrol sisteminin deneyini ve benzetimini gerçekleştirmişlerdir [8]. Qui ve arkadaşları kalıcı mıknatıslı senkron generatör tabanlı rüzgâr türbinlerinde diyotlu doğrultucu, yükselten çevirici ve darbe genişlik modülasyonlu devre topolojilerinin modellenmesi ve kontrolüne yönelik bir güç elektroniği arayüzü ve kontrol sistemi geliştirmişlerdir [9]. Steimer yenilenebilir enerji kullanan şebekelerde enerji kalitesinin artırılması üzerine bir çalışma yaparak güç elektroniği teknolojisine atıfta bulunmuştur [10]. Kjaer ve arkadaşları fotovoltaiik modüller için bir fazlı şebeke bağlantılı evirici uygulamaları geliştirmişlerdir [11]. Carrasco ve arkadaşları yenilenebilir enerji kaynaklarının şebeke entegrasyonu için güç elektroniği sistemleri üzerine bir inceleme yapmışlar ve güç elektroniği sistemlerinin gelecekte bu alanın çeşitli uygulamalarında çok önemli bir rol alacağı sonucuna varmışlardır [12]. Dewei ve arkadaşları kalıcı mıknatıslı senkron generatörlerde kullanılmak üzere düşük maliyetli 3 fazlı bir doğrultucu üzerinde çalışarak rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılmak üzere çeşitli öneriler sunmuşlardır [13]. Celanovic ve arkadaşları yine kalıcı mıknatıslı senkron generatörlerin şebeke bağlantılarında kullanılmak %20 oranlı bir çevirici topolojisi üzerine çalışma yaparak sistemin uygulanabilirliğini vurgulamışlardır [14]. Rodriguez ve arkadaşları çift beslemeli asenkron generatörlerin dengesiz şebeke bağlantılarında doğrudan güç kontrolü üzerine

simülasyona dayalı elde edilen sonuçları sunmuştur [15]. Hansen ve arkadaşı Digsilent programı ile değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılan çift kutuplu senkron generatörün modellenmesi ve simülasyonunu gerçekleştirmiş ve elde edilen verileri sunmuşlardır [16]. Karimi-Dajiyani ve arkadaşları PSCAD/EMTDC programı ile çift beslemeli asenkron generatörün fuzzy lojik kontrolünü gerçekleştirmişlerdir [17]. Joos ve arkadaşları PSCAD programı ile rüzgâr türbini bağlantılı batarya şarj ilişkisinin gerçek zamanlı simülasyonunu gerçekleştirmiştir [18]. Chen ve ekibi tristörlü bir evirici bağlantılı kalıcı mıknatıslı senkron makina modelini bilgisayar ortamında oluşturmuş ve sanal bir laboratuvar ortamında elde ettiği sonuçları sunmuştur [19]. Blaabjerg ve arkadaşları yenilenebilir enerji üretim sistemlerinde güç elektroniği devrelerinin entegrasyonunu ele almıştır [20]. Chen ve arkadaşları geniş değerli DA gerilimde tristörlü bir eviricinin anahtarlama karakteristiklerini çıkarmıştır [21]. Iov ve arkadaşları rüzgâr türbin sistemlerinin modellenmesinde kullanılan HAWC, Matlab/Simulink, Saber ve Digsilent programlarının karşılaştırmalı analizini yaparak değişik sonuçlar ortaya koymuştur [22]. Chen ve arkadaşları EMTDC/PSCAD programı ile rotor kayma ve kanat açısı denetleyicisine ait bir benzetim çalışması yaparak güç sistemlerinde bakım kestirimi üzerinde durmuşlardır [23]. Uluslararası rüzgâr enerjisi birliğinin her yıl rüzgâr enerjisi sistemleri pazarı konusunda rapor sunduğu belirlenmiştir [24]. Hansen ve arkadaşları Digsilent programı ile dinamik rüzgâr türbini modellerini tanıtmışlardır [25]. Michalke ve arkadaşları değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin modellenmesi, kontrolü ve güç sistemlerine olan etkilerinden bahsetmiştir [26]. Digsilent programı ile yapılan bir çalışmada çift beslemeli asenkron generatörün dinamik modellenmesi yapılmıştır [27]. Delarue ve arkadaşları 750 kW'lık bir rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemine ait blok diyagramdan yararlanarak bir rüzgâr türbini simülasyonu gerçekleştirmişlerdir [28]. Petru ve arkadaşları rüzgâr türbinlerinin modellenmesi konusunda kullanılan programlara vurgu yapan bir araştırma yayınlamışlardır [29]. Sorensen ve ekibi EMTDC ve Digsilent programı ile rüzgâr türbin sistemleri üzerine çeşitli deneyler yaparak simülasyon sonuçlarını sunmuşlardır [30]. Yapılan tüm çalışmalara bakıldığında rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi elde etmede kullanılan rüzgâr türbini sistemlerinin gerçek zamanlı benzetimlerinde simülasyon programlarından aktif olarak faydalandığı belirlenmiştir. Rüzgâr türbinleri

sistemlerini oluşturan makina ve diğer bileşenlerin modellenmesi, gerçek zamanlı simülasyonları ve analizleri için Matlab/Simulink, DigSILENT, HAWC, PSCAD, EMTDC ve Saber programları kullanılmıştır. Bu programlar kullanılarak elde edilen çalışmalar incelendiğinde rüzgâr türbinlerinde kullanılan yatay eksenli rüzgâr türbin sistemlerinin tümünü bir arada içeren bir çalışmaya rastlanamamıştır. DigSILENT, PSCAD, EMTDC, Saber ve HAWC programları kullanılarak rüzgâr türbini sistemlerinden herhangi bir tanesi seçilerek çalışmalar özele indirgenmiştir. Literatür incelendiğinde, gerçek zamanlı benzetim çalışmalarının daha çok Matlab/Simulink programı ile yapıldığı görülmektedir. Matlab/Simulink programı içerisinde elektrik ve elektronik kütüphaneleri mevcut ancak rüzgâr türbinleri ile yapılan çalışmaların tam kapsamlı olmadığı görülmüştür. Bu nedenle tez hazırlanırken Simulink programında tam içerikli olmayan bu konu da dikkate alınmıştır. Simulink programı ile oluşturulan matematiksel modellerde parametrelerin ayarlanması, giriş ve çıkış verilerinin izlenebilmesi daha kolay ve anlaşılır olmakla birlikte erişilebilirlik bakımından kullanıcıya kolaylık sağladığı görülmüştür. Bu çalışmada diğer yapılan çalışmalardan farklı olarak yatay eksenli rüzgâr türbini sistemlerinde kullanılan rüzgâr türbini, generatörler ve güç elektroniği devreleri bir bütün olarak değerlendirilmiş ve ihtiyaç duyan bireyler için açık ve anlaşılır bir biçimde kullanıma sunulmuştur.

Her coğrafi bölgenin rüzgâr enerjisi yönünden elverişli olmaması ve rüzgâr türbin sistemlerinin tasarımının yüksek maliyetli olması nedeniyle, sistemlerde kullanılan türbin, generatörler ve güç elektroniği devrelerinin matematiksel modelleri Matlab/Simulink programı yardımıyla oluşturulmuş ve bu modeller sınıflandırılarak yapay ve görsel bir rüzgâr türbin laboratuvarı elde edilmiştir. Yapılan çalışmada mekanik ve elektriksel olmak üzere farklı matematik modeller oluşturulmuştur. Mekanik model olarak 3 kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini (YERT) ve dişli kutusu modellenmiştir. Elektriksel model olarak; 3 fazlı sinüsoidal enerji kaynağı, sincap kafesli asenkron makina, rotoru sargılı asenkron makina, kalıcı mıknatıslı senkron makina ve rotoru sargılı senkron makina modelleri oluşturulmuştur. Ayrıca güç elektroniği devrelerinden doğrultucu ve sinüsoidal darbe genişlik modülasyonlu gerilim beslemeli evirici devresi, kontrolü, çift beslemeli asenkron generatör rotor-

şebeke tarafı evirici ve denetleyicileri ve yük modelleri oluşturulmuştur. Modeli oluşturulan sistemler birbirinden bağımsız çalışabilmektedir. Ayrıca modellerin veri girişleri kullanıcı tarafından modele ait parametre giriş ekranı yardımıyla istenilen değerlere ayarlanabilmektedir.

Tez altı bölümden meydana gelmiştir. İlk bölümde enerji, elektrik enerjisi konusu, enerji üretiminde kullanılan kaynak çeşitleri, üretim santrallerinin çalışma prensipleri, rüzgâr türbinleri sistemleri ve benzetimleri alanında neler yapıldığı ve çalışmada tasarlanan sistem hakkında genel bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde rüzgâr enerjisi ve oluşumu, rüzgâr ile elektrik enerjisi üretiminde kullanılan sistemlerin tanıtımı, rüzgâr türbin çeşitleri tanıtılarak yatay eksenli rüzgâr türbini ve dişli kutusuna ait matematiksel ifadeler yazılmıştır.

Üçüncü bölümde rüzgâr türbinleri sistemlerinde kullanılan generatörler ve güç elektroniği devrelerinin yapısı, çeşitleri, çalışma şekilleri ve generatörlerin modellenebilmesi için gerekli olan eşdeğer devreler ve matematiksel ifadeler yazılmıştır.

Dördüncü bölümde ilk üç bölümde işlenen rüzgâr türbini, generatörler ve güç elektroniği devrelerine ait Matlab/Simulink programında oluşturulan modellerin tanıtımı yapılmıştır.

Beşinci bölümde oluşturulan rüzgâr türbin laboratuvarından kalıcı mıknatıslı senkron generatörlü rüzgâr türbinini temsil eden örnek bir uygulama yapılmış olup oluşturulan sistem ve sonuçlarından elde edilen veriler sunulmuştur.

Altıncı bölüm olan sonuçlar bölümünde ise tasarlanan sistemden elde edilen sonuçlar açıklanmış ve oluşturulan rüzgâr türbin laboratuvarı hakkında öneriler sunulmuştur.

2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ VE MODELLENMESİ

Rüzgâr türbinleri; güneş enerjisinin farklı bir ürünü olan rüzgârın kinetik enerjisini bünyesinde hareket enerjisine dönüştüren mekanik sistemler olarak tanımlanmaktadır. Rüzgâr türbinlerini iyi tanıyabilmek için bu bölümde rüzgâr enerjisi ve nasıl oluştuğu konusu, rüzgâr türbinlerinin yapıları, rüzgâr türbinlerinde kullanılan sistemler ve rüzgârdan elde edilen güce ait matematiksel ifadelerden bahsedilmektedir.

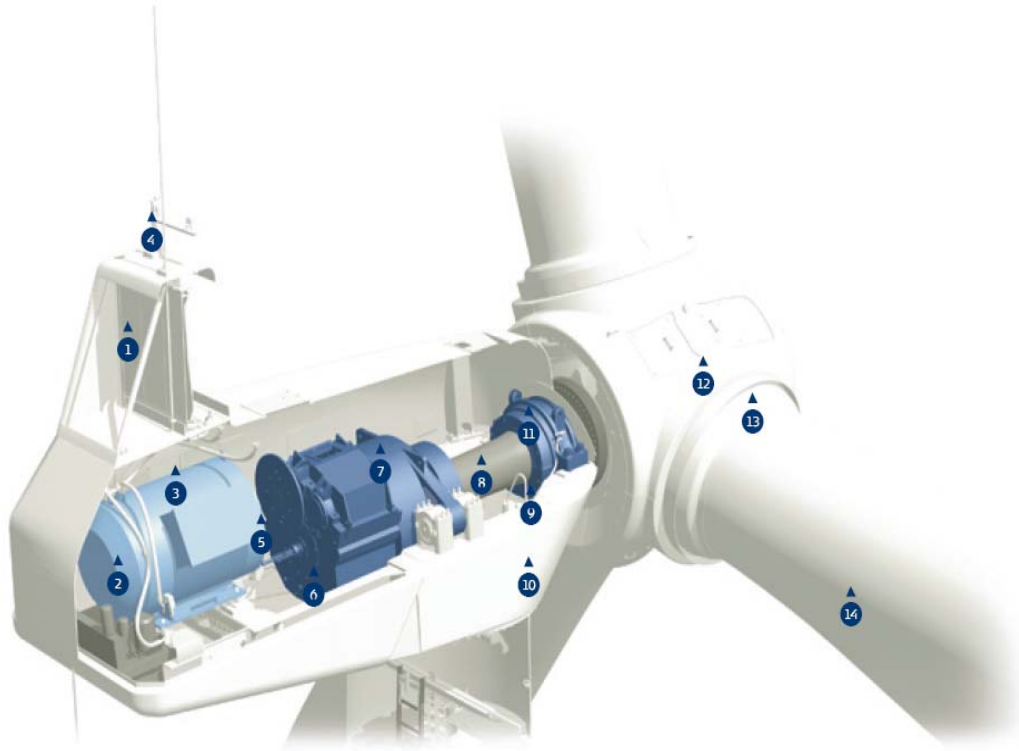
2.1. Rüzgâr Enerjisi ve Oluşumu

Temel enerji kaynağı olan güneş, dünya üzerinde ısıma yoluyla farklı bölgelerde farklı sıcaklıkların oluşmasını sağlamaktadır. Oluşan sıcaklık farklılıkları, farklı bölgelerde farklı basınç değerleri meydana getirmektedir. Sıcaklık ve basınç farkı hesaba katılacak olursa rüzgâr; dünyayı çevreleyen atmosfer içindeki mevcut havanın atmosfer basıncının farklı olduğu iki bölge arasındaki akışı olarak tanımlanmaktadır. Akış hızı birimi ise havanın saniyedeki katettiği metre (m/s) cinsinden literatürde kullanılmaktadır. İki bölge arasındaki basınç farkının değeri ile rüzgâr hızı doğru orantılı olarak değişmektedir. Rüzgâr daima yüksek basınç bölgesinden alçak basınç bölgesine doğru hareket eden bir enerji kaynağıdır. Rüzgârın yönü rüzgâr gülü, hızı ise anemometre ismi verilen sistemlerle ölçülmektedir.

2.2. Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinleri rüzgârda mevcut olan kinetik enerjinin belirli katsayıda alıkonması sonucu hareket enerjisi elde edilen mekanik sistemler olarak tanımlanmıştır. Rüzgâr türbinleri tasarımında üç farklı enerji dönüşümünden söz etmek mümkündür. Bunlardan ilki mekanik-mekanik enerji dönüşümü, ikincisi mekanik-elektrik enerji dönüşümü ve son olarak elektrik-elektrik enerjisi dönüşümüdür. Rüzgâr türbini sistemlerinde, mekanik-mekanik enerji dönüşümünün meydana geldiği kısım olan kanatlar (rotor), mil ve dişli kutusudur. Mekanik-elektrik enerji dönüşümünün meydana geldiği yapı generatör, elektrik-elektrik enerji dönüşümünün meydana

geldiği kısım transformatör ve güç elektroniği devreleridir. Şekil 2.1’de bir rüzgar türbinini oluşturan kısımlar gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Bir rüzgâr türbininin yapısı (Vestas V82-1.65 MW) [31]

1- Soğutucu	6- Mekanik Fren	11- Ana Yatak
2- Generatör	7- Dişli Kutusu	12- Rotor Denetleyici
3- Gövde Denetleyicisi	8- Ana Mil	13- Kanat Açısı Sistemi
4- Anemometre	9- Eksen Dişlileri	14- Kanatlar (rotor)
5- Kuplaj Noktası	10- Gövde Alt Kutusu	

Rüzgâr türbinlerinde mekanik-mekanik enerji dönüşümünde; eksen sürücü sistemi vasıtasıyla rüzgâr yönüne dik olarak konumlandırılan kanatlar, kanatların birleşimi sonucu oluşan bir rotor, rotoru dişli kutusuna bağlayan bir düşük hız mili, ani rüzgâr hızı artışına bağlı tehlikeli hız değişimlerine karşı tasarlanmış kanat açısı kontrol sistemi, bir fren sistemi ve hız dönüşümü için kullanılan bir dişli kutusu kullanılmaktadır. Rüzgâr türbini üzerinde bulunan bir rüzgâr hızı ölçer (anemometre)

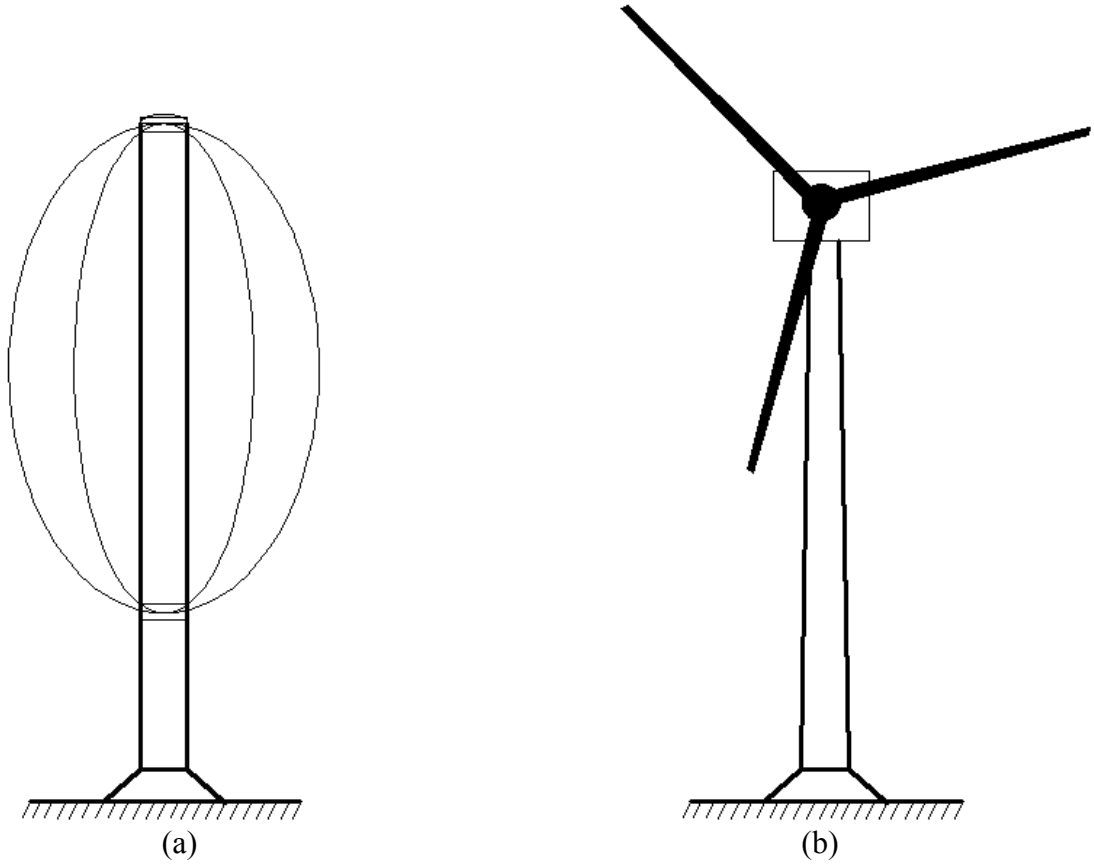
geri besleme sisteminde görev almak üzere denetim amaçlı denetleyiciye bağlıdır. Ayrıca rüzgâr gülü ile rüzgâr yönünün tayini yapılarak eksen motorunun kumanda kontrolü ile kanatların en uygun pozisyona alınarak rüzgâr kinetik enerjisinin absorbe edilmesi sağlanmaktadır. Ana milden alınan mekanik enerji dişli kutusuna aktarılır. Dişli kutusunda dönüştürülen hız generatör miline aktarılır. Generatörden alınan güç ise kullanılan generatör türüne göre sabit hızlı sistemlerde direkt olarak şebekeye aktarılır ya da değişken hızlı türbinlerde generatörden alınan güç şebekeye çeşitli güç elektroniği devreleri yardımıyla aktarılır. Tüm bu sistemleri üzerinde barındıran sisteme nacelle denilmektedir. Nacelle ise bir kule üzerine sabitlenmektedir.

Mekanik-elektrik enerji dönüşümünde elektrik makinaları görev almaktadır. Elektrik üretiminde sağ el kuralı “elektromotor kuvvet üretimi” prensibinde açıklandığı şekilde manyetik alan, iletken ve harekete ihtiyaç duyulmaktadır. Rüzgâr türbinlerinde elektrik üretimi; farklı tipte tasarlanmış asenkron ve senkron generatörlerde oluşturulan manyetik alan kuvvet çizgilerinin iletkenleri belirli açıda ve açısal hızda kesmesi sonucu gerçekleşmektedir. Uygulanan açısal hız generatör miline rüzgâr türbini tarafından uygulanan mekanik döndürme kuvveti etkisi sonucu oluşmaktadır.

Elektrik-elektrik enerji dönüşümü ve kontrolü; AA gerilim azaltıp artıran transformatörler ve güç, frekans ve genlik denetiminde kullanılan güç elektroniği devreleri vasıtasıyla yapılmaktadır.

2.3. Rüzgâr Türbini Çeşitleri

Rüzgâr türbinleri yeryüzüne konumlandırılış eksenleri, hızları ve hız kontrol sistemlerinin kombinasyonları ile farklı çeşitlerle üretilmektedir. Yeryüzüne tam paralel olarak tasarlanan rüzgâr türbinlerine yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT), yeryüzüne dik açı ile konumlandırılanlarına ise dikey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT) denilmektedir. Şekil 2.2’de rüzgâr türbini tipleri gösterilmektedir.



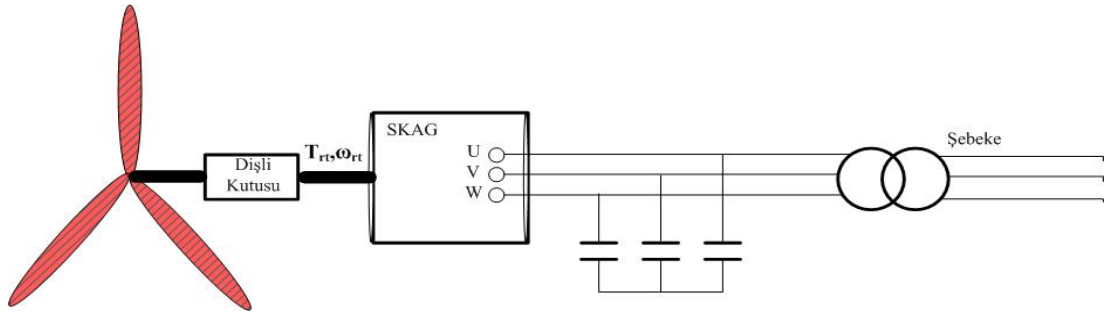
Şekil 2.2. Rüzgâr Türbinleri a) Dikey eksenli rüzgâr türbini, b) Yatay eksenli rüzgâr türbini

Yapılan literatür taramasında YERT'lerin daha çok tercih edildiği belirlenmiştir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin genelinde 3 adet kanat 120° matematiki açı farkı ile kanat merkezinde konumlandırılmaktadır. Birkaç yüz wattan birkaç megawatt güçlerine kadar üretimleri yapılmaktadır. Eşit güçlü sistemlerde kanat çapı arttıkça atalet momentinin artması nedeniyle türbin devir sayısı düşmektedir. Büyük güçlü türbinlerin döner devir sayıları 10-15 d/d gibi oldukça düşük hızlardadır. Düşük hızlarda yüksek tork elde edilen bu rüzgâr türbinlerinde dişli kutusuna aktarılan döner devir hızı yükseltilerek bir mil yardımı ile generatör miline aktarılmaktadır. Hız kontrol sistemlerine göre türbinler; elde edilen gücün belirli limitler dahilinde tutulabilmesi için dinamik hız kontrol sistemleri, aktif dinamik hız kontrol sistemleri ve kanat açısı ile kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Dinamik hız kontrol sistemlerinde tehlikeli rüzgâr hızı değişimlerine karşı koyabilecek mekanik fren sistemleri kullanılmaktadır. Aktif dinamik hız kontrol sistemlerinde mekanik fren

sisteminin yanı sıra rüzgâr hızı artışına bağlı torku belirli limitler dahilinde tutabilmek amacıyla farklı kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Kanat açısı ile kontrol sisteminde rüzgâr hızının artışına bağlı üretilen torkun dengelenmesi amacıyla $0-45^0$ arasında değişen açılarda çalışan kanatlar ve kontrol sistemi görev almaktadır. Döner devir hızlarına göre rüzgâr türbinleri sabit hızlı ve değişken hızlı sistemler olmak üzere iki farklı türde üretilmektedir.

2.3.1. Sabit hızlı sistemler

Sabit hızlı sistemlerde (SHS) generatör ana kaynak olan şebekeye direkt olarak bağlanmaktadır. Şekil 2.3.'te hiçbir güç elektroniği devresine ihtiyaç duyulmadan bir sincap kafesli asenkron generatör (SKAG) direkt olarak şebekeye bağlanmıştır. Şebeke frekansı ve generatör kutup sayısı rotorun senkron hız değerini belirlemektedir. Danimarka konsepti türbinler birkaç MW güce kadar direkt olarak şebekeye bağlanabilmektedir. Elde edilen gücün belirli limitler dahilinde tutulabilmesi için sabit hızlı sistemlerde devir sayılarını stabil tutabilmek amacıyla dinamik hız kontrol sistemleri, aktif dinamik hız kontrol sistemleri ve kanat açısı ile kontrol sistemleri kullanılmaktadır.



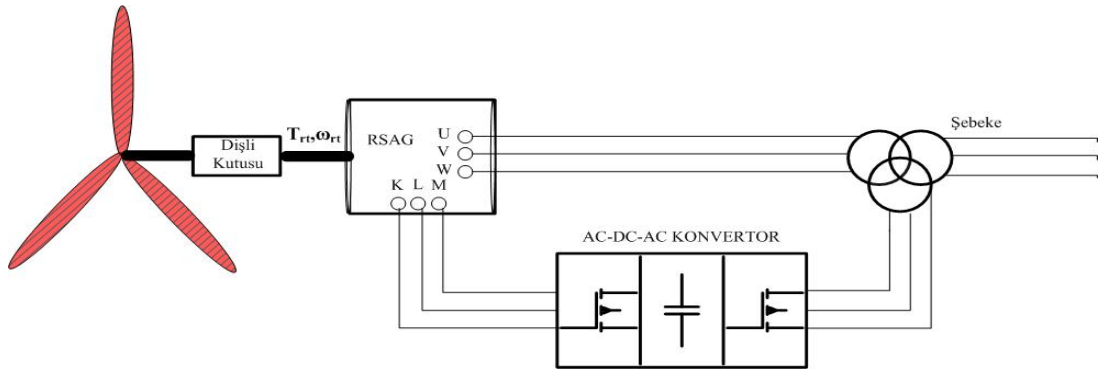
Şekil 2.3. Sincap kafesli asenkron generatörlü sistem

Asenkron generatör kullanan sistemlerin bir avantajı basit yapıda ve ucuz olmalarıdır. Buna ek olarak herhangi bir senkronizasyon sistemlerine ihtiyaç duymamalarıdır. Bu tür sistemler güvenilirlik ve maliyet yönünden daha fazla tercih edilmektedirler. Ancak çekilen aktif gücün kontrolünde (birkaç ms içerisinde) çok hızlı davranamamaktadırlar. Dezavantajları ele alınacak olursa; bir kaynağa ihtiyaç

duymaları, ilk çalışma akımlarının yüksek oluşu, kuvvetli rüzgâr sonucunda tork dalgalanması, dişli kutusundaki darbeler şebeke enerji kalitesini bozması ve en önemlisi şebekeden reaktif güçlerin çekilmesidir. Reaktif güç tüketimini azaltmak için kompanzasyon sistemlerine ihtiyaç duyulur. Bunun için sistemin çalışmasını izleyen bir röle ve kapasitör gurupları kullanılmaktadır. Asenkron generatörlerinin direkt şebeke bağlantılı olanlarında kısa zamanlı enerji kalitesinde geçici durumlar gözlenmektedir. Bunlar kalkınma anında çekilen yüksek akımların sebep olduğu şebekedeki bozulmalar ve sistem sürücü dizisinde yüksek tork gürültüleri oluşturur. Büyük güçlü SKAG'li sistemlerde özel önlemler alınmadığı takdirde kalkınma akımları generatör nominal akımından 5-7 kat yüksek olacağından bu sistemlerde kalkınma akımını sınırlamak amacıyla tristör kontrollü yumuşak anahtarlamalı başlatıcılar kullanılmaktadır. Tristör kontrollü akım sınırlayıcı (yumuşak anahtarlamalı başlatıcı) kalkınma akımını generatör anma akımının iki kat seviyelerinde sınırlamada etkin rol oynar [32].

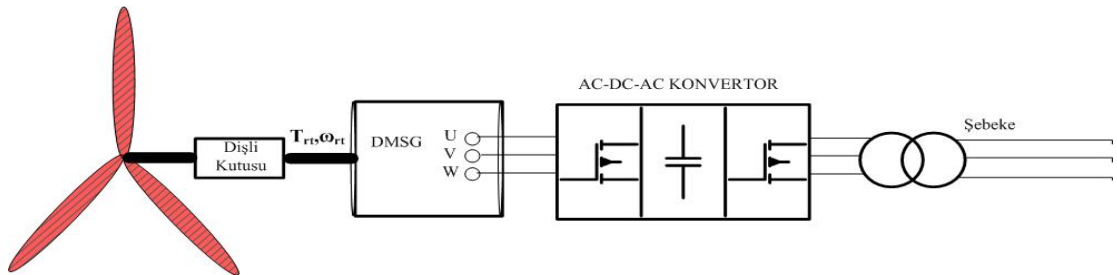
2.3.2. Değişken hızlı sistemler

Değişken hızlı sistemlerde (DHS), generatörlerin şebeke bağlantısı en az bir güç elektroniği devresi yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Rotor sargısı olmayan senkron ve asenkron generatörlerin stator sargıları toplam güç akışının kontrolünün yapıldığı tam donanımlı güç elektroniği devreleri üzerinden direkt olarak şebekeye bağlanırlar. Şekil 2.4.'te Rotoru sargılı asenkron generatörlerin (RSAG) statoru direkt olarak şebekeye bağlı iken rotoru güç elektroniği devresi üzerinden bağlanmaktadır. Bu sistemin şebeke ile iki noktadan bağlı olması nedeniyle çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) adını almıştır. Bu sistemin avantajı senkron altı ve üstü devirlerde rotor döner frekansı kontrol edilebildiğinden geniş bir aralık boyunca aktif olarak çalışabilmesidir.



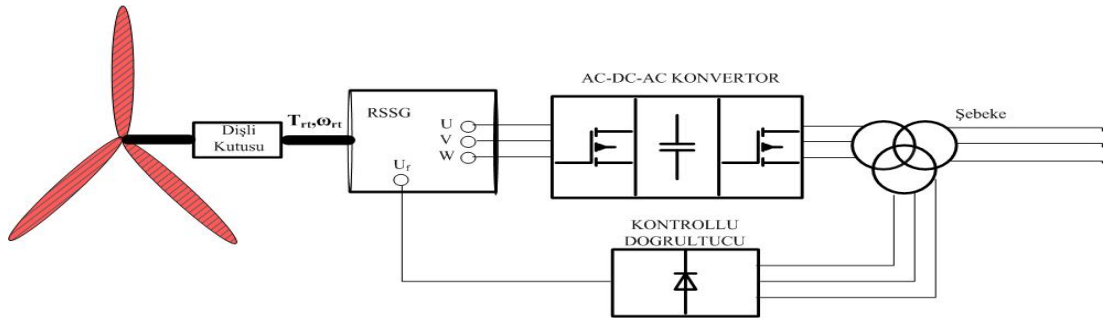
Şekil 2.4. Çift beslemeli asenkron generatörlü sistem.

İkinci DHS ise Şekil 2.5.'de gösterilen daimi mıknatıslı senkron generatörlü (DMSG) sistemdir. DMSG'de kalıcı mıknatısların kullanılması nedeniyle ayrıca bir uyarım devresine ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu sistem de her generatör devri için elektrik enerjisi üretimi söz konusu olup, üretilen enerji tam donanımlı bir güç konvertörü üzerinden şebeke gerilimi ve frekansına dönüşüm gerçekleştirilmektedir. Üretilen gücün bir kısmının güç elektroniği devresinden geçmesi bir dezavantaj olarak düşünülebilir. Genelde güç elektroniği devrelerinin gücü, generatör nominal gücünden daha düşük olacak şekilde tasarlanmaktadır.



Şekil 2.5. Daimi mıknatıslı senkron generatörlü sistem

Şekil 2.6'de rotor sargıları bulunan senkron generatörlü sistem gösterilmektedir. Bu sistemde DMSG'de daimi mıknatısların yaptığı görevi uyarım sargıları gerçekleştirmektedir. Uyarım akımı ve devir sayısı üretilen elektrik enerjisinin değerini etkilemektedir. Uyarım (alan) sargılarında kullanılmak üzere kontrollü bir doğrultucu ve stator sargılarında üretilen enerjinin şebeke değerlerine sabitlenmesi için tam donanımlı bir AC-DC-AC konvertör devresi kullanılmaktadır.



Şekil 2.6. Rotoru sargılı senkron generatörlü sistem.

2.4. Rüzgârdan Elde Edilen Gücün Matematik Modeli

Rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjiden elde edilebilecek mekanik enerji dönüşümünde en önemli bileşen kanatlar, kanatların bileşimi sonucu oluşan rotor görev almaktadır. Rüzgâr türbininden elde edilecek kinetik enerjinin hesaplanmasında, kanat uzunluğu (çapı) (R), kanat çapının bir tam tur dönmesiyle oluşan rotor süpürme alanı (A), havanın yoğunluğu (ρ), tepe uç hız oranı (λ) ve kanat açısı (β), türbin performans katsayısı ($C_p(\lambda, \beta)$), ve rüzgârın hızının (V) ifadeleri kullanılmaktadır. Büyük güçlü rüzgâr türbinleri 2-25 m/s rüzgâr hızı çalışma aralığında çalışabilmektedir. Bir rüzgâr türbininde üretilebilecek gücün maksimum olabilmesi için gerekli rüzgâr hızı günümüzde kullanılan türbinlerde 10 m/s civarındadır. 10 m/s üzerinde anma gücünde çalışabilmekle birlikte güvenlik nedeniyle 25-30 m/s hızın üzerinde türbinler kendini korumaya alacak şekilde tasarlanmaktadır [32].

Rüzgârdan elde edilen gücün matematiksel ifadeleri:

Kütle ve hıza bağlı kinetik enerji denklemi:

$$E = \frac{1}{2} . m . V^2 \quad (2.1)$$

Akışkan yoğunluğuna bağlı oluşan kinetik enerji denklemi:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad (2.2)$$

Denklem 2.'de ρ ifadesi akışkanın yoğunluğuna karşılık gelmektedir. Akışkanların belirli hız ile belirli bir alan içerisinde geçerken oluşturduğu enerji akış oranına ($A \cdot V$) ile doğru orantılıdır. Bu yüzden bir alan içerisinde geçen belirli bir V hızındaki rüzgârın güç denklemi:

$$P_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A V^3 \quad (2.3)$$

1 yıllık zaman aralığındaki ($0 - T_p$) rüzgâra ait ortalama enerji denklemi:

$$P_{ort} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \int_0^{T_p} V^3 dt \quad (2.4)$$

YERT'ye ait çıkış gücü ifadeleri [33]:

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot A}{2} \cdot V_r^3 \quad (2.5)$$

$$A = \pi \cdot R^2 \quad (2.6)$$

$$P_m = k_p \cdot C_p \cdot V_r^3 \quad (2.7)$$

Türbin performans katsayısı olan $C_p(\lambda, \beta)$ 'yi modellemek için oluşturulan genel denklem [33-34]:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \cdot \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \cdot \beta - c_4 \right) \cdot e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \cdot \lambda \quad (2.8)$$

Gerekli olan uç hız oranı denklemi:

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.9)$$

Türbin tasarımdan kullanılan $c_1 - c_6$ sabit katsayılar: $c_1 = 0.5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$ and $c_6 = 0.0068$.

$$\lambda = \frac{\omega_{rt} \cdot R}{V_r} \quad (2.10)$$

$$\omega_{rt} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{rt}}{60} \quad (2.11)$$

$$n_{gen} = \frac{120 \cdot f}{2p} \quad (2.12)$$

Tepe uç hız oranı denklemi:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{rt} \cdot R}{60 \cdot V_r} \quad (2.13)$$

Dişli kutusu kullanılmayan rüzgâr türbinlerinde hızlar:

$$n_{gen} = n_{rt} \quad (2.15)$$

3. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖRLER VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ DEVRELERİ

Bu bölümde rüzgâr türbinlerinde mekanik-elektrik enerji dönüşümünün gerçekleştiği kısmı oluşturan generatörler ve elektrik-elektrik enerjisinin dönüşümünde kullanılan güç elektroniği devreleri ele alınmaktadır.

Elektrik enerjisini üretebilmek için temel olarak iletken, manyetik alan ve harekete ihtiyaç duyulmaktadır. Manyetik alan, iletkenlere uyarım akımı uygulanması sonucu oluşmaktadır. Hareket ise harici bir mekanik sistem tarafından uygulanmaktadır. İletken, manyetik alan ve hareketin bir bütün olarak kullanılarak elektrik enerjisinin üretildiği sisteme generatör denilmektedir. Rüzgâr türbini sistemleri ile enerji üretiminde asenkron ve senkron generatörler yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.1. 3-Fazlı Asenkron Makinalar

3 fazlı asenkron makinalar adını senkron hızda çalışamamalarından almaktadırlar. Senkron altı hızda çalışmaları durumunda motor, senkron üstü hızda çalışmaları durumunda generatör görevi görürler. Motor olarak çalışmaları durumunda üretilen tork pozitif, generatör olarak çalışmalarında ise tork negatiftir. Aynı ebatlardaki bir senkron makina ya da doğru akım makinasına göre daha az maliyetlidirler. Endüstride sık kullanılmaktadırlar. Motor olarak çalışmaları durumunda daha az bakım maliyeti gerektirirler. Ancak hızlarının kontrolü kolay olmamaktadır. İlk kalkınma anında nominal çalışma akımlarının 5-7 katı akım çekerler. Ayrıca yükü arttıkça çalışma anında senkron devir ile çalışma devri arasındaki fark (kayma) ve çekilen reaktif gücün doğru orantılı olarak artması dezavantajları arasında sayılabilir [35-36].

3.1.1. 3-Fazlı asenkron makinaların yapısı

Asenkron generatörler sabit bir stator ve döner bir rotora sahiptir. Stator oluklardan oluşan bir manyetik nüve, oyuklara yerleştirilmiş sargılar, bunları koruyan bir metal

gövde ve bağlantı terminaline sahiptir. Gövdenin tam merkezinde bulunan yatakta rulman ve kapaklara sabitlenmiş rotor, soğutma amaçlı rotora akuple bağlı bir fan bulunmaktadır. Stator sargıları vernikle izole edilmiş bakır ya da alüminyum iletkenlerden oluşmaktadır. P kutuplu bir asenkron makinanın stator sargıları $(2/P) \cdot (2\pi/3)$ radyan derece ile oyuklara yerleştirilir. Bağlantıları ise terminal üzerinde yıldız ya da üçgen şeklinde gerçekleştirilmektedir [37]. Resim 3.1’de 3-Fazlı Sincap kafesli bir asenkron makina ait resim görülmektedir.



Resim 3.1. 3 Fazlı 4 kW sincap kafesli bir asenkron makina.

Asenkron makinalar rotor yapısına göre iki guruba ayrılmaktadır. Rotora ait demir silindirik nüve üzerinde ince kısa devre iletken çubukları bulunduran ASM'lere kısa devre rotorlu ya da sincap kafesli asenkron makinalar (SKASM) denilmektedir.

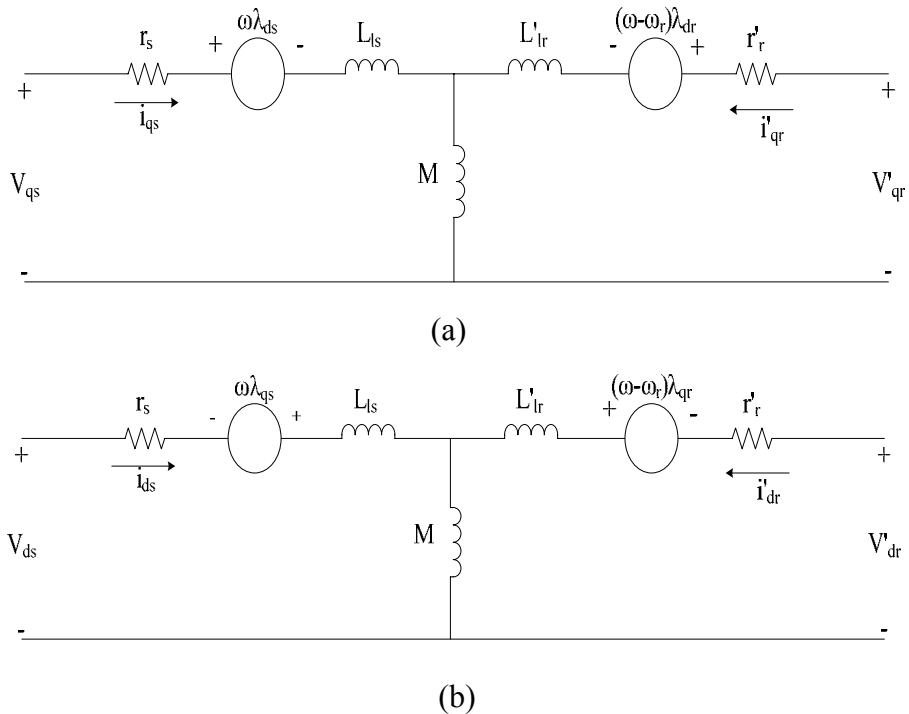
Rotoru üzerinde statora benzer oluklar ve sargılar bulunduran ASM'lere ise rotoru sargılı asenkron makinalar (RSASM) denilmektedir. RSASM'lerde sargılar statora benzer şekilde dağıtılmış olarak sarılıp yerleştirilmiştir. Rotor sargı uçları rotorun döner bir kısım olması nedeniyle bilezik ve fırçalar yardımıyla stator üzerindeki terminale iletilmektedir. Bilezik ve fırçalar milden yalıtılmış halde montaj edilir. Hız kontrolleri rotor sargılarına direnç bağlanarak ya da özel motor sürücüleri ile gerçekleştirilir. Günümüz rüzgâr türbini sistemlerinde SKASM'ler ve RSASM'ler yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.1.2. 3-Fazlı asenkron makinanın dq -eksen gerilim eşitlikleri

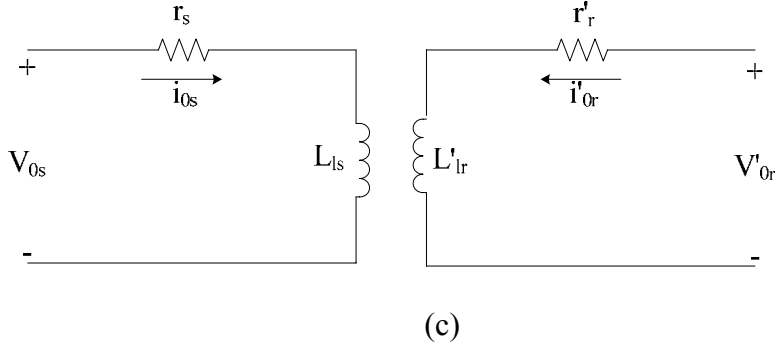
Günümüzde ASM'lerin çalışma analizi ve simülasyonlarında bilgisayar paket programlarından sıkça faydalanılmaktadır. Bu programlar üzerinde makineyi birebir modellemek için matematiksel ifadelerle başvurulmaktadır. 3 fazlı bir ASM'yi modellemek için Şekil 3.1'de gösterilen makinanın 2 faz eşdeğer devresi üzerinden her bir faz için farklı simgeler kullanılarak modelinin oluşturulması mümkündür.

3 fazlı makinaların bilgisayar ortamında modellenebilmesini kolaylaştırmak amacıyla iki faz eşdeğer devre eşitlikleri kullanılmaktadır. Bu eşitliklere iki açılı düzlem (dq eksen) eşitlikleri de denilmektedir. Bu düzlemde rotor parametreleri stator parametrelerine indirgenerek yazılmaktadır.

3 fazlı asenkron makinanın iki açılı düzlem gerilim eşitlikleri ve eşitliklere ait devre şemaları [38-39]:



Şekil 3.1. 3 Fazlı asenkron makinanın $qd0$ eşdeğer devre şemaları a) q -eksen, b) d -eksen, c) 0 -eksen



Şekil 3.1. (Devamı) 3 Fazlı asenkron makinanın *qd0* eşdeğer devre şemaları a) *q*-eksen, b) *d*-eksen, c) 0-eksen

Burada; V_{qs}, V_{ds}, V_{0s} stator *qd0*-eksen gerilimleri, V_{qr}, V_{dr}, V_{0r} rotor *qd0*-eksen gerilimleri, i_{qs}, i_{ds}, i_{0s} *qd0*-eksen stator akımları, i_{qr}, i_{dr}, i_{0r} *qd0*-eksen rotor akımları, $\lambda_{qs}, \lambda_{ds}, \lambda_{0s}$ *qd0*-eksen stator manyetik akıları, $\lambda_{qr}, \lambda_{dr}, \lambda_{0r}$ *qd0*-eksen rotor manyetik akıları, r_s statora sargı direnci, L_{ls} stator kaçak endüktansı, r'_r statora aktarılmış rotor direnci, L'_{lr} statora aktarılmış rotor kaçak endüktansı, M ortak endüktansı, ω senkron açısal frekansı, ω_r rotor açısal frekansını ifade etmektedir.

Asenkron makinaya ait gerilim eşitlikleri:

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} \quad (3.1)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \quad (3.2)$$

$$V_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{d}{dt} \lambda_{0s} \quad (3.3)$$

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda'_{qr} \quad (3.4)$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} - (w - w_r) \lambda'_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda'_{dr} \quad (3.5)$$

$$V'_{0r} = r'_r i'_{0r} + \frac{d}{dt} \lambda'_{0r} \quad (3.6)$$

$$V_{qd0s} = r_s i_{qd0s} + \omega \lambda_{dqs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qd0s} \quad (3.7)$$

$$V'_{qd0r} = r'_r i'_{qd0r} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dqs} + \frac{d}{dt} \lambda'_{qd0r} \quad (3.8)$$

$$M = \frac{3}{2} L_{ms} \quad (3.9)$$

Denklem 3.9'da L_{ms} stator rotor arası endüktansı ifade etmektedir.

Devir sayısı ile açısal frekans hesaplanacak olursa:

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (3.10)$$

Denklem 3.10'da f şebeke frekansını, n döner devir sayısını, ω açısal frekansı, p toplam kutup sayısını ifade etmektedir.

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad (3.11)$$

Denklem 3.11'deki ω açısal frekansı yeniden yazılacak olursa:

$$\omega = \frac{\frac{2\pi \cdot 120 \cdot f}{p}}{60} = \frac{4\pi \cdot f}{p} \quad (3.12)$$

$$\lambda = L.i \quad (3.13)$$

Denklem 3.13'te λ Manyetik akıyı ifade etmektedir.

$$(\lambda_{dqs})^T = [\lambda_{ds} - \lambda_{qs} \ 0] \quad (3.14)$$

$$(\lambda'_{dqr})^T = [\lambda'_{dr} - \lambda'_{qr} \ 0] \quad (3.15)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + M(i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.16)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + M(i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.17)$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls} i_{0s} \quad (3.18)$$

$$\lambda'_{qr} = L'_{lr} i'_{qr} + M(i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.19)$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{lr} i'_{dr} + M(i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.20)$$

$$\lambda'_{0r} = L'_{lr} i'_{0r} \quad (3.21)$$

Denklem 3.16-3.18'de $\lambda_{qs}, \lambda_{ds}, \lambda_{0s}$ *qd0-eksen* stator manyetik akıları, denklem 3.19-3.21'de $\lambda'_{qr}, \lambda'_{dr}, \lambda'_{0r}$ *qd0-eksen* rotor manyetik akılarıdır.

Denklem 3.1 yeniden düzenlenerek yazılacak olursa;

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{w}{w_b} \psi_{ds} + \frac{p}{w_b} \psi_{qs} \quad (3.22)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{w}{w_b} \psi_{ds} + \frac{p}{w_b} \psi_{ds} \quad (3.23)$$

$$V_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{p}{w_b} \psi_{0s} \quad (3.24)$$

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + \left(\frac{w - w_r}{w_b} \right) \psi'_{dr} + \frac{p}{w_b} \psi'_{qr} \quad (3.25)$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} - \left(\frac{w - w_r}{w_b} \right) \psi'_{qr} + \frac{p}{w_b} \psi'_{dr} \quad (3.26)$$

$$V'_{0r} = r'_r i'_{0r} + \frac{p}{w_b} \psi'_{0r} \quad (3.27)$$

$$\psi_{qs} = X_{ls} i_{qs} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.28)$$

$$\psi_{ds} = X_{ls} i_{ds} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.29)$$

$$\psi_{0s} = X_{ls} i_{0s} \quad (3.30)$$

$$\psi'_{qr} = X'_{lr} i'_{qr} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.31)$$

$$\psi'_{dr} = X'_{lr} i'_{dr} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.32)$$

$$\psi'_{0r} = X'_{lr} i'_{0r} \quad (3.33)$$

$$X_M = 2\pi \cdot f \cdot M \quad (3.34)$$

$$p = \frac{d}{dt} \quad (3.35)$$

Denklem 3.35'te p türev operatörünü ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{0s} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \\ V_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{p}{w_b} X_{ss} & \frac{w}{w_b} & 0 & \frac{p}{w_b} X_M & \frac{w}{w_b} X_M & 0 \\ -\frac{w}{w_b} X_{ss} & r_s + \frac{p}{w_b} X_{ss} & 0 & -\frac{w}{w_b} X_M & \frac{p}{w_b} X_M & 0 \\ 0 & 0 & r_s + \frac{p}{w_b} X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{p}{w_b} X_M & \left(\frac{w-w_r}{w_b} \right) X_M & 0 & r'_r + \frac{p}{w_b} X'_{rr} & \left(\frac{w-w_r}{w_b} \right) X'_{rr} & 0 \\ -\left(\frac{w-w_r}{w_b} \right) X_M & \frac{p}{w_b} X_M & 0 & -\left(\frac{w-w_r}{w_b} \right) X'_{rr} & r'_r + \frac{p}{w_b} X'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r'_r + \frac{p}{w_b} X'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Denklem 3.36'da asenkron makinanın iki açılı düzlemdeki gerilim eşitlikleri matrisel formda düzenlenerek yazılmıştır.

3.1.3. 3-Fazlı asenkron makinanın dq -eksen tork eşitlikleri

3 fazlı asenkron makinanın 2 açılı düzlemde tork eşitliği denklem 3.27'de gösterilmektedir.

$$Te = \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{P}{2} \right) M (i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}) \quad (3.37)$$

3.2. 3-Fazlı Senkron Makinalar

Rotor döner devir sayısı senkron döner devir sayısına eşit olan makinalara senkron makinalar (SM) denilmektedir. SM'lerin üretim maliyeti ASM'lere göre daha pahalıdır. Yüksek güç seviyelerinde yüksek verimlilikte çalışmaları avantaj olarak düşünülebilir. 3 fazlı SM'ler endüstride generatör ve motor olarak kullanılmaktadır. Kutup yapılarına göre çıkık kutuplu ve silindirik kutuplu senkron makinalar olmak üzere 2 türde üretilmektedirler.

3.2.1. 3-Fazlı senkron makinaların yapısı

SM'nin stator yapısında, sıkıştırılarak birleştirilmiş saçlardan oluşan ferromanyetik bir nüve, nüve üzerinde oluklar ve oluklar içerisinde fazlara ait dağıtılmış sargılar bulunmaktadır. Stator merkezinde rotora ait yatak, yatak içerisinde rulman ve kapaklarla sabitlenmiş daimi mıknatıslardan ya da sargılardan oluşan rotor bulunmaktadır. SM'lerin döner devir sayısı, kutup sayısı ve frekans ile orantılıdır. Resim 3.2'de senkron makinaya ait resim gösterilmektedir.



Resim 3.2. 3 Fazlı 1 kW rotorlu sargılı senkron makina.

Rotora ait senkron devir sayısı:

$$n = \frac{120 \cdot f}{2p} \quad (3.38)$$

Rotor kutup tasarımına göre senkron makinalar çıkık kutuplu SM ve silindirik kutuplu SM olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Çıkık kutuplu makinalar düşük devir sayılarında çalışabilmesi için çok kutuplu olarak tasarlanmaktadır. Hidroelektrik santrallerinde düşük türbin devir sayısı ile elektrik üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

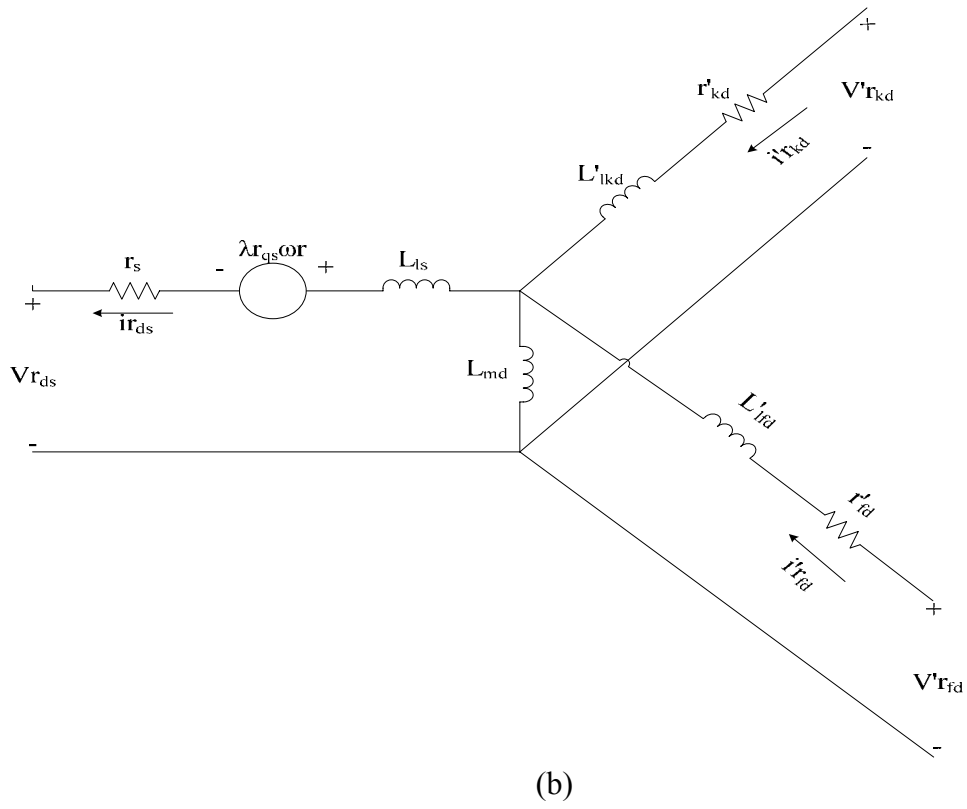
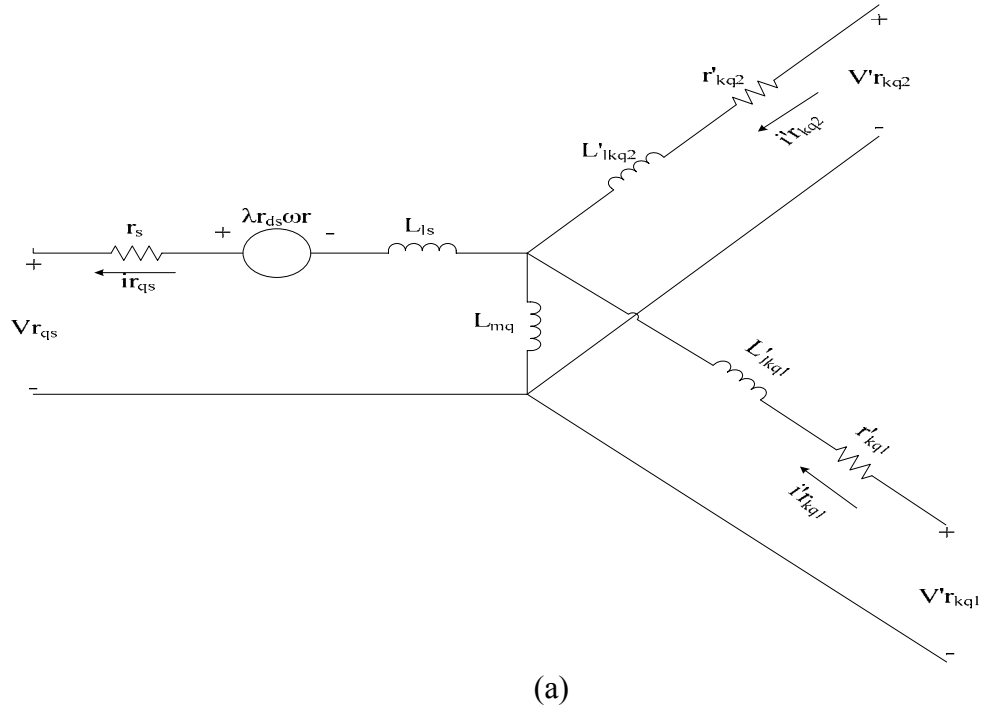
Temel olarak SM'ler rotoru sargılı senkron makina (RSSM) ve daimi mıknatıslı senkron makina (DMSM) olmak üzere 2 genel tipte tasarlanmaktadır.

RSSM'ler genel olarak iki farklı prensipte çalışmaktadırlar. Çoğunlukla elektrik üretiminde kullanılan makinalarda manyetik alan oluşturmak için uygulanan uyartım akımı rotora uygulanmaktadır. Bu prensipten farklı olarak uyartım akımının statora uygulanarak üretilen elektriğin bilezik ve fırçalar yardımıyla rotordan alınması prensibinde çalışanları da mevcuttur.

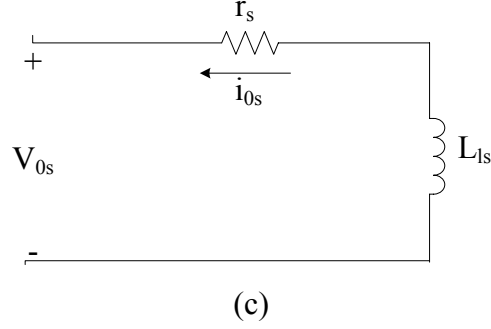
3.2.2. 3-Fazlı alan sargılı senkron makina *dq-eksen* gerilim eşitlikleri

Senkron makinalar rotor devir sayılarında kayma söz konusu olmadığı için ASM'lere göre modellenmesi daha kolaydır. Bilgisayar ortamında matematik modellerinin oluşturulması ve simülasyonlarında ASM'lerde olduğu gibi 2 fazlı eşdeğer devre modeli kullanılmaktadır. 3 fazlı bir SM'yi modellemek için Şekil 3.4'te gösterilen makinanın 2 açılı düzlemde yazılan matematik denklemlerinden yola çıkılarak makinanın Matlab/Simulink modeli oluşturulmuştur.

3 fazlı senkron makinanın iki açılı düzlem gerilim eşitlikleri ve eşitliklere ait devre şemaları [38-39]:



Şekil 3.2. 3 Fazlı Senkron makinanın $qd0$ eşdeğer devre şemaları a) q -eksen, b) d -eksen, c) 0 -eksen [38]



Şekil 3.2. (Devam) 3 Fazlı Senkron makinanın $qd0$ eşdeğer devre şemaları a) q -eksen, b) d -eksen, c) 0 -eksen [38]

Şekil 3.2’de V_{qs}, V_{ds}, V_{0s} stator $qd0$ -eksen gerilimleri, V_{qr}, V_{dr}, V_{0r} rotor $qd0$ -eksen gerilimleri, i_{qs}, i_{ds}, i_{0s} $qd0$ -eksen stator akımları, i_{qr}, i_{dr}, i_{0r} $qd0$ -eksen rotor akımları, r_s statora sargı direnci, l_s stator kaçak endüktansı, r'_r statora aktarılmış rotor direnci, l'_{lr} statora aktarılmış rotor kaçak endüktansı, M ortak endüktansı, ω senkron açısal frekansı, ω_r rotor açısal frekansını ifade etmektedir. L_{mq}, L_{md} dq -eksen ortak (mıknatıslanma) endüktansları, L'_{lkq1}, L'_{lkq2} q -eksen rotor kaçak endüktansları, L'_{lfd}, L'_{lkd} d -eksen alan sargısı kaçak endüktansları, r'_{kq1}, r'_{kq2} q -eksen rotor dirençleri, r'_{fd}, r'_{kd} d -eksen alan sargısı dirençlerini ifade etmektedir.

Senkron makinaaya ait eşitlikler yazılacak olursa:

$$V_{qd0s} = -r_s i_{qd0s} + \omega \lambda_{dqs} + p \lambda_{qd0s} \quad (3.39)$$

Denklem 3.39’da statora ait gerilim eşitlikleri verilmektedir.

$$(\lambda_{dqs})^T = [\lambda_{ds} - \lambda_{qs} \ 0] \quad (3.40)$$

$$V'^r_{qdr} = r'_r i'^r_{qdr} + p \lambda'^r_{qdr} \quad (3.41)$$

Denklem 3.41’de rotora ait gerilim eşitlikleri verilmektedir.

$$V_{qs}^r = -r_s i_{qs}^r + \omega_r \lambda_{ds}^r + p \lambda_{qs}^r \quad (3.42)$$

$$V_{ds}^r = -r_s i_{ds}^r - \omega_r \lambda_{qs}^r + p \lambda_{ds}^r \quad (3.43)$$

$$V_{0s} = -r_s i_{0s} + p \lambda_{0s} \quad (3.44)$$

Denklem 3.39'un genişletilmiş hali denklem 3.42-3.44'te ifade edilmektedir.

$$V_{kq1}^{r'} = r_{kq1}' i_{kq1}^{r'} + p \lambda_{kq1}^{r'} \quad (3.45)$$

$$V_{kq2}^{r'} = r_{kq2}' i_{kq2}^{r'} + p \lambda_{kq2}^{r'} \quad (3.46)$$

$$V_{fd}^{r'} = r_{fd}' i_{fd}^{r'} + p \lambda_{fd}^{r'} \quad (3.47)$$

$$V_{kd}^{r'} = r_{kd}' i_{kd}^{r'} + p \lambda_{kd}^{r'} \quad (3.48)$$

$$\lambda_{qs}^r = -L_{ls} i_{qs}^r + L_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^{r'} + i_{kq2}^{r'}) \quad (3.49)$$

$$\lambda_{ds}^r = -L_{ls} i_{ds}^r + L_{md} (-i_{ds}^r + i_{kd}^{r'} + i_{fd}^{r'}) \quad (3.50)$$

$$\lambda_{0s} = -L_{ls} i_{0s} \quad (3.51)$$

Denklem 3.49-3.51'de *qd0-eksen* manyetik akı eşitlikleri ifade edilmektedir.

$$\lambda_{kq1}^{r'} = L_{lkq1}' i_{kq1}^{r'} + L_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^{r'} + i_{kq2}^{r'}) \quad (3.52)$$

$$\lambda_{kq2}^{r'} = L_{lkq2}' i_{kq2}^{r'} + L_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^{r'} + i_{kq2}^{r'}) \quad (3.53)$$

$$\lambda_{fd}^{rr} = L'_{lfd} i_{fd}^{rr} + L_{md} \left(-i_{ds}^{rr} + i_{fd}^{rr} + i_{kd}^{rr} \right) \quad (3.54)$$

$$\lambda_{kd}^{rr} = L'_{lkd} i_{kd}^{rr} + L_{md} \left(-i_{ds}^{rr} + i_{fd}^{rr} + i_{kd}^{rr} \right) \quad (3.55)$$

Denklem 3.52-3.55'te damper ve alan sargıları manyetik akı eşitlikleri verilmektedir.

$$V_{qs}^r = -r_s i_{qs}^r + \frac{w_r}{w_b} \psi_{ds}^r + \frac{p}{w_b} \psi_{qs}^r \quad (3.56)$$

$$V_{ds}^r = -r_s i_{ds}^r - \frac{w_r}{w_b} \psi_{qs}^r + \frac{p}{w_b} \psi_{ds}^r \quad (3.57)$$

$$V_{os} = -r_s i_{os} + \frac{p}{w_b} \psi_{os} \quad (3.58)$$

Denklem 3.56-3.58'de statora ait gerilim eşitlikleri verilmektedir.

$$V_{kq1}^{rr} = r'_{kq1} i_{kq1}^{rr} + \frac{p}{w_b} \psi_{kq1}^{rr} \quad (3.59)$$

$$V_{kq2}^{rr} = r'_{kq2} i_{kq2}^{rr} + \frac{p}{w_b} \psi_{kq2}^{rr} \quad (3.60)$$

$$V_{fd}^{rr} = r'_{fd} i_{fd}^{rr} + \frac{p}{w_b} \psi_{fd}^{rr} \quad (3.61)$$

$$V_{kd}^{rr} = r'_{kd} i_{kd}^{rr} + \frac{p}{w_b} \psi_{kd}^{rr} \quad (3.62)$$

Denklem 3.59-3.62'de damper ve alan sargılarına ait gerilim eşitlikleri verilmektedir.

$$\psi_{qs}^r = -X_{ls} i_{qs}^r + X_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^{rr} + i_{kq2}^{rr}) \quad (3.63)$$

$$\psi_{ds}^r = -X_{ls} i_{ds}^r + X_{md} (-i_{ds}^r + i_{fd}^{rr} + i_{kd}^{rr}) \quad (3.64)$$

$$\psi_{0s} = -X_{ls} i_{0s} \quad (3.65)$$

Denklem 3.63-3.65'te stator sargılarına ait manyetik akı eşitlikleri verilmektedir.

$$\psi_{kq1}^{rr} = -X'_{lkq1} i_{kq1}^{rr} + X_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^{rr} + i_{kq2}^{rr}) \quad (3.66)$$

$$\psi_{kq2}^{rr} = -X'_{lkq2} i_{kq2}^{rr} + X_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^{rr} + i_{kq2}^{rr}) \quad (3.67)$$

$$\psi_{fd}^{rr} = -X'_{lfd} i_{fd}^{rr} + X_{md} (-i_{ds}^r + i_{fd}^{rr} + i_{kd}^{rr}) \quad (3.68)$$

$$\psi_{kd}^{rr} = -X'_{lkd} i_{kd}^{rr} + X_{md} (-i_{ds}^r + i_{fd}^{rr} + i_{kd}^{rr}) \quad (3.69)$$

Denklem 3.66-3.69'da rotora ait manyetik akı eşitlikleri ifade edilmektedir.

$$e_{xfd}^{rr} = V_{fd}^{rr} \frac{X_{md}}{r'_{fd}} \quad (3.70)$$

$$e_{xfd}^{rr} = \frac{X_{md}}{r'_{fd}} \left(r'_{fd} i_{fd}^{rr} + \frac{p}{w_b} \psi_{fd}^{rr} \right) \quad (3.71)$$

Denklem 3.70-3.71'de uyartım gerilimine ait eşitlik verilmektedir.

$$X_q = X_{ls} + X_{mq} \quad (3.72)$$

$$X_d = X_{ls} + X_{md} \quad (3.73)$$

Denklem 3.72-3.73'te *dq*-eksen endüktif reaktans eşitlikleri verilmektedir.

$$X'_{kq1} = X'_{lkq1} + X_{mq} \quad (3.74)$$

$$X'_{kq2} = X'_{lkq2} + X_{mq} \quad (3.75)$$

$$X'_{fd} = X'_{lfd} + X_{md} \quad (3.76)$$

$$X'_{kd} = X'_{lkd} + X_{md} \quad (3.77)$$

Denklem 3.74-3.77'de damper ve alan sargılarının endüktif reaktanslarına ait eşitlikler verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^r \\ V_{ds}^r \\ V_{0s} \\ V_{kd}^r \\ V_{kq}^r \\ e_{xkd}^r \\ V_{kd}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s \frac{p}{w_b} X_q & -\frac{w}{w_r} X_d & 0 & \frac{p}{w_b} X_{mq} & \frac{p}{w_b} X_{mq} & \frac{w_r}{w_b} X_{md} & \frac{w_r}{w_b} X_{md} \\ \frac{w_r}{w_b} X_q & -r_s \frac{p}{w_b} X_d & 0 & -\frac{w_r}{w_b} X_{mq} & -\frac{w_r}{w_b} X_{mq} & \frac{p}{w_b} X_{md} & \frac{p}{w_b} X_{md} \\ 0 & 0 & -rs \frac{p}{w_b} X_{ls} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{p}{w_b} X_{mq} & 0 & 0 & r'_{kd} + \frac{p}{w_b} X_{kd} & \frac{p}{w_b} X_{mq} & 0 & 0 \\ -\frac{p}{w_b} X_{mq} & 0 & 0 & \frac{p}{w_b} X_{mq} & r'_{kq} + \frac{p}{w_b} X_{kq} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{X_{md}}{r'_{fd}} \left(\frac{p}{w_b} X_{md} \right) & 0 & 0 & 0 & \frac{X_{md}}{r'_{fd}} \left(r'_{fd} + \frac{p}{w_b} X_{fd} \right) & \frac{X_{md}}{r'_{fd}} \left(\frac{p}{w_b} X_{md} \right) \\ 0 & -\frac{p}{w_b} X_{md} & 0 & 0 & 0 & \frac{p}{w_b} X_{md} & r'_{kd} + \frac{p}{w_b} X_{kd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^r \\ i_{ds}^r \\ i_{0s} \\ i_{kd}^r \\ i_{kq}^r \\ i_{xkd}^r \\ i_{kd}^r \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

Denklem 3.78'de rotorlu sargılı senkron makinanın iki açılı düzlemdeki gerilim eşitlikleri matrisel formda düzenlenerek yazılmıştır.

3.2.3. 3-Fazlı senkron makina *dq*-eksen tork eşitlikleri

3 Fazlı rotoru sargılı bir senkron makinaya ait tork eşitliği:

$$Te = \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{p}{2} \right) \left[L_{md} \left(-i_{ds}^r + i_{fd}^{rr} + i_{kd}^{rr} \right) i_{qs}^r - L_{mq} \left(-i_{qs}^r + i_{kq1}^{rr} + i_{kq2}^{rr} \right) i_{ds}^r \right] \quad (3.79)$$

Denklem 3.79’da p makinaya çift kutup sayısını, L_{md}, L_{mq} *dq*-eksen ortak endüktansları i_{ds}^r, i_{qs}^r *dq*-eksen akımları, i_{fd}^{rr}, i_{kd}^{rr} alan sargı akımlarını, $i_{kq1}^{rr}, i_{kq2}^{rr}$ damper sargı akımlarını ifade etmektedir.

3.2.4. 3-Fazlı daimi mıknatıslı senkron makina *dq*-eksen gerilim eşitlikleri

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} \left(-R_s i_d + \omega_e L_q i_q + u_d \right) \quad (3.80)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} \left(-R_s i_q - (\omega_e L_d i_d - \lambda_0) + u_q \right) \quad (3.81)$$

Denklem 3.80-81’de, L_d, L_q *dq*-eksen endüktansı, R_s stator direnci; i_d, i_q *dq*-eksen akımı; ω_e generatör açısal hızı, λ_0 ise sabit mıknatıs akısını ifade etmektedir.

3.2.5. 3-Fazlı daimi mıknatıslı senkron makine *dq*-eksen tork eşitlikleri

DMSG’ye ait *dq*-eksen tork eşitliği denklem 3.82’de verilmektedir.

$$Te = \frac{3}{2} p \left((L_d - L_q) i_d i_q + i_q \lambda_0 \right) \quad (3.82)$$

Denklem 3.82’de Te elektromekanik torku; p ise kutup sayısını ifade etmektedir. Denklemler MATLAB/Simulink ortamında düzenlenerek DMSG modeli elde

edilmiştir.

3.3. Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Güç Elektroniği Devreleri

Rüzgâr türbini sistemlerinde, rüzgârın zamana göre değişken bir enerji kaynağı olduğu düşünüldüğünde çıkış gücünün optimal sabitede kalabilmesi için kontrol sistemlerinin kullanımı gerekmektedir. Kontrol sistemleri mekanik, hidrolik ve elektronik olarak tasarlanabilmektedir. Rüzgâr hızının değişken olması, üretilmek istenen elektrik enerjisinin de değişken güçlerde üretilmesi anlamına gelmektedir. Bundan dolayı rüzgâr türbinlerinde üretilmek istenen enerjinin uygun değerlerde tutulabilmesi için sürekli gelişmekte olan güç elektroniği devrelerinden faydalanılmaktadır.

3.3.1. Güç elektroniği tanımı

Genel anlamda güç elektroniği terimi; bir kaynaktan beslenen kritik yüke giden elektrik enerjisinin kontrolü ve kontrolünde kullanılan elektronik elemanların tümünün sistematik birleşimi şeklinde ifade edilebilir. Kaynak olarak bir doğru akım (DA) ya da alternatif akım (AA) üretici kullanılırken alıcı olarak omik, endüktif ve kapasitif yüklerin kullanıldığı bilinmektedir. Kaynak ile yük arası elektrik enerjisinin kalitesi, akımı, gerilimi, güç katsayısı, frekans, harmonik vb. değerlerini istenilen seviyede tutmak için güç elektroniği devrelerinden faydalanılmaktadır. Güç elektroniği değişik gerilim, akım ve frekans değerlerinde anahtarlama yapabilen tristör (SCR), triyak, IGBT, mosfet, GTO vb. anahtarlama elemanları ve bunların sürücüsü olarak adlandırılan kontrol devrelerinden oluşmaktadır.

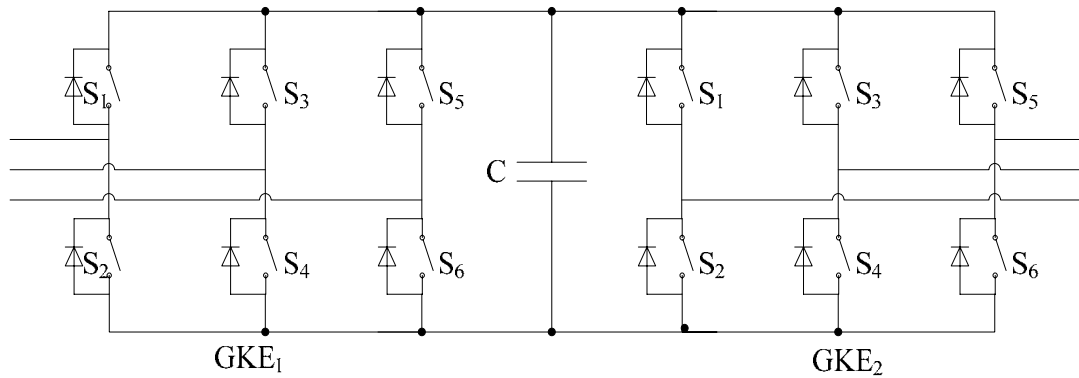
3.3.2. Güç elektroniği devreleri

Güç elektroniğinde temel olarak alternatif akımı (AA) doğru akıma (DA) çeviren doğrultmaç devreleri, DA-DA konvertörler ve DA-AA evirici (konvertör) devreleri kullanılmaktadır. Rüzgâr türbinlerinde üretilen elektriğin kontrolü ve istenilen değerlere dönüştürülebilmesi amacıyla bu güç konvertörlerinden faydalanılmaktadır.

Rüzgâr türbin topolojilerinde kullanılan güç elektroniği devreleri incelendiğinde, sabit hızlı sistemlerde sincap kafesli asenkron generatörler direkt olarak şebekeye bağlanabilirken değişken hızlı sistemlerde ise rotoru sargılı asenkron generatör ile senkron generatör giriş çıkış değerlerini ayarlamak amacıyla tam donanımlı güç konvertörleri kullanılmaktadır.

3.3.3. Gerilim kontrollü eviriciler

Rüzgâr türbini sistemlerinde elektrik enerjisi güç, frekans ve gerilim dönüşümlerinde doğrultmaç devreleri ve gerilim kontrollü eviricilerden (GKE) faydalanılmaktadır. Bir doğrultucu ve bir eviriciyi sembolize eden devre şeması Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Doğrultucu ve gerilim kontrollü evirici devre şeması

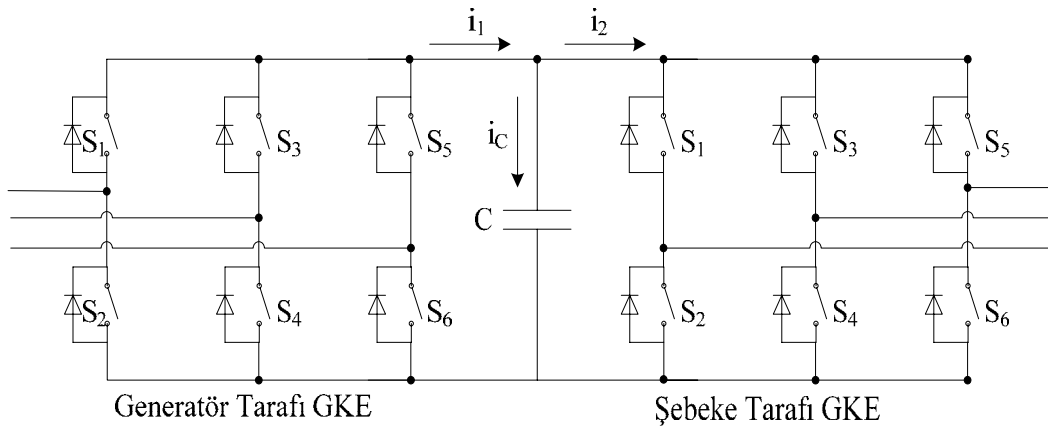
Şekilde gösterilen dönüştürücüde AA-DA ve DA-AA dönüşümü çift taraflı olarak yapılabilmektedir. Burada dönüştürücü hem doğrultucu hem de evirici görevi görebilmektedir. Yani çift yönlü bir güç akışı olduğu söylenebilir.

Gerilim kontrollü dönüştürücülerde bulunan anahtarlama elemanlarının kontrolü birkaç farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bunlar; altı-adımlı, darbe genlik modülasyonu (DAM) ve darbe genişlik modülasyonu (DGM) olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca darbe genişlik modülasyonlu GKE'lerin tasarımı

harmonik bastırma (HB), sinüsoidal DGM (SDGM) ve uzay vektör DGM (UVDGM) modülasyon metodları ile gerçekleştirilmektedir [40].

Bir GKE'nin Simulinkte modellemeyi önce bir DA baranın modellenmesi gerçekleştirilmek istendiğinde; kondansatör bağlı bir DA bara için matematiksel ifade:

$$V_{DC} = \frac{1}{C} \int i_C dt \quad (3.83)$$



Şekil 3.4. Çift taraflı çalışabilen 2 GKE şeması

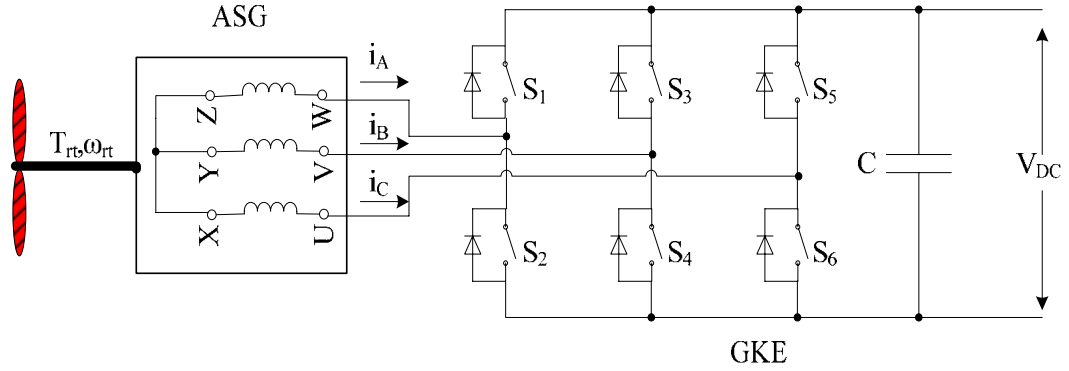
Şekil 3.4'de gösterilen çift taraflı çalışan iki GKE'de DC bara gerilimleri tekrar yazılmak istendiğinde;

$$V_{DC} = \frac{1}{C} \int (i_1 - i_2) dt \quad (3.84)$$

Denklem 3.84'te bara geriliminin, doğrultmaç tarafı akımı ve evirici tarafı akımı ile bağıntılı olduğu görülmektedir.

3.3.4. Yıldız bağlı bir generatöre bağlı GKE çıkışı DA bara gerilim eşitlikleri

Yıldız bağlı ve GKE ile birlikte kullanılan bir SKAG yada RSAG için eşdeğer devre şeklinde görülmektedir.



Şekil 3.5. Gerilim kontrollü eviricili yıldız bağlı asenkron generatör

Şekil 3.5’de gösterilen generatör bağlantı terminalinden alınan gerilimlerin DA bara gerilimine bağlı gerilim eşitlikleri ve anahtarlama fonksiyonları Denklem 3.85’te verilmektedir [40].

$$\begin{bmatrix} V_{UX} \\ V_{VY} \\ V_{WZ} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{DC} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{1-2} \\ S_{3-4} \\ S_{5-6} \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

DA bara akımları giriş akımları ve anahtarlama fonksiyonlarına bağlı olarak Denklem 3.86’daki eşitlik ile hesaplanır.

$$i_{DC} = \begin{bmatrix} S_{1-2} & S_{3-4} & S_{5-6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

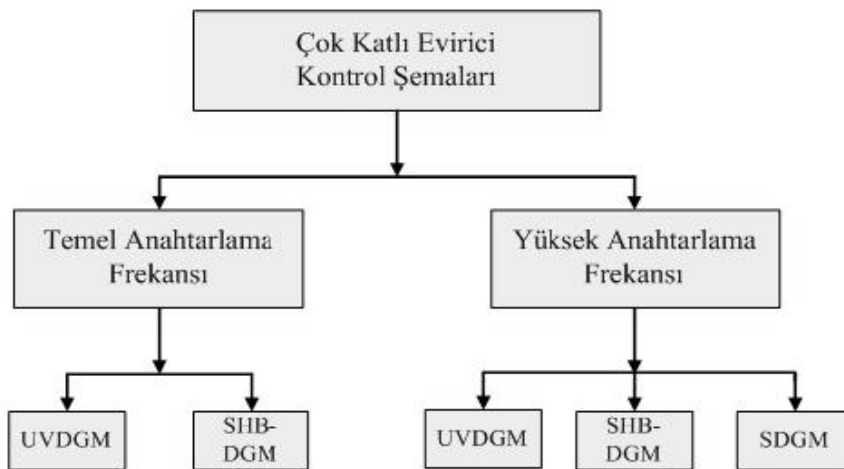
3.3.6. Darbe genişlik modülasyon teknikleri

GKE'lerin aktif olarak çalışabilmeleri ve kontrol devreleri için farklı modülasyon teknikleri kullanılmaktadır. Modülasyon teknikleri kullanılarak elde edilen anahtarlama sıralamaları ile istenilen çıkış gerilimi elde edilebilmektedir. Günümüzde en sık olarak kullanılanları teknikler SDGM ve UVDGM'dir.

Eviricinin beslendiği kaynak üzerine çeşitli olumsuz etkileri de bulunmaktadır. Bunların en önemlisi harmoniklerdir. Harmoniklerin bastırılması için çeşitli HB metodları kullanılmaktadır.

Eviricilerde, DA kaynaktan sağlanan bir gerilimin yüksek verimle AA çıkış gerilimine dönüştürülebilmesi, anahtarlama elemanlarının etkili şekilde kontrol edilmesine bağlıdır. Çok seviyeli eviricilerde bu kontrolü sağlayacak DGM yöntemleri üzerine çeşitli kontrol şemaları geliştirilmiştir [42].

Literatür incelendiğinde en çok kullanılan tekniğin SDGM olduğu belirlenmiştir. Ancak dezavantaj olarak evirici çıkış gerilimi, giriş bara geriliminin 0,8 katını geçememekle birlikte şebekede oluşan 3. harmonikte göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 3.7. Çok katlı evirici kontrol şemaları [42]

3.3.7. Sinüsoidal darbe genişlik modülatörüne ait matematik model

Bir Sinüsoidal Harmonik Bastırılmış (SHB)-DGM için normal görev döngü fonksiyonlarına ait algoritma [40]:

$$Dongu_a = 0,5 \cdot m_i \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[\sin(\theta) + \frac{\sin(3\theta)}{6} \right] + 0,5 \quad (3.89)$$

$$Dongu_b = 0,5 \cdot m_i \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{\sin(3\theta)}{6} \right] + 0,5 \quad (3.90)$$

$$Dongu_c = 0,5 \cdot m_i \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) + \frac{\sin(3\theta)}{6} \right] + 0,5 \quad (3.91)$$

Burada θ istenilen çıkış frekansına bağlı olarak hesaplanan referans açısı, m_i ise modülasyon indeksidir.

$$m_i = \sqrt{3} \frac{V_{ref}}{V_{DC}} \quad (3.92)$$

veya,

$$m_i = \frac{V_{ref}}{V_{tasiyici}} \quad (3.93)$$

Bu yöntemde görev döngüleri, referans bir sinüsoidal sinyal ile taşıyıcı bir üçgen sinyalin karşılaştırılması sonucu elde edilmektedir. Görev döngü algoritması yazılarak bu döngülerin anahtarlama sinyallerine dönüştürülmesi, ölü zaman eklenmesi gereklidir.

3.3.8. Çift beslemeli asenkron generatör için gerilim denetiminin yapısı

Rüzgâr hızının sabit olmaması nedeniyle elde edilen kinetik enerjinin de değişken olması nedeniyle günümüzde rüzgâr türbinleri değişken hızlı olarak tasarlanmaktadır. Değişken hızlı sistemler hemen hemen her rüzgâr hızında verimi daha da artırmaktadır. Senkron hızın $\pm\%30$ hız aralığında çalışabilme ve kullanılan güç elektroniği dönüştürücü gücünün, generatör gücünün yaklaşık $\%25$ 'i olması gibi avantajlarından dolayı son yıllarda Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) kullanımı yaygınlaşmıştır[43]. Bu çalışmada ÇBAG'nin denetimi için doğrudan gerilim denetimi tercih edilmiştir.

ÇBAG şebeke bağlantısında rotor tarafı ve stator tarafı evirici adında 2 adet evirici görev almaktadır. Rotor tarafı evirici rotor üzerinde bulunan bileziklere bağlanmaktadır. Rotor tarafı eviricinin çıkışında gerilim sabitleyici bir DA bara bulunmaktadır. DA bara ise şebeke tarafı eviriciye bağlanmaktadır. Her iki evirici de çift yönlü akım geçişine uygun olarak tasarlanmaktadır. Rotor tarafındaki evirici ile ÇBAG'nin torku, hızı ve stator devresinin güç katsayısı denetlenebilmektedir. Şebeke tarafındaki evirici yardımıyla ise, DA hat gerilimi denetlenerek sabit tutulmaktadır. Rotora uygulanan gerilimin frekansı, büyüklüğü ve faz açısı rotor tarafı evirici yapısı yardımıyla denetlenmektedir. Şekil 3.8'de evirici yapısının denetim modeli verilmiştir. Rotor tarafı eviricinin denetimi için generatör çıkış sinyalleri (u_a , u_b , u_c) Clarke dönüşümü yardımıyla elde edilen doğrudan gerilim denetim algoritması[44-45]:

$$u_{s\alpha} = u_a \quad (3.94)$$

$$u_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}u_a + \frac{2}{\sqrt{3}}u_b \quad (3.95)$$

Denklem 3.94-3.95'te iki boyutlu gerilim vektörüne dönüştürülmüştür. Denklem 3.96'da elde edilen iki boyutlu gerilim vektörünün büyüklüğü $|u|$,

$$|u| = \sqrt{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \quad (3.96)$$

eşitliği ile hesaplanmış ve referans gerilim olan 220 V ile karşılaştırılmaktadır. Elde edilen hata sinyali kontrol bloğuna uygulanmaktadır. Ayrıca üç faz rotor akım sinyalleri iki faza indirgenerek döner referans düzlemine aktarılmaktadır.

$$i_d = i_{\alpha} \cos \theta + i_{\beta} \sin \theta \quad (3.97)$$

$$i_q = -i_{\alpha} \sin \theta + i_{\beta} \cos \theta \quad (3.98)$$

Park dönüşümü için gerekli gerekli kayma konum bilgisi,

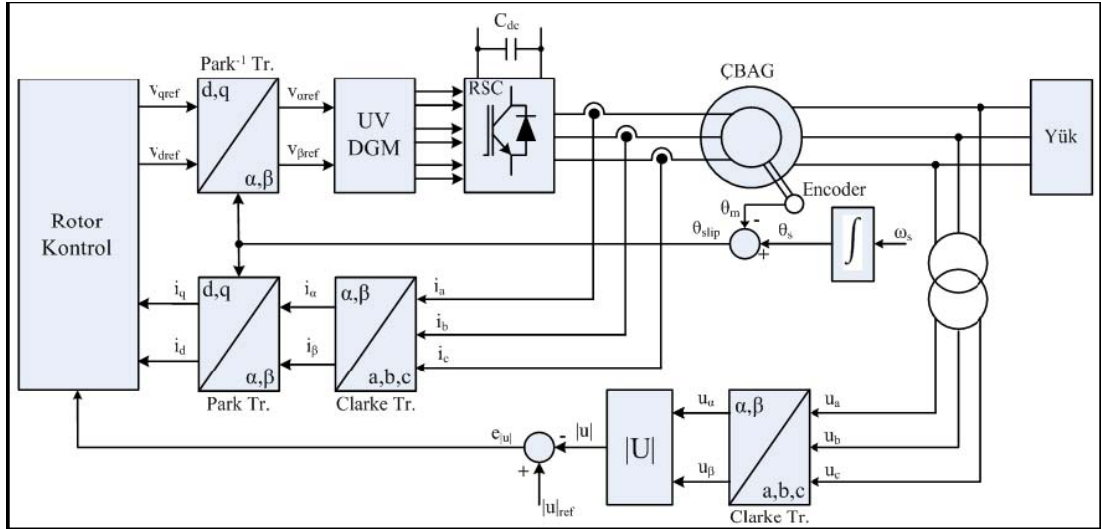
$$\theta_{kayma} = \theta_s - \theta_m \quad (3.99)$$

Denklem 3.99'da θ_m motor açısal pozisyonu, θ_s ise senkron açısal pozisyon bilgisini temsil etmektedir.

Şekil 3.8'de çift beslemeli asenkron rotor tarafı generatör için oluşturulan modellere ait blok şema verilmektedir.

Rotor tarafı evirici sürekli olarak rotor mili açısal hızını takip etmekte ve Denklem 3.100'de ifade edildiği şekilde şebeke senkron açısal hızı için kayma değeri ile belirtilen frekansta gerekli rotor beslemesini sağlamaktadır. Stator çıkışı ise sürekli olarak şebeke frekansı olan 50 Hz'de sabit tutulmaktadır.

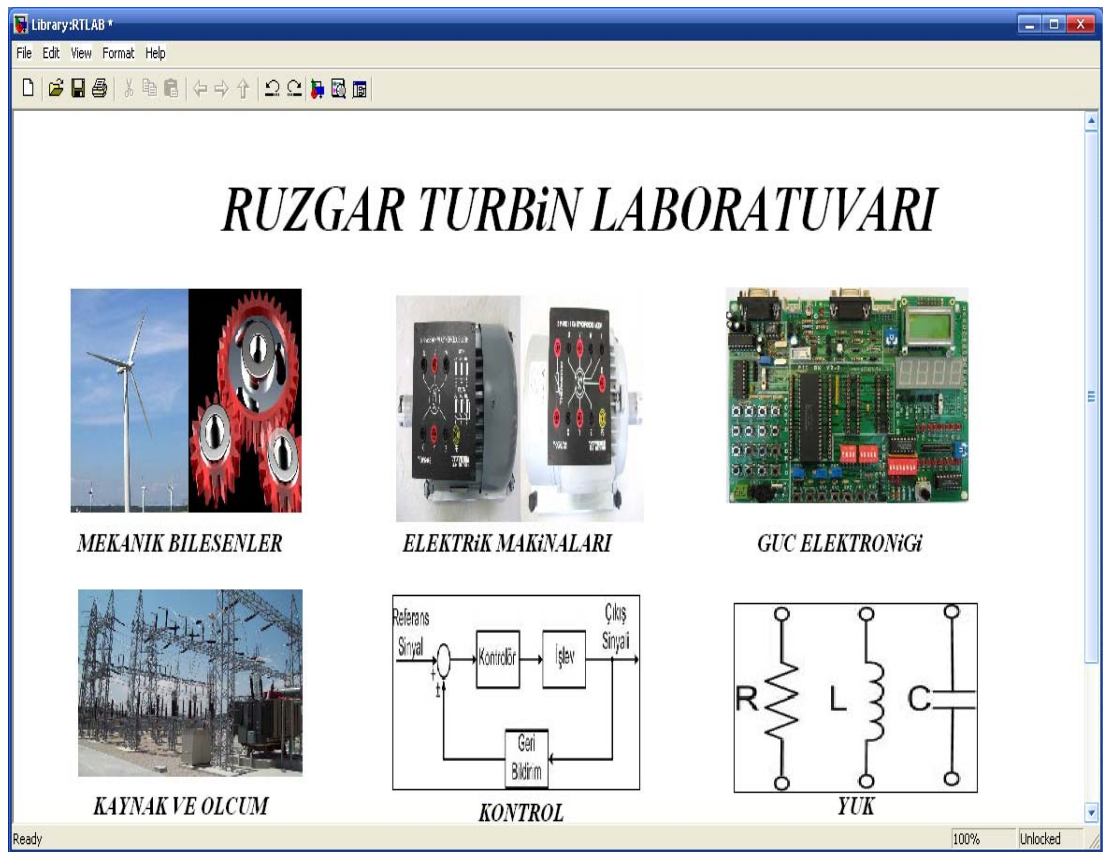
$$\omega_s = \omega_{kayma} + \omega_m \quad (3.100)$$



Şekil 3.8. Rotor tarafı evirici denetim modeli [44]

4. TASARLANAN BENZETİM ARACI

İkinci bölümde işlenen mekanik bileşenler, üçüncü bölümde işlenen elektrik makinaları ve güç elektroniği devreleri Matlab/Simulink programı ortamında fonksiyon blokları kullanılarak modellenmiş ve görsel bir laboratuvar oluşturulmuştur. Bu bölümde Şekil 4.1’de gösterilen Rüzgâr Türbin Laboratuvarı (RTLAB) içinde oluşturulan kütüphaneler, bu kütüphaneler içerisinde bulunan modeller üzerinde durulmaktadır.

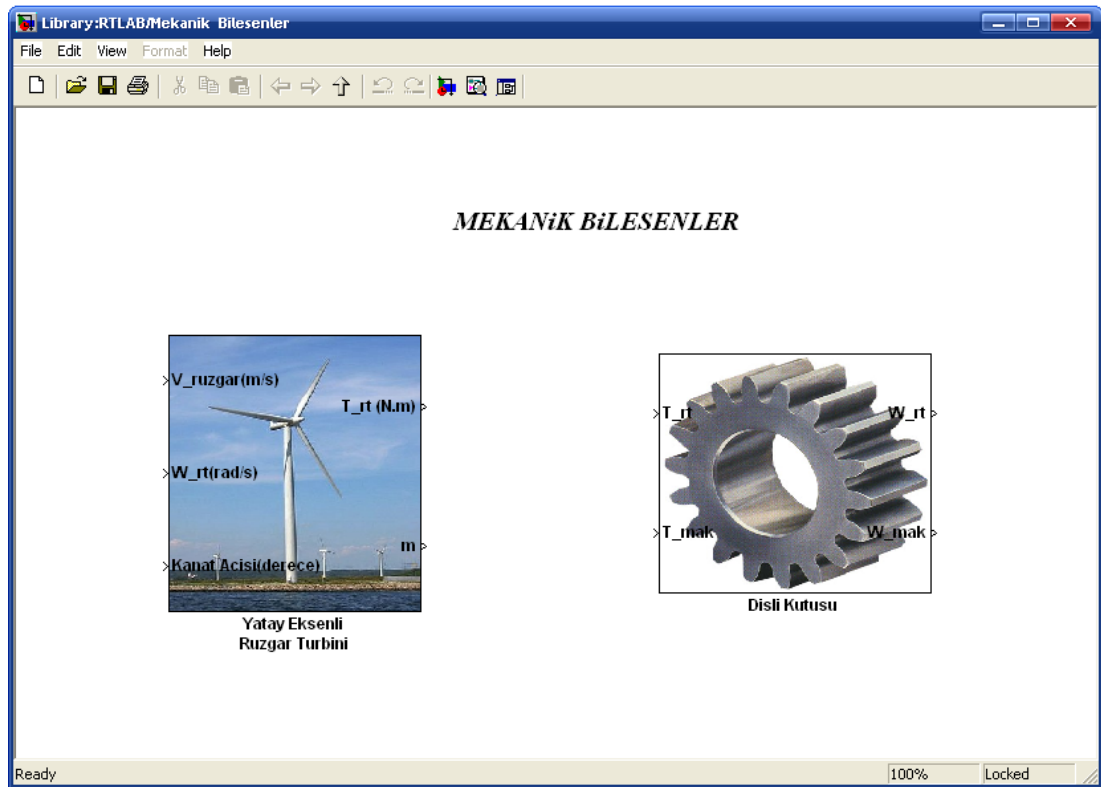


Şekil 4.1. Rüzgâr türbin laboratuvarı (RTLAB) ekran görüntüsü

Oluşturulan bu laboratuvarında Mekanik Bileşenler, Elektrik Makinaları, Güç Elektroniği, Kaynak ve Ölçüm, Kontrol ve Yük adı altında 6 adet kütüphane içerisinde 22 adet model bulunmaktadır. Oluşturulan modeller birbirlerinden bağımsız olarak çalıştırılabilmektedir.

4.1. Mekanik Bileşenler Kütüphanesi

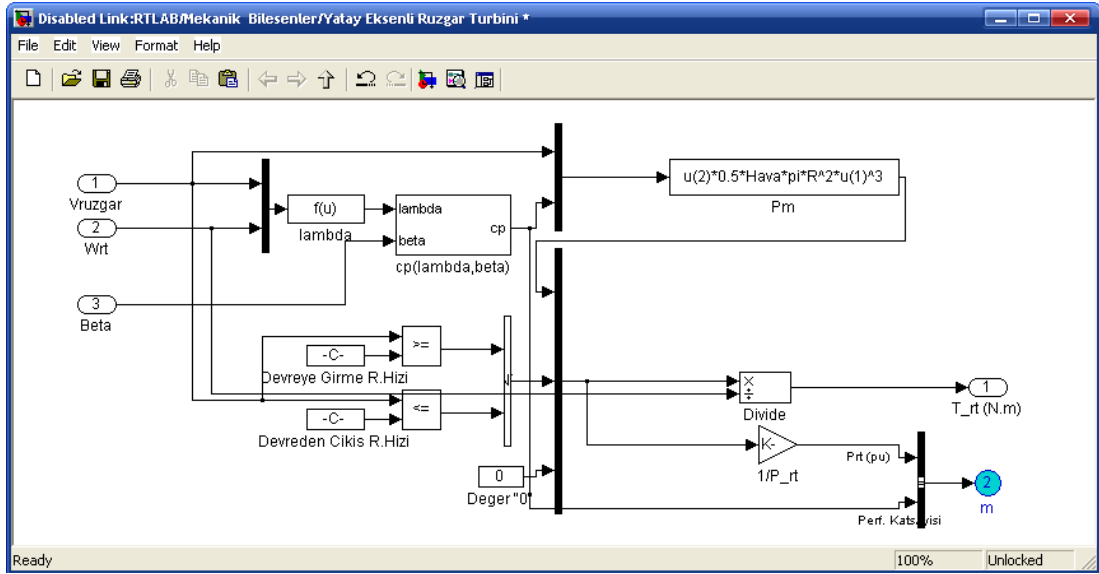
Şekil 4.2’de gösterilen mekanik bileşenler kütüphanesinde bir yatay eksenli rüzgâr türbini ve dişli kutusu modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu iki model elektrik makinaları ile uyumlu çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 4.2. Mekanik bileşenler kütüphanesi ekran görüntüsü

4.1.1. Yatay eksenli rüzgâr türbin modeli

Bölüm 2.4’te verilmiş olan YERT matematik modeli Simulink’te modellenerek Şekil 4.3’te gösterilen blokların birleştirilmesi sonucunda değişken kanat açılı yatay eksenli bir rüzgâr türbini elde edilmiştir.



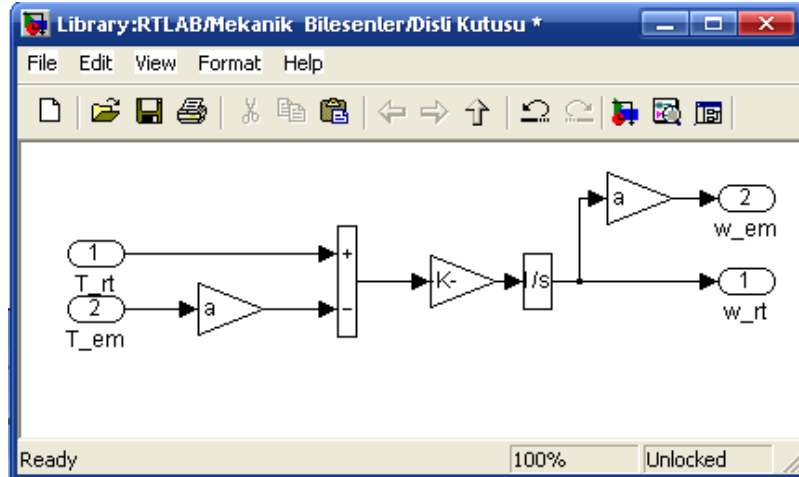
Şekil 4.3. Yatay eksenli rüzgâr türbini simulink modeli

Yatay eksenli rüzgâr türbini parametre giriş ekranı Şekil 4.4’te görülmektedir. Kullanıcı bu model üzerinde RT nominal gücü, kanat uzunluğu, hava yoğunluğu, devreye giriş ve çıkış rüzgâr hızlarını girerek YERT modelini çalıştırabilecektir.

Şekil 4.4. YERT parametre giriş ekranı

4.1.2. Dişli kutusu modeli

YERT ile generatör arasında tork girişi ve açısal hız geri beslemelerinin elde edildiği dişli kutusu modeli Şekil 4.5'teki blokların birleştirilmesi sonucu oluşturulmuştur.



Şekil 4.5. Dişli kutusu simulink modeli

Elektrik makinası ve rüzgâr türbinine ait atalet momenti, dişli kutusu dönüştürme oranı ve rüzgâr türbini başlangıç açısal hız parametreleri girişinin yapıldığı ekran Şekil 4.6'da gösterilmektedir.

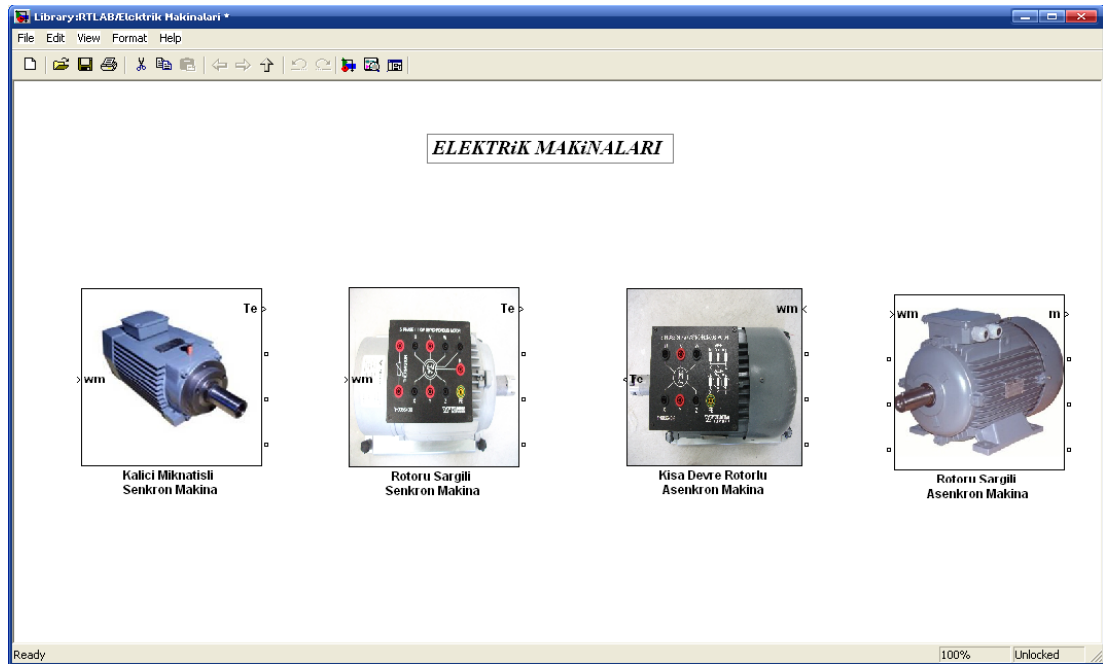
The dialog box 'Function Block Parameters: Dişli Kutusu' contains the following parameters:

- Simple Gearbox (mask)
- Parameters:
 - Elektrik Mak Atalet Momenti [kg m2]: 90
 - Ruzgar Turbini Atalet Momenti [kg*m2]: 49.5e5
 - Disli Kutusu Donusturme Orani: 168
 - BAslangic Kosulu [w_{rt} (rad/s)]: 1.87
- Buttons: OK, Cancel, Help, Apply

Şekil 4.6. Dişli kutusu parametre giriş ekranı

4.2. Elektrik Makinaları Kütüphanesi

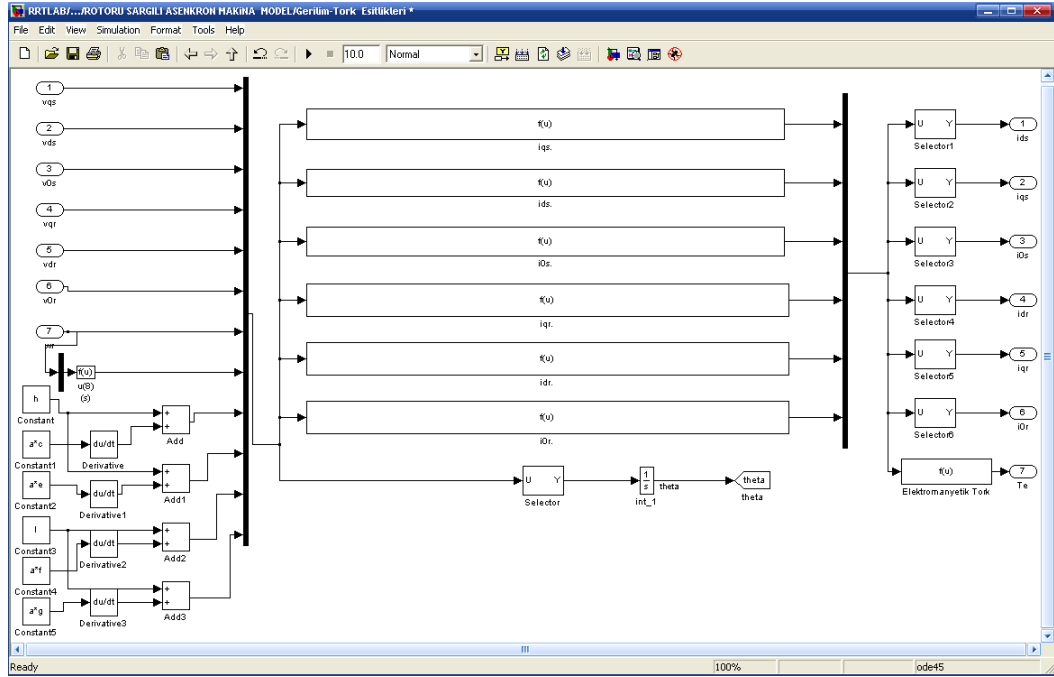
Şekil 4.7’de gösterilen elektrik makinaları kütüphanesinde 4 adet makina modeli oluşturulmuştur. Modeli oluşturulan makinalar rotoru sargılı asenkron makina, sincap kafesli asenkron makina, rotoru sargılı senkron makina ve kalıcı mıknatıslı senkron makinadır.



Şekil 4.7. Elektrik makinaları kütüphanesi ekran görüntüsü

4.2.1. Rotoru sargılı asenkron makina (RSASM) modeli

Bölüm 3.1.2–3.1.3’te işlenen rotoru sargılı asenkron makina (RSASM) gerilim ve torkuna ait matematik denklemleri Simulink’te modellenerek Şekil 4.8’de gösterilen blokların birleştirilmesi sonucunda RSASM modeli elde edilmiştir. Elde edilen Simulink blokları RSASM ve SKASM modellerinin her ikisi içinde kullanılabilir.



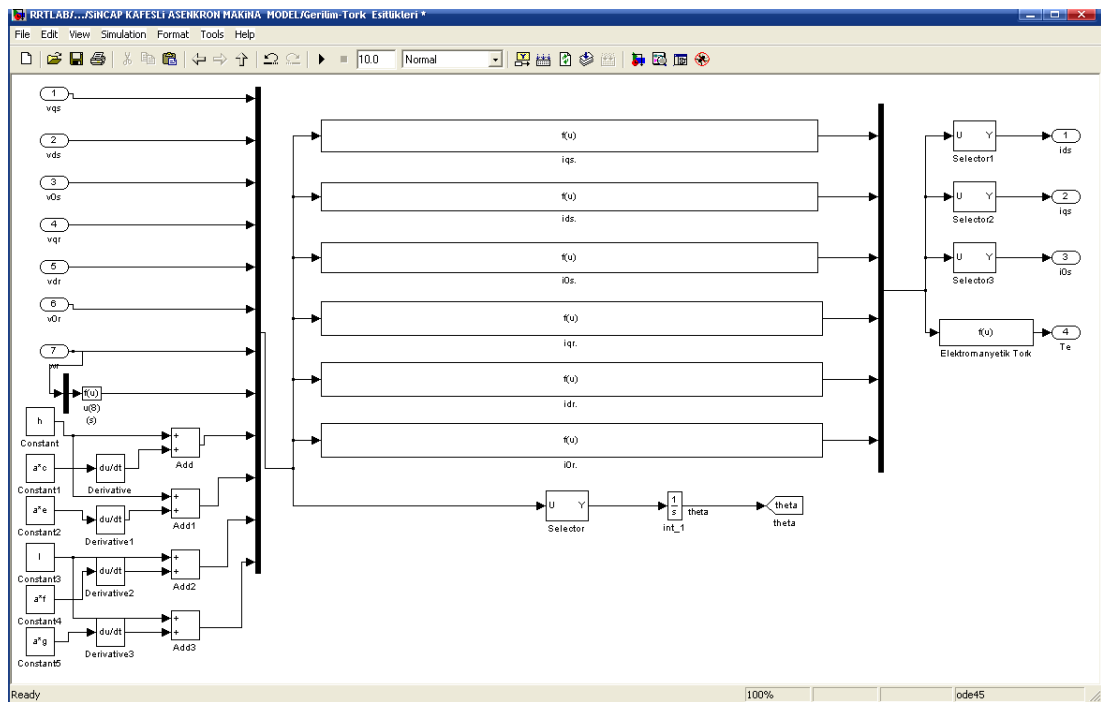
Şekil 4.8. RSASM simulink modeli

Model kullanıcısı RSASM'yi Şekil 4.9'da gösterilen parametre giriş ekranı yardımıyla istediği değerlerde çalıştırabilecektir. Modeli çalıştırmadan önce stator, rotora ait endüktans ve direnç değerleri, ortak endüktans ve kutup sayısı verileri sayısal olarak girilmelidir.

Şekil 4.9. RSASM parametre giriş ekranı

4.2.2. Sincap kafesli asenkron makina (SKASM) modeli

Şekil 4.10'da SKASM'ye ait Simulink model blokları gösterilmektedir. Bu model bölüm 3.1.2 ve 3.1.3'te verilen asenkron makinanın dq -eksen matematiksel ifadeler kullanılarak simulink fonksiyon blokları yardımıyla oluşturulmuştur. Yapı olarak RSASM'den farklı olarak rotor sargılarının olmaması nedeniyle rotor fiziksel bağlantılarının gösterilmemiş olmasıdır.



Şekil 4.10. SKASM simulink modeli

Model kullanıcısı SKASM'yi Şekil 4.11'de gösterilen parametre giriş ekranı yardımıyla istediği değerlerde çalıştırabilecektir. Bu parametre ekranı üzerinden stator ve rotor endüktans ve direnç değerleri, ortak endüktans ve çift kutup sayısı sayısal olarak girilmelidir.

Block Parameters: Kısa Devre Rotorlu Asenkron ...

Kısa Devre Rotorlu Asenkron Makina (mask)

Parameters

Stator parametreleri [Rs (ohm), Ls (H)]

[1.405 0.005839]

Rotor parametreleri [Rr (ohm), Lr (H)]

[1.395 0.005839]

Ortak Enduktans [H]

0.1722

Kutup Sayısı

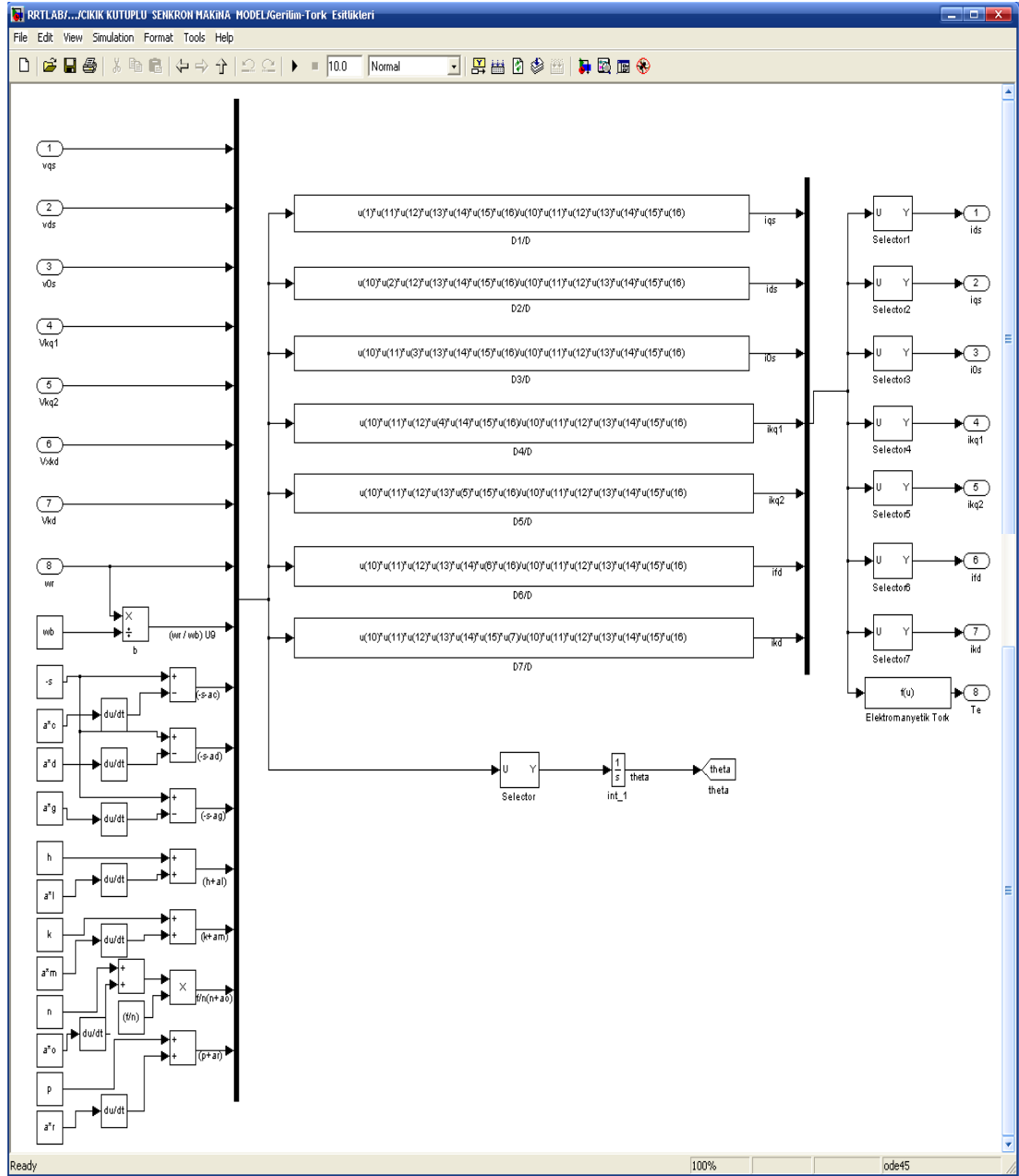
4

OK Cancel Help Apply

Şekil 4.11. SKASM parametre giriş ekranı

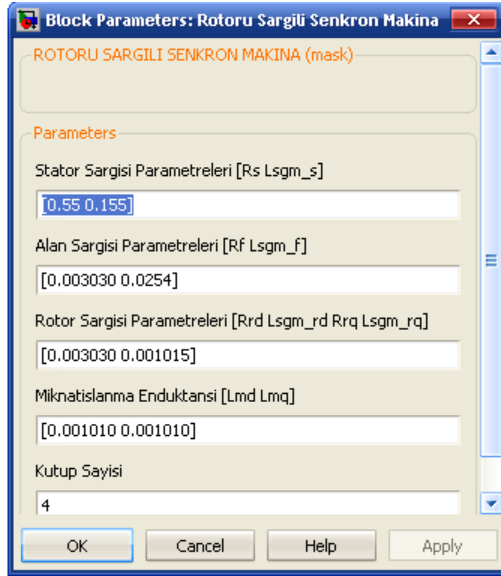
4.2.3. Rotoru sargılı senkron makina (RSSM) modeli

RSSM'ye ait Simulink model blokları Şekil 4.12'de gösterilmektedir. Bu model bölüm 3.2.2–3.2.3'te işlenen çıkık kutuplu senkron makinanın *dq-eksen* matematiksel ifadelerinin Simulink fonksiyon bloklarına aktarılması ile oluşturulmuştur.



Şekil 4.12. RSSM simulink modeli

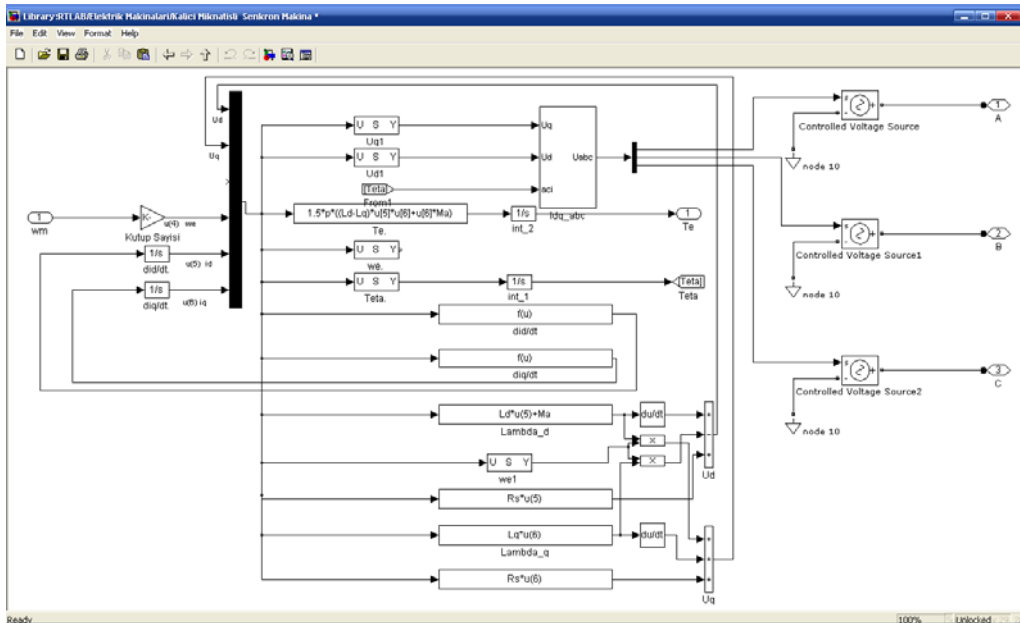
Model kullanıcısı RSSM'yi Şekil 4.13'de gösterilen parametre giriş ekranı yardımıyla istediği değerlerde çalıştırabilmektedir. Bu parametre giriş ekranından stator, rotora ait endüktans ve direnç değerleri, alan sargısına ait endüktans ve direnç değerlerinin yanında mıknatıslanma endüktansı ve çift kutup sayısı sayısal olarak girilmelidir.



Şekil 4.13. RSSM parametre giriş ekranı

4.2.4. Kalıcı mıknatıslı senkron makina modeli

Şekil 4.14'te KMSM'ye ait Simulink model blokları gösterilmektedir. Bu model bölüm 3.2.4–3.2.5'te verilen daimi (kalıcı) mıknatıslı senkron makinanın *dq-eksen* matematiksel ifadeleri ve Simulink fonksiyon blokları yardımıyla oluşturulmuştur.



Şekil 4.14. KMSM simulink modeli

Model kullanıcısı KMSM'yi Şekil 4.15'te gösterilen parametre giriş ekranı yardımıyla stator direnci, dq -eksen endüktans değerleri, sabit mıknatıs akısı ve kutup sayısı sayısal olarak girildikten sonra çalıştırabilmektedir.

Block Parameters: Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makina

KALICI MIKNATISLI SENKRON MAKINA (mask)

Parameters

Stator Direnci [Ohm]
0.24

d Eksen Enduktansı [Henry]
0.001015

q Eksen Enduktansı [Henry]
0.001015

Mıknatıs Akısı [Weber]
0.954

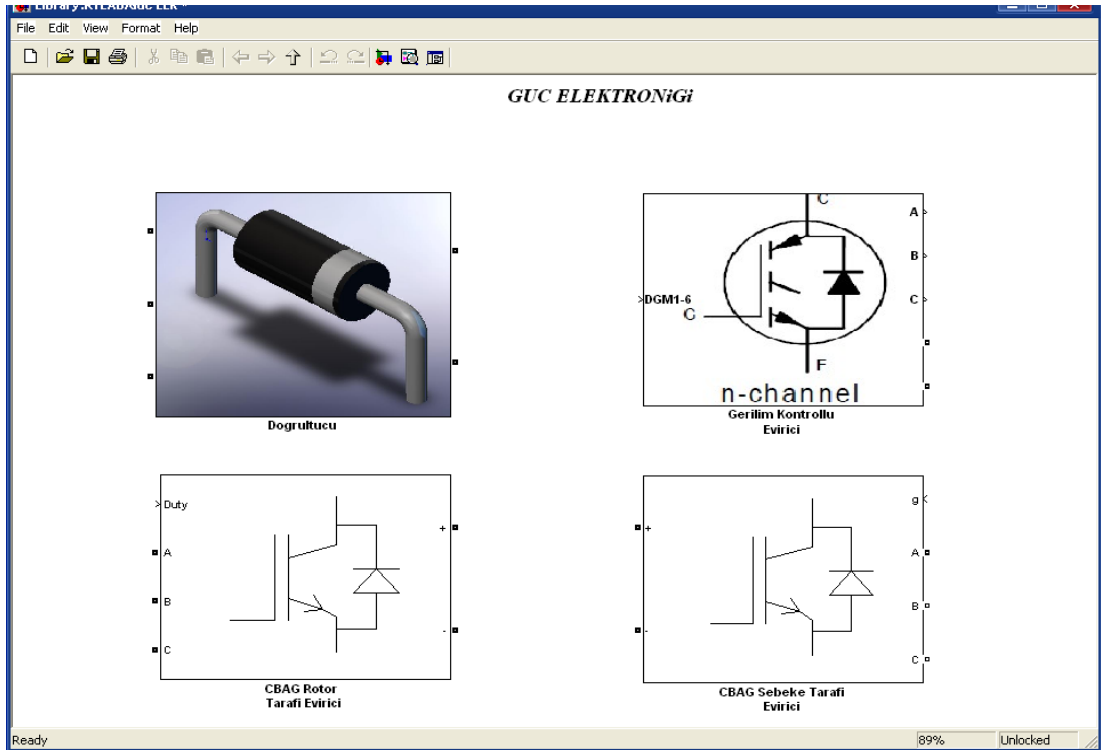
Kutup Sayısı
4

OK Cancel Help Apply

Şekil 4.15. KMSM parametre giriş ekranı

4.3. Güç Elektroniği Kütüphanesi

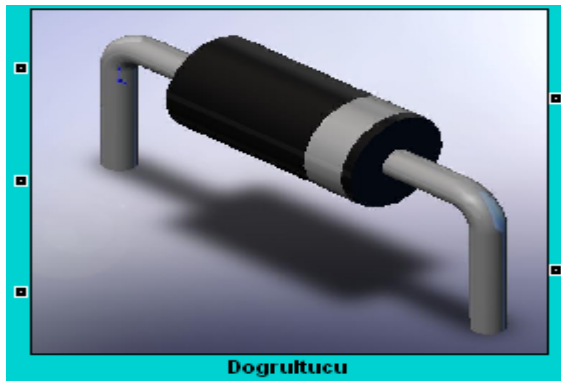
Şekil 4.16'da gösterilen güç elektroniği kütüphanesinde 4 adet güç elektroniği devresi modellenmiştir. Modeli oluşturulan devreler doğrultucu, gerilim kaynaklı evirici, çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgâr türbini sistemlerinde kullanılan rotor ve şebeke tarafı eviricilerdir.



Şekil 4.16. Güç elektroniği kütüphanesi ekran görüntüsü

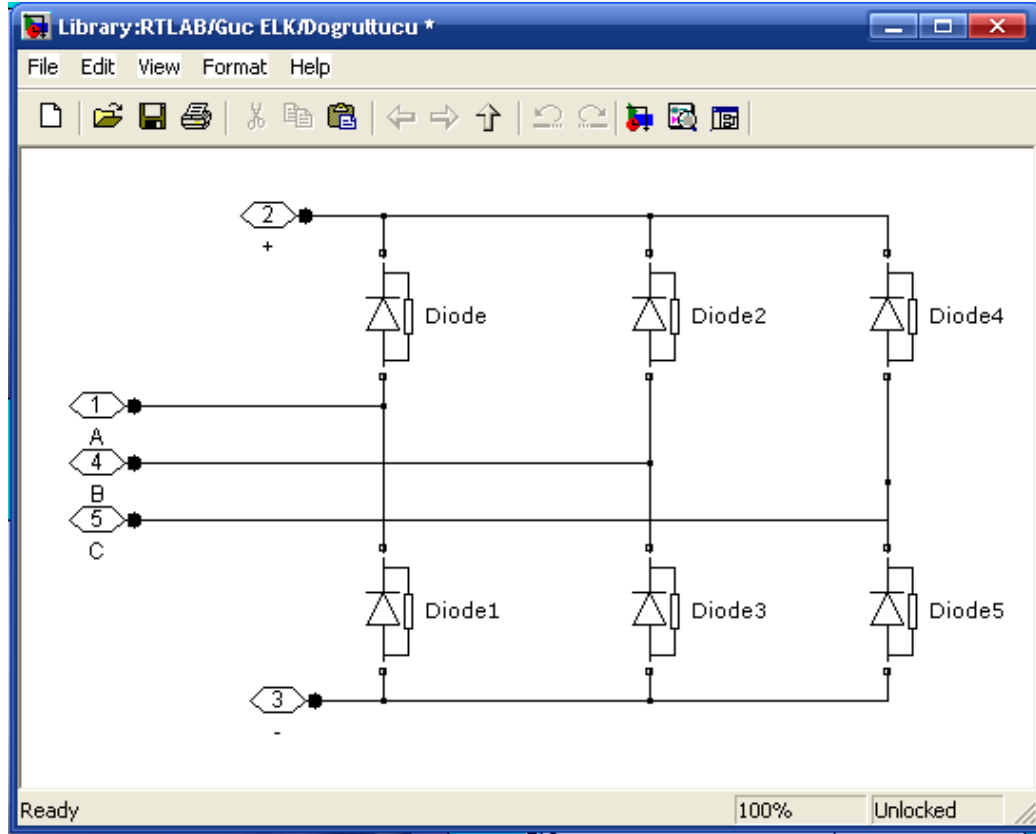
4.3.1. 3 Fazlı doğrultucu modeli

Şekil 4.17’de 3 fazlı doğrultucuya ait Simulink modeli gösterilmektedir. Senkron generatörlerin çıkışlarında yük kütüphanesinden kapasitif yük de bara çıkışına bağlanarak filtrelenmiş bir sinyal alınabilecektir.



Şekil 4.17. 3 fazlı kontrolsüz doğrultucu

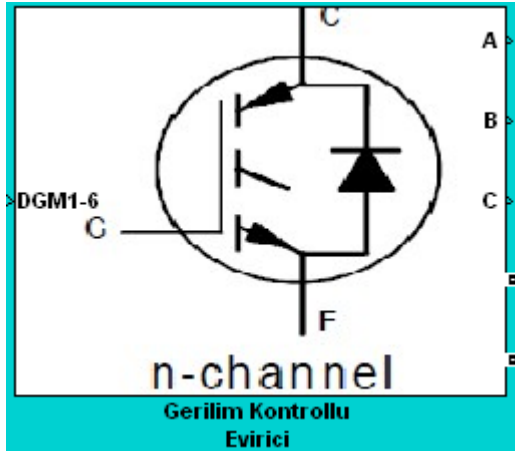
Şekil 4.18’de 3 fazlı kontrolsüz doğrultucuya ait Simulink blokları gösterilmektedir. Bu model 6 kontrolsüz yarı iletken anahtarlama elemanı ile oluşturulmuştur.



Şekil 4.18. 3 fazlı kontrolsüz doğrultucu simulink modeli

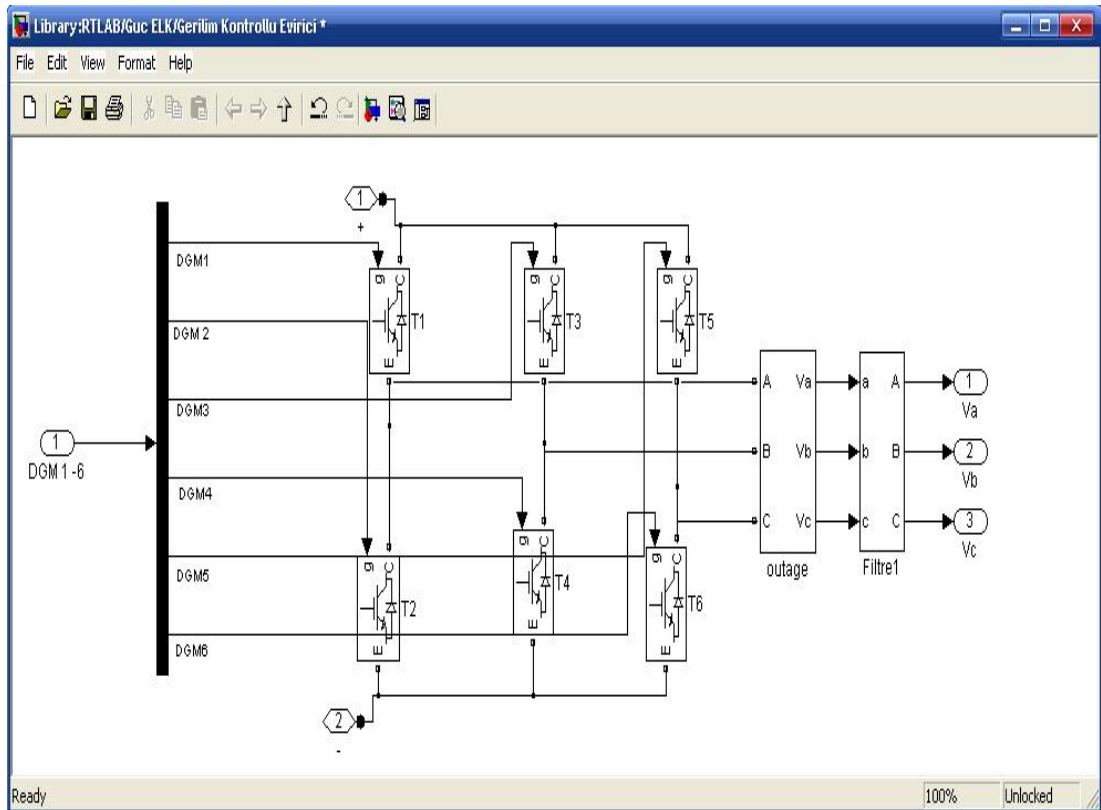
4.3.2. Gerilim kontrollü dönüştürücü (GKE) modeli

GKE’ye ait Simulink modeli Şekil 4.19’da gösterilmektedir. Bu model 6 adet kontrollü doğrultucu elemanın bir araya getirilip çıkışına bir RL filtre eklenmesiyle oluşturulmuştur.



Şekil 4.19. GKE simulink modeli

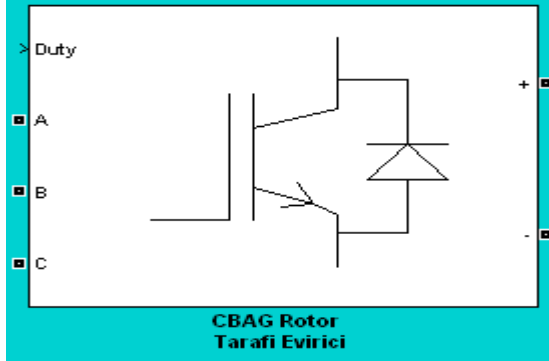
Şekil 4.20’de GKE simulink model blokları gösterilmektedir. Kullanılabilmesi için kontrol kütüphanesinden darbe genişlik modülatörü seçilerek modülasyon indeksi ve taşıyıcı sinyal frekans değerleri girilmelidir.



Şekil 4.20. GKE simulink model blokları

4.3.3. Çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) rotor tarafı evirici modeli

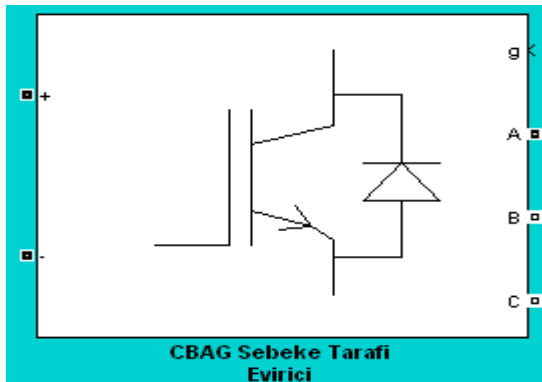
ÇBAG rotor tarafı eviriciye ait Simulink modeli gösterilmektedir. Bu model kontrol kütüphanesinde bulunan ÇBAG rotor tarafı PWM üretici ile kullanılabilir.



Şekil 4.21. CBAG rotor tarafı evirici simulink modeli

4.3.4. Çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) şebeke tarafı evirici modeli

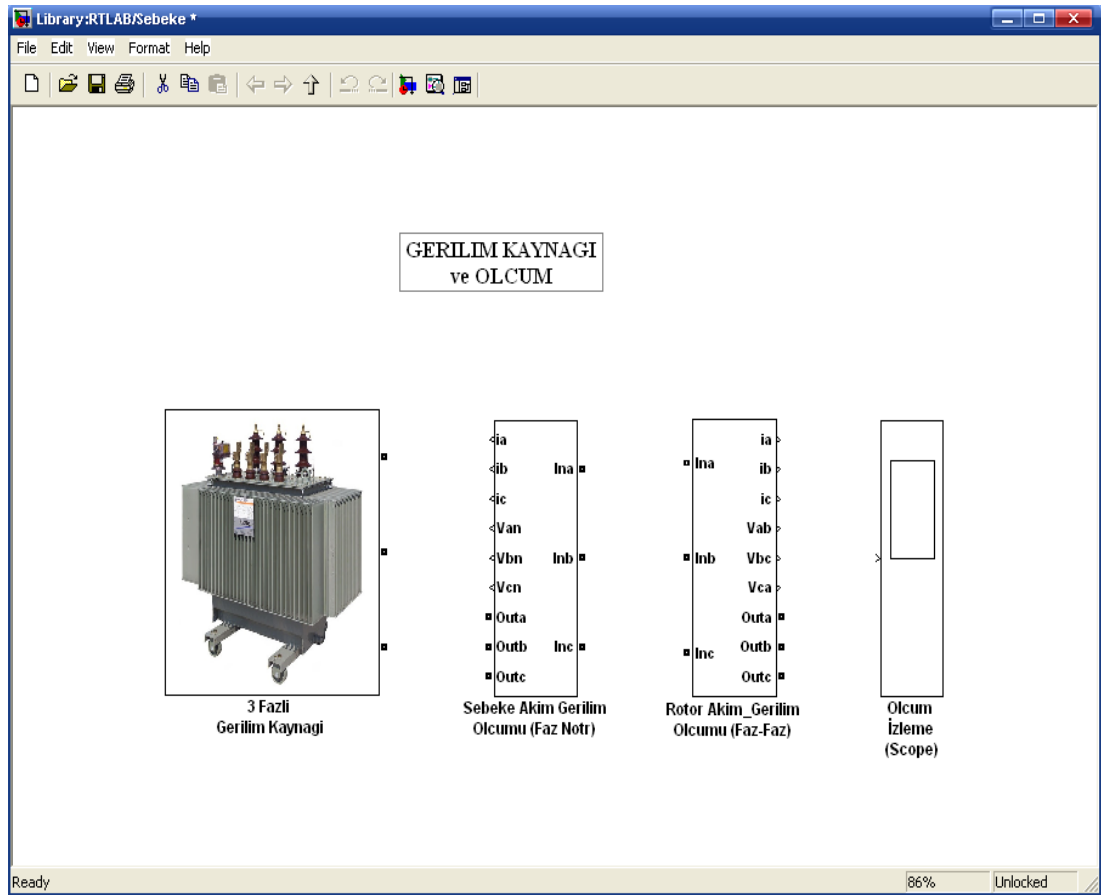
Şekil 4.22’de ÇBAG şebeke tarafı eviriciye ait Simulink model blokları gösterilmektedir. Bu model kontrol kütüphanesinde bulunan ÇBAG şebeke tarafı PWM üretici ile kullanılabilir.



Şekil 4.22. ÇBAG şebeke tarafı evirici modeli

4.4. Kaynak ve Şebeke Kütüphanesi

Şekil 4.23'te gösterilen kaynak ve ölçüm kütüphanesinde 4 adet model oluşturulmuştur. Modeli oluşturulan sistemler 3 fazlı gerilim kaynağı, şebeke ve rotor akım-gerilim ölçümleri ve bunların izlenebileceği ölçüm izleme ünitesidir.



Şekil 4.23. Kaynak ve şebeke kütüphanesi ekran görüntüsü

4.4.1. Kaynak modeli

Şekil 4.24'te kaynağa ait Simulink modeli gösterilmektedir. Bu model Simulink kütüphanesinden temin edilen üç adet bir fazlı sinüs kaynağı 120'şer derecelik faz farkı ile bağlanması ile elde edilmiştir.

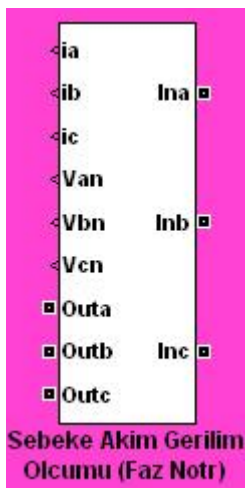


Şekil 4.24. 3 Fazlı gerilim kaynağı simulink modeli

Model kullanıcısı kaynak modelini, faz gerilim değerini ve şebeke frekansını girerek kullanabilmektedir.

4.4.2. Şebeke akım-gerilim ölçüm modeli

Şekil 4.25’de şebekeye ait Simulink modeli gösterilmektedir. Bu model Simulink kütüphanesinde mevcut blokların birleştirilmesi ile elde edilmiştir.

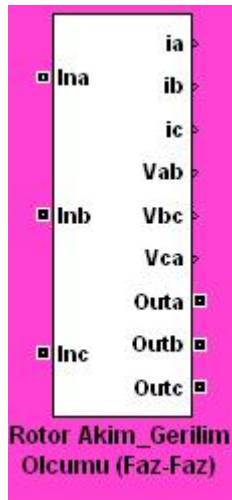


Şekil 4.25. Şebeke akım-gerilim ölçümü simulink modeli

Model kullanıcısı bu model ile şebekeden fiziksel giriş yaparak faz nötr gerilimi ve akım sayısal verilerini elde edebilecektir.

4.4.3. Faz-Faz akım-gerilim ölçüm modeli

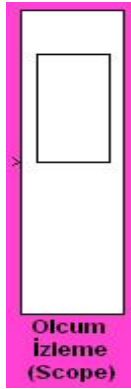
Şekil 4.26'da ÇBAG şebeke ya da rotor tarafına ait fiziksel giriş çıkışlar için akım-gerilim ölçümü yapılabilecek Simulink modeli gösterilmektedir. Bu model Simulink kütüphanesinde mevcut blokların birleştirilmesi ile elde edilmiştir.



Şekil 4.26. Faz-faz akım-gerilim ölçümü modeli

4.4.4. Ölçüm izleme modeli

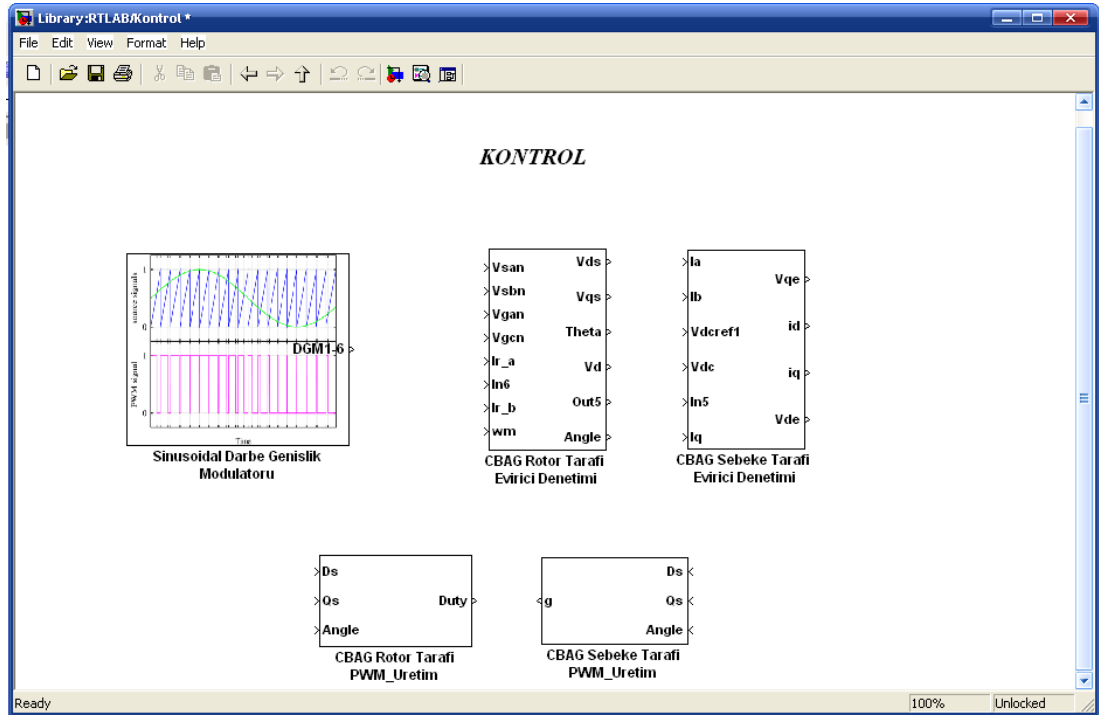
Şekil 4.27'de rüzgâr türbin laboratuvarından seçilerek çalıştırılan her sistemin giriş çıkış verilerinin osiloskop ekranı benzerinde izlenebilmesi için ölçüm izleme modeli simulink kütüphanesinden seçilmiştir. Oluşturulan sistemlerin çalışma analizinde en çok tercih edilen izleme ünitesidir.



Şekil 4.27. Ölçüm izleme (scope) modeli

4.5. Kontrol Kütüphanesi

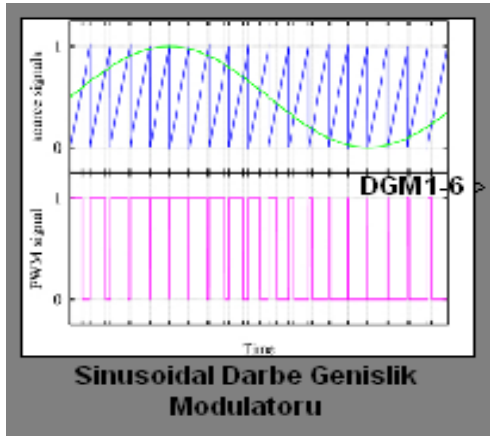
Şekil 4.28’de gösterilen kontrol kütüphanesinde 5 adet güç elektroniği kontrol devresi ayrı ayrı modellenmiştir. Kontrol kütüphanesi sinüsoidal darbe genişlik modülatörü, ÇBAG rotor ve şebeke tarafı evirici denetleyicileri, ÇBAG rotor ve şebeke tarafı PWM (DGM) üreten modellerden oluşmaktadır.



Şekil 4.28. Kontrol kütüphanesi ekran görüntüsü

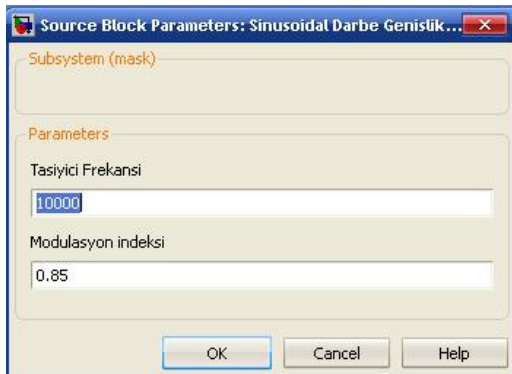
4.5.1. Sinüsoidal darbe genişlik modülatörü (SDGM) modeli

Şekil 4.29’da SDGM’ye ait Simulink model blokları gösterilmektedir. Bu model Simulink bölüm 3.3.7’de verilen SDGM’ye ait matematiksel ifadeler ve Simulink kütüphanesinde bulunan bloklar yardımıyla elde edilmiştir.



Şekil 4.29. SDGM simulink modeli

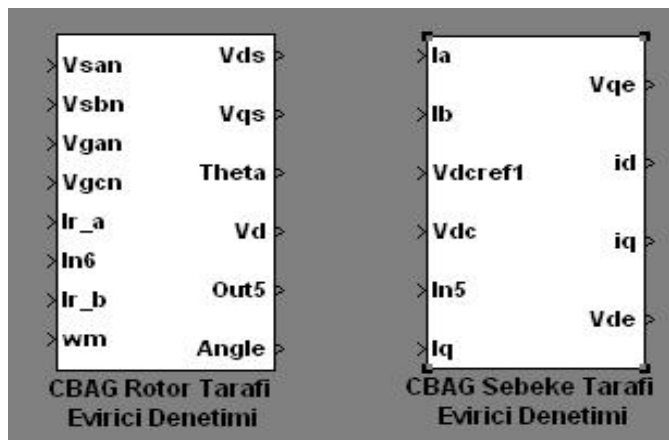
Model kullanıcısı SDGM modelini, Şekil 4.30’da gösterilen parametre giriş penceresi üzerinde taşıyıcı (üçgen) sinyal frekansını, modülasyon indeksini belirleyerek çalıştırabilmektedir. Üretilen 6 adet DGM sinyali GKE’yi oluşturan 6 kontrollü yarı iletken anahtarları tetiklemek için kullanılmaktadır.



Şekil 4.30. SDGM parametre giriş ekranı

4.5.2. ÇBAG rotor ve şebeke tarafı evirici denetleyicileri

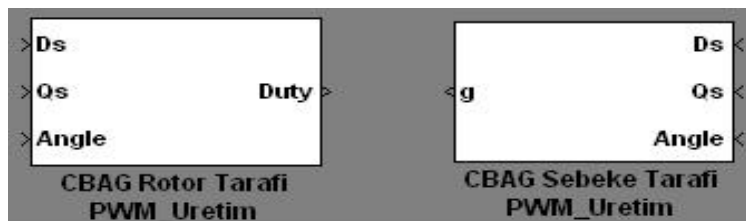
Şekil 4.31’de çift beslemeli asenkron generatör rotor ve şebeke tarafı denetimi için tasarlanmış olan 2 model birlikte gösterilmektedir. Bu modellerin kullanımında rotor ve şebeke tarafından ölçüm kütüphanesindeki ölçüm modelleri yardımıyla alınan akım, gerilim, açısal hız, pozisyon bilgileri gerekmektedir.



Şekil 4.31. ÇBAG rotor ve şebeke tarafı evirici denetim modelleri

4.5.3. ÇBAG rotor ve şebeke tarafı PWM üreteçleri

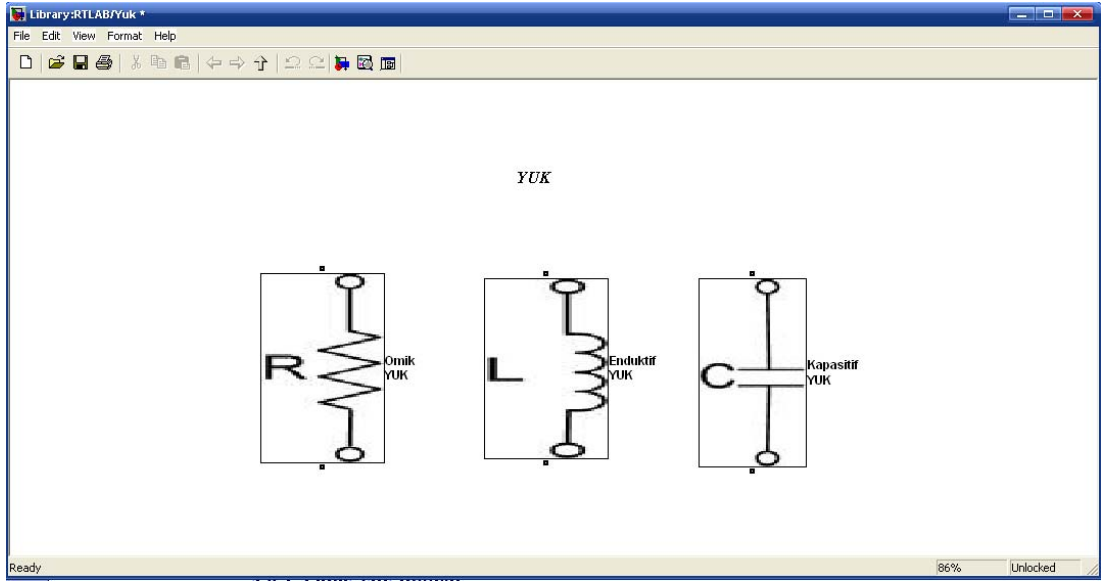
Şekil 4.32’de çift beslemeli asenkron generatör rotor ve şebeke tarafı PWM üretimi için tasarlanmış olan 2 model birlikte gösterilmektedir. Bu modellerin kullanımında rotor ve şebeke d-q eksen gerilim bilgilerinin ve açısal pozisyon verilerinin tanımlanması gerekmektedir.



Şekil 4.32. ÇBAG rotor ve şebeke tarafı evirici denetim modelleri

4.6. Yük Kütüphanesi

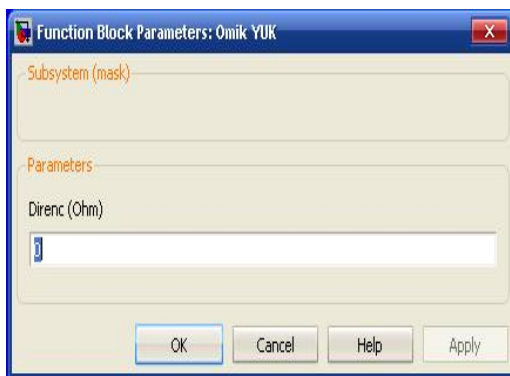
Şekil 4.33'te gösterilen yük kütüphanesinde 3 farklı yük modeli oluşturulmuştur. Modeli oluşturulan yükler omik, endüktif ve kapasitif yüklerdir.



Şekil 4.33. Yük kütüphanesi ekran görüntüsü

4.6.1. Omik yük modeli

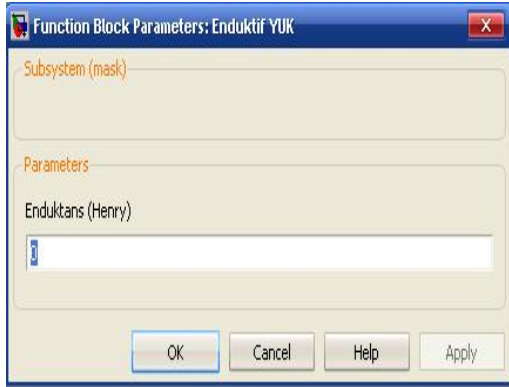
Model kullanıcısı omik yük modelini, Şekil 4.34'de gösterilen parametre giriş penceresi üzerinde omik yük direncini belirleyerek kaynağa bağlayabilmektedir.



Şekil 4.34. Omik yük modeli parametre giriş ekranı

4.6.2. Endüktif yük modeli

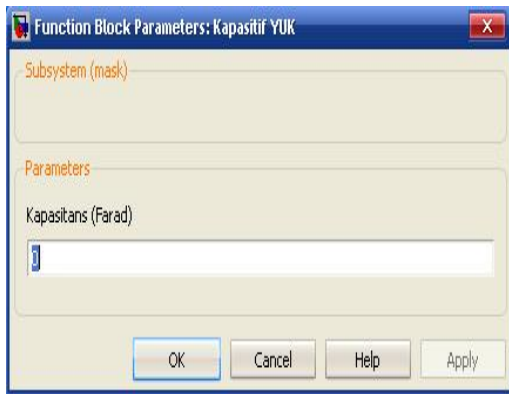
Model kullanıcısı endüktif yük modelini, Şekil 4.35’de gösterilen parametre giriş penceresi üzerinde yük endüktansını belirleyerek kaynağa bağlayabilmektedir.



Şekil 4.35. Endüktif yük modeli parametre giriş ekranı

4.6.3. Kapasitif yük modeli

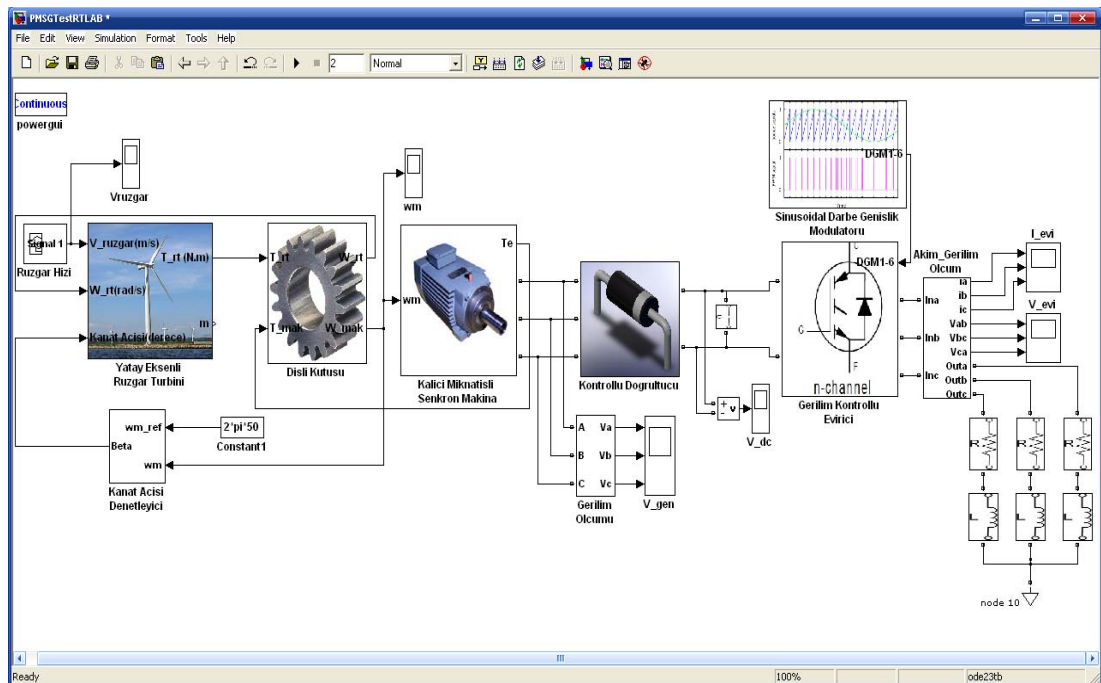
Model kullanıcısı kapasitif yük modelini, Şekil 4.36’da gösterilen parametre giriş penceresi üzerinde yük endüktansını belirleyerek kaynağa bağlayabilecektir.



Şekil 4.36. Kapasitif yük modeli parametre giriş ekranı

5. KALICI MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRLÜ (KMSG) RÜZGÂR TÜRİNİ ÖRNEK UYGULAMASI

Bu bölümde kalıcı mıknatıslı senkron generatörün kullanıldığı yatay eksenli rüzgâr türbini sistemine ait örnek bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1’de simülasyonu gerçekleştirilen sistem verilmiştir. Sistem yatay eksenli rüzgâr türbini, dişli kutusu, KMSG, doğrultucu, gerilim kontrollü evirici ve kontrol modelleri ile yük ve ölçme modellerinden meydana gelmiştir [46].



Şekil 5.1. Simülasyonu gerçekleştirilen sistem

Yatay eksenli rüzgâr türbini olarak daha önce modellenerek RTLAB kütüphanesine yerleştirilen Şekil 5.2’de verilen türbin modeli kullanılmıştır. Türbin parametreleri olarak Şekil 5.3’te verilen değerler kullanılmıştır. Rüzgâr hızı değişken bir parametre olduğundan bir sinyal generator bloğu yardımıyla rüzgâr hızı modellenmiş, PI denetleyici kullanılarak değişken rüzgâr hızlarında kanat açısı kontrolü gerçekleştirilmiş ve türbin hızının sabit kalması sağlanmıştır.



Şekil 5.2. Maske edilmiş olan yatay eksenli rüzgâr türbin (YERT) modeli

Function Block Parameters: Yatay Eksenli Ruzga...

Yatay Eksenli Ruzgar Turbin Modeli

Parameters

RT Nominal Gucu [Watt]
10000

Kanat Uzunlugu [m]
10

Hava Yogunlugu [kg/m3]
1.225

Devreye Giris Hizi [m/sec]
3

Devreden Cikis Hizi [m/sec]
25

Katsayilar (c1-c6) c1
0.5176

OK Cancel Help Apply

Şekil 5.3. YERT modeli için parametre giriş ekranı

YERT modelinin çıkışından elde edilen moment bir dişli kutusu yardımıyla referans hıza dönüştürülmekte ve Şekil 5.4'te verilen kalıcı mıknatıslı senkron generatöre

uygulanmaktadır. KMSG giriş verisi olarak açısal hız ve Şekil 5.5'te KMSG modeli parametre giriş ekranı üzerinden girilen verileri kullanmaktadır. Çıkış verisi olarak 3 fazlı gerilim ve elektromekanik tork verisi üretmektedir.



Şekil 5.4. KMSG simulink modeli

Block Parameters: Kılcık Miknatıslı Senkron Makina

KALICI MIKNATISLI SENKRON MAKINA (mask)

Parameters

Stator Direnci [Ohm]
0.24

d Eksen Enduktansı [Henry]
0.001015

q Eksen Enduktansı [Henry]
0.001015

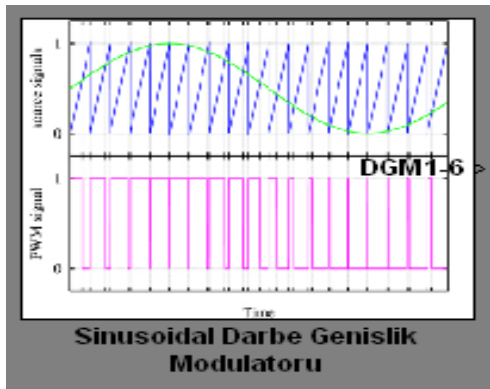
Miknatıslı Akısı [Weber]
0.99

Kutup Sayısı
4

OK Cancel Help Apply

Şekil 5.5. KMSG modeli için parametre giriş ekranı

KMSG çıkışından elde edilen üç faz gerilim, bir doğrultucu yardımıyla doğrultulduktan sonra eviriciye uygulanmış ve burada sabit frekans ve genlikli 3 faz AA elde edilmiştir. Evirici anahtarlama sinyalleri Şekil 5.6'da modeli verilen sinüsoidal darbe genişlik modülatörü (DGM) yardımıyla üretilmiştir. Bu darbe genişlik modülatörü belirli frekans ve gerilimdeki bir referans ve bir taşıyıcı sinyalin karşılaştırılması sonucu 6 adet darbe genişlik sinyal çıkışı üretmektedir.



Şekil 5.6. DGM maske edilmiş modeli

Evirici çıkışından elde edilen sabit genlik ve frekanstaki üç faz gerilim ile bir RL yükün beslemesi gerçekleştirilmiştir.

5.1. Simülasyon Sonuçları

Aşağıda verilen parametreler kullanılarak kalıcı mıknatıslı senkron generatörlü yatay eksenli rüzgâr türbininin simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

YERT:

Nominal Gücü: 10 kW

Kanat Uzunluğu: 10 m.

Rüzgâr Hızı: 10 m/sn

Hava Yoğunluğu: 1.225 kg/m³

REDÜKTÖR:

Dönüştürme Oranı: 168

Türbin Başlangıç Açısal Hızı: 1.87 rad/s

KMSG:

Stator Direnci: 0.24 Ω

d-Eksen Endüktansı: 0.001015 H

q-Eksen Endüktansı: 0.001015 H

Sabit Mıknatıs Akısı: 0.954 Weber

Kutup Sayısı: 4

GKE ve DGM:

Referans Kaynak Gerilimi : 311 V

Referans Kaynak Frekansı: 50 Hz

DC Bara Gerilimi: 545 V

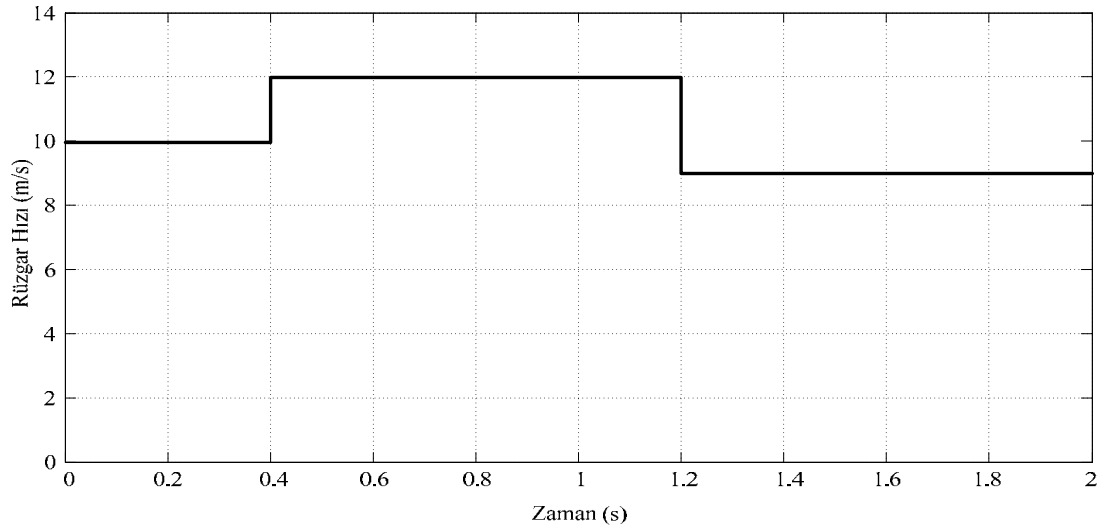
Taşıyıcı Sinyal Frekansı: 10 kHz

YÜK:

Omik : 100 Ohm

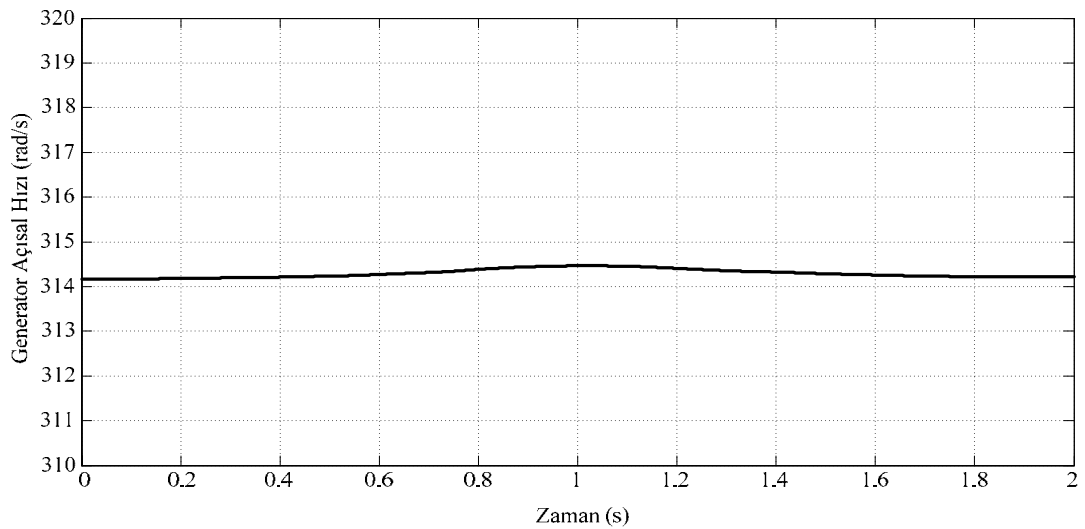
Endüktif : 100 mH

Simülasyonda yatay eksenli rüzgâr türbinine uygulanan rüzgâr hızı Şekil 5.7’de verilmiştir. Başlangıçta 10 m/s olan rüzgâr hızının 0.4 s sonra aniden 12 m/s’ye çıktığı, 1.2 s’de ise 9 m/s’ye düştüğü kabul edilmiştir.



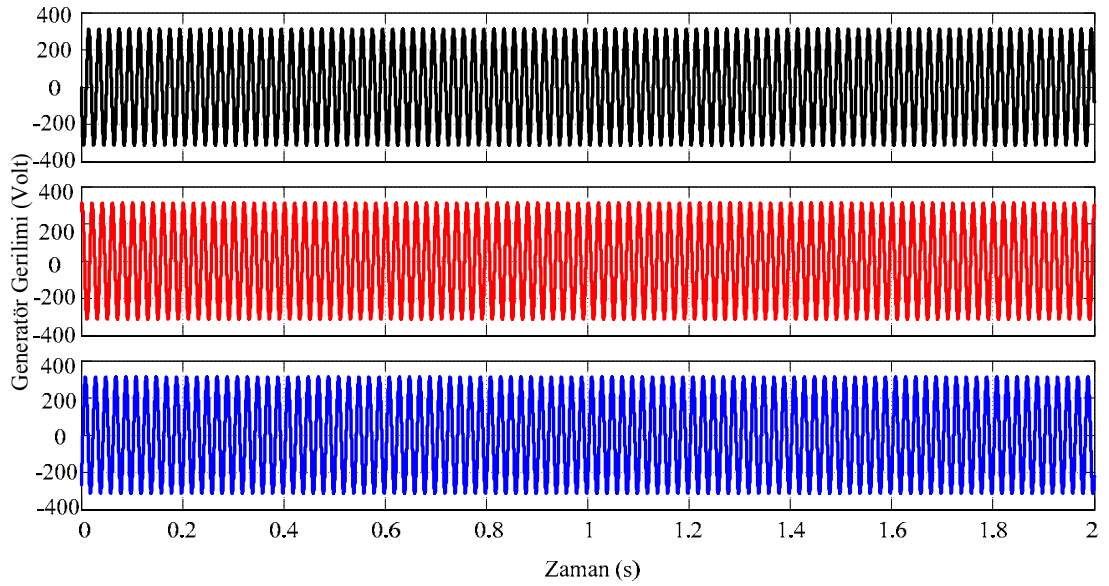
Şekil 5.7. Rüzgâr hız grafiği

Şekil 5.8’de 0.4. saniyedeki rüzgâr hızının yükselmesi nedeniyle generatöre uygulanan açısal hızda % 0.1’lik bir değişim gözlenmiştir. Kanat açısı denetleyicisinin devrede olması nedeniyle bu değişim asgari düzeyde tutulmaya çalışılmıştır. 1.2 s’de ise rüzgâr hızındaki azalma nedeniyle tekrar açısal hızda yumuşak bir düşüş gözlenmiştir. Rüzgâr hızındaki bu ani değişime karşılık kanat açısı kontrolü gerçekleştirildiğinden dolayı Şekil 5.8’de görüldüğü gibi generatör hızında çok fazla değişim olmamıştır.



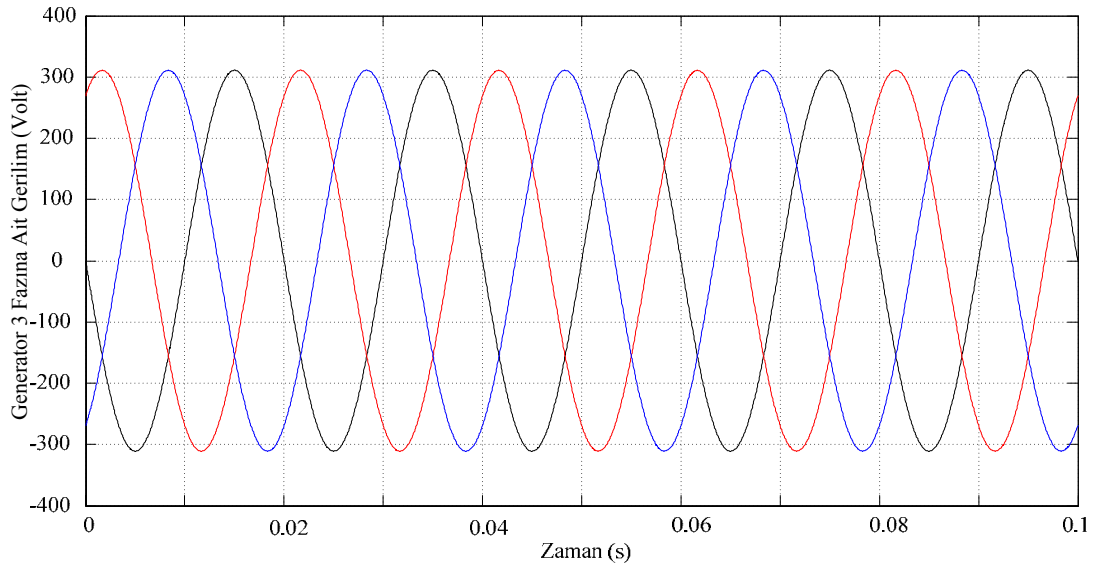
Şekil 5.8. Generatöre uygulanan açısal hız grafiği

Şekil 5.9’da generatör 3 faz çıkış gerilimi verilmiştir Burada çıkış gerilimlerinin sinüsoidal olduğu ve faz tepe gerilimlerinin 311 Volt olduğu görülmektedir. Şekil 5.8’de açısal hızın çok fazla değişmediği belirlendiğinden fazlara ait gerilim değişimleri milivolt seviyelerinde kalmıştır.



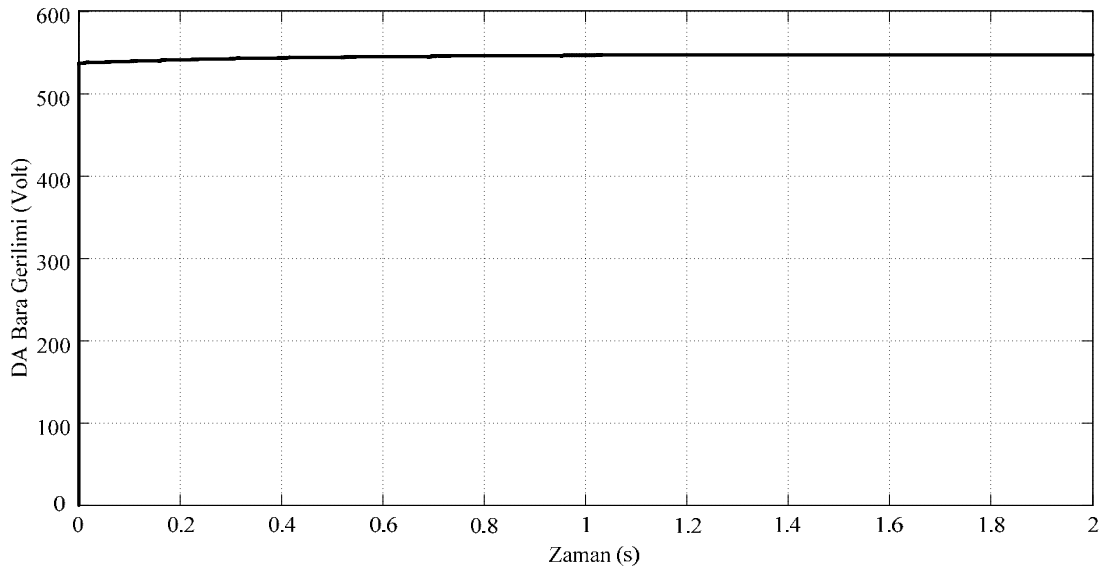
Şekil 5.9. Generatör 3 fazına ait gerilim grafiği

Şekil 5.10’da 0 ile 0.1 saniye arası generatör 3 fazına ait gerilim grafiği elde edilmiş olup faz tepe gerilimleri 311 Volt, frekansı 50 Hz ve fazlar arası faz farkı 120^0 olarak hesap edilmiştir.



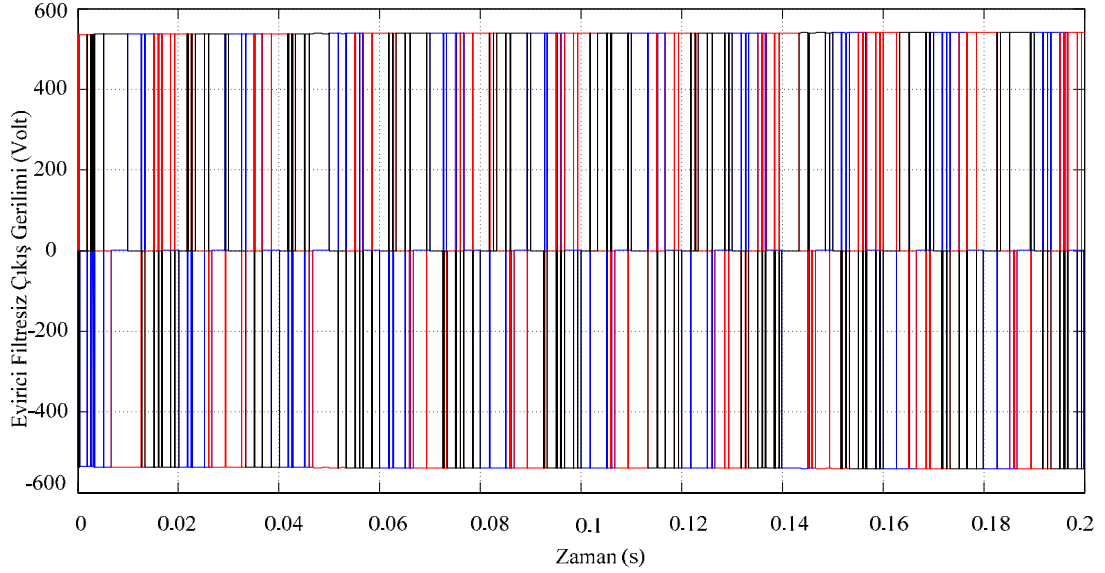
Şekil 5.10. 0-0.1 saniye arası generatör 3 fazına ait gerilim grafiği

Şekil 5.11’de KMSG’nin bağlı bulunduğu DA bara gerilimi 542-545 Volt arasında gözlenmiştir. Generatörde belirgin açısal hız değişiminin olmaması ve kullanılan DA bara kondansatörü ile gerilim aralığı sabit tutulmuştur.



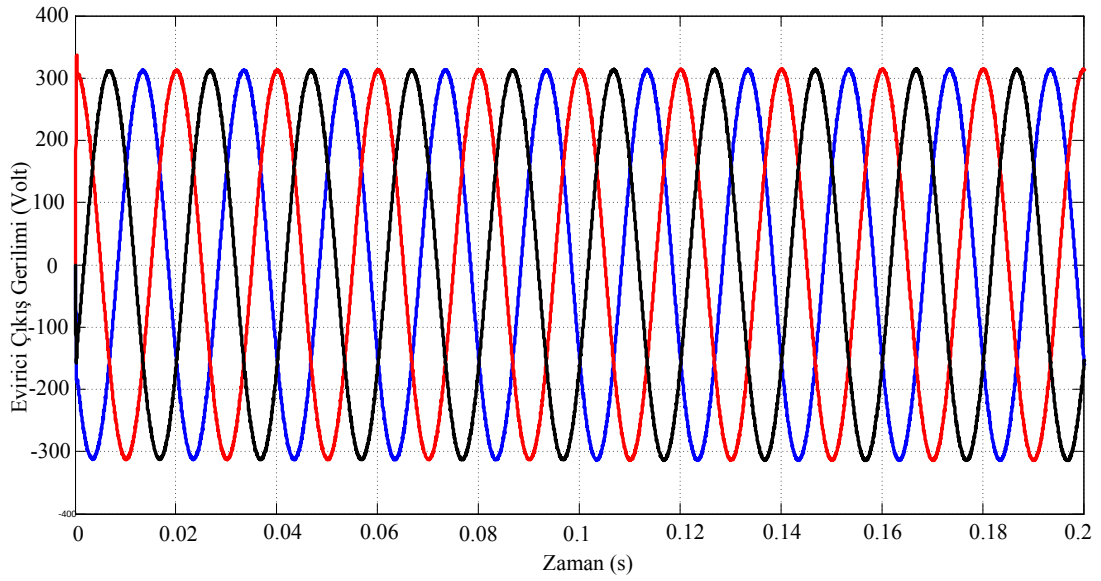
Şekil 5.11. DA bara gerilim grafiği

10 kHz'lik taşıyıcı ve 50 Hz'lik referans sinyalinin kullanıldığı DGM sinyalinin uygulandığı DA baraya bağlı GKE filtresiz çıkış gerilimleri Şekil 5.12'de elde edilmiştir.



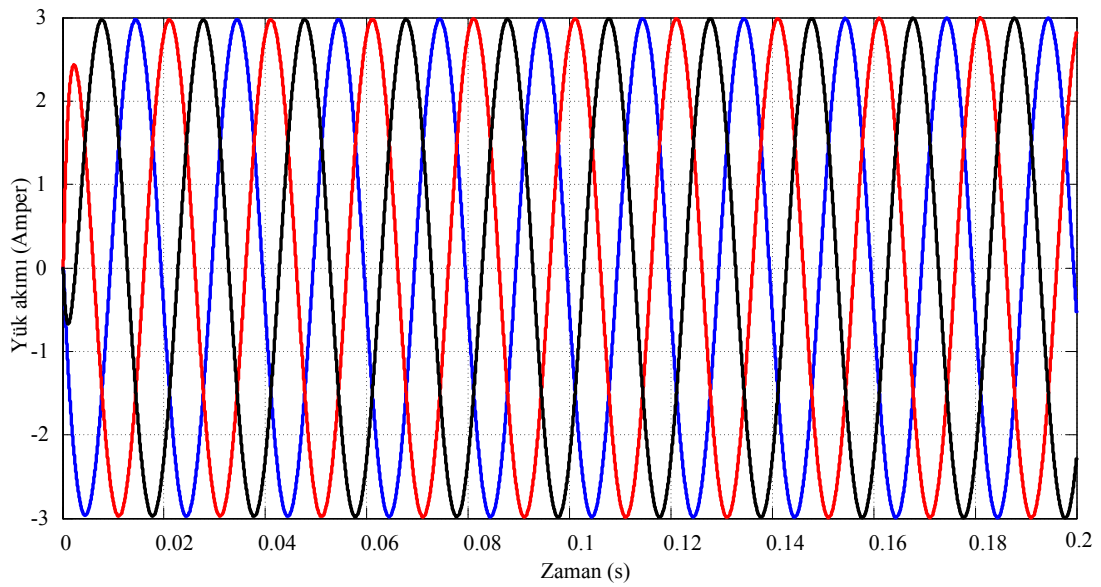
Şekil 5.12. Eviriciye ait filtresiz çıkış gerilimi grafiği

Şekil 5.12'de filtresiz çıkış gerilimleri verilen evirici çıkışına bağlanan bir RL filtre yardımıyla çıkış gerilimi düzenlenerek Şekil 5.13'te elde edilmiştir. Kondansatör DA bara gerilimini sabit tuttuğundan dolayı evirici çıkış genliği de sabit olmaktadır. Tepe faz gerilimleri 311 Volt, sinyal frekansı 50 Hz ve fazlar arası faz farkı 120^0 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.13. Eviriciye ait çıkış gerilimi grafiği

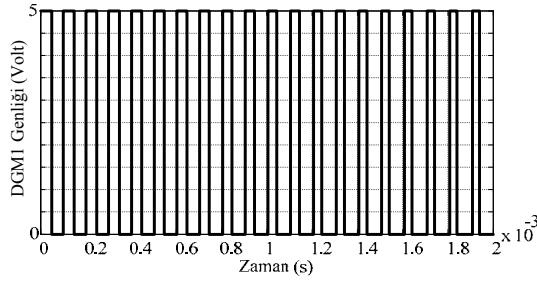
Evirici çıkışına 100 Ohm ve 100 mH'lik seri RL yük bağlantısı yapılmış ve Şekil 5.14'te yük akımları grafiği elde edilmiştir.



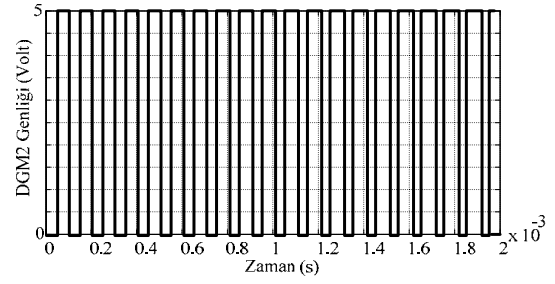
Şekil 5.14. Yük akımları grafiği

Eviriciye uygulanan darbe genişlik modülasyon sinyallerine ait grafikler Şekil 5.15'te gösterilmektedir. Oluşturulan bu sinyaller darbe genişlik modülatörüne 10

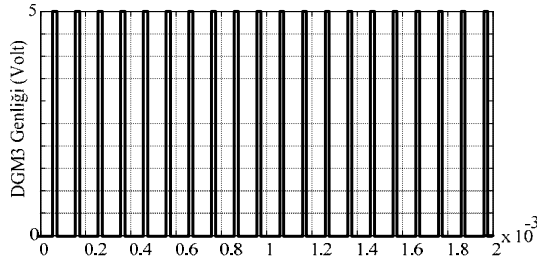
kHz'lik bir taşıyıcı sinyal ve 50 Hz'lik referans bir sinyal uygulanarak elde edilmiştir.



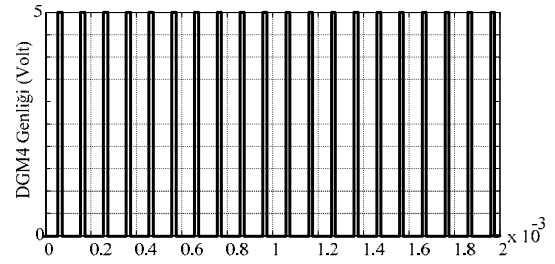
(a)



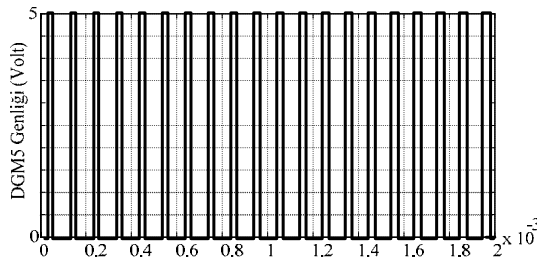
(b)



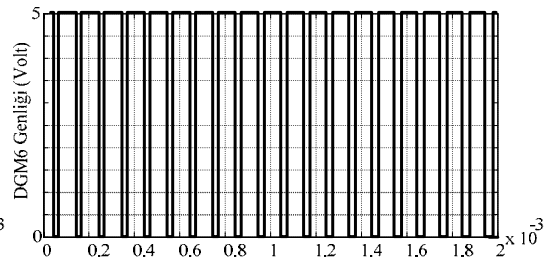
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 5.15. Eviriciye uygulanan darbe genişlik modülasyonu sinyal grafikleri
a) 1 nolu, b) 2 nolu, c) 3 nolu, d) 4 nolu, e) 5 nolu, f) 6 nolu

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada yatay eksenli rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan rüzgâr türbini, generatörler, güç elektroniği devreleri ve kontrol devreleri Matlab/Simulink programı ile modellenerek sanal bir rüzgâr türbin laboratuvarı (RTLAB) oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller için matematik denklemler kullanılmıştır. Kullanılan matematik denklemler simulink kütüphanesindeki bloklardan da yararlanılarak düzenlenmiş ve düzenlenen bu denklemler ile rüzgâr türbinlerinde kullanılan mekanik, elektrik ve elektronik sistem modelleri oluşturulmuştur. Modeller belirli başlıklar altında gruplanarak kütüphaneler içerisine yerleştirilmiştir. Her kütüphane ve model üzerine görsellik katabilmek amacıyla resimler konulmuştur. RTLAB kullanıcısı, herhangi bir yatay eksenli rüzgâr türbin sistemini kütüphane içerisinde sunulan yardım menüsü desteğiyle modelleri tek tek seçip boş bir Simulink sayfasına taşıyarak oluşturabilmektedir. Laboratuvar kullanıcısı gerekli model bağlantılarını gerçekleştirdikten sonra, model üzerindeki parametre giriş ekranından sistem parametrelerini girerek sisteme ait akım, gerilim, tork, açısal hız vb. değerleri gözlemleyebilecektir.

Bu laboratuvar oluşturulurken elde edilen modellerin tasarımında belirli bir silsile takip edilmiştir. Öncelikle mekanik sistemlerin mantığı ve çalışması kavranmıştır. Mekanik sistemler oluşturulduğunda, mekanik ve elektrik sistemin nasıl bağlantı yapılacağı değerlendirilmiş ve buna uygun bir dişli kutusu modeli oluşturulmuştur. Dişli kutusu modeli oluşturulurken rüzgâr türbini ve elektrik makinasından gelen açısal hız geri beslemeleri kullanılmıştır. Açısal hızın ani değişimlerinin önlenmesi amacıyla ayrıca bir türbin kanat açısı denetleyicisi de düşünülmüştür. Elde edilen bu model ile ani rüzgâr hız değişimine bağlı açısal hız değişimlerinin önüne geçilmiştir.

Elektrik makinalarının çıkışı güç elektroniği devreleri bağlantılarına uygun şekilde tasarlanmıştır. Güç elektroniği devrelerinin yanında uygun denetleyicilerde modellenmiş ve sistemlerde kullanılan modellerin tam uyum içerisinde çalışabilmesine özen gösterilmiştir.

Elde edilen bu laboratuvarın genel bir değeriendirilmesi yapıldığında; gerek yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin gerçekleştirilmesi için satın alma ve kurulum maliyetinin oldukça yüksek olması gerekse her yöre ve bölgenin rüzgâr potansiyelinin uygun olmaması nedeniyle elde edilen bu sanal laboratuvarın kullanımının ekonomik ve eğitim yönünden faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Docksai, R., “ "Life After Fossil Fuels" ,. *Futurist, The. FindArticles.com*. 23 Jun, (2011).
2. Pamir, N. “Enerji Arz Güvenliği ve Türkiye”, *Stratejik Analiz*, Mart, (2007).
3. *CIA World Factbook*, (2009).
4. “World Energy Outlook”, *IEA, 2007*, Paris, (2007)
5. Güner, S., Albostan, A., “Türkiyenin Enerji Politikaları”, *YEKSEM'07*, Kasım, (2007).
6. İnternet: Albostan, A., Eren, L., Çekiç, Y., “Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi”, www.emo.org.tr.
7. Iov, F., Ciobotaru, M., Blaabjerg, F., “Power Electronics Control of Wind Energy in Distributed Power Systems”, *IEEE OPTIM 2008, 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, (2008).
8. Krystkowiak, M., Gwózdź, M., “Simulation and Experimental Models of 3-Phase Diode Rectifier with Power Electronics Current Modulator”, *IEEE Nonsinusoidal Currents and Compensation*, 152-155 (2010).
9. Qui, Z., Zhou, K., Li, Y., “Modeling and Control of Diode Rectifier Fed PMSG Based Wind Turbine”, *IEEE Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 1384-1388 (2011).
10. Steimer, P.K., “Enabled by High Power Electronics - Energy efficiency, Renewables and Smart Grids”, *IEEE International Power Electronics Conference (IPEC)*, 11-15 (2010).
11. Kjaer, S.B., Pedersen, J.K., Blaabjerg, F., “A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41 (5): 1292-1306 (2005).
12. Carrasco, J.M., Franquelo, L.G., Bialasiewicz, J.T., Galvan, E., Guisado, R.C.P., Prats, M.A.M., Leon, J.I., Moreno-Alfonso, N., “Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey”, *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 53 (4): 1002-1016 (2006).
13. Xu, D., Wu, B., Luo, Z., A “Low-Cost Rectifier Topology for Variable-Speed High-Power PMSG Wind Turbines”, *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 26 (8): 2192-2200 (2011).

14. Celanovic, N. ; Katic, V.A., “Permanent Magnet Synchronous Generator Cascade for Wind Turbine Application”, *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 23 (3): 1132-1142 (2008).
15. Rodriguez, M.A. ; Iwanski, G. ; Poza, J. , “Direct Power Control of Doubly-Fed-Induction-Generator-Based Wind Turbines Under Unbalanced Grid Voltage”, *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 25 (2): 442-452 (2010).
16. Hansen, D., Michalke, G., “Modelling and control of variable-speed multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbine”, *John Wiley & Sons Ltd.*, 11(5): 534-557 (2008)
17. Joos, G. ;Belanger, J., “Real-Time Simulation of a Wind Turbine Generator Coupled With a Battery Supercapacitor Energy Storage System”, *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 57 (4): 1137-1145 (2010).
18. Salehfar, H., “State-of the-Art Power Electronics, Electric Drivers and Renewable Energy Systems Laboratories at the Univercty of North Dakota”, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 261-265 (2005).
19. F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, “Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems”, *IEEE Transaction Power Electron.*, 19 (5): 1184–1194, Sep. 2004.doi:10.1109/TPEL.2004.833453
20. Chen, Z., Spooner, E., “Current source thyristor inverter and its active compensation system”, *IEE Proc. Generation, Transmission Distributions*, 150 (4): 447–454, July 2003.doi:10.1049/ip-gtd:20030304
21. Chen, Z, “Compensation schemes for a SCR converter in variable speed wind power systems”, *IEEE Trans. Power Delivery*, 19 (2): 813–821, April 2004.doi:10.1109/TPWRD.2003.823189
22. Iov, F., Hansen, A. D., Jauch, C., Sørensen, P., Blaabjerg, F., “Advanced tools for modeling, design and optimization of wind turbine systems”, *J. Power Electron.*, 5 (2): 83–98. (2005)
23. Sun, T., Chen, Z., Blaabjerg, F., “Voltage recovery of grid-connected wind turbines after a short-circuit fault”, *Proc. of the 29th Annual Conf. IEEE Industrial Electron. Soc., IECON 2003*, Roanoke, VA, 2723–2728 (2003).
24. BTM Consults Aps. “International wind energy department word market update 2011”, *Forecast 2003-2011*, (2011).
25. Hansen, A. D.,C. Jauch, P. Soerensen, Iov, F., Blaabjerg, F., “Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DigSilent”, *Report Risoe-R-1400 (EN)*, (2003).

26. Michalke G., Hansen, A., D., Hartkopf, T., “Variable speed wind turbines - Modeling, Control and Impact on Power Systems”, *European Wind Energy Conference EWE*, Brussels–Belgium, (2008).
27. “Dynamic Modelling of Doubly-Fed Induction Machine Wind-Generators”, *DIgSILENT GmbH*, (2003).
28. Delarue, Ph.a, Bouscayrol, A., Tounzi, A., Guillaud X., Lancigub G., “Modelling, control and simulation of an overall wind energy conversion system”, *Science direct Renewable Energy*, 28, (2003).
29. Petru, T., Thiringer T., “Modeling of Wind Turbines for Power System Studies”, *Ieee Transactions On Power Systems*, 17 (4), November (2002).
30. Sørensen, P., “Simulation and Verification of Transient Events in Large Wind Power Installations”, *Risø-R-1331(EN)*, (2003).
31. İnternet: <http://www.vestas.com/en/media/brochures.aspx>, (Vestas V82-1.65 MW)
32. Blaabjerg, F., Chen, Z., “Power Electronics for Modern Wind Turbines”, *Synthesis Lectures on power electronics*, (2006).
33. Heier, S., "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", *John Wiley & Sons Ltd*, (1998).
34. İnternet: <http://www.mathworks.com/toolbox.htm>
35. Çolak, İ., “Asenkron Makinalar”, *Seçkin Yayınları*, (2008).
36. Bal, G., “Genelleştirilmiş Elektrik Makinaları Ders Notları”, *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yüksek Lisans Dersleri*, (2008).
37. Ong, C. M., “Dynamic simulations of electric machinery”, *Prentice Hall*, (1998).
38. Krause, P. C., Thomas, C.H., “Simulation of Symmetrical İnduction Machinery”, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, 84: 1038-1053 November (1965).
39. Krause, P. C., Nozari, F., Skvsrenina, T.L., Olive, D.W., “The Theory of Neglecting Stator Transients”, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, 98: 141-148, (1979).
40. Iov F., Hansen, A.D., Sorensen, P., Blaabjerg, F., “Wind turbine blockset in Matlab/Simulink v3.0”, *Aalborg University*, (2004).
41. Mocanu, C.I., “Theory of electrical circuits”, *EDP*, Bucharest (1979).

42. Çolak, İ., Kabalcı, E., “Çok Seviyeli Eviricilerin Kontrol Yöntemleri”, *Tübav Bilim Dergisi*, 1(2): 45-54 (2008).
43. Petersson, A., “Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for wind Turbines”, *Phd Thesis, Chalmers University of Technology*, Göteborg, Sweden, (2005).
44. Demirbaş, Ş., Bayhan, S., “Şebeke Bağlantısız Çift Beslemeli Asenkron Generatörün Doğrudan Gerilim Denetimi”, *Elektrik - Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Eleco, (2010).
45. Demirbaş, Ş., Bayhan, S., "Grid Synchronization of Doubly Fed Induction Generator in Wind Power Systems", III. *International Conference on Power Engineering Energy and Electrical Drives, POWERENG 2011* Spain, Malaga, (2011).
46. İşcan, S., Demirbaş, Ş., “Rüzgâr Türbin Laboratuvarı: Daimi Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgâr Türbini Modellenmesi ve Simülasyonu” *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, IATS-2011*, Elazığ, (2011).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : İŞCAN, Serkan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 24.01.1984 Sorgun
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (368) 271 57 42 - 1181
 Faks : 0 (368) 271 57 40
 e-mail : siscan@sinop.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	M. tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi/ TEF Elektrik Eğitimi Bölümü	2008
Lise	Tuzla A.M.L/ Elektrik Bölümü	2001

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2004-2009	BAŞKENT E.D.A.Ş	Teknik Personel
2009- Halen	Sinop Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce (ÜDS:78.75)

Yayınlar

1. İşcan, S., Demirbaş, Ş., “Rüzgâr Türbin Laboratuvarı: Daimi Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgâr Türbini Modellenmesi ve Simülasyonu” Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS-2011).