

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

**RÜZGÂR TÜRBİNİNDEN BESLENEN VE ROTOR
YANI MATRİS KONVERTER ÜZERİNDEN
ŞEBEKEYE BAĞLI BİLEZİKLİ ASENKRON
GENERATÖRDE GÜÇ DÖNÜŞÜMÜNÜN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
Doç. Dr. Hüseyin ALTUN

HAZIRLAYAN
Ferit AKBALIK

ELAZIĞ-2010

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGÂR TÜRBİNİNDEN BESLENEN VE ROTOR YANI MATRİS KONVERTER
ÜZERİNDEN ŞEBEKEYE BAĞLI BİLEZİKLİ ASENKRON GENERATÖRDE
GÜÇ DÖNÜŞÜMÜNÜN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ferit AKBALIK

(07126101)

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02 Eylül 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Eylül 2010**

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hüseyin ALTUN (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Sedat SÜNTER (F.Ü.)

Doç. Dr. Beşir DANDIL (F.Ü.)

EYLÜL-2010

ÖNSÖZ

Bu tezi hazırlarken çok büyük yardımlarını gördüğüm ve fikirleriyle bana yol gösteren başta danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hüseyin ALTUN' a ve diğer hocalarıma çok teşekkür ederim.

Tez çalışması süresince sabır ve desteklerinden dolayı Arkadaşlarım Arş. Gör. Hüseyin AYDIN' a(Batman Üniv.), Öğr. Gör. Şefik ÜNEY' e (Şırnak Üniv.), Öğr. Gör. Şehmus BADAY' a (Şırnak Üniv.) çok teşekkür eder, şükranlarımı sunarım. Ayrıca manevi olarak yardımlarını esirgemeyen ve sürekli yanımda olan değerli aileme ve diğer tüm dostlarıma çok teşekkür ederim.

Ferit AKBALIK
ELAZIĞ-2010

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET.....	IV
SUMMARY.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLolar LİSTESİ.....	IX
SEMBOL LİSTESİ.....	X
1. GİRİŞ	1
2. RÜZGÂR ENERJİSİ VE RÜZGÂR TÜRBİNLERİ	6
2.1 Rüzgâr Enerjisi.....	6
2.2 Rüzgâr Türbinleri	9
2.2.1 Rüzgâr Türbininin Karakteristikleri	10
2.2.2 Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması	15
2.2.3 Rüzgâr Türbini Elemanları	18
3. ASENKRON MAKİNE MODELLERİ.....	20
3.1 Asenkron Makine Yapısı ve Çalışması	20
3.2 Asenkron Generatör.....	24
3.3 Clarke ve Park Dönüşümleri	27
3.4 Matematiksel Modeller	30
3.5 Modelleme ve Simülasyon Sonuçları.....	36
4. MATRİS KONVERTÖRLER	42
4.1 Giriş	42
4.2 Matris Konverterin Yapısı	43
4.3 Venturini Kontrol Algoritması.....	45
4.3.1 Giriş ve Çıkış Gerilimleri	45
4.3.2 Giriş ve Çıkış Akımları.....	48
4.4 Matris Konverterin Matlab/Simulink Benzetim Çalışması	50
5. RÜZGAR TÜRBİNİNDEN BESLENEN DFIG'in GÜÇ KONTROLÜ	55
5.1 Vektör Kontrol Yöntemi	56
5.2 Simülasyon Modeli ve Sonuçlar	59
5.3 Vektör Kontrol denklemlerinin elde edilmesi.....	66
6. SONUÇ	73
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	77

ÖZET

Günümüzde çevre bilincinin oluşmasıyla insanlar, elektrik enerjisini elde etmek için yenilenebilir enerji kaynaklarından olan ve hızlı bir gelişim süreci yaşayan, temiz ve maliyeti düşük olan rüzgâr enerjisinden giderek daha çok faydalanmaktadırlar. Bu amaçla rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Rüzgâr türbinleri rüzgârdaki kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürürler. Bu mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için bir elektrik generatörüne ihtiyaç vardır. Bu çalışmada; Rüzgâr türbininden beslenen, stator yanı doğrudan ve rotor yanı matris konverter üzerinden şebekeye bağlı sargılı asenkron generatörde güç dönüşümü incelenmiştir. Bunun için rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştürecek olan rüzgâr türbini, rotoru sargılı asenkron generatör ve matris konverter üçlüsü Vektör Kontrol yöntemiyle bu üç birimin matematiksel modeli oluşturulmuştur. Asenkron generatörün d-q referans çatı modeli esas alınarak Matlab/Simulink modeli oluşturulmuştur. Daha sonra Matlab/Simulink ortamında kurulan bu modellerin güç çıkışı, çeşitli çalışma koşulları altında incelenerek sonuçları gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar Türbini, Asenkron Generatör, Matris Konverter, Vektör Kontrol

SUMMARY

Today, with the increase of environmental consciousness, people are benefiting more and more from renewable energy sources to obtain electrical energy, such as wind energy which have the rapid development process and also clean and low-cost. Wind turbines are used for this purpose. Wind turbines convert the kinetic energy into mechanical energy. For conversion of this mechanical energy into electrical energy an electric power generator is needed. In this study, power conversion of a wound-rotor induction generator which was fed by the wind turbine and its stator was directly connected to the network and its rotor was connected to the network via a matrix converter, was investigated. For this purpose, a wind turbine for converting wind energy into electrical energy, a wound-rotor induction generator and a matrix converter were mathematically modeled using the control method, field oriented control. Matlab/Simulink model was obtained based on d-q reference frame model of the induction generator. Then, in the Matlab/Simulink environment, the power output of the induction generator, under various operating conditions, was established and the results were presented.

Key words: Wind Turbine, Induction Generator, Matrix Converter, Vector Control.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1.	Güç katsayısı ile hız oranının değişimi	12
Şekil 2.2.	Rüzgar türbin gücünün rotor hızıyla değişim karakteristiği	12
Şekil 2.3.	Uç hız oranına bağlı eğim açısıyla güç katsayısının değişimi	13
Şekil 2.4.	Rüzgar türbini Matlab/Simulink modeli.....	15
Şekil 2.5.	Rüzgar türbini Matlab/Simulink modelinde T_sürme bloğunun iç yapısı	15
Şekil 2.6.	Yatay eksenli türbinler	16
Şekil 2.7.	Düşey eksenli türbinler.....	17
Şekil 2.8.	Bir rüzgar türbininin elemanları.....	18
Şekil 2.9.a.	Tüp kule	19
Şekil 2.9.b.	Kafes yapılu kule	19
Şekil 2.9.c.	Direk kule	19
Şekil 3.1.	Asenkron makinenin kayma doğrusu	23
Şekil 3.2.	Asenkron makinenin kaymaya göre moment karakteristiği	24
Şekil 3.3.	Asenkron generatör sürekli durum eşdeğer devresi	25
Şekil 3.4.	Stator sargı uçlarına üç fazlı yıldız bağlı uyarma kapasiteleri	26
Şekil 3.5.	Rüzgar türbini-asekron generatör sistemi.....	27
Şekil 3.6.	X_a, X_b, X_c 'nin X_α, X_β 'ya dönüşümü için Matlab/Simulink modeli ...	28
Şekil 3.7.	X_α, X_β 'nın X_a, X_b, X_c 'ye dönüşümü için Matlab/Simulink modeli ...	28
Şekil 3.8.	X_α, X_β 'nın X_d, X_q 'ye dönüşümü için Matlab/Simulink modeli	29
Şekil 3.9.	X_d, X_q 'nın X_α, X_β 'ya dönüşümü için Matlab/Simulink modeli	29
Şekil 3.10.	(a) Üç eksen, (b) durağan iki eksen, (c) hareketli iki eksen değişkenlerinin zamana göre değişimleri	30
Şekil 3.11.	Bilezikli asenkron makinenin toplu parametrelerin gösterimi.....	30
Şekil 3.12.	α eksenli eşdeğer devresi.....	34
Şekil 3.13.	β eksenli eşdeğer devresi.....	34
Şekil 3.14.	d eksenli eşdeğer devresi.....	36
Şekil 3.15.	q eksenli eşdeğer devresi.....	36

Şekil 3.16.	Matlab/Simulink modeli.....	37
Şekil 3.17.	Asenkron makine (ASM) Matlab/Simulink modeli.....	37
Şekil 3.18.	Stator gücü, hava aralığı gücü, mekanik güç ve mil hızının zamanla değişimleri	39
Şekil 3.19.	Türbin momenti, elektromanyetik moment ve mil hızının zamanla değişimleri	39
Şekil 3.20.	Statorun ürettiği 1-faz gerilim ve akımın zamana göre değişimleri	40
Şekil 3.21.	Stator 3-faz akımlarının zamana göre değişimleri.....	40
Şekil 3.22.	Rotor 3-faz akımlarının zamana göre değişimleri	41
Şekil 4.1.	Matris konverter anahtar dizilişleri	43
Şekil 4.2.	Çift yönlü anahtar yapıları	44
Şekil 4.3.	Anahtarların tetiklenme sıraları ve iletimde kalma süreleri	48
Şekil 4.4.	Her bir faza ait giriş akımları ve çıkış akımı bileşenleri	49
Şekil 4.5.	R-L yükünü besleyen matris konverter	50
Şekil 4.6.	Matris konverterin Matlab/simulink blok digramı.....	51
Şekil 4.7.	$q = 73/220$ ve $f_o = 35$ Hz için modülasyon terimleri ve testere dişi sinyal değişimi	53
Şekil 4.8.	$q = 73/220$ ve $f_o = 35$ Hz için anahtarlara uygulanan darbe dizileri.....	53
Şekil 4.9.	$q = 73/220$ ve $f_o = 35$ Hz için çıkış faz gerilimleri	54
Şekil 4.10.	$q = 73/220$ ve $f_o = 35$ Hz için yük akımları.....	54
Şekil 5.1.	Rüzgar türbini ve DFIG'in hız-moment karakteristikleri.....	55
Şekil 5.2.	DFIG'in güç kontrolü şeması	59
Şekil 5.3.	Rüzgar türbininde beslenen rotor yanı matris konverterler üzerinde şebekeye bağlı DFIG'in güç kontrolünün simulink bloku	61
Şekil 5.4.	Türbin momenti, makine momenti ve mil hızının zamanla değişimi	62
Şekil 5.5.	Stator bir faz gerilim ve akımının zamanla değişimi	63
Şekil 5.6.	Rotor bir faz gerilim ve akımın zamanla değişimi.....	63
Şekil 5.7.	Stator ve rotor 3-faz akımlarının zamanla değişimi.....	64
Şekil 5.8.	Rotor 3-faz gerilimlerinin zamanla değişimi	65
Şekil 5.9.	Stator ve rotor d-q akımlarının zamanla değişimi.....	65

Şekil 5.10.	Stator d-q akı fazörünün zamanla değişim	66
Şekil 5.11.	Stator ve rotor aktif güçleri ile makine gücünün zamanla değişimi	66
Şekil 5.12.	Stator ve rotor reaktif güçlerinin zamanla değişimleri.....	67
Şekil 5.13.	Türbin momenti, makine momenti ve mil hızının zamanla değişimi	68
Şekil 5.14.	Stator bir faz gerilim ve akımının zamanla değişimi	69
Şekil 5.15.	Rotor bir faz gerilim ve akımın zamanla değişimi.....	69
Şekil 5.16.	Stator ve rotor 3-faz akımlarının zamanla değişimi.....	70
Şekil 5.17.	Rotor 3-faz gerilimlerinin zamanla değişimi	70
Şekil 5.18.	Stator ve rotor d-q akımlarının zamanla değişimi.....	71
Şekil 5.19.	Stator d-q akı fazörünün zamanla değişim	71
Şekil 5.20.	Stator ve rotor aktif güçleri ile makine gücünün zamanla değişimi	72
Şekil 5.21.	Stator ve rotor reaktif güçlerinin zamanla değişimleri.....	73

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. 1999 yılı verilerine göre dünya rüzgâr enerjisi kurulu gücü.....	7
Tablo 2.2. Ülkemizde bölgelere göre rüzgar dağılımları.....	8
Tablo 2.3. Türkiye 'de rüzgâr enerjisi için yapılan ölçümler	8
Tablo 2.4. Büyüklüklerine göre türbinlerin karşılaştırılması.....	10
Tablo 2.5. Türkiye'de Rüzgâr enerjisi için öngörülen hedefler.....	13
Tablo 3.1. Asenkron makine ve rüzgar türbini parametreleri.....	38

SEMBOLLER LİSTESİ

P_t	: Türbin çıkış gücü
T_t	: Türbin momentini
T_y	: Yük momentini
T_m	: Generatör momentini
P_m	: Generatörün tahrik gücü
P_e	: Şebekeye verilen güç
P_r	: Rotor gücü
P_s	: Stator gücü
P_g	: Hava aralığı gücü
R	: Türbin yarıçapı
B	: Sürtünme katsayısı
S	: Kayma
J	: Eylemsizlik momentini
V_w	: Rüzgar hızı
C_p	: Güç katsayısı
ρ	: Hava yoğunluğu
ζ	: Dönüştürme oranı
λ	: Uç-Hız oranı
ω_t	: Türbin hızı
ω_s	: Generatör senkron hızı
ω_m	: Generatör mil hızı
ω_e	: Döner alan hızı
ω_r	: Rotor elektriksel hızı
f	: Kaynak frekansı
f_r	: Rotor elektriksel frekansı
f_s	: Anahtarlama frekansı
m	: Modülasyon katsayısı
V_{im}	: Sabit giriş geriliminin tepe değeri
V_{om}	: Çıkış geriliminin değişken tepe değeri
ω_i	: Giriş geriliminin frekansı
ω_o	: Çıkış geriliminin değişken frekansı
q	: Talep faktörü
P	: Makine kutup sayısı
θ_r	: Rotorun statora göre elektriksel konum açısı
*	: Kompleks eşlenek
n_s	: Döner alan hızı
n_r	: Rotor hızı
U_s, \dot{I}_s	: Stator akım ve gerilimi
R_s, R_r	: Stator ve rotor sargı direnci
X_{1s}, X_{1r}	: Stator ve rotor kaçak reaktansları
L_{1s}, L_{1r}	: Stator ve rotor kaçak reaktansları
i_r	: Rotor akımı fazörü

i_m	: Miknatıslanma akımı
X_m	: Miknatıslanma reaktansı
L_s, L_r	: Stator ve rotor öz indüktansları
L_m	: Miknatıslanma indüktansı
U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}	: Stator a-b-c faz gerilimleri
$U_{r(a)}, U_{r(b)}, U_{r(c)}$: Rotor a-b-c faz gerilimleri
$U_{s\alpha\beta}$: Stator gerilimi fazörü
$U_{r(\alpha\beta)}$: Rotor gerilimi fazörü
$U_{s\alpha}, U_{s\beta}$: Stator referans çatısında statorun gerilim fazörlerin α - β bileşenleri
$U_{r\alpha}, U_{r\beta}$: Stator referans çatısında rotorun gerilim fazörlerin α - β bileşenleri
U_{sdq}, U_{rdq}	: d-q referans çatısında stator ve rotor gerilim fazörleri
U_{sd}, U_{sq}	: Senkron hızla dönen referans çatıda statorun gerilim fazörün d-q bileşeni
U_{rd}, U_{rq}	: Senkron hızla dönen referans çatıda rotorun gerilim fazörün d-q bileşeni
i_m	: Miknatıslanma akımı
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	: Stator a-b-c faz akımları
$i_{r(a)}, i_{r(b)}, i_{r(c)}$: Rotor a-b-c faz akımları
$i_{s\alpha\beta}$: Stator akımı fazörü
$i_{r(\alpha\beta)}$: Rotor akımı fazörü
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$: Stator referans çatısında statorun akım fazörünün α - β bileşenleri
$i_{r\alpha}, i_{r\beta}$: Stator referans çatısında rotorun akım fazörünün α - β bileşenleri
i_{sdq}, i_{rdq}	: d-q referans çatısında stator ve rotor akım fazörleri
i_{sd}, i_{sq}	: Senkron hızla dönen referans çatıda statorun akım fazörün d-q bileşeni
i_{rd}, i_{rq}	: Senkron hızla dönen referans çatıda rotorun akım fazörün d-q bileşeni
$\Psi_{sa}, \Psi_{sb}, \Psi_{sc}$: Stator a-b-c faz sargılarının akıları
$\Psi_{r(a)}, \Psi_{r(b)}, \Psi_{r(c)}$: Rotor a-b-c faz sargılarının akıları
$\Psi_{s\alpha\beta}$: Stator akı fazörü
$\Psi_{r(\alpha\beta)}$: Rotor akı fazörü
$\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$: Stator referans çatısında statorun akı fazörünün α - β bileşenleri
$\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$: Stator referans çatısında rotorun akı fazörünün α - β bileşenleri
Ψ_{sdq}, Ψ_{rdq}	: d-q referans çatısında stator ve rotor akı fazörleri
Ψ_{sd}, Ψ_{sq}	: Senkron hızla dönen referans çatıda statorun akı fazörün d-q bileşeni
Ψ_{rd}, Ψ_{rq}	: Senkron hızla dönen referans çatıda rotorun akı fazörün d-q bileşeni
DFIG	: Doubly Fed Induction Generator (Bilezikli asenkron generatör)
PWM	: Pulse-Width Modulation (Darbe genişlik modülasyonu)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistör (Geyt'i yalıtılmış bipolar transistör)
ASM	: Asenkron makine

1. GİRİŞ

Artan nüfus ve sanayileşme ile birlikte enerjiye olan ihtiyaç da artmaktadır. Bu artan enerji ihtiyacını karşılamak için, gelecekte tükeneceği bilinen ve çevreye olumsuz etkileri olan fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynakları konusunda yaygın bir şekilde araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Rüzgâr enerjisi gibi yeni enerji kaynaklarının kullanımındaki temel amaç, ihtiyaç duyulan enerjiyi elde etmekle beraber doğayı korumak ve yaşanan ortamı daha iyi bir hale getirmektir. Fosil yakıtların insan sağlığına zarar vermesi, neden olduğu sera gazlarının küresel ısınma ve iklim değişikliğine yol açması, diğer yandan nükleer enerji kaynaklarının toplumsal, çevresel ve ekonomik açıdan maliyetli olması, ülkeleri maliyeti daha az olan ancak çevreye zarar vermeyen alternatif enerji kaynakları arayışına yönlendirmiştir. Rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, insan sağlığı açısından çevrenin korunmasıyla birlikte sürekli enerji kaynakları olarak, günümüzde giderek önem kazanmaktadır.

Rüzgâr enerjisini elde etmede aracı olarak kullanılan makinelerden birisi de rüzgâr türbinidir. Rüzgâr türbini, rüzgârdaki kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren bir makinedir. Elde edilen mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü için, bir elektrik generatörü gereklidir. Rüzgâr gücünden elde edilen elektrik enerjisini uygun bir şekilde kullanabilmek için de; rüzgâr türbini ve elektrik generatörü yanı sıra transformatör, dişli kutusu ve evirici ya da çevirici gibi güç elektroniği devreleri kullanılması gerekir. Rüzgâr enerjisini, elektrik enerjisine dönüştürerek, kullanıma hazır hale getirdikten sonra şebekeye aktaran bu tür sistemler rüzgâr santrali olarak adlandırılırlar.

Rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü sistemlerde, elde edilen elektrik enerjisinin kullanıcı açısından uygun hale gelmesi bakımından, evirici ya da çevirici gibi güç elektroniği devrelerinin kontrolü için çeşitli kontrol teknikleri kullanılmaktadır. Üretilen elektrik enerjisi gerilim ve frekans bakımında uygun hale dönüştürülürken, belli bir kontrol mantığı çerçevesinde rüzgardan optimum enerji elde edilmesi önemlidir. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler, güç kapasitesi yüksek anahtarlama elemanları ve hızlı sinyal işlemcilerinin ortaya çıkması, rüzgar enerjisinden optimum güç elde edilmesini sağlayan sistemlerin tasarımına olanak sağlamıştır.

Rüzgâr türbini ile beraber kullanılan generatörler, rüzgârın doğasından dolayı, gücü devamlı azalıp artan bir mekanik tahrik kaynağı ile çalışmak durumundadır. Rüzgâr santralinde, alternatif akım üretmek için üç fazlı asenkron generatörler de kullanılmaktadır. Değişken hızlı sistemler için rotoru bilezikli asenkron generatörlerin kullanılması uygundur. Çünkü hem rotor hem de stator sargı uçları dışarı alınarak kontrol edilebilirler.

Bir asenkron generatörün, içinde bulunduğu enerji sisteminin çeşitli çalışma koşulları altında, davranışının incelenmesi ve uygun kontrol kurallarının belirlenmesi gerekir. Bu amaçla gerçekleştirilecek sistemi en doğru şekilde temsil edecek matematiksel denklemlere ihtiyaç vardır. Sistemin davranışını veren matematiksel denklemlerin elde edilmesi ve çeşitli çalışma koşulları altında bu denklemleri kullanarak sistem çıkışı hakkında bilgi veren çeşitli bilgisayar programlarının hazırlanmasına modelleme adı verilir. Böylece istenen belli davranış kriterlerini sağlayabilecek kontrol sistemleri geliştirilebileceği gibi, sistemin duyarlılığını ve doğrudan ölçülmesi mümkün olmayan değişkenlerin davranışlarını belirlemek mümkün olur (Sarioğlu vd., 2003).

Mevcut sürücü sistemlerin bir kısmında bir aşamalı dönüşüm yapan doğrudan link konverterler kullanılmaktadır. Doğrudan frekans konverterleri olarak da adlandırılan bu konverterler, ara enerji depolama elemanlarına ihtiyaç duymadan doğrudan ac-ac dönüşüm yaparlar. Konverterde kullanılan yarıiletken anahtarlar konverterin giriş ve çıkış yolları arasına bağlanır. Bir aşamalı dönüşüm yapan ac-ac konverterler, saykıl konverter ve matris konverter olmak üzere iki ayrı yapıya sahiptir. Her iki tip konverter de çok sayıda yarıiletken anahtar elemanlarının ve uygun modülasyon tekniklerinin kullanımını gerektirir.

Matris konverterler doğrudan ac-ac dönüşüm yapan bir konverterdir. Matris konverterde doğrultma ünitesi bulunmadığından dolayı enerjinin depolanması için, kondansatör kullanımına gerek yoktur. Asenkron makine moment-hız değişiminde, dört bölgede de çalışmaya imkân verdiği için matris konverter diğer konverterlere göre üstünlük sağlamaktadır. Her iki yönde de akım geçişi olması, aynı zamanda iki yönlü güç akışını da sağlamaktadır. Giriş ve çıkış dalga şekillerinin sinüzoidal olması ve kontrol edilebilir giriş güç katsayısı, matris konverterlere olan ilgiyi artırmıştır (Sünter ve Altun, 2001). Asenkron makinenin matris konverterden beslenirken denetlenmesinde, vektör kontrol yöntemi kullanılabilir. Bu yöntemde akı ve moment değerleri hesaplanarak doğrudan hız ve güç kontrolü sağlanabilmektedir.

Bu tezin amacına ulaşmasında yararlanılan başlıca kaynaklardan bazılarının içeriği ile ilgili aşağıda bilgi verilmiştir.

Pena ve arkadaşları, rüzgâr enerjisi tahrikiyle Doubly Fed Induction Generator (DFIG) back-to-back Pulse-Width Modulation (PWM) konverterle kontrolü adlı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada back-to-back PWM vektör scherbius şeması ile ilgili deneysel bir çalışma yapmışlardır. Sistemin performansı ile ilgili deneysel sonuçlar sunmuşlardır (Pena vd., 1996).

Zhang ve arkadaşları, DFIG'i süren değişik hızlardaki rüzgâr türbininin güç kontrolü için matris konverteri de kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, aktif ve reaktif gücü kontrol etmek ve rüzgârdan maksimum enerji elde etmeyi amaçlamışlardır. Bu sistemin çalışmasında vektör kontrol yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca sistemin çalışmasının simülasyonu gerçekleştirilmiştir (Zhang vd., 1998).

Bir başka çalışmada ise Demirok ve Sabanovic, şebeke bağlantılı bilezikli asenkron generatörün aktif ve reaktif gücünü ayırıştırarak denetimini yapmışlardır. Stator uçları doğrudan şebekeye bağlanmış bir bilezikli asenkron generatörün şebekeye verdiği aktif ve reaktif gücün uygun referans eksenini seçilmesiyle ayırıştırılmasının denetimini simülasyonla göstermişlerdir (Demirok ve Sabanovic, 2007).

Demirci ve arkadaşları tarafından rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi elde etmek için denetimli asenkron generatör konusunda bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada, rüzgâr gücünden elektrik enerjisi üretimi iki aşamadan gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birincisi mikroişlemcinin sistemi denetlemesi ve maksimum gücün çekilmesi için programlama mantığının hazırlanması, ikincisi ise güç elektroniği devreleriyle üretilen gerilimin genlik ve frekansını denetlenmesidir. Böylece düşük rüzgâr hızında türbin gücünden optimum elektrik enerjisi üretimini gerçekleştirmişlerdir (Demirci vd., 2007).

Petersson, rüzgâr türbinlerinde kullanılan bilezikli asenkron generatörün modellenmesi, analizi ve kontrolü konusunda yazmış olduğu kitabında rüzgâr enerjisi konusunda geniş bir çalışma yapmıştır (Peterson, 2005).

Tapia ve arkadaşları, rüzgâr türbinleri tarafından sürülen bilezikli asenkron generatörlerin kontrolü ve modellenmesi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada gerçek bazı sonuçlar ile rüzgâr türbini tarafından sürülen DFIG'in simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca vektör kontrol yöntemi kullanılarak güç kontrolü gerçekleştirilmiştir (Tapia vd., 2003).

İskender ve Genç, Rüzgâr türbini ile sürülen çift çıkışlı asenkron generatörün incelenmesi ve bulanık mantık kontrol yöntemiyle maksimum çıkış gücünün elde edilmesi ile ilgili çalışmalarında değişken hız, sabit frekans ve sabit gerilim altında çalışan rüzgâr

türbini ile sürülen bilezikli asenkron generatörün kararlı durum karakteristiklerini elde etmişlerdir. Ayrıca benzetim çalışması sonuçlarını ile laboratuvar ortamında hazırlanarak yapılan deneysel çalışma sonuçları karşılaştırarak bulanık mantık kontrol yöntemi kullanılarak rüzgâr türbininden beslenen bilezikli asenkron generatörden maksimum çıkış gücü elde edilebileceğini göstermişlerdir (İskender ve Genç, 2009).

Altun ve Sünter, güç kalitesi korunarak kayma enerjisinin geri kazanımı için, rotor yanı matris konverterden beslenen bilezikli asenkron makine ile ilgili çalışmalarında, makine için değişik çalışma koşulları altında elde ettikleri simülasyon sonuçları ile iyi bir performansla sistemin kontrolünün yapılabileceğini göstermişlerdir (Altun ve Sünter, 2007). Yine aynı araştırmacılar matris konverterden beslenen kafes sargılı asenkron motor sürücüsünün modellenmesi, simülasyonu ve kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Güç kaynağı olarak üç fazlı matris konverter, bu konverterin kontrolü için Venturini kontrol algoritmasını, sürücü sistemin kontrolünde alan yönlendirme kontrol yöntemini kullanarak dört-bölgeli çalışma koşulları altında motor ile ilgili simülasyon sonuçları vermişlerdir (Altun ve Sünter, 2003).

Pinto ve arkadaşları, değişken hızlı rüzgar enerjisi üretim sisteminde matris konverterin kullanımı ve kontrolü konusundaki araştırmalarında, kullandıkları bilezikli asenkron generatörün rotor devresini matris konverterden besleyerek doğrudan kontrolünü sağlamış ve rüzgar enerjisinden maksimum enerji elde etmişlerdir (Pinto vd., 2007).

Barakati ve arkadaşları içinde matris konverter, rüzgâr türbini ve bilezikli asenkron generatör bulunan rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin, rüzgârdan maksimum güç elde edecek şekilde kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminde maksimum rüzgar gücünün takibi için, matris konverter ile asenkron generatör kontrol edilerek bazı simülasyon sonuçları elde edilmiştir (Barakati vd., 2009).

Güç elektroniği devrelerinde kullanılan yarıiletken devre elemanlarının hızındaki artış ve mikroişlemci/mikrodenetleyici teknolojisindeki gelişmeler, asenkron makinelerin kontrolünde büyük kolaylıklar sağlamıştır. Bunun yanı sıra yakın gelecekte tükeneceği bilinen fosil enerji kaynakları, bu kaynakların kullanımı nedeniyle insan ve çevre üzerinde meydana gelen zararlı etkilerden dolayı, çevre dostu ve sürekli olan enerji kaynakları arayışı devam etmektedir. Bilimsel alanda, çevre dostu ve sürekli olan enerji kaynaklarından birisi olan rüzgâr enerjisinden faydalanmak için çalışmalar hızla devam etmektedir. Rüzgâr enerjisinden faydalanırken son teknolojik gelişmeler de dikkate alınması gerekir. Teknolojik gelişmeler dikkate alındığında, rüzgâr enerjisinden daha çok

yararlanılabildiği gibi, rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için kurulan sistemlerin maliyeti daha da düşecektir. Bilim dünyasında, rüzgâr enerjisinden daha fazla ve daha iyi faydalanabilmek için araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Burada verilen bu bilgilerden hareketle, bu çalışmada rüzgâr türbininden beslenen ve rotor yanı matris konverter üzerinden şebekeye bağlı bilezikli asenkron generatörde güç dönüşümü incelenmiştir.

Bu çalışmada, rüzgâr türbininden beslenen ve rotor yanı matris konverter üzerinden şebekeye bağlı bilezikli asenkron generatörde güç dönüşümünü inceleyebilmek için öncelikle, bu konuda yapılan literatür çalışmaları araştırılmıştır. Sonra rüzgâr türbini, asenkron generatör ve matris konverter'in matematiksel modelleri çalışılmıştır. Daha sonra bir bütün olarak rüzgâr türbini, bilezikli asenkron generatör ve matris konverterden oluşan sistemin kontrollü bir şekilde Matlab/Simulink'te simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Sistemin kontrolünde yöntem olarak vektör kontrol yöntemi kullanılmıştır.

İkinci bölümde rüzgâr enerjisinin öneminde bahsedilmiş ve rüzgar karakteristikleri incelenmiştir. Daha sonra rüzgâr türbinleri, çeşitli özelliklerine göre türbin çeşitleri ve türbin elemanlarından bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde asenkron makinenin yapısı ve çalışması hakkında bilgi verilmiş olup asenkron generatörler açıklanmıştır. Daha sonra asenkron makinenin matematiksel model denklemleri çıkartılmış ve simulink benzetimi yapılmıştır. Ayrıca stator gücü, hava aralığı gücü, mekanik güç, mil hızı, türbin moment, elektromanyetik moment ile stator gerilim ve akım değişimleri incelenmiştir.

Dördüncü bölümde matris konverter hakkında genel bilgi verilmiş ve anahtarlama elemanlarının yapısı açıklanmıştır. Ayrıca matris konverterlerin giriş-çıkış akım ve gerilim veren denklemlerinin analizi yapılmıştır. Bu denklemler doğrultusunda matris konverterin simülasyonları yapılmıştır. Talep faktörüne göre modülasyon terimleri, testere dişi sinyal, anahtarlara uygulanan darbe dizileri, çıkış faz gerilimleri ve yük akımı değişimleri incelenmiştir.

Beşinci bölümde rüzgâr santralinden beslenen DFIG'in güç kontrolü yapılmıştır. Kontrol olarak da vektör kontrol yöntemi anlatılmış olup matematiksel denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemler doğrultusunda simülasyonlar yapıp elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. RÜZGÂR ENERJİSİ VE RÜZGÂR TÜRBİNLERİ

2.1. Rüzgâr Enerjisi

Fosil yakıtların yakılması sağlığımıza zarar vermekte ve gezegenimizi tahrip etmektedir. Özellikle petrol ve kömürün yakılması asit yağmurlarına neden olmaktadır. Fosil yakıt tüketimi aynı zamanda dünya iklimini bozan kirleticilerin ana kaynağıdır. Karbondioksit; kömür, petrol ve doğalgaz yanması sonucu oluşan bir yan üründür. Karbondioksit ve sera gazlarının birikimi; enfeksiyon hastalıklarının giderek yayılmasına, fırtınalara, kuraklığa, sel baskınlarına, deniz seviyelerinin yükselmesine ve kıyıların su baskımına uğramasına neden olarak insan sağlığını ve varlığını tehdit etmektedir.

Yıllar öncesinden fosil yakıtların küresel iklim değişimine neden olduğu anlaşılmış ve çevresel endişeler giderek önem kazanmaya başlamıştır. Ancak Dünya fosil yakıtlardan vazgeçmek durumunda olmasına rağmen, üretilmesi gereken elektrik enerjisinin büyük bir kısmı yine kömür, gaz ve petrolden sağlanmaktadır. İklim değişimi sorunu, fosil yakıt arzında görünen belirsizlikler ve giderek artan nüfusun nasıl sürdürülebilir bir yaşama kavuşturulacağı, enerji üretiminin geleceğine bağlıdır. Rüzgâr enerjisinden faydalanarak atmosfere salınan sera gazlarının miktarı azaltılabilir, sonra kullanmak üzere değerli fosil yakıt rezervleri korunabilir.

Atmosfere saldığı sera gazları ile iklim değişikliğine en çok neden olan ülke Amerika Birleşik Devletleri (ABD) dir. Yapılan öngörülere göre sadece elektrik üretim sektöründe 2010 yılında 1 milyar ton karbondioksit fazlası bulunmaktadır. Amerikan Rüzgâr Enerjisi Birliği, 2010 yılında ABD'nin toplam rüzgâr enerjisi kapasitesinin 30000 MW olacağını ve yılda 105 milyar kWh enerji üreteceğini öngörmektedir. Bu ise; 10 milyon konutun enerji gereksiniminin karşılanması, CO₂ emisyonunun 100 milyon ton azaltılması demektir.

1990'lı yıllarda Dünya çapında rüzgar enerjisi % 25.7 oranında artmıştır. ABD ve diğer ülkeler rüzgâr enerjisinin kalifiye imalat ve bakımla ilgili iş sağlamadaki potansiyelinin de farkına varmaya başlamışlardır. Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliğine göre 2010 yılında hedeflenen 40000 MW kapasiteye erişilmesiyle birlikte, yılda 1 milyon kişilik bir istihdam kapasitesinin ortaya çıkacağı öngörülmektedir. Rüzgâr enerjisinin ekonomik büyümeye çevreye maliyet getirmeden katkısı büyüktür. Rüzgâr enerjisinden faydalanmak

üzere kullanılan rüzgâr türbinleri; hava kirliliği yaratmadan ve sera gazları üretmeden enerji üretir. Düşük maliyet, güçlü iş potansiyeli ve az zararlı çevresel etki faktörleri rüzgâr enerjisinin dünyanın enerji geleceğinde önemli rol alacağını göstermektedir. Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği 2020 yılına kadar 100000 MW'lık rüzgâr gücünden yararlanmayı hedeflemiştir. Ayrıca Tablo 2.1'de 1999 yılı itibarıyla dünyanın rüzgar enerjisi kurulu gücü ile ilgili istatistiksel bilgiler verilmiştir.

Tablo 2.1. 1999 Yılı Verilerine Göre Dünya Rüzgâr Enerjisi Kurulu Gücü

Avrupa	6469 MW
Kuzey Amerika	2035 MW
Hindistan	968 MW
Diğer	367 MW
Toplam	9839 MW

Yapılan araştırmaların sonucuna göre fosil enerjisinin 1-2 asırlık ömrü kalması, teknoloji alanındaki gelişmeler ve endüstriyel alanda artan enerji ihtiyacı, dünyada olduğu gibi ülkemizde de yeni enerji kaynakları arayışına ve bu kaynaklardan daha fazla yararlanma imkanlarının geliştirilmesine neden olmuştur. Mamafih dünyada ve ülkemizde yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgâr enerjisinden yeterince yararlanıldığı söylenemez. Bu nedenle günümüzde hala rüzgâr enerjisinden faydalanma imkanlarının geliştirilmesi konusunda araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. 1990 yılından sonra enerji kaynağı olarak rüzgâr enerjisinden faydalanmak üzere geliştirilen rüzgâr santrallerinin kurulu gücü diğer elektrik enerjisi kaynaklarıyla rekabet edecek hale gelmiştir. Güneş enerjisinin %1-2'lik kısmı rüzgâr enerjisine dönüşmekte ve meydana gelen bu rüzgâr enerjisi miktarının %1'i, dünyada mevcut günlük enerji tüketimine eş düşmektedir (Ültanır, 1996).

Dünyada, rüzgâr enerjisinden faydalanılarak elektrik enerjisi üretiminde ABD lider durumundadır. Ancak Batı Avrupa ülkeleri bu farkı çok hızlı bir şekilde kapatmaktadır. ABD her yıl 3 milyon kwh elektrik enerjisi üreterek yaklaşık 1 milyon kişinin yıllık elektrik enerjisi ihtiyacına cevap vermektedir (Ültanır, 1996).

Rüzgâr enerjisi ile ülkemizin enerji açığının yüzde 25'inin karşılanabilmesi mümkün görülmektedir. Uydu aracılığı ile yapılan araştırmalar sonucu ülkemizin 8200 MW rüzgâr gücüne sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durumda rüzgârdan elde edilecek elektrik enerjisi, hiç de azımsanmayacak gibi görünmektedir (Şapçı, 1998). Türkiye'de

Elektrik İşleri Etüd İdaresi kurumuna göre Türkiye’de bölgelere göre rüzgar gücü ve rüzgar hızı dağılımları Tablo 2.2’de ve ülkemizin bazı yörelerinde yapılan rüzgar hızı ölçümlerinin sonuçları Tablo 2.3’te verilmiştir.

Tablo 2.2. Ülkemizde bölgelere göre rüzgar dağılımları

Bölge adı	Ortalama Rüzgâr Gücü Yoğunluğu (W/m²)	Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
Akdeniz	21.36	2.45
İç Anadolu	20.14	2.46
Ege	23.47	2.65
Karadeniz	21.31	2.38
Doğu Anadolu	13.39	2.12
Güneydoğu	29.33	2.69
Marmara	51.91	3.29

Tablo 2.3. Türkiye ‘de rüzgâr enerjisi için yapılan ölçümler

Bölge	Yıllık ortalama rüzgâr hızları (m/s)
Bandırma	5.12
Sinop	4.73
Nurdağı (K.Maraş)	7
Datça	5.85
Akhisar	6.84
Yalıkavak (Bodrum)	5.68
Göktepe (Bitlis)	5.66
Belen (İskenderun)	7.01
Zengen (Bor)	3.54
Didim	4.81
Kocadağ (Çeşme)	9.28
Karabiga (Çeşme)	6.52
Şenköy (Mardin)	7.69
Gökçeada	7.03
Söke	5

Rüzgâr santrallerinin; görsel ve estetik kirliliği, gürültü yapması, kuş ölümlerine neden olması, gerek radyo ve gerekse TV alıcılarında parazitler oluşturması gibi olumsuz çevre etkileri ile kaza olasılıklarından söz edilmektedir. Görüntü kirliliğini engellemek ve

estetik görünümü sağlamak için önlemler alınmaktadır. Türbinlerin haberleşmede parazit oluşturması ise 2-3 km'lik alanla sınırlı kalmaktadır. Rüzgâr çiftliği içerisindeki gürültü, türbinlerin bulunduğu ortamda bile, 85 dB düzeyini aşmamaktadır (Özgür, 2002).

2.2. Rüzgâr Türbinleri

Günümüzde kullanılan fosil yakıtların bilinmediği zamanlarda insanlar su ve rüzgâr gücünden yararlanarak mekanik iş yapmaya başlamışlardır. Tarih süreci içinde rüzgâr gücünden istifade etmek, önceleri düşey milli rüzgâr değirmenleri daha sonra da kuzey Avrupa'da ilk uygulamalarına rastlanan yatay milli rüzgâr değirmenlerinin kullanılması ile başlamıştır. İnsanlık, rüzgâr değirmenlerinden modern rüzgâr santrallerine uzanan teknolojik bir süreç yaşamıştır (Uyar, 1985).

Rüzgâra karşı konan bir engelin hareket etmesiyle rüzgâr enerjisini mekanik enerjiye çevirir. Bu mantıktan hareketle, bir mil etrafında dönebilecek olan pervanenin rüzgâr etkisi ile dönmesi mümkün olmaktadır. Bu düşünce ilk defa rüzgâr değirmenlerinde uygulanmıştır. Günümüzde bu mantık, rüzgârın dairesel hareket eden bir türbin ile frenlenerek, mekanik enerjiye dönüştürülmesi ile bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Bu teknolojiye rüzgâr türbini adı verilmektedir (John ve Nicholas, 1997).

Rüzgâr türbinlerinde bir rotor, bir güç mili ve rüzgârın kinetik enerjisini elektrik enerjisine çevirecek bir generatör bulunur. Türbinlerde ayrıca, dönme oranını ayarlayacak ve kanatların hareketini durduracak bir rotor kontrol mekanizması mevcuttur. Rüzgâr türbininde kanatlar sayesinde, elektrik enerjisi üreten generatör tahrik edilir. Kanatların daha uzun ve rüzgâr şiddetinin büyük olması, rüzgâr türbininden daha fazla elektrik enerjisi üretimine neden olur. Rüzgâr türbinleri çevredeki engellerin rüzgârı kesemeyeceği yükseklikte bir kule üzerine yerleştirilir. Rüzgâr hızı hem yükseklikle artmakta, hem de daha az değişken olmaktadır.

Dünyadaki örneklerine baktığımızda, rüzgâr enerjisi kullanımının iki kısımda incelenmesi gerektiğini görüyoruz. Bu kısımlar; küçük türbinler olarak adlandırabileceğimiz, kişisel kullanıma yönelik sistemler ve büyük türbinler adını alan endüstriyel kullanıma yönelik sistemlerdir.

Büyük türbinler, rüzgâr çiftliği olarak adlandırılan yerlerde kurulur. Bir rüzgâr çiftliğinin toplam gücü 1-150 MW arasındadır. Tek bir türbinin gücü 50 kW'tan 2 MW'a

kadar olabilir. Ancak günümüzde ekonomik şartlar açısından 500 kW'tan küçük türbinler pek fazla kullanılmamaktadır.

Küçük türbinler, genellikle şebekenin olmadığı veya enerji ulaştırmanın ekonomik olmadığı ya da sorunlu olduğu yerlerde kurulur. Şehir dışı yerleşim yerlerinde, çiftlik evlerinde, telekomünikasyon aktarıcılarında, radyo ve orman kulelerinde, askeri tesislerde, demiryolu sinyalizasyonunda, balık çiftliklerinde, seralarda, maden ocaklarında, deniz vasıtalarında ve bazı fabrikalarda küçük rüzgâr türbinleri oldukça uygun kullanım alanlarına sahiptir. Küçük türbinlerin güç değerleri, 0,05-20 kW arasındadır. Bu tip türbinler bakımsız, ya da çok az bakım gerektirecek şekilde hazırlanırlar. İşletme giderleri neredeyse bulunmamakta ve her türlü çevre şartlarına uyum gösterebilecek kapasitededirler. Bu tür rüzgâr türbinlerinde otomatik kontrol mekanizması, türbini aşırı yükten koruyarak çok yüksek rüzgâr hızlarında bile sistemi otomatik korunmalı hale getirmektedir. Büyük rüzgar türbinleriyle küçük rüzgar türbinlerinin çeşitli kullanım özelliklerine göre kıyaslanması Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4. Büyüklüklerine göre türbinlerin karşılaştırılması

Türbin Çeşitleri	Kullanım Alanı	Bir Tek Türbin Gücü	Üretilen Enerjinin Verildiği Yer	Akü İhtiyacı	Bakım Masrafı	Kurulum Masrafı
Büyük Rüzgâr Türbini	Endüstriyel	50kW-2MW	Şebeke	Yok	Var	Yüksek
Küçük Rüzgâr Türbini	Kişisel	50W-20kW	Çiftlik evleri, Telekomünikasyon alıcısı, Radyo kulesi, Seralar Acil Telefonları vb.	Var	Yok	Düşük

2.2.1. Rüzgâr Türbininin Karakteristikleri

Yatay eksenli rüzgâr türbini için mekanik çıkış gücü P_t rüzgâr hızı V_w nin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V_w^3 \quad (2.1)$$

Burada C_p güç katsayısı, ρ havanın yoğunluğu ve R türbin yarıçapıdır. Türbinin momenti, çıkış gücünün mil hızına oranı olarak şu şekilde ifade edilir.

$$T_t = \frac{P_t}{\omega_t} \quad (2.2)$$

T_t türbin momenti ve ω_t türbinin açısal hızıdır. Normal olarak türbin bir generatör miline, generatör milinin hızını istenilen bir aralıkta tutmak için dönüştürme oranı ζ olan bir dişli kutusu üzerinden bağlıdır. Dişli kutusu aracılığıyla mekanik güç iletimi esnasında meydana gelen kayıplar ihmal edildiğinde rüzgâr türbininin, dişli kutusunun generatör tarafına indirgenmiş momenti ve mil hızı aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir.

$$T_m = \frac{T_t}{\zeta} \quad (2.3)$$

$$\omega_m = \zeta \omega_t \quad (2.4)$$

Burada sırasıyla T_m generatörü süren moment ve ω_m ise generatörün mil hızıdır.

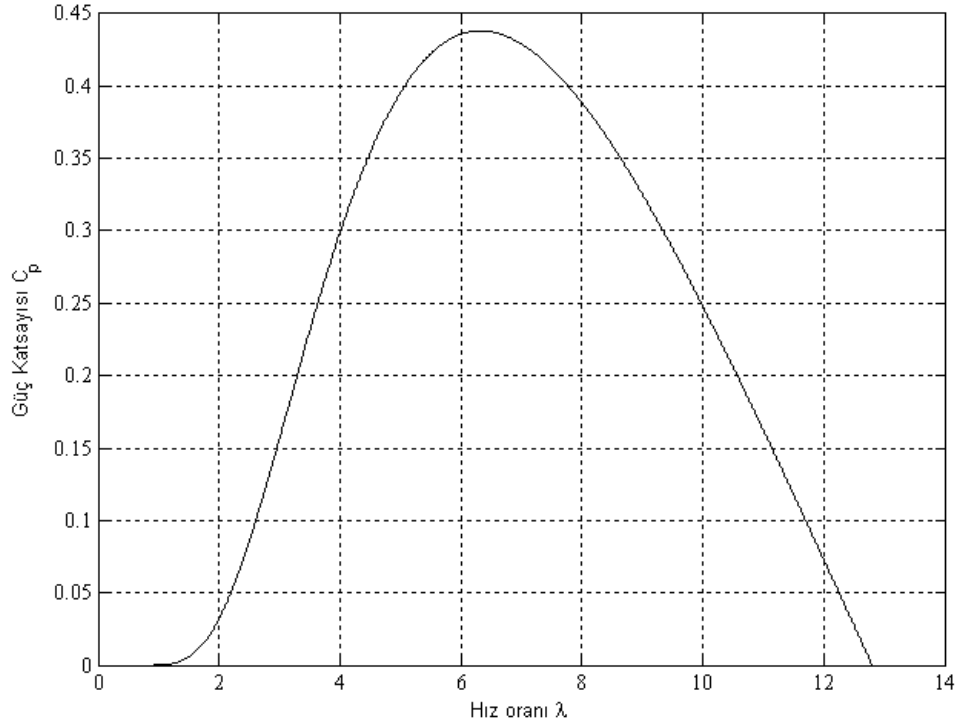
Bir rüzgâr türbini rüzgârla ilgili gücün sadece belli bir yüzdesini üretebilir. Bu yüzde rüzgâr hızının bir fonksiyonu olan C_p , türbinin dönme hızı ve özel türbin kanatlarının adım açısı ile temsil edilmektedir.

Rüzgâr hızı V_w ve rüzgâr türbini dönme hızı ω_t kullanılarak uç-hız oranı olarak adlandırılan λ şu şekilde ifade edilir.

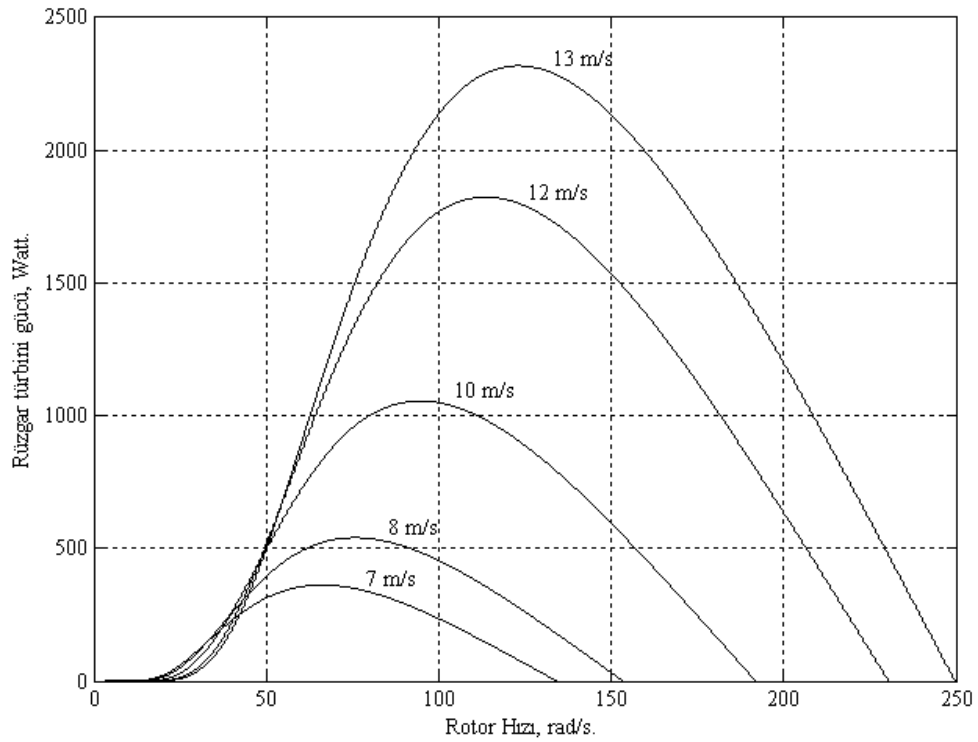
$$\lambda = R \frac{\omega_t}{V_w} \quad (2.5)$$

C_p ve λ arasında doğrusal olmayan ilişki herhangi özel bir türbin için deneysel olarak belirlenebilir. Bu çalışmada kullanılan türbinin $C_p - \lambda$ eğrisi Şekil 2.1'de görülmektedir. Şekil 2.2'de görüldüğü üzere belli bir rüzgâr hızı için farklı rotor hız değerlerinde farklı rüzgâr türbini güç değerleri meydana gelmektedir. Ancak, belli bir rüzgâr hızı için ve belli bir rotor hızında rüzgâr türbini gücü maksimum olmaktadır. Rüzgâr türbini gücünün maksimum olduğu noktada güç katsayısı C_p maksimum olmaktadır. Bu çalışmada kullanılan türbinin güç katsayısı C_p maksimum olduğu noktada değeri 0.44 buna karşı gelen uç-hız oranı λ ise 6.3 civarındadır. Değişken hızlı rüzgâr türbini

tarafından tahrik edilen bilezikli asenkron generatörde, türbinin mil hızı elektriksel olarak ayarlanabilmektedir.

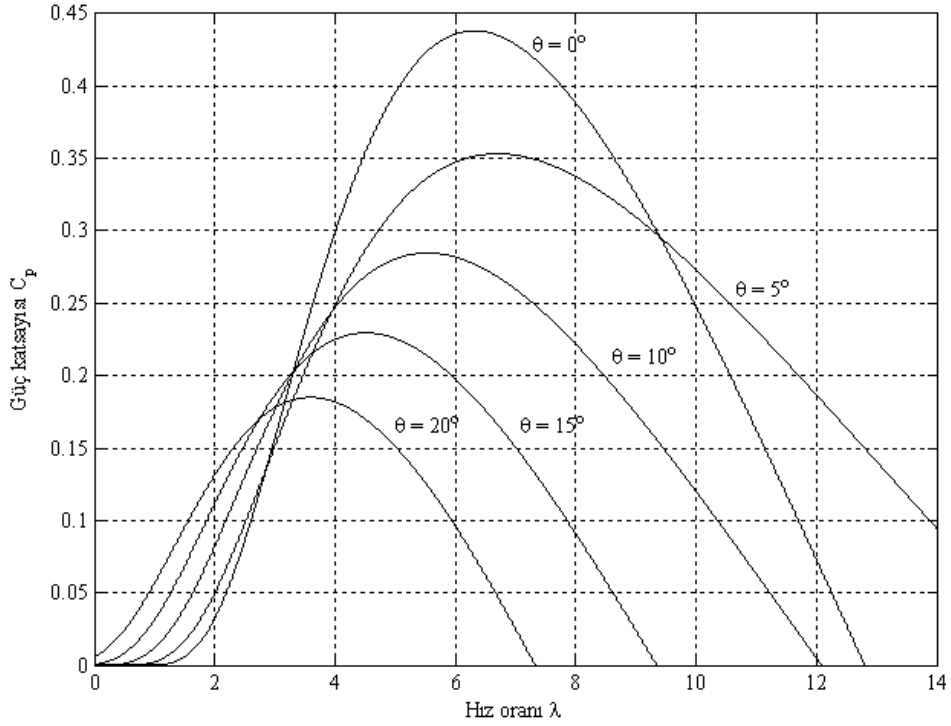


Şekil 2.1. Güç katsayısı ile hız oranının değişimi



Şekil 2.2. Rüzgar türbin gücünün rotor hızıyla değişim karakteristiği

Ayrıca rüzgâr gücünden faydalanılarak elektrik enerjisi elde edilmesinde kullanılan rüzgâr türbini kanatlarının rüzgârın estiği yöne göre açısal olarak ayarlanması söz konusudur. Belli bir rüzgâr hızında bu açının değişimine göre rüzgâr türbini farklı güç karakteristikleri ya da farklı $C_p - \lambda$ karakteristikleri vermektedir. Şekil 2.3'te belli bir rüzgar hızı için rüzgarın estiği yöne göre rüzgar türbini kanatlarının farklı θ konum açılara göre $C_p - \lambda$ karakteristikleri görülmektedir.



Şekil 2.3. Uç hız oranına bağlı eğim açısıyla güç katsayısının değişimi

Ayrıca bu güç, kullanılan generatör asenkron generatör ise, generatörün tahrik momenti, rad/s olarak generatör hızı, generatörün kayma değeri ve rad/s olarak generatörün senkron hızı terimleri cinsinden ifade edilebilir.

$$P_m = P_t - B\omega_m^2 \quad (2.6)$$

$$P_m = T_m \omega_m \quad (2.7)$$

$$P_m = T_m \frac{1-S}{\omega_s} \quad (2.8)$$

Burada P_m generatörün tahrik giriş gücü, B sürtünme katsayısı, ω_m generatör hızı, S kayma ve ω_s generatörün senkron hızıdır.

$$S = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (2.9)$$

Generatörün tahrik momenti T_m türbin momenti T_t ile ilişkisi şu şekilde de ifade edilebilir.

$$T_m = T_t - B\omega_m \quad (2.10)$$

Generatörün tahrik momenti T_m sürekli durumda, sürtünme ve vantilasyon kayıpları $B\omega_m^2$ sistemin kayıp gücü terimi olarak dikkate alındığında, asenkron generatörün ürettiği elektromanyetik moment ile dengelenmektedir. Türbin mili hızının kontrol edilmesi, doğrudan asenkron generatörün gücü tarafından belirlenen T_m momentinin ayarlanmasına bağlıdır. Bu güç bilezikli asenkron generatörün stator ve rotor güç bileşenlerinden oluşmaktadır. Rotor gücü P_r , asenkron generatör çalışma moduna bağlı olarak, şebekeden çekilmekte veya şebekeye verilmektedir. Generatörün alt senkron çalışma modunda ($\omega_m < \omega_s$), rotor gücü pozitif ve şebekeden rotora doğru güç akışı olduğuna işaret etmektedir. Generatörün üst senkron çalışma modunda ise ($\omega_m > \omega_s$), rotor gücü negatif ve rotordan şebekeye doğru güç akışı olduğuna işaret etmektedir.

Rüzgâr türbini ve bilezikli asenkron generatörden oluşan rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi elde edilen sistemden, generatörün stator bakır kayıpları ve generatörün nüve kayıpları ihmal edildiğinde, stator gücü yaklaşık olarak hava aralığı gücüne eşittir.

$$P_s \cong P_g = P_r + P_m \quad (2.11)$$

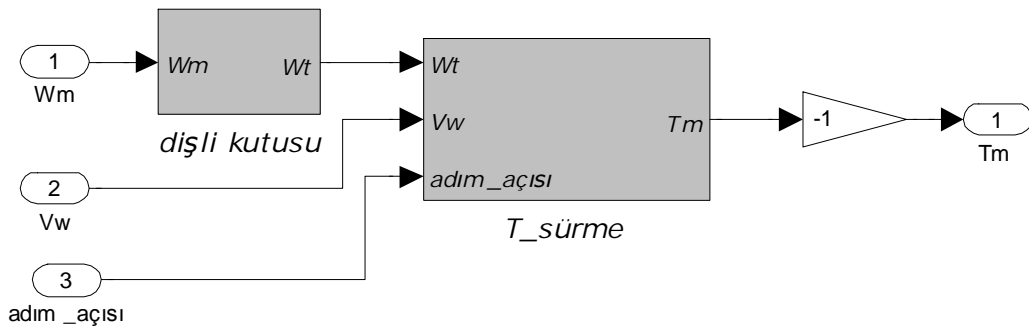
Burada P_g hava aralığı gücü ve P_s stator gücüdür. Böylece generatörün ürettiği ve şebekeye verdiği elektrik gücü $P_s - P_r$ kadar olur. Rüzgar türbininden belli bir rüzgar hızında, Şekil 2.2'deki gibi maksimum güç alınması için, generatöre uygulanan kontrol yöntemi rüzgar türbininin kendi optimal güç eğrisini izlemesine müsaade etmelidir. Yaygın olarak bu anlamda kullanılan kontrol stratejilerinde generatörün rotor hızının kontrolü ve generatörün doğrudan güç kontrolü bulunmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan rüzgâr türbininin güç katsayısı C_p nin uç-hız oranı λ ve konum açısı θ ile ilişkisini amprik olarak ifade eden aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

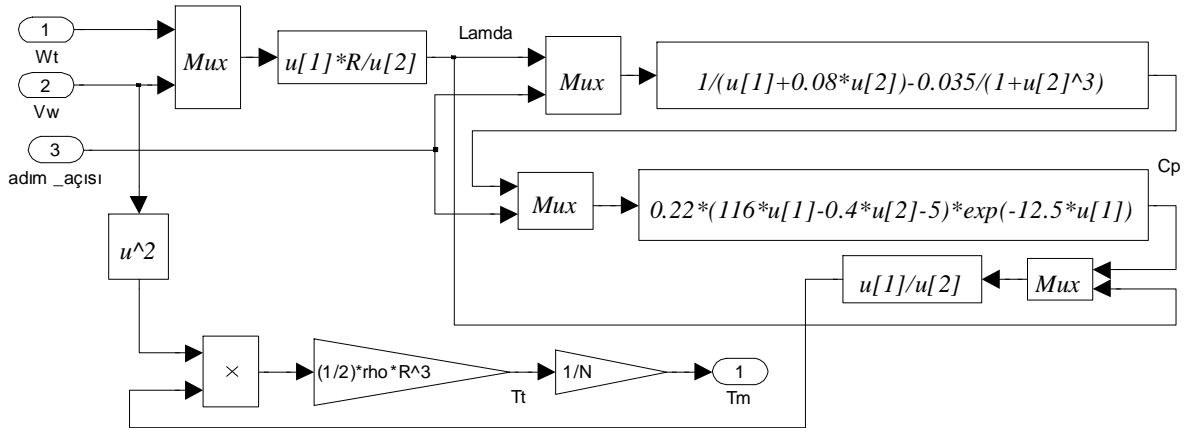
$$C_p(\lambda, \theta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{1 + \theta^3} \quad (2.13)$$

Denklemler (2.1)-(2.13) kullanılarak Matlab/Simulinkte oluşturulan ve Şekil 2.4 ile Şekil 2.5'te gösterilen model program yardımıyla, rüzgar türbiniyle ilgili Şekil 2.1, Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te gösterilen karakteristikler elde edilmiştir.



Şekil 2.4. Rüzgar türbini Matlab/Simulink modeli



Şekil 2.5. Rüzgar türbini Matlab/Simulink modelinde T_sürme blokunun iç yapısı

2.2.2. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgâr türbinleri çeşitli özellikleri ile birbirlerinden ayrılır ve bu özellikleri ile adlandırılırlar. Eksen yapılarına göre rüzgâr türbinleri üçe ayrılır. Bunlar;

olmasıdır. Üç veya daha fazla kanada sahip olan tüm pervaneler bu avantaja sahiptir. Ayrıca, üç kanatlı pervane bu avantajından dolayı rüzgâr türbinleri üzerinde ek bir yük getirmemektedir.

2.2.3 Rüzgâr Türbini Elemanları

Rüzgâr türbinleri rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye, daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bir rüzgâr türbini genel olarak; kule, elektrik generatörü, hız dönüştürücüsü (dişli kutusu), elektrik–elektronik elemanlar ve rüzgâr pervanesinden oluşur. Bir rüzgâr türbinin tüm elemanları Şekil 2.8’de gösterilmiştir.

Rüzgâr türbini, çevredeki engellerin rüzgârı kesemeyeceği yükseklikte bir kule ve bunun üzerine yerleştirilmiş bir gövde ve rotordan oluşmaktadır. Kulenin yüksek olması, yeryüzüne yakın rüzgâr profilinin yüksek hızdaki kısmını kullanmaya da yarar. Rüzgârın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Rotor milinin devir hareketi hızlandırılarak, gövdedeki generatöre aktarılır. Generatörden elde edilen elektrik enerjisi aküler vasıtasıyla depolanarak veya direkt olarak alıcılara ulaştırılarak kullanılır.



Şekil 2.8. Bir rüzgâr türbininin elemanları

Rotor Kanatları: Modern kanatların çoğu güçlendirilmiş fiber glass malzemeden yapılır. Epoxy ve güçlendirilmiş fiber polyester buna örnek verilebilir. Karbon fiber kullanımı da diğer bir seçenektir. Ancak bu malzemeler türbin kanadı için ekonomik bir seçenek

değildir. Alüminyum ve çelik kanatlarda sağlamlıklarına karşın ağırlıkları ile dezavantajlıdır. Bu tip kanatlar sadece küçük rüzgâr türbinlerinde kullanılır.

Yaw mekanizması: Yaw mekanizması, türbinlerde rüzgârın sürekli rotora doğru yönelmesini sağlayan sistemdir. Rüzgâr türbinlerinde eğer rüzgâr yönü rotora dik konumda ise bu duruma yaw hatası denir. Bu hata sonucu rotor, rüzgar enerjisinden daha az bir şekilde yararlanır. Bu durum çıkış gücünün kontrolü ile belirlenir. Diğer yandan yaw mekanizması rotoru bu konumdan alarak rüzgâra doğru yöneltir.

Kule: Kule, rüzgâr türbinlerinde nacelle ve rotoru taşır. Kuleler genellikle tüp şeklinde çelik, kafes yapılı veya betonarme olarak inşa edilir. Tüp şeklindeki kule en çok tercih edilen kule şeklidir. Şekil 2.9.a'da tüp şeklinde kule kullanan rüzgar türbinleri görülmektedir. Genellikle 20-30 metre yükseklikte üretilir. Kafes yapılı kuleler çelik profillerin kaynak yapılarak birleştirilmesi ile oluşturulur (Şekil 2.9.b). En temel avantajları maliyetlerinin düşük olmasıdır. Benzer boyutlarda bir tüp kulenin hemen hemen yarısı kadar malzeme ve yapım maliyeti vardır. Birçok küçük türbin halat destekli direk tipi kule kullanılarak inşa edilir. En büyük avantajı ağırlığının çok az ve maliyetlerinin çok düşük olmasıdır. Şekil 2.9.c'de bu kule tipine bir örnek görülmektedir. Dezavantajları ise arazi kurulum zorluğu ve tarım alanlarının kullanımını engellemesidir.



a)

b)

c)

Şekil 2.9. a) Tüp kule, b) Kafes yapılı kule, c) Direk kule

3. ASENKRON MAKİNE MODELLERİ

Günümüzde asenkron makineler endüstrinin her kolunda ve bir çok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Asenkron makineler basit yapıda, sağlam, ucuz, güvenilir ve az bakım gerektiren makinelerdir. Üç fazlı ve tek fazlı olarak imal edilirler. Bu bölümde ele alınacak asenkron makine üç fazlı asenkron makinedir.

Meydana gelen teknolojik gelişmelerle beraber asenkron makinenin daha verimli kullanımı için çeşitli kontrol teknikleri de geliştirilmiştir. Makinenin kontrolünde genel olarak skaler ve vektörel kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Vektörel kontrol yöntemi kullanıldığında skaler kontrol yöntemine göre makine daha verimli ve etkin olmaktadır. Ancak vektörel kontrol yönteminin uygulanması için daha karmaşık hesap algoritmaları gerekir. Ayrıca asenkron makinenin boşa ve hafif yük altında güç faktörünün küçük olması, bunun yanı sıra bu güç faktörünün kontrol edilememesi bir dezavantajdır.

3.1 Asenkron Makine Yapısı ve Çalışması

Asenkron makineler motor olarak stator sargıları ile aldığı elektrik enerjisini rotorundan dönme hareketi yaparak mekanik enerjiye ve generatör olarak, rotorundan aldığı mekanik enerjiyi, bazı koşullar altında, stator sargılarında elektrik enerjisine çeviren makinelerdir. Asenkron makine başlıca *stator* ve *rotor* olmak üzere iki kısımdan oluşur.

Stator Yapısı: Stator makinenin sabit olan kısmıdır. Statorda manyetik akıyı ileten stator sac paketi ile stator sargısı bulunur. Stator sac paketi elektriksel olarak izole edilmiş çok ince silisyumlu demir saclarının bir araya getirilerek ve yüksek basınç altında sıkıştırılması ile elde edilir. Demirden sac paketi pres kalıplar kullanılarak içinde üç fazlı sargının yerleştirileceği çeşitli biçimlerde oyuklar açılır. Neticede ortaya çıkan her iki oyuk arasındaki dişlerle birlikte oluşan demir nüvenin stator gövdesine bağlantısını sağlamak için ayrıca nüve üzerinde çeşitli yerlerde vida delikleri de açılır. Stator nüvesinde açılan oyukların biçimleri makinenin elektrik karakteristiklerine yansımaktadır. Stator nüvesindeki oyuklara yerleştirilen üç fazlı stator sargısı sayesinde stator-rotor arasındaki hava aralığında genliği sabit ancak, stator sargısının beslediği kaynak frekansına ve kutup sayısına bağlı döner hareket yapan bir elektromanyetik alan meydana gelmektedir.

Rotor Yapısı: Rotor asenkron makinenin dönen kısmı olup, rotor sac paketi ile rotor üç-faz sargısından oluşur. Rotor sac paketi de stator sac paketi gibi silisyumlu demirden elektriksel olarak izole edilmiş ince sac levhalarının bir araya getirilerek yüksek basınç altında preslenmesiyle elde edilir. Rotor sac levhalarında da üç-faz sargısının yada rotor çubuklarının yerleştirilmesi için özel kalıplar yardımıyla pres altında oyuklar açılır. Yine neticede ortaya çıkan her iki oyuk arasındaki dişlerin biçimleri makinenin çalışma karakteristiklerine yansımaktadır. Asenkron makinenin rotorunda indüksiyon akımlarının iletimi için kısa devre bileziklerle beraber alüminyumdan çubuklar kullanılırsa, makine sincap kafesli/kafes sargılı asenkron makine adını alır. Asenkron makinenin rotorunda statordakine benzer ve eşit sayıda kutba sahip üç fazlı bir sargı yerleştirildiği durumda ise, makine rotoru sargılı/bilezikli asenkron makine adını alır. Yalnız, bilezikli asenkron makinede rotora yerleştirilen üç fazlı sargının uçları fırça ve kaygan bilezikler aracılığı ile dışarıya alınmaktadır. Dışarıya alınan bu uçlar ileride makine için yol vermede ve makinenin kontrolünde kullanılabilir.

Asenkron makinenin motor modunda çalışması durumunda, stator üç-faz sargısına üç fazlı kaynaktan gerilim uygulanarak, sargıdan üç-faz akımlarının akmasına neden olunur. Bu akımlar sayesinde oluşan döner manyetik alan, rotor oyuklarına yerleştirilmiş üç-faz sargısının iletkenlerini ya da kafes sargısının iletken çubuklarını keserek rotorda akımların indüklenmesine neden olur. Bu bakımdan asenkron makinenin temel çalışmasında döner manyetik alan çok önemli bir faktördür. Rotordaki indüksiyon akımları ile döner manyetik alan etkileşerek rotor iletkenleri üzerinde kuvvetler meydana gelir. Bu kuvvetler sayesinde oluşan elektromanyetik moment nedeniyle rotor bir dönme ekseninde hareket eder (Chapman, 2007).

Stator üç-faz sargısı akımları sayesinde meydana gelen döner manyetik alanın hızı kaynak frekansına ve motorun kutup sayısına bağlı olarak şu şekilde ifade edilir.

$$n_s = \frac{120 f}{P} \quad (3.1)$$

Burada n_s d/dk olarak döner alan hızı (senkron hız), f kaynak frekansı ve P makinenin kutup sayısıdır. Makinenin motor çalışmasında rotordaki akımlar indüksiyon yoluyla meydana geldiği için, rotorun dönme hızı ile döner alanın hızı arasında her zaman bir fark olmalıdır. Asenkron makine teorisinde bu hız farkının senkron hıza oranına kayma denilmektedir. S kayma ve n_r d/dk olarak rotor hızı olmak üzere;

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.2)$$

ifadesi sıkça kullanılmaktadır. Burada rad/s olarak döner alan ve rotor mekaniksel hızları, d/dk olarak döner alan ve rotor hızları cinsinden ifadeleri ile kutup sayısı bakımından elektriksel ve mekaniksel frekanslar arasındaki ilişkiler dikkate alındığında, S kayma değeri bir çok şekilde ifade edilebilir.

$$\omega_s = \frac{2\pi}{60} n_s \quad \text{ve} \quad \omega_m = \frac{2\pi}{60} n_r \quad (3.3)$$

$$\omega_m = \frac{2}{P} \omega_r \quad \text{ve} \quad \omega_s = \frac{2}{P} \omega_e \quad (3.4)$$

$$\omega_e = 2\pi f \quad \text{ve} \quad \omega_r = 2\pi f_r \quad (3.5)$$

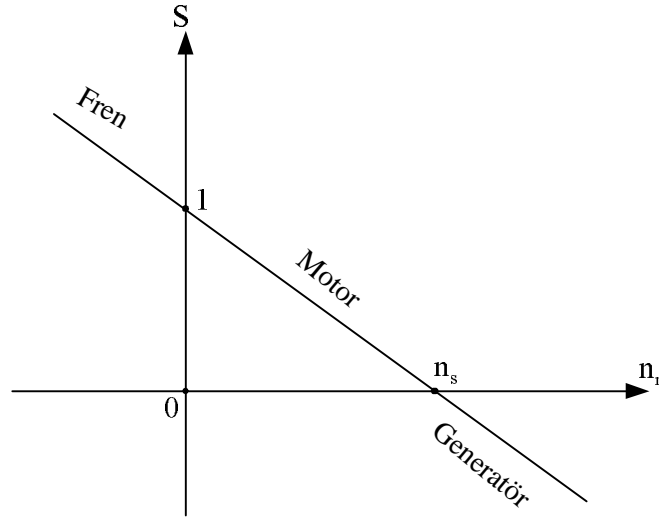
$$S = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} = \frac{f - f_r}{f} \quad (3.6)$$

Burada ω_s , ω_m rad/s olarak sırasıyla döner alan ve rotor mekaniksel hızlarıdır. ω_e , ω_r ise rad/s olarak sırasıyla döner alan ve rotor elektriksel hızlarıdır. f_r rotor dönme hareketinin Hz olarak elektriksel frekansıdır.

Asenkron makine motor modunda çalıştığı zaman rotor hızı en fazla senkron hıza ulaşabildiği için kayma değeri $0 \leq S \leq 1$ aralığındadır. Burada kayma değeri sıfır iken makinenin hızı senkron hız kadar ve kayma değeri bir iken, makine enerjili olduğu halde, rotor hızının sıfır olduğuna işaret etmektedir. Kayma değeri bir iken makine yol alabilmesi için kalkış momenti üretmek zorundadır. Aynı zamanda kayma değeri sıfır iken rotor hızı döner alan hızı kadar olduğu için, rotor iletkenlerinde indüksiyon akımları meydana gelmediğinden, makine herhangi bir moment üretememektedir. Bunun yanı sıra makine $0 \leq S \leq 1$ aralığında, yani motor modunda çalışıyorsa rotor döner alanın yönünde dönmek zorundadır. Makinenin kayma değeri $S > 1$ ise, denklem (3.2)'ye göre döner alana rağmen rotor ya dışarıdan herhangi bir müdahaleyle ya da stator sargısını besleyen üç fazlı kaynağın herhangi iki fazının yer değiştirmesinden dolayı, döner alanın tersi yönünde dönmektedir anlamına gelir. Bu durumda müdahalenin büyüklüğüne bağlı olarak döner alan nedeniyle rotor iletkenlerinde rotorun hareket ettiği yönün tersi yönünde kuvvetler oluşacak şekilde akımlar indüklenerek motor frenlenmeye çalışılacaktır. Makinenin kayma

değeri $S < 0$ olduğunda ise, yine denklem (3.2) yada (3.6)'ya göre rotor hızı dışarıdan bir müdahaleyle veya bir kontrol mekanizmasıyla, senkron hızın üzerine çıktığı anlamına gelir. Müdahale olmadan bir asenkron makinenin rotor hızının senkron hızın üzerine çıkması mümkün değildir. Asenkron makinenin stator uçları besleme kaynağına bağlı olması kaydıyla, rotor hızı senkron hızın üzerine çıktığı zaman ($S < 0$), stator akımları 180° yön değiştirir. Bu durumda rotor hızının senkron hızın üstüne çıkmasına neden olan mekanik güç elektriksel güce dönüştürülerek, makine generatör olarak çalışmaya başlar.

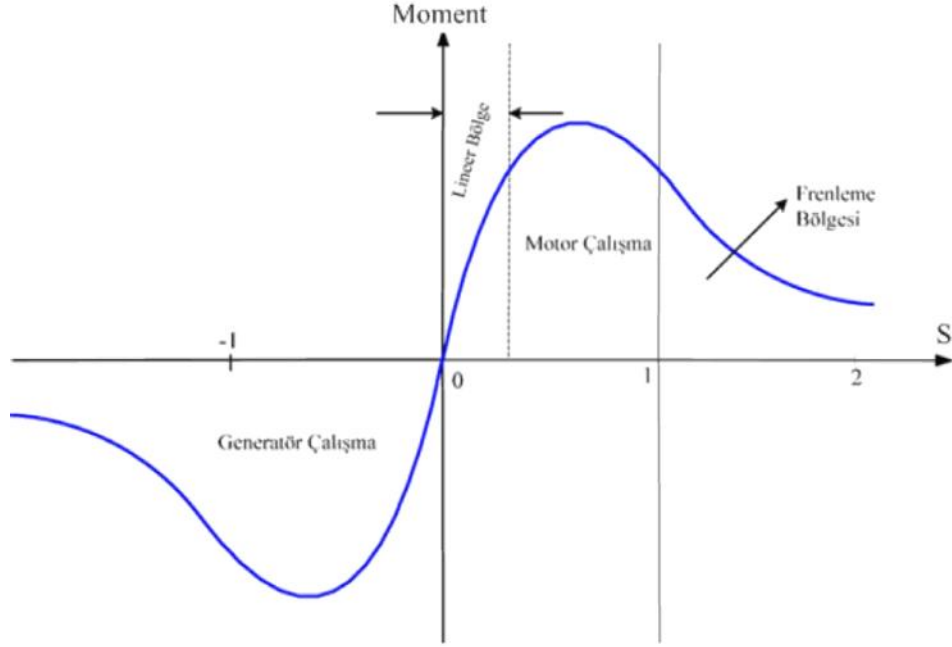
Şekil 3.1'de asenkron makinenin rotor hızına göre kayma doğrusu ve makine çalışma bölgeleri gösterilmiştir. Şekilden rotor hızı $0 \leq n_r \leq n_s$ aralığında olduğunda kayma değeri $0 \leq S \leq 1$ aralığında olduğu ve makinenin motor modunda çalıştığı, $n_r > n_s$ olduğunda kayma değeri $S < 0$ olduğu ve makinenin generatör modunda çalıştığı, $n_r < 0$ olduğunda ise kayma değeri $S > 1$ olduğu ve makinenin fren modunda çalıştığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.1. Asenkron makinenin kayma doğrusu

Şekil 3.2'de ise bir asenkron makinenin kaymaya göre moment değişimi verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi moment-S düzleminde değişim iki bölgedir. Birinci bölgede, yani kayma $0 \leq S \leq 1$ aralığında olduğunda moment ve hız pozitifdir. Makinenin gücü moment ve hız çarpımıyla orantılı olduğu için, bu aralıkta makinenin motor modunda çalıştığı söylenebilir. Yine birinci bölgede, $S > 1$ için rotor hızı negatif ve üretilen moment pozitifdir. Burada ise makinenin gücü negatif olduğu ve frenleme bölgesinde çalıştığı söylenebilir. Son olarak moment-S düzleminin üçüncü bölgesinde, yani $S < 0$ olduğunda

rotor hızı pozitif ve üretilen moment negatif işaretlidir. Bu nedenle bu bölgede makine generatör modunda çalışmaktadır.



Şekil 3.2. Asenkron makinenin kaymaya göre moment karakteristiği

3.2. Asenkron Generatör

Asenkron generatör, yapılış bakımından asenkron motor ile aynıdır. Asenkron generatörler sargılı, sincap kafesli bir, iki, üç ve çok fazlı yapılabirler. Çalışma ilkesi bakımından asenkron generatör bir mekanik sürücü motor, buhar türbini, gaz türbini yada rüzgar türbini ile senkron hızın üstünde döndürülmesi ve mıknatıslanma akımını sağlayacak bir şebekeye bağlı olması lazımdır. Mıknatıslanma akımı endüktif bir akımdır. Bu akımı, asenkron generatörün bağlı olduğu şebekedeki senkron generatörler ya da senkron generatörler bulunmuyor ise kapasitelerden sağlar (Sarioğlu vd., 2003).

Dönme hızları sabit değildir, fakat dönme hızı yükü çok az değişir. Döner hareket yapan diğer makinelere kıyasla daha sağlam, daha az bakım isteyen ve daha ucuz makinelerdir. Güç elektroniği alanındaki teknolojik gelişmelerle beraber, asenkron generatörlerin kontrolü kolayca yapılabilmektedir. Bir asenkron makine generatör olarak çalıştığında aşağıdaki durumlar oluşur.

1. Rotor dönme hızı döner alanın hızından (senkron hız) büyük olur ($n_r > n_s$).

2. Kayma negatif olur ($S < 0$).
3. Stator akımı I_s 'nin fazı 180^0 değişir.
4. Generatör şebekeye elektrik gücü verir.
5. Generatör milinden mekanik güç (P_m) alır ve stator sargı uçlarının bağlı olduğu şebekeye elektrik gücü (P_e) verir ($P_m > 0$ ve $P_e < 0$).

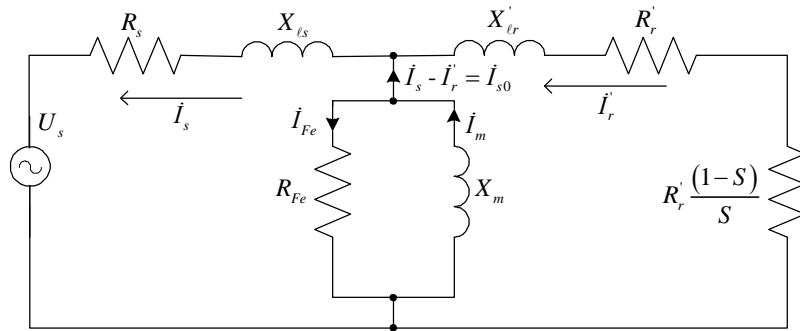
Bir asenkron genratörün sürekli durum için kullanılan eşdeğer devresi Şekil 3.3'te görülmektedir. Bu devre ise asenkron motorun sürekli durum eşdeğer devresine benzemekle beraber, aradaki fark rotor tarafında kullanılan kaymanın negatif alınmasıdır. Yani, asenkron motorun gerilim denklemlerinde kayma negatif alınırsa, asenkron genratörün gerilim denklemleri elde edilmiş olur.

$$U_s = R_s \dot{I}_s + jX_{ls} \dot{I}_s + jX_m (\dot{I}_s - \dot{I}_r) \quad (3.7)$$

$$0 = \frac{R_r'}{(-s)} \dot{I}_r + jX_{lr}' \dot{I}_r - jX_m (\dot{I}_s - \dot{I}_r) \quad (3.8)$$

$$\frac{R_r'}{s} \dot{I}_r = jX_{lr}' \dot{I}_r - jX_m (\dot{I}_s - \dot{I}_r) \quad (3.9)$$

Burada U_s, \dot{I}_s sırasıyla stator gerilimi ve stator akımının fazörleri; R_s, R_r' stator ve rotor dirençleri ve X_{ls}, X_{lr}' stator ve rotor kaçak reaktanslarıdır. \dot{I}_r' rotor akımının fazörü ve X_m ise mıknatıslanma reaktansdır. Şekil 3.3'te verilen eşdeğer devrede demir kayıpları temsil eden R_{Fe} direncinden geçen akım mıknatıslanma reaktansından geçen akım yanında ihmal edilerek yukarıdaki denklemler yazılmıştır. Denklemler (3.7)-(3.9)'da görüldüğü gibi kayma negatif alınınca, rotor direnci negatif bir direnç olur. Negatif direnç, bir gerilim kaynağı gibi etki yapacak ve rotor akımının fazı değişecektir.

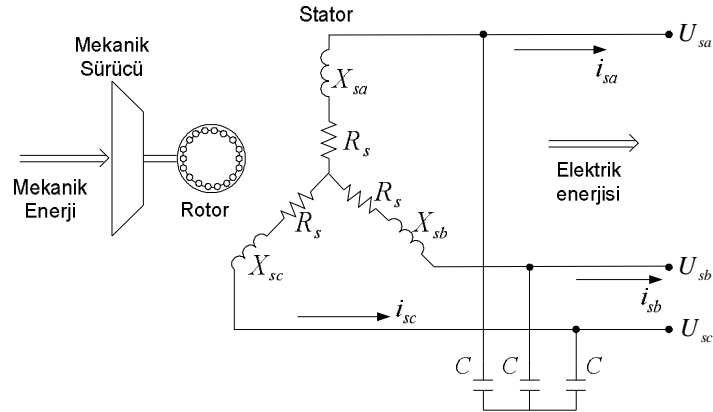


Şekil 3.3. Asenkron genratör sürekli durum eşdeğer devresi

Senkron generatörün olmadığı bir şebekede asenkron generatör tek başına çalışamaz. Çünkü endüktif bir akım olan mıknatıslanma akımı i_m , ya senkron generatör yada kapasiteler tarafından verilebilir. Şebekeye direkt bağlı olan asenkron generatör için frekansı senkron generatörler belirler. Bir asenkron makinenin tek başına generatör olarak çalışabilmesi için;

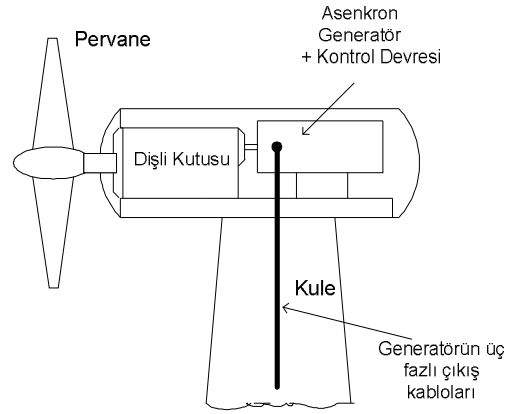
1. Endüktif bir akım olan i_m mıknatıslanma akımının sağlanması,
2. Makinenin daha önceki çalışmalarından dolayı kutup ayaklarında kalıcı bir mıknatısiyet alanının bulunması gerekir.

Asenkron generatörünün kalıcı mıknatısiyetinin daha önceki çalışmalarından var olduğu kabul edilerek; 2. Maddedeki koşul yerine getirilmiş olur. Madde 1.'deki koşul, asenkron makine stator sargı uçlarına üç fazlı kapasiteler bağlanarak sağlanır. Şekil 3.4'te bu kapasitelerin bağlantı şekli gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Stator sargı uçlarına üç fazlı yıldız bağlı uyarma kapasiteleri

Hem sincap kafesli hem de bilezikli asenkron generatör, rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretmek için kullanılabilirler. Asenkron generatörler rüzgâr türbininin rotoruna bir dişli takımı üzerinden bağlanır. Şekil 3.5'te rüzgâr türbinine bir dişli sistem üzerinden bağlanan asenkron generatöre ilişkin basit bir prensip şeması verilmiştir. Günümüzde rüzgâr türbini-asekron generatör sistemi ile 0,6 kW'dan 1 MW-4 MW'a kadar güç üretilmektedir. Türbin-generatör sistemi 50 m yüksekliğinde kulelerin üstüne yerleştirilir. Pervane 3 kanatlı ve 50 m çapına kadar üretilebilmektedir. Asenkron generatörlerin yer aldığı rüzgâr türbinlerinden elde edilen enerjinin kullanılmasına ve generatörün kontrol edilmesine ilişkin değişik sistemler bulunmaktadır.



Şekil 3.5. Rüzgar türbini-asenron generatör sistemi

Sabit hızlı sistemde makinenin stator faz uçlarına şebekeye bağlı olduğu için gerilimi değişmeyeceğinden değişen rüzgâr hızındaki iniş çıkışlar ve bununla bağlı olarak mildeki gücün benzeri şekilde değişmesi nedeniyle generatörden çekilen akımlarda dalgalanmalar meydana gelir. Bu ise generatörün bağlı olduğu şebekenin gücü fazla değilse, şebekede titreşimlere neden olur.

Motor çalışması ve generatör çalışması için, hem geçici durum hem de sürekli durum analizleri yapmak gerekirse, asenkron makine modellemelerinde önce uygun matematiksel model denklemlerinin ortaya konması gerekir. Bu denklemlerin ortaya konulmasında literatürde yer alan ve sıkça kullanılan Clarke ve Park dönüşümlerinden faydalanılır. Bu dönüşümler kullanıldığı takdirde makine için elde edilen matematiksel denklemlerden hareketle makinenin dinamik performansı ile ilgili çeşitli analizler yapılabilir.

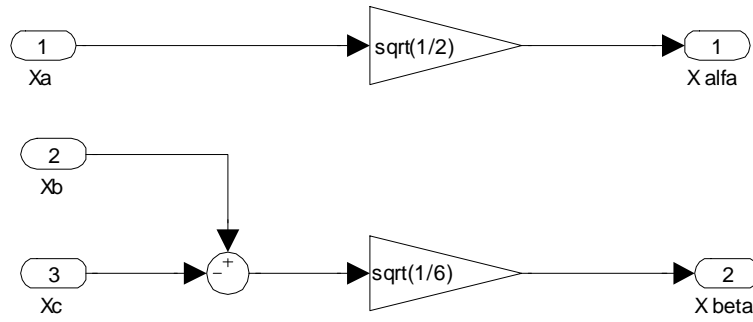
3.3. Clarke ve Park Dönüşümleri

Asenkron makinenin stator ya da rotoruna ait $a-b-c$ üç faz akım, gerilim ya da akı değişkenleri durağan ve birbirlerine dik iki eksen değişkenlerine dönüştürülebilir. Aralarında 120° açı farkı bulunan $a-b-c$ üç eksenli koordinat sistemi değişkenlerinin, aralarında 90° açı farkı bulunan $\alpha - \beta$ iki eksenli koordinat sistemi değişkenlerine dönüşümü için Clarke dönüşümü kullanılır. Benzer şekilde iki eksenli koordinat sisteminin değişkenleri kullanılarak üç eksenli koordinat sisteminin değişkenleri de elde edilebilir. Bu çift yönlü dönüşümde değişkenlerin hız ve zamana bağlı bağımlılıkları devam etmektedir. Asenkron motorun stator ya da rotoruna ait üç fazlı akım, gerilim veya akı değişkenleri

sırasıyla X_a, X_b, X_c olmak üzere ve $\alpha - \beta$ eksenli değişkenleri de X_α, X_β olmak üzere aralarında şu eşitlik bulunmaktadır.

$$\begin{aligned} X_\alpha &= \frac{1}{\sqrt{2}} X_a \\ X_\beta &= \frac{1}{\sqrt{6}} (X_b - X_c) \end{aligned} \quad (3.10)$$

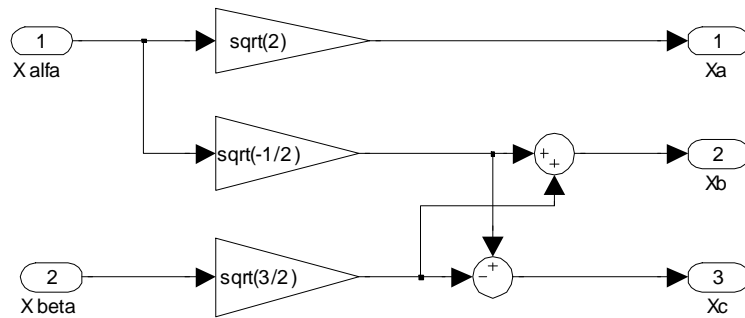
Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak verilen $a-b-c$ üç eksenli değişkenler, $\alpha - \beta$ iki eksenli değişkenlerine dönüşümü için Şekil 3.6'da Matlab/Simulink modeli görülmektedir.



Şekil 3.6. X_a, X_b, X_c 'nin X_α, X_β 'ya dönüşümü için Matlab/Simulink modeli

Aynı zamanda makine analizinde $\alpha - \beta$ iki eksenli değişkenlerin $a-b-c$ üç eksenli değişkenlere dönüşümü gerekebilir. Bu nedenle aşağıda bu dönüşüm için denklem (3.11) ve bu denklemden yararlanılarak elde edilen Matlab/Simulink dönüşüm modeli Şekil 3.7.'de verilmiştir.

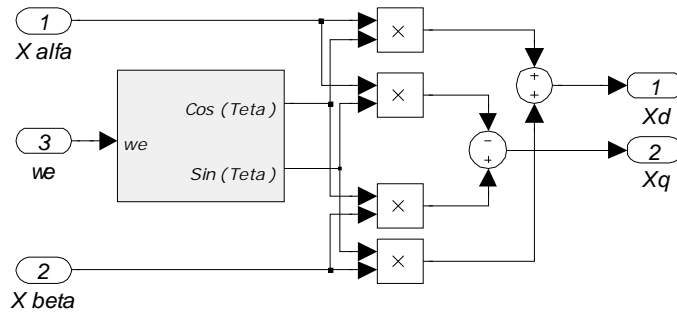
$$\begin{aligned} X_a &= \sqrt{2} X_\alpha \\ X_b &= -\frac{1}{\sqrt{2}} X_\alpha + \sqrt{\frac{3}{2}} X_\beta \\ X_c &= -\frac{1}{\sqrt{2}} X_\alpha - \sqrt{\frac{3}{2}} X_\beta \end{aligned} \quad (3.11)$$



Şekil 3.7. X_α, X_β 'nin X_a, X_b, X_c 'ye dönüşümü için Matlab/Simulink modeli

$\alpha - \beta$ ekseninde bulunan değişkenlerin $d-q$ eksenine dönüşümü de makine analizinde kullanılmaktadır. Yani, $d-q$ eksen dönüşümünün $\alpha - \beta$ eksen dönüşümünden farkı hareket etmesidir. Bu dönüşüm, kullanıldığında elde edilen $d-q$ eksen değişkenleri hızdan bağımsız olmaktadır. Bu dönüşüme aynı zamanda Park dönüşümü denilmektedir. $\alpha - \beta$ eksen değişkenleri bilindiği takdirde, bunlardan yararlanılarak $d-q$ eksen değişkenleri aşağıdaki denklemle elde edilebilir. Bu denklem kullanılarak elde edilen Matlab/Simulink dönüşüm modeli Şekil 3.8'deki gibi olmaktadır.

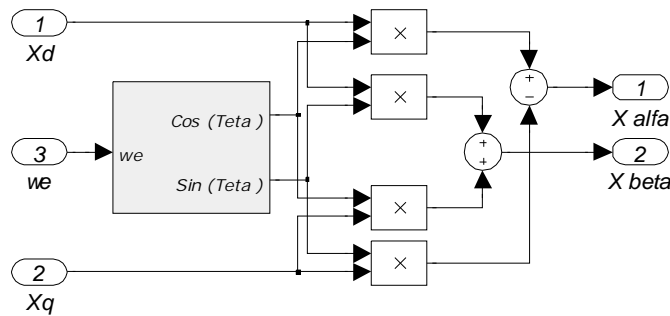
$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (3.12)$$



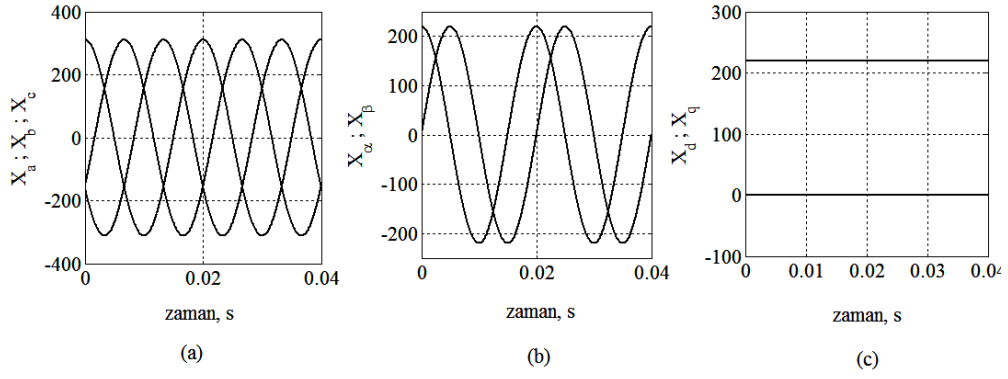
Şekil 3.8. X_α, X_β 'nin X_d, X_q 'ye dönüşümü için Matlab/Simulink modeli

Hareketli $d-q$ eksen değişkenleri bilindiği takdirde, bunlardan yararlanılarak durağan $\alpha - \beta$ eksen değişkenleri elde edilebilir. Bu dönüşüme Ters Park dönüşümü denir. Ters Park dönüşümü için denklem (3.13) kullanılabilir. Bu denklemin kullanılmasıyla elde edilen Matlab/Simulink dönüşüm modeli Şekil 3.9'da verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (3.13)$$



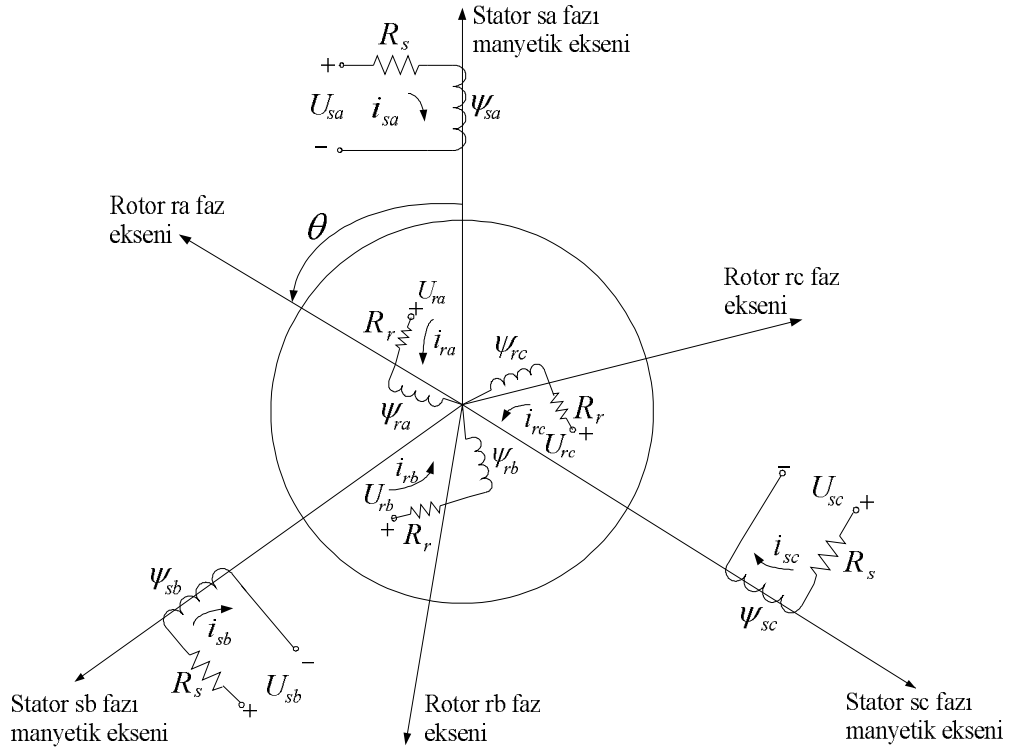
Şekil 3.9. X_d, X_q 'nin X_α, X_β 'ye dönüşümü için Matlab/Simulink modeli



Şekil 3.10. (a) Üç eksen, (b) durağan iki eksen, (c) hareketli iki eksen değişkenlerinin zamana göre değişimleri.

3.4. Matematiksel Modeller

Bilezikli asenkron makinenin hem statorunda hem de rotorunda üç-fazlı sargılar bulunmaktadır. Stator içinde dönen kısım olan rotorun sargı uçları fırçalar ve kaygan bilezikler aracılığıyla dışarı alınmıştır. Dışarı alınan bu uçlar makinenin kontrolü için ikinci bir giriş sağlamaktadır. Makinenin modelini elde etmemizi sağlayacak matematiksel denklemleri bulmak için toplu şekilde parametreleri Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Bilezikli asenkron makinenin toplu parametrelerin gösterimi

Asenkron makinenin dinamik performansını analiz etmek için, makinenin geçici durum denklemlerini de içeren bir matematiksel modelin elde edilmesi gerekir. Bu nedenle Şekil 3.11'deki Stator ve rotor fazlarına Kirchoff'un gerilim kanunu uygulanacak olursa;

$$\begin{aligned} U_{sa} &= R_s i_{sa} + \frac{d\psi_{sa}}{dt} = U_{r(a)} - R_r i_{r(a)} + \frac{d\psi_{r(a)}}{dt} \\ U_{sb} &= R_s i_{sb} + \frac{d\psi_{sb}}{dt} = U_{r(b)} - R_r i_{r(b)} + \frac{d\psi_{r(b)}}{dt} \\ U_{sc} &= R_s i_{sc} + \frac{d\psi_{sc}}{dt} = U_{r(c)} - R_r i_{r(c)} + \frac{d\psi_{r(c)}}{dt} \end{aligned} \quad (3.14)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemlerde $U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} - U_{r(a)}, U_{r(b)}, U_{r(c)}$ stator ve rotora ait $a-b-c$ faz gerilimlerini, R_s, R_r stator ve rotor sargı dirençlerini, $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} - i_{r(a)}, i_{r(b)}, i_{r(c)}$ stator ve rotor $a-b-c$ faz akımlarını, $\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc} - \psi_{r(a)}, \psi_{r(b)}, \psi_{r(c)}$ stator ve rotor $a-b-c$ faz sargılarının akılarını göstermektedir. Aşağıdaki tanımlamalar yapıldıktan sonra;

$$[U_{sabc}] = [U_{sa} \ U_{sb} \ U_{sc}]^T ; [U_{r(abc)}] = [U_{r(a)} \ U_{r(b)} \ U_{r(c)}]^T \quad (3.15)$$

$$[i_{sabc}] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T ; [i_{r(abc)}] = [i_{r(a)} \ i_{r(b)} \ i_{r(c)}]^T \quad (3.16)$$

$$[\psi_{sabc}] = [\psi_{sa} \ \psi_{sb} \ \psi_{sc}]^T ; [\psi_{r(abc)}] = [\psi_{r(a)} \ \psi_{r(b)} \ \psi_{r(c)}]^T \quad (3.17)$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

denklem (3.14)'teki ifadeler birleştirilerek stator ve rotor gerilim denklemleri vektörel olarak şu şekilde yazılabilir.

$$[U_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d[\psi_{sabc}]}{dt} \quad (3.19)$$

$$[U_{r(abc)}] = [R_r][i_{r(abc)}] + \frac{d[\psi_{r(abc)}]}{dt} \quad (3.20)$$

Denklemler (3.10) ve (3.11)'den gerilim denklemleri (3.19) ve (3.20) $\alpha - \beta$ eksenini değişkenleri cinsinden şu şekilde dönüştürülebilir.

$$U_{s\alpha\beta} = R_s i_{s\alpha\beta} + \frac{d\psi_{s\alpha\beta}}{dt} \quad (3.21)$$

$$U_{r(\alpha\beta)} = R_r i_{r(\alpha\beta)} + \frac{d\psi_{r(\alpha\beta)}}{dt} \quad (3.22)$$

Burada $U_{s\alpha\beta}, U_{r(\alpha\beta)}$ stator ve rotor gerilim; $i_{s\alpha\beta}, i_{r(\alpha\beta)}$ stator ve rotor akım ve $\psi_{s\alpha\beta}, \psi_{r(\alpha\beta)}$ stator ve rotor akı fazörleridir. Dikkat edilirse statora ait değişkenler yazılırken değişkenin yanında “ $\alpha\beta$ ” indisi parantez içine alınmamış ancak rotora ait değişkenler yazılırken değişkenin yanında “ $\alpha\beta$ ” indisi parantez içerisinde gösterilmiştir. “ $\alpha\beta$ ” indisi parantez içinde değilse değişkenin stator referans çatisında, “ $\alpha\beta$ ” indisi parantez içinde ise değişkenin rotor referans çatisında olduğu anlamına gelmektedir. Aynı zamanda $\alpha - \beta$ eksenli değişkenleri cinsinden stator ve rotor akı denklemleri şu şekilde ifade edilebilir.

$$\psi_{s\alpha\beta} = L_s i_{s\alpha\beta} + L_m i_{r(\alpha\beta)} e^{j\theta_r} \quad (3.23)$$

$$\psi_{r(\alpha\beta)} = L_r i_{r(\alpha\beta)} + L_m i_{s\alpha\beta} e^{-j\theta_r} \quad (3.24)$$

Burada L_s, L_r sırasıyla stator ve rotor öz idüktansları ve L_m mıknatıslanma indüktansdır. θ_r ise rotorun statora göre elektriksel konum açısıdır. Asenkron makinenin $\alpha - \beta$ eksenli akım değişkenleri, kutup sayısı, mıknatıslanma indüktansı ve rotorun elektriksel konum açısı cinsinden ürettiği elektromanyetik momentin denklemi ise şu şekilde yazılabilir.

$$T_e = 3 \frac{P}{2} L_m \text{imag}\{i_{s\alpha\beta} [i_{r(\alpha\beta)} e^{j\theta_r}]^*\} \quad (3.25)$$

Burada * kompleks eşlenik ve $\text{imag}\{ \}$ operatörü “imajiner” anlamında kullanılmıştır. Denklemler (3.22) ve (3.24) rotora ait gerilim ve akı denklemleri olup rotor referans çatisındadır. Stator referans çatisında $\alpha - \beta$ eksenli değişkenleri cinsinden makineye ait matematiksel bir model kurmak gerekirse, bu denklemlerin stator referans çatisına indirgenmesi ve bunun için bu denklemlerin her iki yanının $e^{j\theta_r}$ ile çarpılması gerekir. Bu nedenle denklemler (3.22), (3.23) ve (3.24) stator referans çatisında yazıldığı taktirde;

$$U_{r\alpha\beta} = R_r i_{r\alpha\beta} + \frac{d\psi_{r\alpha\beta}}{dt} - j\omega_r \psi_{r\alpha\beta} \quad (3.26)$$

$$\psi_{s\alpha\beta} = L_s i_{s\alpha\beta} + L_m i_{r\alpha\beta} \quad (3.27)$$

$$\psi_{r\alpha\beta} = L_r i_{r\alpha\beta} + L_m i_{s\alpha\beta} \quad (3.28)$$

denklemleri elde edilir. Denklemler (3.21), (3.25) ve (3.26)-(3.28) ayrıştırılarak yazılacak olursa şu sonuç denklemler bulunur.

$$U_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} \quad (3.29)$$

$$U_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} \quad (3.30)$$

$$U_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \omega_r \psi_{r\beta} \quad (3.31)$$

$$U_{r\beta} = R_r i_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - \omega_r \psi_{r\alpha} \quad (3.32)$$

$$\psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha} \quad (3.33)$$

$$\psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta} \quad (3.34)$$

$$\psi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha} \quad (3.35)$$

$$\psi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta} \quad (3.36)$$

$$T_e = 3 \frac{P}{2} L_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) \quad (3.37)$$

Burada $U_{s\alpha}, U_{s\beta} - i_{s\alpha}, i_{s\beta} - \psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}$ stator referans çatısında statorun sırasıyla gerilim, akım ve akı fazörlerinin $\alpha - \beta$ eksen bileşenleridir. Benzer şekilde $U_{r\alpha}, U_{r\beta} - i_{r\alpha}, i_{r\beta} - \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ stator referans çatısında rotorun gerilim, akım ve akı fazörlerinin $\alpha - \beta$ eksen bileşenleridir. Denklemler (3.29)-(3.37) ile beraber aşağıda verilen makinenin mekaniksel dinamik denklemini kullanıldığında, makinenin motor ya da generatör olarak stator referans çatısında hem geçici hem de sürekli durumda analizi yapılabilir.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_y - B\omega_m \quad (3.38)$$

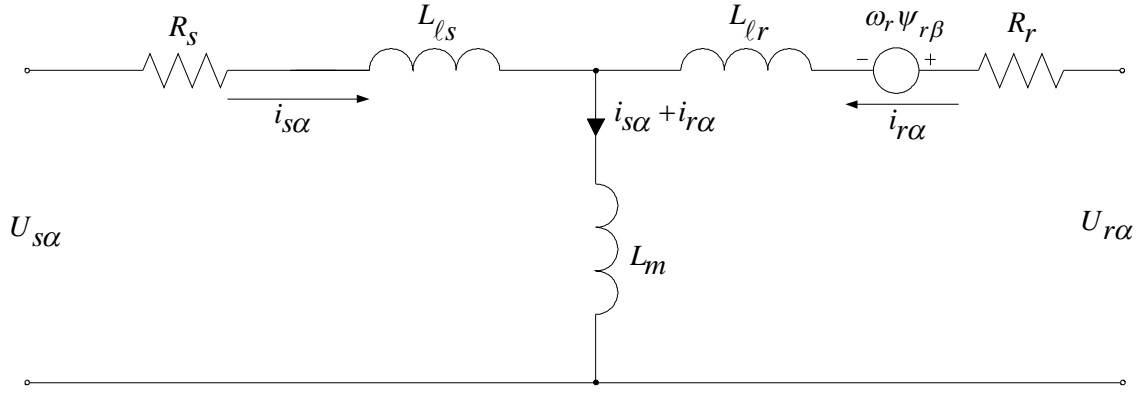
Burada J $kg.m^2$ olarak eylemsizlik momenti ve T_y yük momentidir. Denklem (3.4)'teki ilk ifade dikkate alınarak denklem (3.38)'te yazıldığında, makinenin elektriksel dinamik denklemini verecek şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$J \frac{2}{P} \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_y - B \frac{2}{P} \omega_r \quad (3.39)$$

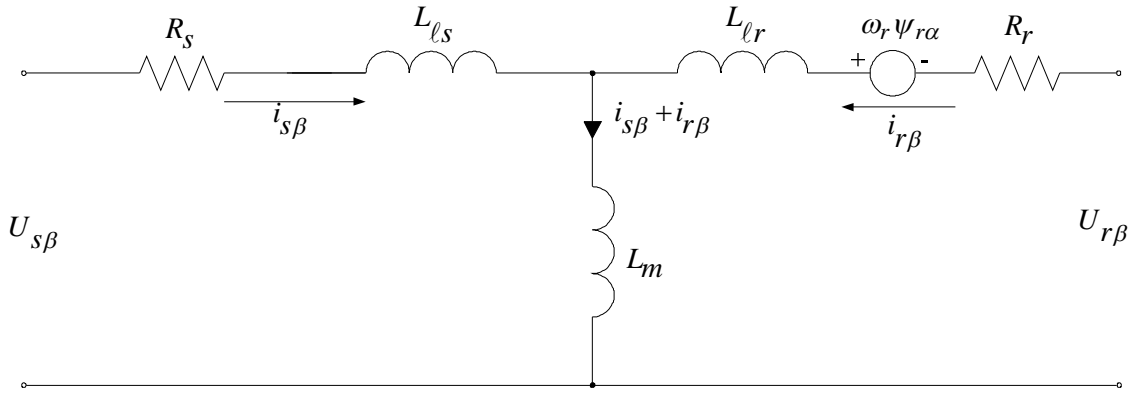
Stator referans çatısındaki stator ve rotora ait gerilim ve akı denklemleri (3.29)-(3.36)'dan yararlanılarak, makineyi hem geçici hem de sürekli durumlarda temsil eden Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te α ekseni ve β ekseni eşdeğer devreleri görülmektedir.

Makinenin stator referans çatısında $\alpha - \beta$ ekseni değişkenleri cinsinde matematiksel model denklemleri ve eşdeğer devreleri kullanıldığı gibi, $d-q$ ekseni

değişkenleri cinsinden model denklemleri ve eşdeğer devreleri de kullanılmaktadır. $\alpha - \beta$ eksenli değişkenleri cinsinde matematiksel model denklemleri elde edildikten sonra $d-q$ eksenli matematiksel model denklemleri kolay bir şekilde elde edilebilir.



Şekil 3.12. α eksenli eşdeğer devresi



Şekil 3.13. β eksenli eşdeğer devresi

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te görülen $L_{\ell s}, L_{\ell r}$ indüktansları sırasıyla stator ve rotorun kaçak indüktansları olup, stator ve rotorun öz indüktansları ile aralarındaki ilişki aşağıda ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} L_s &= L_{\ell s} + L_m \\ L_r &= L_{\ell r} + L_m \end{aligned} \quad (3.40)$$

Makinenin stator referans çatısında $\alpha - \beta$ eksenli değişkenleri cinsinden matematiksel denklemleri (3.21),(3.26)-(3.28)'in her iki yanını $e^{-j\theta_e}$ ile çarpılırsa $d-q$ eksenli matematiksel model denklemlerinden gerilim ve akı denklemleri şu şekilde ifade edilebilir.

$$U_{sdq} = R_s i_{sdq} + \frac{d\psi_{sdq}}{dt} + j\omega_e \psi_{sdq} \quad (3.41)$$

$$U_{rdq} = R_r i_{rdq} + \frac{d\psi_{rdq}}{dt} + j(\omega_e - \omega_r)\psi_{rdq} \quad (3.42)$$

$$\psi_{sdq} = L_s i_{sdq} + L_m i_{rdq} \quad (3.43)$$

$$\psi_{rdq} = L_r i_{rdq} + L_m i_{sdq} \quad (3.44)$$

Üretilen elektromanyetik momentle ilgili denklem (3.25) yine $d-q$ eksenine dönüştürülerek şu sonuç elde edilir.

$$T_e = 3 \frac{P}{2} L_m \text{imag}\{i_{sdq} i_{rdq}^*\} \quad (3.45)$$

Burada $U_{sdq}, i_{sdq}, \psi_{sdq} - U_{rdq}, i_{rdq}, \psi_{rdq}$ senkron hızla dönen $d-q$ referans çatısında stator ve rotorun sırasıyla gerilim, akım ve akı fazörleridir. Denklemler (3.41)-(3.45) ayrıştırılarak yazılacak olursa, stator ve rotor $d-q$ eksen değişkenleri cinsinden gerilim, akı ve moment denklemleri, son olarak şu şekilde ifade edilebilir.

$$U_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_e \psi_{sq} \quad (3.46)$$

$$U_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_e \psi_{sd} \quad (3.47)$$

$$U_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_e - \omega_r)\psi_{rq} \quad (3.48)$$

$$U_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_e - \omega_r)\psi_{rd} \quad (3.49)$$

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad (3.50)$$

$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad (3.51)$$

$$\psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \quad (3.52)$$

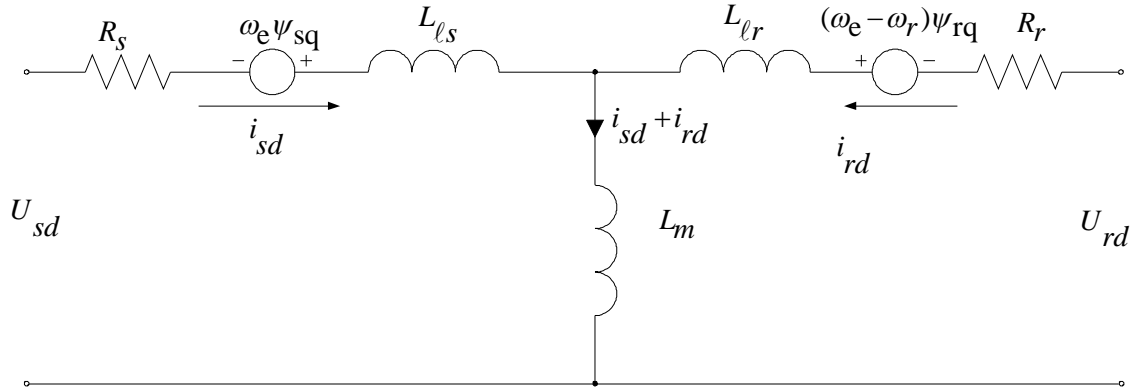
$$\psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \quad (3.53)$$

$$T_e = 3 \frac{P}{2} L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (3.54)$$

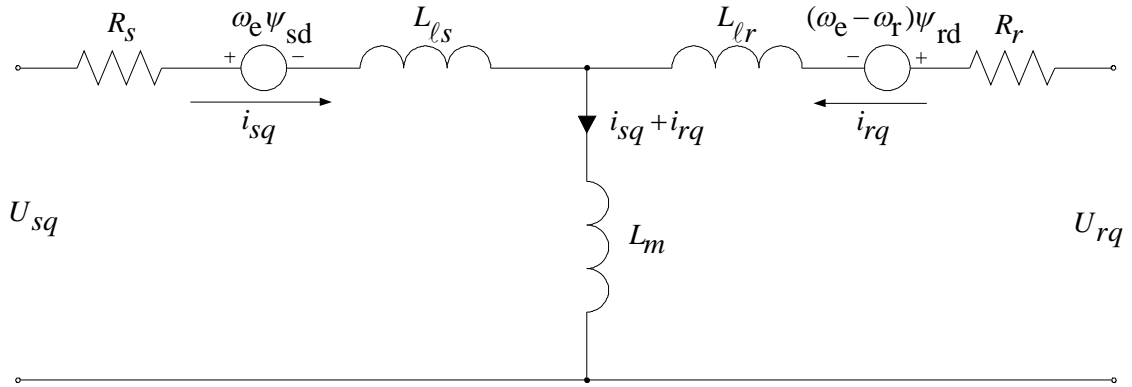
Burada $U_{sd}, U_{sq} - i_{sd}, i_{sq} - \psi_{sd}, \psi_{sq}$ senkron hızla dönen referans çatıda statorun sırasıyla gerilim, akım ve akı fazörlerinin $d-q$ eksen bileşenleridir. Benzer şekilde $U_{rd}, U_{rq} - i_{rd}, i_{rq} - \psi_{rd}, \psi_{rq}$ senkron hızla dönen referans çatıda rotorun gerilim, akım ve akı fazörlerinin $d-q$

eksen bileşenleridir. Denklemler (3.46)-(3.54) ile beraber makinenin mekaniksel dinamik denklemi (3.39) kullanıldığında, makine motor ya da generatör olarak senkron hızla dönen d - q referans çatısında hem geçici hem de sürekli durumda analizi yapılabilir.

Senkron hızla dönen referans çatısındaki stator ve rotora ait gerilim ve akı denklemleri (3.46)-(3.53)'ten yararlanılarak, makineyi hem geçici hem de sürekli durumlarda temsil eden Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te d ve q eksenine eşdeğer devreleri görülmektedir.



Şekil 3.14. d eksenine eşdeğer devresi

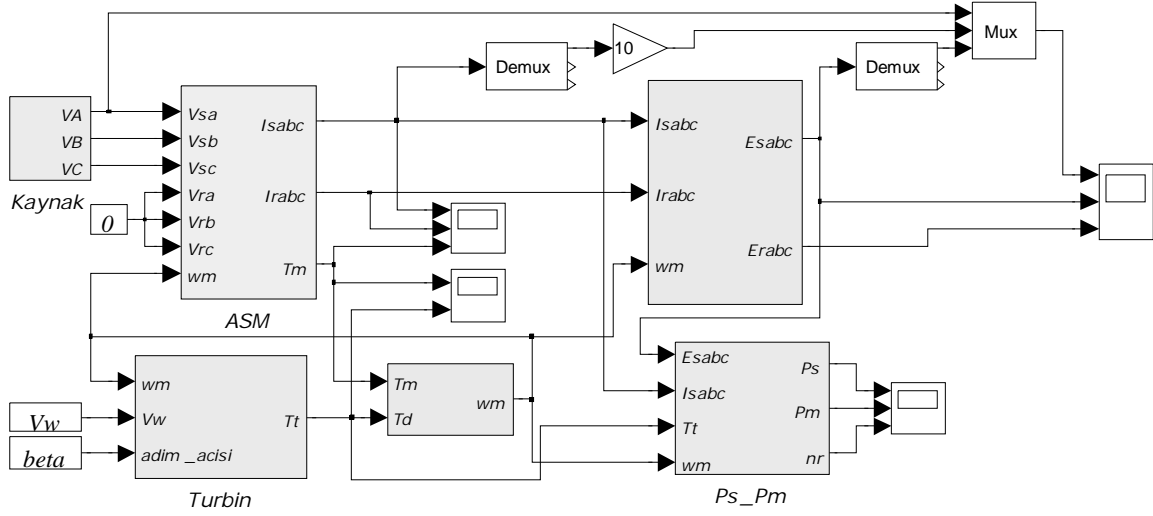


Şekil 3.15. q eksenine eşdeğer devresi

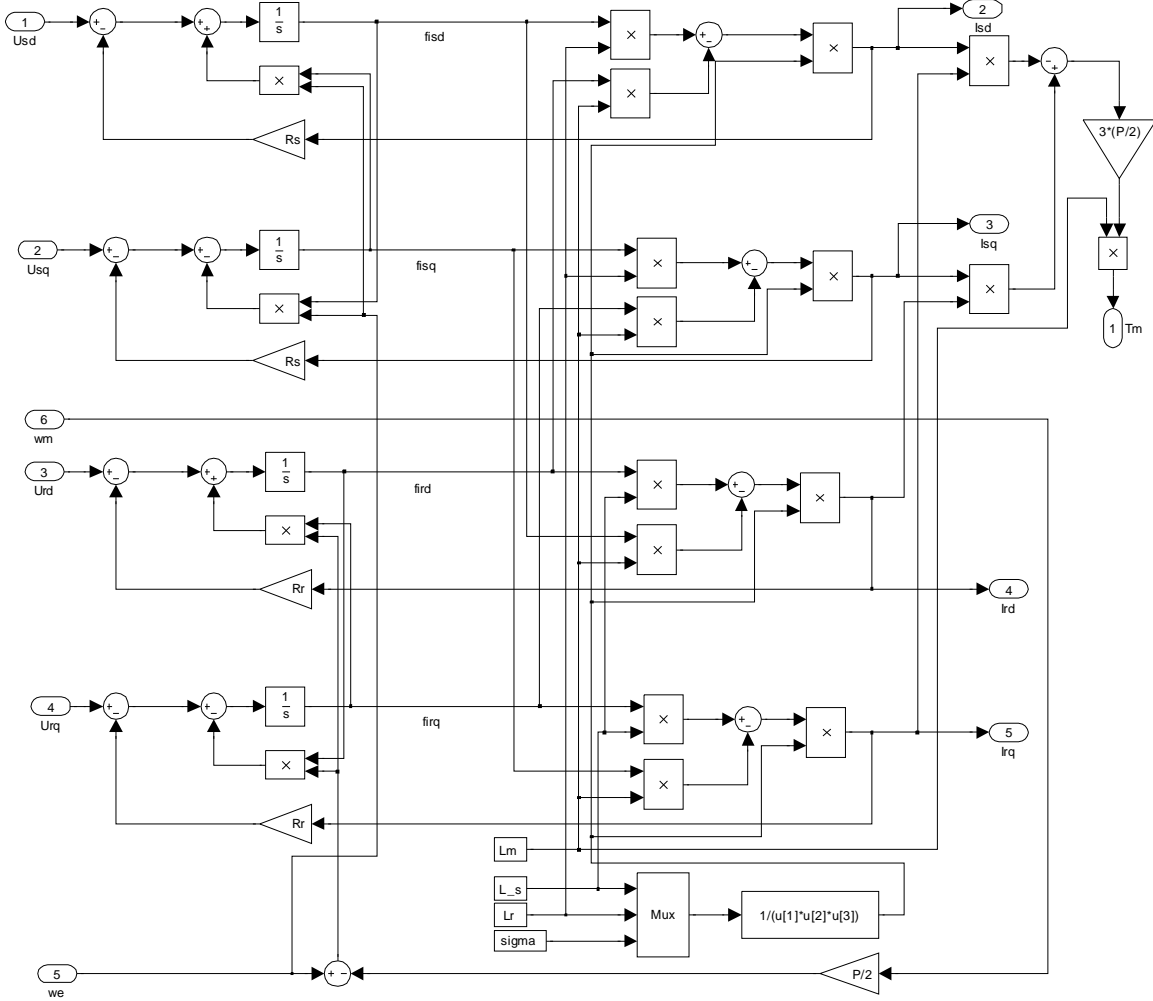
3.5. Modelleme ve Simülasyon Sonuçları

Bu çalışmada yukarıda verilen asenkron makineye ait matematiksel model denklemleri (3.38), (3.46)-(3.54) kullanılarak Matlab/Simulink ortamında makineye ait Şekil 3.16'da verilen model oluşturulmuştur. Şekilde verilen modelde "ASM" isimli bloğun içeriğinde asenkron makine modellenmiştir ve bu bloğun iç yapısı Şekil 3.17'de verilmiştir. Model yapıda asenkron makine generatör olarak bir rüzgâr türbini tarafından

tahrik edilirken, aynı zamanda stator uçları faz gerilimi 220 volt olan bir üç fazlı kaynağa bağlı tutulmuştur. Rotora ise dışarıdan herhangi bir gerilim uygulanmamıştır.



Şekil 3.16. Matlab/Simulink modeli



Şekil 3.17. Asenkron makine (ASM) Matlab/Simulink modeli

Simülasyonda kullanılan asenkron makine ve türbin parametreleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Parametreleri verilen asenkron makine başlangıç hızını senkron hız olarak verdikten sonra $t=0$ ’dan itibaren 1. saniyeye kadar rüzgar hızı 8 m/s, 1. saniyeden 2. saniyeye kadar rüzgar hızı 10 m/s ve 2. saniyeden 3. saniyeye kadar rüzgar hızı 13 m/s olan ve tabloda parametreleri verilen rüzgar türbini tarafından tahrik edildiği varsayılarak sonuçlar alınmıştır.

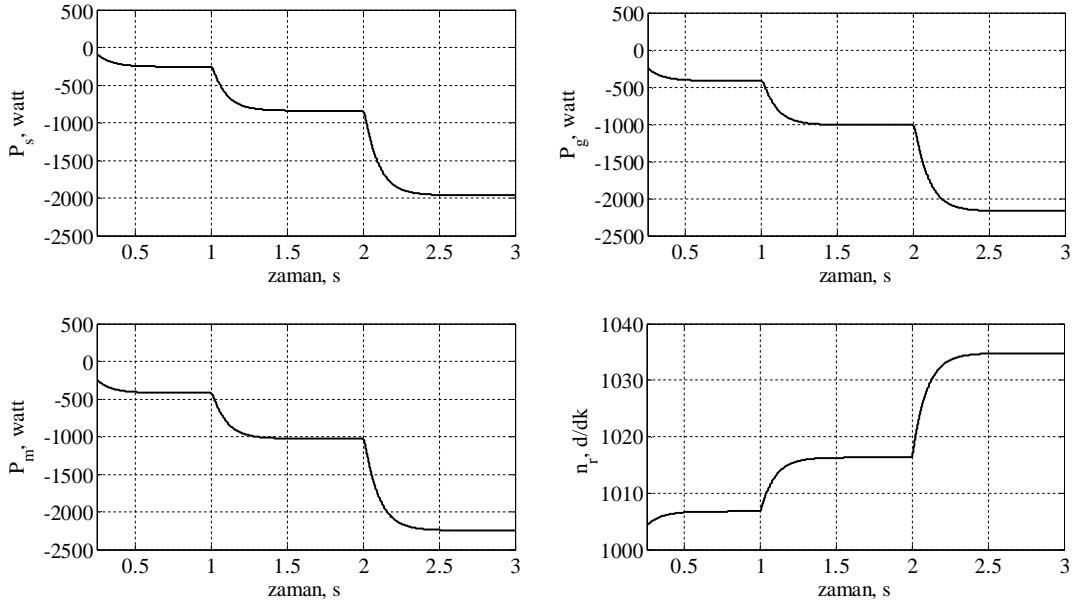
Tablo 3.1. Asenkron makine ve rüzgar türbini parametreleri

<i>Anma gerilimi</i>	: 220 Volt
<i>Frekans</i>	: 50 Hz
<i>Kutup sayısı</i>	: 6
<i>Stator öz indüktansı</i>	: 0.094 H
<i>Rotor öz indüktansı</i>	: 0.088 H
<i>Mıknatıslanma indüktansı</i>	: 0.082 H
<i>Stator direnci</i>	: 0.95 Ω
<i>Rotor direnci</i>	: 1.8 Ω
<i>Eylemsizlik</i>	: 0.2 kg.m ²
<i>Sürtünme katsayısı</i>	: 0 N.m.s
<i>Türbin yarıçapı</i>	: 2 m
<i>Hava yoğunluğu</i>	: 1.204 kg/m ³
<i>Adım açısı</i>	: 0
<i>Dişli oranı</i>	: 3

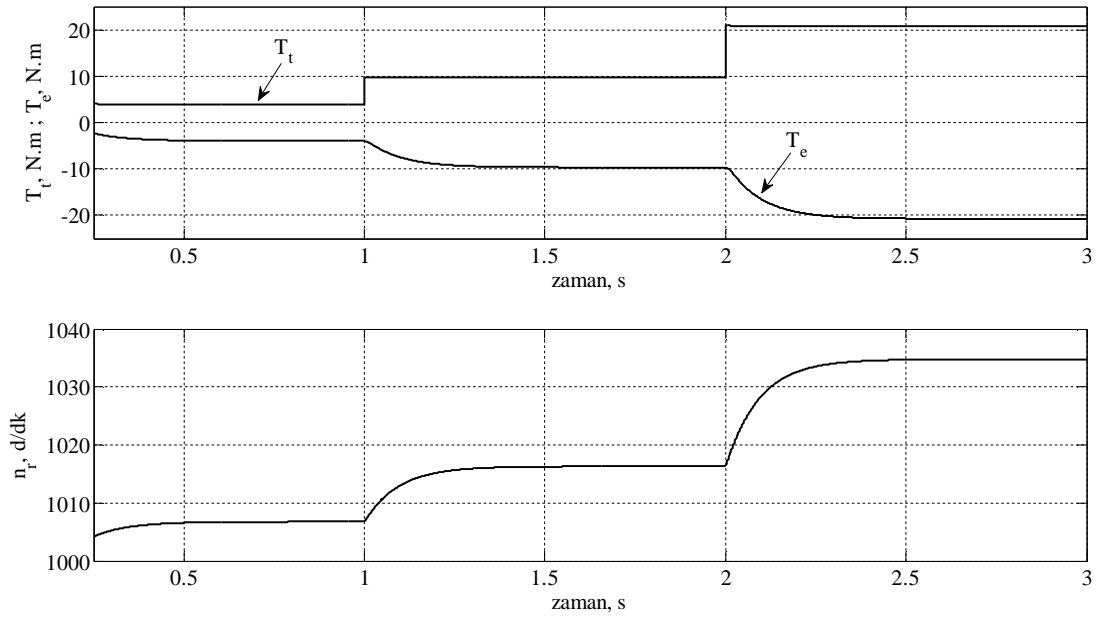
Bu çalışma koşulları altında Şekil 3.18’de stator gücü (P_s), hava aralığı gücü (P_g), mekanik güç (P_m) ve mil hızının (n_r) zamanla değişimleri görülmektedir. Şekildeki değişimler incelendiğinde, mil hızının rüzgar hızı artışına bağlı olarak 1000 d/dk senkron hızı üzerine çıkarak artış gösterdiği görülmektedir. Buna bağlı olarak mekanik güç, hava aralığı gücü ve stator gücü arasında $P_m < P_g < P_s$ ilişkisi bulunmuştur. Güçlerin üçü de negatif olması, asenkron makinenin türbin aracılığıyla mekanik güç olarak hava aralığı üzerinden stator uçlarının bağlı olduğu kaynağa doğru, güç akışında bulunduğu anlamına gelmektedir. Burada sürtünme ihmal edildiği için rotorun türbin aracılığıyla aldığı mekanik güç ile hava aralığı gücü arasındaki fark rotor bakır kayıplarına, hava aralığı gücü ile stator gücü arasındaki fark ise stator bakır kayıplarına karşılık gelmektedir. Sonuç olarak, makine için tanımlanan her üç zaman aralığında da mil hızı senkron hız üzerinde olduğundan,

makine türbinden mekanik enerji almış ve bu enerjiyi elektrik enerjisi olarak stator uçlarının bağlı bulunduğu kaynağa aktarmıştır. Ancak, bu zaman aralıklarında rüzgar hızı gittikçe artış gösterdiğinden, doğal olarak türbinin verebileceği rüzgar enerjisi de artmış ve bu nedenle asenkron makinenin kaynağa aktardığı güç de artış göstermiştir.

Yine bu çalışma koşulları altında, türbin momenti (T_t) ve makinenin ürettiği elektromanyetik moment (T_e)'nin zamanla değişimleri Şekil 3.19'da görülmektedir.

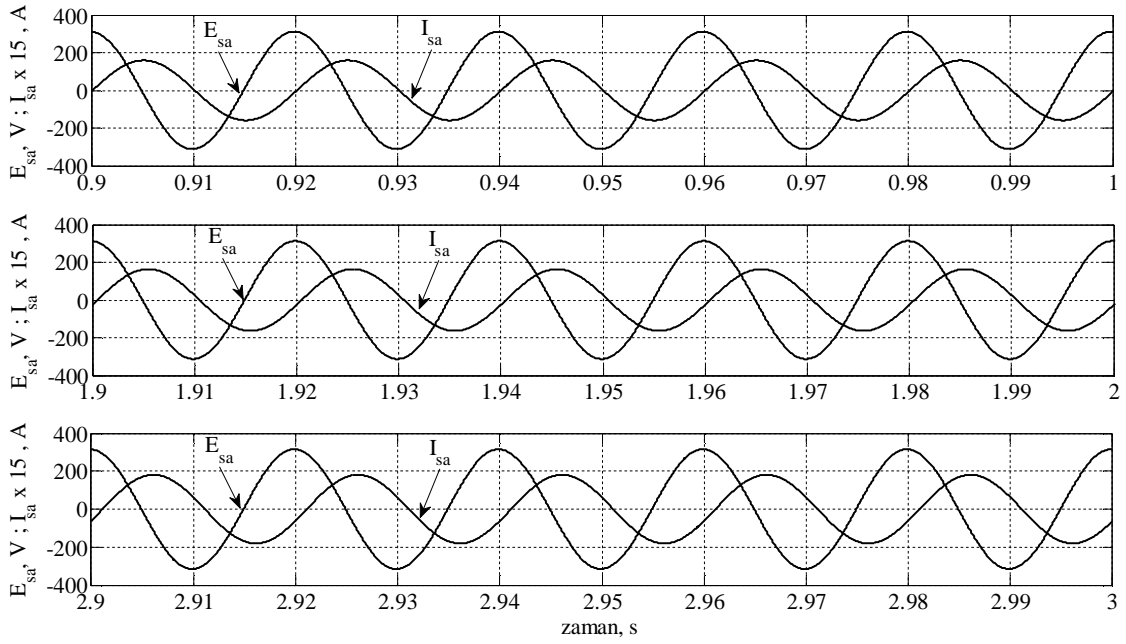


Şekil 3.18. Stator gücü (P_s), hava aralığı gücü (P_g), mekanik güç (P_m) ve mil hızının (n_r) zamanla değişimleri

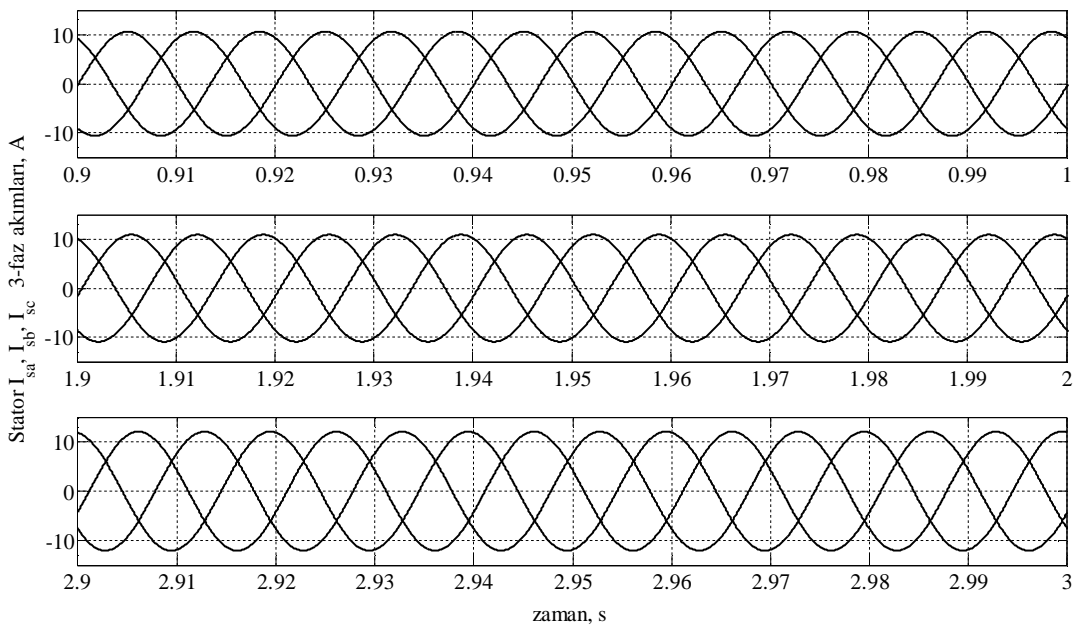


Şekil 3.19. Türbin momenti (T_t), elektromanyetik moment (T_e) ve mil hızının (n_r) zamanla değişimleri

Şekil 3.19’da görülen moment değişimlerinde, türbin momentinin değişimi pozitif iken makinenin ürettiği moment ise negatiftir. Bu, türbinin makineye enerji verdiği ve makinenin karşı yönde moment üreterek bu enerjiyi aldığı anlamına gelmektedir. Dikkat edilirse sürekli durumda mil hızının sabit olduğu zaman aralıklarında türbin momentini mutlak olarak makinenin ürettiği moment kadardır. Şekil 3.20’de statordaki *e.m.k.* geriliminin stator akımıyla beraber zamanla değişimleri verilmiştir. Şekil 3.21’de ise stator 3-faz akımlarının zamanla değişimleri görülmektedir.



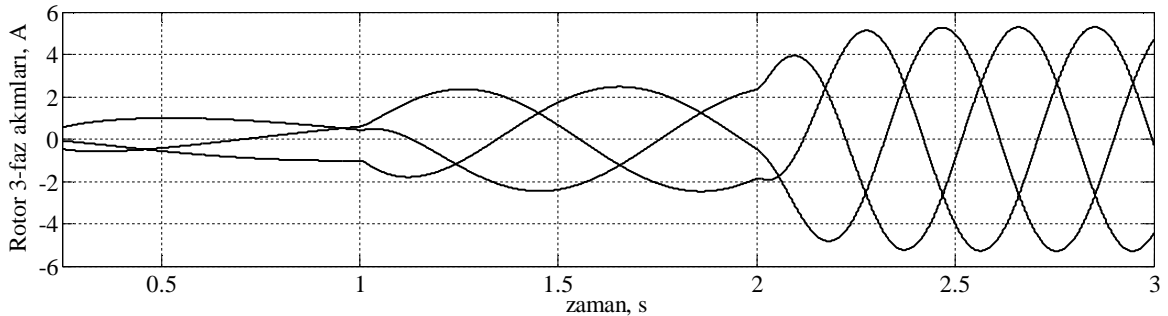
Şekil 3.20. Statorun ürettiği 1-faz gerilim ve akımın zamana göre değişimleri



Şekil 3.21. Stator 3-faz akımlarının zamana göre değişimleri

Şekil 3.20’de verilen her üç zaman aralığında da (0.9-1, 1.9-2, 2.9-3) stator akımı statorun ürettiği gerilimden 90° den daha büyük bir açıyla geri fazda olduğu görülmektedir. Bu durum, makinenin motor olarak değil generatör olarak çalıştığı ve enerji akışının yönü stator uçlarının bağlı bulunduğu kaynağa doğru olduğunu göstermektedir. Akımın gerilimden geride olduğu faz açısının 90° den büyük ancak 180° den küçük olması makinenin stator uçlarının bağlı bulunduğu kaynaktan aynı zamanda reaktif güç çektiği anlamına gelmektedir. Zira, asenkron makine generatör olarak çalışmada mıknatıslanma akımını karşılayacak reaktif güce ihtiyaç duymaktadır. Lokal bir şekilde asenkron makine generatör olarak çalıştırılmak istenildiğinde bu reaktif güç, stator uçları arasına bağlanan kondansatörler aracılığıyla karşılanmaktadır. Dikkat edilirse, Şekil 3.20’de 2.9-3 saniye aralığında görülen akım değişimi 0.9-1 ve 1.9-2 zaman aralıklarında görülen akım değişimlerine göre gerilimden daha büyük oranda geri fazdadır. Bu durum da, makinenin generatör olarak stator uçlarının bağlı bulunduğu kaynağa aktardığı gücün, gittikçe arttığı anlamına gelmektedir.

Şekil 3.21’de, 0.9-1, 1.9-2, 2.9-3 zaman aralıklarında stator 3-faz akım değişimlerine dikkat edilirse, yine makinenin generatör olarak aktardığı gücün artması nedeniyle, stator akımlarının genlik olarak da büyüdüğü görülecektir. Şekil 3.22’de ise makine için varsayılan çalışma koşulları altında rotor 3-faz akımları verilmiştir. Burada görüldüğü gibi 0-1 saniyeleri aralığında rotor akımlarının frekansı ve genliği küçük, 1-2 saniyeleri aralığında rotor akımlarının frekansı ve genliği bir önceki zaman aralığına göre daha büyük ve 2-3 saniye zaman aralığında ise rotor akımlarının frekansı ve genliği en büyüktür. Görüldüğü gibi motor çalışmasının aksine mil hızı arttığında rotor akımlarının frekansı artmıştır. Zira motor çalışmasında hızın artışına karşın rotor akımlarının frekansı düşmektedir.



Şekil 3.22. Rotor 3-faz akımlarının zamana göre değişimleri

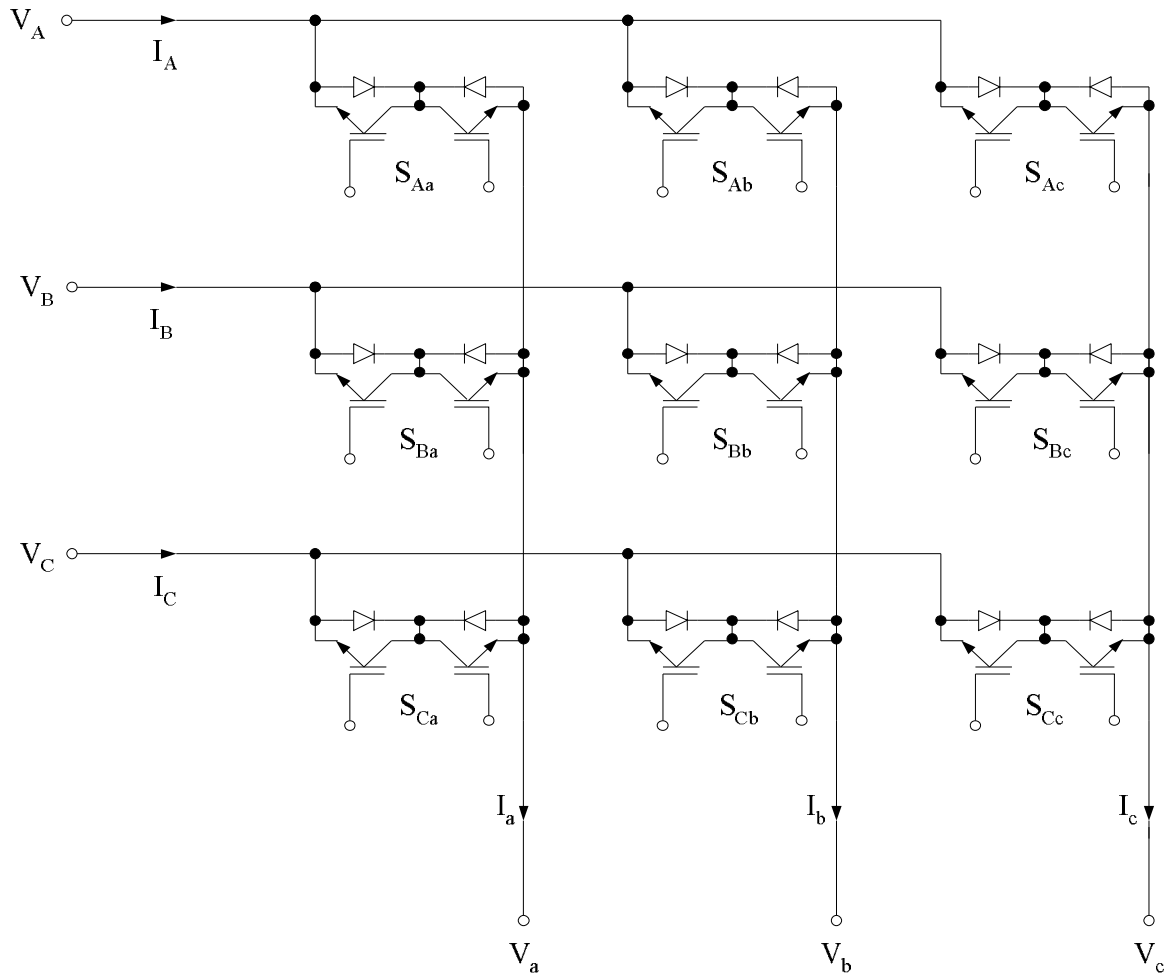
4. MATRİS KONVERTERLER

4.1. Giriş

Yarıiletken güç anahtarları ve mikroişlemci teknolojisindeki hızlı ilerlemeler sonucunda farklı denetim olanakları sağlayan asenkron makine sürücülerini tasarlanmıştır. Bu gelişmeler sonucu olarak birçok uygulamada asenkron makine kullanılır hale gelmiştir. Değişken hız uygulamalarında bu makinenin ihtiyaç duyduğu değişken frekans ve değişken gerilim, matris konverterler tarafından sağlanmaktadır. Matris konverterler alternatif akımdan alternatif akıma doğrudan dönüşüm yapan devrelerdir. Bu konverterler, 3 faz giriş 3 faz çıkış için matris şeklinde düzenlenmiş çift yönlü 9 adet yarı iletken anahtardan oluşurlar. Bu çift yönlü anahtarlar giriş gerilimini farklı modülasyon algoritmaları ile anahtarlayarak genlik ve frekansı sabit giriş geriliminden, değişken genlik ve frekanslı çıkış gerilimi elde edilmesini sağlar.

Mevcut sürücü sistemlerin bir kısmında ise bir aşamalı dönüşüm yapan doğrudan link konverterler kullanılmaktadır. Bir aşamalı dönüşüm yapan *ac-ac* konverterler, saykıl konverter ve matris konverter olmak üzere iki ayrı yapıya sahiptir. Matris konverterler, ara enerji depolama elemanlarına ihtiyaç duymadan doğrudan *ac-ac* dönüşümü yapar (Gündoğdu, 2005). Matris konverterlerin avantajlarına karşılık bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Serbest dolaşım yolları bulunmadığı için bir anahtardan diğerine akımı güvenilir bir şekilde değiştirmek zordur. Diğer *ac-ac* dönüştürücülere oranla kullanılan eleman sayısının fazla olması, anahtarların kayıpların artmasına neden olmaktadır. Bir diğer dezavantaj ise çıkış gerilimi giriş geriliminin en fazla %86,6'sı kadar olabilmesidir.

İlk olarak 1976 yılında Gyugyi ve Pelly tarafından geliştirilen matris konverterlerin temeli saykıl konverter prensibine dayanmaktadır. Geliştirilen bu ilk matris konverterin dezavantajı giriş akımı ve çıkış gerilimi üzerinde, filtre ile kolay bir şekilde yok edilemeyen bazı harmonikler bulunmasıdır. Ancak, daha sonra Venturini tarafından önerilen yeni bir kontrol algoritması sayesinde bu problem giderilmiştir. Bu algoritma ile sınırsız çıkış frekansı ile sinüsoidal giriş akımları ve çıkış gerilimleri sağlanmasına karşılık çıkış geriliminin giriş gerilimine oranı maksimum %50'dir (Tuzsuzoğlu, 2002).



Şekil 4.1. Matris konverter anahtar dizilişleri

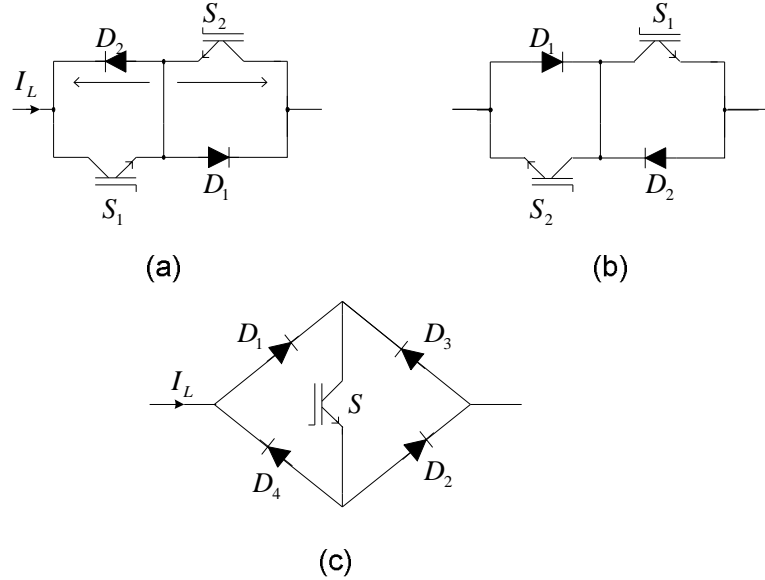
4.2. Matris Konverterin Yapısı

Matris konverter doğrudan *ac-ac* dönüşüm gerçekleştiren bir konverter tipidir. Doğrultma işlemi yapılmadığından enerjinin depolanması için kondansatör kullanımına gerek duymamaktadır (Sünter, 1995).

Matris konverterin her 1-faz çıkış gerilimi, 3-faz giriş gerilimlerinin yarıiletken anahtarlar yardımı ile uygun bir şekilde kıyılmasından elde edilir. Bu anahtarların iletimde kalma süreleri ayarlanarak, istenilen genlikte ve frekandaki çıkış gerilimi elde edilir. Kullanılan her bir S_{ij} anahtarı çift yönlü yarıiletken anahtardır. Anahtarların isimlendirilmesinde kullanılan indislerin birincisi girişi ($i=A,B,C$), ikincisi çıkışı ($j=a,b,c$) ifade eder. Aynı düzenleme anahtarların iletimde kalma sürelerinin gösteriminde de kullanılır. Yarıiletken anahtarlama elemanlarının bağlantısı Şekil 4.1 'de gösterilmiştir.

Örneğin; A fazı girişini a faz çıkışına aktaran S_{Aa} anahtarının iletimde kalma süresi t_{Aa} olarak gösterilir. Şekil 4.1'de görülen matris çeviricinin V_a çıkış fazının oluşumu anahtarların iletimde kalma sürelerine göre şöyledir. V_A fazı S_{Aa} anahtarının t_{Aa} , bunun hemen ardından V_B fazı S_{Ba} anahtarının t_{Ba} ve son olarak da V_c fazı S_{Ca} anahtarının t_{Ca} süresince iletimde kalmasıyla çıkışa aktarılarak V_a çıkış gerilimi elde edilir. Böylece V_a çıkış gerilimi V_A, V_B, V_C giriş gerilimlerinin uygun şekilde kıyılması ile elde edilir. Burada t_{Aa}, t_{Ba}, t_{Ca} sürelerinin toplamı sabit olan anahtarlama periyodu kadardır. Aynı şekilde V_b fazı S_{Ab}, S_{Bb}, S_{Cb} anahtarlarının t_{Ab}, t_{Bb}, t_{Cb} sürelerine göre ve V_c fazı S_{Ac}, S_{Bc}, S_{Cc} anahtarlarının t_{Ac}, t_{Bc}, t_{Cc} sürelerine göre sıralı bir şekilde anahtarlama ile elde edilir. Anahtarların sabit bir anahtarlama periyodu boyunca bu işlemi sırasıyla tekrarlamasıyla konverterin 3-faz çıkış gerilimi elde edilmiş olur.

Yüksek akım ve gerilim uygulamaları için, güç devrelerinde mosfetlerin yerine yine gerilim kontrollü Insulated Gate Bipolar Transistör (IGBT) elemanlar tercih edilir. IGBT, güç mosfetlerinin kolay sürülme, hızlı çalışma ve sağlamlık gibi üstünlüklerini bünyesinde barındıran ve düşük anahtarlama ve iletim kayıplarına sahip olan bir yarıiletken anahtar elemanıdır. Bir IGBT'nin anahtarlama hızı mosfet'ten daha düşüktür, ancak anahtarlama kayıpları da düşük olduğundan dc ve ac motor sürücüleri gibi uygulamalarda, kontrollü güç kaynaklarında anahtar elemanı olarak kullanımı artış göstermektedir (Erdem, 2007).



Şekil 4.2. Çift yönlü anahtar yapıları

Matris konverterde kullanılan çift yönlü yarıiletken anahtarlama elemanları tek yönlü elemanların uygun bir kombinasyonu ile oluşturulur. Oluşturulan bu anahtarlama

elemanları a-) ortak emiterli, b-) ortak kolektörlü ve c-) köprü diyotlu anahtarlama elemanı olarak adlandırılır. Şekil 4.2’de bu anahtarlama elemanlarına ait yapılar gösterilmektedir.

4.3. Venturini Kontrol Algoritması

Matris konverterlerin kontrolü için Venturini tarafından 1980 yılında yeni bir darbe genişlik modülasyonlu (DGM) kontrol algoritması gerçekleştirilmiştir. Bu kontrol algoritması sınırsız çıkış frekansı elde edilmesi, giriş akımlarının ve çıkış geriliminin dalga şeklinin sinüsoidal olması ve giriş yer değiştirme faktörünün kontrol edilebilmesi olanaklarını sağlar. Bununla birlikte bu teknikte çıkış geriliminin genliği giriş geriliminin genliğinin %50’si oranında olabilmektedir. Daha sonra Venturini ve Alesina’nın beraber yaptıkları bir çalışma ile bu oranın %86,6’ya çıkarılması ve diğer tüm özelliklerin de kullanılabilir olmasını sağlanmıştır.

Matris konverterlerin çıkış gerilimi, giriş geriliminin yarıiletken anahtarlar yardımı ile kısılmasından elde edildiği için çıkış geriliminin genliği ve frekansı anahtarların iletimde kalma süreleri ayarlanarak kontrol edilir. İstenilen seviyede genlik ve frekans elde etmek için, güç devresindeki yarıiletken anahtarların iletimde kalma süreleri, belirli bir algoritma sayesinde ayarlanmalıdır. Bu algoritma ile gerçekleştirilen kontrol işlemine modülasyon tekniği denir. Matris konverterler için modülasyon teknikleri ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar arasında temel olarak venturini modülasyon metodu, scalar metod, uzay vektör modülasyon metodu ve hayali *dc* link metodu yer almaktadır. Bunlardan Venturini modülasyon metodu "direkt metod", hayali *dc* link metodu ise "indirekt metod" olarak bilinir.

4.3.1 Giriş ve Çıkış Gerilimleri

Modülasyon işlemi boyunca, anahtarların ideal ve matris konverterin girişine uygulanan gerilimlerin 3-faz dengeli sinüzoidal gerilim olduğu varsayılırsa, matris konverterin girişine uygulanan gerilim V_{ABC} , matris konverterin çıkışından alınan gerilim V_{abc} olmak üzere;

$$V_{abc} = [m]V_{ABC} \quad (4.1)$$

şeklinde bir ifade yazmak mümkündür. Burada $[m]$ modülasyon katsayısı matrisidir.

$V_{ABC} = [V_A V_B V_C]^T$ ve $V_{abc} = [V_a V_b V_c]^T$ olmak üzere, bu denklemleri (4.1)'deki denklemde yerlerine yazılacak olursa;

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{Aa} & m_{Ba} & m_{Ca} \\ m_{Ab} & m_{Bb} & m_{Cb} \\ m_{Ac} & m_{Bc} & m_{Cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

şeklinde giriş-çıkış gerilimleri arasındaki matematiksel bağıntıyı ortaya koymak mümkündür. Anahtarlama frekansı (f_s) nin periyodu T_s kadar ise, modülasyon katsayı matrisi $[m]$ elemanlarının anahtarlama periyodu ile anahtarların iletimde kalma süreleri cinsinden ve aralarındaki ilişki bu şekilde gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix} m_{Aa} & m_{Ba} & m_{Ca} \\ m_{Ab} & m_{Bb} & m_{Cb} \\ m_{Ac} & m_{Bc} & m_{Cc} \end{bmatrix} = \frac{1}{T_s} \begin{bmatrix} t_{Aa} & t_{Ba} & t_{Ca} \\ t_{Ab} & t_{Bb} & t_{Cb} \\ t_{Ac} & t_{Bc} & t_{Cc} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} m_{Aa} + m_{Ba} + m_{Ca} \\ m_{Ab} + m_{Bb} + m_{Cb} \\ m_{Ac} + m_{Bc} + m_{Cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ ve } \begin{bmatrix} t_{Aa} + t_{Ba} + t_{Ca} \\ t_{Ab} + t_{Bb} + t_{Cb} \\ t_{Ac} + t_{Bc} + t_{Cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_s \\ T_s \\ T_s \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Giriş-çıkış gerilimleri için faz sırası $A-B-C$ ve $a-b-c$ şeklinde olduğu göz önünde bulundurulursa, modülasyon katsayı matrisinin terimleri veya anahtarların iletimde kalma süreleri arasında (4.5)'deki eşitlikler yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} t_{Aa} \\ t_{Ba} \\ t_{Ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{Bb} \\ t_{Cb} \\ t_{Ab} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{Cc} \\ t_{Ac} \\ t_{Bc} \end{bmatrix} \text{ ve } \begin{bmatrix} m_{Aa} \\ m_{Ba} \\ m_{Ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{Bb} \\ m_{Cb} \\ m_{Ab} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{Cc} \\ m_{Ac} \\ m_{Bc} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Anahtarların iletimde kalma sürelerine ilişkin ifadeleri türetmek için denklem (4.2), (4.3) ve (4.4) daha sade bir şekilde yazacak olursak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{Aa} & m_{Ba} & m_{Ca} \\ m_{Cb} & m_{Ab} & m_{Bb} \\ m_{Bc} & m_{Cc} & m_{Ac} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{T_s} \begin{bmatrix} t_{Aa} & t_{Ba} & t_{Ca} \\ t_{Cb} & t_{Ab} & t_{Bb} \\ t_{Bc} & t_{Cc} & t_{Ac} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Sinüzoidal 3-faz giriş gerilimlerinde yine sinüzoidal ve istenilen genlik ve frekansta çıkış 3-faz gerilimleri elde edildiğine göre, giriş-çıkış gerilimlerini şu şekilde yazmak mümkündür.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = V_{im} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t) \\ \cos(\omega_i t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega_i t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = V_{om} \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t) \\ \cos(\omega_o t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega_o t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Burada V_{im} ve ω_i sırasıyla sabit giriş geriliminin tepe değeri ve frekansdır. V_{om} ve ω_o ise çıkış geriliminin değişken tepe değeri ve değişken frekansdır. $q=V_{om}/V_{im}$ (gerilim oranı) alınmak üzere denklem (4.7) denklem (4.6)'da yerine yazılacak olursa, şu ifadeler elde edilebilir.

$$T_s q \begin{bmatrix} \cos(\alpha_o) \\ \cos(\beta_o) \\ \cos(\gamma_o) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i) & \cos(\beta_i) & \cos(\gamma_i) \\ \cos(\beta_i) & \cos(\gamma_i) & \cos(\alpha_i) \\ \cos(\gamma_i) & \cos(\alpha_i) & \cos(\beta_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{Aa} \\ t_{Ba} \\ t_{Ca} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Burada $\alpha_o, \beta_o, \gamma_o$ ve $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$, ile ilgili tanımlamalar;

$$\begin{bmatrix} \alpha_o \\ \beta_o \\ \gamma_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_o t \\ \omega_o t - 2\pi/3 \\ \omega_o t + 2\pi/3 \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \\ \gamma_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_i t \\ \omega_i t - 2\pi/3 \\ \omega_i t + 2\pi/3 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

şeklindedir. Denklem (4.8)'den ilk iki satırda bulunan ifadeler ve denklem (4.4)'ten anahtarlama süreleriyle ilgili matris denklemin ilk satırındaki ifade kullanılarak t_{Aa} , t_{Ba} , t_{Ca} sürelerine ilişkin matematiksel sonuçlar aşağıdaki gibi türetilir.

$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha_i) & \cos(\beta_i) & \cos(\gamma_i) \\ \cos(\beta_i) & \cos(\gamma_i) & \cos(\alpha_i) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{Aa} \\ t_{Ba} \\ t_{Ca} \end{bmatrix} = T_s \begin{bmatrix} q \cos(\alpha_o) \\ q \cos(\beta_o) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

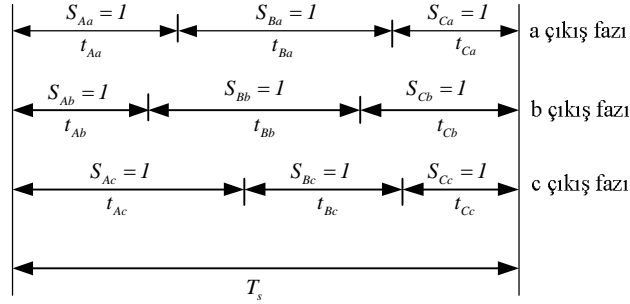
Denklem (4.10)'daki t_{Aa} , t_{Ba} , t_{Ca} anahtarlama süreleri bilinmeyenler kabul edilerek çözülecek olursa;

$$\begin{bmatrix} t_{Aa} \\ t_{Ba} \\ t_{Ca} \end{bmatrix} = \frac{T_A}{3} \begin{bmatrix} 1 + 2q \cos(\omega_m t) \\ 1 + 2q \cos(\omega_m t + 2\pi/3) \\ 1 + 2q \cos(\omega_m t - 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

şeklinde bir sonuç elde edilmiş olur. Burada $\omega_m = \omega_o - \omega_i$ kadardır ve modülasyon frekansı diye tanımlanır. Denklem (4.11) denklem (4.3)'ün ilk satır ifadesinde yerine yazılırsa m_{Aa}, m_{Ba}, m_{Ca} modülasyon terimlerine de ilişkin sonuç ifadeleri bulunmuş olur.

$$\begin{bmatrix} m_{Aa} \\ m_{Ba} \\ m_{Ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 + 2q \cos(\omega_m t) \\ 1 + 2q \cos(\omega_m t + 2\pi/3) \\ 1 + 2q \cos(\omega_m t - 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Burada geri kalan anahtarlama süreleri t_{Ab}, t_{Bb}, t_{Cb} ile t_{Ac}, t_{Bc}, t_{Cc} ve modülasyon terimleri m_{Ab}, m_{Bb}, m_{Cb} ile m_{Ac}, m_{Bc}, m_{Cc} 'nin ne olacağını denklem (4.5)'e bakarak anlamak mümkündür.



Şekil 4.3. Anahtarların tetiklenme sıraları ve iletimde kalma süreleri

Bu modülasyon tekniğinin daha da anlaşılması bakımından anahtarlama frekansının bir periyodu için, yarıiletken anahtar elemanlarının iletimde kaldıkları süreler bir diyagramla Şekil 4.3'teki gibi gösterilmiştir.

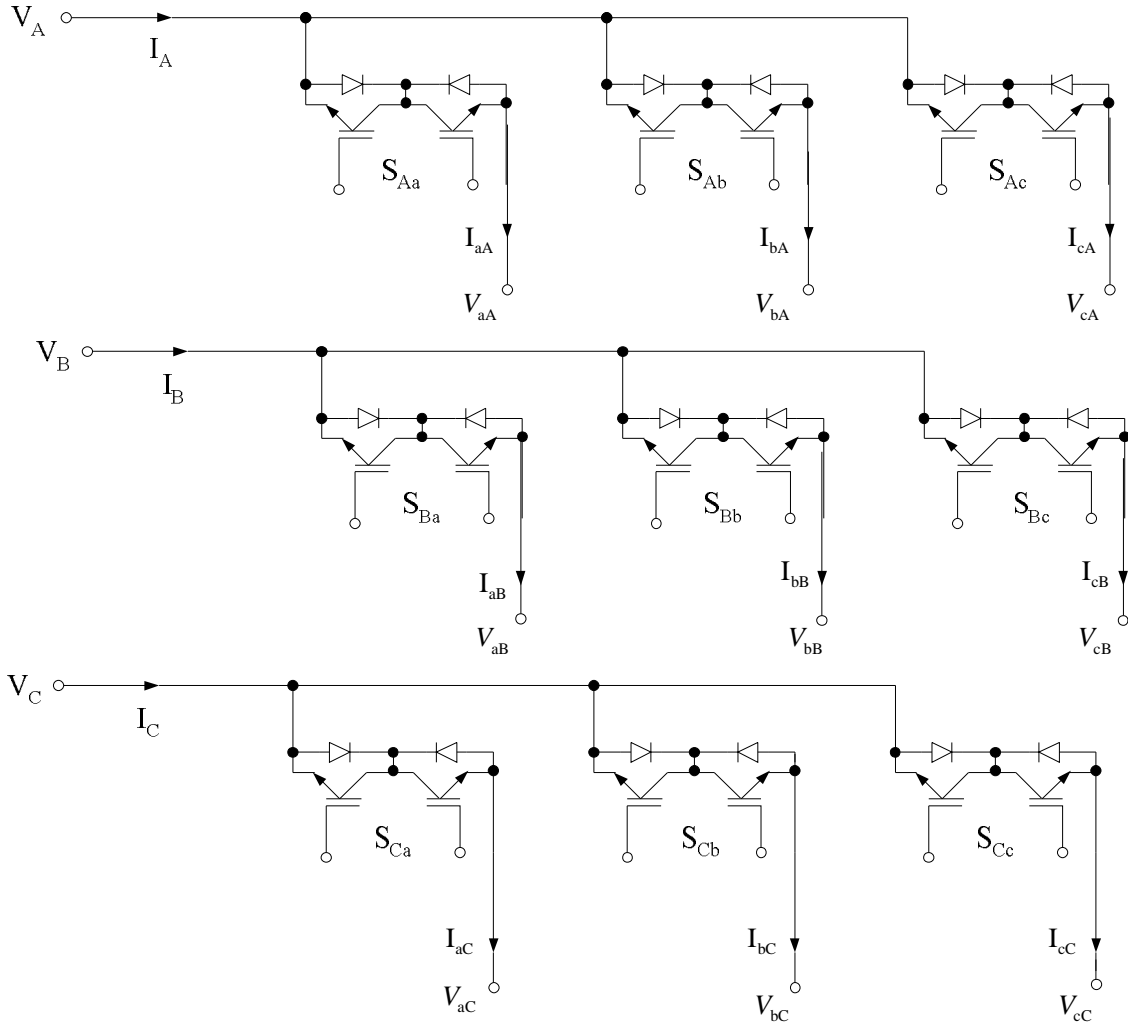
4.3.2 Giriş ve Çıkış Akımları

Matris konverter aracılığıyla hedef, değişken frekansta değişken gerilim elde etmek ise ve sabit sinüzoidal giriş gerilimlerinin kıyaslamasıyla elde edilen çıkış gerilimleri sinüzoidal yapıda ise, matris konverterin çıkışına bağlı bulunan yükün karakterine bağlı olarak çıkış akımları da (Gündoğdu, 2005) aşağıdaki gibi sinüzoidal yapıda olmalıdır.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = I_{om} \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t + \varphi) \\ \cos(\omega_o t + \varphi - 2\pi/3) \\ \cos(\omega_o t + \varphi + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Burada φ yükün güç açısıdır. Şekil 4.4'ten görüldüğü gibi giriş akımları I_A, I_B, I_C ve çıkış akımları I_a, I_b, I_c ' arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{aA} & I_{aB} & I_{aC} \\ I_{bA} & I_{bB} & I_{bC} \\ I_{cA} & I_{cB} & I_{cC} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$



Şekil 4.4. Her bir faza ait giriş akımları ve çıkış akımı bileşenleri

Çıkış akımlarının bileşenleri de çıkış akımları ve modülasyon terimleri cinsinden şu şekilde ifade etmek mümkündür.

$$\begin{bmatrix} I_{aA} \\ I_{aB} \\ I_{aC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{Aa} & m_{Ca} & m_{Ba} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$\begin{bmatrix} I_{bA} \\ I_{bB} \\ I_{bC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{Ba} & m_{Aa} & m_{Ca} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$\begin{bmatrix} I_{cA} \\ I_{cB} \\ I_{cC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{Ca} & m_{Ba} & m_{Aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Denklem (4.15), (4.16) ve (4.17) denklem (4.14)'te yerine yazılacak olursa;

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{Aa} & m_{Ca} & m_{Ba} \\ m_{Ba} & m_{Aa} & m_{Ca} \\ m_{Ca} & m_{Ba} & m_{Aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Matris konvertörün giriş akımları denklem (4.18)'deki gibi elde edilir. Genel bir ifadeyle giriş akımlarını denklem (4.19)'deki gibi göstermek mümkündür.

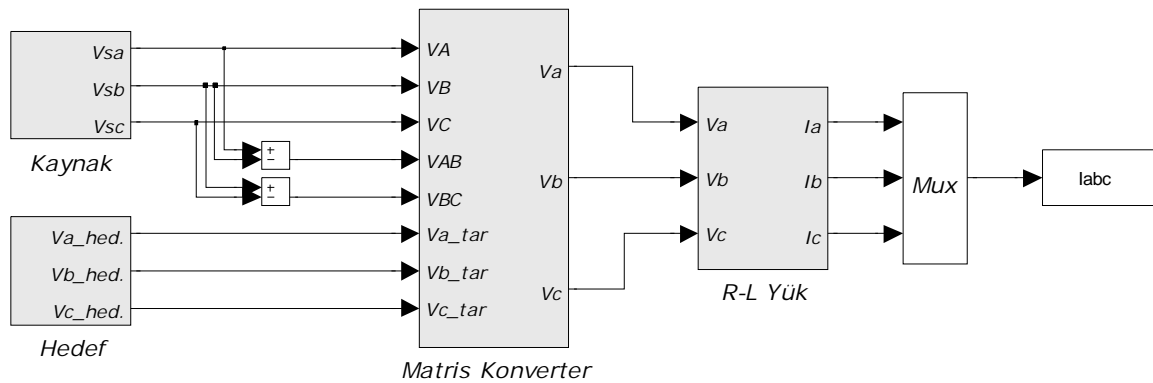
$$I_{ABC} = [m]^T I_{abc} \quad (4.19)$$

Burada $I_{ABC} = [I_A, I_B, I_C]^T$, $I_{abc} = [I_a, I_b, I_c]^T$ ve $[m]$ modülasyon katsayı matrisinin transpozesidir. Denklem (4.12) ve (4.13), denklem (4.18)'de yerine yazıldıktan sonra, bazı matematiksel işlemler yapılarak çıkış akımları I_A, I_B, I_C 'ye ilişkin denklemler aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = qI_{om} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t + \varphi) \\ \cos(\omega_i t + \varphi - 2\pi / 3) \\ \cos(\omega_i t + \varphi + 2\pi / 3) \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

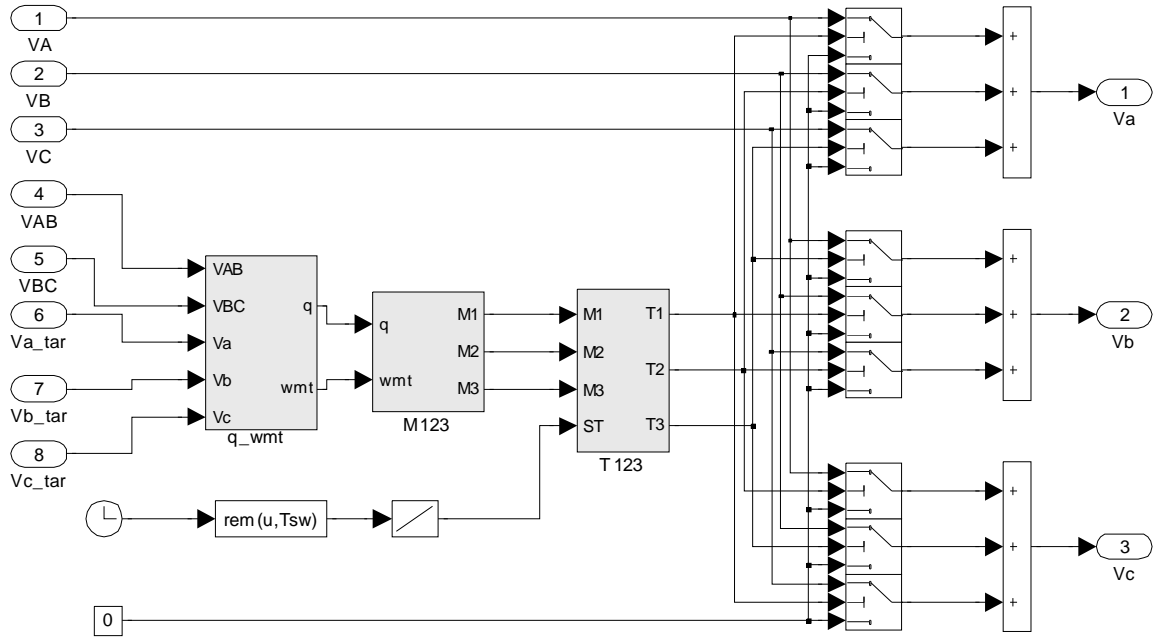
4.4. Matris Konverterin Matlab/Simulink Benzetim Çalışması

Bu bölümde matris konverterin giriş-çıkış gerilimleri ve giriş-çıkış akımları kısmında detaylı bir şekilde verilen matematiksel denklemlerinin ışığında Matlab/Simulink paket programı kullanılarak matris konverterin simülasyonu yapılmıştır. Sabit bir kaynaktan beslenen, R-L yükünü besleyen matris konverterin matlab/simulink modeli Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. R-L yükünü besleyen matris konverter

Matris konverterin Matlab/Simulink ile benzetimini yapabilmek için öncelikle Şekil 4.5'te görüldüğü gibi konverteri besleyecek olan 3-fazlı kaynağın herhangi iki hat gerilimini ölçmek gerekir. Burada V_{AB} ve V_{BC} gerilimleri ölçülmüştür. Şekilden görüldüğü gibi matris konverteri besleyen “Kaynak” isimli blok üç fazlı ideal bir kaynak olup gerilimi ve frekansı sabit 220 volt ve 50 Hz kadardır. “Hedef” isimli blokta ise matris konverterin çıkışında istenilen hedef sinüzoidal 3-fazlı ideal çıkış gerilimleri bulunmaktadır. Ayrıca şekilden de görüldüğü gibi simülasyonda matris konvertere yük olarak bir R-L yük bağlanmıştır. Şekil 4.5'te görülen “Matris Konverter” isimli bloğun iç yapısı Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Matris konverterin Matlab/simulink blok diqramı

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi 9 adet ideal anahtar, $V_A-V_B-V_C$ giriş gerilimleri ve $V_a-V_b-V_c$ çıkış gerilimleri ile toplama blokları dışında kalan diğer blokların tümü, anahtarların sürülmesinde kullanılacak olan T_1, T_2, T_3 dizi darbelerin elde edilmesi için kullanılmıştır. “ q_wmt ” adlı blok aracılığıyla, istenilen çıkış gerilimi genliğinin ve frekansının belirlenmesinde kullanılan q gerilim oranı ve ω_m modülasyon frekansı hesaplanmaktadır. Bunun için, ölçülen giriş gerilimlerinden faz giriş geriliminin tepe değeri ve $\omega_i t$ açısı belirlenebilir (Sünter ve Altun, 2001).

$$V_{im} = \frac{2}{3} \sqrt{(V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{AB} V_{BC})} \quad (4.21)$$

$$\omega_i t = \arctan \left[\frac{-V_{BC}}{\sqrt{3} \left(\frac{2}{3} V_{AB} + \frac{1}{3} V_{BC} \right)} \right] \quad (4.22)$$

Daha sonra denklem (4.7) ile verilen hedef çıkış gerilimlerinden faz çıkış geriliminin tepe değeri ve $\omega_o t$ açısı da hesaplanabilir.

$$V_{om} = \sqrt{\frac{2}{3} (V_a^2 + V_b^2 + V_c^2)} \quad (4.23)$$

$$\omega_o t = \arctan \left(\frac{V_c - V_b}{\sqrt{3} V_a} \right) \quad (4.24)$$

Denklem (4.21) ile (4.23)'ten q gerilim oranı ve denklem (4.22) ile (4.24)'ten $\omega_m t$ modülasyon açısı bulunabilir.

$$q = \frac{V_{om}}{V_{im}} \quad (4.25)$$

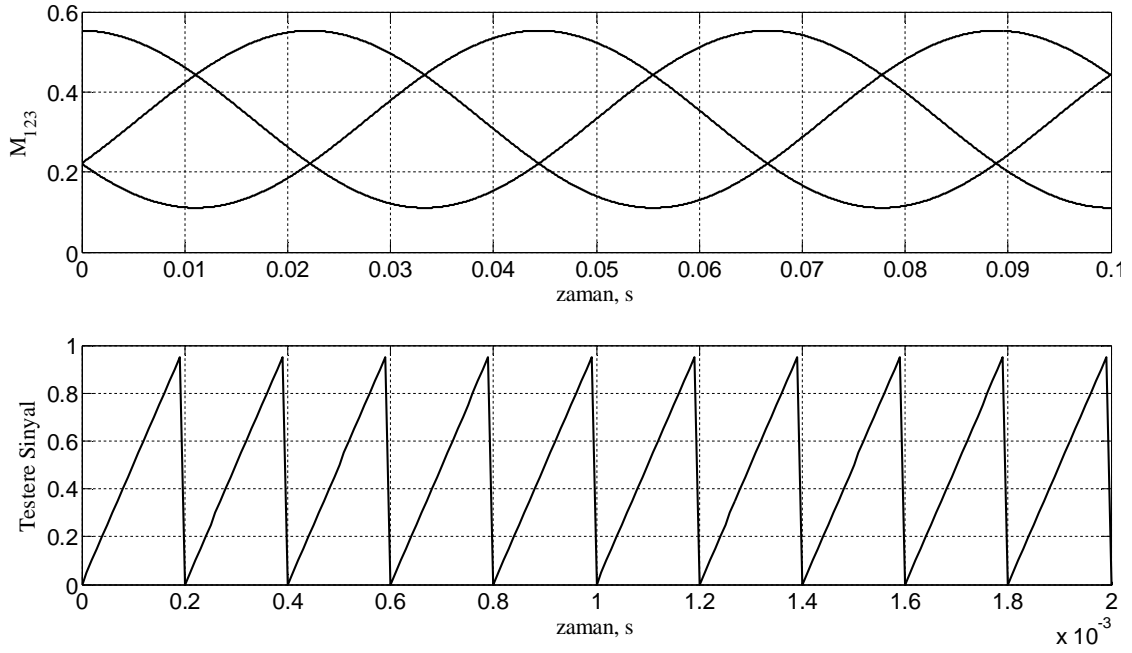
$$\omega_m t = \omega_o t - \omega_i t \quad (4.26)$$

Gerilim oranı ve modülasyon açısı belirlendikten sonra denklem (4.12) kullanılarak “M123” adlı blok aracılığıyla modülasyon terimleri m_1, m_2, m_3 hesaplanmaktadır. Elde edilen modülasyon terimlerinin değerleri daha sonra “T123” bloğu yardımıyla bir testere dişi sinyalle karşılaştırılarak anahtarlara uygulanacak olan T_1, T_2, T_3 darbe dizileri elde edilmektedir. Bütün bu işlemler sonucunda konverter çıkışında V_a, V_b, V_c değişken genlik ve frekanstaki çıkış gerilimleri elde edilmektedir.

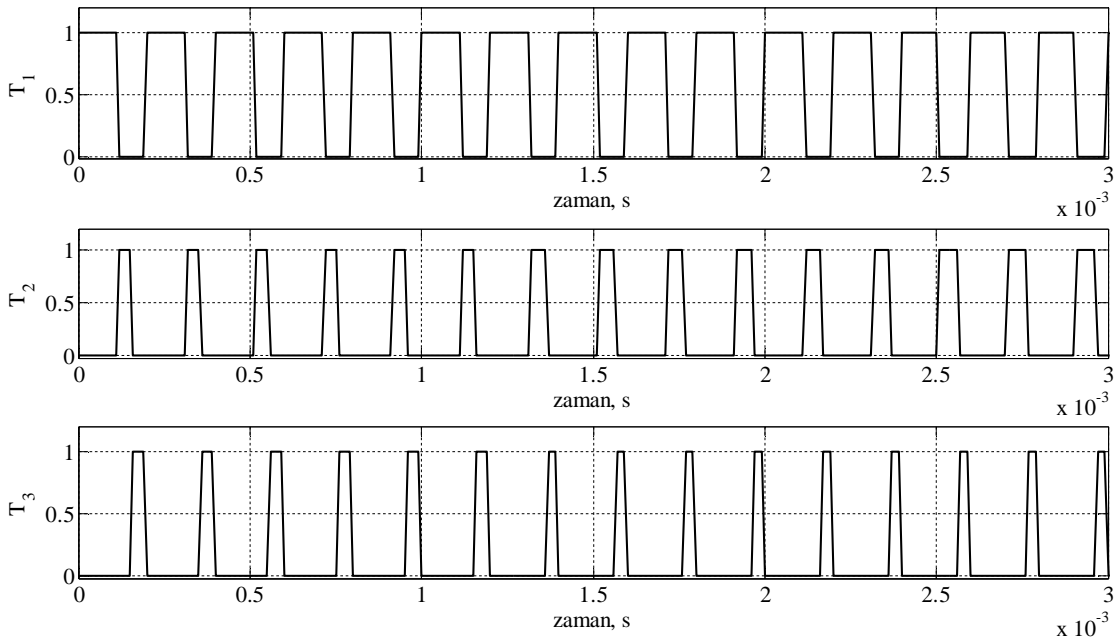
Bu simülasyon çalışmasında matris konverterin giriş gerilimi sabit 220 volt olup frekansı 50 Hz'dir. Başlangıçta hedef olarak çıkış gerilimi 73 volt ve çıkış frekansı 35 Hz seçilmiştir. Bu genlik ve frekanstaki gerilim statik $R=10 \Omega$ ve $L=100 \text{ mH}$ olan R-L yüküne uygulanmıştır. Bu benzetimde tercih edilen sabit anahtarlama frekansı ise 5 kHz'dir.

Şekil 4.7'de değişimleri verilen ve her an için denklem (4.4)'deki gibi toplamları 1 olan m_{Aa}, m_{Ba}, m_{Ca} terimleri, frekansı 5 kHz olan bir testere dişi sinyalle karşılaştırıldıktan sonra, hedef seçilen genliği 73 volt ve frekansı 35 Hz olan çıkış gerilimlerini elde etmek için, Şekil 4.8'de verildiği gibi anahtarlara uygulanacak olan darbe dizileri belirlenmiştir. Burada herhangi bir anahtar kapalı iken diğer iki anahtar açık durumdadır. Şekil 4.9'da

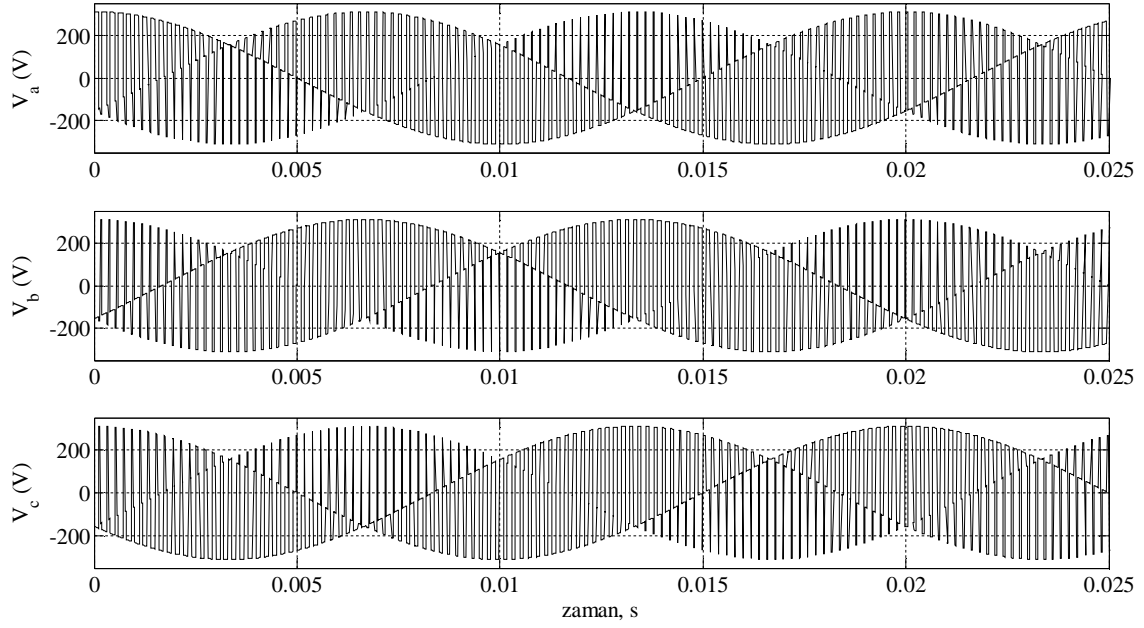
verilen çıkış gerilimleri V_a , V_b , V_c , R-L yüküne uygulanması sonucu Şekil 4.10'da verilen akımların oluşmasına neden olmuştur. Bu oluşan akımlar sinüzoidal ve aralarında 120° lik açı farkı bulunmaktadır. Bu nedenle Şekil 4.9'da değişimleri verilen çıkış gerilimlerinin her biri üzerinde giriş 3-faz gerilimlerinin etkisi görünüyorsa da her bir çıkış faz geriliminin ana bileşeni sinüzoidal ve istenilen genlikte ve frekanstadır.



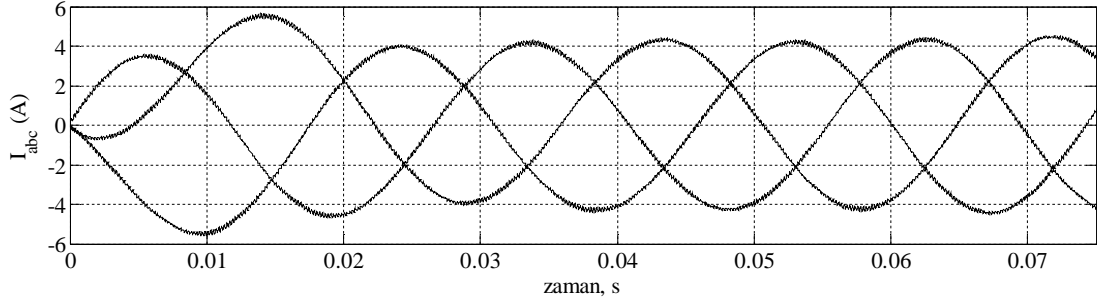
Şekil 4.7. $q = 73/220$ ve $f_o = 35$ Hz için modülasyon terimleri ve testere dişi sinyal değişimi



Şekil 4.8. $q = 73/220$ ve $f_o = 35$ Hz için anahtarlara uygulanan darbe dizileri



Şekil 4.9. $q = 73/220$ ve $f_o = 35$ Hz için çıkış faz gerilimleri

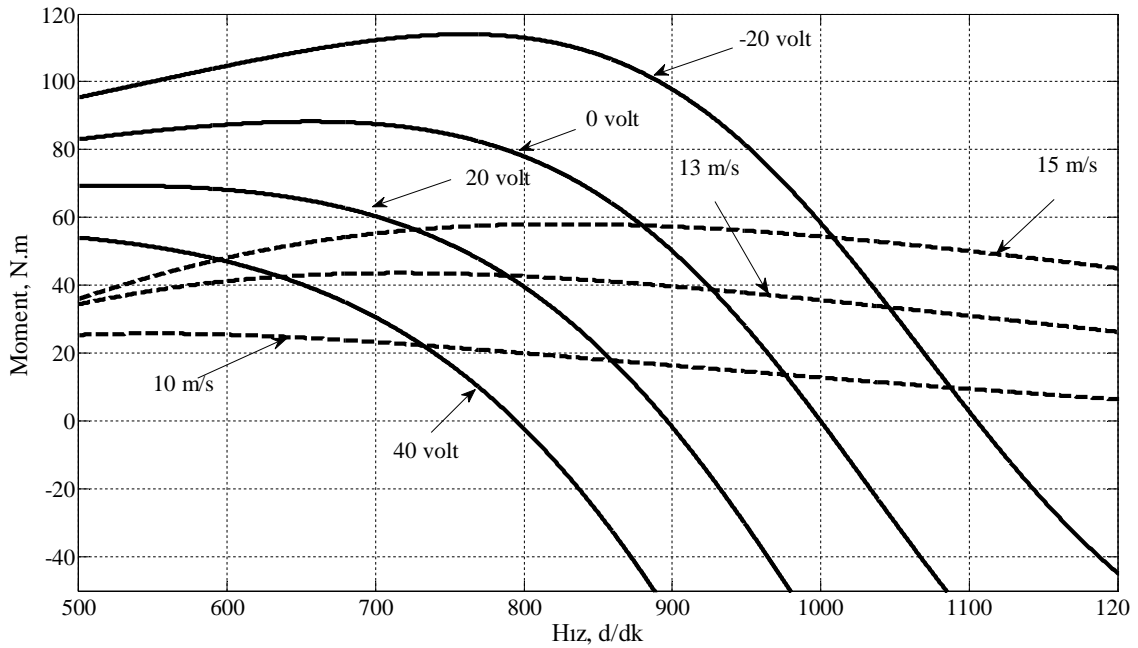


Şekil 4.10. $q = 73/220$ ve $f_o = 35$ Hz için yük akımları

Sonuç olarak böyle bir modülasyon tekniği ile sabit giriş faz gerilimleri kıyılarak değişken genlik ve frekansta sinüzoidal bir gerilim elde edilmiştir. Şekil 4.9'da sabit giriş faz gerilimlerinden elde edilen çıkış faz gerilimleri görülmektedir. Bu çıkış faz gerilimlerinden herhangi biri giriş gerilimlerinin sentezi sonucu olduğu için, değişiminde giriş gerilimlerinin her üçünün etkisi görülmektedir.

5. RÜZGÂR TÜRBİNİNDEN BESLENEN DFIG'in GÜÇ KONTROLÜ

Bu çalışmada rüzgâr türbininden beslenen ve statoru şebekeye bağlı rotoru sargılı bir asenkron generatörün (DFIG) güç kontrolünün simülasyonu yapılmıştır. Bunun için generatörün rotoru değişken frekanslı ve değişken gerilimli bir güç kaynağından beslenmiştir. DFIG'in rotorunu besleyebilmek için değişken güç kaynağı olarak matris konverter kullanılmıştır. Şekil 5.1'de rotoruna uygulanan değişik gerilimler için generatörün hız-moment karakteristikleri ve değişik rüzgar hızı değerleri için generatörün beslediği rüzgar türbini karakteristikleri görülmektedir. Karakteristiklerin kesişme noktaları, generatörün bu noktalarda rüzgâr türbininin sahip olduğu güç kadar gücü şebekeye aktarabileceği anlamına gelmektedir.



Şekil 5.1. Rüzgâr türbini ve DFIG'in hız-moment karakteristikleri

Rüzgâr türbininin enerjisini elektrik enerjisine dönüştürürken DFIG'in mili rüzgâr türbininin miline akuple edilmesi gerekir. Oluşan sistemin mekaniksel dinamiği dikkate alınırken rüzgâr türbinine göre DFIG bir dinamik yük olarak algılanır. Ancak asenkron generatör denetim yoluyla rüzgâr türbini tarafından dinamik yük olarak algılanması için uygun hale getirilmesi gerekir. Aksi halde denetimsiz olarak asenkron generatör bir rüzgâr

türbinine akuple edilecek olursa, asenkron generatöre göre rüzgâr türbini yük olarak algılanabilir. Bu nedenle bu çalışmada ele alınan ve rüzgâr gücünden elektrik enerjisi üreten asenkron generatörün, alan yönlendirme kontrol yöntemi kullanılarak, kontrolü gerçekleştirilmiştir. Alan yönlendirme ile asenkron generatör rüzgâr türbinine göre yük olarak algılanacak hale getirilerek, generatörün güç kontrolünün simülasyonu yapılmıştır.

5.1. Vektör Kontrol Yöntemi

Vektör kontrol yöntemi ac sürücü sistemlerde yaygın bir şekilde kullanılan önemli bir yöntemdir. Asenkron makinelerde bu yöntemin kullanılması, skaler yonteme göre makinenin performansını çok daha olumlu etkilemektedir. Bu nedenle bu çalışmada bu yöntem tercih edilmiştir. Ancak bu yöntemin uygulanmasında kullanılan algoritma skaler yonteme göre daha karmaşıktır. Vektör kontrol yada alan yönlendirmeli kontrol yöntemi, ac makineye stator tarafından yada rotor tarafından dolaylı olarak yada doğrudan bir şekilde uygulanabilir. Bu çalışmada asenkron generatörün denetimi için uygulanan vektör kontrol yöntemi, dolaylı bir şekilde stator akısı yönlendirilecek şekildedir.

Asenkron makinenin dolaylı bir şekilde rotor akımları ile stator akısının yönlendirilebilmesi için makinenin stator akı vektörünün senkron hızla dönen d-q eksen sisteminde d eksenini ile çakıştırılması gerekir. Bu akı vektörü d eksenine çakıştırıldığı taktirde, dc makinelerde olduğu gibi, makinenin alanı ile ürettiği moment ayrı ayrı akım bileşenleriyle denetlenebilir. Böyle yapılabildiği taktirde makinenin ürettiği moment ve makinenin manyetik alanı birbirinden bağımsız bir şekilde kontrol edilebilir. Stator akı vektörü d eksenine çakıştırıldığı taktirde, bu vektörün q bileşeni sıfır olacaktır. Vektörün d bileşeni ise stator akı vektörünün tümünü temsil edecektir.

$$\psi_{sq} = 0 \quad \text{ve} \quad \psi_{sd} = L_m i_\mu \quad (5.1)$$

Burada i_μ denetim esnasında stator akısı istenildiği şekilde olması için gerekli mıknatıslanma akımıdır. Denklem (5.1)'deki ifadeler denklemler (3.50) ve (3.51)'de yerine yazılırsa stator d ve q akımları rotor d ve q akımları cinsinden şu şekilde ifade edilebilir.

$$i_{sd} = \frac{L_m}{L_s} (i_\mu - i_{rd}) \quad (5.2)$$

$$i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \quad (5.3)$$

Kaçak indüktans katsayısı olarak da söylenen σ 'nın eşit olduğu şu ifade dikkate alındığında;

$$\sigma = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r} \quad (5.4)$$

ve denklemler (5.2) ve (5.3) denklemler (3.52) ve (3.53)'te yerine yazıldığı takdirde rotor akı vektörü bileşenleri için aşağıdaki ifadeler bulunur.

$$\psi_{rd} = \sigma L_r i_{rd} + (1 - \sigma) L_r i_{\mu} \quad (5.5)$$

$$\psi_{rq} = \sigma L_r i_{rq} \quad (5.6)$$

Ayrıca denklemler (5.1), (5.2) ve (5.3) denklemler (3.46) ve (3.47)'de kullanılacak olursa, denetim için gerekli mıknatıslanma akımı ve rad/s olarak senkron frekans ifadeleri elde edilmiş olur.

$$i_{\mu} = \frac{\frac{T_s}{L_m} U_{sd} + i_{rd}}{1 + T_s p} \quad (5.7)$$

$$\omega_e = \frac{\frac{T_s}{L_m} U_{sq} + i_{rq}}{T_s i_{\mu}} \quad (5.8)$$

Burada yukarıdaki ifadelerde görünen T_s stator tarafının elektriksel zaman sabiti olup $T_s = L_s / R_s$ oranı kadardır. Denklemler (5.5) ve (5.6) denklemler (3.48) ve (3.49)'da yerine yazılacak olursa şu sonuç ifadeler elde edilmiş olunur.

$$U_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} + U_{rdc} \quad (5.9)$$

$$U_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + U_{rqc} \quad (5.10)$$

$$U_{rdc} = (1 - \sigma) L_r \frac{di_{\mu}}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{rq} \quad (5.11)$$

$$U_{rqc} = (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{rd} + (\omega_e - \omega_r) (1 - \sigma) L_r i_{\mu} \quad (5.12)$$

Burada U_{rdc} ve U_{rqc} kompanzasyon gerilimleridir. Makinenin denetimi yapılırken kullanılan akım kontrolörlerinin çıkışındaki gerilim sinyallerine, bu terimlerin ilave edilmesiyle ancak makinenin rotoruna uygulanması gereken gerilimlerin seviyeleri belirlenmiş olur. Denklemler (5.2) ve (5.3) denklem (3.54)'te kullanılacak olursa, birbirinden bağımsız iki akım bileşeni cinsinden moment şu şekilde bulunur.

$$T_e = -3 \frac{P L_m^2}{2 L_s} i_\mu i_{rq} \quad (5.13)$$

Görüldüğü gibi moment i_μ ve i_{rq} akımlarına bağımlıdır. Yalnız bu iki akım birbirlerinden bağımsız kontrol edilebildiği için i_μ akımı ile alan ve i_{rq} akımı ile hız yada moment kontrol edilebilir. i_μ akımı sabit tutulduğunda, serbest uyarımlı dc motorda olduğu gibi, asenkron makine de hız yada moment de kontrol edilebilmektedir.

Asenkron generatörün stator aktif ve reaktif güçlerinin aşağıdaki ifadelerle eşit olduğuna göre, bu güçlerin kontrolü için uygun sonuçlar bulunması gerekir.

$$P_s = 3(U_{sd} i_{sd} + U_{sq} i_{sq}) \quad (5.14)$$

$$Q_s = 3(U_{sq} i_{sd} - U_{sd} i_{sq}) \quad (5.15)$$

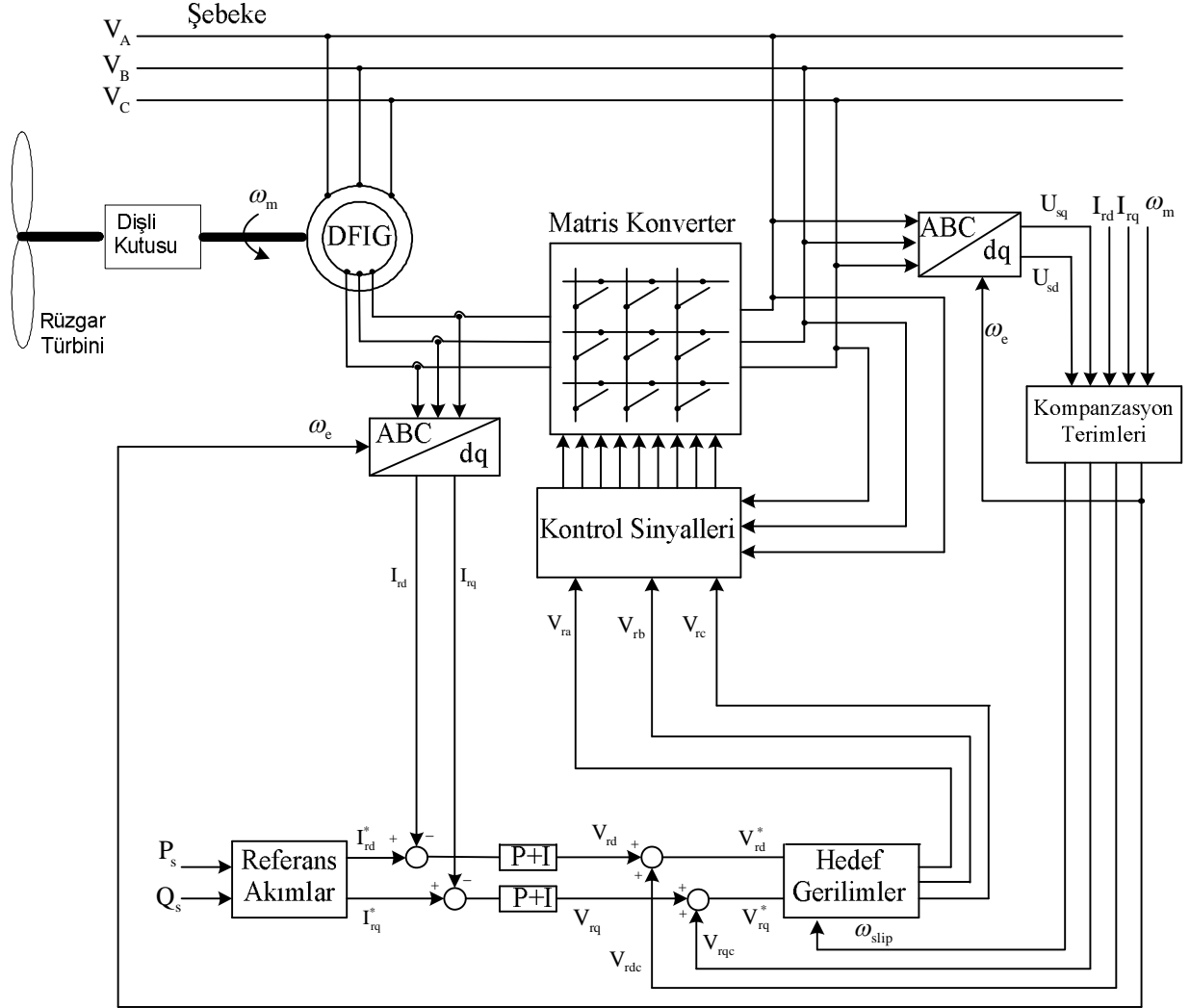
Burada P_s stator aktif gücü ve Q_s stator reaktif gücüdür. Bu güç ifadelerinde denklemler (5.1), (5.2) ve (5.3) yerine yazıldığı zaman, stator aktif ve reaktif güçlerinin de kontrol edilebildiğini gösteren sonuç denklemler elde edilir.

$$P_s = -3\omega_e \frac{L_m^2}{L_s} i_\mu i_{rq} \quad (5.16)$$

$$Q_s = 3\omega_e \frac{L_m^2}{L_s} i_\mu (i_\mu - i_{rd}) \quad (5.17)$$

Görüldüğü gibi stator aktif ve reaktif güçleri de moment ifadesinde olduğu gibi i_μ ve i_{rq} akımlarına bağlıdır. Burada i_μ akımı sabit tutulduğu takdirde i_{rd} akımıyla stator reaktif gücü ve i_{rq} akımıyla stator aktif gücü kontrol edilebilmektedir. Böylece asenkron generatör rüzgar türbini tarafından sürüldüğü takdirde, statordan rüzgar enerjisinin elektrik enerjisi olarak alınması için rotora uygulanması gereken gerilimin ve frekansının belirlenmesinde

denklemler (5.7), (5.8), (5.16) ve (5.17) kullanılabilir. Bu çalışmada rotor yanı matris konverter üzerinden şebekeye bağlı ve rüzgar türbini ile beslenen bilezikli asenkron generatörün güç kontrol şeması Şekil 5.2’de görülmektedir.

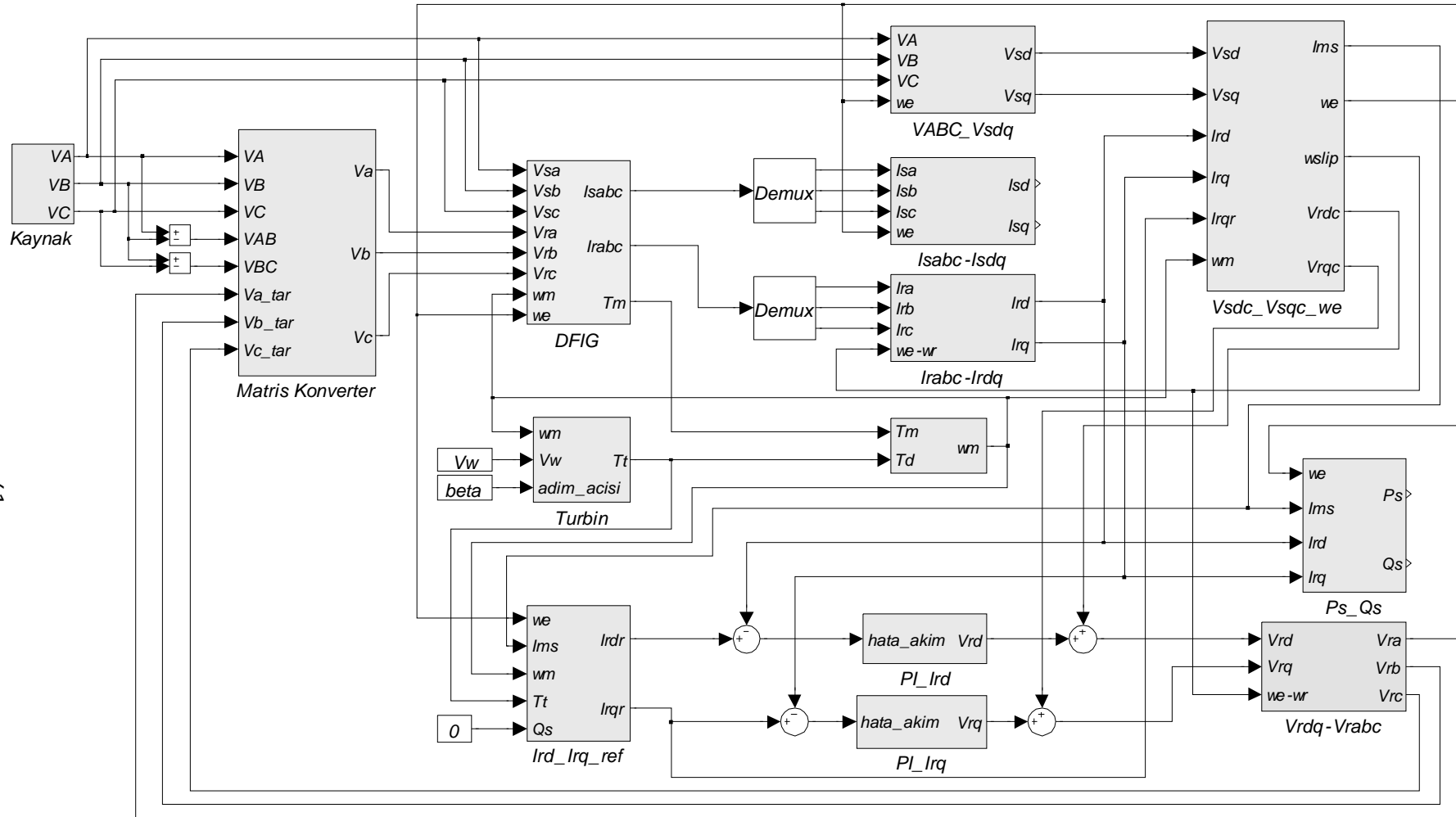


Şekil 5.2. DFIG'in güç kontrolü şeması

5.2. Simülasyon Modeli ve Sonuçlar

Bu çalışmada simülasyon modeli kurulmadan önce, önce makinemizi tahrik edecek türbin modeli gerçekleştirilmiştir. Bunun için ikinci bölümde türbinle ilgili verilen denklemler ışığında rüzgârdan beslenen türbinin simülasyonu yapılmıştır. Daha sonra bölüm üçte bu çalışmada kullandığımız asenkron generatörün matematiksel denklemleri

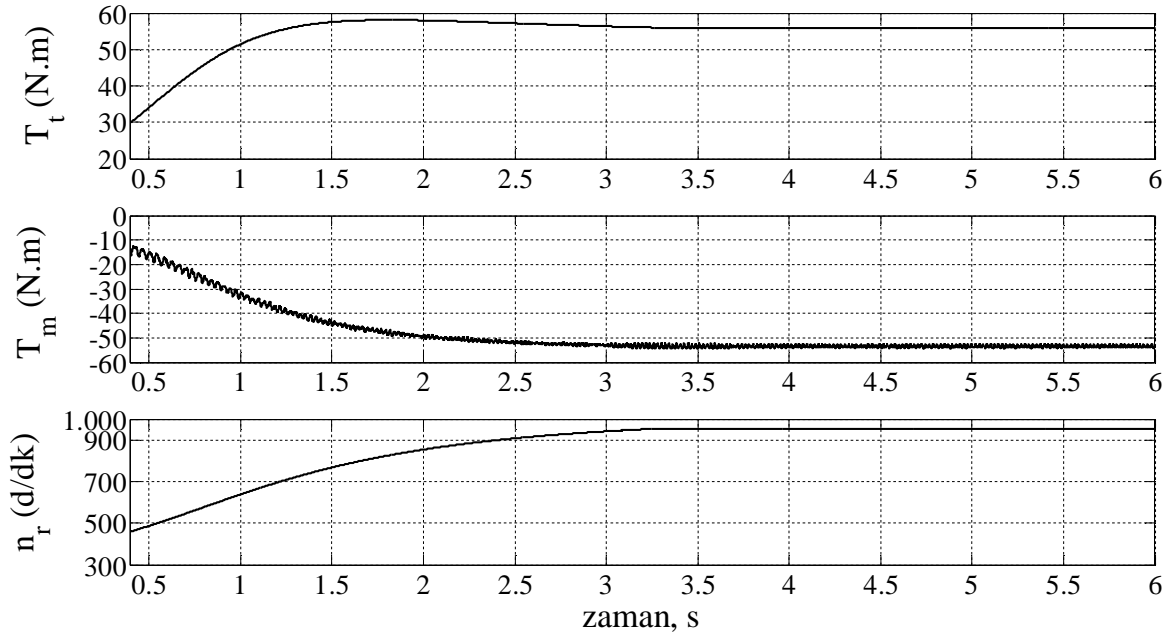
(3.38), (3.46)-(3.54) kullanılarak Matlab/Simulink ortamında makineye ait Şekil 3.17’de verilen model oluşturulmuştur. Dördüncü bölümde matris konverterin giriş-çıkış gerilimleri ve giriş-çıkış akımları kısmında detaylı bir şekilde verilen matematiksel denklemlerden faydalanarak matris konverterin simülasyonu yapılmıştır. En son olarak da bölüm beşte verilen asenkron makineyi kontrol edecek vektör kontrol yöntemi açıklanmıştır. Bunların hepsinin uygun bir şekilde bir arada kullanılmasıyla, rüzgar türbininden beslenen rotor yanı matris konverter üzerinde şebekeye bağlı DFIG’in güç denetiminin Matlab/Simulink ortamında oluşturulan Şekil 5.3’te verilen model elde edilmiş olur. Bu modelde statora ait 3-faz akım ve gerilimleri ile rotora ait 3-faz akımları d-q eksenine dönüştürülmüştür. Stator d-q gerilimleri, rotor d-q akımları, rotor q eksen referans akımı ve generatör mil hızı kullanılarak $V_{sdc_Vsqc_we}$ bloku elde edilmiştir. Döner alan hızı, mıknatıslanma akımı ve rotor d-q akımları kullanılarak da makinenin aktif ve reaktif güçlerinin hesaplanmasını sağlayan $P_s_Q_s$ bloku elde edilmiştir. Şekil 5.3’te görüldüğü gibi türbin mil hızı, döner alan hızı, mıknatıslanma akımı, türbin momenti ve reaktif güç değerleri kullanılarak rotor d-q eksen takımındaki referans akım değerleri hesaplanır. Bu referans akım değerleri ile rotor d-q akımları karşılaştırılıp PI kontrolörlerine uygulandığında $V_{rd}\text{-}V_{rq}$ gerilimleri elde edilir. Elde edilen bu gerilim değerleri ile kompanzasyon gerilimleri karşılaştırarak matris konverterin hedeflenen giriş gerilimleri oluşturulur. Böylece matris konverterin çıkışından elde edilen gerilimler DFIG’e uygulanarak, DFIG çıkışında elde edilen akımların uygun şekilde dönüşümleri sağlanır ve kontrolör girişindeki akımlar elde edilerek sistemin vektör kontrol yöntemiyle kontrolü sağlanmış olur.



Şekil 5.3. Rüzgar türbininde beslenen rotor yanı matris konverterler üzerinde şebekeye bağlı DFIG'in güç kontrolünün simulink bloku

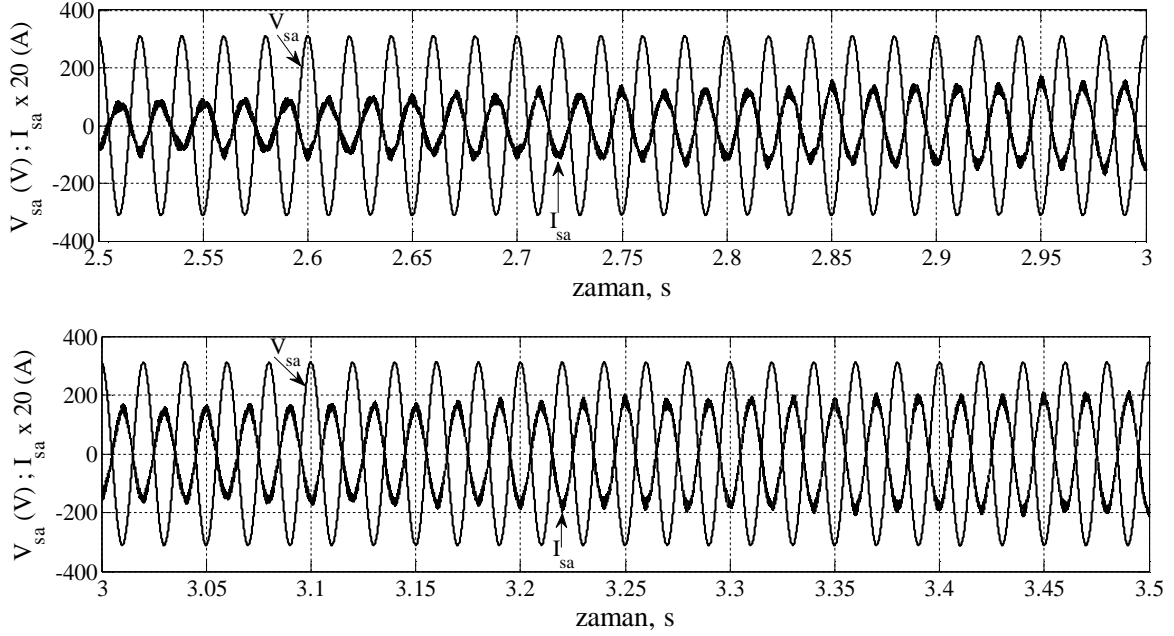
Şekil 5.3'te verilen model yapıda, asenkron makine generatör olarak bir rüzgâr türbini tarafından tahrik edilirken, aynı zamanda stator uçları faz gerilimi 220 volt olan bir üç fazlı kaynağa bağlı tutulmuştur. Rotor ise matris konverterin çıkış gerilimi uygulanmıştır. Simülasyonda kullanılan asenkron makine ve türbin parametreleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Parametreleri verilen asenkron makine hızı senkron hız altı alınmış rüzgar hızı 15 m/s, türbin mil hızı ise 100 rad/s (955 d/dk) alınarak tabloda parametreleri verilen rüzgar türbini tarafından tahrik edildiği varsayılmış ve Şekil 5.4. ile Şekil 5.12. arasındaki sonuçlar alınmıştır.

Bu çalışma koşullarında Şekil 5.4'te türbin momentini (T_t), makine momentini (T_m) ve mil hızının (n_r) zamanla değişimi görülmektedir. Şekildeki değişimler incelendiğinde mil hızının 1000 d/dk senkron hızın altında kaldığı görülmektedir. Moment değişimlerine dikkat edilecek olursa, türbin momentinin değişimi pozitif iken makinenin ürettiği moment ise negatiftir. Bu anlamı ise, türbinin makineye enerji verdiği ve makinenin karşı yönde moment üreterek bu enerjiyi aldığı anlamına gelmektedir. Şekil 5.4'te görüldüğü gibi sürekli durumda mil hızının sabit olduğu zaman aralıklarında türbin momentini mutlak olarak makinenin ürettiği moment kadardır.

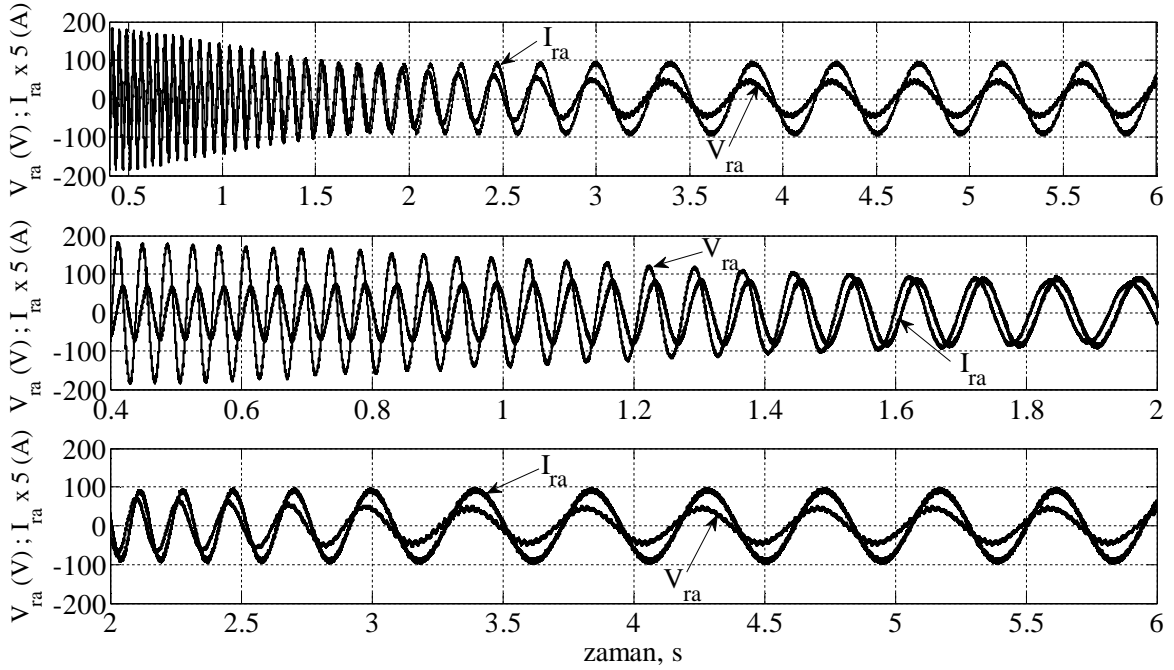


Şekil 5.4. Türbin momentini (T_t), makine momentini (T_m) ve mil hızının (n_r) zamanla değişimi

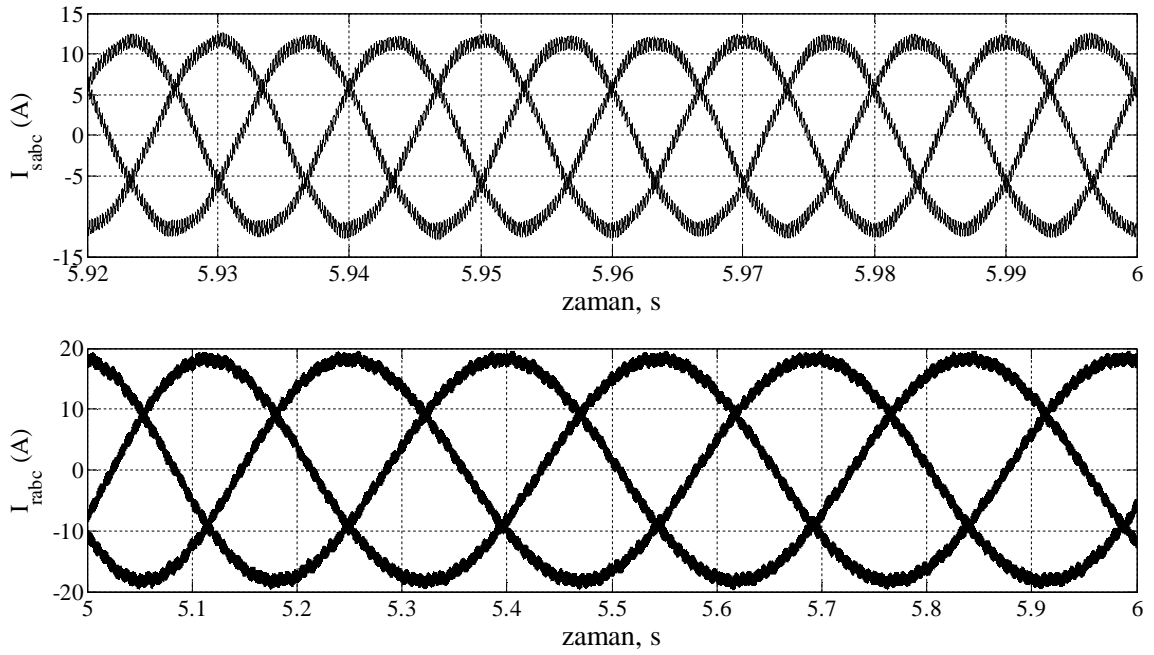
Şekil 5.5'te stator 1-faz gerilim ve akımının zamanla değişimi verilmiştir. Şekil 5.6'da ise rotor 1-faz akım ve geriliminin zamanla değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.5. Stator bir faz gerilim ve akımının zamanla değişimi



Şekil 5.6. Rotor bir faz gerilim ve akımın zamanla değişimi

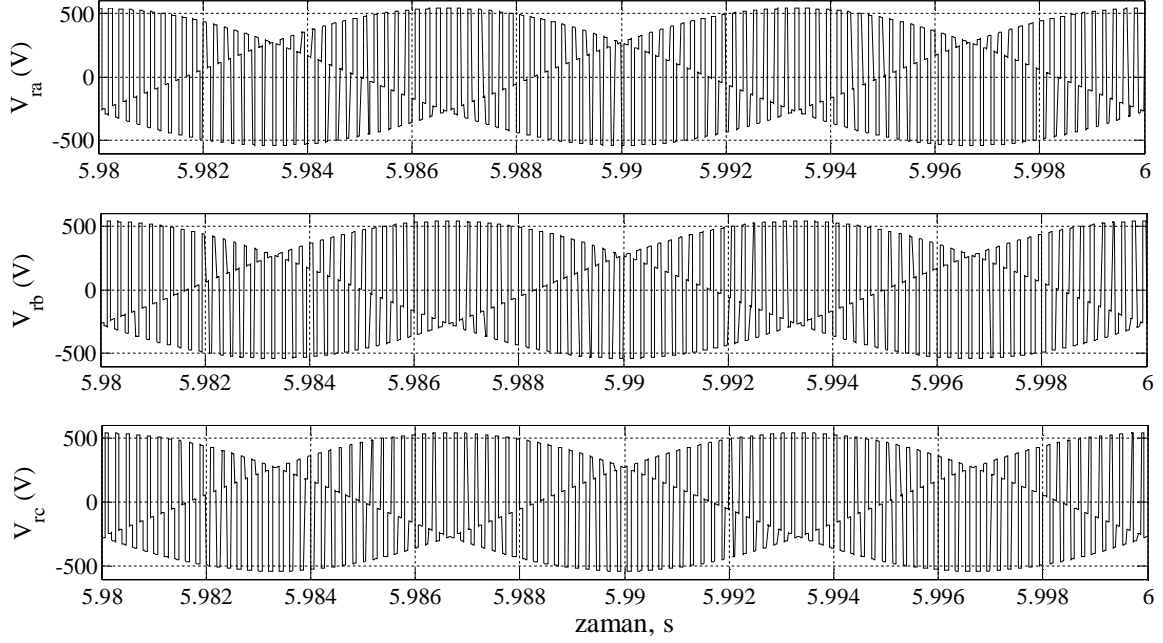


Şekil 5.7. Stator ve rotor 3-faz akımlarının zamanla değişimi

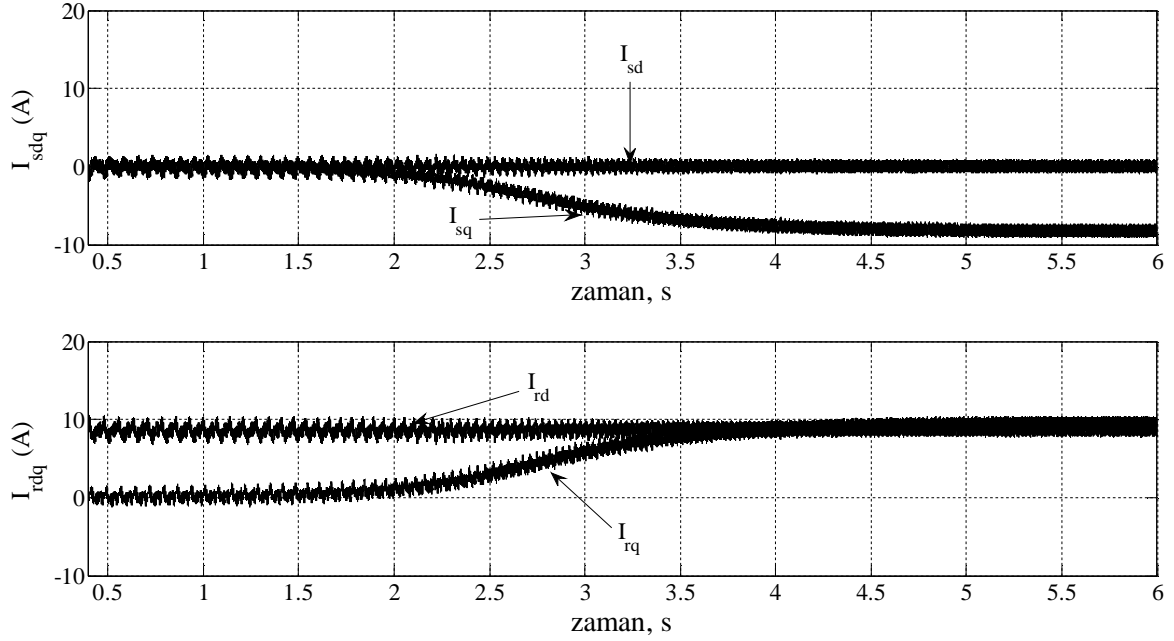
Şekil 5.5'te stator 1-faz gerilim ve akımının 180° faz farklı olduğu görülmektedir. Ayrıca gerilim değeri aynı kalırken akım değerinin zamanla arttığı da gözlemlenebilmektedir. Şekil 5.6'da rotor 1-faz akım ve gerilim değerlerinin zamanla birbirinin tersi yönünde bir değişimin gösterdikleri görülmektedir. Gerilim genliği zamanla azalırken akım genliği ise bir artış göstermektedir. Akım ve gerilimin frekansı da zamanla azalmaktadır. Şekil 5.7'de stator ve rotor 3-faz akımlarının zamanla değişimleri verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi stator akımlarının frekansı rotor akımlarının frekansından daha büyük olduğu görülmektedir.

Şekil 5.8'de rotora uygulanan matris konverterin çıkışında elde edilen gerilimlerin zamanla değişimi görülmektedir. Bu gerilim değerleri sabit olup frekansı ise 50 Hz olmaktadır. Şekil 5.9'da stator ve rotor d-q akımlarının zamanla değişimleri verilmektedir. Değişimler incelendiğinde stator d akımının sıfır olduğu, q akımının makine devrinin sürekli duruma geldiği zamanda negatif yönde bir artışın olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak da rotor q akımında stator q akımının tersi yönde bir değişim olmaktadır. Şekil 5.10'da stator d-q akı fazörlerinin zamanla değişimleri verilmektedir. Stator akı vektörü d eksenine çakıştırıldığı zaman, bu vektörün q bileşeni sıfır olmaktadır. Stator akı vektörünün d bileşeni mıknatıslanma akımına bağlı olduğundan ve mıknatıslanma akımı

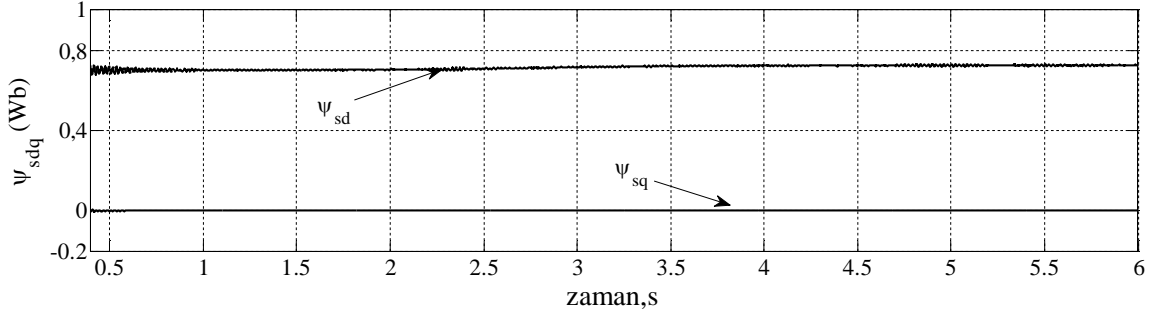
sabit seçildiğinden akının bu bileşeni de mıknatıslanma akımıyla orantılı olarak sabit bir değer almaktadır.



Şekil 5.8. Rotor 3-faz gerilimlerinin zamanla değişimi

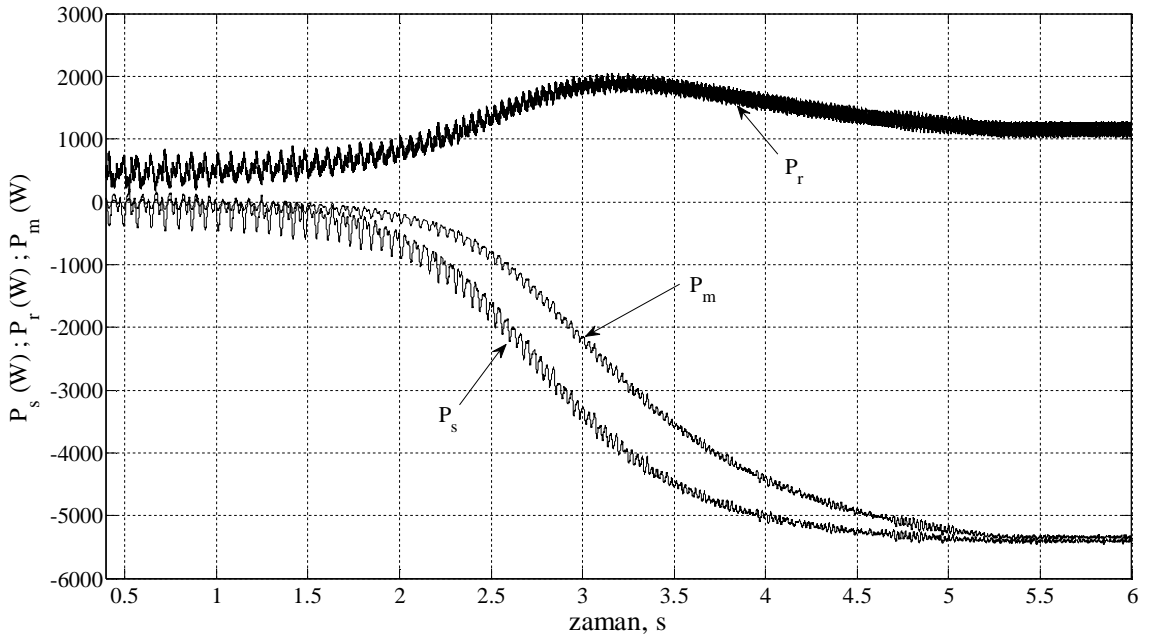


Şekil 5.9. Stator ve rotor d-q akımlarının zamanla değişimi



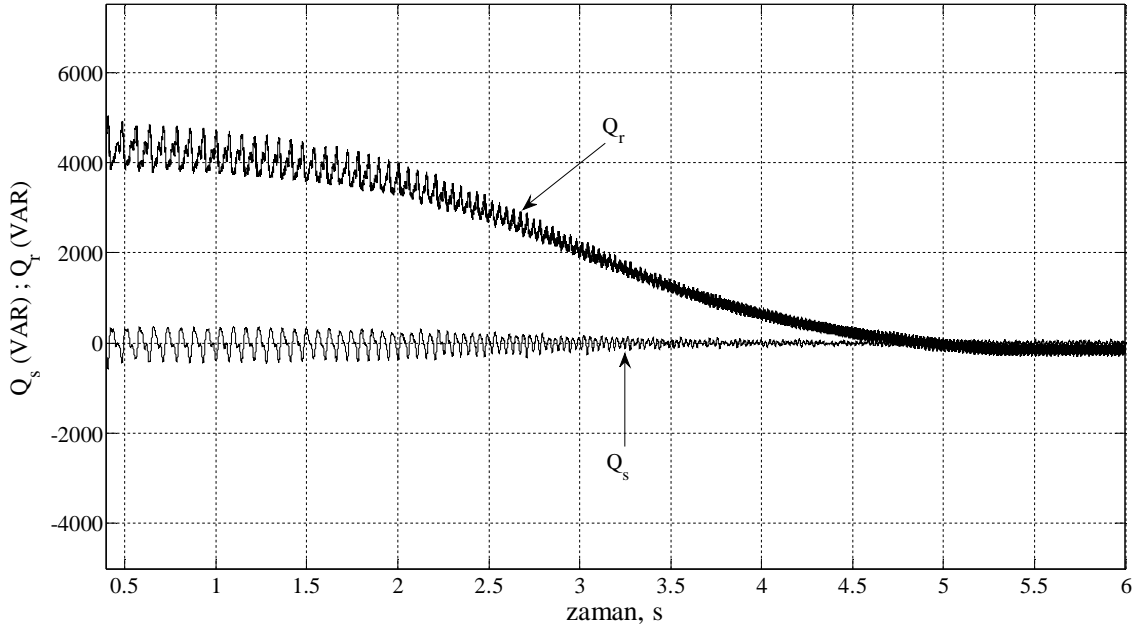
Şekil 5.10. Stator d-q akı fazörünün zamanla değişim

Şekil 5.11’de stator gücü (P_s), rotor gücü (P_r) ve mekanik gücün (P_m) zamanla değişim eğrileri verilmektedir. Değişimleri incelendiğinde rotor gücü pozitif, stator ve mekanik güçler ise negatif olduğu görülüyor. Güçlerin negatif olması, asenkron makinenin türbin aracılığıyla mekanik güç olarak stator uçlarının bağlı olduğu kaynağa doğru, güç akışında bulunduğu anlamına gelmektedir. Makine türbinden mekanik enerji almış ve bu enerjiyi elektrik enerjisi olarak stator uçlarının bağlı bulunduğu kaynağa aktarmıştır. Rotor gücünün pozitif olması rotorun güç beslediğinin anlamına gelmektedir.



Şekil 5.11. Stator (P_s) ve rotor (P_r) aktif güçleri ile makine gücünün (P_m) zamanla değişimi

Şekil 5.12’de stator ve rotor reaktif güçlerinin zamanla değişim eğrileri görülmektedir. Stator reaktif gücü i_{rd} akımıyla kontrol edilebilmektedir. i_{rd} sıfır yapılarak stator reaktif gücü sıfır yapılabilmektedir. Rotor ise makine ilk yol aldığı anda reaktif güç çekmektedir. Makine sürekli duruma geldiğinde ise rotor reaktif gücü sıfır olmaktadır.

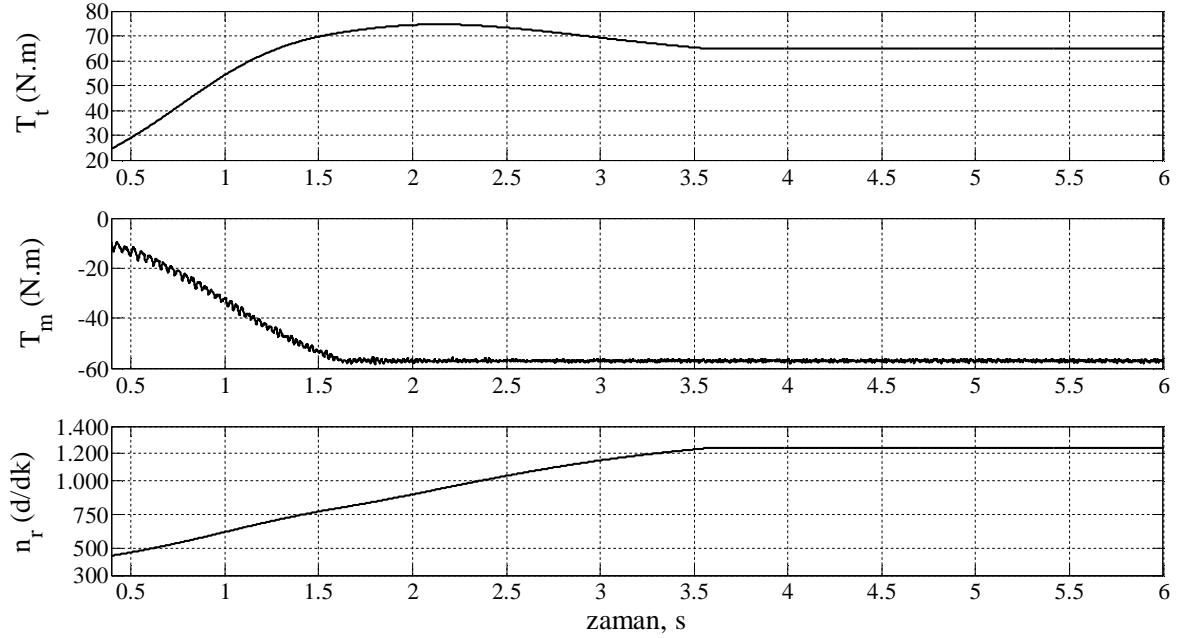


Şekil 5.12. Stator (Q_s) ve rotor (Q_r) reaktif güçlerinin zamanla değişimleri

Şekil 5.3’te verilen model yapıda, asenkron makine generatör olarak bir rüzgâr türbini tarafından tahrik edilirken, aynı zamanda stator uçları faz gerilimi 220 volt olan bir üç fazlı kaynağa bağlı tutulmuştur. Rotora ise matris konverterin çıkış gerilimi uygulanmıştır. Parametreleri verilen asenkron makine hızını senkron hızının üstü alınarak rüzgar hızı 17 m/s, türbin mil hızı ise 130 rad/s (1241 d/dk) alınarak Tablo 3.1’de parametreleri verilen rüzgar türbini tarafından tahrik edildiği varsayılarak yukarıdaki sonuçların hepsi tekrar alınmıştır.

Şekil 5.13’de türbin momentini, makine momentini ve mil hızının zamanla değişimi görülmektedir. Şekildeki değişimler incelendiğinde mil hızının 1000 d/dk senkron hızının üstüne çıktığı görülmektedir. Moment değişimlerine dikkat edilecek olursa, Şekil 5.4’te verilen değişimlere paralel bir değişim gözlemlenmektedir. Aradaki fark ise hıza bağlı olarak moment değişimlerinin değeri olarak bir artış göstermeleridir. Türbin momentinin değişimi pozitif iken makinenin ürettiği moment ise negatiftir. Bu anlamı ise, türbinin

makineye enerji verdiği ve makinenin karşı yönde moment üreterek bu enerjiyi aldığı anlamına gelmektedir.



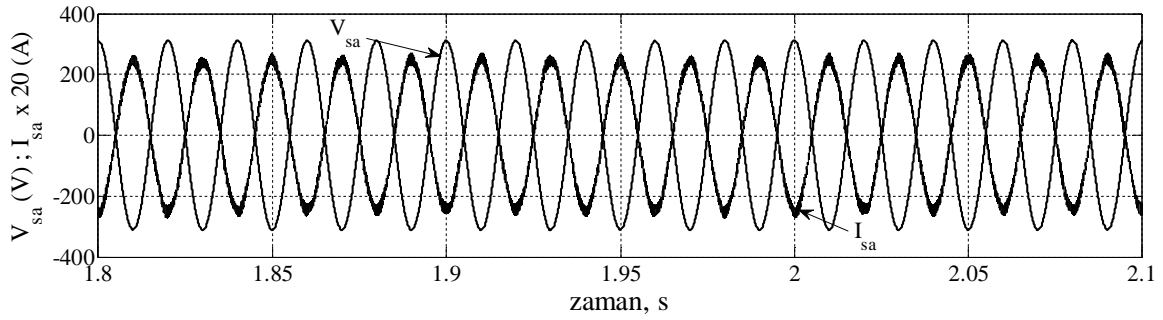
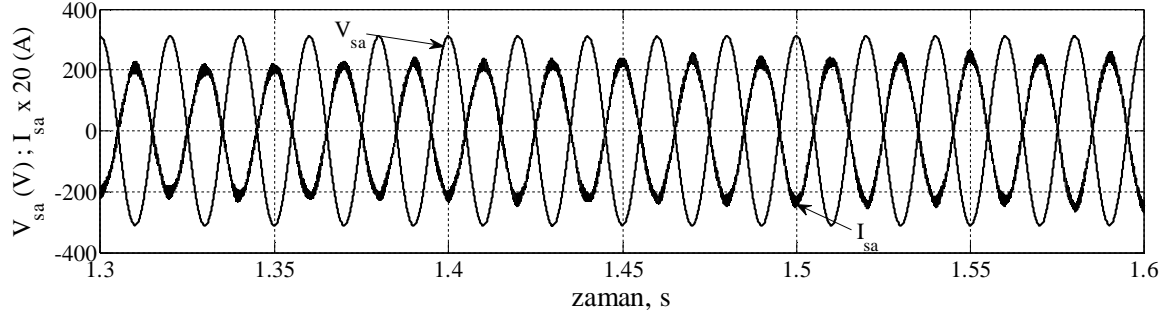
Şekil 5.13. Türbin momenti (T_t), makine momenti (T_m) ve mil hızının (n_r) zamanla değişimi

Şekil 5.14'te stator 1-faz akım ve gerilimlerinin zamanla değişimleri verilmektedir. Şekil ayrıntılı bir şekilde incelendiğinde akım ile gerilimin 180° faz farklı olduğu ve akımın zamanla genliğinde bir artışın olduğu görülmektedir. Buna karşın gerilim değerinde bir değişim söz konusu olmamaktadır.

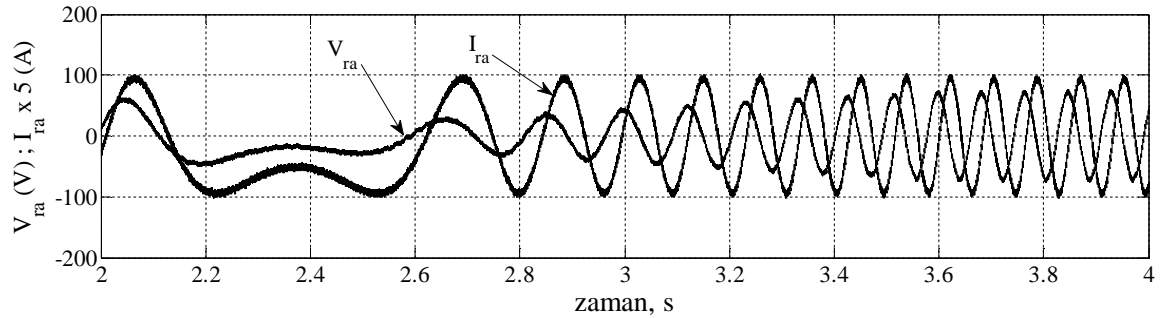
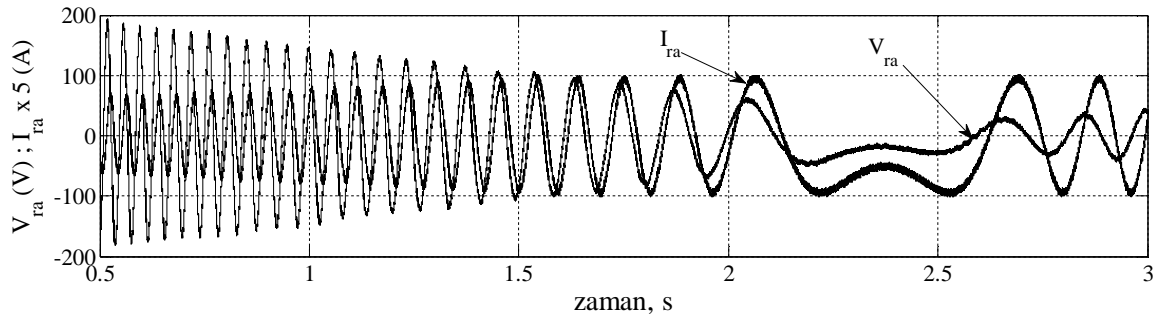
Şekil 5.15'te rotor 1-faz akım ve geriliminin zamanla değişimi verilmektedir. Şekil kontrol edildiğinde şeklin başında akım ile gerilim arasında faz farkı küçük iken makine senkron hızı yakalamaya çalıştığında bu faz farkının arttığı görülmektedir. Ayrıca makine, senkron hızı yakalamadan önce akım ve gerilim frekansı büyük iken senkron hızın üstüne çıktığı zamanda bu frekans değerinin düştüğü, başlangıçta akımın genliği küçük gerilimin genliği büyük olduğu halde zamanla akımın arttığı gerilim azaldığı da görülmektedir.

Şekil 5.16'da stator ve rotor 3-faz akımlarının zamanla değişimleri verilmektedir. Stator 3-faz akımlarının sürekli durumda sabit ve sinüzoidal olduğu, rotor 3-faz akımlarının sinüzoidal ve 2.5 saniyeden itibaren makinenin senkron hızı yakaladığı görülebilmektedir.

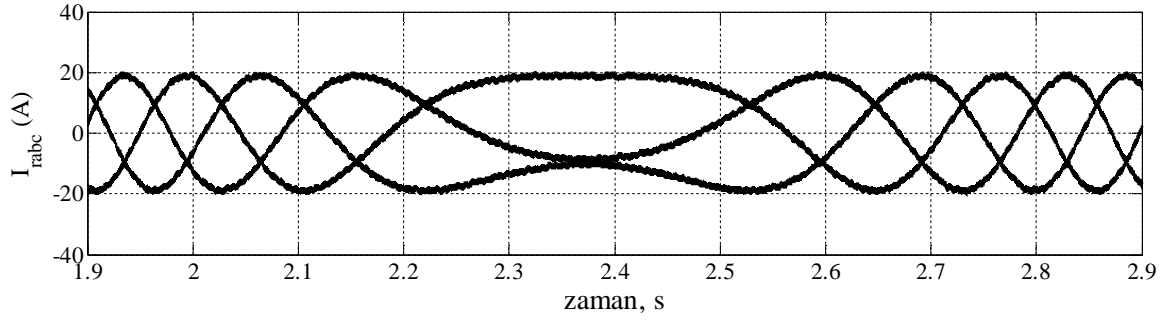
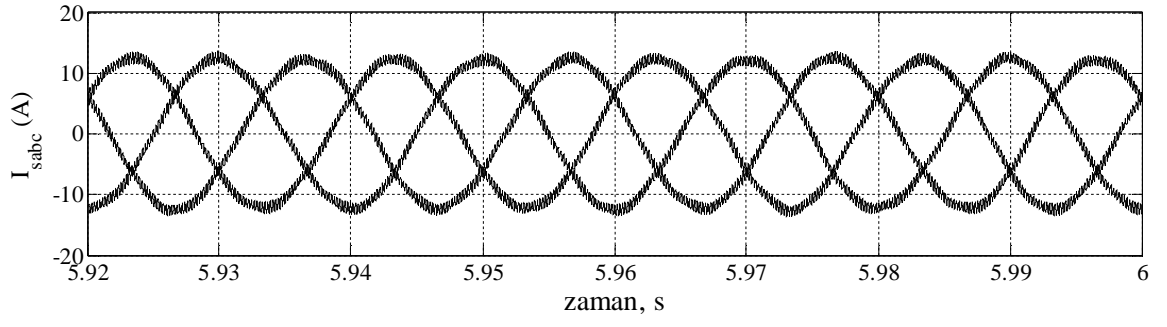
Şekil 5.17’de rotor 3-faz gerilimlerinin zamanla değişimleri görülmektedir. Bu gerilim değerleri matris konverterin girişine uygulanıp, çıkışta istenen genlik ve frekansta gerilim elde edilir.



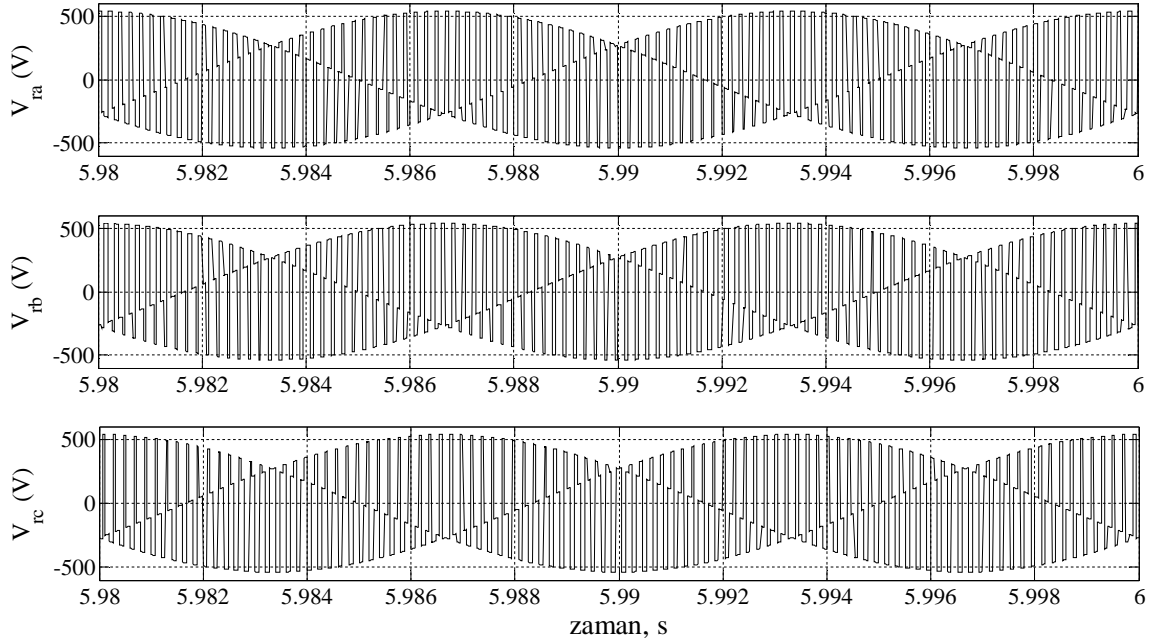
Şekil 5.14. Stator bir faz gerilim ve akımının zamanla değişimi



Şekil 5.15. Rotor bir faz gerilim ve akımın zamanla değişimi

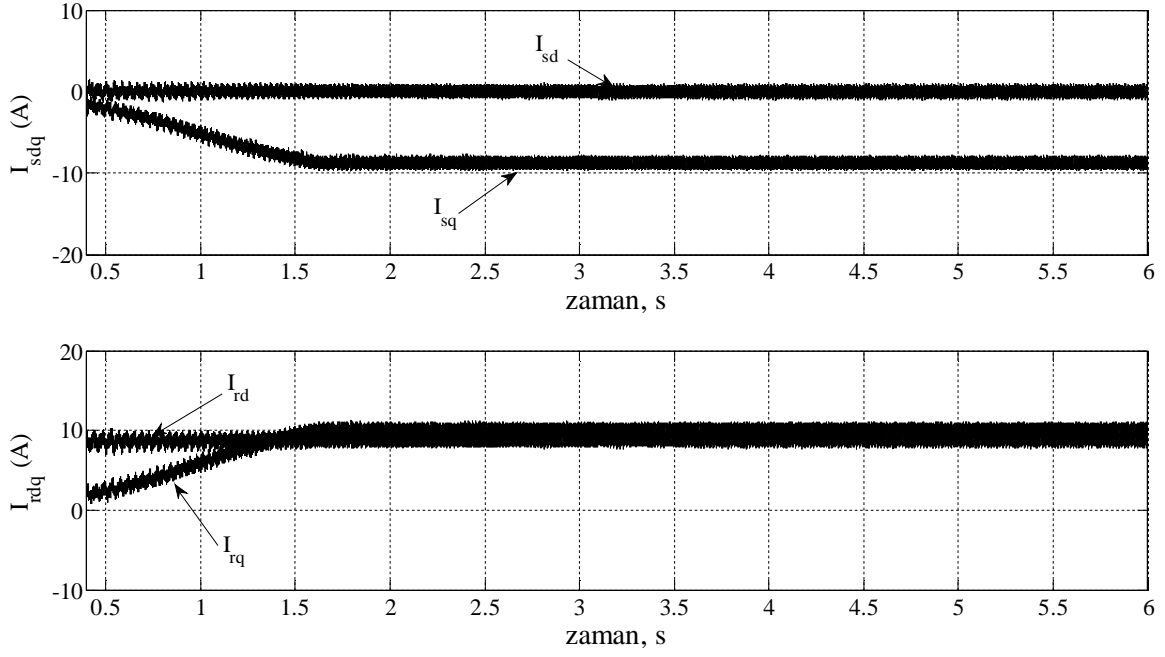


Şekil 5.16. Stator ve rotor 3-faz akımlarının zamanla değişimi

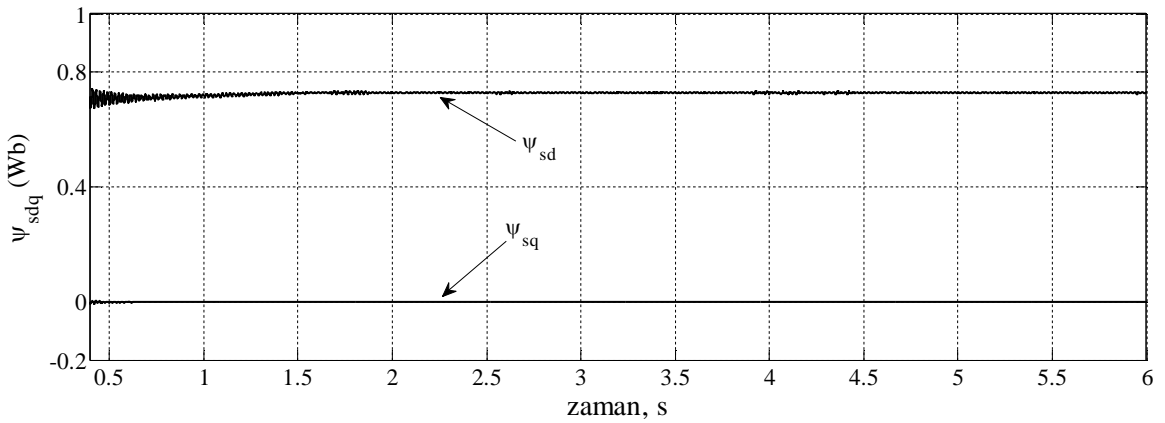


Şekil 5.17. Rotor 3-faz gerilimlerinin zamanla değişimi

Şekil 5.18’de stator ve rotor d-q akımlarının zamanla değişimleri verilmektedir. Bu değişim Şekil 5.9’dekine benzer bir değişim göstermektedir. Şekil 5.19’da stator d-q akı fazörlerinin zamanla değişimleri gösterilmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi stator q akı fazörü sıfır iken stator d akı fazörü yaklaşık olarak 0.7 wb olmaktadır.

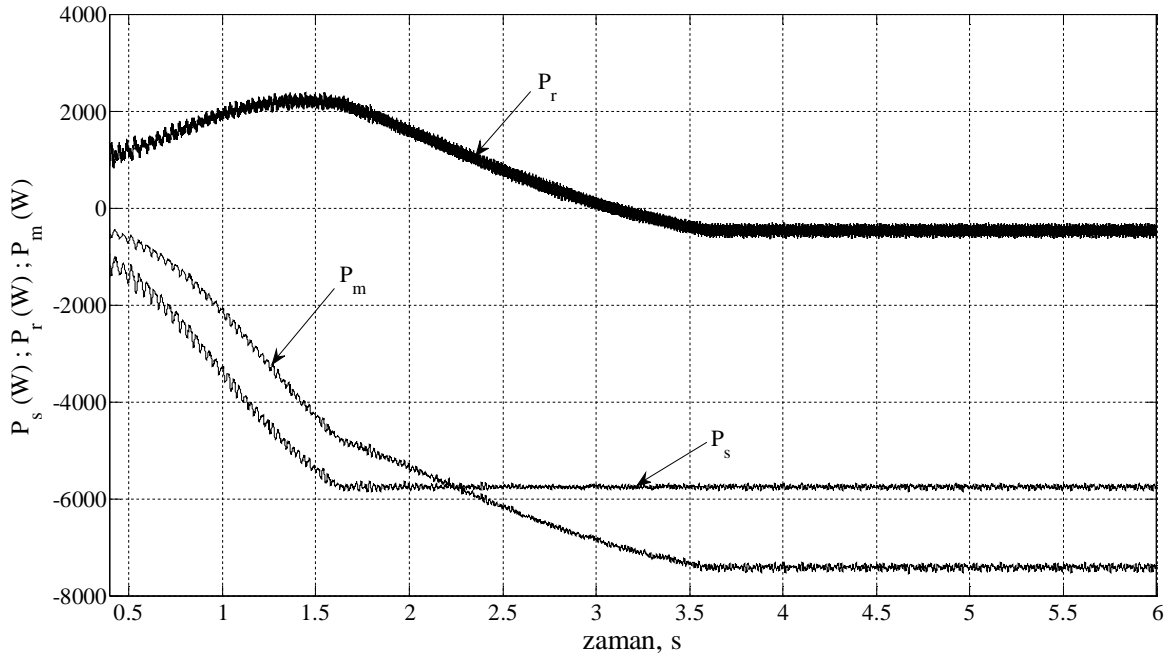


Şekil 5.18. Stator ve rotor d-q akımlarının zamanla değişimi



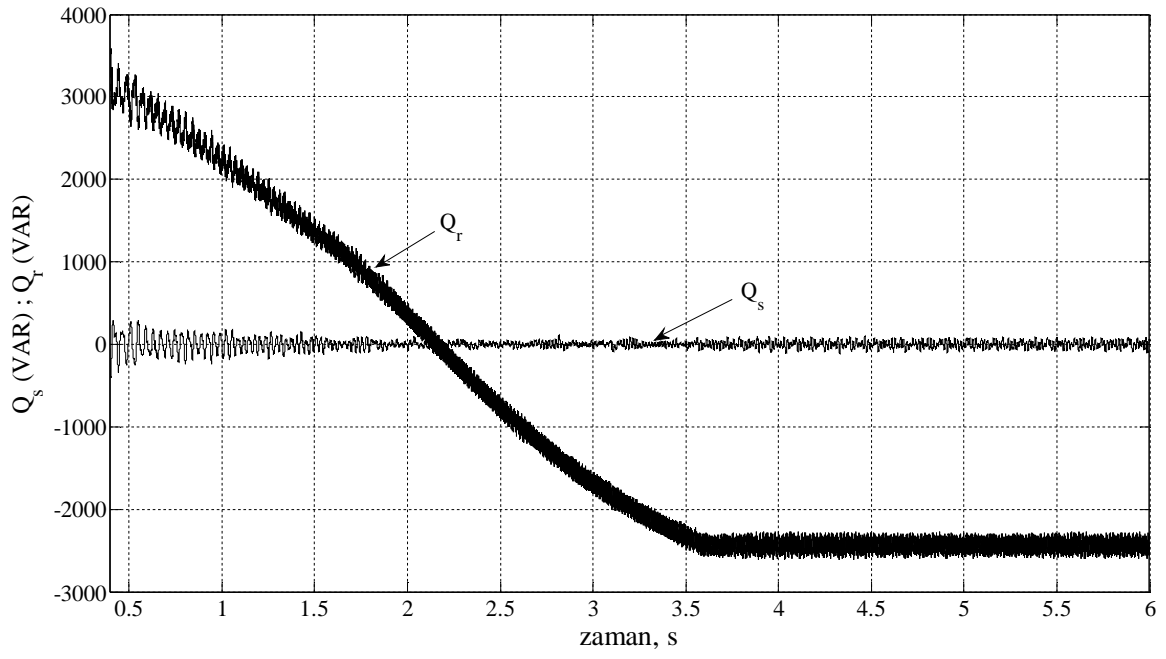
Şekil 5.19. Stator d-q akı fazörünün zamanla değişim

Şekil 5.20’de stator gücü, rotor gücü ve mekanik güçlerinin zamanla değişimleri görülmektedir. Bu değişimler incelendiğinde makine senkron hızın üstüne çıktığı zaman rotor gücü negatif olmaktadır. Güçlerin negatif olması, asenkron makinenin türbin aracılığıyla mekanik güç olarak stator uçlarının bağlı olduğu kaynağa doğru, güç akışında bulunduğu anlamına gelmektedir. Makine türbinden mekanik enerji almış ve bu enerjiyi elektrik enerjisi olarak stator uçlarının bağlı bulunduğu kaynağa aktarmıştır.



Şekil 5.20. Stator (P_s) ve rotor (P_r) aktif güçleri ile makine gücünün (P_m) zamanla değişimi

Şekil 5.21’de stator ve rotor reaktif güçlerinin zamanla değişim eğrileri görülmektedir. Stator reaktif gücü i_{rd} akımına bağlı olup bu değer sıfır seçildiğinde stator reaktif gücü sıfır yapılabilir. Rotor ise makine ilk yol aldığı anda pozitif yönde reaktif güç çekmektedir. Makine senkron hıza ulaştığında ise rotor reaktif gücü negatif yönde artmakta ve sürekli durumda sabit olmaktadır. Rotor reaktif gücünün negatif olması şebekeye reaktif güç verdiği anlamına gelmektedir. Böylece şebekenin reaktif güç ihtiyacı da sağlanmış olur.



Şekil 5.21. Stator (Q_s) ve rotor (Q_r) reaktif güçlerinin zamanla değişimleri

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, rüzgâr türbininde beslenen ve rotor yanı matris konverter üzerinden şebekeye bağlı bilezikli asenkron generatörde güç dönüşümü yapılmıştır. Elektrik enerjisi üretmek için faydaladığımız kaynak rüzgârdır. Rüzgâr enerjisi birçok alanda kullanılmaktadır. Örneğin; yelkenli gemilerde, değirmenlerde, rüzgar türbinlerinde vs. gibi yerlerde kullanım alanı bulmaktadır. Amerikan Rüzgâr Enerjisi Birliği, 2010 yılında ABD'nin toplam rüzgâr enerjisi kapasitesinin 30000 MW olacağını ve yılda 105 milyar kWh enerji üreteceğini öngörmektedir. Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği, 2010 yılında 40000 MW, 2020 yılına kadar da 100000 MW'lık rüzgâr gücünden yararlanmayı hedeflemiştir. Rüzgâr enerjisi ile ülkemizin enerji açığının yüzde 25'inin karşılanabilmesi mümkün görülmektedir. Yapılan araştırmalar sonucu ülkemizin 8200 MW rüzgâr gücüne sahip olduğu belirlenmiştir (Şapçı, 1998).

Rüzgârdan elde edilen enerjiyi, mekanik enerjiye dönüştürmede rüzgâr türbininden faydalanılmıştır. Rüzgâr türbini, rüzgârdaki kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren bir makinedir. Rüzgâr türbinlerinde bir rotor, bir güç mili ve rüzgârın kinetik enerjisini elektrik enerjisine çevirecek bir generatör bulunur. Türbinlerde ayrıca, dönme oranını ayarlayacak ve kanatların hareketini durduracak bir rotor kontrol mekanizması mevcuttur. Rüzgâr türbininde kanatlar sayesinde, elektrik enerjisi üreten generatör tahrik edilir.

Bu çalışmada, generatör olarak bilezikli asenkron generatör kullanılmıştır. Generatörün dönme hızları sabit değildir, fakat dönme hızı yükte çok az değişir. Döner hareket yapan diğer makinelere kıyasla daha sağlam, daha az bakım isteyen ve daha ucuz makinelerdir. Güç elektroniği alanındaki teknolojik gelişmelerle beraber, asenkron generatörlerin kontrolü kolayca yapılabilmektedir. Asenkron makine kontrolü için bu çalışmada, ilk önce makine modeli oluşturulurken, aralarında 120° açılı farkı bulunan a-b-c üç eksenli koordinat sistemi değişkenleri, aralarında 90° açılı farkı bulunan durağan α - β iki eksenli koordinat sistemi değişkenlerine dönüştürülmüştür. Daha sonra α - β iki eksenli koordinat sistemi, hızdan bağımsız hareketli d-q iki eksen sistemi değişkenlerine dönüştürülmüştür. Buradaki amacımız güç kontrolünün ayrı iki akım bileşeniyle kontrol edilebileceğini göstermektir.

Kullandığımız generatörün rotoru değişken frekanslı ve değişken gerilimli bir güç kaynağından beslenmiştir. DFIG'in rotorunu besleyebilmek için değişken güç kaynağı

olarak matris konverter kullanılmıştır. Matris konverter, ac-ac dönüşümünü direkt yapma, istenen genlik ve frekansta gerilimi çıkışa aktarma gibi avantajlarından dolayı tercih edilmiştir. Modelden alınan simülasyon verilerine göre, q talep faktörü referanslı, istenen genlik ve frekansın DFIG'in rotoruna verildiği görülmektedir.

Bu çalışmada dolaylı olarak sekonder akısı yönlendirilerek DFIG'in güç kontrolünün simülasyonu, Matlab/Simulink programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Alan yönlendirme kontrol tekniğinin asenkron makinede, doğru akım motorların da olduğu gibi, alan ve momentin iki ayrı akım bileşeni ile kontrol edilebildiği Bölüm 5'te görülmüştür. Bu kontrol tekniğinde alan d akım bileşeni tarafından, moment ise q akım bileşeni tarafından kontrol edildiği simülasyon sonuçlarından görülmektedir.

DFIG, senkron hızın altı ve senkron hızın üstü olmak üzere iki farklı durum için çalıştırılmıştır. Sistem senkron hız altında çalıştırılırken, rüzgar hızı 15 m/s, türbin mil hızı 100 rad/s olarak, sistem senkron hız üstünde çalıştırılırken, rüzgar hızı 17 m/s, türbin mil hızı 130 rad/s olarak seçilmiştir. Bütün çalışma koşulları için elde edilen simülasyon sonuçlarında, DFIG değişkenleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Simülasyon sonuçlarından elde edilen verilere göre, senkron hız altında rotor şebekeden güç çekmekte ve stator gücünün bir kısmının rotor devresini beslediği, senkron hız üstünde rotor şebekeye güç aktarmakta ve hem stator hem de rotorun güç ürettiği görülmüştür. Ayrıca, stator aktif ve reaktif güçleri de moment ifadesinde olduğu gibi i_μ ve i_{rq} akımlarına bağlı olduğu, i_μ akımı sabit tutulduğu takdirde i_{rd} akımıyla stator reaktif gücü ve i_{rq} akımıyla stator aktif gücü kontrol edilebildiği görülmüştür. Böylece asenkron generatör rüzgar türbini tarafından sürüldüğü takdirde, statordan rüzgar enerjisinin elektrik enerjisi olarak alındığı görülmüştür.

Sonuç olarak rüzgar türbini tarafından tahrik edilen rotor yanı matris konverter ile beslenen bilezikli asenkron generatörün güç kontrolünde kullanılan, vektör kontrol tekniği sayesinde, makine kontrol komutları doğrultusunda performans göstermiştir. Ayrıca DFIG'in istenen gerilim-frekansta beslenebileceği ve gücünün yine istendiği gibi kontrol edilebileceği, bu yapılan çalışmada görülmüştür. Bu çalışma DFIG'in beslemesi ve kontrolü alanında yapılan çalışmalar bakımından, farklı bir bakış açısı kazandırması açısından önemlidir.

KAYNAKLAR

- Demirok, E. ve Sabanovic, A.,** 2007. Şebeke Bağlantılı Bilezikli Asenkron Generatörün Aktif ve Reaktif Gücü Ayrıştırılarak Denetimi, TOK'07 Bildiriler Kitabı, İstanbul, 5-7 Eylül.
- Sarıoğlu, M.K., Gökaşan, M. ve Boğosyan, S.,** 2003. Asenkron makineler ve kontrolü, Birsen yayınevi, İstanbul.
- Altun, H. ve Sünter, S.,** 2003. Matrix Converter Induction Motor Drive: Modeling, Simulation and Control , Electrical Engineering , 86-1 , 25-33.
- Sünter, S. ve Altun, H. ,** 2001. Matris Konvertörde Giriş Gerilimi Üzerindeki Harmonik Etkisinin İncelenmesi ve Kompanzasyonu, Electrical Engineering , Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası , 191-195 , Kocaeli, Türkiye.
- Chapman, S.J.,** 2007. Elektrik makinelerinin temelleri, Çağlayan kitabevi, İstanbul.
- Gündoğdu, A.,** 2005. Matris Konverterden Beslenen Sabit mıknatıslı Senkron Motorun Vektör Kontrolünün Sayısal Benzetimi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Erdem, E.,** 2007. Matris Çeviriciden beslenen bir asenkron motor sürücüsünün tasarımı ve control algoritmalarının uygulamasında yeni bir yaklaşım. Doktora tezi, Fırat ünv. Fen bilimleri enstitüsü, Elazığ.
- Tuzsuzoğlu, K.,** 2002. Matris çeviricisinden beslenen üç fazlı asenkron motorun vector kontrolünün simulink ile benzetimi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Sünter, S.,** 1995. A Vector Controlled Matris Converter Induction Motor drive, PhD thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Nottingham, UK.
- Şapçı, M.,** 1998. Rüzgar Türbinleri, Focus Dergisi, Haziran, s25-32.
- Ültanır, M.Ö.,** 1996. Rüzgar Santrallerindeki Gelişmeler, Enerji Dünyası Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Bülteni,sayı:9-10,s:17.
- John, F. Walker, Nicholas, J.,** 1997. Wind Energy Technology, Published in 1997 by John Wiley & Sons,page:45-48,50-54.

- Uyar, T.S.**, 1985. Rüzgar Enerjisi Sistemleri, TÜBİTAK bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü, Makine ve Enerji Sistemleri Araştırma Bölümü, Gebze/ Kocaeli, Haziran.
- Pena, R., Clare, J.C. ve Asher, G.M.**, 1996. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind-energy generation. IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 143, No. 3.
- Zhang, L., Watthanasarn, C. ve Shepherd, W.**, 1998. Application of a matrix converter for the power control of a variable- speed wind-turbine driving a double-fed induction generator. IEE proceedings. Electric power applications ,vol. 145, n°4, pp. 284-294
- Petersson, A.**, 2005. Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines. ISBN 91-7291-600-1, Göteborg, Sweden.
- Tapia, A., Tapia, G., Ostolaza, J.X. ve Sáenz, J. R.**, 2003. Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator. Ieee transactions on energy conversion, vol. 18, no. 2, june.
- İskender, İ. ve Genç, N.**, 2009. Rüzgar türbini ile sürülen çift çıkışlı asenkron jeneratörün incelenmesi ve bulanık mantık kontrol yöntemiyle maksimum çıkış gücünün elde edilmesi. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 24, No 2, 343-350.
- Pinto, S.F., Aparicio, L. ve Esteves, E.**, 2007. Direct controlled matrix converters in variable speed wind energy generation systems. Powereng 2007, April 12-14, Setubal, Portugal.
- Barakati, S.M., Kazerani, M. ve Aplevich, J.D.** 2009. Maximum power tracking control for a wind turbine system including a matrix converter. Ieee transactions on energy conversion, vol. 24, no. 3, september.
- Altun, H. ve Sünter, S.**, 2007. Application of Matrix Converter to Doubly-Fed Induction Motor for Slip Energy Recovery with Improved Power Quality, IEEE International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics(ACEMP'2007),10-12September,Bodrum-Türkiye
- Özgör, M.A.**, 2002. Kütahya'da seçilen bir konumda rüzgar verileriyle elektrik enerjisi üretim potansiyelinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

ÖZGEÇMİŞ

06.03.1978 tarihinde Mardin ili Nusaybin ilçesi Çatalözü köyünde doğdum. İlkokulu, Mardin Noter Cevdet Altun İlkokulu'nda, ortaokulu Mardin Cumhuriyet Ortaokulu'nda, lise eğitimini ise Mardin Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi'nde tamamladım. 1999 yılında Dicle Üniversitesi Batman Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünü kazandım.2003 yılında lisans eğitimini tamamladım. 2007 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı Yüksek Lisans programına kayıt oldum.