

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



MUNZUR
ÜNİVERSİTESİ
2008

**ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖR TABANLI DEĞİŞKEN HIZLI
RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN KONTROLÜ, TASARIMI VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İrfan ERDEM

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Zeki OMAÇ
TUNCELİ – 2019

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖR TABANLI DEĞİŞKEN HIZLI
RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN KONTROLÜ, TASARIMI VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İrfan ERDEM
(11877001)

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Zeki OMAÇ

TUNCELİ – 2019

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

**ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖR TABANLI DEĞİŞKEN HIZLI
RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN KONTROLÜ, TASARIMI VE ANALİZİ**

İrfan ERDEM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 10 / 06 / 2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza:.....

İmza:.....

İmza:.....

Dr. Öğr. Üyesi Zeki OMAÇ
(Munzur Üniversitesi)

Prof. Dr. Hasan KÜRÜM
(Fırat Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Düzgün AKMAZ
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

ÜYE

ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Prof. Dr. Numan YILDIRIM
Enstitü Müdürü
İmza ve Mühür

Bu çalışma, Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (MÜNİBAP) tarafından desteklenmiştir.

Proje No: YLMUB017-14

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Son yıllarda dünya üzerinde yaşanan enerji krizi, enerji fiyatlarında meydana gelen artış, giderek artan enerji talebi ve bu talebi karşılayacak yenilenemeyen enerji kaynaklarındaki azalıştan dolayı alternatif enerji kaynaklarının araştırılması ve geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Dünyanın artan enerji ihtiyacının temiz, ekonomik ve güvenli bir şekilde karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi artmıştır. Bu kaynaklardan biride, elektrik üretiminde en yüksek büyüme oranına sahip olan rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr tarafından üretilen kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi için rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Rüzgâr türbinleri sabit hızlı ve değişken hızlı olmak üzere iki farklı şekilde kullanılmaktadır. Rüzgâr tarafından üretilen kinetik enerji genellikle değişkendir. Bu değişimi daha verimli bir şekilde kullanmak ve türbin verimini arttırmak için günümüzde çoğunlukla değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin üretimi tercih edilmektedir. Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde genellikle doğrudan sürülen senkron generatörler ve çift beslemeli asenkron generatörler tercih edilmektedir. Çift beslemeli asenkron generatörler (ÇBAG)'lerde aktif ve reaktif güç ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir. Güç elektroniği dönüştürücü gücünün sistem gücünden küçük olması nedeniyle maliyetleri azdır. Bozucu etkilere karşı dayanıklı ve kararlıdır. Bu gibi avantajlarından dolayı son yıllarda kullanımı artmıştır. Ancak karmaşık modele ve çok sayıda parametreye sahip olmalarından dolayı kontrol edilmeleri oldukça zordur. Bu tez çalışmasında çift beslemeli asenkron generatör tabanlı değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin yapısı ve kontrolü incelenmiştir.

Çift beslemeli asenkron generatör tabanlı değişken hızlı rüzgâr türbin sisteminin kontrolü için vektör kontrol algoritması uygulanmıştır. ÇBAG'ler çift taraflı enerji akışı sağlayabilmesinden dolayı, arka arkaya bağlı iki adet çift yönlü güç elektroniği dönüştürücüsünden oluşur. Rotor tarafına bağlanan dönüştürücü devresi ile değişken hız kontrolü amaçlanmıştır. Tüm sistemin parametreleri belirlenip matematiksel modeli oluşturulmuştur. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanıma yönelik, dayanıklı ve uygulanabilir yüksek performanslı, çift beslemeli bir asenkron generatör kontrol sistemi oluşturulmuştur. Ayrıca ÇBAG'nin kontrolü için sürücü devre kartı tasarlanmıştır. ÇBAG'nin kontrol algoritmasını tasarlamak için MATLAB/Simulink paket programı kullanılmıştır. Sürücü devre kartının tasarlanmasında AUTODESK/Eagle bilgisayar paket programı kullanılmıştır. Tasarlanan sistem kontrolü ve sürücü devre kartının değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerine uygulanabilirliği başarılı bir şekilde kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG), Rüzgâr Enerji Sistemleri, Uzak Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu.

ABSTRACT

CONTROL, DESIGN AND ANALYSIS OF DOUBLE FED INDUCTION GENERATOR BASED VARIABLE SPEED WIND TURBINES

In recent years, research and develop of alternative energy sources has become mandatory due to the energy crisis in the world, the increase in energy prices, the increasing energy demand and the decrease in non-renewable energy resources to meet this demand. For meet in a manner clean, economic and safe the world's growing energy needs has increased importance of renewable energy sources. Too one of these sources is wind energy which has the highest growth rate in electricity generation. To convert of kinetic energy produced by wind into electrical energy are used the wind turbines. Wind turbines are used in two different ways as constant speed and variable speed. Kinetic energy produced by the wind is often variable. In order to use this change more efficiently and to increase the turbine efficiency, mostly is preferred the production of variable speed wind turbines. In the variable speed wind turbine systems are generally preferred sencron generators and double feed induction generators. In the DFIGs can be controlled separately active and reactive power. Because the DFIG's power electronics converting power is less than the power of the system, its cost is low. DFIGs are durable and stable against disturbing effects. Due to such advantages, its use has increased in recent years. However, because DFIGs have a complex model and many parameters, it is very difficult to control. In this thesis, the structure and control of double feed induction generator based variable speed turbines are examined.

For control of the double fed induction generator based variable speed wind turbine system is applied vector control algorithm. DFIGs consist of two bi-directional power electronics converters connected to each other due to the fact that they can be a double-sided energy flow. Variable speed control with the converter circuit connected to the rotor side is intended. The parameters of the whole system were determined and the mathematical model was created. A durable and applicable high-performance, double fed induction generator control system for use in variable speed wind turbines has been created. In addition, for the control of DFIG is designed the drive circuit board. For to design the algorithm of the doubly feed induction generator is used the MATLAB/Simulink program. For to design the driver board is used AUTODESK / Eagle computer package program. The designed system algorithms have been successfully run as simulation and experimental. Simulation results and experimental results are given. Of the created system algorithms and the drive circuit board applicability to variable speed wind turbine systems have been successfully proven.

Key Words: Double Fed Induction Generator (DFIG), Wind Energy Systems, Space Vector Pulse Width Modulation.

TEŞEKKÜRLER

Yüksek Lisans tez çalışmamda tezin her aşamasında derin bilgi birikimi ve tecrübeleri ile çalışmalarımı her anlamda destekleyen ve yönlendiren değerli danışman hocam Sayın **Dr. Öğr. Üyesi Zeki OMAÇ**'a teşekkürlerimi arz ederim.

Proje dahilinde yaptığı desteklerden dolayı **Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi**'ne (MÜNİBAP) teşekkür ederim.

Göstermiş oldukları uzun sabır ve desteklerinden dolayı çok kıymetli aileme teşekkür ederim.

İrfan ERDEM
TUNCELİ-2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	II
ABSTRACT	III
TEŞEKKÜRLER.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	XI
KISALTMALAR.....	XII
SEMBOLLER LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Özeti.....	4
1.2. Tezin Amacı	10
1.3. Tezin Ana Hatları	11
2. RÜZGÂR ENERJİSİ TÜRBİN SİSTEMLERİ.....	13
2.1. Rüzgâr Enerjisi Tarihçesi	13
2.2. Sabit Hızlı Rüzgâr Türbin Sistemleri	14
2.3. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbin Sistemleri	14
2.4. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbin Sistemlerinde Kullanılan Generatörler.....	15
2.5. Çift Beslemeli Asenkron Generatörlerin Yapısı ve Çalışma Prensipleri.....	15
2.6. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbin Sistemlerinde Kullanılan Generatörlerin Karşılaştırılması	17
3. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN MATEMATİKSEL MODELİ	19
3.1. Clarke Dönüşüm Matrisleri	20
3.2. Park Dönüşüm Matrisleri.....	21
3.3. ÇBAG'nin Dinamik Denklemi	22
3.4. ÇBAG'de Güç Değişimi ve Kayma	25
3.5. ÇBAG'de Kullanılan Güç Devresi	27
4. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖR TABANLI DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN KONTROLÜ	29
4.1. Rotor Taraf Çevirici Kontrolü	29
4.2. Şebeke Taraf Çevirici Kontrolü.....	34
4.3. Faz Kilitlemeli Döngü	36
4.4. Uzak Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu	37
4.4.1. UVDGM Algoritması	38

4.5. Çift Beslemeli Asenkron Generatörün Kontrolünde Kullanılan Donanım ve Yazılım	48
4.5.1. Akıllı Güç Modülü Tabanlı Sürücü Devre Tasarımı	48
4.5.2. RCD Snubber Devresi	52
4.5.3. Akım ve Gerilim Ölçme Devresi.....	53
4.5.4. Alarm Devresi	55
4.5.5. Sürücü Devre Kartı Besleme Gerilimleri	55
4.5.6. dSPACE DS1103 Denetleyici Kartı	56
4.5.7. Deney Yazılımı.....	58
5. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN KONTROLÜNE İLİŞKİN SONUÇLAR.....	62
5.1. Simülasyon Çalışması	62
5.2. Simülasyon Çalışma Sonuçları	66
5.3. Deney Çalışması	73
5.4. Deneysel Çalışma Sonuçları	75
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR.....	89
ÖZGEÇMİŞ	97

SEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Rüzgâr enerjisi türbin sistemi iç yapısı	13
Şekil 2.2. Sabit hızlı rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı	14
Şekil 2.3. Değişken hızlı rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı	15
Şekil 2.4. Çift beslemeli asenkron generatörün yapısal görüntüsü.....	16
Şekil 2.5. Çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgâr türbin sistemi blok diyagramı	17
Şekil 3.1. Gerilim vektörünün abc- $\alpha\beta$ ve abc- dq dönüşümleri ile vektörel gösterimi	20
Şekil 3.2. ÇBAG eşdeğer devresi	22
Şekil 3.3. ÇBAG güç aktarımı.....	27
Şekil 3.4. ÇBAG güç aktarımı blok diyagramı	28
Şekil 4.1. Stator ve rotor akılarının vektörel gösterimi	30
Şekil 4.2. Stator akısından oryantasyonlu örnek kontrol yöntemi blok diyagramı	30
Şekil 4.3. Reaktif güç kontrolü.....	31
Şekil 4.4. Hız, güç veya moment kontrolü	32
Şekil 4.5. Stator gerilim vektörü.....	32
Şekil 4.6. Stator geriliminden oryantasyonlu kontrol yöntemi.....	33
Şekil 4.7. GSC ve RSC evirici devresinin birlikte gösterimi	34
Şekil 4.8. GSC blok diyagramı.....	35
Şekil 4.9. Geleneksel 3-PLL yapısı	36
Şekil 4.10. İki seviyeli 6 anahtar invertörünün devre şeması.....	37
Şekil 4.11. Temel uzay vektörleri ve anahtarlama durumları.....	39
Şekil 4.12. Sektör için θ açısı, V_1 , V_2 ve V_{ref} alan vektörleri.....	40
Şekil 4.13. Sektörlere göre uygulanacak DGM işaretleri.....	41
Şekil 4.14. Matlab/Simulink UVDGM algoritması.....	43
Şekil 4.15. Sisteme uygulanan üç fazlı gerilimler	43
Şekil 4.16. Elde edilen V_α , V_β ve V_{ref} değerleri	44
Şekil 4.17. Hesaplanan θ açısı değeri	44
Şekil 4.18. Elde edilen sektör değişimi	45
Şekil 4.19. Hesaplanan T_1 , T_2 ve T_0 değerlerin değişimi	45
Şekil 4.20. Hesaplanan T_a , T_b , T_c anahtarlama kontrol sinyalleri.....	46
Şekil 4.21. Hesaplanan üçgen dalga şekli değeri.....	46
Şekil 4.22. Üst güç anahtarları için elde edilen G_1 , G_3 , G_5 DGM kapı sinyalleri	47
Şekil 4.23. Üç fazlı inverterden elde edilen V_a , V_b , V_c gerilim şekli.....	47

Şekil 4.24. Üç fazlı inverterden elde edilen I_a, I_b, I_c akımları.....	48
Şekil 4.25. 7MBP100VEA120-50 akıllı güç modülü.....	48
Şekil 4.26. Akıllı güç modülü blok yapısı	50
Şekil 4.28. Üç fazlı köprü doğrultucu, frenleme ve akıllı güç modülünün genel bağlantı şekli blok diyagramı.....	51
Şekil 4.29. sürücü devre kartının kısmi çalışma şekli bağlantısına ait blok diyagramı.....	51
Şekil 4.30. RCD snubber devresinin sürücü devre kartı üzerinde görünümü	52
Şekil 4.31. LA55-P akım sensörü.....	53
Şekil 4.32. LV25-P gerilim sensörü	53
Şekil 4.33. Bir faz akım ölçme devresi.....	54
Şekil 4.34. Bir faz gerilim ölçme devresi	54
Şekil 4.35. Gerilim ve akım ölçme devrelerinin sürücü kartı üzerindeki görünümü	54
Şekil 4.36. VLA128-24153QR'in besleme blok diyagramı	55
Şekil 4.37. dSPACE DS1103 denetleyici kart.....	56
Şekil 4.38. DS1103 iç mimarisi.....	57
Şekil 4.39. Deneysel çalışmada kullanılan dSPACE DS1103	58
Şekil 4.40. Geliştirilen sürücü devresi kartından bir görünüm.....	59
Şekil 4.41. Geliştirilen sürücü devresi kartının bitmiş ve sistem bağlantılarının yapılmış görüntüsü	59
Şekil 4.42. Geliştirilen kontrol yazılımı ve sürücü devre kartının çalıştırılmasından bir görünüm.....	60
Şekil 4.43. Geliştirilen kontrol yazılımı ve sürücü devre kartının çalıştırılmasıyla yapılan ölçüm görüntüsü	60
Şekil 4.44. ÇBAG ve asenkron motoru tahrik sisteminin yakından görünüşü.....	61
Şekil 4.45. ÇBAG kontrol ünitesinin genel görünümü	61
Şekil 5.1. ÇBAG'ün kontrolü için oluşturulan blok diyagramı.....	64
Şekil 5.2. Matlab/Simulink programında oluşturulan ÇBAG'nin kontrol yapısı blok diyagramı.....	65
Şekil 5.3. ω_m, ω_{m_ref} hız değişimi	66
Şekil 5.4. T_{em} ve $T_{rüzgar}$ moment değişimi	67
Şekil 5.5. P_s ve Q_s (stator aktif, reaktif güç) değişimi	67
Şekil 5.6. P_r rotor aktif güç değişimi	68
Şekil 5.7. I_{ds} ve I_{qs} değişimi	68
Şekil 5.8. I_{dr} ve I_{qr} değişimi	69
Şekil 5.9. I_s stator akımları değişimi	69
Şekil 5.10. I_r rotor akımları değişimi	70
Şekil 5.11. V_{dr_ref} ve V_{qr_ref} değişimi.....	70

Şekil 5.12. Kayma değişimi.....	71
Şekil 5.13. V_s stator gerilimleri değişimi	71
Şekil 5.14. V_s stator gerilimleri değişimi (yakınlaştırılmış görüntü)	72
Şekil 5.15. ψ_{sd} ve ψ_{sq} stator akıları değişimi	72
Şekil 5.16. Stator elektriksel açısı θ_s	73
Şekil 5.17. Rotor mekanik açısı θ_m	73
Şekil 5.18. ÇBAG'nin kontrolü için oluşturulan blok diyagramı	74
Şekil 5.19. Matlab/Simulink ortamında deney çalışması için oluşturulan kontrol sistemi blok diyagramı.....	75
Şekil 5.20. Rotor açısı elektriksel hızı ω_r (d/dk).....	76
Şekil 5.21. i_{rabc} rotor hat akımları	76
Şekil 5.22. i_{rabc} rotor hat akımları (yakınlaştırılmış görüntü)	76
Şekil 5.23. T_{abc} anahtarlama kontrol sinyalleri.....	77
Şekil 5.24. V_{sabc} stator gerilimleri.....	77
Şekil 5.25. V_{sabc} stator gerilimleri (yakınlaştırılmış görüntü).....	78
Şekil 5.26. V_{sd}, V_{sq} stator gerilimleri	78
Şekil 5.27. $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ stator hat akımları.....	78
Şekil 5.28. $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ stator hat akımları (yakınlaştırılmış görüntü).....	79
Şekil 5.29. i_{sd}, i_{sq} stator akımları	79
Şekil 5.30. P_s, Q_s stator aktif ve reaktif gücü	80
Şekil 5.31. Elde edilen sektör değişimi	80
Şekil 5.32. θ_s stator hat gerilimleri açısı	80
Şekil 5.33. θ_m rotor mekanik hız açısı	81
Şekil 5.34. Rotor mekanik hızı ω_m (d/dk)	81
Şekil 5.35. i_{rabc} rotor hat akımları	82
Şekil 5.36. i_{rabc} rotor hat akımları (yakınlaştırılmış görüntü)	82
Şekil 5.37. T_{abc} anahtarlama kontrol sinyalleri.....	83
Şekil 5.38. V_{sabc} stator gerilimleri.....	83
Şekil 5.39. V_{sabc} stator gerilimleri (yakınlaştırılmış görüntü).....	83
Şekil 5.40. V_{sd}, V_{sq} stator gerilimleri	84
Şekil 5.41. $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ stator hat akımları.....	84
Şekil 5.42. $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ stator hat akımları (yakınlaştırılmış görüntü).....	84
Şekil 5.43. i_{sd}, i_{sq} stator akımları	85
Şekil 5.44. P_s, Q_s statordan alınan toplam aktif ve reaktif güç	85
Şekil 5.45. Elde edilen sektör değişimi	86

Şekil 5.46. θ_s stator hat gerilimleri açısı	86
Şekil 5.47. θ_m rotor mekanik hız açısı	86



TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1. Anahtarlama durumları ve bunlara karşılık gelen çıkış gerilimlerinin kombinasyonu.....	38
Tablo 4.2. θ açısının alacağı değerler	40
Tablo 4.3. Her sektörde anahtarlama zamanı hesaplaması.....	42
Tablo 5.1. ÇBAG'nin parametreleri	63
Tablo 5.2. Simülasyonda kullanılan adım testleri ve süreleri.....	65
Tablo 5.3. ÇBAG'ye ait etiket bilgileri	74



KISALTMALAR

AA	: Alternatif Akım
ÇBAG	: Çift Beslemeli Asenkron Generatör
DA	: Doğru Akım
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
DSP	: Dijital Sinyal İşleyici (Digital Signal Processing)
GSC	: Şebeke Taraf Dönüştürücü (Grid Side Converter)
IGBT	: İzole Edilmiş Kapılı İki Kutuplu Transistör (Insulated Gate Bipolar Transistor)
IPM	: Akıllı Güç Modülü (Intelligent Power Module)
PI	: Oransan İntegral (Proportion Integral)
PLL	: Faz Kilitlemeli Çevrim (Phase Lock Loop)
RCD	: Direnç Kondansatör Diyot (Resistor Capacitor Diode)
RSC	: Rotor Taraf Dönüştürücü (Rotor Side Converter)
RTK	: Rotor Taraf Kontrol
ŞTK	: Şebeke Taraf Kontrol
UVDGM	: Uzak Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu

SEMBOLLER LİSTESİ

L_g	: Şebeke hat endüktansı
T_s	: Sinyal periyodu
T_{abc}	: Anahtarlama kontrol sinyalleri
V_{gd}	: Şebeke gerilimi d ekseni bileşeni
V_{gq}	: Şebeke gerilimi q ekseni bileşeni
V_{sd}	: Stator gerilimi d ekseni bileşeni
V_{sq}	: Stator gerilimi q ekseni bileşeni

i_{gd}	: Şebeke akımı d eksen bileşeni
i_{gq}	: Şebeke akımı q eksen bileşeni
i_{ra}	: Rotor hat akımları a fazı
i_{rb}	: Rotor hat akımları b fazı
i_{sc}	: Stator hat akımları c fazı
$i_{s\alpha}$	: Stator hat akımları alfa eksen bileşeni
i_{sa}	: Rotor hat akımları a fazı
i_{sb}	: Stator hat akımları b fazı
i_{sc}	: Stator hat akımları c fazı
$i_{s\beta}$	: Stator hat akımları beta eksen bileşeni
i_{sd}	: Stator hat akımları d eksen bileşeni
i_{sq}	: Stator hat akımları q eksen bileşeni
θ_m	: Rotor mekanik hız açısı
θ_s	: Stator hat gerilimleri açısı
I_{dr}	: Rotor akımı d eksen bileşeni
I_{ds}	: Stator akımı d eksen bileşeni
I_{qr}	: Rotor akımı q eksen bileşeni
I_{qs}	: Stator akımı d eksen bileşeni
I_r	: Rotor hat akımları
I_s	: Stator hat akımları
L_m	: Mıknatıslanma endüktansı
L_r	: Rotor endüktansı
$L_{r\sigma}$	: Rotor kaçak endüktansı

L_s	: Stator endüktansı
$L_{s\sigma}$	: Stator kaçak endüktansı
N_r	: Rotor sarım sayısı
N_s	: Stator sarım sayısı
P_g	: Şebeke aktif gücü
P_r	: Rotor aktif gücü
P_s	: Stator aktif gücü
Q_g	: Şebeke reaktif gücü
Q_s	: Stator reaktif gücü
R_r	: Rotor direnci
R_s	: Stator direnci
S_{max}	: Maksimum kayma
T_{em}	: Elektromagnetik moment
$T_{rüzgar}$	: Rüzgâr momenti
V_{dr_ref}	: Referans rotor gerilimi d bileşeni
V_{qr_ref}	: Referans rotor gerilimi q bileşeni
V_r	: Rotor hat gerilimleri
V_s	: Stator hat gerilimleri
f_r	: Rotor akımları frekansı
f_s	: Stator akımları frekansı
ψ_{rd}	: Rotor akısı d eksen bileşeni
ψ_{rq}	: Rotor akısı q eksen bileşeni
ψ_s	: Stator akısı

ψ_{sd}	: Stator akısı d eksen bileşeni
ψ_{sq}	: Stator akısı q eksen bileşeni
$\psi_{s\alpha}$	: Stator akısı alfa eksen bileşeni
$\psi_{s\beta}$	: Stator akısı beta eksen bileşeni
ω_g	: Şebeke açısal hızı
ω_m	: Rotor mekanik hızı
θ_g	: Şebeke açısı
ω_r	: Rotor elektriksel hızı
ω_s	: Stator elektriksel hızı
n	: Senkron hız
P	: Kutup sayısı
R	: Şebeke direnci
σ	: Kaçak faktörü
J	: Eylemsizlik momenti
B	: Sürtünme katsayısı
s	: Kayma

1. GİRİŞ

Son yıllarda dünya üzerinde yaşanan enerji krizi, enerji fiyatlarında meydana gelen artış, giderek artan enerji talebi ve bu talebi karşılayacak yenilenemeyen enerji kaynaklarındaki azalıştan dolayı alternatif enerji kaynaklarının araştırılması ve geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Mevcut durumda kullanılan enerji kaynakları çevre kirliliği ile ilgili birçok probleme neden olmakla beraber, fosil yakıtların zamanla azalacağı ve tükeneceğinin bilinmesi, insanları yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları sürekliliği olan ve hiç bitmeyecekleri varsayılan kaynaklar olarak tanımlanmaktadır. Dünyanın artan enerji ihtiyacının temiz, ekonomik ve güvenli bir biçimde karşılanabilmesi için yapılan çalışmalar neticesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi artmıştır. Bu kaynaklardan biride, elektrik üretiminde son yıllarda en yüksek büyüme oranına sahip olan rüzgâr enerjisidir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisinin avantajlarını maddeler halinde sıralarsak;

- 1) Rüzgâr enerjisi kendini yenileyen ve sürdürebilen bir enerji kaynağı olduğu için fosil yakıtların (kömür, petrol ve gaz gibi) rezervlerinin aksine çok uzun yıllar bitmeyecek bir enerji kaynağıdır. Bu özelliğinden dolayı sürdürülebilir bir güç kaynağı olarak iyi bir enerji seçimidir.
- 2) Rüzgâr enerjisi, günümüzde mevcut olan enerji kaynakları arasında en çevre dostu enerji kaynaklarından biridir. Bunun nedenleri arasında rüzgâr türbinlerinin elektrik üretirken çevre kirliliği yaratmaması gösterilebilir. Yenilenebilir olmayan çoğu enerji kaynağının yakılması sonucunda atmosfere karbondioksit ve metan gibi gazlar salınmaktadır. Bu gazların iklim değişikliği üzerine olumsuz etkilere neden olduğu bilinmektedir. Buna karşın, rüzgâr türbinleri elektrik üretirken sera gazı üretmez.
- 3) Rüzgâr enerjisinden elektrik üretilerek, kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtların kullanılma ihtiyacı azaltılmış olur. Böylece dünyanın doğal kaynaklarının tüketimi azaltılarak korumasına yardımcı olunabilir.

- 4) Yenilenebilir olmayan çoğu enerji kaynağından farklı olarak, ucuz elektrik üretmek için rüzgâr enerjisi bizlere uygun bir seçenek sunar.
- 5) Rüzgâr türbinleri arazide nispeten küçük yer kaplarlar. Toprağın üstünden yüksekte olmalarına rağmen tabandaki arazi üzerindeki kapladıkları alan oldukça azdır.
- 6) Rüzgâr türbinleri genellikle tarlalarda, tepelerde ve denizlerde inşa edildikleri için bulundukları yerleri çevreleyen araziye neredeyse hiç rahatsızlık vermezler.
- 7) Rüzgâr türbinleri sadece endüstriyel ölçekli tesislerle sınırlı olmayıp rüzgâr çiftlikleri gibi alanlarda da kurulabilirler.
- 8) Rüzgâr türbinleri, uzak yerlere enerji getirmek için önemli bir rol oynayabilir. Enerji nakli zor olan şebeke dışı köyler ve uzak araştırma tesislerine kadar birçok farklı durumda enerjinin sağlanmasında yardımcı olabilir.
- 9) Rüzgâr türbinlerinin bakımı oldukça düşük olup herhangi bir bakım gerektirmeden uzun süre dayanabilirler. Her ne kadar eski türbinler güvenilirlik açısından yeterli olmasalar da teknolojik gelişmeler genel güvenilirliği artırmaya yardımcı olmaktadır.
- 10) Rüzgâr enerjisinin işletme maliyeti genellikle düşüktür. Rüzgâr enerjisinin tek maliyeti rüzgâr türbinlerinin bakımındır. Fakat yine de doğada az bakım gerektirirler.
- 11) Çoğu durumda, bir ülke fosil yakıtlarının bir kısmını veya tamamını başka bir ülkeden sağlamaktadır. Savaş, siyaset ve genel talep bu doğal kaynakların fiyatını belirlemektedir. Bu durum ciddi ekonomik sorunlara ya da arz sıkıntısına neden olabilmektedir. Yerel yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak dışarıya olan bağımlılık azaltabilir. Bu da doğrudan bir sonuç olarak ülke enerji güvenliğini arttırabilir.

Tüm bu belirtilen avantajlardan sonra rüzgâr enerjisinin dezavantajlarını maddeler halinde sıralayacak olursak;

- 1) Rüzgâr enerjisi sürdürülebilir ve çok uzun yıllar bitmeyecek olmasına rağmen yıl içerisinde rüzgarlar sürekli oluşmayabilirler. Bu durum rüzgâr çiftliği geliştiricileri için ciddi sorunlara neden olabilir. Genellikle, belirli bir yerin rüzgâr enerjisi için uygun olup olmadığını araştırmak önemli miktarda zaman ve para harcanmasına sebep olabilir. Bir rüzgâr türbininin verimli bir şekilde çalışabilmesi için bulunduğu yerin yeterli ölçüde rüzgâr enerjisi kaynağına sahip olması gerekir. Bu nedenle rüzgâr türbinleri genellikle tepelerin

üstüne veya denizlere inşa edilir. Bulundukları bu bölgelerde rüzgârın gücünü azaltacak arazi engelleri daha azdır.

2) Maliyetler zamanla azalsa da rüzgâr türbinlerinin kurulumu halen pahalıdır. Saha araştırmalarının yapılması, belirli bir süre boyunca rüzgâr hızlarını ölçülmesi, önceden yapılmış bir temelin üzerine üretilmesi, taşınması ve dikilmesi gibi tüm bu süreçler, rüzgâr türbinlerinin kurulumunun toplam maliyetini arttırmaktadır. Tüm bunların yanında açık deniz rüzgâr çiftlikleri de hesaba katıldığında, maliyetler çok daha fazla olmaktadır.

3) Rüzgâr türbinleri yaban hayatı için bir tehdit oluştursa da cep telefonu direkleri ve radyo kuleleri gibi kurulumlara göre daha az tehlikelidir. Bununla birlikte, rüzgâr türbinleri hala kuş ve yarası popülasyonları arasında ölümlere neden olmaktadır.

4) Rüzgâr türbinlerinin en yaygın dezavantajlarından biri de ürettikleri gürültü kirliliğidir. Genellikle tek bir rüzgâr türbininin sesi yüzlerce metre uzaktan duyulabilir.

Rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülebilmesinde rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Rüzgâr türbinleri sabit hızlı ve değişken hızlı olmak üzere iki farklı çalışma şeklinde kullanılabilmektedir. Sabit hızlı rüzgâr türbinleri, değişken hızlarda esen rüzgâr hızının belirli bir hız aralığında ($\pm 1\%$) tutularak belirlenen sabit hızda dönen türbinlerden enerji elde edilmesi prensibine dayanan bir sistemdir ve doğrudan şebekeye bağlanmaktadır. Rüzgârın sahip olduğu kinetik enerji genellikle değişkendir. Bu değişimin daha verimli bir şekilde kullanılmasını ve türbin verimini arttırabilmek için günümüzde çoğunlukla değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin üretimi tercih edilmektedir. Senkron hızın $\pm 30\%$ gibi geniş hız aralığında çalışabilmesi, aktif ve reaktif gücün bağımsız olarak kontrol edebilmesi ve kullanılan güç elektroniği dönüştürücü gücünün, generatör gücünün yaklaşık 30% 'una karşılık gelmesi gibi avantajlarından dolayı son yıllarda değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde daha çok Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) kullanımı tercih edilmektedir.

1.1. Literatür Özeti

Rüzgâr enerjisi sektöründe ÇBAG uygulamaları son yıllarda literatürde oldukça geniş yer almaktadır. Yapılan çalışmaların bir bölümünde ÇBAG'nin modeli çıkartılarak farklı kontrol yapıları tasarlanmıştır. Genel olarak Rotor Taraf Kontrol (RTK) stratejileri ve Şebeke Taraf Kontrol (ŞTK) stratejileri incelenmiştir. RTK ve ŞTK stratejileri prensip olarak benzerlikler göstermekte olup literatürde farklı çalışmalarda incelenmişlerdir. Bazı çalışmalarda ise ÇBAG'nin sensörlü veya sensörsüz kontrol tasarımları üzerinde durulmuştur. Yapılan çalışmalar şebeke bağlantılı veya şebeke bağlantısız olarak gerçekleştirilmiştir. ÇBAG üzerine yapılan çalışmaların büyük bir kısmı bilgisayar tabanlı benzetim çalışmaları olarak gerçekleştirilirken, bazı çalışmalarda ise benzetim çalışmalarının uygulamaya dönüştürülerek gerekli kontrol ve analizlerin yapıldığı görülmüştür.

Xiao ve arkadaşları ÇBAG'nin dönüştürülmüş süper-iletken manyetik enerji depolama arıza akım sınırlayıcısı ve RTK ile arıza geçiş yeteneğini arttırmaya yönelik çalışma yapmışlardır. Şebekeye bağlı ÇBAG için fay geçişi yeteneği ve geçici tutarlılığı ele alınması gereken hayati problemlerdir. Bu problemlerin üstesinden gelmek için, süper iletken bobin ve RTK ile yeni bir süper iletken manyetik enerji depolama arıza akım sınırlayıcısı tabanlı koruma şemasını incelemişlerdir. Süper iletken endüktans parametresini tahmin etmek ve optimize etmek için rotor taraf kontrollü matematiksel bir model kullanmışlardır (Xiao ve ark., 2018).

Bian ve arkadaşları çok çalışma noktaları altında ÇBAG tabanlı rüzgâr santraline sahip bir güç sisteminin senkron altı kontrol etkileşiminin azaltılmasına yönelik çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, ÇBAG için bir Güç Sistemi Stabilizasyonunun (GSS) olasılıksal bir tasarımını sunmuşlardır. ÇBAG dönüştürücü ve çoklu çalışma noktalarında senkron altı kontrol etkileşimini azaltma potansiyel yeteneğini araştırmışlardır. Rüzgâr santrali etkisi ile sistemin olasılıksal eşzamanlı kararlılığını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında, ÇBAG-(GSS)'nin ön oturumu için kullanılan senkron altı kontrol etkileşimi güçlü durum değişkenleri ve temel kontrol döngülerinin belirlenmesi için katılım faktörleri elde etmişlerdir. Tasarladıkları ÇBAG-GSS'nin, çok işlemli noktalarda sistemin olasılık arası küçük sinyal senkron altı kararlılığını geliştirebildiğini ve performansının, genel küçük

sinyal yöntemi ile tasarlanan bir ÇBAG-GSS'den daha iyi olduğunu göstermişlerdir (Bian ve ark., 2018).

Tian ve arkadaşları ÇBAG'nin sanal atalet optimizasyonu kontrolü ve güç şebekesinin eşdeğer atalet zaman sabitinin değerlendirilmesi ile ilgili çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, eşdeğer atalet zaman sabiti için bir değerlendirme yöntemi önermişlerdir. Ayrıca ÇBAG'nin eşdeğer atalet zaman sabiti değerlendirme değerini vermişlerdir. Daha sonra geleneksel fonksiyon, durum değerlendirmesi ve ek sanal atalet kontrolünü içeren durum değerlendirme değerine dayalı rotor akımının doğrudan kontrolü kullanılarak ÇBAG'nin bir sanal eylemsizlik optimizasyon kontrolünü önermişlerdir. Rüzgâr enerjisi ve kontrol stratejilerinin etkisine bağlı olarak rüzgâr santralleri, eşzamanlı generatörler ve çok tipli generatörler ile bağlantılı güç şebekelerinin eşdeğer atalet zaman sabiti değerlendirme değerlerini hesaplamışlardır (Tian ve ark., 2018).

Ma ve arkadaşları akım-kaynak tabanlı bir ÇBAG modelinin uygulaması üzerine analiz çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında, güç sistemi kararlılığı analizi için mevcut kaynak tabanlı modelin kullanılma koşullarını sunmuşlardır. Daha sonra modelin geçerliliğini simetrik ve asimetrik hata koşulları altında incelemişlerdir. Kuzey Çin'deki gerçek bir rüzgâr santraline modelleme ve doğrulamaya yönelik uygulamalarının geçerlilik analizini mevcut kaynak tabanlı ÇBAG modeli üzerinde doğrulamışlardır (Ma ve ark., 2018).

Sarma ve arkadaşları endüstriyel dönüştürücüler kullanarak test tesisleri için ÇBAG stator akı odaklı kontrol şeması uygulaması üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, endüstriyel dönüştürücüler üzerinde özel bir harici gerçek zamanlı platform ve bir hız / konum iletişim modülü aracılığıyla etkin bir şekilde uygulanmasını sağlayan bir metodoloji sunmayı amaçlamışlardır (Sarma ve ark., 2018).

Liu ve arkadaşları ÇBAG tabanlı rüzgâr santralleri için kısa devre hesaplama yöntemi ile ilgili çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, ÇBAG tabanlı rüzgâr santralleri için kısa devre akımlarının pratik hesabı yöntemini önermişlerdir. ÇBAG'deki tek bir kısa devre akımı için geliştirilmiş hesaplama yöntemi, elektromanyetik geçici analize dayalı olarak geliştirmişlerdir. Güç sisteminin kısa devre akımlarını hesaplamak için geleneksel yöntemle birlikte, kısa devre akımları için kullanılan ÇBAG tabanlı rüzgâr santralinin eşdeğer bir modeli üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında önerilen hesaplama yönteminin, ÇBAG

tabanlı rüzgâr santrallerinin elektrik tasarımında daha iyi doğruluk ve pratikliğe sahip olduğunu göstermişlerdir (Liu ve ark., 2018).

Deng ve arkadaşları şebeke gerilimi altında ÇBAG'nin geçici elektromanyetik özelliğinin analizi ile ilgili çalışma yapmışlardır. Şebeke gerilimi altında ÇBAG üzerindeki elektromanyetik etkiyi ve ilgili kontrol stratejisini incelemek için stator akı bağlantısının kararlı ve geçici bileşenlerini, ÇBAG'nin rotor tarafından indüklenen gerilim ve rotor akımını şebeke gerilimi altında karşılaştırmış ve analiz etmişlerdir. ÇBAG'nin şebeke gerilimi altında rotor aşırı akımına daha az eğilimli olduğunu, böylece arıza koruma devresine ihtiyaç duyulmadığını ve şebeke gerilimi genliğinin çok az değiştiğini, rotor tarafındaki inverterin aşırı modülasyona daha az eğilimli olduğu sonucuna varmışlardır (Deng ve ark., 2018).

Prajapat ve arkadaşları rüzgâr türbini tahrikli ÇBAG sisteminde mevcut dişli boşluğunun modellenmesi ve tahmini üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, ÇBAG ile çalışan rüzgâr türbini dişli çarklarında mevcut olan geri tepmenin modellenmesi ve çevrimiçi tahminini sunmuşlardır. Tahmini geri tepmeyi bir parametre olarak ele alan ve onu dinamik olarak bir durum olarak genişleten sönümsüz kalman filtresi kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. ÇBAG sisteminin yerel ölçümlerini, geri tepmeyi tahmin etmek için kullanmışlardır. Yöntemin performansını ve etkinliklerini farklı senaryolarda incelemişlerdir (Prajapat ve ark., 2018).

Bhattarai ve arkadaşları ÇBAG için parametrik olarak sağlam dinamik hız tahmini bazlı kontrol üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, ÇBAG için hız tahmini tabanlı vektör kontrol yapısını sunmuşlardır. Önerdikleri kontrol yapısının ana avantajı, bu metodoloji ile generatörün bir hız sensörü ve konum kodlayıcısı olmaksızın çalıştırılabilmesidir. Metotlarında, rotor hızı ve pozisyon hatası ile ilgili transfer fonksiyonunun tanımlanmasına dayanan, tekrarlayan en küçük kareler tekniği kullanılarak online olarak makine parametrelerini hesaplamışlardır. Minimum değişiklik kontrolü, hızın uygun şekilde tahmin edilmesiyle konum hatasının düşük olmasını sağlamışlardır (Bhattarai ve ark., 2018).

Sadeghi ve arkadaşları hava taşıtı marş / generatör için basamaklı ÇBAG için azaltılmış düzen modeli üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, eşzamanlı referans çerçevesinde ÇBAG'nin yapısına benzer olan basamaklı asenkron generatör için azaltılmış

bir model önermişlerdir. Önerilen modelin verimliliğini göstermek için alan odaklı bir kontrol tasarlayıp tam model ile karşılaştırmışlardır. Önerdikleri modelin performansını ve doğruluğunu, dengeli ve dengesiz yük değişikliğine ve rotor hızı değişimleri test senaryolarına bağlı simülasyon ve deney sonuçları ile doğrulamışlardır (Sadeghi ve ark., 2018).

Ouyang ve arkadaşları rüzgâr hızı değişimine dayalı reaktif gücün dinamik kısıtlamalarına yönelik ÇBAG'nin kontrolü üzerine çalışma yapmışlardır. ÇBAG'nin rotor geriliminin kontrol edilebilirliğini dikkate alan bir vektör eşdeğer modeli oluşturmuşlardır. Rüzgâr hızı değişimi altında reaktif gücün dinamik gereksinimi ve sınırlandırılmasını araştırmışlardır. Reaktif gücün acil durum kontrol stratejisini, gereksinim ve sınırlama temelinde önermişlerdir. ÇBAG'nin hızlı ayar kabiliyetinin önerilen yöntemle tam olarak kullanılabileceğini simülasyonla göstermişlerdir (Ouyang ve ark., 2018).

Liu ve arkadaşları faz açısı kontrolü kullanılarak ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinlerinin primer frekans kontrolü ile ilgili çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, ÇBAG bazlı rüzgâr türbinlerinin primer frekans kontrolü için bir faz açısı kontrolörü önermişlerdir. Frekans sapması olaylarında senkron generatörün ve ÇBAG-RT'nin iç geriliminin dinamiğini araştırmışlardır. Bir BPAC, ÇBAG-RT'nin hızlı aktif güç kontrolünü sağlayan bir faz kilitli döngü ile elde edilen faz açısını düzenlemek için tasarlamışlardır. Tüm sistemin stabilizesini doğrulamak için ÇBAG-RT ve harici SG tabanlı güç sisteminden oluşan kapalı devre sistemi için küçük-sinyal analizi gerçekleştirmişlerdir (Liu ve ark., 2018).

Qin ve arkadaşları ÇBAG'nin Ricatti denklem tabanlı rotor taraf dönüştürücü kontrolü üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, düşük gerilimli sürüş kabiliyetini arttırmak için, duruma bağlı olarak endüklenen asenkron generatör ile rotor tarafındaki dönüştürücü kontrolünün, duruma bağlı Riccati denklemi yaklaşımı ile sunulmasını amaçlamışlardır (Quin ve ark., 2018).

Filho ve arkadaşları ÇBAG'nin güç kontrolüne uygulanan güçlü ölçülebilir bir kontrol seti üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, ÇBAG'nin güç kontrolü için güçlü bir ölçülebilir kontrol seti önermişlerdir. Bu şekilde önerilen güçlü ölçülebilir kontrol, tahmini rotor geriliminin iki bileşenine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Birinci terim, rotor akım referanslarını dikkate alarak gerilimi hesaplamış ve ikinci terim, parametrelerin tahminine bağlı hatalar dikkate alınarak tasarlamışlardır. Parametrelerin değişimlerinden

kaynaklanan söz konusu hataları, rotor akımı değişiklikleri olarak modellemişlerdir (Filho ve ark., 2018).

Karakasis ve arkadaşları ÇBAG ile rüzgâr sisteminde optimum verim kontrolü üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında, ÇBAG ile bir rüzgâr sistemi için en uygun verimlilik kontrol şemasını önermişlerdir. Önerilen kontrol şeması, rüzgâr türbinde ÇBAG ve maksimum güç noktası takibinde kayıp optimizasyonunu birleştirmiş ve bu nedenle aynı rüzgâr enerjisi potansiyeli ile maksimum elektrik enerjisi üretimi sağlamışlardır. Ayrıca, kesme rüzgâr hızı azaltıldığından dolayı kullanılabilir rüzgâr hızı aralığının alt hız bölgesine doğru uzatılmasını sağlamışlardır (Karakasis ve ark., 2019).

Zhou ve arkadaşları geliştirilmiş sistem seviyesi güvenilirliğine sahip ÇBAG rüzgâr türbin sistemlerinde en iyi güç çevirici seçimi üzerine çalışma yapmışlardır. Şebeke tarafı dönüştürücüsünün ve rotor tarafı dönüştürücüsünün B1 ömürlerinin, elektriksel stresleri göz önünde bulundurarak birçok sapma gösterdiği, optimize edilmiş tasarım stratejileri kullanılarak daha dengeli hale geldiğini gözlemlemişlerdir. Böylece, sistem seviyesi kullanım ömrü, arka arkaya güç dönüştürücülerinin uygun tasarımıyla önemli ölçüde arttığını görmüşlerdir (Zhou ve ark., 2018).

Cruz ve arkadaşları moment dalgalanma değerini ve kaybını azaltmak için ÇBAG-DA sisteminin moment ve rotor akı kontrolü üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmalarında, moment dalgalanma etkisinin ve kayıpların en aza indirgenmesini sağlayan bir doğrudan moment kontrol stratejisi önererek moment dalgalanma konusunu ele almışlardır (Cruz ve ark., 2018).

Prajapat ve arkadaşları ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini sisteminin lineer ikinci dereceden regülatör ile kararlılık geliştirilmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında, şebekeye bağlı ÇBAG'nin salınım davranışını kontrol etmek ve kararlılığı geliştirmek için lineer ikinci dereceden regülatöre dayanan uygun bir kontrol şeması önermişlerdir. Önerdikleri lineer ikinci dereceden regülatör tabanlı sönümleme kontrolörünün performansını ÇBAG ile birleştirilen güç sistemi kararlılığı ile karşılaştırmışlardır (Prajapat ve ark., 2018).

Saric ve arkadaşları ÇBAG tesis örneği gibi yenilenebilir enerjide model tanımlama ve parametre tahmininin geometri bilgisi üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında yenilenebilir kaynaklara sahip elektrik sistemlerine uyarlanmış yeni bir sistem tanımlama

yöntemi açıklamışlardır. Açıklanan yöntemin diferansiyel geometride hesaplama ilerlemelerine dayandığını ve elektrik güç sistemlerinin yeni, global ve içsel zorluklarının karakterizasyonunu sunmuşlardır (Saric ve ark., 2018).

Xiahou ve arkadaşları ÇBAG'nin sensörsüz rotor akımı kontrolü üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında, ÇBAG'nin aktif ve reaktif güçlerin kontrolünün ayrıştırılması için rotor ve akım algılayıcı kontrolü şeması sunmuşlardır (Xiahou ve ark., 2018).

Subudhi ve arkadaşları değişken hızlı rüzgâr türbin sistemi tabanlı ÇBAG'nin ideal ön gösterim stator gerilimi odaklı kontrolü üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, ÇBAG'yi rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin stator aktif ve reaktif güç kontrolleri için yeni bir ideal ön gösterim kontrolünü önermişlerdir. Bu güçleri, stator aktif ve reaktif güç titreşimlerini önlemek için rotor akımları ile kontrol etmişlerdir. Bu ideal ön gösterim denetleyicisini, doğrusal ikinci dereceden düzenleyici yaklaşımı temel alınarak tasarlamışlardır (Subudhi ve ark., 2018).

Bhattarai ve arkadaşları, ÇBAG için azaltılmış sıralı durum gözlemci tabanlı geri beslemeli kontrol metodolojileri üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında, stator gerilimini ve güç ölçümlerini kullanarak bir durum gözlemleyicisi tasarlamışlardır. Ayrıca, önerilen durum gözlemcisi rotor tarafındaki dönüştürücü için iki kontrol stratejisi sağlamak amacıyla durum tahmincisi tabanlı durum geribildirim kontrolü ve durum tahmincisi tabanlı vektör kontrolü kullanmışlardır. Durum gözlemcisi ve kontrolleri, gerçek zamanlı bir simülasyon ile tam düzen bir dinamik model kullanarak değişen rüzgâr koşullarında test etmişlerdir (Bhattarai ve ark., 2018).

Tiwari ve arkadaşları, ÇBAG beslemeli 3 fazlı 4 telli yüke sahip özerk rüzgâr-güneş sisteminin tasarımı ve kontrolü üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışma, 3-fazlı 4-telli yükleri besleyen özerk rüzgâr-güneş enerji sisteminin tasarım, kontrol ve deneysel incelemesini yapmışlardır. Oluşan rüzgâr enerjisi bloğunu maksimum güç noktası izleme algoritması ile donatmışlardır. ÇBAG'nin kontrolünü, iki dönüştürücünden, yani rotor tarafındaki dönüştürücünden ve arkaya bağlanan yük tarafı dönüştürücüsünden oluşturmuşlardır. Sistemi MATLAB'da modellemiş ve performansı dengesiz doğrusal olmayan yük, değişken rüzgâr hızları ve güneş ışınlı koşullarında gerçekleştirmişlerdir.

Tüm bu koşullar altında ÇBAG'nin stator sargılarından akan akımları toplam harmonik bozulma ile dengelemişlerdir (Tiwari ve ark., 2018).

Li ve Nian, dengesiz ve harmonik olarak bozulmuş gerilim altında faz kilitli çevrimsiz ÇBAG sisteminin doğrudan güç kontrolü ile ilgili çalışma yapmışlardır. Bu çalışma, dengesiz ve bozuk gerilim koşulları altında ÇBAG'nin rotor tarafı dönüştürücü ve şebeke tarafı dönüştürücü için geliştirilmiş bir doğrudan güç kontrolü stratejisi önermişlerdir. Önerdikleri şemayı, sabit açısal hıza sahip bir eşzamanlı referans çerçevesinde gerçekleştirmişlerdir. Böylece faz kilitli çevrim çıkarabilmeyi ve ilgili potansiyel kararsızlık durumlarından kaçınılabilmeyi amaçlamışlardır (Li ve ark., 2018).

Chau ve arkadaşları, birincil frekans tepkisinin geliştirilmesi için karmaşık güç sistemlerinde ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinlerinin yeni kontrol stratejisi üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada, lokal senkronize generatör baralarının ağırlıklı frekans sapmaları, parçacık sürüsü optimizasyonu ile optimize edilmiş parametrelerle, özel olarak RTK için özel olarak tasarlanmış özel bir güç sistemi stabilizatörüne giriş sinyali olarak kullanmışlardır. Konvansiyonel kontrol yapısı ile yeni geliştirilen RTK ile güç sisteminin birincil frekans yalıtımını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Alan kontrol hatasını ortadan kaldırmak için, otomatik üretim kontrolü ile seçilen senkron generatörlerin eğirme rezervini kullanan ikincil kontrol şeması eklemişlerdir (Chau ve ark., 2018).

1.2. Tezin Amacı

Yaklaşık yirmi yıl öncesine kadar standart rüzgâr türbinlerinin çoğu basit ve güvenilir bir yapıda olup sincap kafesli asenkron generatörlerden oluşmaktaydı. Bu tip generatörler rüzgâr hızının belirli bir değerde tutularak sabit hızlarda çalışacak şekilde tasarlanmışlardı. Kullanılan bu yöntem iklimsel özelliklere bağlı olarak rüzgâr hızında meydana gelen değişimlerden dolayı elde edilen enerjinin maksim kullanımı açısından verimli bir yöntem değildir.

Günümüzde rüzgâr enerjisinden en iyi şekilde faydalanabilmek için değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde çoğunlukla çift beslemeli asenkron generatörler, alan sargılı senkron generatörler ve daimî mıknatıslı senkron generatörler tercih edilmektedir. Değişken hızlı rüzgâr türbinleri, rüzgâr hızında meydana gelen değişimlere göre moment salınımlarını

minimum değere indirir ve rüzgâr hızında meydana gelen değişime bağlı olarak değişen “generatör güç-hız” karakteristiğine göre maksimum enerji üretimini gerçekleştirirler.

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinden elde edilen enerjinin en iyi şekilde kullanılıp verimli ve güvenilir bir şekilde elektrik şebekesine verilebilmesi için birçok farklı kontrol stratejisi ve sistem yazılımı ara yüzü kullanılmaktadır. Böylece değişken rüzgâr hızlarında sabit frekans ve genlikte çıkış gerilimi elde edilebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı değişken hızlı rüzgâr koşullarında çalışabilen, bu değişimlerden etkilenmeyip şebekeye sabit genlikte ve frekansta gerilimler verebilecek değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde kullanıma yönelik, dayanıklı ve uygulanabilir yüksek performanslı, ÇBAG kontrol algoritması ve rotor tarafı kontrolü için akıllı güç modülü tabanlı sürücü devre kartı tasarlamaktır. ÇBAG’nin kontrol algoritmasının bilgisayar ortamında oluşturulması için MATLAB/Simulink paket programı kullanılacaktır. ÇBAG’nin simülasyon ve deneysel kontrol yapısı bilgisayar ortamında oluşturularak grafiksel sonuçlar elde edilecektir. Ayrıca akıllı güç modülü tabanlı sürücü devre kartının tasarımında AUTODESK/Eagle bilgisayar paket programından faydalanılacaktır. ÇBAG’nin deneysel sonuçlarının alınmasında DS1103 denetleyici kartı kullanılacaktır.

1.3. Tezin Ana Hatları

1. Bölümde tez hakkında ön bilgi verilip, tezin amaç, kapsam ve literatür araştırmasına yönelik bilgiler verilmiştir.

2. Bölümünde rüzgâr enerjisi, rüzgâr türbin sistemleri ve rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatörler incelenip kıyaslama yapılmıştır.

3. Bölümde Çift Beslemeli Asenkron Generatör yapısı detaylı olarak ele alınmıştır. Bu bölümde ÇBAG’nin matematiksel modeli çıkarılarak gerekli dönüşüm matrisleri, ÇBAG’nin eşdeğer devresinden hareketle dinamik denklemleri ve güç değişimi verilmiştir.

4. Bölümde ÇBAG’nin kontrolüne yönelik rotor tarafı ve şebeke tarafı çevirici kontrol yapıları oluşturulmuştur. Simülasyon ve deney çalışmasında kullanılmak üzere uzay vektör darbe genişlik modülasyonu algoritması oluşturulup ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. ÇBAG’nin şebekeye vereceği stator gerilim açısının belirlenmesinde kullanılacak Faz

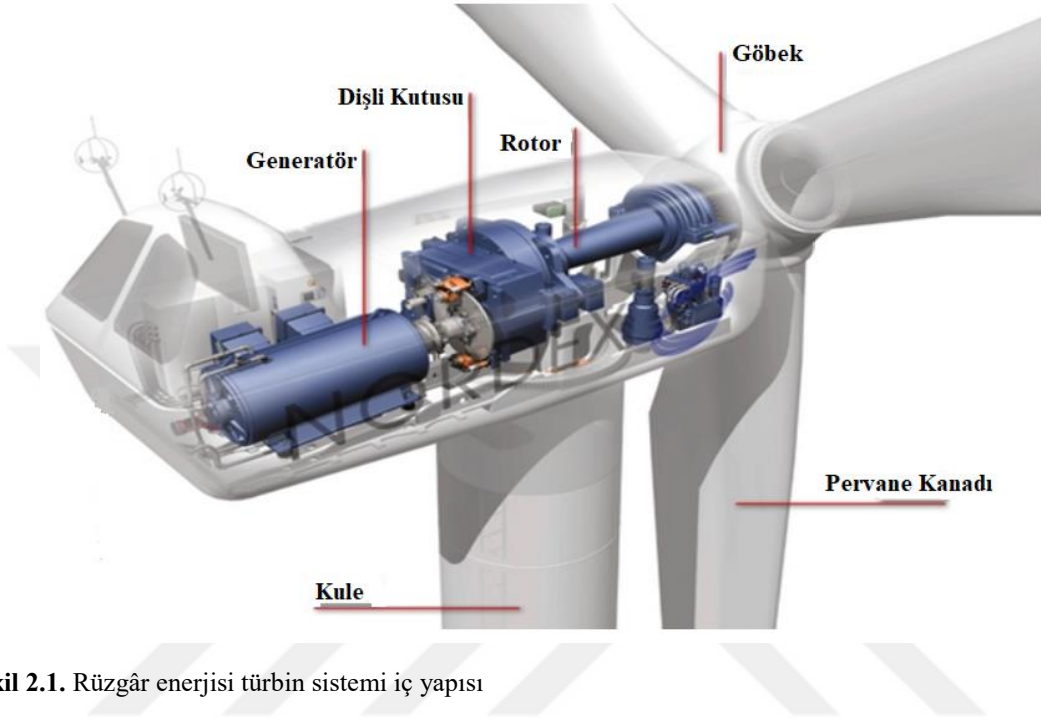
Kilitlemeli Döngü (PLL) tekniği anlatılmıştır. Ayrıca akıllı güç modülü tabanlı sürücü devre kartı tasarımına yönelik yapılan çalışma veriliş deney seti ile ilgili bilgiler verilmiştir.

5. Bölümde tasarlanan kontrol yapılarına yönelik simülasyon ve deney çalışması verilip elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

6. Bölümde ise sonuçlara ve gelecek yöntemlere yer verilmiştir.



2. RÜZGÂR ENERJİSİ TÜRBİN SİSTEMLERİ



Şekil 2.1. Rüzgâr enerjisi türbin sistemi iç yapısı

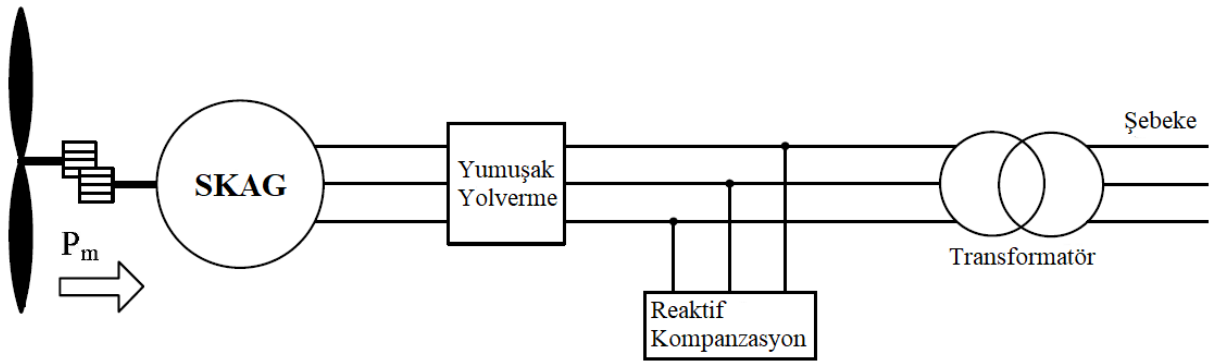
2.1. Rüzgâr Enerjisi Tarihçesi

Milattan önceki yıllarda kullanılmaya başlanılan rüzgâr enerjisi, denizlerde yelkenli gemilerin yol almasında, karada yel değirmenlerinin çalıştırılmasında güç kaynağı olarak kullanılmışlardır. Özellikle buğday, mısır gibi tahıl ürünlerinin öğütülmesinde ve suyun bir yerden başka bir yere taşınması gibi birçok alanda yıllarca kullanılmıştır. Türkler ilk yel değirmenlerini M.S. 7. yüzyılda kullanmışlardır. Avrupalılar ise yel değirmenlerini ilk olarak haçlı seferleri sırasında görmüşlerdir. Fransa ve İngiltere yel değirmenlerini ilk olarak 12. yüzyılda kullanılmışlardır. 18. yüzyılın sonunda Hollanda’da 10.000’e yakın yel değirmeni bulunmaktaydı. Buhar makinelerinin yapılması ile odun, kömür gibi yakıtlardan kesintisiz enerji üretimine başlanmıştır. Bu sebepten dolayı rüzgâr enerjisi önemini yitirmeye başlamıştır. Bununla beraber, rüzgâr türbini denilen ve elektrik üretiminde kullanılan ilk makineler, 1890’ların başlarında Danimarka’da yapılmıştır. Rüzgâr enerjisinden elektrik üreten ilk türbin ise 1891’de Paul la Cour tarafından Danimarka’da inşa edilmiştir (Musial ve Ram., 2010).

2.2. Sabit Hızlı Rüzgâr Türbin Sistemleri

Sabit hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde, rotor hızında yalnızca küçük değişikliklere izin verilmektedir. Bu tip rüzgâr türbinlerinde genellikle sincap kafesli asenkron generatörler kullanılmaktadır. Bunun sebebi sincap kafesli asenkron generatörlerin senkron hıza yakın kontrol edilemeyen küçük hız aralıklarında çalışabilmeleridir. Bu tarz generatörler ile oluşturulan türbin sistemleri sabit hızlı türbin sistemi olarak adlandırılır. Sabit hızlı rüzgâr türbinleri düşük üretim maliyeti, az bakım gerektirmeleri ve güçlü mekanik yapıya sahip olmaları gibi bazı avantajlara sahiptirler.

Rüzgâr hızında meydana gelen anlık değişimler, sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde elektromanyetik momentin değişimine neden olur. Bu değişimler, şebeke bağlantılı rüzgâr türbin sistemleri için istenmeyen bir özelliktir. Bu durum, generatör sabit hızda çalışmasından kaynaklı olarak türbinin mekanik aksamaları üzerinde ciddi baskılar oluşturur ve ana şaft üzerinde şiddetli salınımlar meydana getirir. Sistemde meydana gelen bu gibi değişimler, rüzgâr türbininin ömrünü kısaltır, mekanik baskılara neden olur ve güç kalitesini azaltır. Bu durum sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde büyük dezavantaj olarak gösterilebilir. Bu nedenlerden dolayı rüzgâr türbinleri optimum performansında çalıştırılmazlar ve genellikle rüzgârdan maksimum güç elde edilemez. Şekil 2.2’de sabit hızlı rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı verilmiştir.

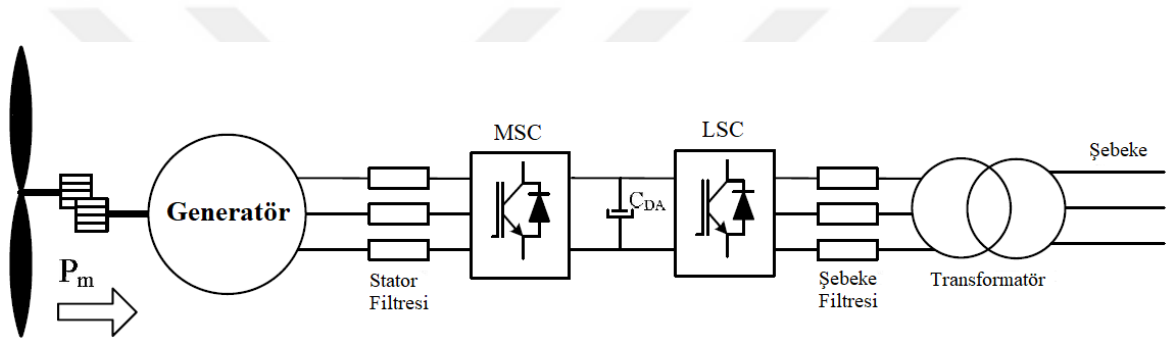


Şekil 2.2. Sabit hızlı rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı

2.3. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbin Sistemleri

Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemleri, değişken ve geniş hız değerlerinde esen rüzgârlardan maksimum enerji verimi elde edebilmek için tasarlanmış enerji sistemleridir.

Bu türbin sistemlerinde rüzgâr hızında meydana gelen değişimlere bağlı olarak rotor hızı da değişir ve böylece maksimum güç katsayısına uygun olan uç hız oranı sabit tutulur. Değişken hızlı rüzgâr türbinleri sabit hızlı rüzgâr türbinlerine kıyasla daha karmaşık sistem yapısına sahiptirler. Değişken hızlı rüzgâr türbinleri güç elektroniği sistemleri üzerinden şebekeye bağlanırlar. Böylece generatörlerin hız, güç veya moment kontrolleri gerçekleştirilir. Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemleri rüzgâr enerjisinden geniş hız aralığında faydalanabildiği için verimleri oldukça yüksektir. Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde genellikle doğrudan sürülen senkron generatörler ve çift beslemeli asenkron generatörler tercih edilmektedir. Şekil 2.3'te değişken hızlı rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.3. Değişken hızlı rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı

2.4. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbin Sistemlerinde Kullanılan Generatörler

Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde; doğru akım generatörleri, senkron generatörler, alan sargılı senkron generatörler, sürekli mıknatıslı senkron generatörler, asenkron generatörler, sincap kafesli asenkron generatörler ve çift beslemeli asenkron generatörler kullanılmaktadır.

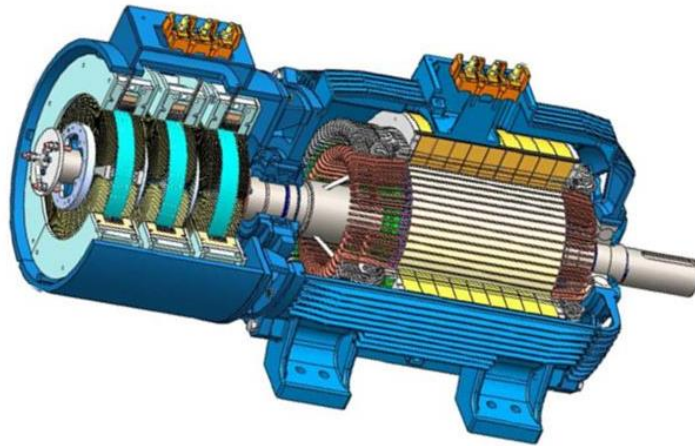
2.5. Çift Beslemeli Asenkron Generatörlerin Yapısı ve Çalışma Prensibi

Çift beslemeli asenkron makinaların rotoruna ve statoruna üç fazlı sargılar yerleştirilmiştir. Bu yapılarından dolayı bu makinaların hem rotor hem de stator uçlarından giriş ve çıkış yapılabilir. Rotor sargı uçlarının bir tarafı bileziklere bağlı olup diğer tarafı kısa devre edilerek yıldız noktası oluşturulur. Bu makinaların stator sargıları direkt

olarak sabit frekanslı üç fazlı şebekeye, rotor sargıları ise bilezikler üzerinden iki yönlü güç dönüştürücü yardımıyla şebekeye bağlıdır.

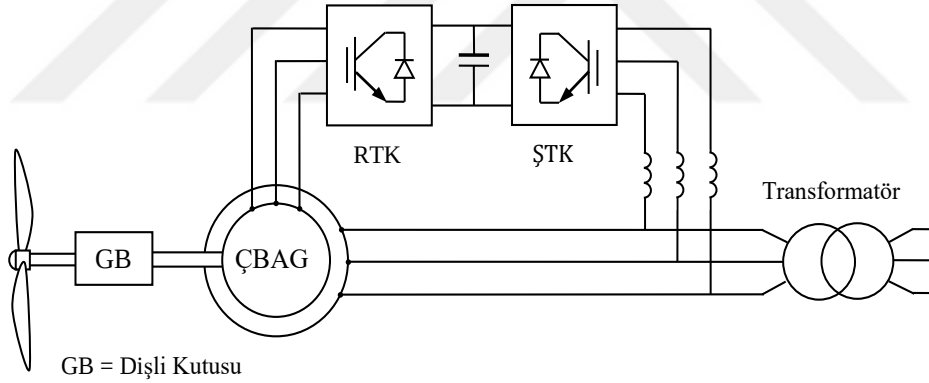
Asenkron makinanın generatör olarak çalışma esnasındaki güç kaynağı, rotordan aldığı mekanik güçtür. Asenkron generatörün statorunda yer alan oyuklarda üç fazlı sargılar bulunur. Bu üç fazlı sargı fiziksel olarak stator etrafına yayılmıştır. Bu sargılar üzerinden akım akıtıldığında rotor etrafında ve çevresinde dönen bir manyetik alan meydana gelir. Bu manyetik alan asenkron makinanın en önemli çalışma özelliğini oluşturur. Rotor akımı ile stator akısı arasındaki etkileşimden dolayı moment oluşur. Asenkron makinenin rotoru bir rüzgâr türbinine bağlanırsa ve senkron hızdan daha yüksek bir hızda döndürülürse, rotorda endüklenen akım ve momentin yönü motor çalışma durumuna göre ters yönde gerçekleşir. Bu durumda makina generatör olarak çalışmaya başlar. Türbinden elde edilen mekanik gücü elektrik gücüne çevirerek stator uçlarına bağlı olan yükü besler. Eğer makina şebekeye paralel olarak çalışıyor ise şebekeye güç aktarımı gerçekleştirir.

Yani makinanın generatör olarak çalıştırılabilmesi için senkron hızın üstündeki hızlarda döndürülmesi gerekmektedir. Asenkron makinelerde stator ile rotor arasında elektriksel bir bağlantı bulunmamaktadır. Elektromanyetik endüksiyon prensibine göre çalışırlar. Asenkron makina AA uyarımına ihtiyaç duyar. Dolayısıyla bu makineler hem kendinden uyarımlı hem de dışarıdan uyarımlı olabilirler. Şekil 2.4'te çift beslemeli asenkron generatörün yapısal görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.4. Çift beslemeli asenkron generatörün yapısal görüntüsü

ÇBAG'nin kullanıldığı koşullar gereği çift taraflı enerji akışı olabilmesinden dolayı, güç dönüştürücüler arka arkaya bağlı iki adet çift yönlü dönüştürücüden oluşur. Bu özelliklerinden dolayı ÇBAG'lerin kontrolünde iki farklı ana kontrol yapısı kullanılır. Dönüştürücülerden biri rotor tarafına diğeri ise şebeke tarafına bağlanarak kullanılır. Rotor tarafına bağlanan dönüştürücü devresi ile moment, hız ve güç katsayısının kontrolü amaçlanır. Şebeke tarafına bağlanan dönüştürücü devresi ile iki dönüştürücü arasındaki DA bara geriliminin kontrolü amaçlanır. Rotor gücü ve şiddetine göre şebekeden çift taraflı enerji giriş çıkışı sağlanır. ÇBAG'ler senkron altı durumlarda çalışırken rotor üzerinden şebekeden enerji çekerler. Senkron üstü durumlarda çalıştıklarında ise rotor tarafından şebekeye enerji verirler. ÇBAG'ler aktif ve reaktif gücün ayrı ayrı kontrol edilebilmesi, güç elektroniği dönüştürücü gücün sistem gücünden küçük olduğu için maliyetlerinin az olması ve harici bozucu etkilere karşı dayanıklı ve kararlı olmaları gibi avantajlara sahip olup son yıllarda rüzgâr türbin sistemlerinde kullanımı artmıştır. Şekil 2.5'te çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgâr türbin sistemi blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.5. Çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgâr türbin sistemi blok diyagramı

2.6. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbin Sistemlerinde Kullanılan Generatörlerin Karşılaştırılması

Sincap kafesli asenkron generatör ve daimî mıknatıslı senkron generatörler genellikle küçük ve orta ölçekli rüzgâr güç sistemlerinde tercih edilmektedir. Büyük ölçekli rüzgâr güç sistemlerinde ise çift beslemeli asenkron generatörler ve senkron generatörlerin kullanımı tercih edilmektedir. Rüzgâr türbin sistemlerinde, türbininin yerleşeceği bölgenin rüzgâr

özelliği dikkate alınarak kullanılacak generatör tipi belirlenir. Belirlenen generatörün rüzgâr hızında meydana gelen değişimden düşük oranda etkilenmesi ve yüksek verimde çalışması amaçlanır.

Bu alanda kullanılan generatörler arasında ÇBAG'ler diğer generatör yapılarına kıyasla önemli üstün özelliklere sahiptir. Bu özelliklerden biri de ÇBAG'nin kontrolü için tam ölçekli güç elektroniği dönüştürücüsü yerine ÇBAG'nin %30 gücünde bir dönüştürücü gücüne gereksinim duyulmasıdır. Böylece rüzgâr türbin sisteminin maliyeti büyük ölçüde azalmaktadır. Ayrıca ÇBAG'nin reaktif güç kontrolünün gerçekleştirilebilmesi ve sahada koşullarında çalışma durumunu sürdürebilmesi gibi özelliklerinden dolayı son yıllarda rüzgâr türbin sistemlerinde kullanımı tercih edilmektedir.



3. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN MATEMATİKSEL MODELİ

Çift beslemeli asenkron generatörün kontrol yapısını oluşturabilmek için asenkron makinalara ait genel matematiksel denklemlerin bilinmesi gerekmektedir. Oluşturulacak matematiksel model, asenkron generatörün geçici ve sürekli durum karakteristiğini doğru yansıtabilecek bir yapıda olmalıdır. ÇBAG denklemleri senkron hızda dönen dq eksen takımında tanımlanarak verilecektir (Ai ve ark., 2017; Amrane ve ark., 2017). Model ifade edilmeden önce referans alınan a fazı referanslı duran abc- $\alpha\beta$ ve senkron hızla dönen abc-dq dönüşümleri verilecektir (Barkia ve ark., 2016; Aroussi ve ark., 2017).

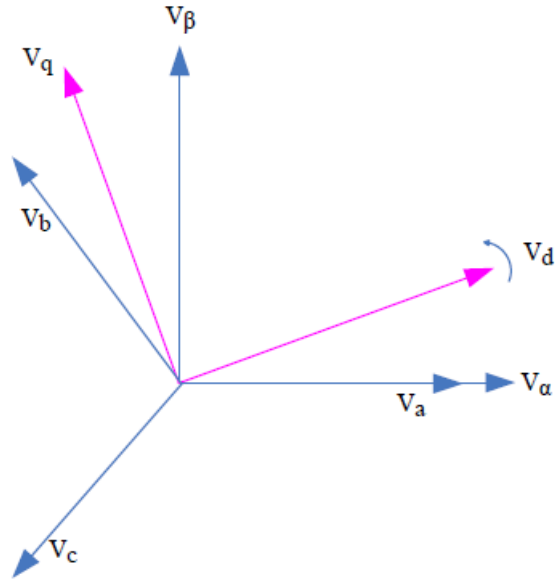
İki fazlı sistemler elektrik makinalarının modellemelerinde ve teorik analizlerinde önemli kolaylıklar sağladığı için üç fazlı dengeli aralarında 120 derece faz farkı bulunan sistemleri durağan düzlemde aralarında 90 derece faz farkı bulunan iki fazlı sistemlere dönüştürülerek sıklıkla kullanılırlar. Ayrıca bu dönüşümler ile kontrol yapılarındaki gereksiz boyut fazlalığı indirgenmiş olur (Firouzi ve ark., 2017; Chang ve ark., 2018). Fakat iki fazlı duran sistemlerde sinüzoidal işaretlerde periyodik değişim gerçekleştiği için duran eksenden senkron hızla dönen eksene geçiş tercih edilir. Yapılan dönüşümler ile işaretlerin sürekli halde sabit bir değerde kalması sağlanır (Gao ve ark., 2018; Fu ve ark., 2018). Gerçekleştirilen dönüşümler gerilim işareti baz alınarak verilecek olsa da diğer elektriksel değişkenler için de (akım, akı, vb.) aynı dönüşüm matrisleri kullanılabilir. Üç fazlı dengeli gerilim bileşen formülleri (3.1, 3.2, 3.3)'te ifade edilmiştir.

$$V_a = \cos(\omega t) \quad (3.1)$$

$$V_b = \cos(\omega t - 2\pi/3) \quad (3.2)$$

$$V_c = \cos(\omega t + 2\pi/3) \quad (3.3)$$

Şekil 3.1'de Gerilim vektörüne ait abc- $\alpha\beta$ ve abc- dq eksen dönüşümleri ile vektörel gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.1. Gerilim vektörünün abc- αβ ve abc- dq dönüşümleri ile vektörel gösterimi

3.1. Clarke Dönüşüm Matrisleri

İlk kez Edith Clarke tarafından kullanılan ve Clarke dönüşümü olarak bilinen dönüşüm tekniği ile aralarında 120 derece faz farkı bulunan üç fazlı olarak ifade edilen makina modeli aralarında 90 derece faz farkı bulunan αβ eksen takımı olarak isimlendirilen iki faza indirgenmiş makina dönüşüm matris modeli (3.4) ve iki fazdan üç faza dönüştürülmüş şekli (3.5)'te denklemsel olarak ifade edilmiştir (Hu ve ark., 2013; Jerin ve ark., 2018).

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1 \\ 0.5 & -\sqrt{3}/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_o \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

3.2. Park Dönüşüm Matrisleri

Clarke ve Park dönüşümlerini birlikte kullanan ve matrissel formda ifade eden Paul C. Krause ise, geliştirdiği matris ile üç fazlı makina modelinden direk olarak dq eksen takımındaki makine modeline dönüşümünü gerçekleştirmiştir (Kong ve ark., 2014; Kou ve ark., 2017). Üç fazlı dengeli gerilim bileşenleri abc-dq dönüşümü denklem (3.6)'da ve dq-abc ters dönüşüm matrisleri denklem (3.7)'de gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Burada θ açısı omega açısal hızın integralinden denklem (3.8)'de gösterildiği gibi ifade edilmiştir.

$$\theta = \int 2\pi f dt \quad (3.8)$$

Ayrıca Clarke dönüşümünü R. H. Park geliştirerek $\alpha\beta$ eksen takımından elde edilen makina modelini rotor eksen takımıyla birlikte dönen dq eksen takımına dönüşümünü gerçekleştirmiştir. $\alpha\beta$ -dq dönüşüm denklem (3.9)'da ve dq- $\alpha\beta$ ters dönüşüm matrisleri denklem (3.10)'da gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

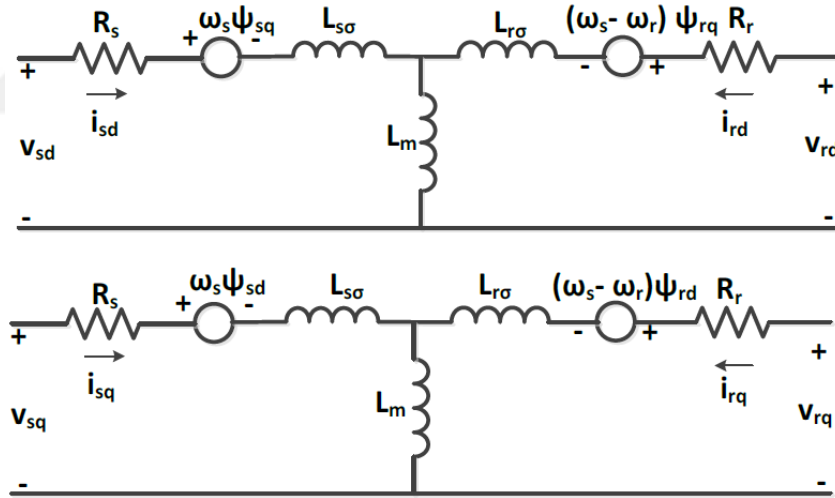
$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.3. ÇBAG'nin Dinamik Denklemleri

ÇBAG dinamik model elde edilirken ihmal edilen ve varsayım olarak kabul edilen bazı özellikler şu şekildedir; Stator sargıları stator çevresine düzgün bir şekilde yayılmış olup hava aralığındaki akı değişiminin sinüzoidal olduğu kabul edilmiştir. Üç Fazlı stator sargıları 120 derecelik açı ile yerleştirilmiştir (Moualdia ve ark., 2016; Mohammadi ve ark., 2018). Demir kayıpları ihmal edilmiş olup magnetik kısımların geçirgenliği sonsuz sayılmıştır. Deri etkisi ihmal edilmiştir. Direnç ve endüktansların sıcaklık ve frekansla değişimleri ihmal edilmiştir (Müller ve ark., 2002; Murari ve ark., 2017).

Denklemlerde 's' alt indisi ile yazılmış değişkenler stator devresi, 'r' alt indisi ile yazılmış değişkenler ise rotor devresi ile ilişkilidir. N_s ve N_r sırasıyla stator ve rotor sarım sayılarını ifade etmektedir.

Şekil 3.2'de ÇBAG eşdeğer devresi verilmiştir. Eşdeğer devredeki tüm büyüklükler statora indirgenmiştir.



Şekil 3.2. ÇBAG eşdeğer devresi

Burada V_{sd}, V_{sq} dq eksen takımındaki stator gerilimlerini ve V_{rd}, V_{rq} dq eksen takımındaki rotor gerilimlerini, i_{sd}, i_{sq} dq eksen takımındaki stator akımlarını ve i_{rd}, i_{rq} dq eksen takımındaki rotor akımlarını, $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}, L_m$ sırasıyla dq eksen takımındaki stator, rotor kaçak endüktansını ve mıknatıslanma endüktansı değerlerini, R_s, R_r sırasıyla dq eksen takımındaki stator ve rotor dirençlerini, ω_s, ω_r sırasıyla dq eksen takımındaki stator ve rotor elektriksel hızlarını, $\psi_{sd}, \psi_{sq}, \psi_{rd}, \psi_{rq}$ sırasıyla dq eksen takımındaki stator ve rotor akısını

ifade etmektedir. Şekil 3.2'deki ÇBAG eşdeğer devresinden kirchoff gerilim kuralına göre denklem (3.11), (3.12), (3.13) ve (3.14)'de gösterildiği gibi ifade edilmiştir (Silveria ve ark., 2018; Song ve ark., 2018).

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} + L_m \frac{di_{rd}}{dt} \quad (3.11)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} - \omega_s \psi_{sd} + L_m \frac{di_{rd}}{dt} \quad (3.12)$$

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_r \psi_{rq} + L_m \frac{di_{sd}}{dt} \quad (3.13)$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + L_r \frac{di_{rq}}{dt} - \omega_r \psi_{rd} + L_m \frac{di_{sq}}{dt} \quad (3.14)$$

Elektromagnetik akı ifadeleri denklem (3.15), (3.16), (3.17) ve (3.18)'de gösterildiği gibi ifade edilmiştir.

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad (3.15)$$

$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad (3.16)$$

$$\psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \quad (3.17)$$

$$\psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \quad (3.18)$$

Stator ve rotor bir faz endüktansları sırasıyla L_s ve L_r denklem (3.19) ve (3.20) gösterildiği şekilde tanımlanmıştır.

$$L_s = L_m + L_{s\sigma} \quad (3.19)$$

$$L_r = L_m + L_{r\sigma} \quad (3.20)$$

Bu şekilde ÇBAG'ye ait elektriksel dinamik denklemleri elde edilmiştir. Daha sonra generatör mekaniksel dinamik denklemi (3.21)'de gösterildiği gibi ifade edilmiştir.

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_m + T_e) + b\omega_m \quad (3.21)$$

Denklem (3.21)'de genelleştirilmiş olarak yazılan ifade makinanın generatör veya motor olarak çalışma şekline göre değişmektedir. Makinaya doğru verilen moment ifadesi negatif işaretli, makinadan alınan moment ifadesi pozitif işaretli olarak değişmektedir.

Dolayısıyla elektrik makinasının generatör olarak çalışması durumunda mekaniksel dinamik denklemi (3.22)'de gösterildiği gibidir.

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}(T_m - T_e) + B\omega_m \quad (3.22)$$

Burada ω_m mekanik hızı, J eylemsizlik momentini, T_m ve T_e mekanik ve elektromagnetik momenti, B sürtünme katsayısını ifade etmektedir. Mekanik hız ω_m ile rotor elektriksel hızı ω_r arasındaki ilişki denklem (3.23)'te verilmiştir.

$$\omega_r = \omega_s - p\omega_m \quad (3.23)$$

Burada p ÇBAG'nin kutup sayısını ifade etmektedir. Stator ve rotora ait akım büyüklükleri doğrudan ölçülebilmekte olup elektromagnetik moment denklemi (3.24)'te gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$T_e = \frac{3}{2}pL_m(i_{rd}i_{sq} - i_{sd}i_{sq}) \quad (3.24)$$

Statordan alınan toplam aktif ve toplam reaktif güç hesabı sırasıyla denklem (3.25) ve (3.26)'da verilmiştir.

$$P_s = \frac{3}{2}(V_{sd}i_{sd} + V_{sq}i_{sq}) \quad (3.25)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(V_{sq}i_{sd} - V_{sd}i_{sq}) \quad (3.26)$$

Denklem (3.11-14) ile verilen dinamik denklemler durum uzay modeli şeklinde de ifade edilmiştir. Böylece elde edilen eşitliklerin simülasyon ortamına uygulanabilirliği daha kolay hale gelmiştir. Stator ve rotor akımlarını durum değişkenleri, gerilimleri de kontrol girişleri olarak varsayılarak durum uzay modeli denklem (3.16-19)'da yeniden düzenlenmesi ile aşağıdaki gibi verilmiştir (Tang ve ark., 2018).

$$\frac{dx}{dt} = A(\omega_m)x(t) + Bu(t) \quad (3.27)$$

Durum uzay modelinde ait $A(\omega_m)$, B, x(t) ve u(t) matrisleri aşağıda gösterildiği gibidir.

$$A(\omega_m) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \omega_s + \frac{p\omega_m L_m^2}{\sigma L_s L_r} & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} & \frac{p\omega_m L_m}{\sigma L_s} \\ -\left(\omega_s + \frac{p\omega_m L_m^2}{\sigma L_s L_r}\right) & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \frac{p\omega_m L_m}{\sigma L_s} & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} & -\frac{p\omega_m L_m}{\sigma L_r} & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & \omega_s - \frac{p\omega_m}{\sigma} \\ \frac{p\omega_m L_m}{\sigma L_r} & \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} & \frac{p\omega_m}{\sigma} - \omega_s & -\frac{R_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \\ -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$x = [i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}]^T \quad (3.30)$$

$$u = [V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}]^T \quad (3.31)$$

(3.28) ve (3.29)'da verilen σ kaçak faktörü olup (3.32)'de gösterildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (3.32)$$

3.4. ÇBAG'de Güç Değişimi ve Kayma

Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan çift beslemeli asenkron generatörler senkron altı ve senkron üstü hızlarda çalışabildikleri için stator ve rotor üzerinden güç akışı sağlayabilirler. ÇBAG'ler senkron altı çalışma durumunda güç akışı şebekeden rotor sargılarına doğru gerçekleşirken, senkron üstü çalışmada ise rotor sargılarından şebekeye doğru bir güç akışı gerçekleşir. ÇBAG'ler genellikle generatör senkron hızının $\pm\%30$ değerindeki çalışma bölgelerinde çalışırlar. Generatörün bu değer aralığında kontrol edilebilmesi generatörün kayma oranına bağlıdır (Yan ve ark., 2017; Yantao ve ark., 2017). Asenkron makinalarda genel kayma ifadesi (s) denklem (3.33)'te verilmiştir.

$$s = \frac{\omega_s - p\omega_m}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s} \quad (3.33)$$

Burada ω_s stator hızı, ω_r ise rotor elektriksel hızıdır ve denklem (3.37)'de verilmiştir. Kayma ifadesi farklı yöntemle ifade edecek olursak, rotor akımlarının frekansının (f_r) stator akımlarının frekansına (f_s) oranı ile denklem (3.34)'te gösterildiği gibi tanımlanabilir.

$$s = \frac{f_r}{f_s} \quad (3.34)$$

Stator hızı ω_s sabit olduğundan dolayı, kayma ifadesi ω_r rotor elektriksel hızının değişimine göre değiştirilebilir.

Asenkron makinalarda mekanik gücün elektriksel güce dönüşümü denklem (3.35)'te verildiği gibi ifade edilebilir.

$$P_m = P_s + P_r \quad (3.35)$$

P_m , P_s ve P_r sırasıyla toplam mekanik, stator ve rotor gücünü ifade etmektedir. Rüzgâr tarafından üretilen mekanik güç stator ve rotorda üretilen gücün toplamıdır. Güç ifadeleri generatör momenti ile denklem (3.36)'da verildiği gibi ifade edilir.

$$T_m \omega_r = T_m \omega_s - P_r \quad (3.36)$$

Burada T_m rüzgâr tarafından üretilen mekanik momenti ifade etmektedir. Denklem (3.36)'nın yeniden düzenlenmesi ile rotor gücü (P_r) yeniden (3.37)'de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$P_r = -T_m(\omega_s - \omega_r) \quad (3.37)$$

Rotor gücü (P_r) ile stator gücü (P_s) (3.38)'de verildiği gibi ilişkilendirilebilir.

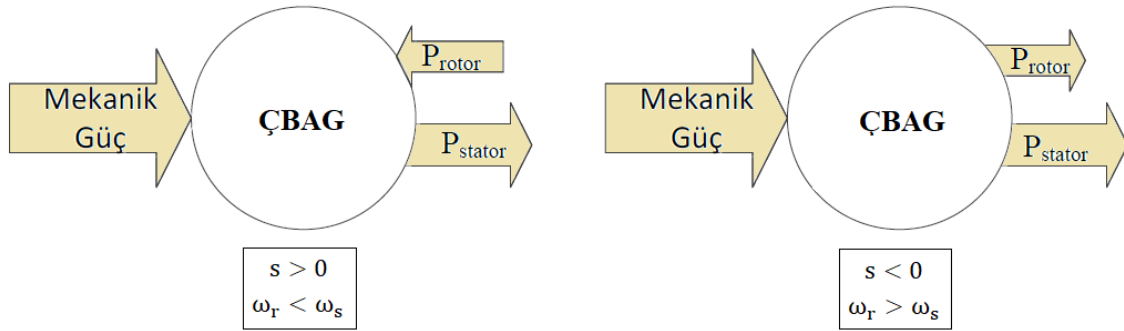
$$P_r = -sT_m \omega_s = -P_s \quad (3.38)$$

Rotordaki aktif ve reaktif güç değişimleri (3.39) ve (3.40)'ta gösterildiği gibi tanımlanabilir.

$$P_r = \frac{3}{2}(V_{rd}i_{rd} + V_{rq}i_{rq}) \quad (3.39)$$

$$Q_r = \frac{3}{2}(V_{rq}i_{rd} + V_{rd}i_{rq}) \quad (3.40)$$

Kayıpların ihmal edildiği ÇBAG'de güç aktarımı Şekil 3.3'te görselleştirilmiştir.



Şekil 3.3. ÇBAG güç aktarımı

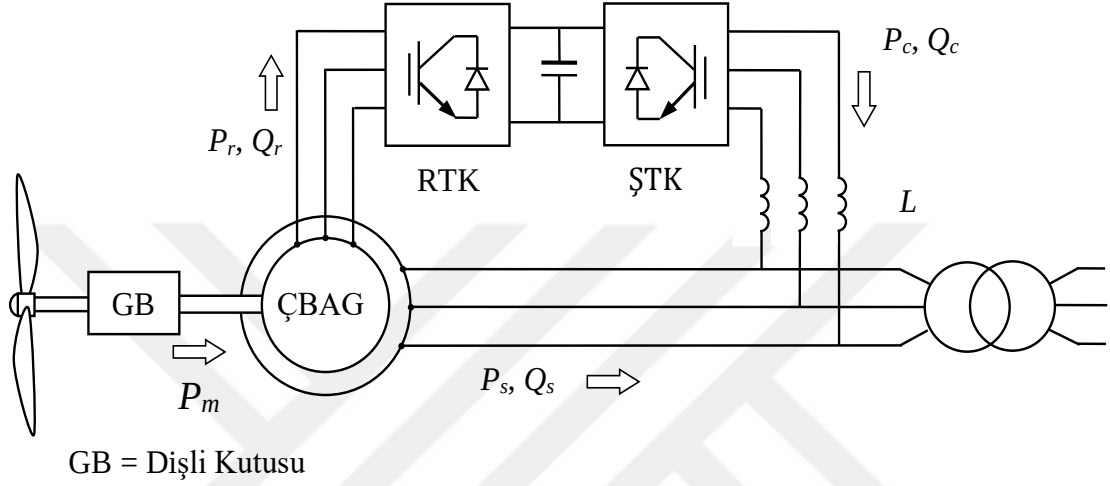
Kaymaya göre generatör çalışma bölgeleri aşağıda belirtilmiştir.

$s=1$ kayma durumunda generatör durmakta, $s=0$ durumunda ise generatör senkron hızda dönmektedir. $s>1$ olduğu durum ters çalışma bölgesini, $0<s<1$ olduğu durum senkron altı çalışma bölgesi, $-1<s<0$ olduğu durum ise senkron üstü çalışma bölgesi ifade etmektedir. Asenkron makineler manyetik alanın oluşturduğu stator döner alan hızında dönemezler. Rotorun döndüğü hız ile stator hızı birbirinden farklı olup aralarındaki farkın stator hızı oranı kayma olarak adlandırılır. Kayma frekansı ise rotor döner manyetik alanının frekansına eşittir. Çift beslemeli asenkron generatörlerde rotor sargıları üzerinden rotor frekansı kontrol edilerek yani kayma frekansı kontrol edilerek generatörlerin belirli sınırlar içerisinde istenilen hızda kontrolü sağlanabilir (Zhao ve ark., 2017).

3.5. ÇBAG'de Kullanılan Güç Devresi

ÇBAG'lerin güç sistemine paralel olarak bağlanması ve sisteme enerji aktarımının devre şekli blok diyagramı Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Bu güç devresi ile stator ve rotor üzerindeki güç akışını kontrol etmek mümkündür. Sistem arka arkaya bağlanan iki adet gerilim kaynaklı dönüştürücü kullanılarak senkron altı veya senkron üzeri hızlarda çift yönde

rotor güç akışı sağlanabilir. Sabit genlik ve frekans değerinde, değişken hızlarda aktif ve reaktif güç akışı güç elektroniği dönüştürücüsü yardımıyla kontrol edilebilmektedir. Stator açısı ve rotor açısı arasında uygun dönüşümler yapılarak rotora uygulanan gerilimlerin frekansı değiştirilebilir. Böylece ÇBAG hız değişimlerinden etkilenmeyerek şebeke gerilimi ile aynı frekans ve genlikte gerilimler üretir (Zhou ve ark., 2018).



Şekil 3.4. ÇBAG güç aktarımı blok diyagramı

4. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖR TABANLI DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN KONTROLÜ

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde ÇBAG'nin sistem kontrolünün gerçekleştirilebilmesi için ÇBAG modelinin oluşturulması gerekir. Sistem modellemesi iki kısımdan meydana gelir. Bunlardan biri rotor tarafı dönüştürücü bölümü diğeri ise şebeke tarafı dönüştürücüsü bölümünden oluşur. Bu iki bölümün sistem modellemesi yapılarak ÇBAG kontrolü gerçekleştirilir. Rotor tarafı modellemesi yapılırken generatör yapısı baz alınırken şebeke tarafı modellemesinde ise sistem elektriksel denklemleri baz alınmaktadır. Rotor tarafı dönüştürücüsünün görevi rotor akımlarını kontrol ederek stator aktif ve stator reaktif güç üretiminin kontrolünü sağlar. Şebeke tarafı dönüştürücüsünün görevi ise DA bara gerilimini sabit tutarak güç akışının şebekeden rotora veya rotordan şebekeye çift yönde aktarımını kontrol eder (Zhu ve ark., 2017; Zhou ve ark., 2018).

Bu bölümde ilk olarak ÇBAG'nin rotor tarafı kontrolü ve şebeke tarafı kontrolüne yönelik iki kontrol yapısı ayrıntılı incelenecek olup bu iki benzer kontrol sistemine yönelik oluşturulan kontrol yapıları verilecektir. Daha sonra faz kilitlemeli çevrim yapısı verilerek ÇBAG'nin kontrol sisteminde kullanımına yönelik tasarlanan Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM) algoritması verilecektir.

4.1. Rotor Taraf Çevirici Kontrolü

Rotor tarafı çevirici kontrolüne yönelik farklı kontrol yöntemleri bulunmaktadır. Stator akısının veya stator geriliminin referans alındığı doğrudan vektör kontrolü ÇBAG kontrolüne yönelik kullanılan temel bir yöntemdir. Ayrıca dolaylı vektör kontrolü, doğrudan moment kontrolü gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Doğrudan vektör kontrolü, dolaylı vektör kontrolü ve doğrudan moment kontrolü gibi yöntemlerde stator ve rotor akı oryantasyonu kullanılmaktadır. Rotor akısı oryantasyonu kullanılan vektör kontrolü yönteminde rotor akısının genliği ve açısı hesaplanır.

Vektör kontrol yöntemi prensibinin temeli dq eksen dönüşümleridir. Üç fazlı generatör modeli değişkenlerinin dönüşüm tekniği ile aralarında 90 derece fark olan dq eksen takımına dönüşümü gerçekleştirilerek birbirlerinden bağımsız olarak kontrol edilebilmesi sağlanmaktadır. dq eksen dönüşümlerinin elde edilmesiyle doğru akım makinasında gerçekleştirilen kontrol yapısındaki gibi sistemin kontrol algoritmasını oldukça kolaylaştıracaktır (Bian ve ark., 2018).

The block diagram illustrates the control system for a DFIG. It features several key components and signal flows:

- Reference Inputs:** Active power Q_s^* and mechanical torque ω_m^* are provided as references.
- Control Loops:**
 - Q_s^* is compared with the measured active power Q_s and fed into a PI controller to generate the reference rotor current i_{rd}^* .
 - ω_m^* is compared with the measured mechanical torque ω_m and fed into a PI controller to generate the reference rotor current i_{rq}^* .
 - The reference rotor currents i_{rd}^* and i_{rq}^* are compared with the measured rotor currents i_{rd} and i_{rq} and fed into PI controllers to generate the reference rotor voltages v_{rd}^* and v_{rq}^* .
- Coordinate Transformations:**
 - The reference rotor voltages v_{rd}^* and v_{rq}^* are transformed from the $d-q$ frame to the $\alpha-\beta$ frame using the transformation $e^{j(\theta_s - \theta_r)}$.
 - The measured rotor currents i_{rd} and i_{rq} are transformed from the $d-q$ frame to the $\alpha-\beta$ frame using the transformation $e^{-j(\theta_s - \theta_r)}$.
- Power Converter and Grid Connection:**
 - The reference rotor voltages v_{rd}^* and v_{rq}^* are fed into a $2/3$ phase inverter block, which generates the reference rotor voltages $v_{ra,b,c}^*$.
 - The reference rotor voltages $v_{ra,b,c}^*$ are fed into a UVSGM block, which generates the reference rotor voltages $v_{ra,b,c}$.
 - The reference rotor voltages $v_{ra,b,c}$ are fed into a DA-link block, which generates the reference rotor voltages $v_{sa,b,c}$.
 - The reference rotor voltages $v_{sa,b,c}$ are fed into a $2/3$ phase inverter block, which generates the reference rotor voltages $v_{sa,b,c}$.
 - The reference rotor voltages $v_{sa,b,c}$ are fed into a Stator block, which generates the reference rotor voltages $v_{sa,b,c}$.
 - The reference rotor voltages $v_{sa,b,c}$ are fed into a $2/3$ phase inverter block, which generates the reference rotor voltages $v_{sa,b,c}$.
 - The reference rotor voltages $v_{sa,b,c}$ are fed into a Stator block, which generates the reference rotor voltages $v_{sa,b,c}$.
 - The reference rotor voltages $v_{sa,b,c}$ are fed into a $2/3$ phase inverter block, which generates the reference rotor voltages $v_{sa,b,c}$.
- Feedback and Estimation:**
 - The measured rotor currents $i_{ra,b,c}$ are transformed from the $\alpha-\beta$ frame to the $d-q$ frame using the transformation $e^{-j(\theta_s - \theta_r)}$ to generate the measured rotor currents i_{rd} and i_{rq} .
 - The measured rotor currents i_{rd} and i_{rq} are fed into the control loops.
 - The measured rotor currents i_{rd} and i_{rq} are also fed into a d/dt block, which generates the reference rotor voltages v_{rd}^* and v_{rq}^* .
 - The measured rotor currents i_{rd} and i_{rq} are also fed into a d/dt block, which generates the reference rotor voltages v_{rd}^* and v_{rq}^* .

30

Şekil 4.2’de Stator akısından oryantasyonlu kontrol yönteminin blok diyagramı verilmiştir. Stator akı hesabı $\alpha\beta$ duran ekseninde tanımlanarak (4.1) ve (4.2)’de verilen denklemler yardımıyla elde edilir.

$$\psi_{s\alpha} = \int (V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \quad (4.1)$$

$$\psi_{s\beta} = \int (V_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \quad (4.2)$$

Stator akısından elde edilen açı bilgisi (4.3)’te gösterilmiştir.

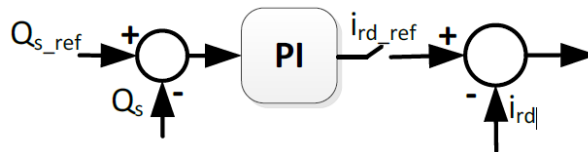
$$\theta_s = \arctan \frac{\psi_{s\beta}}{\psi_{s\alpha}} \quad (4.3)$$

Stator akısı ve generatörün rotor açısından elde edilen konum bilgisi kullanılarak gerekli dönüşümler yapılır. Böylece dq eksen takımında ayrıştırılmış rotor akımları PI kontrolör ve sonrasında ilave edilen kompanzasyon terimleri ile kontrol edilmektedir (Tian ve ark., 2018). Kompanzasyon terimleri, kontrolör sürekli hal hatasının giderilmesi, ayrıştırma (decoupling) ve performans açısından oldukça önemlidir. Elde edilen ayrıştırılmış gerilim referansları denklem (4.4) ve (4.5)’te verildiği gibi elde edilir.

$$V_{rd}^{ref} = (i_{rd}^{ref} - i_{rd})PI + \underbrace{(\omega_s - \omega_r)\sigma L_r i_{rq}}_{kompanzasyon} \quad (4.4)$$

$$V_{rq}^{ref} = (i_{rq}^{ref} - i_{rq})PI + \underbrace{(\omega_s - \omega_r)L_m I_{ms} + \sigma L_r i_{rd}}_{kompanzasyon} \quad (4.5)$$

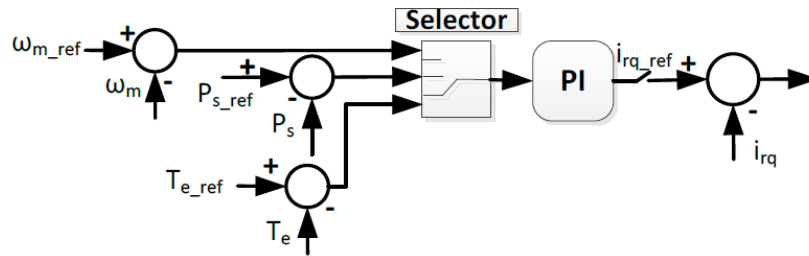
Kompanzasyon terimleri (4.4) ve (4.5)’den de görüldüğü gibi makina parametreleri ve kaymaya bağlı bilgilerden oluşmaktadır. Akım kontrolünden önce Şekil 4.3 ve 4.4’te verilen kontrol uygulamaları gerçekleştirilebilir.



Şekil 4.3. Reaktif güç kontrolü

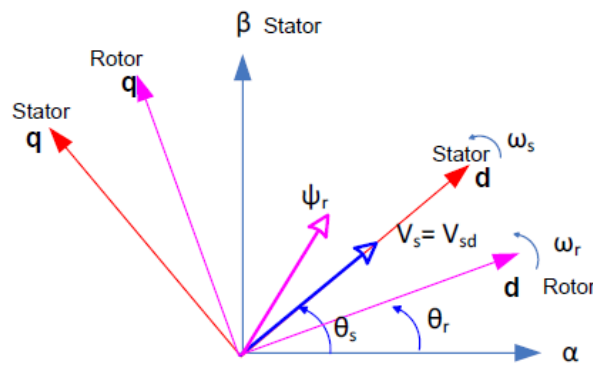
Reaktif gücün değişiminde i_{rd} etkin olduğu için akım kontrolü öncesinde tasarlanacak kontrol yapısı ile reaktif güç kontrolü gerçekleştirilebilir.

Hız, güç veya moment kontrolü, Şekil 4.4'te verildiği gibi i_{rq} kontrolünden önce tasarlanacak bir kontrol yapısı ile gerçekleştirilebilir. Bu sayede istenen kriterlere göre ÇBAG'nin kontrolü gerçekleştirilir (Ma ve ark., 2018).



Şekil 4.4. Hız, güç veya moment kontrolü

Stator geriliminden oryantasyonlu yöntemlerde stator gerilimi senkron hızla dönen dq eksen takımının d eksenine Şekil 4.5'te gösterildiği gibi sabitlenerek $V_s = V_{sd}$ eşitliği sağlanır. Böylece rotor akımları kontrol edilebilir. Stator akı hesabında stator direncinin ihmal edilmesi durumunda stator gerilimi ile stator akısı arasında doksan derecelik faz farkı olacağı için gerilim vektörünün park dönüşümleri ile doksan derece kaydırılma yapılır (Sarma ve ark., 2018).



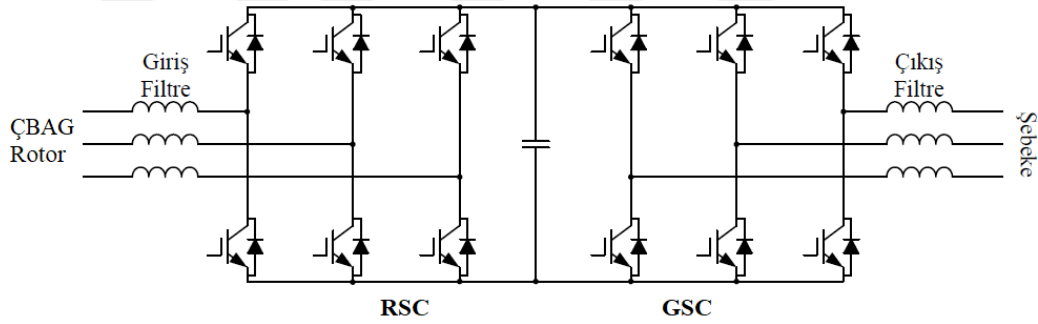
Şekil 4.5. Stator gerilim vektörü

Şekil 4.6'da gösterildiği gibi Q_s ve ω_m kontrol edilebilir.

4.2. Şebeke Taraf Çevirici Kontrolü

GSC (Şebeke Taraf Dönüştürücü) ve RSC (Rotor Taraf Dönüştürücü) iki seviyeli evirici devresinin birlikte gösterimi şekil 4.7’de verilmiştir. (Deng ve ark., 2018, Liu ve ark., 2018).

Şekil 4.7’de gösterilen IGBT’ler üzerinde bulunan diyotların aktif olmasını engellenmek ve şebekeye gönderilen veya şebekeden alınan faz akımlarının kontrol edilebilmesi için DA bara gerilimi şebeke geriliminin biraz üzerinde bir değerde kontrol edilmelidir. Giriş endüktansının amacı şebeke harmoniklerini azaltmak ve anahtarlardan oluşan komutasyon etkisini engellemektir (Karakasis ve ark., 2019).



Şekil 4.7. GSC ve RSC evirici devresinin birlikte gösterimi

Enerji sistemindeki aktif ve reaktif güç akışını ayarlamak için RTK’da olduğu gibi abc-dq dönüşümleri uygulanarak şebeke geriliminden oryantasyonlu bir vektör kontrol yöntemi uygulanabilir (Ouyang ve ark., 2018). Sistemin eşdeğer devresinden (4.9) ve (4.10) eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V_{dinv} = Ri_{gd} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_g L_g i_{gd} + V_{gd} \quad (4.9)$$

$$V_{qinv} = Ri_{gq} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} - \omega_g L_g i_{gq} + V_{gq} \quad (4.10)$$

Burada V_{dinv} , V_{qinv} evirici tarafından üretilen gerilimi, V_{gd} , V_{gq} şebeke gerilimini, i_{gd} , i_{gq} şebeke akımlarını, R şebekenin direncini, L_g şebekenin hat endüktansını, ω_g ise şebekenin açısal hızını ifade etmektedir. Şekil 4.8’de ŞTK blok diyagramı verilmiştir.

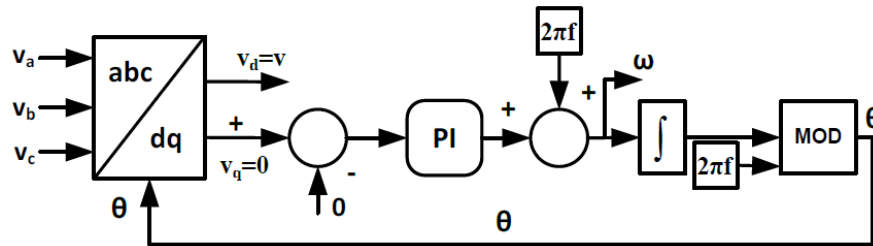
$$P_g = \frac{3}{2}(V_{gd}i_{gd} + V_{gq}i_{gq}) \quad (4.14)$$

$$Q_g = \frac{3}{2}(V_{gq}i_{gd} - V_{gd}i_{gq}) \quad (4.15)$$

4.3. Faz Kilitlemeli Döngü

Şebeke bağlantılı yenilenebilir enerji dönüştürücü sistemlerinde şebeke gerilimlerinde bozulmalar ve harmonikler meydana gelebilmektedir. Genel şebeke kararlılığına uygun bir şekilde katkıda bulunabilmek için uygun kontrol teknikleri gereklidir. Yenilenebilir enerji sistemlerinin kontrolü esas olarak şebeke geriliminin fazına, büyüklüğüne, frekansına ve doğru bir şekilde belirlenmesi gereken senkronizasyon algoritmasına bağlıdır. Şebeke gerilim açısının belirlenmesi için Faz Kilitlemeli Döngü (PLL-Phase Locked Loop) teknikleri kullanılmaktadır. PLL yapısının tasarımı ve performansı sistem kontrol dönüştürücü dinamiklerini doğrudan etkilemektedir. Temelde sıfır geçişi algılama ve faz kilitlemeli çevrimler olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Sıfır geçiş algılama tekniği oldukça basit olup ve bozucu işaretlere karşı dayanıksızdır (Cruz ve ark., 2018, Zhou ve ark., 2018).

PLL yöntemleri, basit ve dayanıklı yapıya sahip olmaları nedeniyle gerilim açısının ve frekansının hesaplanmasında en sık kullanılan yöntemdir. İşaret bozulmalarına karşı dayanıklıdır (Prajapat ve ark., 2018). Bu bölümde çoğunlukla kullanılan üç fazlı 3-PLL yapısı detaylandırılacaktır. Şekil 4.9’da geleneksel 3-PLL yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Geleneksel 3-PLL yapısı

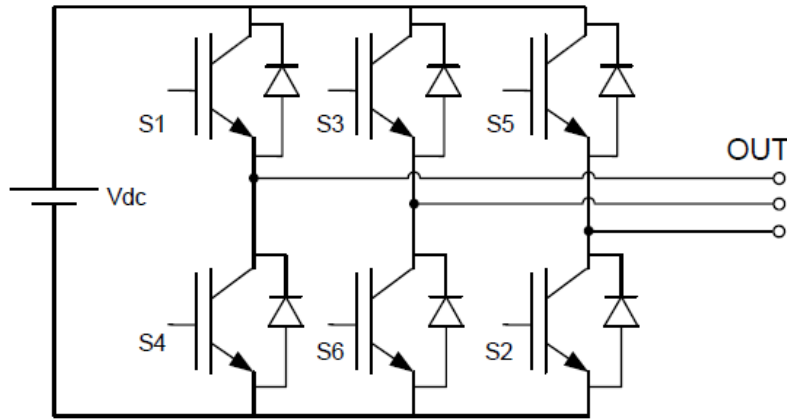
3-PLL yapısının oluşturulmasında ilk olarak üç fazlı gerilimler gerekli dönüşümler yapılarak senkron hızda dönen abc-dq eksen takımı elde edilir. Bu gerilimler senkron hızla dönen dq eksen takımının d eksenine sabitlenirse $V = V_d$ ve $V_q = 0$ eşitliği elde edilecektir. Daha sonra V_q eşitliği PI kontrolörden geçirildikten sonra $2\pi f$ değeri kontrolör çıkışına

eklenerek işaretin hız bilgisi elde edilir. Hız bilgisinin integrali alınarak konum açısı elde edilir ve elde edilen açı bilgisi abc-dq dönüşümüne gönderilir.

4.4. Uzak Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu

Uzak Vektör Darbe Genişlik Modülasyon (UVDGM) tekniği günümüzde oldukça popüler olan tekniklerden biridir. UVDGM tekniği sinüzoidal DGM tekniğine göre daha yüksek gerilim seviyesi ve daha fazla DA veri yolu kullanımı sunmaktadır. Uygun anahtarlama düzeni seçimi ile minimum anahtarlama kaybı sağlanabilmektedir. Uygun anahtarlama düzeni seçilimi ile çıkış akımında düşük harmonik içerik elde edilir. Ayrıca daha düşük anahtarlama frekansında çalışabilme tekniği gibi avantaja sahiptirler. Çok seviyeli eviricilerdeki seviye sayısının artmasından dolayı algoritmanın karmaşık hale gelmesi, bu tekniğin tek dezavantajı olarak gösterilebilir (Alouane ve ark., 2018).

UVDGM'nin sahip olduğu bu avantajlar, genel üç fazlı inverterlerin en önemli özelliklerindendir. Anahtarlama tekniğinin sadece kontrol algoritmasına bağlı olmasından dolayı bu avantajlar herhangi bir ekstra donanım cihazı eklenmeden elde edilebilmektedir. Bu avantajlar rüzgâr türbini gibi yüksek güçlü sistemlerde oldukça önemli hale gelmektedir (Kebuitari ve ark., 2012). 2- seviyeli 6 anahtarlı IGBT inverter temel şeması Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. İki seviyeli 6 anahtar inverterinin devre şeması

Rotor tarafı kontrol devresi genellikle düşük temel frekans bölgesinde çalışmaktadır. Bu sebeple üretilen işaretler sıfır geçişlerinde bozulmaktadır. Deneysel çalışmada UVDGM

yönteminin bu problemi en düşük değere indirdiği görülmüştür. Bu sebeple RTK uygulamasında UVDGM yöntemi kullanılmıştır (Lakhimsetty ve ark., 2018).

4.4.1. UVDGM Algoritması

Bu yöntemde üç fazlı büyüklükler α - β olmak üzere iki fazlı büyüklüklere indirgenmektedir. V_a, V_b, V_c gerilimleri faz gerilimlerini göstermek üzere (4.16-20)'de gerekli dönüşüm denklemleri verilmiştir.

$$V_\alpha = V_a - V_b * \cos 60 - V_c * \cos 60 \quad (4.16)$$

$$V_\alpha = V_a - \frac{1}{2}V_b - \frac{1}{2}V_c \quad (4.17)$$

$$V_\beta = 0 + V_b * \cos 30 - V_c * \cos 30 \quad (4.18)$$

$$V_\beta = 0 + \frac{\sqrt{3}}{2}V_b - \frac{\sqrt{3}}{2}V_c \quad (4.19)$$

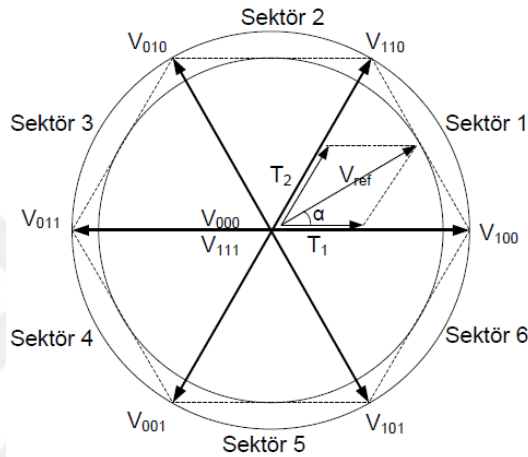
$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

İstenen uzay vektörünü oluşturmak için kullanılan ana vektörler, bu vektörleri oluşturmak için Darbe Genişlik Modülasyon (DGM) sinyali uygulanması gereken anahtarlama elemanları ve bunun sonucunda oluşan gerilimler Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Anahtarlama durumları ve bunlara karşılık gelen çıkış gerilimlerinin kombinasyonu

a	b	c	V_a	V_b	V_c	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	$2/3 * V_{dc}$	$-1/3 * V_{dc}$	$-1/3 * V_{dc}$	1	0	-1
1	1	0	$1/3 * V_{dc}$	$1/3 * V_{dc}$	$-2/3 * V_{dc}$	0	1	-1
0	1	0	$-1/3 * V_{dc}$	$2/3 * V_{dc}$	$-1/3 * V_{dc}$	-1	1	0
0	1	1	$-2/3 * V_{dc}$	$1/3 * V_{dc}$	$1/3 * V_{dc}$	-1	0	1
0	0	1	$-1/3 * V_{dc}$	$-1/3 * V_{dc}$	$2/3 * V_{dc}$	0	-1	1
1	0	1	$1/3 * V_{dc}$	$-2/3 * V_{dc}$	$1/3 * V_{dc}$	1	-1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0

Bu referans gerilimini makina faz sargılarında elde etmek için referans geriliminin nerede olduğunu bilmeliyiz. Tablo 4.1'den, altı anahtar inverterde 8 olasılık olduğu anlaşılabilir. Anahtarların her bir kombinasyonu Şekil 4.11'de bir uzay vektörü oluşturur (Lee ve ark., 2018). Referans vektörü, bu uzay vektörleri ve / veya bunların kombinasyonu ile oluşturulmalıdır. Referans vektörü oluşturmak için, güç anahtarlarına en yakın üç uzay vektörü uygulanmalıdır (Le ve ark., 2019). Böylece bu üç vektöre her adımda sektör bilgisiyle karar verilir.



Şekil 4.11. Temel uzay vektörleri ve anahtarlama durumları

Şekil 4.11'da verilen yapı 2 seviyeli inverter yapısı için verilmiş olup bu yapıda 8 farklı vektör mevcuttur. Bu uzay vektörlerinin 2'li kombinasyonu ile oluşan 6 farklı sektör mevcuttur. Bu vektörlerden V_0 ve V_7 vektörleri sıfır çıkış gerilimi üretir. Bu nedenle bu vektörlere sıfır vektörü denir (Lin ve ark., 2018).

Algoritmada gerçekleştirilen adımlar aşağıda belirtiler sıralamayla gerçekleştirilmektedir;

- 1)- V_α , V_β , V_{ref} vektörleri ve θ açısı tespiti.
- 2)- V_{ref} 'in bulunduğu sektörlerin tespiti,
- 3)- T_1 , T_2 ve T_0 sürelerinin hesabı,
- 4)- Her bir transistörün (S_1 - S_6) anahtarlama sırasının tespiti.

Üç faz büyüklükler V_α ve V_β olmak üzere iki fazlı iki boyutlu düzleme indirgendikten sonra (4.22)'de gösterilen formül ile V_{ref} elde edilir (Miyama ve ark., 2018). Daha sonra V_{ref} vektörünün bulunduğu bölgenin θ açısı (4.21)'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_\beta}{V_\alpha} \right) \quad (4.21)$$

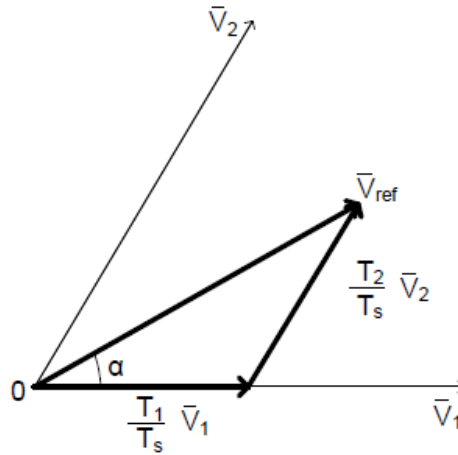
$$V_{ref} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (4.22)$$

V_{ref} vektörünün bulunduğu bölgenin θ açısı belirlendikten sonra V_{ref} vektörünün bulunduğu sektör belirlenir (Xueguang ve ark., 2018). Tablo 4.2’de θ açısının bulunduğu sektörler gösterilmiştir.

Tablo 4.2. θ açısının alacağı değerler

AÇI (θ)	BULUNDUĞU SEKTÖR
$0^\circ \leq \theta < 60^\circ$	1. Sektör
$60^\circ \leq \theta < 120^\circ$	2. Sektör
$120^\circ \leq \theta < 180^\circ$	3. Sektör
$180^\circ \leq \theta < 240^\circ$	4. Sektör
$240^\circ \leq \theta < 300^\circ$	5. Sektör
$300^\circ \leq \theta < 360^\circ$	6. Sektör

V_{ref} vektörü ilgili sektörü oluşturan ana vektörlerin bileşkesi olarak oluşturulur. Ana vektörlerin genliği vektörün uygulanma süresi ile ayarlanır (Ni ve ark., 2019). Uygulanan DGM sinyalinin periyodu T_s ise V_{ref} vektörünün 1. sektörde olduğunu varsayarsak V_1 vektörünün uygulanma süresi T_1 , V_2 vektörünün uygulanması süresi T_2 ve V_0 vektörünün uygulanma süresi T_0 olmak üzere (4.23-25)’de gerekli hesaplamalar verilmiştir.



Şekil 4.12. Sektör için θ açısı, V_1 , V_2 ve V_{ref} alan vektörleri

$$\int_0^{T_s} \bar{V}_{ref} dt = \int_0^{T_1} \bar{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \bar{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} \bar{V}_0 dt \quad (4.23)$$

$$T_s \cdot \bar{V}_{ref} = (T_1 \cdot \bar{V}_1 + T_2 \cdot \bar{V}_2) \quad (4.24)$$

$$T_s \cdot |\bar{V}_{ref}| \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} = T_1 \cdot \bar{V}_1 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \cdot \bar{V}_2 \cdot \begin{bmatrix} \cos(\pi/3) \\ \sin(\pi/3) \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

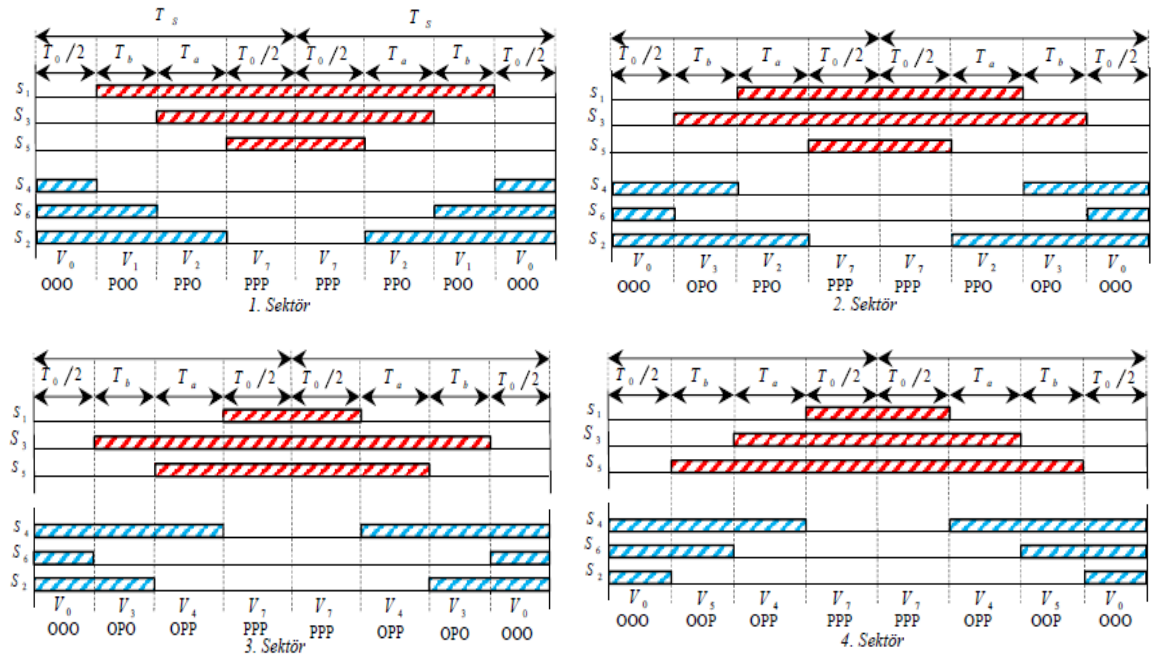
eşitlikleriyle V_{ref} vektörü oluşturulur (Sasi ve ark., 2013). Bütün sektörler göz önüne alındığında T_1, T_2, T_0 süreleri genel olarak (4.26-28)'deki şekilde hesaplanır.

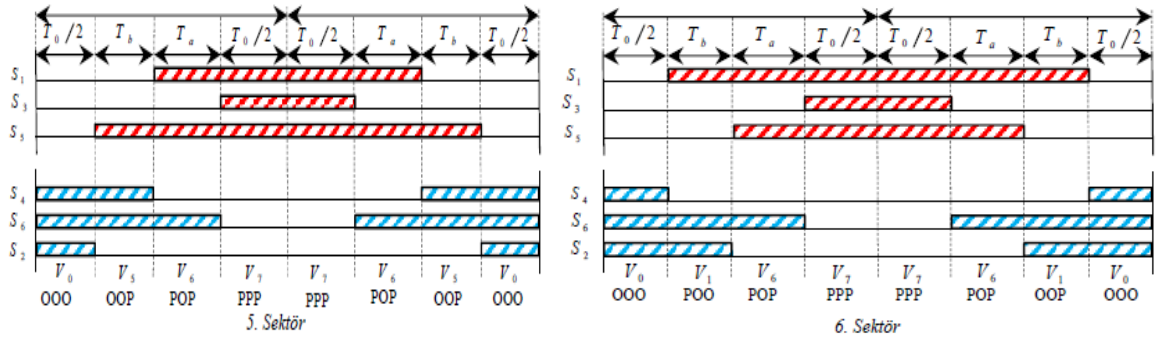
$$T_1 = T_s \cdot \frac{|\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \cdot \frac{\sin(\pi/3 - \theta)}{\sin(\pi/3)} \quad (4.26)$$

$$T_2 = T_s \cdot \frac{|\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \cdot \frac{\sin(\theta)}{\sin(\pi/3)} \quad (4.27)$$

$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2) \quad (4.28)$$

T_1, T_2, T_0 sürelerinin hesaplanmasının ardından DGM işaretlerinin anahtarlama elemanlarına hangi şekilde uygulanacağı Şekil 4.13'te verilmiştir (Sawant ve ark., 20016). Görüldüğü gibi DGM işaretini simetrik yapabilmek için iki T_s kullanılmaktadır.





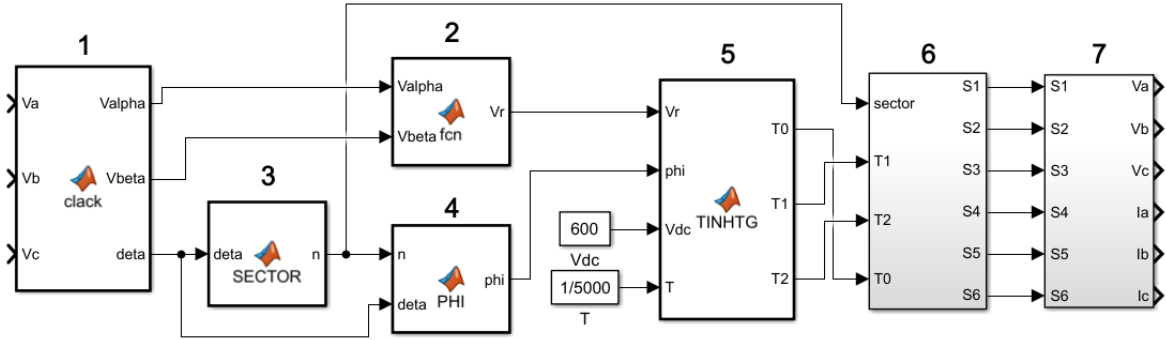
Şekil 4.13. Sektörlere göre uygulanacak DGM işaretleri

Tablo 4.3'te Her sektörde anahtarlama zamanı hesaplaması verilmiştir.

Tablo 4.3. Her sektörde anahtarlama zamanı hesaplaması

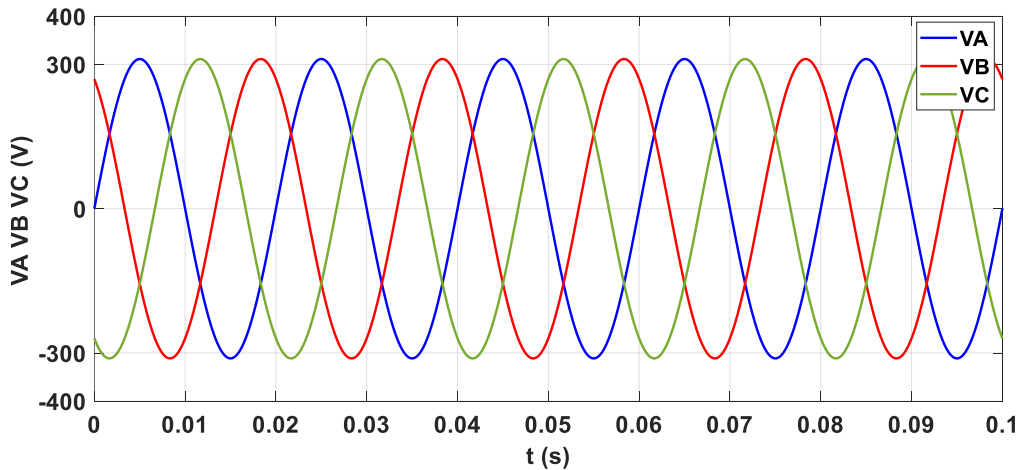
SEKTÖR	ÜST ANAHTARLAR S_1, S_3, S_5	ALT ANAHTARLAR S_4, S_6, S_2
1	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_3 = T_2 + T_0/2$ $S_5 = T_0/2$	$S_4 = T_0/2$ $S_6 = T_1 + T_0/2$ $S_2 = T_1 + T_2 + T_0/2$
2	$S_1 = T_1 + T_0/2$ $S_3 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_5 = T_0/2$	$S_4 = T_2 + T_0/2$ $S_6 = T_0/2$ $S_2 = T_1 + T_2 + T_0/2$
3	$S_1 = T_0/2$ $S_3 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_5 = T_2 + T_0/2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_6 = T_0/2$ $S_2 = T_1 + T_0/2$
4	$S_1 = T_0/2$ $S_3 = T_1 + T_0/2$ $S_5 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_6 = T_0/2$ $S_2 = T_0/2$
5	$S_1 = T_2 + T_0/2$ $S_3 = T_0/2$ $S_5 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_4 = T_1 + T_0/2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_2 = T_2 + T_0/2$
6	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_3 = T_0/2$ $S_5 = T_1 + T_0/2$	$S_4 = T_0/2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_2 = T_2 + T_0/2$

Şekil 4.14'te Matlab/Simulink ortamında oluşturulan UVDGM algoritması verilmiştir.



Şekil 4.14. Matlab/Simulink UVDGM algoritması

Sisteme ilk olarak üç fazlı V_a , V_b , V_c gerilimler uygulanmıştır. Uygulanan bu gerilimler 1 numaralı blokta gerekli dönüşümler yapılarak V_α , V_β ve gerilim açısı değerleri elde edilmektedir. Elde edilen V_α ve V_β değerleri 2 numaralı bloğa gönderilerek V_{ref} değeri elde edilmiştir. Elde edilen gerilim açısı değeri ise 3 numaralı bloğa gönderilerek sektörlerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Sektör bilgisi ve açı değeri 4 numaralı bloğa gönderilerek phi açısı elde edilmiştir. Daha sonra phi açısı, V_{dc} ve elde edilen V_{ref} değeri 5 numaralı blokta T_1 , T_2 , T_0 değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. 6 numaralı blokta T_1 , T_2 , T_0 ve sektör bilgisi kullanılarak S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , S_5 , S_6 anahtarlama elemanlarına ait UVDGM işaretleri elde edilmiştir. Bu işaretler 7 numaralı üç fazlı inverter bloğuna gönderilerek V_a , V_b , V_c gerilimleri ve I_a , I_b , I_c akımları elde edilmiştir. Şekil 4.15'te sisteme uygulanan üç fazlı gerilimler gösterilmiştir.

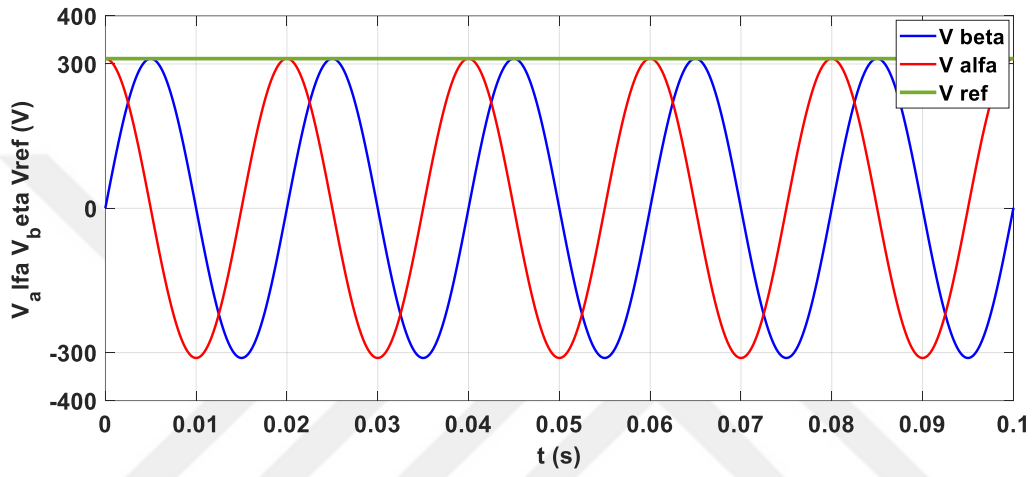


Şekil 4.15. Sisteme uygulanan üç fazlı gerilimler

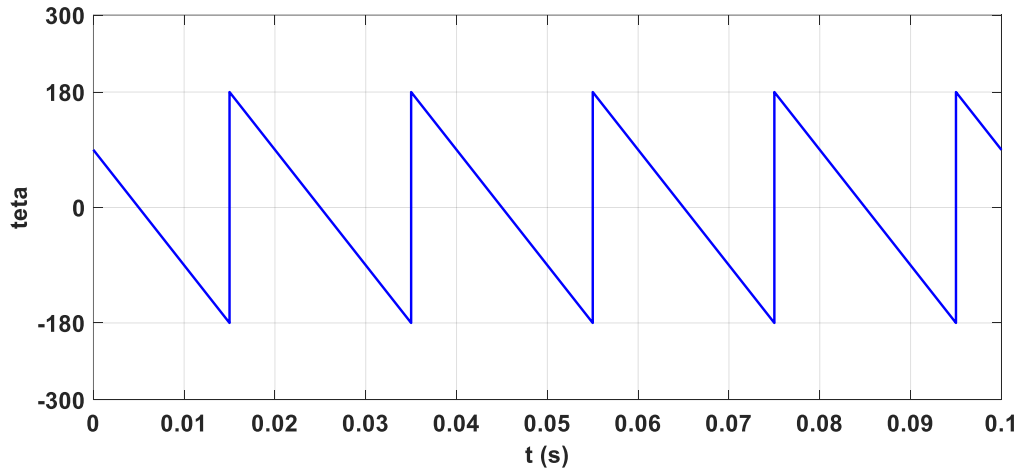
Şekil 4.16’da ise üç fazlı büyüklüklerin α - β olmak üzere iki boyutlu düzleme indirgenmiş hali ve hesaplanan V_{ref} değeri görünmektedir.

Şekil 4.17’de V_α ve V_β değerleri ile hesaplanıp sektörlerin belirlenmesi için kullanılacak olan teta değeri verilmiştir.

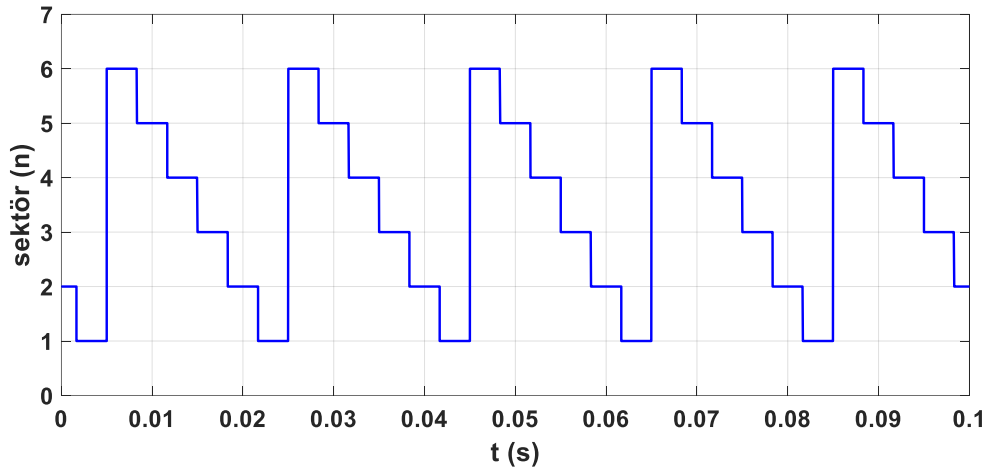
Şekil 4.18’de ise elde edilen sektör değişimi görünmektedir.



Şekil 4.16. Elde edilen V_α , V_β ve V_{ref} değerleri



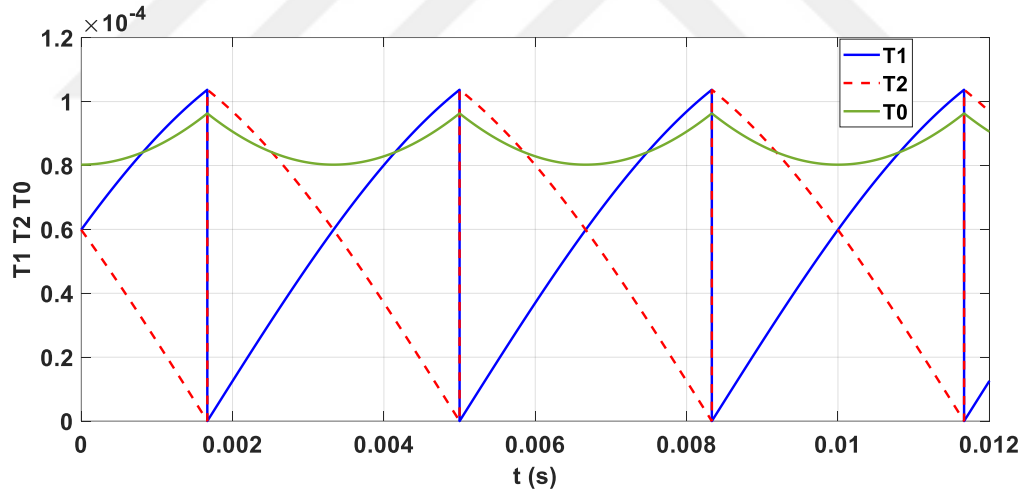
Şekil 4.17. Hesaplanan θ açısı değeri



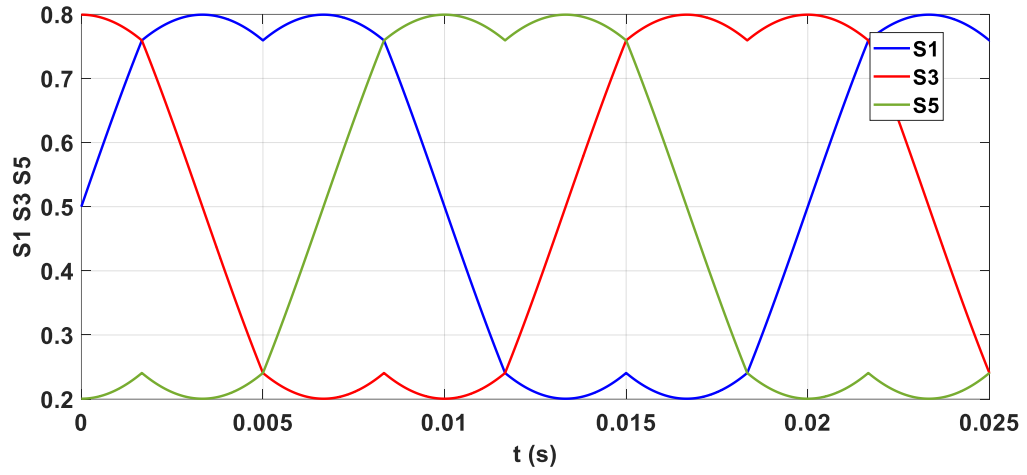
Şekil 4.18. Elde edilen sektör değişimi

Şekil 4.19’da hesaplanan T_1 , T_2 ve T_3 değerlerinin değişimi görünmektedir.

Şekil 4.20’de elde edilen S_1 , S_3 ve S_5 anahtarlama kontrol sinyalleri görünmektedir.



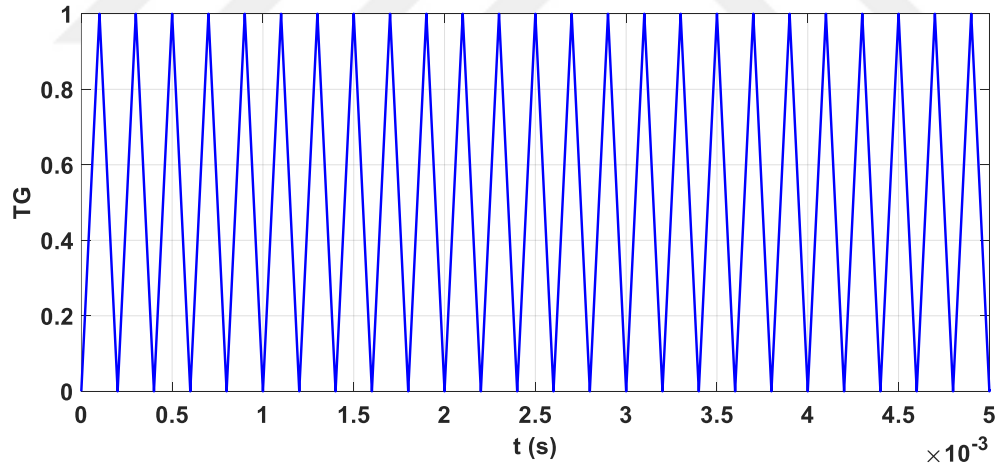
Şekil 4.19. Hesaplanan T_1 , T_2 ve T_0 değerlerin değişimi



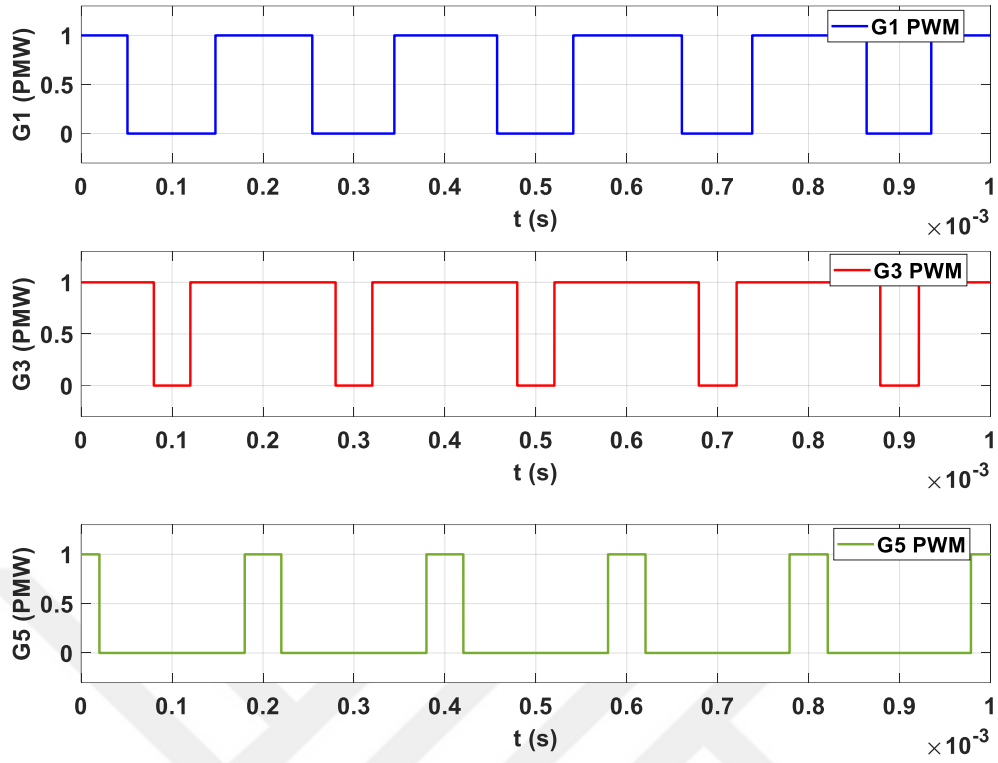
Şekil 4.20. Hesaplanan T_a , T_b , T_c anahtarlama kontrol sinyalleri

Şekil 4.21’de elde edilen üçgen dalga şekli değerinin değişimi görünmektedir.

Şekil 4.22’de üst güç anahtarları için elde edilen G_1 , G_3 ve G_5 DGM kapı sinyalleri gösterilmiştir.



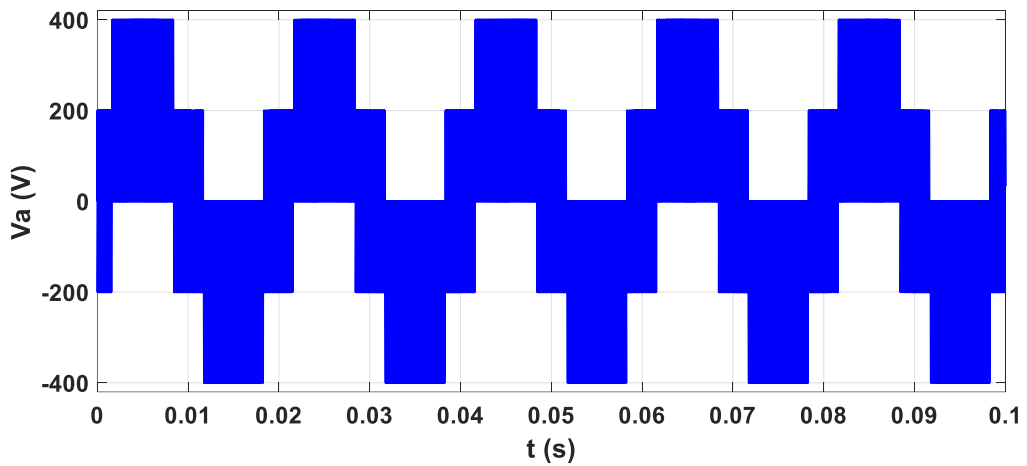
Şekil 4.21. Hesaplanan üçgen dalga şekli değeri



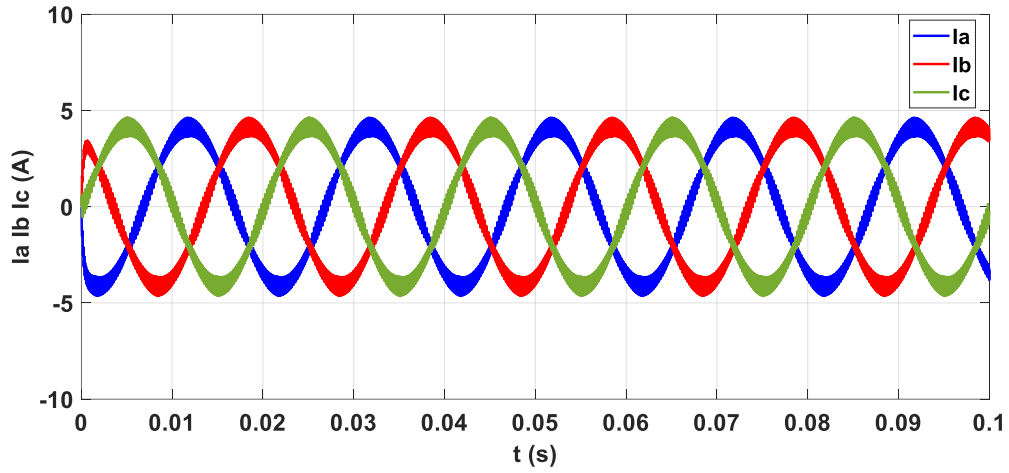
Şekil 4.22. Üst güç anahtarları için elde edilen G_1 , G_3 , G_5 DGM kapı sinyalleri

Şekil 4.23'te üç fazlı inverterden elde edilen V_a , V_b , V_c gerilim şekli görünmektedir.

Şekil 4.24'te üç fazlı inverterden elde edilen I_a , I_b , I_c akımları görünmektedir.



Şekil 4.23. Üç fazlı inverterden elde edilen V_a , V_b , V_c gerilim şekli



Şekil 4.24. Üç fazlı inverterden elde edilen I_a , I_b , I_c akımları

4.5. Çift Beslemeli Asenkron Generatörün Kontrolünde Kullanılan Donanım ve Yazılım

4.5.1. Akıllı Güç Modülü Tabanlı Sürücü Devre Tasarımı



Şekil 4.25. 7MBP100VEA120-50 akıllı güç modülü

Akıllı Güç Modülleri (IPM- Intelligent Power Module) temelinde motor sürücülerinin verimini artırmak amacıyla tasarlanmışlardır. Akıllı Güç Modülleri, daha yüksek miktarda tümleştirme ve kullanıcı açısından geçit sürme ile koruma fonksiyonlarını

bir araya getirmesinden dolayı yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Son zamanlarda IPM teknolojisi, fonksiyonellik ve koruma fonksiyonları bakımından büyük değişikliklere uğramıştır. IPM'ler günümüzde fotokuplör ara yüzüne, dV/dt etkisinin azaltılmasına ve sinyal osilasyonlarının kontrol edilmesinde yardımcı olmaktadır. IPM topolojisinin yonga üstü sıcaklık algılama özelliği ile her bir IGBT yongası ayrı ayrı korunabilmektedir.

IPM'nin iç kontrol devresi, izole edilmiş 15 V DA besleme gerilimi ile çalışmaktadır. Herhangi bir nedenle besleme gerilimleri eşik seviyesinin (UV_t) altına düşer ise güç yapıları susturularak hata sinyali oluşturulur. Belirlenmiş $tdUV(<10\mu s)$ süresinden daha az küçük çökmeler, kontrol devresinin çalışmasını etkilemez ve düşük besleme gerilimi koruması tarafından dikkate alınmaz. Normal çalışmanın devam edebilmesi için besleme geriliminin düşük besleme gerilimi resetleme seviyesini geçmesi gerekmektedir (UV_r).

IPM, IGBT yongasının bir parçası olan ısı algılayıcısına sahiptir. Eğer, IGBT yongasının sıcaklığı aşırı sıcaklık eşik seviyesini geçerse IPM'nin iç kontrol devresi güç yapılarının geçit sürücülerini durdurur. Aşırı sıcaklık durumu ortadan kalkana kadar girişine gelecek hiçbir kontrol sinyalini dikkate almaz.

IGBT (İzole edilmiş kapılı, iki kutuplu transistör) temel olarak üç bacaklı yarı iletken bir elemandır. Dört katmandan (P1, P2, N1, N2) oluşur ve metal oksit yarı iletken ile kontrol edilir. Yalıtılmış transistör de denilmektedir. Daha çok güç devreleri içinde kullanılırlar. Asıl görevleri elektronik anahtarlama olan IGBT'ler, anahtarlama işlemini hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleştirirler. IGBT, gerilim kontrollü bir eleman olup kapısından (Gate) geçirilen potansiyel fark ile ilettime geçerler. Tam kontrollü olduklarından dolayı bu gerilim ortadan kaldırıldığında otomatik olarak kesime gider ve bu durum güç modülünün hızlı bir eleman olmasını sağlar.

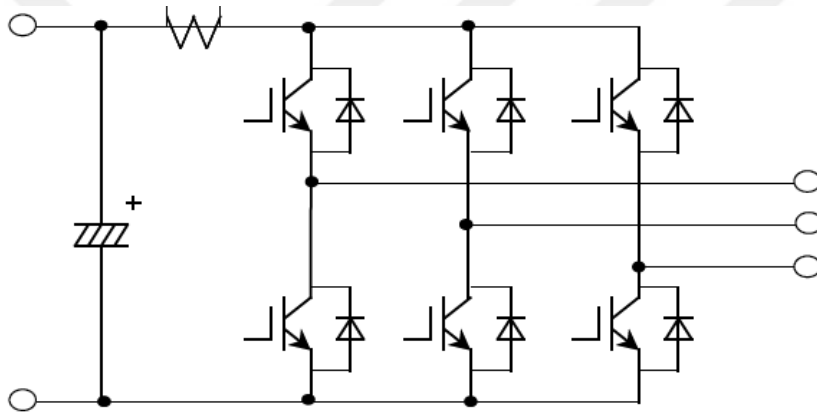
IGBT, çok hızlı açılıp kapanma gerçekleştirdiği için yükseltici devrelerde sıkça kullanılmaktadır. Özellikle karmaşık dalga şekillerine sahip darbe genişlik modülasyon tekniği ve düşük geçirgen filtreler yardımıyla sentezleme yeteneğine sahiptirler. IGBT, yapısında bulundurduğu ek P-N bloğu ile oluşabilecek ters akımları engelleyebilmektedir. IGBT üzerine ters gerilim uygulanmak istendiğinde devre üzerinde IGBT'nin önüne diyot serisi kullanması gerekmektedir.

Rotor tarafı dönüştürücü yapısının oluşturulmasında güç anahtarı olarak IGBT kullanılmıştır. IGBT seçiminde deneysel çalışmalarda kullanılan ÇBAG'nin rotor sargı

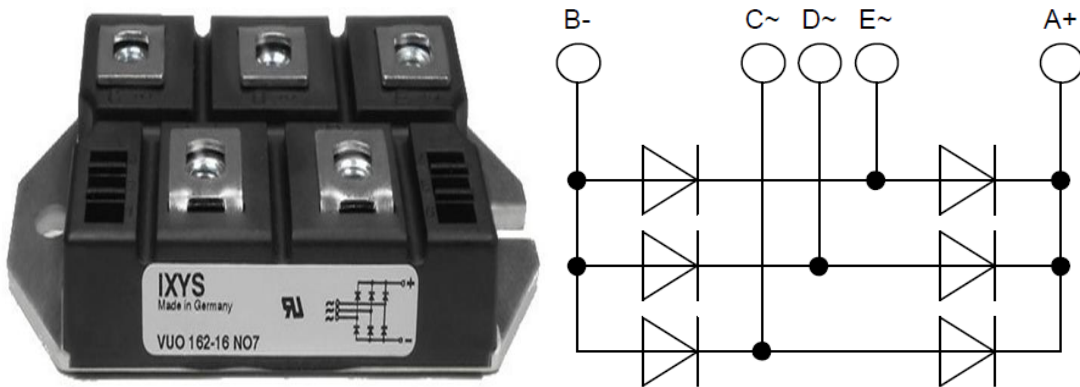
akımı dikkate alınarak, FUJI firması tarafından üretilen 7MBP100VEA120-50 akıllı güç modülü kullanılmıştır. Kullanılan modüldeki anahtarların her biri 100 A akım taşıma ve 1200 V gerilim tutma kapasitesine sahiptir.

7MBP100VEA120-50 akıllı güç modülünün P ve N girişlerini doğru gerilim ile beslemek amacıyla girişine uygulanan üç fazlı alternatif gerilimleri çıkışında doğru gerilime dönüştüren IXYS firmasına ait VUO162-16NO7 üç fazlı köprü doğrultucusu kullanılmıştır.

Akıllı güç modülü ve üç fazlı köprü doğrultucu bağlantı şeması blok diyagramı sırasıyla Şekil 4.26 ve 4.27’de verilmiştir.

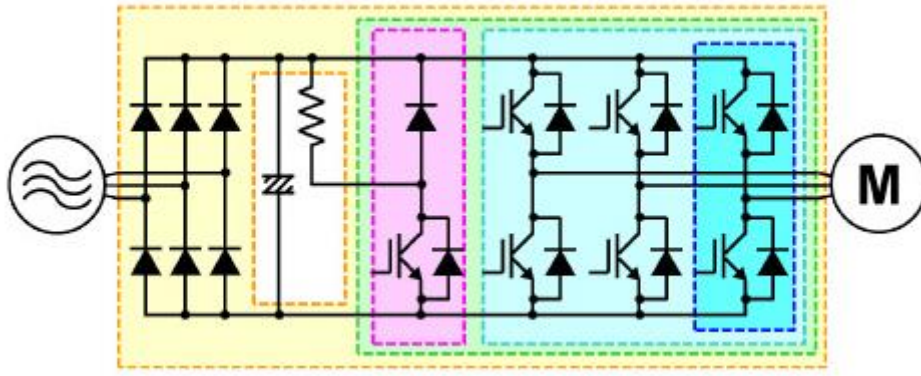


Şekil 4.26. Akıllı güç modülü blok yapısı



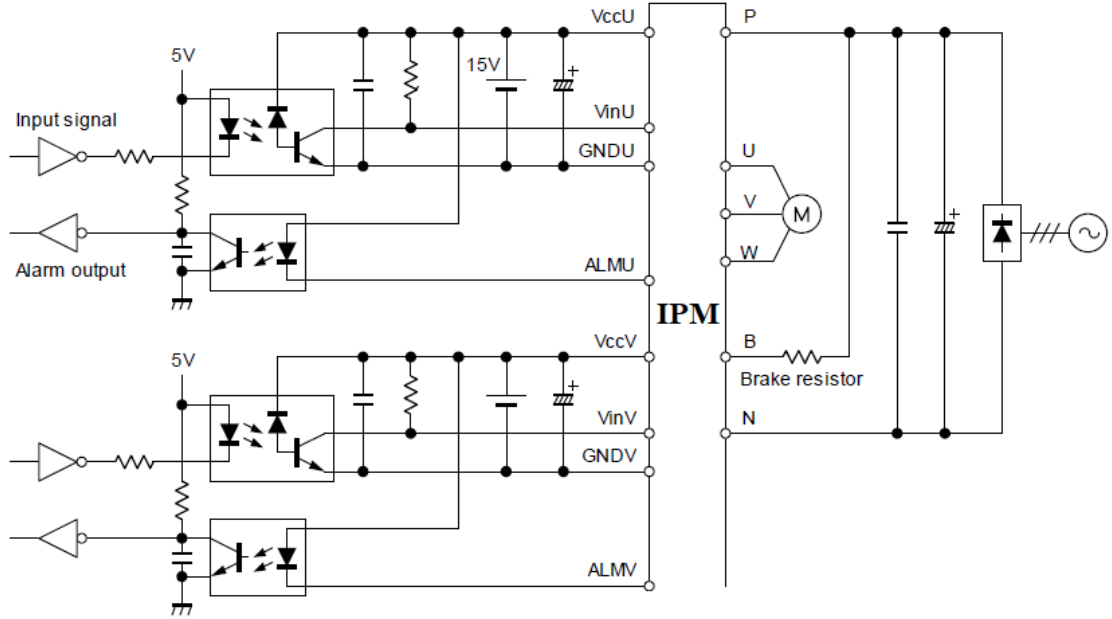
Şekil 4.27. Üç fazlı köprü doğrultucu ve blok yapısı

Şekil 4.28’de üç fazlı köprü doğrultucu, frenleme ve akıllı güç modülünün genel bağlantı şekli blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.28. Üç fazlı köprü doğrultucu, frenleme ve akıllı güç modülünün genel bağlantı şekli blok diyagramı

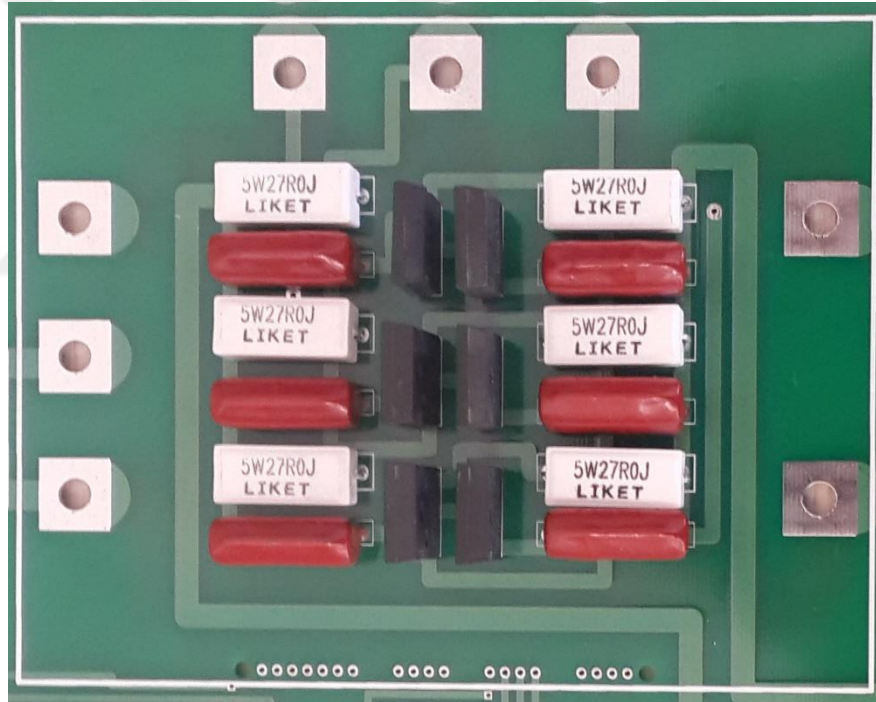
Şekil 4.29’da sürücü devre kartının kısmi çalışma şekli bağlantısına ait blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.29. Sürücü devre kartının kısmi çalışma şekli bağlantısına ait blok diyagramı

4.5.2. RCD Snubber Devresi

Anahtarlama elemanları kesime girme esnasında anahtar uçlarında hızlı bir gerilim yükselmesine ve iletme girme esnasında hızlı bir akım yükselmesine maruz kalırlar. İletim esnasında snubber devresi olmadığı durumda, akımın yükselmesi anahtarın müsaade edilen di/dt 'sinden çok daha büyük olabilir. Bu durumun meydana gelmemesi için snubber devresi kullanılarak akımın yükselme hızı sınırlandırılabilir. Benzer olarak anahtar, kesim esnasında aşırı gerilimlere veya dv/dt 'ye maruz kalabilir. Bu durumun yaşanmaması için direnç, kondansatör ve diyottan oluşan RCD snubber devresi kullanılmıştır. Kullanılan RCD snubber devresinin sürücü devre kartı üzerindeki görünümü Şekil 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.30. RCD snubber devresinin sürücü devre kartı üzerinde görünümü

Rotor tarafı güç elektroniği dönüştürücü girişine 4700 μ F/450 V kondansatör yerleştirilmiştir. Bu kondansatör gerilimde yaşanacak salınımları önlemekle beraber ÇBAG'nin senkron altı ve senkron üstü hızlara geçişlerde kısa süreli enerjinin depolanması amacıyla da kullanılmaktadır.

4.5.3. Akım ve Gerilim Ölçme Devresi

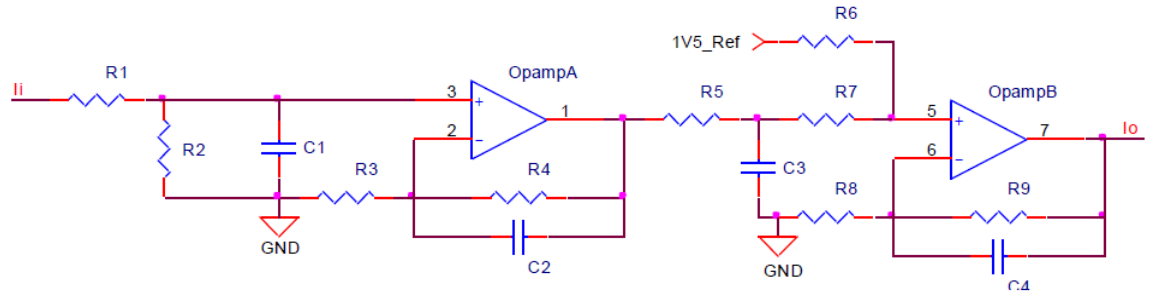
ÇBAG tarafında üretilen stator gerilimi, akımı, ile ÇBAG rotor akımlarını DSP'nin analog girişlerine uygun hale getirmek amacıyla sürücü kartı üzerinde bir ölçme devresi tasarlanmıştır. Tasarlanan ölçme devresinde akım algılayıcısı olarak LEM firması tarafından üretilen LA55-P akım sensörleri kullanılmıştır. Kullanılan akım sensörleri 50 A'e kadar akımların ölçümünü yapabilmektedir. Gerilim algılayıcısı olarak ise LEM firması tarafından üretilen LV25-P gerilim sensörleri kullanılmıştır. Bu sensörler 10 mA 10-500 V gerilimlerde çalışabilmektedirler. Şekil 4.31'de LA55-P akım sensörü, Şekil 4.32'de LV25-P gerilim sensörü gösterilmiştir. Şekil 4.33 ve 4.34'te bir faz için tasarlanan gerilim ve akım devre yapısı verilmiştir. Gerilim ve akım ölçme devrelerinin sürücü devre kartı üzerindeki görünümü Şekil 4.35'te verilmiştir.



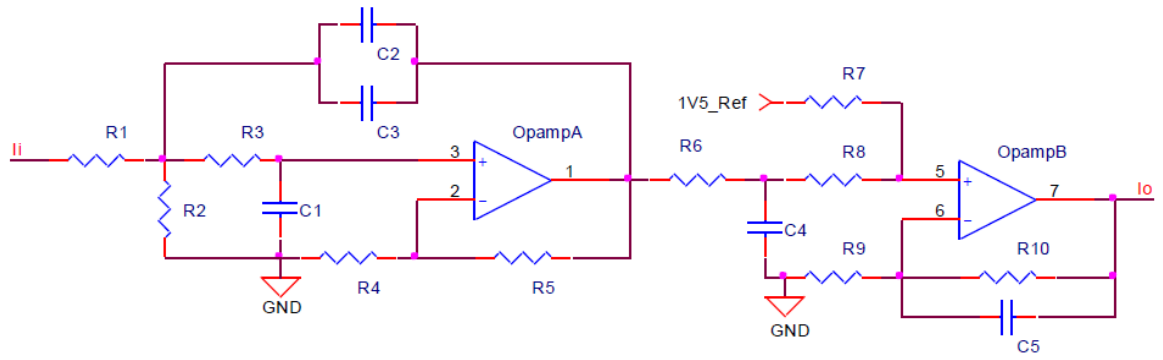
Şekil 4.31. LA55-P akım sensörü



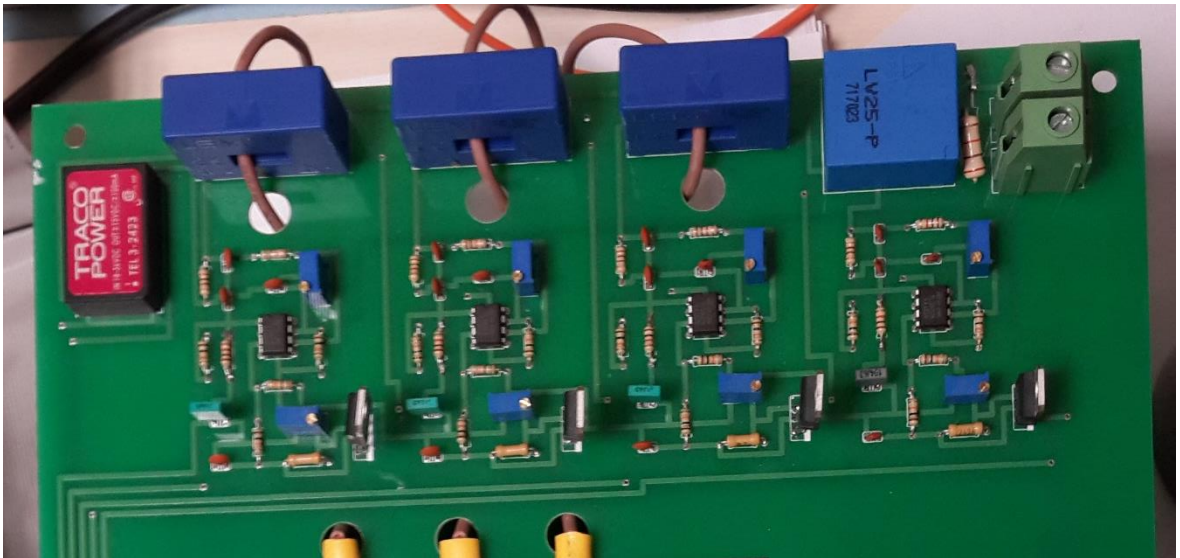
Şekil 4.32. LV25-P gerilim sensörü



Şekil 4.33. Bir faz akım ölçme devresi



Şekil 4.34. Bir faz gerilim ölçme devresi



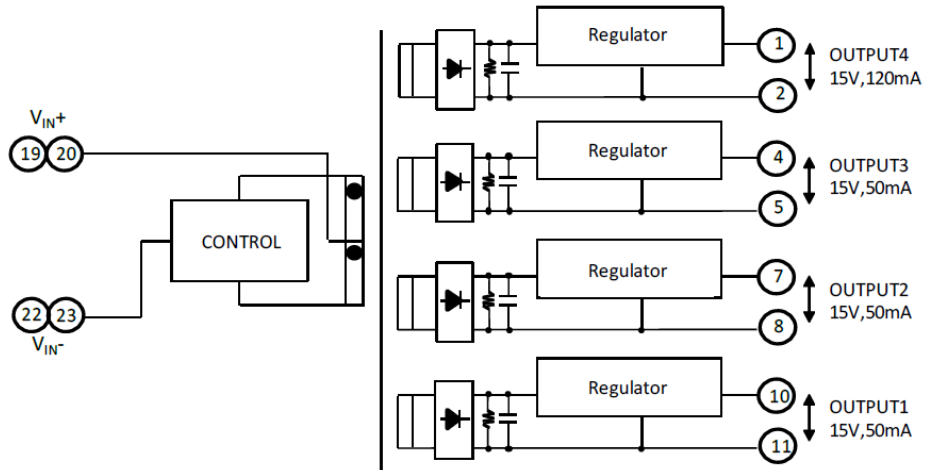
Şekil 4.35. Gerilim ve akım ölçme devrelerinin sürücü kartı üzerindeki görünümü

4.5.4. Alarm Devresi

Sürücü devre kartı üzerinde akıllı güç modülünü koruma amaçlı alarm devresi tasarlanmıştır. Bir alarm sinyali üretildiğinde, akıllı güç modülüne gönderilen giriş sinyali hemen sistemi durdurur ve kapatır. Akıllı güç modülü koruma fonksiyonları güç modülünü anormal durumlara karşı korur. Üst kolda anormal bir durum tespit edildiğinde, tespit edilen faz kapatılır ve aynı fazdan bir alarm çıkışı üretilir. Bu aşamada diğer fazların değiştirilmesine izin verilir. Öte yandan, alt kolda anormal bir durum tespit edildiğinde, alt kolun (+ fren ünitesi) tüm anahtarlarını fazdan bağımsız olarak kapatılır ve alt kolda bir alarm oluşur. Bu esnada üst kolun tüm anahtarlarının değiştirilmesine izin verilir.

4.5.5. Sürücü Devre Kartı Besleme Gerilimleri

Sürücü devre kartının besleme gerilimi olarak VLA128-24153QR dört çıkışlı izoleli DA-DA gerilim dönüştürücü kullanılmıştır. Girişine uygulanan +24 V DA gerilimi çıkışında +15 V DC gerilime dönüştürmektedir. DA-DA dönüştürücüden elde edilen gerilimlerin 1 numaralı çıkışı akıllı güç modülünün VccU, 2 numaralı çıkışı VccV, 3 numaralı çıkışı VccW ve 4 numaralı çıkışı Vcc fazı girişlerine uygulanmıştır. Gerilim ve akım sensörlerinin beslenme gerilimi için 24-15 DA-DA gerilim dönüştürücü kullanılmıştır. Optocoupler ve buffer bölümünü beslemek için 24-5 DA-DA gerilim dönüştürücü kullanılmıştır. Şekil 4.36'da VLA128-24153QR'in besleme blok diyagramı gösterilmiştir.



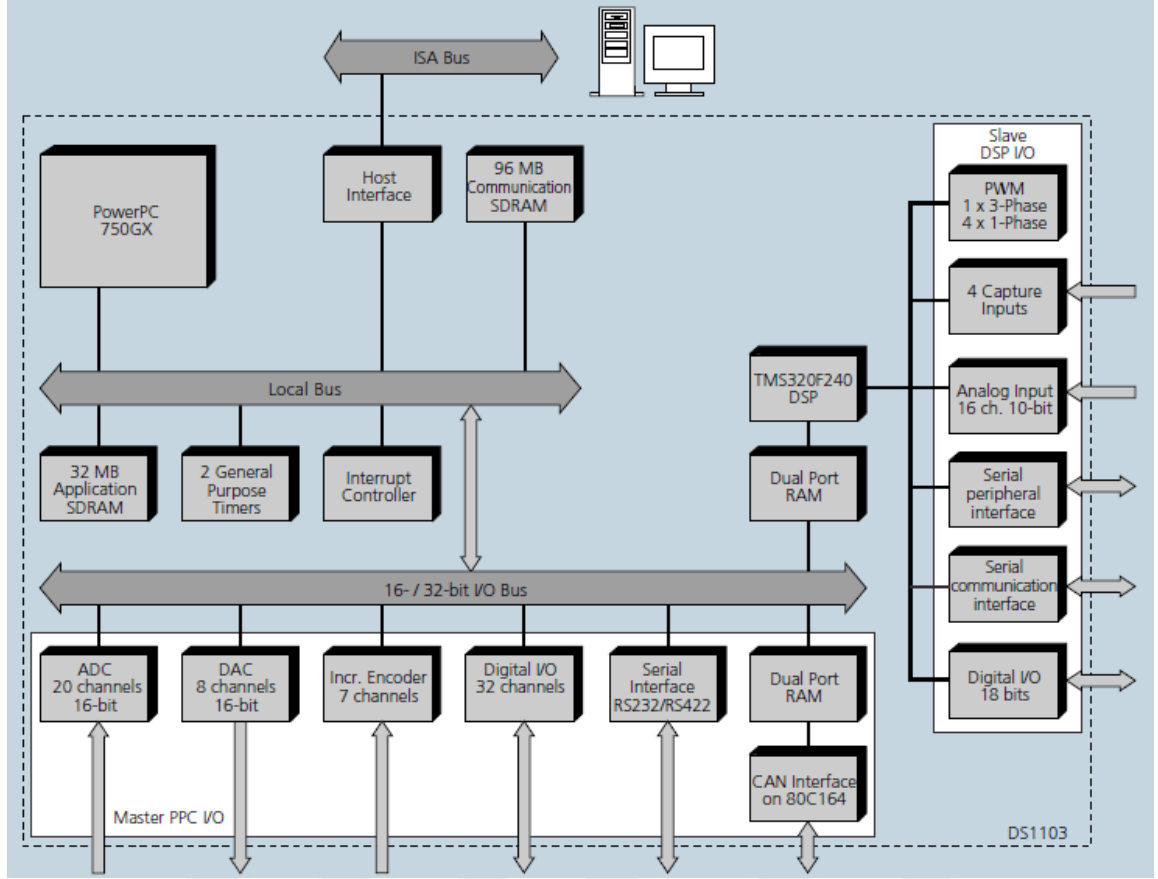
Şekil 4.36. VLA128'in besleme blok diyagramı

4.5.6. dSPACE DS1103 Denetleyici Kartı

Son yıllarda güç elektroniği yapılarının kontrolünde daha karmaşık kontrol algoritmalarının kullanılmasıyla bunlara uyumlu şekilde çalışabilecek hızlı mikroişlemciler üretilmiştir. Çalışma frekansının yüksek ve analog bilgiyi sayısal bilgiye çevirme zamanının kısa olması sebebiyle gerçekleştirilen bu tez çalışmasında TMS320F240 sayısal sinyal işlemcisi DS1103 dSPACE kartı kullanılmıştır. Kart üzerinde PowerPC 750GX (1GHz) ve Texas Instruments (20MHz) olarak iki işlemci bulunmaktadır. DS1103 denetleyici kart ISA kartı bulunan ve bazı şartları sağlayan her türlü bilgisayara takılabilir. DSP modülde 32 bit 16 kanal 6.67 ns çözünürlüklü ölü zaman ayarlı programlanabilir PWM çıkışı, 16 kanal 12-bit 80 ns dönüşüm zamanlı Analog/Dijital çevirici, 4 adet sayısal yakalama girişi ve 4 adet kare dalga kodlayıcı girişi, konum ve hız algılayıcı girişlerine sahip olup C/C++ programlama desteğine sahiptir. İşlemci sabit noktalı aritmetik işlem yapmasına rağmen IQ math kütüphane desteği ile kayan noktalı aritmetik işlem kolaylığında ve ona yakın doğrulukta işlem yapabilmektedir. Şekil 4.37’de dSPACE DS1103 denetleyici kartı ve Şekil 4.38’de DS1103 iç mimarisi gösterilmiştir.



Şekil 4.37. dSPACE DS1103 denetleyici kart



Şekil 4.38. DS1103 iç mimarisi

dSPACE DS1103 kartının bilgisayarda kurulumu yapıldıktan sonra Matlab/Simulink'te benzetimi yapılan algoritma “Simulink Real Time Workshop” yazılımı ile gerçek koda dönüştürülür. Daha sonra dönüştürülen kodlar “Real Time Interface” yazılımı kullanılarak DS1103 denetleyici kartına yüklenir. “Control Desk Developer” yazılımı ile denetleyici kart tarafından hesaplanan ve ölçülen sistem parametreleri grafiksel bir platform üzerinden gözlenebilir ve bu veriler sonradan işlenmek üzere kaydedilebilir.

Şekil 4.39’da deneysel çalışmada kullanılan dSPACE DS1103 gösterilmiştir.



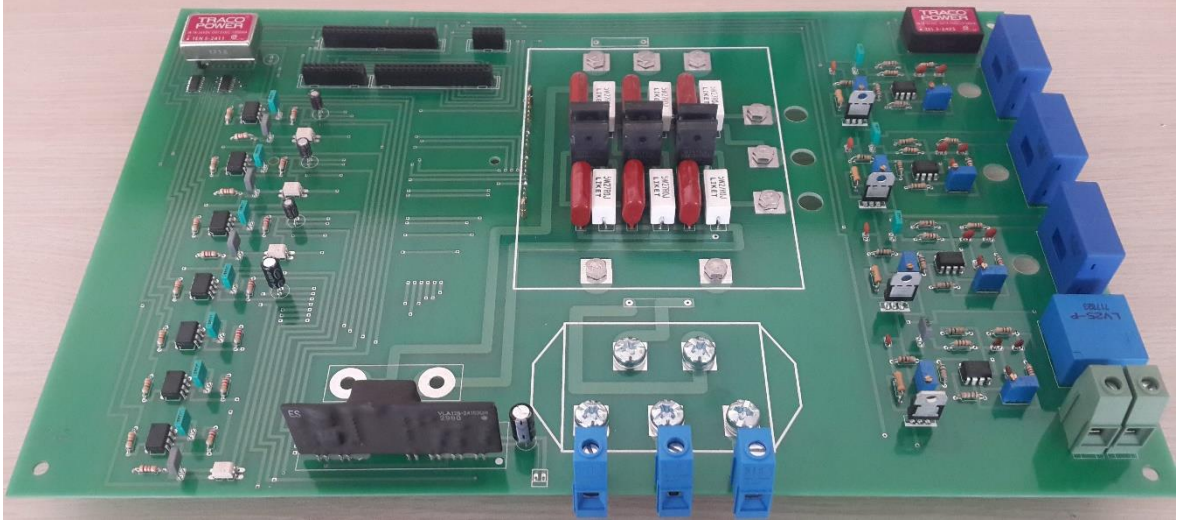
Şekil 4.39. Deneyisel çalışmada kullanılan dSPACE DS1103

4.5.7. Deney Yazılımı

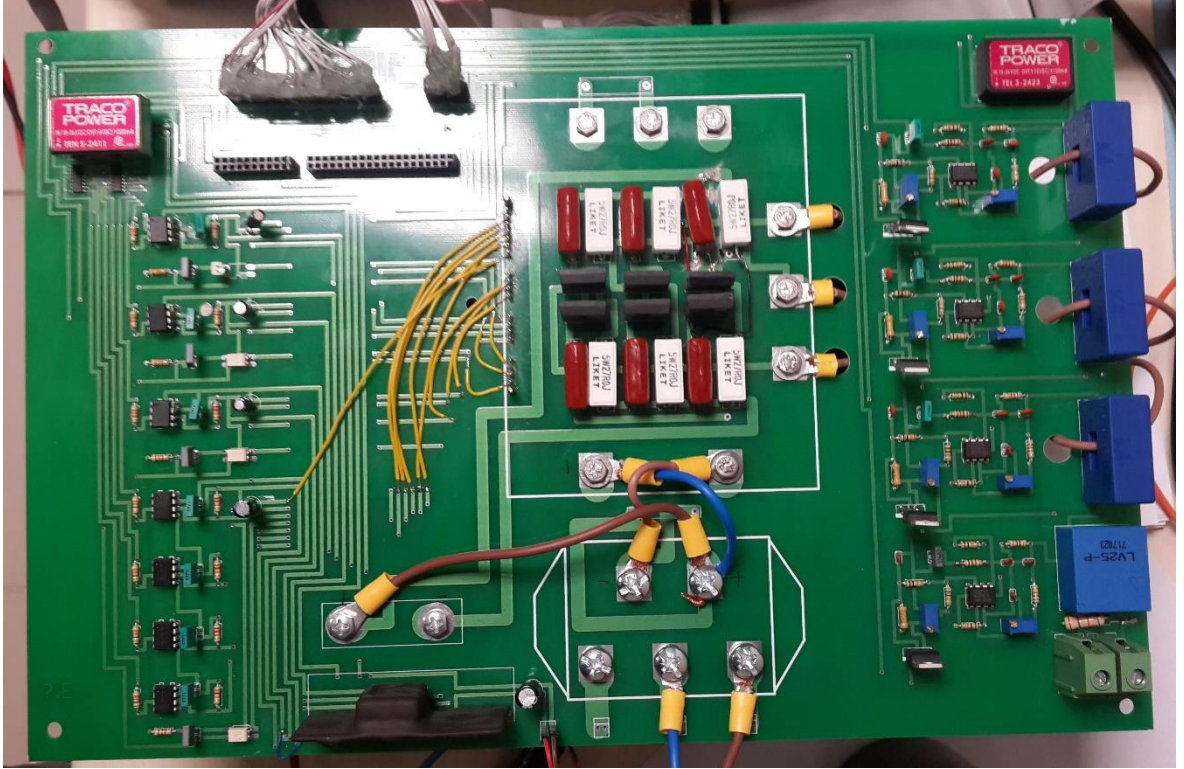
DS1103 Ace kiti tarafından kullanılan kod dosyası Matlab/Simulink programında kontrol algoritması hazırlanıp derlendikten sonra çalıştırılmıştır. Matlab/Simulink programında oluşturulan kontrol algoritması dosyası daha hızlı çalışabilmesi için derleyici tarafından optimize edilmiştir. Bu çalışmada ÇBAG'nin kontrolü için hazırlanan yazılım MATLAB/Simulink kullanılarak hazırlanmış ve DSP ile bilgisayar arasındaki fiber optik bağlantı yoluyla doğrudan DSP ye aktarılmıştır.

Kullanılan DS1103 Ace kiti Matlab programı ile doğrudan bağlantı kurabilen bir karttır. DS1103 Ace kiti yazılımının bilgisayara yüklenmesi sırasında Matlab programının orijinalinde içerisinde bulunmayan DSP'ye ait parametreler Matlab programının içerisine yüklenmektedir. Böylece simulink programı kullanılarak doğrudan DSP içerisindeki modüller yazılım içerisine aktarılabilir.

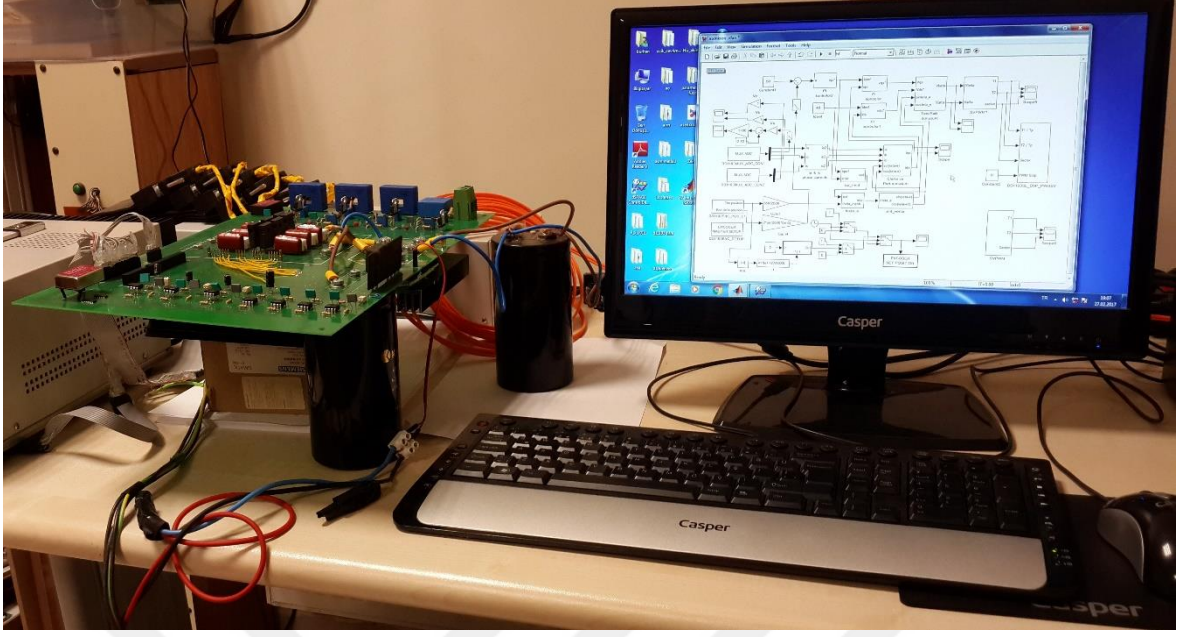
Aşağıda verilen şekillerde tasarlanan akıllı güç modülü tabanlı sürücü devre kartı ve deney seti gösterilmektedir.



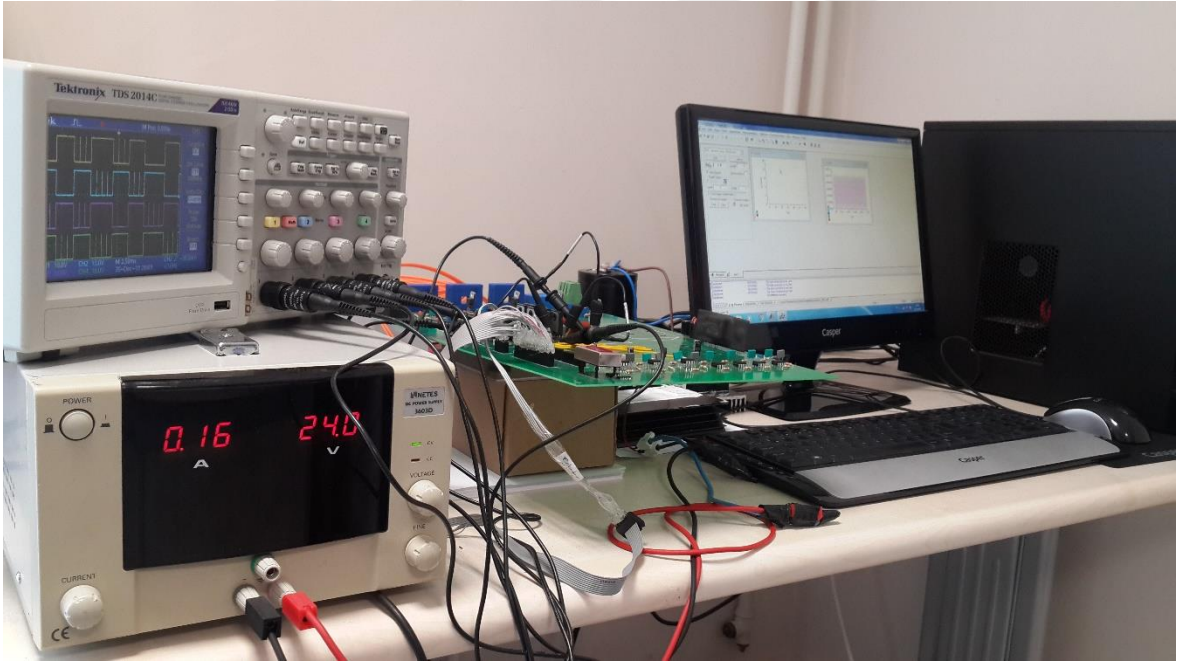
Şekil 4.40. Geliştirilen sürücü devresi kartından bir görünüm



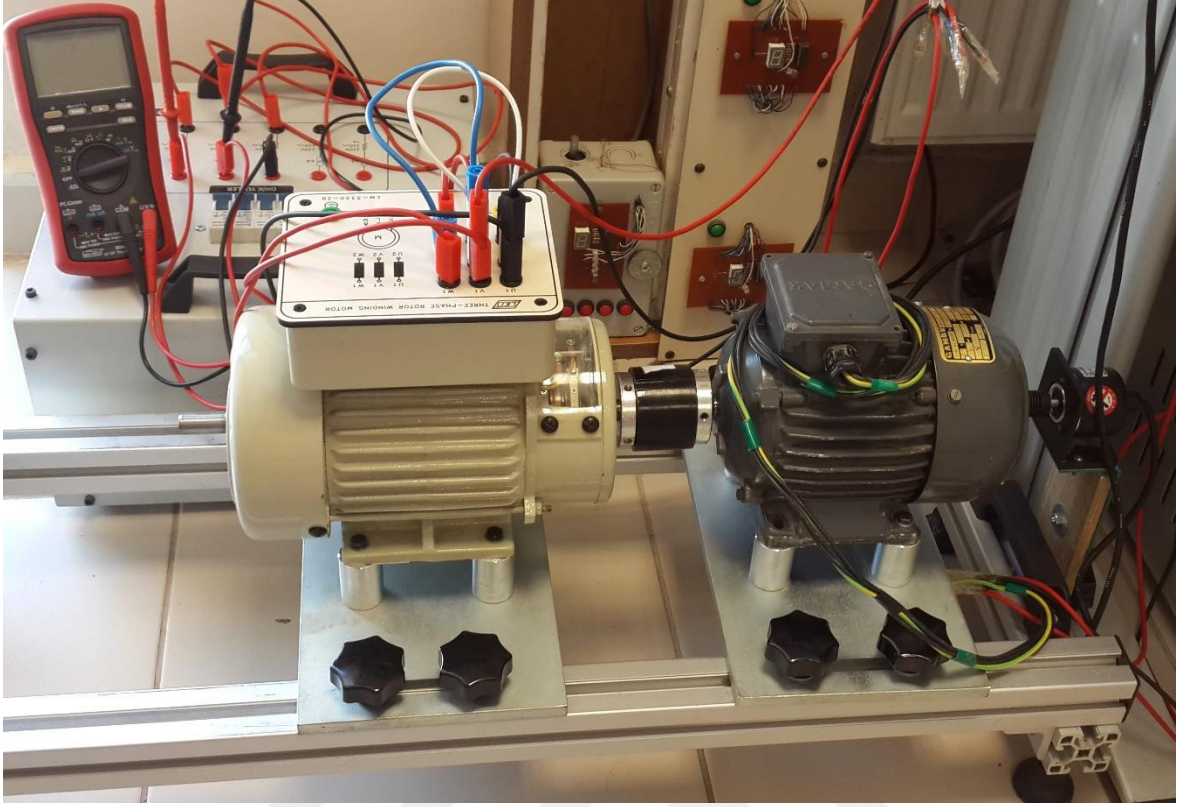
Şekil 4.41. Geliştirilen sürücü devresi kartının bitmiş ve sistem bağlantılarının yapılmış görüntüsü



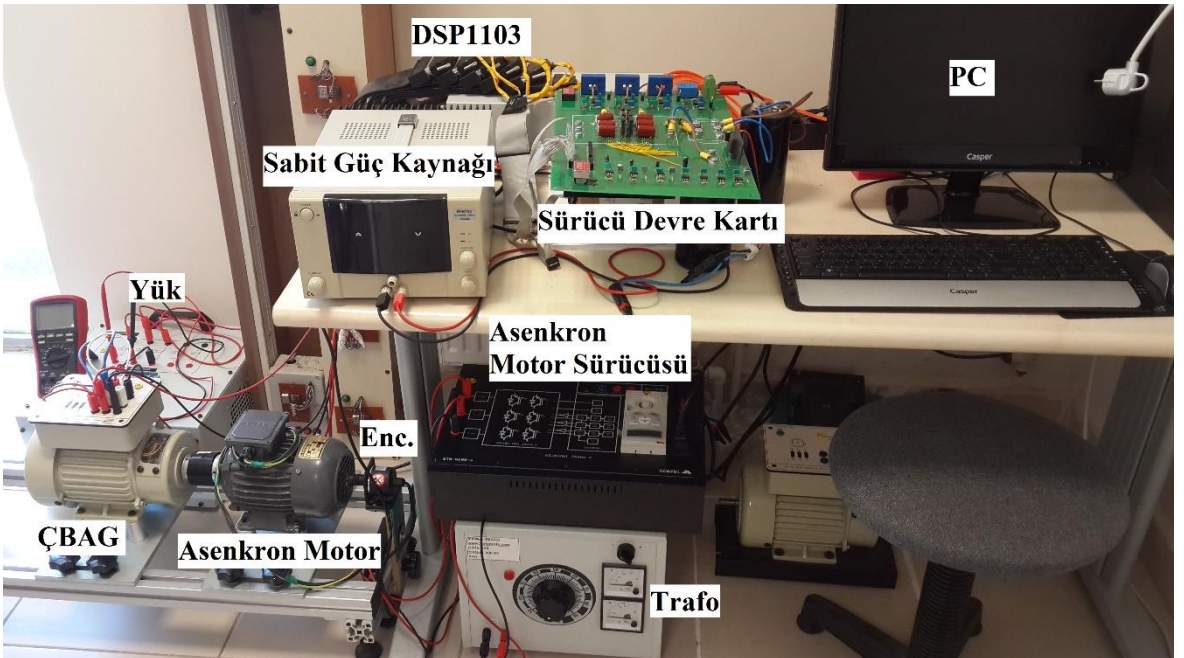
Şekil 4.42. Geliştirilen kontrol yazılımı ve sürücü devre kartının çalıştırılmasından bir görünüm



Şekil 4.43. Geliştirilen kontrol yazılımı ve sürücü devre kartının çalıştırılmasıyla yapılan ölçüm görüntüsü



Şekil 4.44. ÇBAG ve asenkron motoru tahrik sisteminin yakından görünüşü



Şekil 4.45. ÇBAG kontrol ünitesinin genel görünümü

5. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN KONTROLÜNE İLİŞKİN SONUÇLAR

ÇBAG'nin kontrolü üzerine (Bölüm 3-4)'te oluşturulan sistemin matematiksel modeli ve kontrol yapısı bilgisi kullanılarak, örnek bir türbin kontrol sistemi simülasyon ortamında tasarlanmıştır. Simülasyon çalışmasının amacı oluşturulan kontrol sistemi ile değişken rüzgâr hızı ve yük altında generatörün bu değişimlerden etkilenmeyip sabit gerilim ve frekansta şebekeye verilecek stator geriliminin elde edilebileceğini kanıtlamaktır. Kontrol yapısının oluşturulmasında Matlab/Simulink paket programından yararlanılmıştır. Öncelikle tasarlanan simülasyon çalışmasında kullanılacak generatörün parametreleri ve generatör çalışma bilgileri verilmiştir. Verilen parametreler daha önceden çıkarılan sistem matematiksel modeli ve kontrol algoritması bilgileri kullanılarak uygun kontrolör katsayıları belirlenmiştir. Elde edilen kontrolör katsayıları ile oluşturulan sistem, belirlenen kontrol algoritmasına uygun şekilde simülasyon programında çalıştırılmış ve simülasyon çıktıları incelenmiştir. Deney çalışmasında ise oluşturulan kontrol sistemi ve deney seti ile rotor tarafı kontrolü yaparak farklı hızlarda tahrik edilen generatörden şebekeye verilebilecek sabit gerilim değeri ve sabit frekansta stator gerilimi elde edilebileceğini göstermek.

5.1. Simülasyon Çalışması

Tablo 5.1'de verilen ÇBAG parametreleri ve (5.1-5.5)'te verilen denklemlerle Matlab/Simulink ortamında şekil 5.1'de verilen kontrol sistemi oluşturulmuştur. Değişken hızlı ÇBAG'ye yönelik kontrol sistemi moment, güç veya hız kontrolü olmak üzere farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Simülasyon çalışmasında ÇBAG'nin hız kontrolüne yönelik bir kontrol sistemi oluşturulmuştur.

Tablo 5.1. ÇBAG'ün parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Stator Frekansı (f_s)	50	Hz
Nominal Stator Gücü (P_s)	2	MW
Nominal Stator Gerilimi (V_s)	690	V
Nominal Stator Akımı (I_s)	1760	A
Kutup Sayısı (P)	2	
Maksimum Kayma (S_{max})	1/3	
Nominal Moment (T_{em})	12732	Nm
Senkron Hız (n)	1500-157.14	d/dk-rad/s
Stator Direnci (R_s)	2.6	mΩ
Rotor Direnci (R_r)	2.9	mΩ
Mıknatıslanma Endüktans (L_m)	2.5	mH
Stator Kaçak Endüktansı ($L_{s\sigma}$)	0.087	mH
Rotor Kaçak Endüktansı ($L_{r\sigma}$)	0.087	mH
Çevirme Oranı (N_s/N_r)	4	
Eylemsizlik Momenti (J)	127	Kgm ²
Sürtünme Katsayısı (B)	0.001	Kgm ² /s
Anahtarlama Frekansı (f_{sw})	4000	(Hz)
Anahtarlama Periyot Süresi (T_s)	$1/f_{sw}$	

ÇBAG'de belirlenen senkron hız hesabı (5.1)'de verilmiştir.

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{P} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ rpm} \quad (5.1)$$

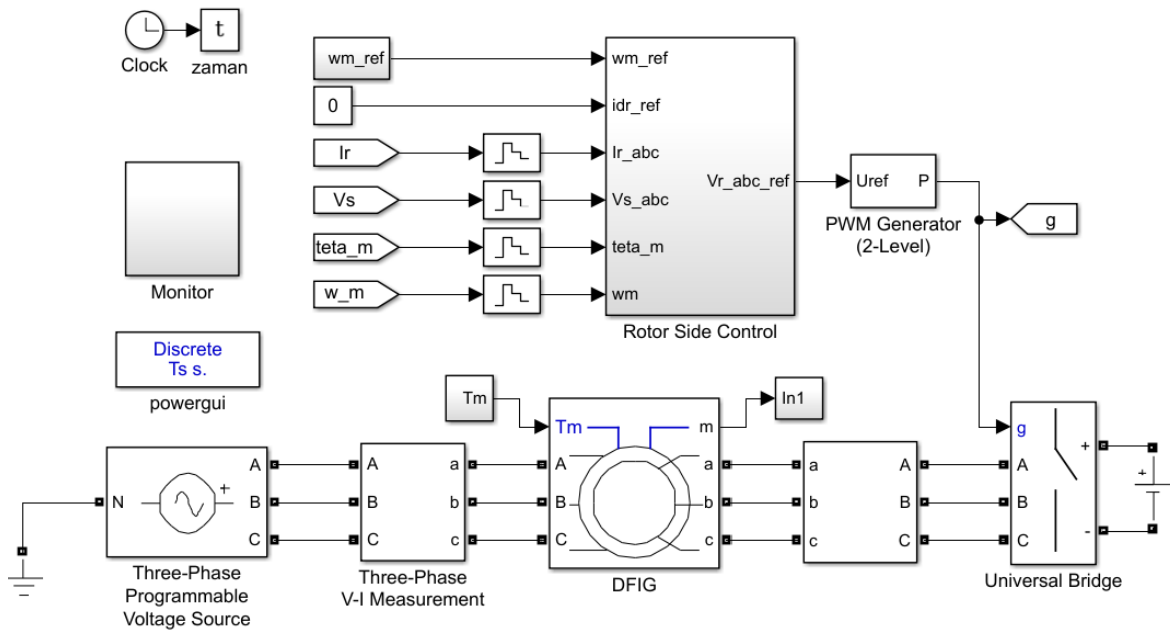
Generatör çalışma aralığı $s = (-0.33, +0.33)$ olarak belirlenmiştir. Bu kayma aralığına göre maksimum ve minimum hız değeri hesabı (5.2) ve (5.3)'de verilmiştir.

$$n_{min} = n_s \cdot (1 - s) = 1500 \cdot (1 - 0.33) = 1005 \text{ rpm} \quad (5.2)$$

Simulink ortamında oluşturulan sistem 6 saniye çalıştırılmış olup hız ve rüzgâr momenti büyüklükleri Tablo 5.2’de belirtilen sürelerde değiştirilmiştir. ÇBAG’nin oluşturulan kontrol sistemi modeline Tablo 5.2’de verilen değerler uygulanmıştır. Elde edilen değişkenlerin grafiksel değerleri verilmiştir. Tablo 5.2’de simülasyonda kullanılan adım testleri ve süreleri verilmiştir. Şekil 5.2’de Matlab/Simulink ortamında oluşturulan ÇBAG’nin kontrol yapısı blok diyagramı gösterilmiştir.

Tablo 5.2. Simülasyonda kullanılan adım testleri ve süreleri.

Değişken	Adım 1	t_1 (s)	Adım 2	t_2 (s)	Adım 3	t_3 (s)
Hız	157.14 rad/s 1500 rpm	0-2	141.426 rad/s 1350 rpm	2-4	172.84 rad/s 1650 rpm	4-6
Moment (T_e)	0 Nm	0-2	3000 Nm	2-4	6000 Nm	4-6
I_{rd}	0 A	0-6				



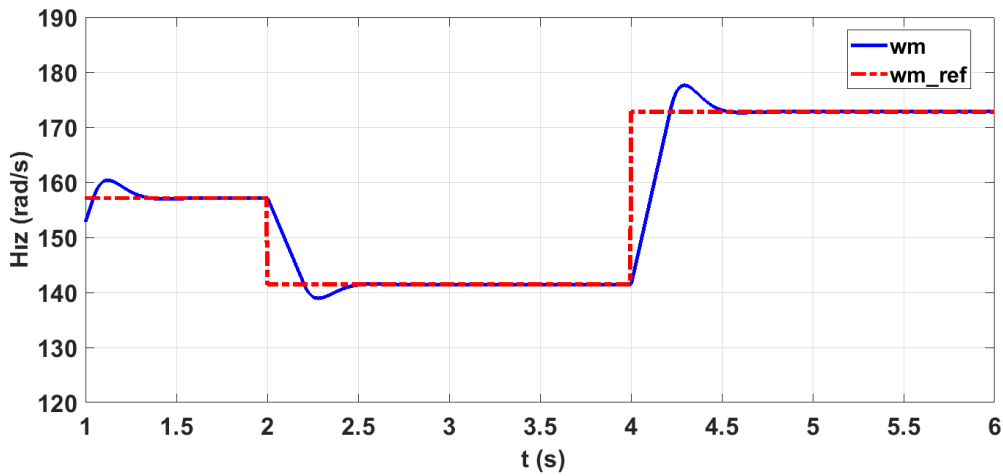
Şekil 5.2. Matlab/Simulink programında oluşturulan ÇBAG’nin kontrol yapısı blok diyagramı

Simülasyon esnasında sıfır, iki ve dördüncü saniyelerde sisteme uygulanan referans değişkenler, oluşturulan kontrol sistemi tarafından başarılı bir şekilde takip edilmiştir. Rotor akımlarından I_{rd} değeri tüm sistem çalışması esnasında sıfır olarak belirlenmiştir.

Sisteme 0-2 saniye aralığında 157.14 rad/s senkron hız değeri ve 0 Nm moment uygulanmıştır. 2-4 saniye aralığında 141.426 rad/s senkron altı hız değeri ve 3000 Nm moment uygulanmıştır. 4-6 saniye arasında ise 172.84 rad/s senkron üstü hız değeri ve 6000 Nm moment uygulanmıştır.

5.2. Simülasyon Çalışma Sonuçları

ÇBAG'nin hız ve momentindeki değişim grafiği sırasıyla Şekil 5.3 ve 5.2'de gösterilmiştir. Şekil 5.3'te sisteme uygulanan hız ve moment değerlerindeki değişime bağlı olarak verilen hız değişimi cevabı verilmiştir. Hızda meydana gelen değişimin, referans hız ve momentin ikinci ve dördüncü saniyelerde değişmesiyle yörüngeden uzaklaştığı, kısa süre içerisinde referans hız değerini yakaladığı görülmektedir.

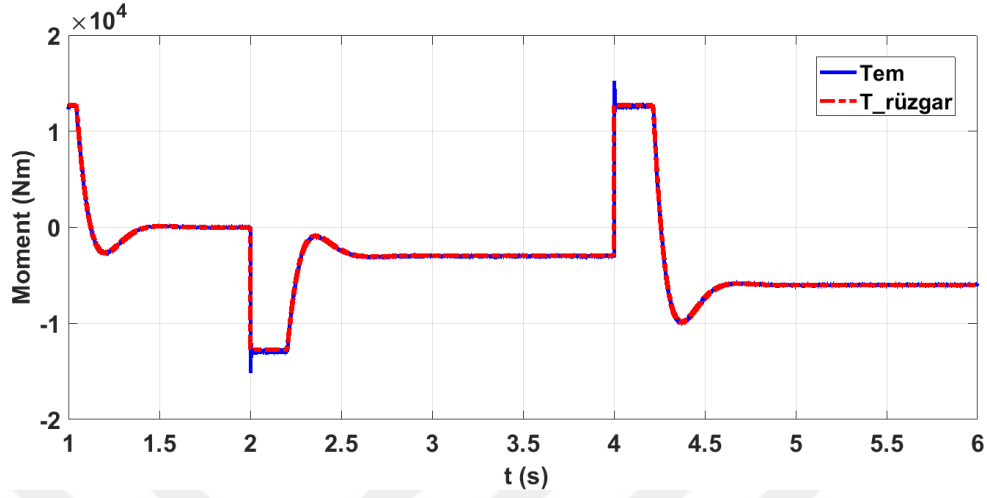


Şekil 5.3. ω_m , ω_{m_ref} hız değişimi

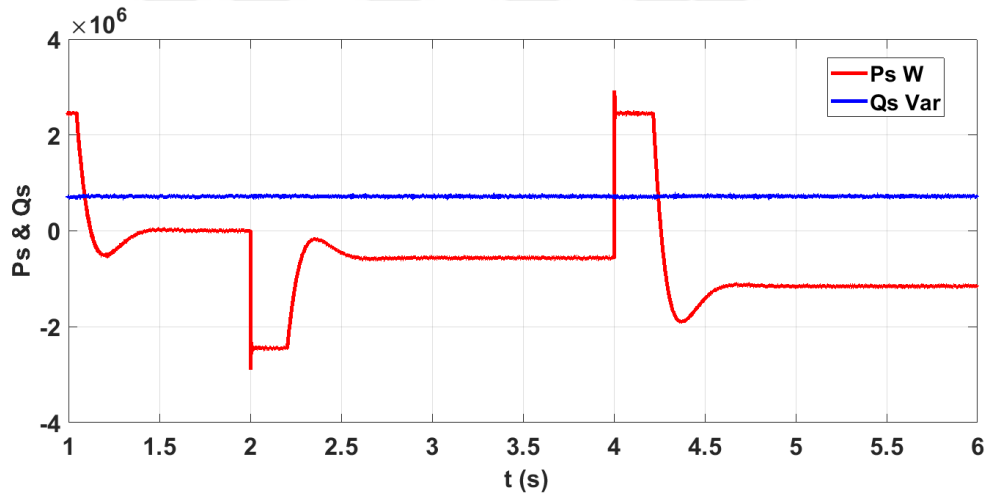
Şekil 5.4'te sisteme uygulanan moment değişim değerleri verilmiştir. Ayrıca ikinci ve dördüncü saniyelerde hızda meydana gelen ani değişimin moment üzerindeki etkisi görülmektedir.

Şekil 5.5'te P_s ve Q_s güç değeri değişim grafiği gösterilmiştir. P_s ve Q_s değeri denklem (3.25, 3.26) ile hesaplanmıştır. P_s 'nin değişimi momentte meydana gelen değişime

paralel olarak değiştiği görülmektedir. Q_s 'de meydana gelen değişimin I_{rd} değerinin sıfır amper seçilmesinden dolayı 136 kVar değerinde sabit kaldığı görülmektedir.



Şekil 5.4. T_{em} ve $T_{rüzgar}$ moment değişimi

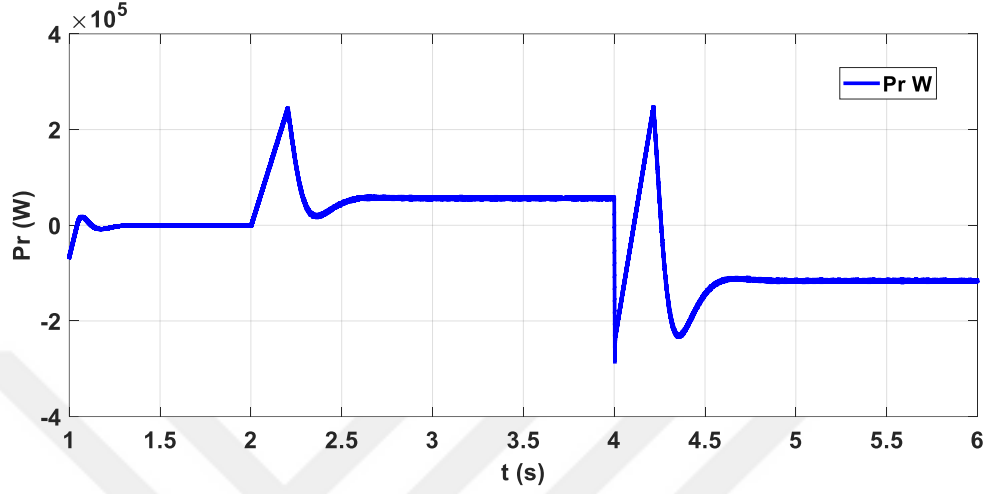


Şekil 5.5. P_s ve Q_s sırasıyla statordan alınan toplam aktif ve reaktif güç değişimi

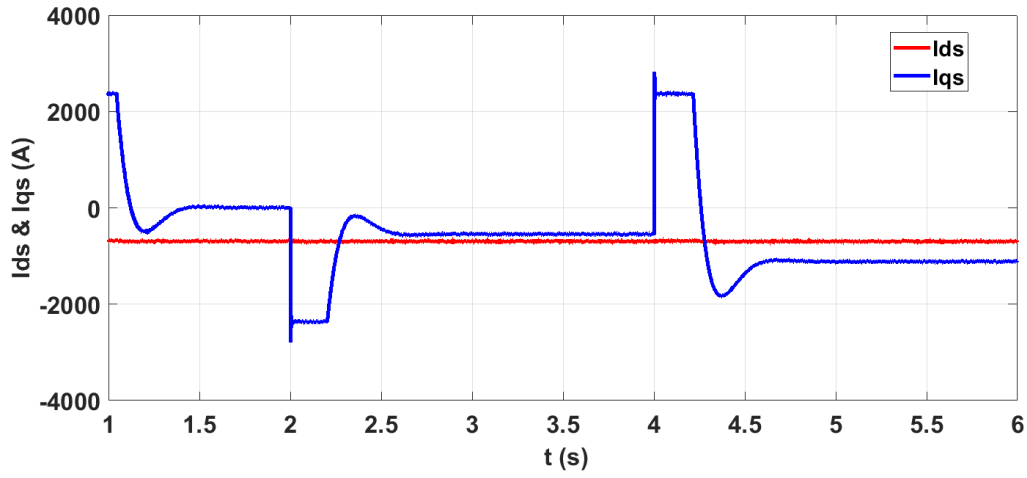
Şekil 5.6'da P_r gücünde meydana gelen değişim gösterilmiştir. İlk iki saniye boyunca sisteme uygulanan moment sıfır ve ÇBAG'nin hızı senkron hıza eşit olduğu için $P_r = 0$ olduğu görülmektedir. Generatör ikinci saniyeden sonra senkron altı, dördüncü saniyeden sonra ise senkron üstü hız durumunda çalıştığı için P_r 'nin işaret değiştirdiği görülmektedir.

Şekil 5.7'de I_{ds} ve I_{qs} 'nin değişimi verilmiştir. I_{ds} 'nin moment ve hız değişimlerinden etkilenmeyip sabit kaldığı görülmektedir. I_{qs} 'nin ise sisteme uygulanan moment ve hız değişimlerine göre değişiklik gösterdiği görülmektedir.

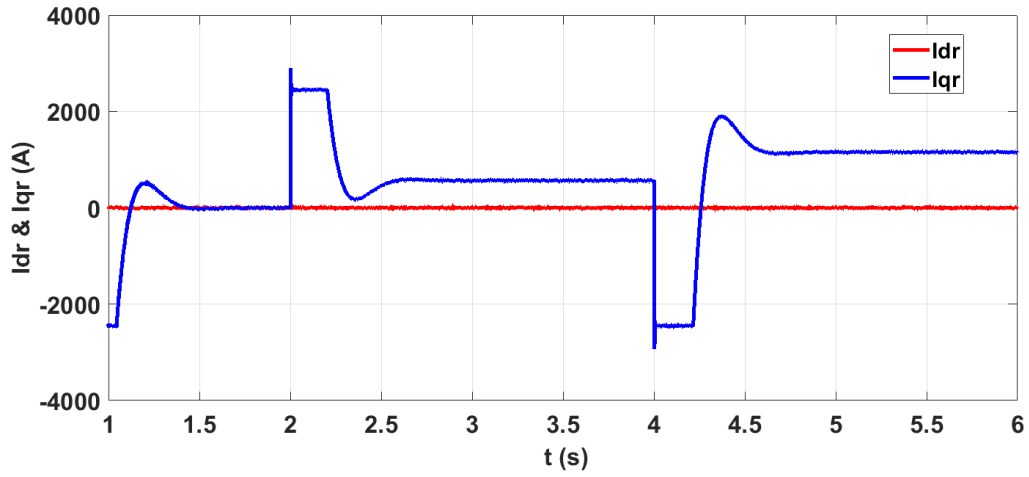
Şekil 5.8’de I_{dr} ve I_{qr} ’nin değişimi verilmiştir. I_{dr} ’nin simülasyon boyunca sabit değerde kaldığı, I_{qr} ’nin ise moment ve hızdaki değişime göre değiştiği görülmektedir.



Şekil 5.6. P_r rotordan alınan toplam aktif güç değişimi



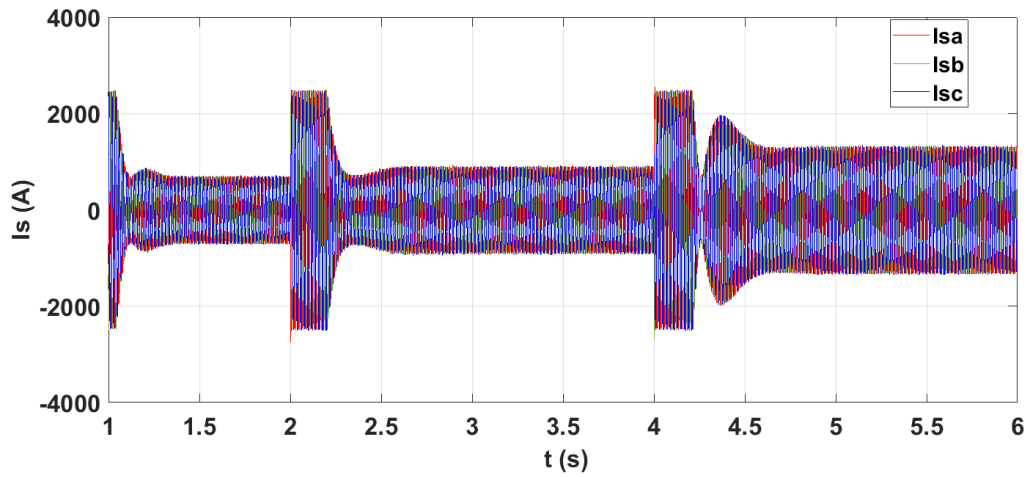
Şekil 5.7. I_{ds} ve I_{qs} değişimi



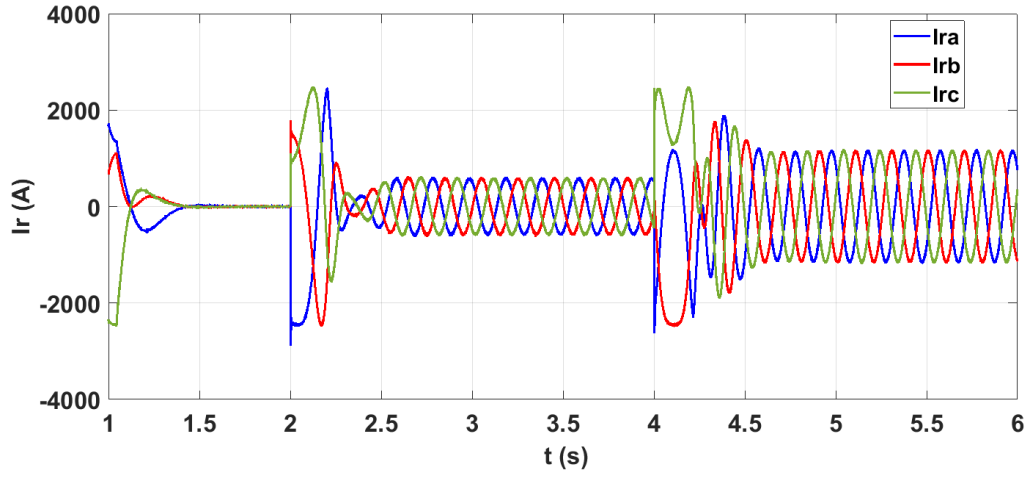
Şekil 5.8. I_{dr} ve I_{qr} değişimi

Şekil 5.9’da I_s ’nin değişimi gösterilmiştir. Moment ve hızdaki değişime göre stator akımlarının da değiştiği görülmektedir.

Şekil 5.10’da I_r ’nin değişimi gösterilmiştir. Moment ve hızdaki değişime göre rotor akımlarının da değiştiği görülmektedir. Kaymaya bağlı olarak senkron altı hızdan senkron üstü hıza geçişte rotor akımlarının yön değiştirdiği görülmektedir.



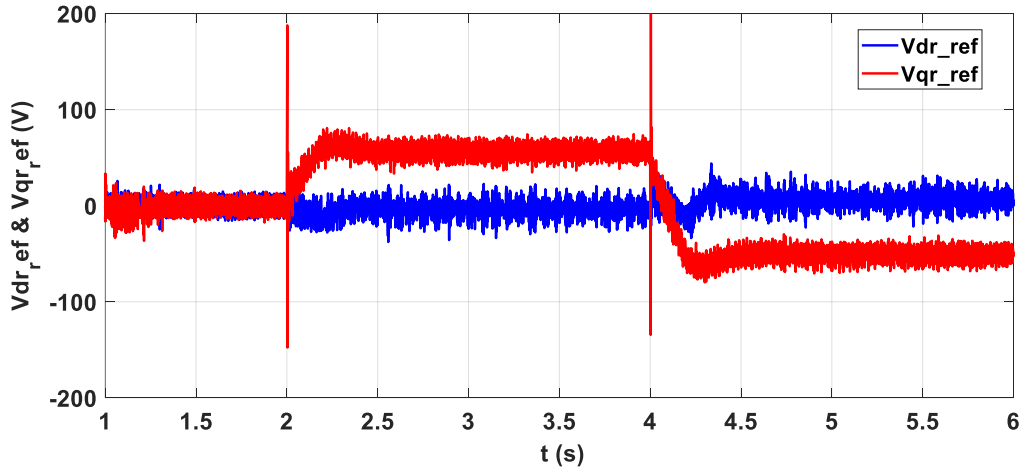
Şekil 5.9. I_s stator hat akımları değişimi



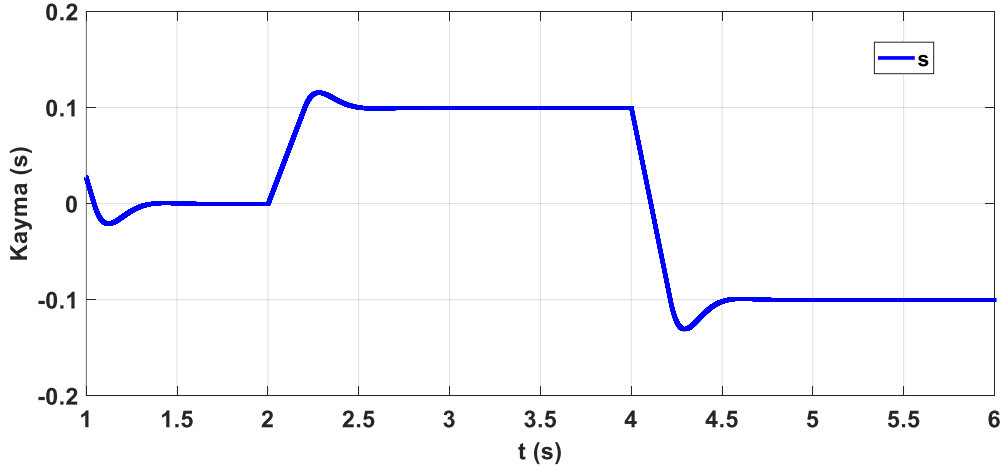
Şekil 5.10. I_r rotor hat akımları değişimi

Şekil 5.11’de V_{dr_ref} ve V_{qr_ref} ’de meydana gelen değişim verilmiştir. Moment ve hız değerindeki değişimlere göre V_{dr_ref} değerinin sabit kaldığı fakat V_{qr_ref} değerinin senkron altı ve senkron üstü hız durumlarına göre işaret değiştirdiği görülmektedir.

Şekil 5.12’de kayma değerinin değişimi gösterilmiştir. Belirlenen hız değerlerine göre denklem (5.4 – 5.5)’te hesaplanan kayma değerinin aynı olduğu görülmektedir.

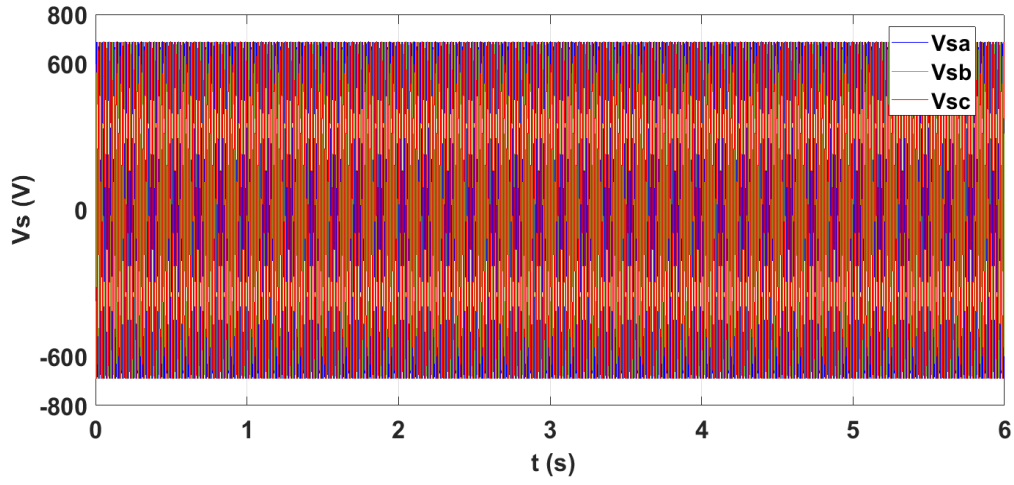


Şekil 5.11. V_{dr_ref} ve V_{qr_ref} değişimi



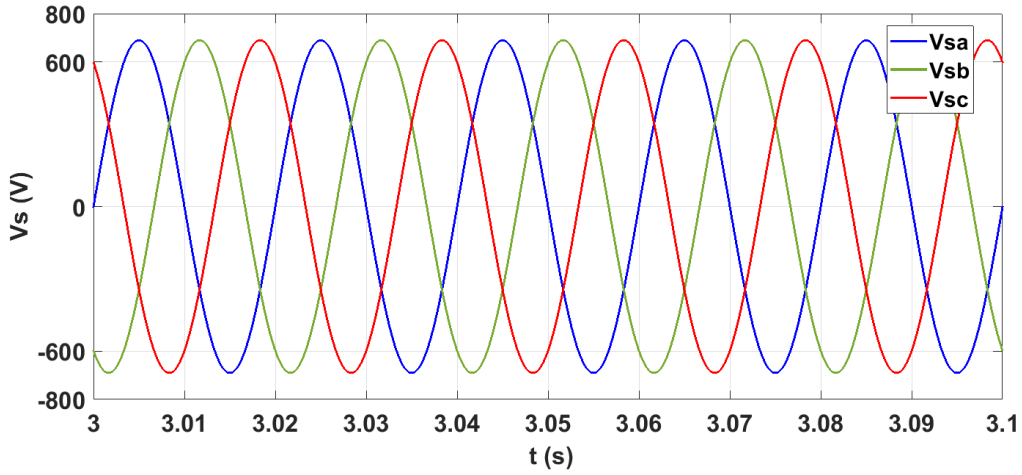
Şekil 5.12. Kayma değişimi

Şekil 5.13'te V_s 'de meydana gelen değişim verilmiştir. Stator geriliminin belirlenen 690 volt ve 50Hz değerinde sabit olduğu görülmektedir.



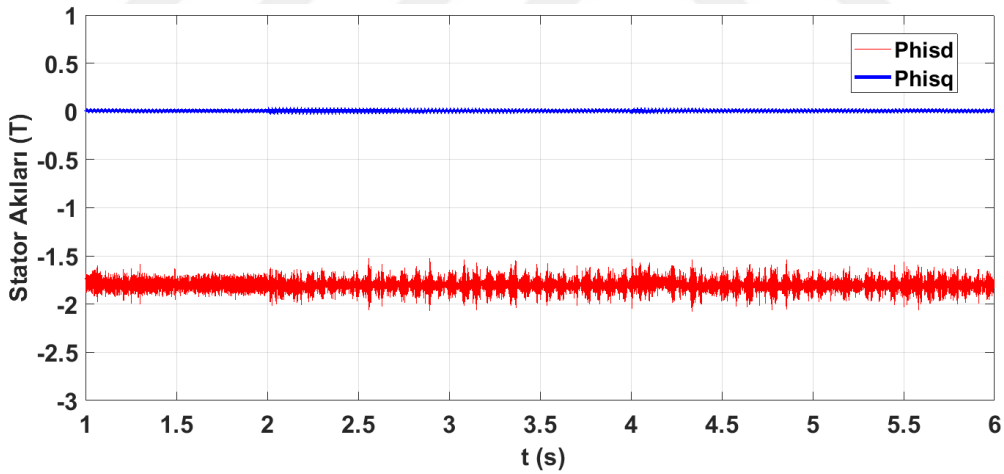
Şekil 5.13. V_s stator gerilimleri değişimi

Şekil 5.14'te V_s 'de meydana gelen değişimin yalınlaştırılmış şekli gösterilmiştir.



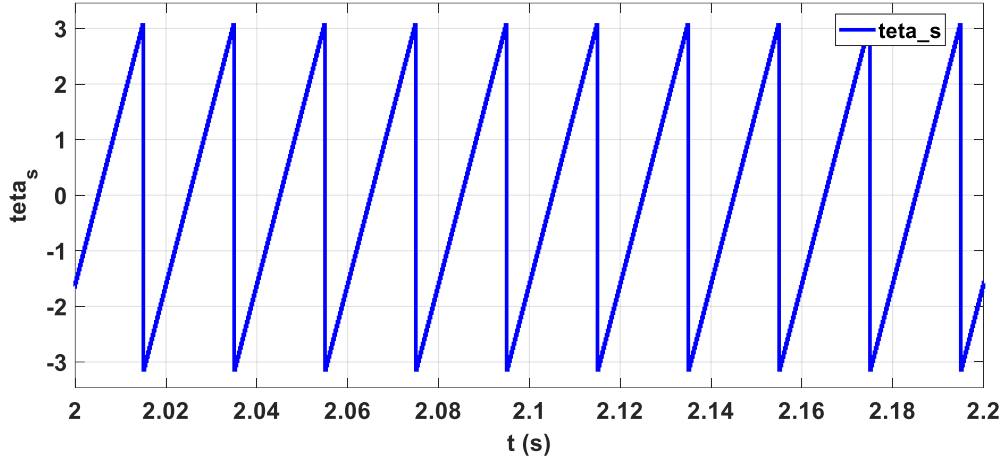
Şekil 5.14. V_s stator gerilimleri değişimi (yakınlaştırılmış görüntü)

Şekil 5.15'te ψ_{sd} ve ψ_{sq} 'da meydana gelen değişim verilmiştir. Manyetik akı ifadesinin hesabı denklem (6.15–6.16)'da yapılmıştır. ψ_{sd} değerinin -1.85 Tesla olduğu görülmektedir. ψ_{sq} değerinin ise sıfırda sabit kaldığı görülmektedir.

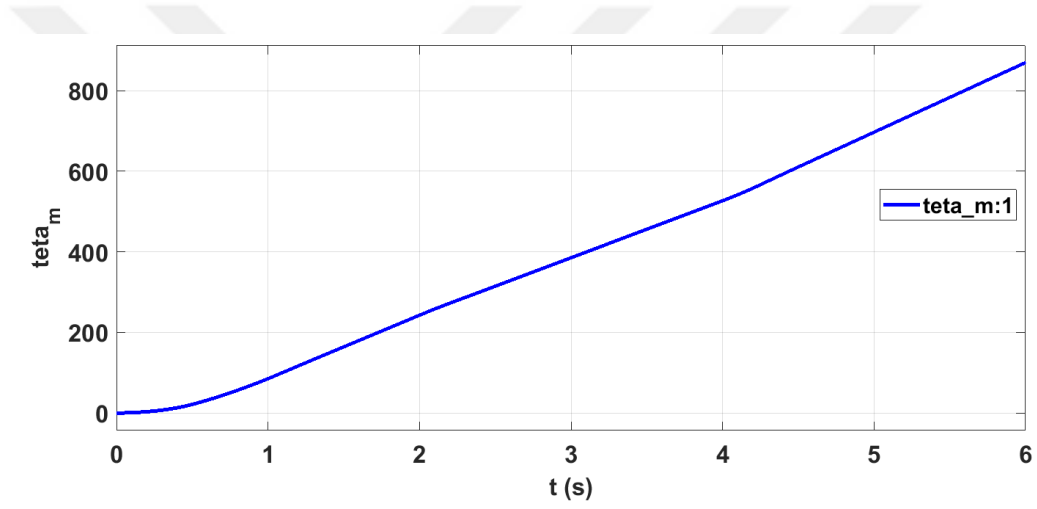


Şekil 5.15. ψ_{sd} ve ψ_{sq} stator akıları değişimi

Şekil 5.16'da θ_s stator açısında meydana gelen değişim gösterilmiştir. Şekil 5.17'de ise θ_m 'de meydana gelen rotor mekanik açısındaki değişim verilmiştir.



Şekil 5.16. Stator elektriksel açısı (θ_s)



Şekil 5.17. Rotor mekanik açısı θ_m

5.3. Deney Çalışması

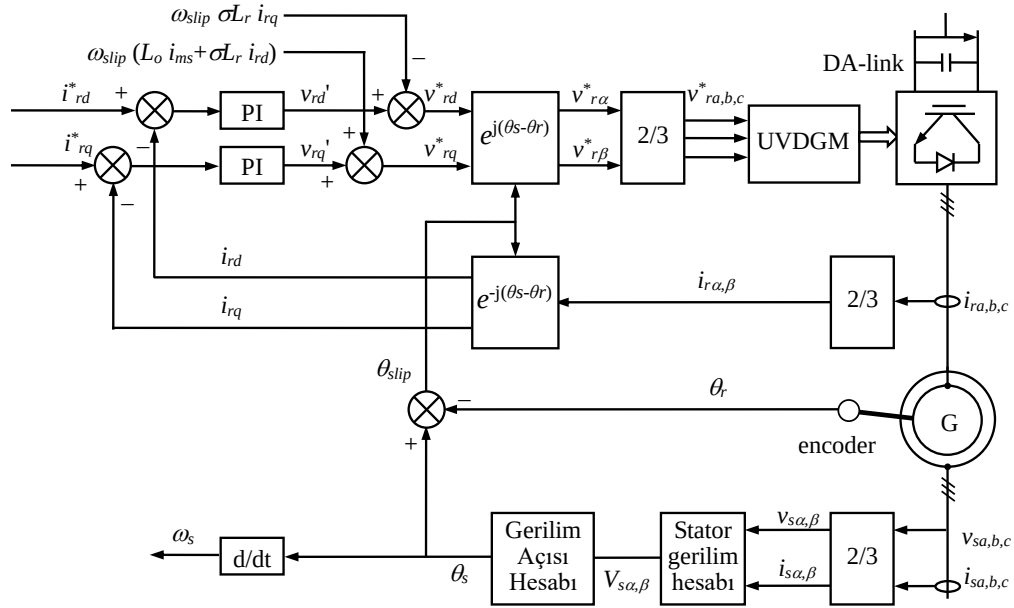
Yapılan deneysel çalışmada ABB firmasına ait bir motor sürücüsü ve bu sürücü tarafından tahriklenen üç fazlı asenkron motor rüzgârı temsil etmek için kullanılmıştır. Motor sürücüsü tüm sistemin hızını değiştirmektedir. ÇBAG'ye ait etiket bilgileri Tablo 5.3'te verilmiştir. Gerekli akım ve gerilim ölçümleri tasarlanan sürücü devre kartı ile oluşturulan kontrol sistemine iletilmektedir. Stator ve rotor akımları da (i_s ve i_r) her bir fazda ayrı ayrı ölçülmüştür. ÇBAG'nin hız bilgisi enkoder ile ölçülerek sürücü devre kartı üzerinden kontrol sistemine gönderilmiştir.

Tablo 5.3. ÇBAG'ye ait etiket bilgileri

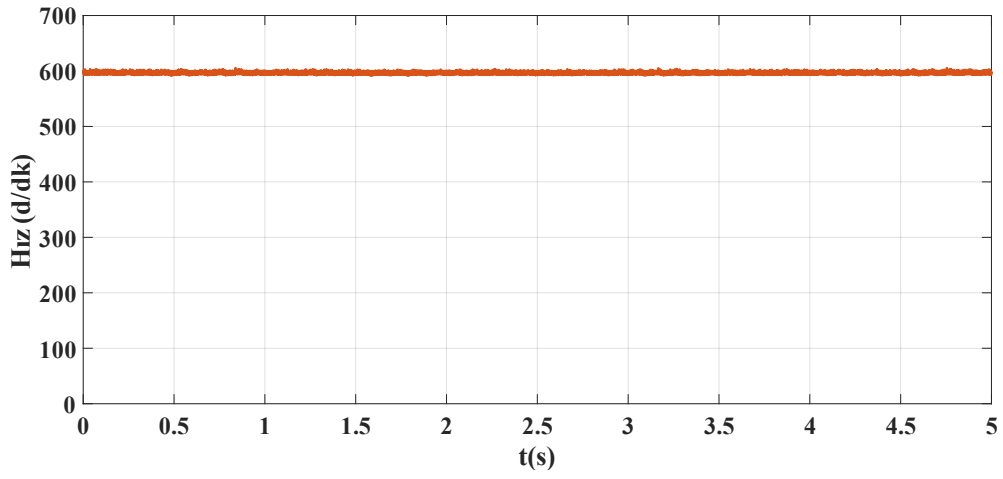
Parametre	Değer	Birim
Güç	350	W
Stator Gerilimi	220	VAC
Stator Akımı	2	A
Anma Hızı	1440	rpm
Mıknatıslanma Endüktansı L_m	0.942	H
Rotor Endüktansı L_r	1.031	H
Stator Endüktansı L_s	1.031	H
R_1	28.25	Ω
R_2	3.93	Ω

Deneylerde 5kHz anahtarlama frekansında (fz) çalışılmıştır. PI Kontrol kazançları K_p , K_d ve K_i herhangi bir atama yöntemi kullanılmadan deneme yanılma yoluyla belirlenmiştir. Simülasyon çalışmasında generatör senkron altı çalışma hızı (600 d/dk) ve (900 d/dk) olarak belirlenmiştir.

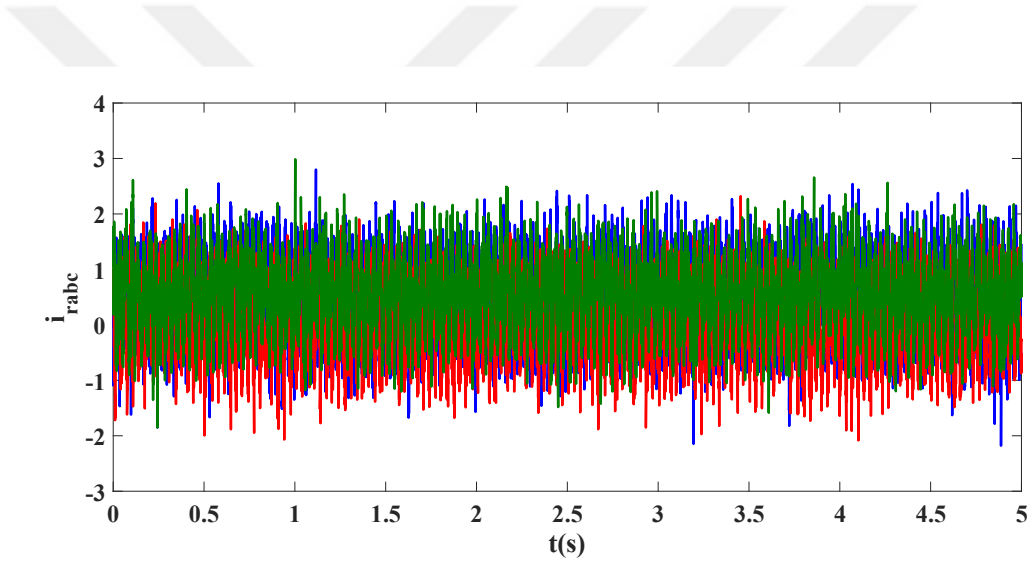
Şekil 5.18'de Matlab/Simulink ortamında oluşturulan kontrol sistemi blok diyagramı verilmiştir.



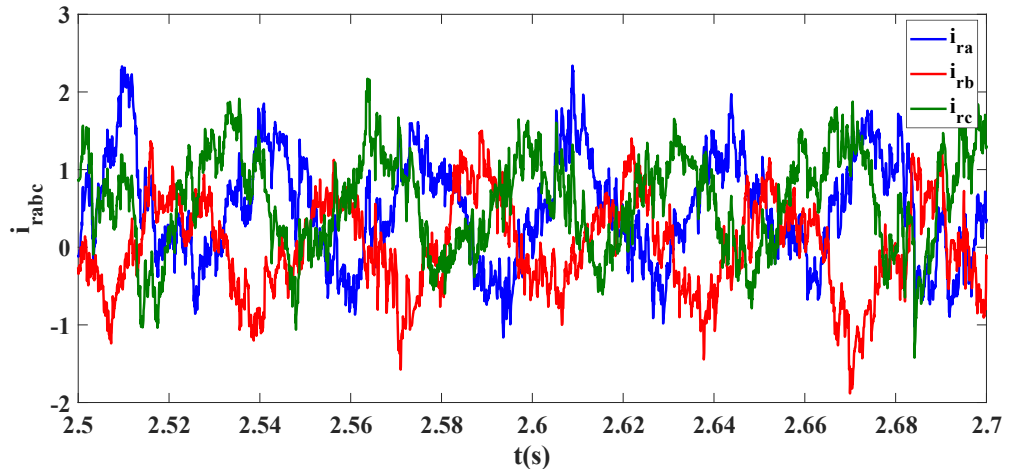
Şekil 5.18. ÇBAG'nin kontrolü için oluşturulan blok diyagramı



Şekil 5.20. Rotor açısı elektriksel hızı ω_r (d/dk)



Şekil 5.21. i_{rabc} rotor hat akımları



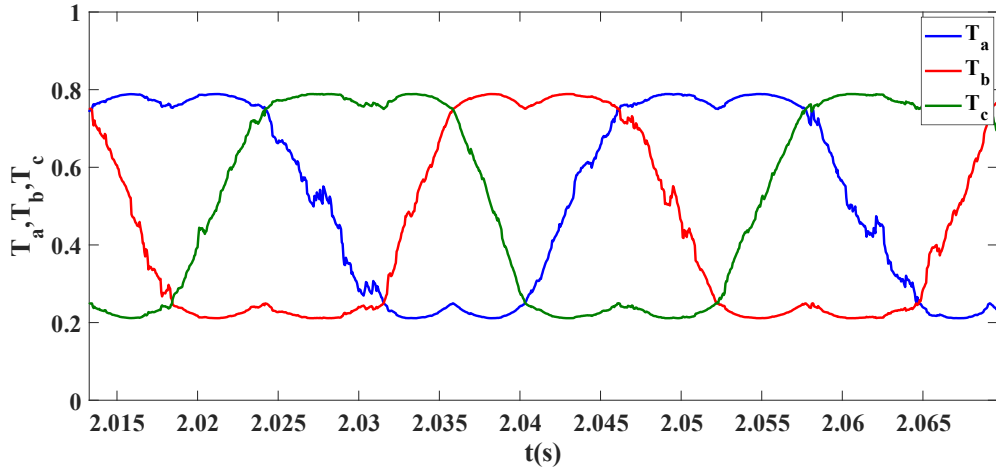
Şekil 5.22. i_{rabc} rotor hat akımları (yakınlaştırılmış görüntü)

Şekil 5.23'te UVDGM tarafından elde edilen T_a, T_b ve T_c (30Hz) anahtarlama kontrol sinyalleri verilmiştir.

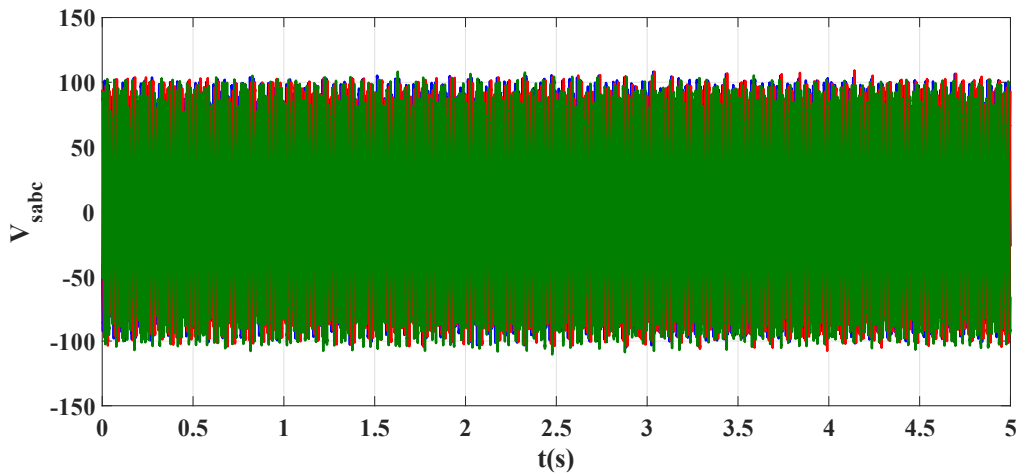
Şekil 5.24 ve 5.25'te ÇBAG statorunda elde edilen üç fazlı V_{sabc} stator hat gerilimi ve yakınlştırılmış şekli gösterilmiştir. 600 d/dk hızda tahriklenme durumunda ÇBAG'ün statorunda sabit 100 VAC ve sabit 50 Hz frekansta gerilimler üretildiği görölmektedir.

Şekil 5.26'da V_{sd}, V_{sq} stator gerilimleri gösterilmiştir. $V_{sq} = 100$ Volt olduğu görölmektedir.

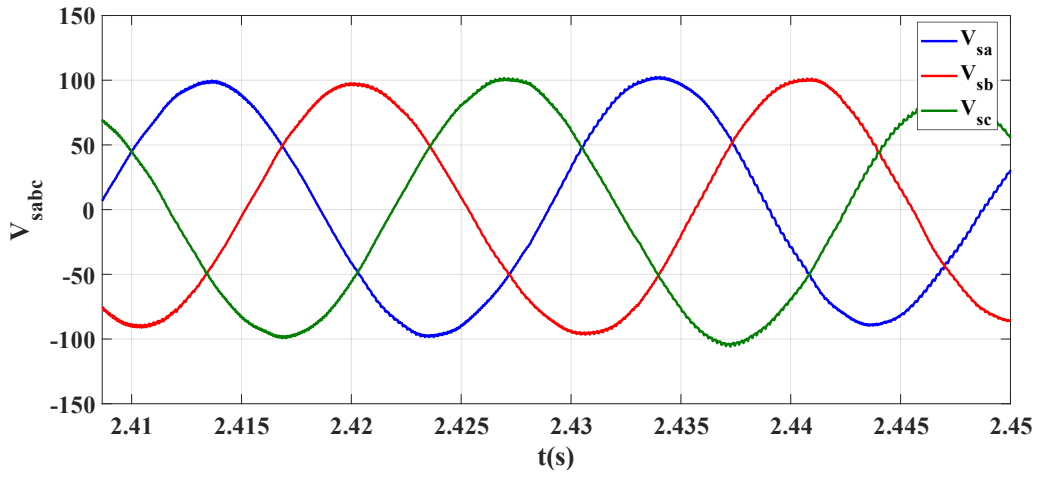
Şekil 5.27 ve 5.28'de sırasıyla $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ stator hat akımları ve yakınlştırılmış şekli verilmiştir. Stator hat akımlarının sabit değerde ve 50 Hz olduğu görölmektedir.



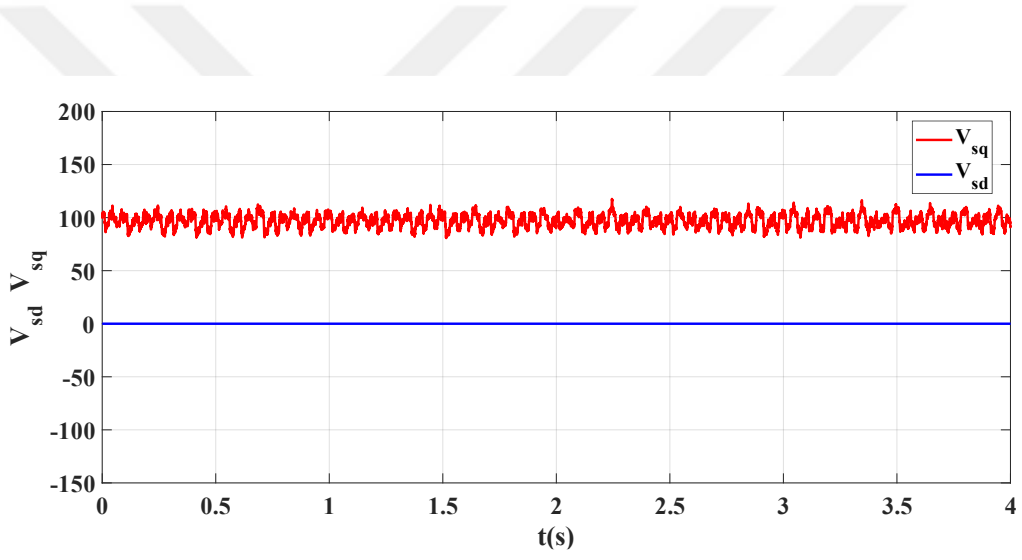
Şekil 5.23. T_{abc} anahtarlama kontrol sinyalleri



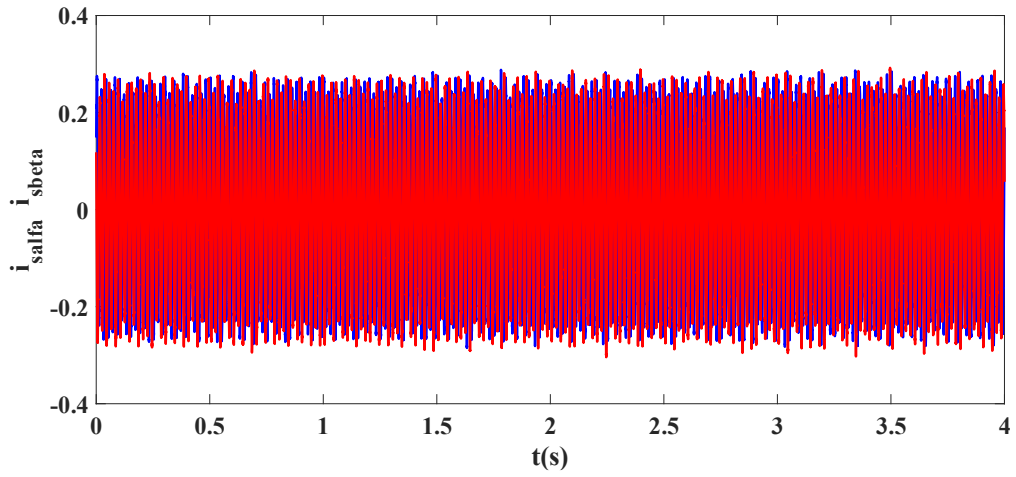
Şekil 5.24. V_{sabc} stator gerilimleri



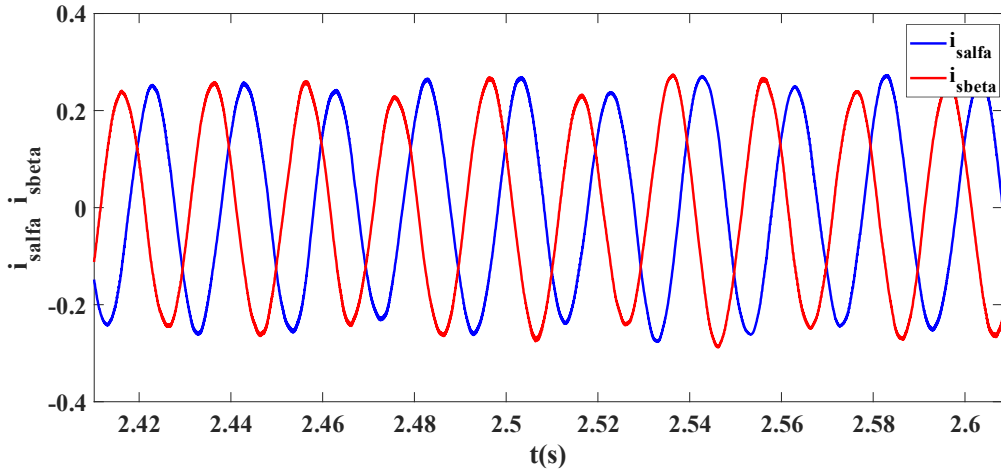
Şekil 5.25. V_{sabc} stator gerilimleri (yakınlaştırılmış görüntü)



Şekil 5.26. V_{sd}, V_{sq} stator gerilimleri



Şekil 5.27. $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ stator hat akımları



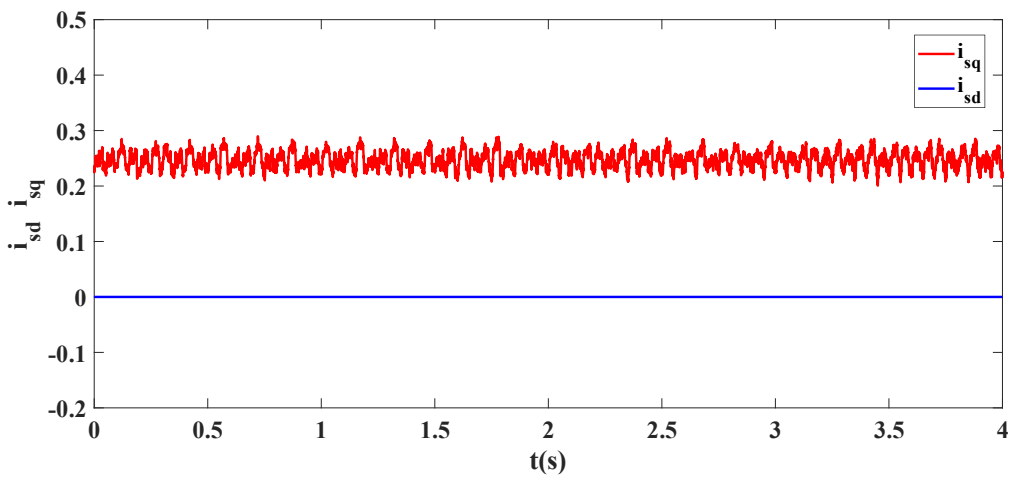
Şekil 5.28. $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ stator hat akımları (yakınlaştırılmış görüntü)

Şekil 5.29’da i_{sd}, i_{sq} stator akımlarının d ve q bileşenleri gösterilmiştir.

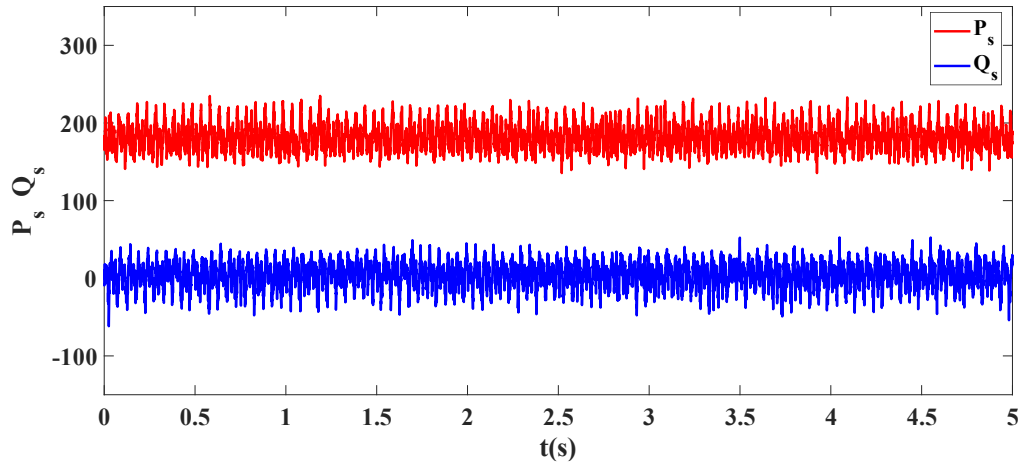
Şekil 5.30’da P_s, Q_s stator aktif ve reaktif gücü gösterilmiştir. $P_s = 175 \text{ W}$ ve $Q_s = 0 \text{ War}$ olduğu görülmektedir.

Şekil 5.31’de UVDGM tarafından elde edilen sektör bilgisi gösterilmiştir. Şekil 5.32’de PLL yapısı tarafından elde edilen stator hat gerilimi θ_s açısı verilmiştir. Stator hat gerilimi açısının sabit 50 Hz frekansa sahip olduğu görülmektedir.

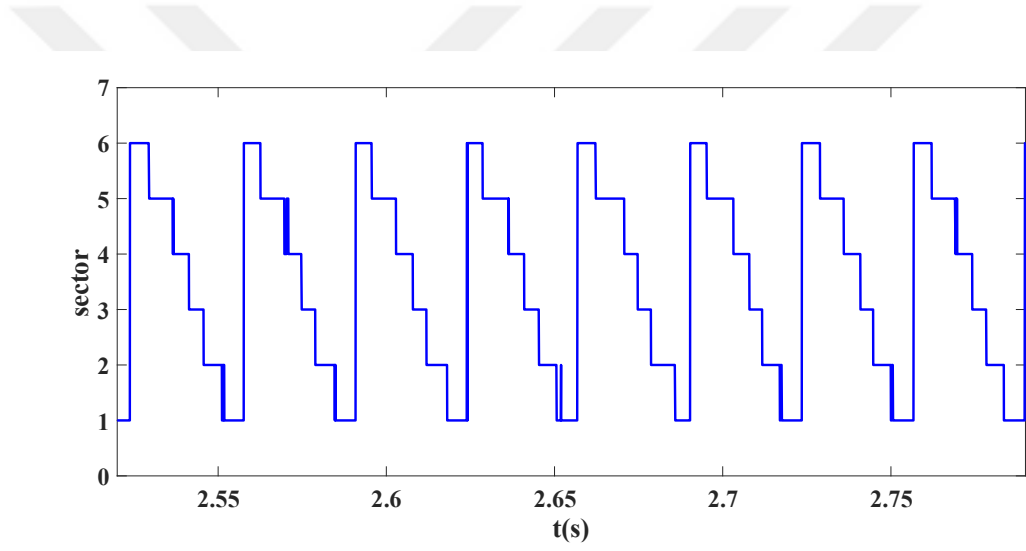
Şekil 5.33’de θ_m rotor mekanik hız açısı bilgisi verilmiştir.



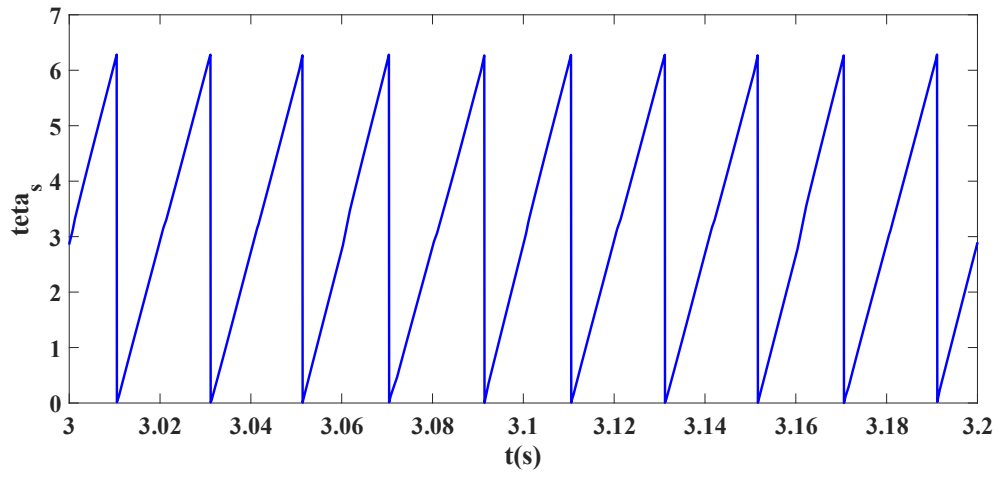
Şekil 5.29. i_{sd}, i_{sq} stator akımları



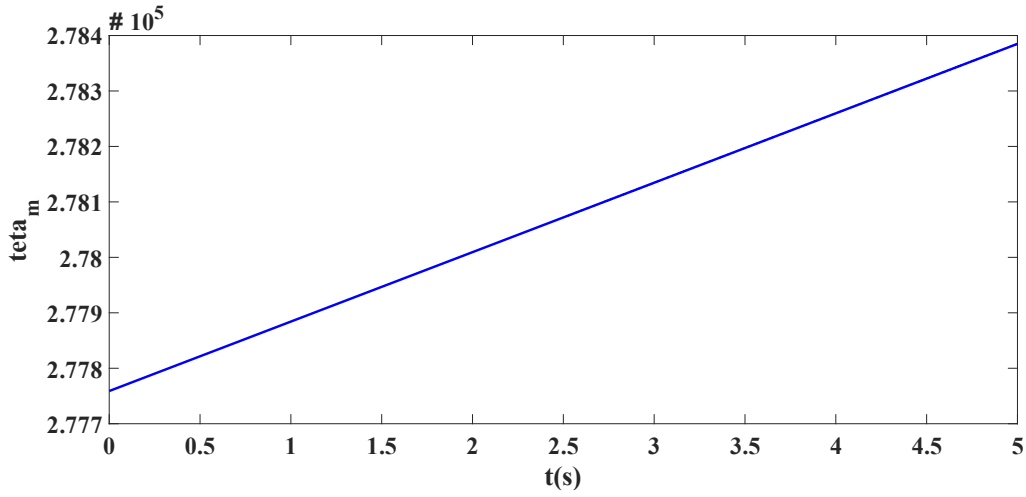
Şekil 5.30. P_s, Q_s stator aktif ve reaktif gücü



Şekil 5.31. Elde edilen sektör değişimi



Şekil 5.32. Stator hat gerilimleri açısı θ_s

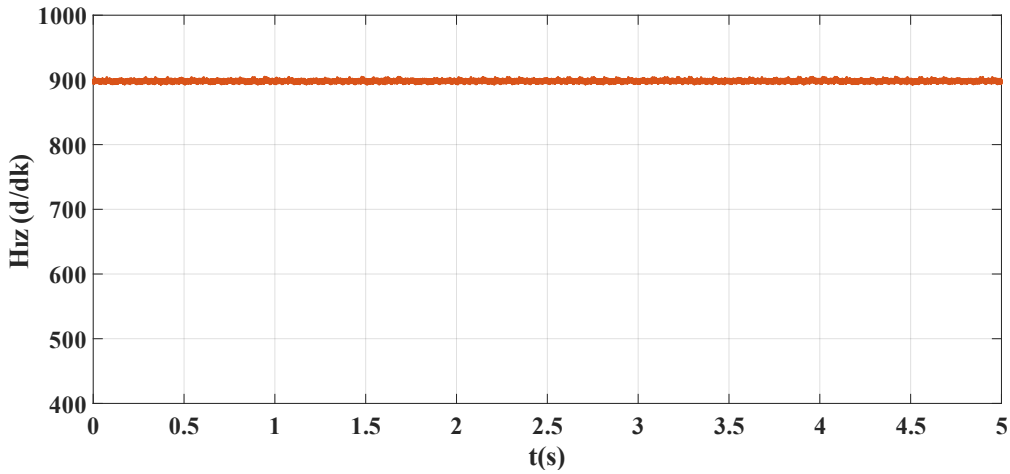


Şekil 5.33. θ_m rotor mekanik hız açısı

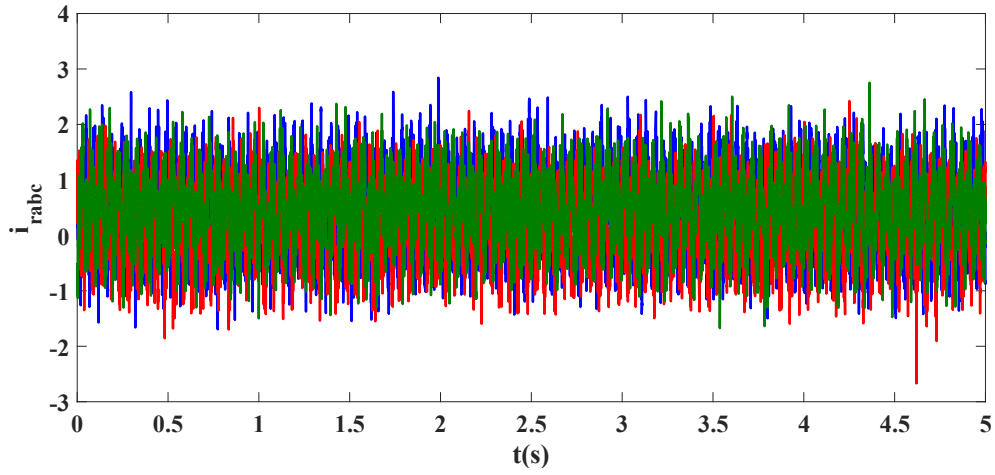
İlk deneyde şebekeye bağlanmış olduğu varsayılan ÇBAG'nin mili 600 d/dk hızda asenkron motor tarafından rüzgâr varsayımı olarak çalıştırılmıştır. İkinci deneyde ise ÇBAG'nin hızı 900 d/dk hıza çıkartıldığında statorunda birinci deneyde olduğu gibi sabit genlikli ve sabit frekanslı gerilim elde edileceği gösterilecektir. Böylece ÇBAG'nin rüzgârda meydana gelen hız değişiminden etkilenmeyen, şebekeye istenilen sabit genlik ve frekansta gerilim verilebildiği gösterilecektir.

Şekil 5.34'te ÇBAG'nin 900 d/dk hızda çalışma durumu gösterilmiştir.

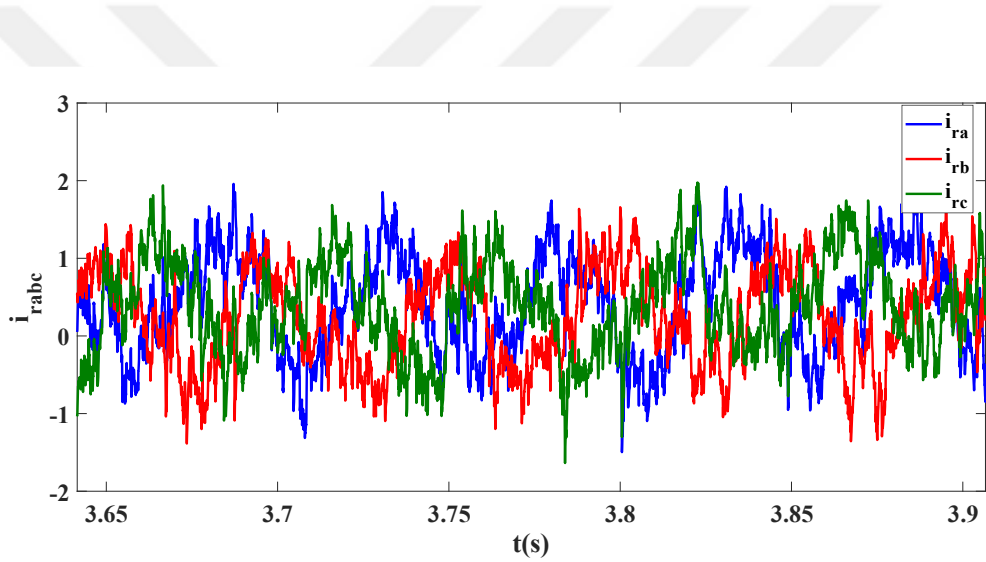
Şekil 5.35 ve 5.36'da rotor devresinde hat akımlarının değişimi 5 saniyelik sürede ve yakınlaştırılmış şekilde gösterilmiştir. Rotor akımlarının 20Hz'lik frekansta olduğu görülmektedir.



Şekil 5.34. Rotor mekanik hızı ω_m (d/dk)



Şekil 5.35. i_{rabc} rotor hat akımları



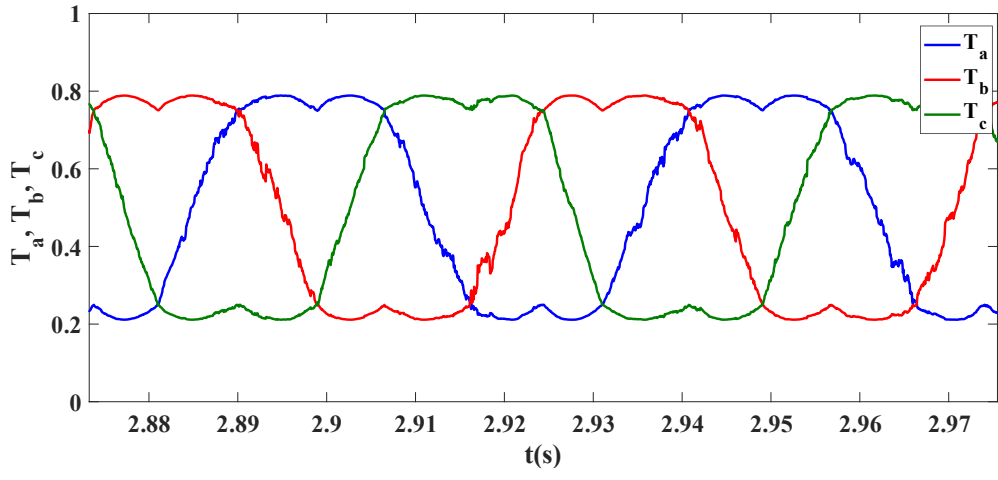
Şekil 5.36. i_{rabc} rotor hat akımları (yakınlaştırılmış görüntü)

Şekil 5.37’de UVDGM tarafından elde edilen T_a, T_b ve T_c (20Hz) anahtarlama kontrol sinyalleri gösterilmiştir.

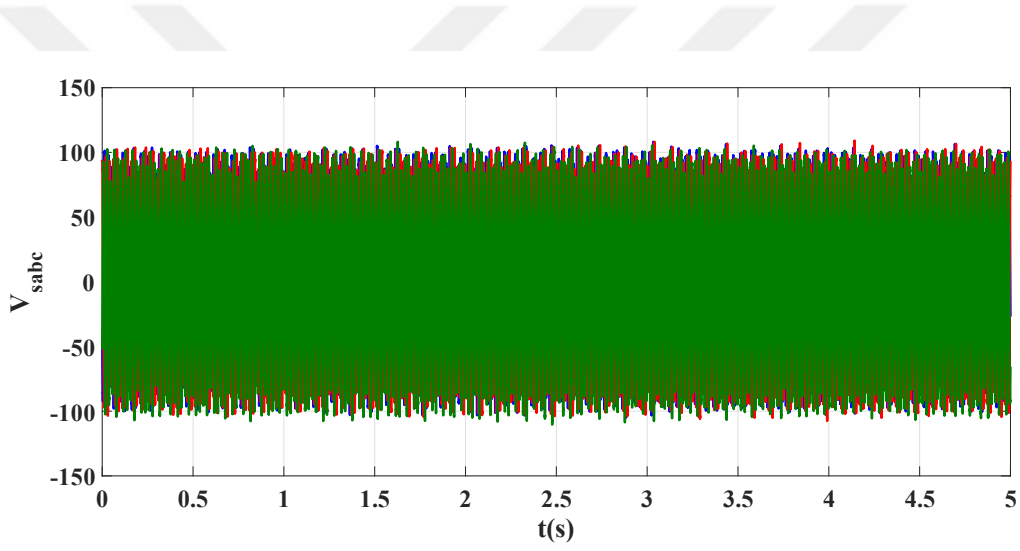
Şekil 5.38 ve 5.39’da ÇBAG statorunda elde edilen üç fazlı V_{sabc} stator hat gerilimi ve yakınlaştırılmış şekli verilmiştir. ÇBAG’nin sabit 100 VAA ve sabit 50 Hz frekansta gerilimler ürettiği görülmektedir.

Şekil 5.40’ta V_{sd}, V_{sq} stator gerilimleri gösterilmiştir. $V_{sq} = 100$ Volt olduğu görülmektedir.

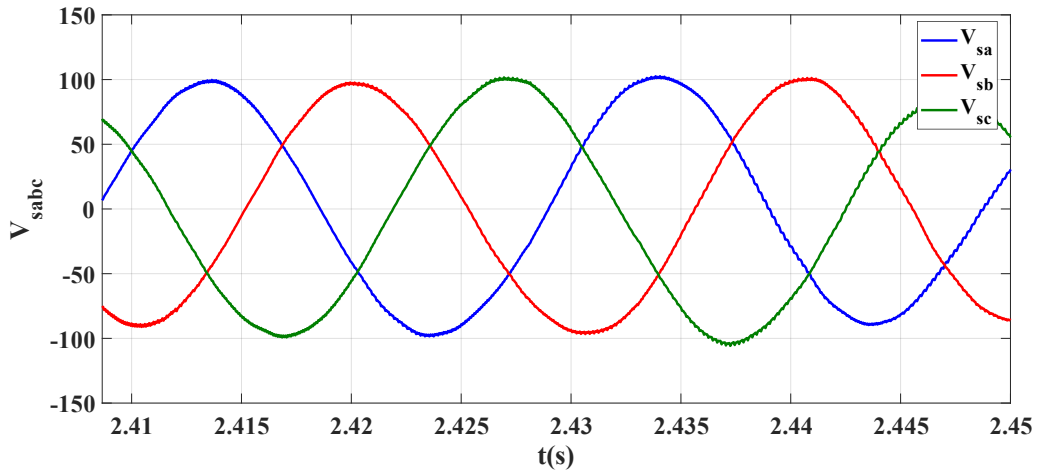
Şekil 5.41 ve 5.42’de $i_{sa}, i_{s\beta}$ stator hat akımları ve yakınlaştırılmış şekli gösterilmiştir. Stator hat akımlarının sabit değerde ve 50 Hz olduğu görülmektedir.



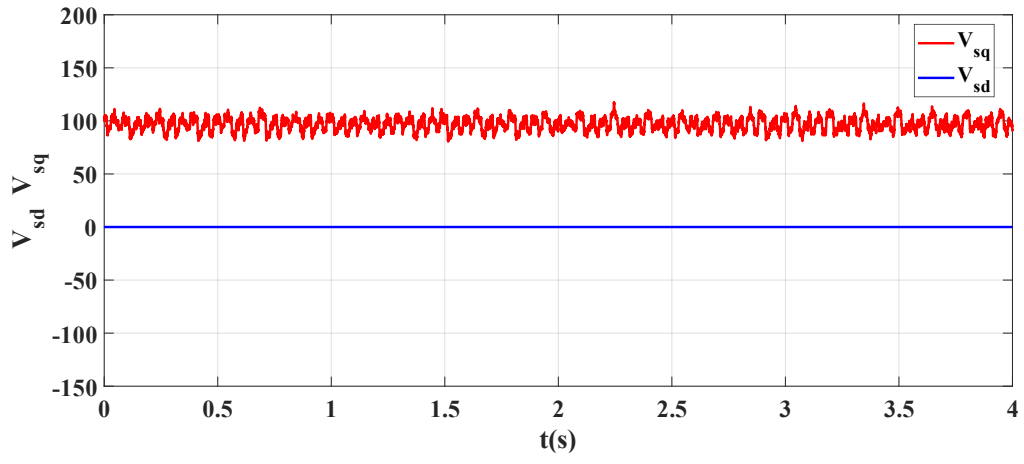
Şekil 5.37. T_{abc} anahtarlama kontrol sinyalleri



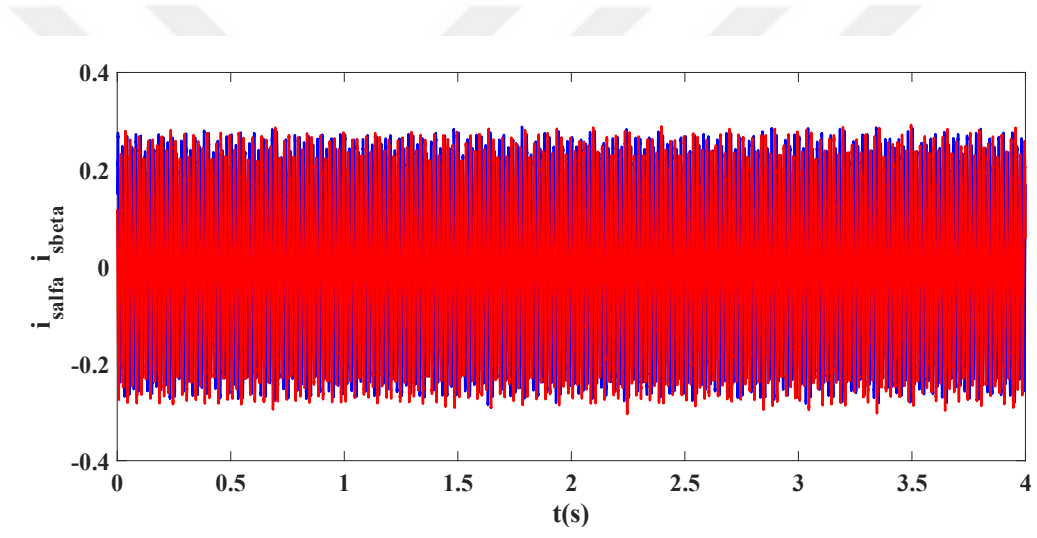
Şekil 5.38. V_{sabc} stator hat gerilimleri



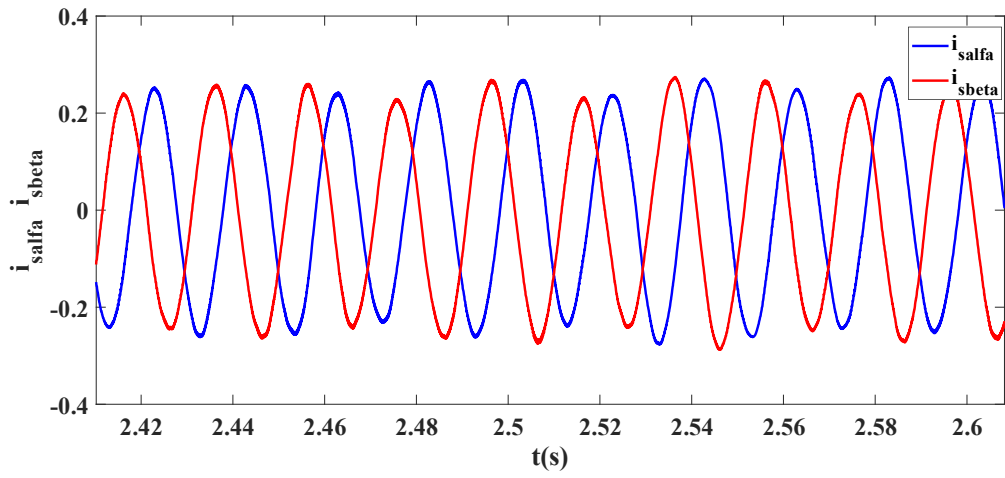
Şekil 5.39. V_{sabc} stator hat gerilimleri (yakınlaştırılmış görüntü)



Şekil 5.40. V_{sd}, V_{sq} stator gerilimleri



Şekil 5.41. $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ stator hat akımları



Şekil 5.42. $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ stator hat akımları (yakınlaştırılmış görüntü)

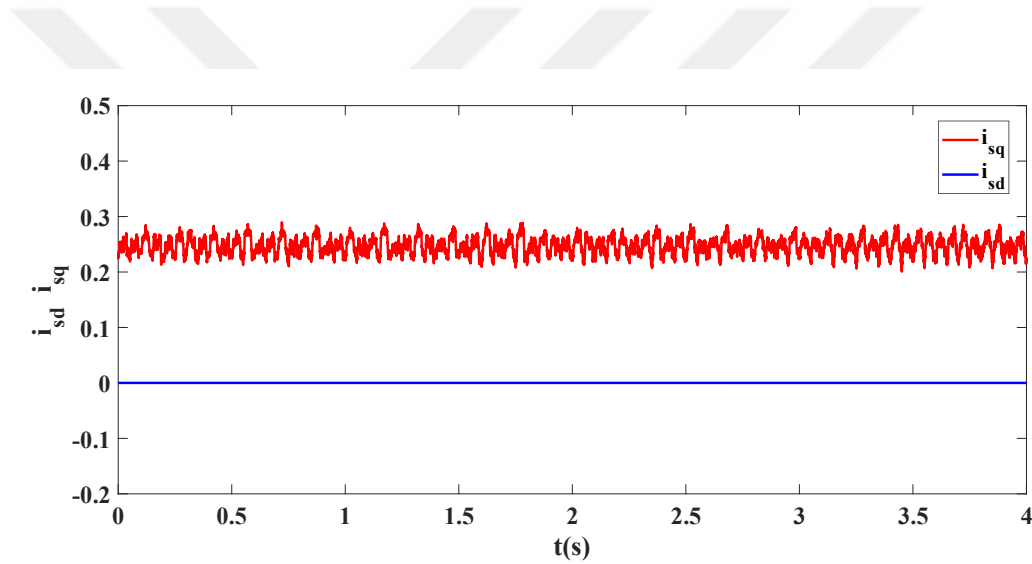
Şekil 5.43'te i_{sd}, i_{sq} stator akımlarının q ve q bileşenleri gösterilmiştir. $i_{sq} = 0.25$ A olduğu görülmektedir.

Şekil 5.44'te P_s, Q_s statordan alınan toplam aktif ve reaktif güç verilmiştir. $P_s = 175$ W ve $Q_s = 0$ War olduğu görülmektedir.

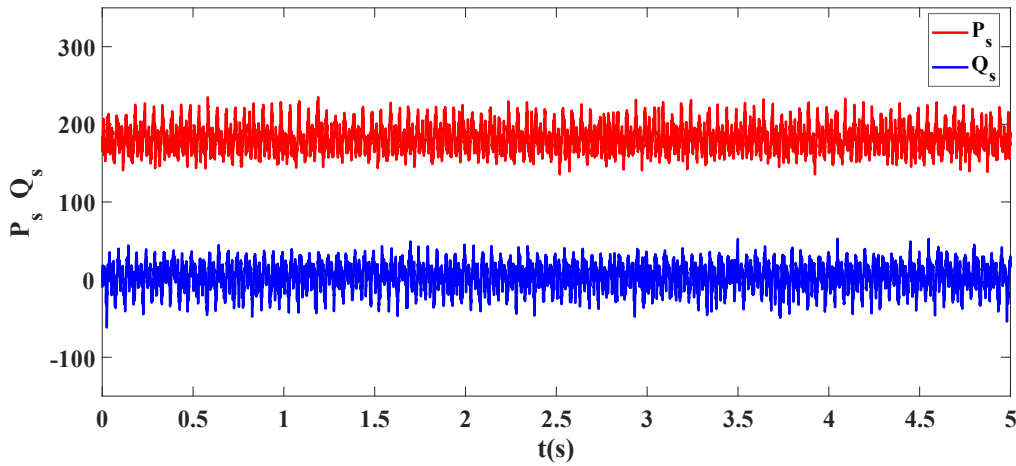
Şekil 5.45'te UVDGM tarafından elde edilen sektör bilgisi gösterilmiştir.

Şekil 5.46'da PLL yapısı tarafından elde edilen stator gerilimi açısı θ_s gösterilmiştir. Elde edilen stator gerilimi açısının sabit 50 Hz frekansa sahip olduğu görülmektedir.

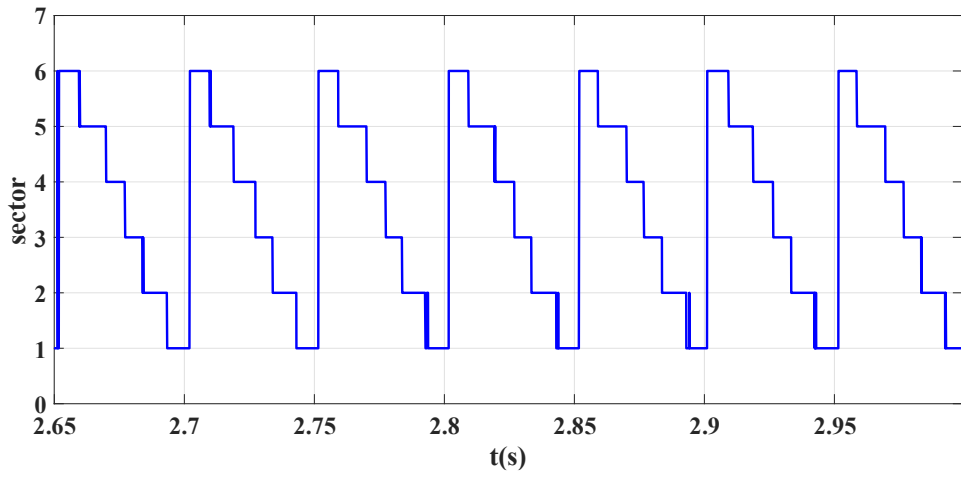
Şekil 5.47'de θ_m rotor mekanik hız açısı bilgisi verilmiştir.



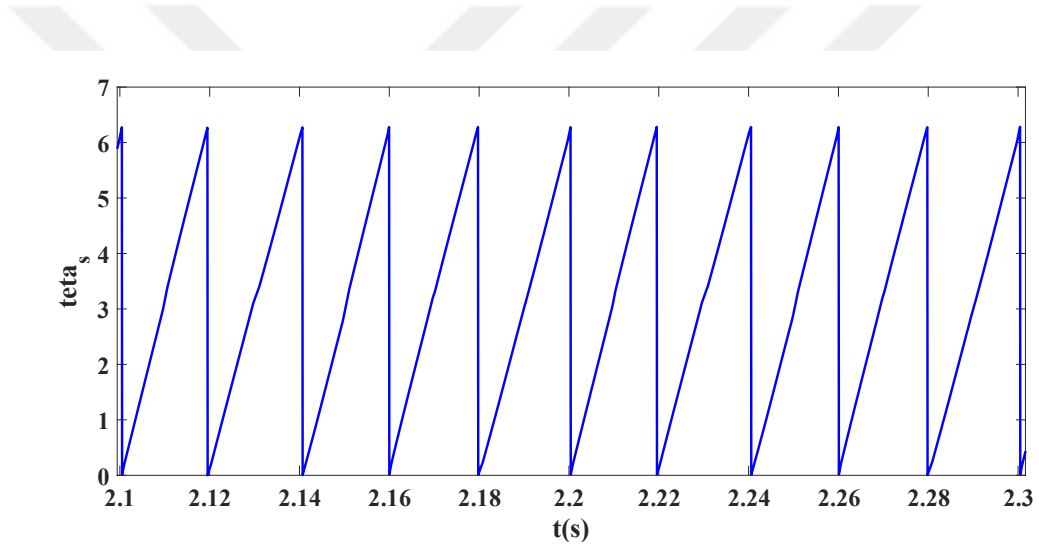
Şekil 5.43. i_{sd}, i_{sq} stator akımları



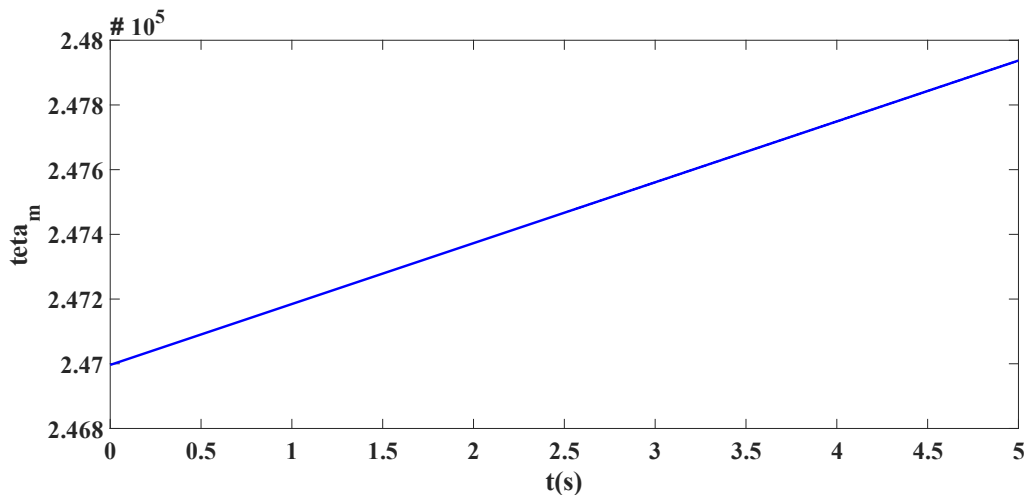
Şekil 5.44. P_s, Q_s statordan alınan toplam aktif ve reaktif güç



Şekil 5.45. Elde edilen sektör değişimi



Şekil 5.46. θ_s stator hat gerilimleri açısı



Şekil 5.47. θ_m rotor mekanik hız açısı

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, ÇBAG tabanlı değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin kontrolü incelenmiştir. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör çeşitlerine ve ÇBAG tabanlı rüzgâr türbin sisteminin diğer rüzgâr türbin sistemlerine olan üstünlükleri incelenmiştir. Çift beslemeli asenkron generatörün matematiksel analizi yapıp dq eksen takımı matematiksel modeli ve model içerisindeki değişkenler oluşturulmuştur.

ÇBAG tabanlı değişken hızlı rüzgâr türbin sistemine, doğru akım makinelerinde sağlanan yüksek kontrol performansına benzer bir yapıyı elde etmek için vektör kontrol algoritması uygulanmıştır. Vektör kontrol algoritması ile model, çok değişkenli karmaşık fonksiyonlardan arındırılarak çözüm çok daha basit olacak şekilde elde edilmiştir. Böylece ÇBAG'nin kontrolü daha kolay bir hale getirilerek yüksek kontrol performansı elde edilmiştir. Oluşturulan matematiksel modele uygun sistem kontrolü oluşturulmuştur. Ayrıca oluşturulan UVDGM algoritması hem simülasyon hem de deneysel çalışmada başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

2 MW'lık ÇBAG tabanlı değişken hızlı örnek bir rüzgâr türbin kontrol sistemi algoritması Matlab/Simulink programında oluşturulmuştur. Simülasyon çıktıları ayrıntılı şekilde sunularak, 2 MW'lık sistemin farklı hız ve yük değerleri altında senkron, senkron altı ve senkron üstü çalışma durumları incelenip ÇBAG'nin istenilen genlikte ve frekansta gerilimler ürettiği elde edilen simülasyon sonuçlarıyla gösterilmiştir. ÇBAG için oluşturulan kontrol algoritması başarılı bir şekilde test edilmiş olup simülasyon sonucu elde edilen grafiksel sonuçlar verilmiştir.

Deneysel çalışmada 350 W'lık ÇBAG tabanlı örnek bir rüzgâr türbin sistemi laboratuvar ortamında oluşturulmuştur. Matlab/Simulink yazılımı kullanılarak ÇBAG'nin rotor tarafı kontrol yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan 350 W'lık sistemin 600 d/dk ve 900 d/dk hızlarda çalışma durumu incelenip elde edilen grafiksel sonuçlar verilmiştir. ÇBAG farklı hız değerlerinde çalıştırılarak bu değişken hız değerlerinden etkilenmeyen, istenilen genlikte ve frekans değerinde gerilimler ürettiği görülmüştür.

Tasarlanan kontrol yapısı, basit ve dayanıklı yapısıyla değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde başarılı bir şekilde kullanılabilirliği ölçüm sonuçlarıyla gösterilmiştir. Ayrıca tasarlanan akıllı güç modülü tabanlı sürücü devre kartının tüm testleri ve ölçümleri yapıp deneysel çalışmada ÇBAG'nin rotor tarafı kontrolünde başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

ÇBAG'nin konum ve hız bilgisini ölçmek için enkoder kullanılmıştır. Bu durum maliyeti arttırmakta ve sistemin fiziksel boyutlarını büyötmektedir. Bundan sonraki çalışmalarda enkoder kullanılmadan ÇBAG'nin kontrolü üzerinde çalışılması önerilebilir.

ÇBAG'nin kontrolünde rotor tarafı kontrolü gerçekleştirilmiştir. Elde edilen gerilimler yüke bağlanıp şebekeye verilmemiştir. Bundan sonraki çalışmalarda rotor tarafı kontrolüne ek olarak şebeke tarafı kontrolü tasarlanıp gerekli senkronizasyon ayarları yapılarak ÇBAG'den elde edilen gerilimlerin şebekeyi beslemesi önerilebilir.

KAYNAKLAR

- Ai, H., Bai, J., Xie, G.,** 2017. Reach on Power Decoupling Control strategy for Doubly-fed Wind Turbine Generator. *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference*, Dalian, China, July:26-28.
- Akdoğan, Ş.,** 2011. Değişken Hızlı Değişken Kanat Açılı Bir Rüzgâr Türbininin Modellenmesi, Simülasyonu ve Kontrolü. *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 82s.
- Alouane, A., Rhouma, A.B., Hamouda, M., Khedher, A.,** 2018. Efficient FPGA-Based Real-Time Implementation of an SVPWM Algorithm for a Delta Inverter. *IET Power Electron*, doi: 10.1049/iet-pel.2017.0418.
- Amrane, F., Chaiba, A., Francois, B., Babes, B.,** 2017. Real Time Implementation of Grid-Connection Control Using Robust PLL for WECS in Variable Speed DFIG-Based on HCC. *The 5th International Conference on Electrical Engineering*, Boumerdes, Algeria, October:29-31.
- Aroussi, H.A., Ziani, E., Bossoufi, B.,** 2017. Contribution to the Enhancement of Dual DTC. *3rd International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing*, Fez, Morroco, May:22-24.
- Barkia, A., Bouchiba, N., Sallem, S., Alaoui, L.C., Drid, S., Kammoun, M.B.A.,** 2016. A Comparative Study of PI and Sliding Mode Controllers for Autonomous Wind Energy Conversion System Based on DFIG. *17th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering*, Sousse, Tunisia, December:19-21.
- Bayhan, S.,** 2012. Çift Beslemeli Asenkron Generatör İçin Etkin Bir Denetleyici Tasarımı. *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 130s.
- Bhattacharai, R., Gurung, N., Ghosh, S., Kamalasadan, S.,** 2018. Parametrically Robust Dynamic Speed Estimation Based Control for Doubly Fed Induction Generator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(6):6529-6542.

- Bhattacharai, R., Gurung, N., Thakallapelli, A., Kamalasadan, S.,** 2018. Reduced-Order State Observer-Based Feedback Control Methodologies for Doubly Fed Induction Machine. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(3):2845-2856.
- Bian, X., Ding, Y., Jia, Q., Shi, L., Zhang, X.P., Lo, K.L.,** 2018. Mitigation of sub-synchronous control interaction of a power system with DFIG based wind farm under multi-operating points. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 12(21):5834-5842.
- Ceylan, M.Ç.,** 2014. Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tabanlı Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin Kontrolü. *Yüksek Lisans Tezi*, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 77s.
- Chang, Y., Hu, J., Tnag, W., Song, G.,** 2018. Fault Current Analysis of Type-3 WTs Considering Sequential Switching of Internal Control and Protection Circuits in Multi Time Scales During LVRT. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(6): 6894-6903.
- Chau, T.K., Yu, S.S., Fernando, T.L., Lu, H.H-C., Small, M.,** 2018. A Novel Control Strategy of DFIG Wind Turbines in Complex Power Systems for Enhancement of Primary Frequency Response and LFOD. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(2):1811-1823.
- Cruz, S.M.A., Marques, G.D., Gonçalves, P.F.C., Lacchetti, M.F.,** 2018. Predictive Torque and Rotor Flux Control of a DFIG-DC System for Torque Ripple Compensation and Loss Minimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(12):9301-9310.
- Deng, Y., Xing, Z., Zhang, Q.,** 2018. Analysis of Electromagnetic Transient Characteristics of Doubly-Fed Induction Generator Under Grid Voltage Swell. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 3(2):111-118.
- Döşoğlu, M.K.,** 2014. Rüzgâr Santrallerinin Dinamik Modellemesi ve Analizi. *Doktora Tezi*, Kocaeli Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 133s.
- Filho, A.J.S., Oliveria, A.L., rodrigues, L.L., Costa, EC.M., Jacomini, R.V.,** 2018. A Robust Finite Control Set Applied to the DFIG Power Control. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(4):1692-1698.

- Firouzi, M., Gharehpetian, B., Mozafari, B.,** 2017. Power-Flow Control and Short-Circuit Current Limitation of Wind Farms Using Unified Interphase Power Controller. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(1):62-71.
- Fu, Y., Zhang, H., Mi, Y., Huang, L., Li, Z., Wang, J.,** 2018. Control Strategy of DFIG in Hybrid Micro-Grid Using Sliding Mode Frequency Controller and Observer. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 12(11):2662-2669.
- Gao, B., Hu, Y., Song, R., Li, R., Zhang, X., Yang, L., Zhao, S.,** 2018. Impact of DFIG-Based Wind Farm Integration on Sub-Synchronous Torsional Interaction Between HVDC and Thermal Generators. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 12(17):3913-3923.
- Gürleyen, H.,** 2012. Şebeke Bağlı Çift Beslemeli Asenkron Generatörlerde Güç Kontrolünün İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 89s.
- Hu, J., Xu, H., He, Y.,** 2013. Coordinated Control of DFIG's RSC and GSC Under Generalized Unbalanced and Distorted Grid Voltage Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(7):2808-2819.
- İnal, T.T.,** 2012. Üç Faz IGBT Köprü Doğrultucunun Tasarımı ve Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tabanlı Rüzgâr Türbin Sistemlerindeki Kontrolü. *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 75s.
- Jerin, A.R.A., Kaliannan, P., Subramaniam, U., Moursi, M.S.E.,** 2018. Review on FRT Solutions for Improving Transient Stability in DFIG-WTs. *IET Renew. Power Gener.*, 12(15):1786-1799.
- Karakasis, N., Tsioumas, E., Jabbour, N., Bazzi, A.M., Mademlis, C.,** 2019. Optimal Efficiency Control in a Wind System With Doubly Fed Induction Generator. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(1):356-368.
- Kebuitari, M., Alhusayn, A., Alnahar, M.,** 2012. Space Vector PWM Simulation for Three Phase DC/AC Inverter. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 6(12):1402-1407.
- Kılıçaslan, M.F.,** 2015. Rüzgâr Türbinlerinde Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör Denetimi. *Yüksek Lisans Tezi*, K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 86s.

- Kong, x., Zhang, Z., Yin, X., Wen, M.,** 2014. Study of Fault Current Characteristics of the DFIG Considering Dynamic Response of the RSC. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29(2):278-287.
- Kou, P., Liang, D., Li, J., Gao, L., Ze, Q.,** 2017. Finite-Control-Set Model Predictive Control for DFIG Wind Turbine. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 1-10.
- Lakhimsetty, S., Somasekhar, V.T.,** 2018. Discontinuous Decoupled SVPWM Schemes for a Four-Level Open-End Winding Induction Motor Drive With Waveform Symmetries. *IET Power Electron.*, 11(2):280-292.
- Le, Q.A., Lee, D.C.,** 2019. Elimination of Common-Mode Voltages Based on Modified SVPWM in Five-Level ANPC Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(1):173-183.
- Lee, Y., Kim, J.,** 2018. Monitoring ON-Resistance of MOSFET Devices in Real Time for SVPWM-VSI With Direct Compensation. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 41(1):28-34.
- Li, L., Nian, H., Ding, L., Zhou, B.,** 2018. Direct Power Control of DFIG System Without Phase-Locked Loop Under Unbalanced and Harmonically Distorted Voltage. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(1):395-404.
- Lin, Q., Lie, X., Yongdong, L., Xiaoyan, H., Youtong, F.,** 2018. Spectral Analysis of a SVPWM Modulated Matrix Converter Based on 3D Fourier Integral. *J. Eng.*, Vol. 2018(13):411–416.
- Liu, M., Pan, W., Quan, R., Li, H., Liu, T., Yang, A.G.,** 2018. A Short-Circuit Calculation Method for DFIG-Based Wind Farms. *IEEE Access, Digital Object Identifier*, 10.1109/ACCESS.2018.2867624, 52793-52800.
- Liu, Y., Jiang, L., Smith, J.S., Wu, Q.H.,** 2018. Primary Frequency Control of DFIG-WTs Using Bang-Bang Phase Angle Controller. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 12(11):2670-2678.
- Ma, J., Zhao, D., Yao, L., Qian, M., Yamashita, K., Zhu, L.,** 2018. Analysis on Application of a Current-source Based DFIG Wind Generator Model. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 4(3):352-361.

- Miyama, Y., Ishizuka, M., Kometani, H., Akatsu, K.,** 2018. Vibration Reduction by Applying Carrier Phase-Shift PWM on Dual Three-Phase Winding Permanent Magnet Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(6):5998-6004.
- Mohammadi, J., Zadeh, S.V., Ebrahimzadeh, E., Blaabjerg, F.,** 2018. Combined Control Method for Grid Side Converter of Doubly Fed Induction Generatorbased Wind Energy Conversion Systems. *IET Renew. Power Gener.*, 12(8):943-952.
- Moualdia, A., Boudana, D., Bouchhida, O., Wira, P.,** 2016. Direct Torque Control Based Multi-Level Inverter and Artificial Neural Networks of Wind Energy Conversion System. *8th International Conference on Modelling, Identification and Control Algiers*, Algeria- November 15-17.
- Murari, A.L.L.F., Altuna, J.A.T., Jacomini, R.V., Osorio, C.M.R., Chaves, J.S.S., FILHO, A.J.S.,** 2017. A Proposal of Project of PI Controller Gains Used on the Control of Doubly-Fed Induction Generators. *IEEE Latin America Transactions*, 15(2):173-180.
- Musial, W., Ram, B.,** 2010. "Large-Scale Offshore Wind Power in the United States," U.S. National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-500-40745, September.
- Müller, S., Deicke, M., Rik, W.,** 2002. Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines. *IEEE Industry Applications Magazine* • MAY|JUNE, 26-33.
- Ni, K., Hu, Y., Chen, G., Gan, C., Li, X.,** 2019. Fault-Tolerant Operation of DFIG-WT With Four-Switch Three-Phase Grid-Side Converter by Using Simplified SVPWM Technique and Compensation Schemes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(1):659-669.
- Ouyang, J., Tang, T., Diao, Y., Li, M., Yao, J.,** 2018. Control Method of Doubly Fed Wind Turbine for Wind Speed Variation Based on Dynamic Constraints of Reactive Power. *IET Renew. Power Gener.*, 12(9):973-980.
- Özsoy, E.E.,** 2014. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinde Kullanım Yönelik Dayanıklı Çift Beslemeli Asenkron Generatör Kontrol Yöntemi Tasarımı ve Uygulaması. *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 131s.

- Prajapat, G.p., Senyor, N., Kar, I.N.,** 2018. Stability Enhancement of DFIG Based Wind Turbine System Through Linear Quadratic Regulator. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 12(6):1331-1338.
- Prajapat, G.P., Bhui, P., Senroy, N., Kar, I.N.,** 2018. Modelling and Estimation of Gear Train Backlash Present in Wind Turbine Driven DFIG System. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 12(14):3527-3535.
- Quin, B., Sun, H.,** 2018. State Dependent Riccati Equation Based Rotor-Side Converter Control for Doubly Fed Wind Generator. *IEEE Access, Digital Object Identifier* 10.1109/ACCESS.2018.2839579, 27853-27863.
- Sadeghi, R., Madani, S.M., Agha-kashkooli, M.R., Atei, M.,** 2018. Reduced-Order Model of Cascaded Doubly Fed Induction Generator for Aircraft Starter/ Generator. *IET Electr. Power Appl.*, 12(6):757-766.
- Saric, A.T., Transtrum, M.K., Stankovic, A.M.,** 2018. Information Geometry for Model Identification and Parameter Estimation in Renewable Energy – DFIG Plant Case. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 12(6):1294-1302.
- Sarma, N., Tuohy, P.M., Apsley, J.M., Wang, Y., Dijurovic, S.,** 2018. DFIG Stator Flux-Oriented Control Scheme Execution for Test Facilities Utilising Commercial Converters. *IET Renew. Power Gener.*, 12(12):1366-1374.
- Sasi, D., Kuruvilla, J.,** 2013. Modeling and Simulation of SVPWM Inverter Fed Permanent Magnet Brushless DC Motor Drive. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* Vol. 2, Issue 5, May.
- Sawant, C.T., Patil, D.R.,** 2016. Analysis, Simulation and Implementation of Space Vector Pulse Width Modulation For Speed Control Of Induction Motor. *International Research Journal of Engineering and Technology*, Volume: 03 Issue: 04 April.
- Silveria, S.E., Silva, S.M., Filho, B.J.C.,** 2018. Fault Ride-Through Enhancement in DFIG With Control of Stator Flux Using Minimised Series Voltage Compensator. *IET Renew. Power Gener.*, 12(11):1234-1240.
- Song, Y., Blaabjerg, F.,** 2018. Analysis of Middle Frequency Resonance in DFIG System Considering Phase-Locked Loop. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(1):343-356.

- Subudli, B., Ogeti, P.S.**, 2018. Optimal Preview Stator Voltage-Oriented Control of DFIG WECS. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 12(4):1004-1013.
- Tang, W., Hu, J., Chang, Y., Liu, F.**, 2018. Modeling of DFIG-Based Wind Turbine for Power System Transient Response Analysis in Rotor Speed Control Timescale. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(6):6795-6805.
- Tian, X., Wang, W., Chi, Y., Li, Y., Liu, C.**, 2018. Virtual Inertia Optimisation Control of DFIG and Assessment of Equivalent Inertia Time Constant of Power Grid. *IET Renew. Power Gener.*, 12(15):1733-1740.
- Tiwari, S.K., Singh, B., Goel, P.K.**, 2018. Design and Control of Autonomous Wind–Solar System With DFIG Feeding 3-Phase 4-Wire Loads. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(2):1119-1127.
- Xiahou, K., Lin, X., Liu, Y., Wu, Q.H.**, 2018. Robust Rotor-Current Sensorless Control of Doubly Fed Induction Generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(2):897-899.
- Xiao, X.X., Yang, R.H., Chen, X.Y., Zheng, Z.X., Li, C.S.**, 2018. Enhancing Fault Ride-Through Capability of DFIG with Modified SMES-FCL and RSC Control. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 12(1):258-266.
- Xueguang, Z., Li, W., Xiao, Y., Wang, G., Xu, D.**, 2018. Analysis and Suppression of Circulating Current Caused by Carrier Phase Difference in Parallel Voltage Source Inverters With SVPWM. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(12):11007-11020.
- Yan, L., Yuan, X.**, 2017. Positive and Negative Sequence Control of DFIG Based Wind Turbines and Its Impact on Grid Voltage Profile Concerning Converter Control Capability. *The 6th International Conference on Renewable Power Generation (RPG)*, 19–20 October, s.1584-1589.
- Yantao, F., Zhen, X.**, 2017. Coordinated Primary Frequency Regulation and Inertia Response Based on DFIG using Over Speed and Torque Reserve. *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference*, Dalian, China, July 26-28.

- Zhao, M., Yuan, X., Hu, J.,** 2017. Modeling of DFIG Wind Turbine Based on Internal Voltage Motion Equation in Power Systems Phase-Amplitude Dynamics Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, DOI 10.1109/TPWRS.2728598.
- Zhou, D., Zhang, G., Blaabjerg, F.,** 2018. Optimal Selection of Power Converter in DFIG Wind Turbine With Enhanced System-Level Reliability. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(4):3637-3644.
- Zhou, Y., Zhao, L., Lee, W.J.,** 2018. Robustness Analysis of Dynamic Equivalent Model of DFIG Wind Farm for Stability Study. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(6):5682-5690.
- Zhu, D., Zou, X., Zhou, S., Dong, W., Kang, Y., Hu, J.,** 2017. Feedforward Current References Control for DFIG-Based Wind Turbine to Improve Transient Control Performance During Grid Faults. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Doi:10.1109/TEC.2017.2779864.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: İrfan ERDEM
Doğum Yeri ve Tarihi: PERTEK / 1991
Lisans: Munzur Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği-2016
Yüksek Lisans: Munzur Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği-2019
Yabancı Dili: İngilizce
E-posta: irfan.erdem.eem@gmail.com / irfan.erdem@emo.org.tr

Yayın ve Patent Listesi

- **ERDEM, İ., OMAÇ, Z.,** (2017). Sensorless Speed Control of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor. *8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17)*, 19-22 October, Elâzığ, Turkey, 1305-1312s.