

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR TÜRBİN - GENERATÖR SİSTEMLERİNİN MODELLEMESİ,
KONTROLÜ VE ŞEBEKE GERİLİM DÜŞMELERİNE KARŞI SİSTEM
DAVRANIŞININ ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ozan AYKUT

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

ARALIK 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR TÜRBİN - GENERATÖR SİSTEMLERİNİN MODELLEMESİ,
KONTROLÜ VE ŞEBEKE GERİLİM DÜŞMELERİNE KARŞI SİSTEM
DAVRANIŞININ ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ozan AYKUT
(504171038)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Güven K. KÖMÜRGÖZ

ARALIK 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504171038 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ozan AYKUT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “RÜZGAR TÜRBİN - GENERATÖR SİSTEMLERİNİN MODELLEMESİ, KONTROLÜ VE ŞEBEKE GERİLİM DÜŞMELERİNE KARŞI SİSTEM DAVRANIŞININ ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

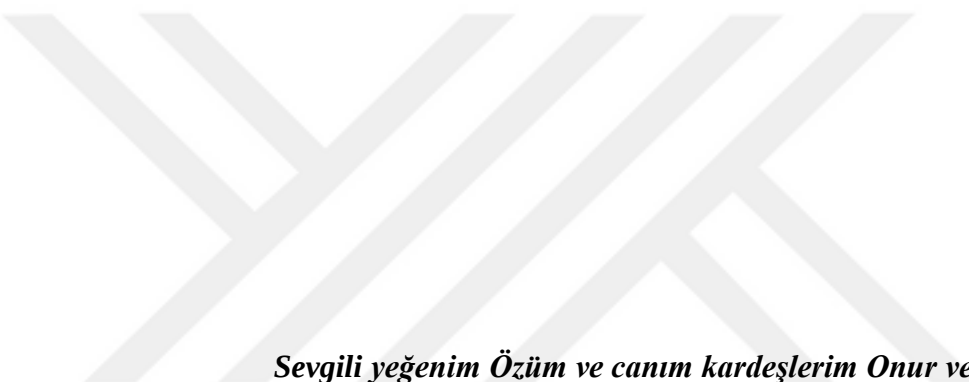
Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Güven K. KÖMÜRGÖZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Önder GÜLER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cenk ULU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 15 Kasım 2019
Savunma Tarihi : 10 Aralık 2019





Sevgili yeğenim Özüm ve canım kardeşlerim Onur ve Erencan'a,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans yaşamım boyunca desteğini esirgemeyen, gerek mesleki bilgi ve tecrübesiyle, gerekse insanî vasıflarıyla yolumu aydınlatan saygıdeğer tez danışmanım Prof. Dr. Güven K. KÖMÜRGÖZ'e derin minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Kasım 2019

Ozan AYKUT
Elektrik Mühendisi





İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Rüzgar Türbinleri Hakkında Genel Bilgiler	1
1.1.1 Rüzgar türbinlerinin donanım yapısı	2
1.1.2 Rüzgar türbinlerinin farklı modelleri	3
1.1.3 Rüzgar türbinlerinin çalışma bölgeleri	7
1.2 Literatür Taraması	8
1.2.1 Rüzgar türbin-generator sistemlerinde modelleme	8
1.2.2 Rüzgar türbin-generator sistemlerinde kontrol stratejileri	11
1.3 Tezin Katkısı	15
1.3 Tezin İçeriği	16
2. RÜZGAR TÜRBİN – GENERATÖR SİSTEMİNİN MODELLEMESİ	17
2.1 Aero-Dinamik Model	18
2.2 Sürücü Sistem Modeli	20
2.3 Çift Beslemeli Asenkron Generatör Modeli	22
2.4 Frekans Dönüştürücü Modeli	36
3. RÜZGAR TÜRBİN – GENERATÖR SİSTEMİNİN KONTROL STRATEJİLERİ	41
3.1 Faz Kilitlemeli Çevrim Kontrolü	41
3.2 Şebeke Tarafı Dönüştürücü Kontrolü	43
3.3 Generatör Tarafı Dönüştürücü Kontrolü	46
3.4 Maksimum Güç Noktası İzleme Kontrolü	57
3.5 Kanat Açık Kontrolü	58
4. RÜZGAR TÜRBİN – GENERATÖR SİSTEM MODELİNİN PERFORMANS ANALİZİ	61
4.1 Senkron Altı Çalışması Durumunda Performans Analizi	63
4.2 Senkron Üstü Çalışması Durumunda Performans Analizi	72
4.3 Senkron Altı/Üstü Çalışması Durumunda Performans Analizi	81
4.4 Maksimum Güç Noktası İzleme Bölgesindeki Performans Analizi	90
4.5 Kanat Açısı Kontrol Bölgesindeki Performans Analizi	99
5. ŞEBEKE GERİLİM DÜŞMELERİNDE RÜZGAR TÜRBİN – GENERATÖR SİSTEM MODELİNİN DİNAMİK DAVRANIŞ ANALİZİ	109
5.1 Model ve Kontrol Stratejileri	111

5.2 %25 Gerilim Düşmesi Durumunda Sistemin Dinamik Davranışının Analizi	113
5.3 %50 Gerilim Düşmesi Durumunda Sistemin Dinamik Davranışının Analizi	117
5.4 %75 Gerilim Düşmesi Durumunda Sistemin Dinamik Davranışının Analizi	126
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	135
KAYNAKLAR.....	137
ÖZGEÇMİŞ.....	141



KISALTMALAR

ÇBAG	: Çift Beslemeli Asenkron Generatör
ŞTD	: Şebeke Tarafı Dönüştürücü
GTD	: Generatör Tarafı Dönüştürücü
MGNI	: Maksimum Güç Noktası İzleme
ABC	: A, B, ve C Faz Terminalleri
DQ	: D ve Q Bileşenler



SEMBOLLER

ρ	: Hava Yoğunluğu
A	: Kanat Tarafından Süpürülen Alan
$V_{rüzgar}$	: Rüzgar Hızı
λ	: Uç Hız Oranı
β	: Kanat (Pitch) Açısı
w_{rotor}	: Rotor Açısal Hız
R_{rotor}	: Rotor Yarıçapı
P_{rotor}	: Aero Dinamik Güç
T_{rotor}	: Aero Dinamik Tork
$P_{rüzgar}$	: Rüzgardan Elde Edilen Güç
J_r	: Dönen Sistemin Toplam Ataleti
T_e	: Generatör Tork Değeri
D_r	: Dönen Sistemin Sönümleme Katsayısı
ω_m	: Rotorun Mekanik Hızı
J_T, J_G	: Türbin ve Generatör Rotor Ataleti
ω_T, ω_G	: Türbin ve Generatör Rotorunun Mekanik Hızı
D_T, D_G	: Türbin ve Generatör Self Sönümleme Değeri
D_s, K_s	: Şaft Ortak Sönümleme ve Sertlik Değeri
v_a, v_b, v_c	: Rotor Terminal Gerilimi
i_a, i_b, i_c	: Rotor Terminal Akımı
r_a, r_b, r_c	: Rotor Faz Direnci
$\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$	: Rotor Akı
v_A, v_B, v_C	: Stator Terminal Gerilimi
i_A, i_B, i_C	: Stator Terminal Akımı
r_A, r_B, r_C	: Stator Faz Direnci
$\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$	: Stator Akı
L_{ss}, L_{sm}	: Stator Faz Sargısının Self ve Ortak Endüktansı
L_{rr}, L_{rm}	: Rotor Faz Sargısının Self ve Ortak Endüktansı
$\overline{T_{sr0}}, \overline{T_{rr0}}$	: Rotora Sabitlenmiş, Stator ve Rotor Dönüşüm Matrisi

$\overline{T_{sst}}, \overline{T_{rst}}$	: Durağan Stator Referans Frame, Stator ve Rotor Dönüşüm Matrisi
$\overline{T_s}, \overline{T_r}$	: Senkron Referans Frame, Stator ve Rotor Dönüşüm Matrisleri
P_g, P_{mek}	: Giriş ve Mekanik Güçleri
T_{pro}	: Üretilen Tork
p	: Generatörün Kutup Sayısı
ω_{rm}	: Mekaniksel Dönme Hızı
$\Lambda_{dq0}, \Lambda_{dq0}$	: DQ Ekseninde Stator ve Rotor Akıları
P_s, Q_s	: Stator Terminallerindeki Aktif ve Reaktif Güç
L_s, L_r, L_m	: Stator Kaçak, Rotor Kaçak ve Mıknatıslanma Endüktansı
v_{ds}, v_{qs}	: DQ Ekseninde Stator Gerilimi
v_{dr}, v_{qr}	: DQ Ekseninde Rotor Gerilimi
i_{ds}, i_{qs}	: DQ Ekseninde Stator Akımı
i_{dr}, i_{qr}	: DQ Ekseninde Rotor Akımı
R_g, L_g	: Şebeke Tarafı Direnç ve Endüktansı
C_{dc}	: DC-Link Kapasitörü
V_{dc}	: DC-Link Gerilimi
S_d, S_q	: DQ Referans Frame - Anahtarlama Fonksiyonları
F_{pll}	: Faz Kilitlemeli Çevrim Sisteminde Akım Kontrolörü
F_{if_d}, F_{if_q}	: DQ Ekseninde, ŞTD Akım Kontrolörü
F_{dc}	: DC-Link Gerilim Kontrolörü
F_{id}, F_{iq}	: DQ Ekseninde, GTD Rotor Akım Kontrolörü
F_{ps}	: Stator Aktif Güç Kontrolörü
a	: Sabit
F_{wr}	: Hız Kontrolörü
F_{Q_s}	: Stator Reaktif Güç Kontrolörü
$R_{crowbar}$	: Crowbar Direnci
$R_{chopper}$	: Chopper Direnci
R_{crow_maks}	: Maksimum Crowbar Direnci
V_{dc_maks}	: Maksimum DC-Link Gerilimi
P_{dc_maks}	: DC-Link Üzerinden Aktarılabilecek Maksimum Güç
C_p	: Güç Katsayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Çift beslemeli asenkron generatörlü ve kalıcı mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbinlerinin karşılaştırılması.....	6
Çizelge 4.1 : Model kontrol bilgileri ve teknik özellikler.	61
Çizelge 4.2 : Frekans dönüştürücüsünün teknik özellikler.....	62
Çizelge 4.3 : Türbin ve ÇBAG'ün teknik özellikler.....	62



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Rüzgar türbini-generatör sisteminin donanımları.....	2
Şekil 1.2 : Sabit hızlı rüzgar türbini sisteminin genel yapısı.....	4
Şekil 1.3 : Farklı rotor dirençleri ile değişken hızlı rüzgar türbini sisteminin genel yapısı.....	5
Şekil 1.4 : Kısmi ölçekli güç dönüştürücüsü ile değişken hızlı rüzgar türbini sisteminin genel yapısı.....	5
Şekil 1.5 : Tam ölçekli güç dönüştürücüsü ile değişken hızlı rüzgar türbini sisteminin genel yapısı.....	6
Şekil 1.6 : Rüzgar türbinlerinde farklı çalışma bölgeleri.....	7
Şekil 1.7 : Farklı kanat açısı değerleri & güç katsayısı-uç hız oranı grafikleri.....	12
Şekil 2.1 : Değişken hızlı ve çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbini sistemi.....	18
Şekil 2.2 : İki kütleli sürücü sistem modeli.....	20
Şekil 2.3 : Bilezikli asenkron generatörün kesit alanı görünümü	22
Şekil 2.4 : Rotor üzerinde sabitlenmiş DQO-dq0 referans frame – ABC frame ...	26
Şekil 2.5 : Stator üzerine sabitlenmiş DQO-dq0 referans frame – ABC frame	28
Şekil 2.6 : Senkron bir şekilde dönen DQO-dq0 referans frame – ABC frame ...	29
Şekil 2.7 : Üç fazlı PWM kontrollü gerilim kaynaklı dönüştürücü devresi ...	36
Şekil 3.1 : Faz kilitlemeli çevrim kontrolü blok diyagramı	42
Şekil 3.2 : Şebeke tarafı dönüştürücü için DQ senkron referans frame nin vektör diyagramı	43
Şekil 3.3 : Şebeke tarafı dönüştürücüsünün kontrol sistemi	44
Şekil 3.4 : Stator akı ve durağan referans arasındaki ilişkiyi gösteren uzay vektörü ...	47
Şekil 3.5 : Generatör tarafı dönüştürücüsünün kontrol sistemi ...	49
Şekil 3.6 : $C_p-\lambda$ eğrisi ...	58
Şekil 3.7 : PI kontrolörü kullanılarak çizilen kanat açısı kontrol şeması ...	59
Şekil 3.8 : Rüzgar türbin – generatör sisteminin genel kontrol yapısı	60
Şekil 4.1 : MATLAB/Simulink ortamında kurulan sistem modeli	61
Şekil 4.2 : Sistem modeli üzerinde uygulanan rüzgar hızı (senkron altı)	63
Şekil 4.3 : Kanat açısı (senkron altı)	64
Şekil 4.4 : Güç katsayısı (senkron altı)	64
Şekil 4.5 : ÇBAG'ün hızı (senkron altı) ...	64
Şekil 4.6 : Şebeke açısal frekansı (senkron altı) ...	65
Şekil 4.7 : ÇBAG'ün kayma değeri (senkron altı) ...	65
Şekil 4.8 : ÇBAG'de stator akı değeri (DQ, senkron altı)	65
Şekil 4.9 : ÇBAG'ün stator gerilimi (senkron altı) ...	66
Şekil 4.10 : ÇBAG'ün stator akımı (senkron altı).....	66
Şekil 4.11 : ÇBAG'ün stator gerilimi (DQ, senkron altı)	66
Şekil 4.12 : ÇBAG'ün stator akımı (DQ, senkron altı) ...	67
Şekil 4.13 : ÇBAG'ün rotor gerilimi (senkron altı)	67

Şekil 4.14 : ÇBAG'ün rotor akımı (senkron altı) ...	67
Şekil 4.15 : GTD terminalleri üzerindeki gerilim (senkron altı) ...	68
Şekil 4.16 : GTD terminalleri üzerinden akan akım (senkron altı) ...	68
Şekil 4.17 : Rotor akımı (DQ, senkron altı) ...	68
Şekil 4.18 : ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (senkron altı) ...	69
Şekil 4.19 : ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (DQ, senkron altı) ...	69
Şekil 4.20 : Şebeke terminalleri üzerindeki toplam akım (senkron altı) ...	69
Şekil 4.21 : DC-link gerilimi (senkron altı) ...	70
Şekil 4.22 : ÇBAG'de üretilen tork değeri (senkron altı) ...	70
Şekil 4.23 : ŞTD terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron altı) ...	70
Şekil 4.24 : Stator terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron altı) ...	71
Şekil 4.25 : Şebeke terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron altı) ...	71
Şekil 4.26 : Sistem modeli üzerinde uygulanan rüzgar hızı (senkron üstü) ...	72
Şekil 4.27 : Kanat açısı (senkron üstü) ...	73
Şekil 4.28 : Güç katsayısı (senkron üstü) ...	73
Şekil 4.29 : ÇBAG'ün hızı (senkron üstü) ...	73
Şekil 4.30 : Şebeke açısal frekansı (senkron üstü) ...	74
Şekil 4.31 : ÇBAG'ün kayma değeri (senkron üstü) ...	74
Şekil 4.32 : ÇBAG'de stator akı değeri (DQ, senkron üstü) ...	74
Şekil 4.33 : ÇBAG'ün stator gerilimi (senkron üstü) ...	75
Şekil 4.34 : ÇBAG'ün stator akımı (senkron üstü) ...	75
Şekil 4.35 : ÇBAG'ün stator gerilimi (DQ, senkron üstü) ...	75
Şekil 4.36 : ÇBAG'ün stator akımı (DQ, senkron üstü) ...	76
Şekil 4.37 : ÇBAG'ün rotor gerilimi (senkron üstü) ...	76
Şekil 4.38 : ÇBAG'ün rotor akımı (senkron üstü) ...	76
Şekil 4.39 : GTD terminalleri üzerindeki gerilim (senkron üstü) ...	77
Şekil 4.40 : GTD terminalleri üzerinden akan akım (senkron üstü) ...	77
Şekil 4.41 : Rotor akımı (DQ, senkron üstü) ...	77
Şekil 4.42 : ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (senkron üstü) ...	78
Şekil 4.43 : ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (DQ, senkron üstü) ...	78
Şekil 4.44 : Şebeke terminalleri üzerindeki toplam akım (senkron üstü) ...	78
Şekil 4.45 : DC-link gerilimi (senkron üstü) ...	79
Şekil 4.46 : ÇBAG'de üretilen tork değeri (senkron üstü) ...	79
Şekil 4.47 : ŞTD terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron üstü) ...	79
Şekil 4.48 : Stator terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron üstü) ...	80
Şekil 4.49 : Şebeke terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron üstü) ...	80
Şekil 4.50 : Sistem modeli üzerinde uygulanan rüzgar hızı (senkron altı/üstü) ...	81
Şekil 4.51 : Kanat açısı (senkron altı/üstü) ...	82
Şekil 4.52 : Güç katsayısı (senkron altı/üstü) ...	82
Şekil 4.53 : ÇBAG'ün hızı (senkron altı/üstü) ...	82
Şekil 4.54 : Şebeke açısal frekansı (senkron altı/üstü) ...	83
Şekil 4.55 : ÇBAG'ün kayma değeri (senkron altı/üstü) ...	83
Şekil 4.56 : ÇBAG'ün stator akı değeri (DQ, senkron altı/üstü) ...	83
Şekil 4.57 : ÇBAG'ün stator gerilimi (senkron altı/üstü) ...	84
Şekil 4.58 : ÇBAG'ün stator akımı (senkron altı/üstü) ...	84
Şekil 4.59 : ÇBAG'ün stator gerilimi (DQ, senkron altı/üstü) ...	84
Şekil 4.60 : ÇBAG'ün stator akımı (DQ, senkron altı/üstü) ...	85
Şekil 4.61 : ÇBAG'ün rotor gerilimi (senkron altı/üstü) ...	85
Şekil 4.62 : ÇBAG'ün rotor akımı (senkron altı/üstü) ...	85
Şekil 4.63 : GTD terminalleri üzerindeki gerilim (senkron altı/üstü) ...	86

Şekil 4.64 : GTD terminalleri üzerinden akan akım (senkron altı/üstü)	86
Şekil 4.65 : Rotor akımı (DQ, senkron altı/üstü).....	86
Şekil 4.66 : ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (senkron altı/üstü).....	87
Şekil 4.67 : ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (DQ, senkron altı/üstü)....	87
Şekil 4.68 : Şebeke terminalleri üzerindeki toplam akım (senkron altı/üstü)	87
Şekil 4.69 : DC-link gerilimi (senkron altı/üstü)	88
Şekil 4.70 : ÇBAG’de üretilen tork değeri (senkron altı/üstü)	88
Şekil 4.71 : ŞTD terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron altı/üstü)	88
Şekil 4.72 : Stator terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron altı/üstü)	89
Şekil 4.73 : Şebeke terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron altı/üstü).....	89
Şekil 4.74 : Sistem modeli üzerinde uygulanan rüzgar hızı (MGNİ)... ..	90
Şekil 4.75 : Kanat açısı (MGNİ)	91
Şekil 4.76 : Güç katsayısı (MGNİ)	91
Şekil 4.77 : ÇBAG’ün hızı (MGNİ)	91
Şekil 4.78 : Şebeke açısal frekansı (MGNİ)	92
Şekil 4.79 : ÇBAG’ün kayma değeri (MGNİ)	92
Şekil 4.80 : ÇBAG’de stator akı değeri (DQ, MGNİ).....	92
Şekil 4.81 : ÇBAG’ün stator gerilimi (MGNİ)	93
Şekil 4.82 : ÇBAG’ün stator akımı (MGNİ)	93
Şekil 4.83 : ÇBAG’ün stator gerilimi (DQ, MGNİ).....	93
Şekil 4.84 : ÇBAG’ün stator akımı (DQ, MGNİ)....	94
Şekil 4.85 : ÇBAG’ün rotor gerilimi (MGNİ)	94
Şekil 4.86 : ÇBAG’ün rotor akımı (MGNİ)	94
Şekil 4.87 : GTD terminalleri üzerindeki gerilim (MGNİ)	95
Şekil 4.88 : GTD terminalleri üzerinden akan akım (MGNİ)	95
Şekil 4.89 : Rotor akımı (DQ, MGNİ).....	95
Şekil 4.90 : ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (MGNİ)	96
Şekil 4.91 : ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (DQ, MGNİ).....	96
Şekil 4.92 : Şebeke terminalleri üzerindeki toplam akım (MGNİ)	96
Şekil 4.93 : DC-link gerilimi (MGNİ)	97
Şekil 4.94 : ÇBAG’de üretilen tork değeri (MGNİ)	97
Şekil 4.95 : ŞTD terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (MGNİ)	97
Şekil 4.96 : Stator terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (MGNİ)	98
Şekil 4.97 : Şebeke terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (MGNİ).....	98
Şekil 4.98 : Sistem modeli üzerinde uygulanan rüzgar hızı (kanat açısı kontrol)	99
Şekil 4.99 : Kanat açısı (kanat açısı kontrol)	99
Şekil 4.100 : Güç katsayısı (kanat açısı kontrol)	100
Şekil 4.101 : ÇBAG’ün hızı (kanat açısı kontrol)	100
Şekil 4.102 : Şebeke açısal frekansı (kanat açısı kontrol).....	100
Şekil 4.103 : ÇBAG’ün kayma değeri (kanat açısı kontrol)	101
Şekil 4.104 : ÇBAG’ün stator akı değeri (DQ, kanat açısı kontrol)....	101
Şekil 4.105 : ÇBAG’ün stator gerilimi (kanat açısı kontrol)	101
Şekil 4.106 : ÇBAG’ün stator akımı (kanat açısı kontrol)	102
Şekil 4.107 : ÇBAG’ün stator gerilimi (DQ, kanat açısı kontrol).....	102
Şekil 4.108 : ÇBAG’ün stator akımı (DQ, kanat açısı kontrol)....	102
Şekil 4.109 : ÇBAG’ün rotor gerilimi (kanat açısı kontrol).....	103
Şekil 4.110 : ÇBAG’ün rotor akımı (kanat açısı kontrol)	103
Şekil 4.111 : GTD terminalleri üzerindeki gerilim (kanat açısı kontrol)	103
Şekil 4.112 : GTD terminalleri üzerinden akan akım (kanat açısı kontrol)	104
Şekil 4.113 : Rotor akımı (DQ, kanat açısı kontrol)....	104

Şekil 4.114 : ŞTD tarafı filtre üzerinden akan akım (kanat açısı kontrol)	104
Şekil 4.115 : ŞTD tarafı filtre üzerinden akan akım (DQ, kanat açısı kontrol).....	105
Şekil 4.116 : Şebeke terminalleri üzerindeki toplam akım (kanat açısı kontrol)	105
Şekil 4.117 : DC-link gerilimi (kanat açısı kontrol)	105
Şekil 4.118 : ÇBAG'de üretilen tork değeri (kanat açısı kontrol)	106
Şekil 4.119 : ŞTD terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (kanat açısı kontrol)	106
Şekil 4.120 : Stator terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (kanat açısı kontrol)	106
Şekil 4.121 : Şebeke terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (kanat açısı kontrol) ..	107
Şekil 5.1 : Şebeke gerilim düşümü ve geçen zamanın sınır değerleri	109
Şekil 5.2 : Rüzgar türbin-generatör ve koruma sistemleri	110
Şekil 5.3 : Crowbar koruma sistemi	112
Şekil 5.4 : Chopper koruma sistemi	113
Şekil 5.5 : ÇBAG'ün stator gerilimi (%25 gerilim düşmesi)	113
Şekil 5.6 : ÇBAG'ün stator akımı (%25 gerilim düşmesi)	114
Şekil 5.7 : ÇBAG'ün stator akımı (DQ, %25 gerilim düşmesi)....	114
Şekil 5.8 : ÇBAG'ün rotor akımı (%25 gerilim düşmesi)	114
Şekil 5.9 : GTD terminal akımı (%25 gerilim düşmesi)	115
Şekil 5.10 : ÇBAG'ün rotor akımı (DQ, %25 gerilim düşmesi)....	115
Şekil 5.11 : ŞTD terminal akımı (%25 gerilim düşmesi)	115
Şekil 5.12 : ŞTD terminal akımı (DQ, %25 gerilim düşmesi).....	116
Şekil 5.13 : DC link gerilimi (%25 gerilim düşmesi)	116
Şekil 5.14 : ÇBAG'ün tork değeri (%25 gerilim düşmesi)	116
Şekil 5.15 : Şebeke tarafı aktif ve reaktif güç (%25 gerilim düşmesi)....	117
Şekil 5.16 : ÇBAG'nün stator gerilimi (%50 gerilim düşmesi)	118
Şekil 5.17 : ÇBAG'ün stator akımı (%50 gerilim düşmesi)	118
Şekil 5.18 : ÇBAG'ün stator akımı (DQ, %50 gerilim düşmesi)....	118
Şekil 5.19 : ÇBAG'ün rotor akımı (%50 gerilim düşmesi)	119
Şekil 5.20 : GTD terminal akımı (%50 gerilim düşmesi)	119
Şekil 5.21 : ÇBAG'ün rotor akımı (DQ, %50 gerilim düşmesi)....	119
Şekil 5.22 : ŞTD terminal akımı (%50 gerilim düşmesi)	120
Şekil 5.23 : ŞTD terminal akımı (DQ, %50 gerilim düşmesi).....	120
Şekil 5.24 : DC link gerilimi (%50 gerilim düşmesi)	120
Şekil 5.25 : ÇBAG'ün tork değeri (%50 gerilim düşmesi)	121
Şekil 5.26 : Şebeke tarafı aktif ve reaktif güç (%50 gerilim düşmesi)....	121
Şekil 5.27 : ÇBAG'nün stator gerilimi (%50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)	121
Şekil 5.28 : ÇBAG'ün stator akımı (%50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)	122
Şekil 5.29 : ÇBAG'ün stator akımı (DQ, %50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)....	122
Şekil 5.30 : ÇBAG'ün rotor akımı (%50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)	122
Şekil 5.31 : GTD terminal akımı (%50 gerilim düşme, Yöntem 1)	123
Şekil 5.32 : ÇBAG'ün rotor akımı (DQ, %50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)....	123
Şekil 5.33 : ŞTD terminal akımı (%50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)	123
Şekil 5.34 : ŞTD terminal akımı (DQ, %50 gerilim düşmesi, Yöntem 1).....	124
Şekil 5.35 : DC link gerilimi (%50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)	124
Şekil 5.36 : ÇBAG'ün tork değeri (%50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)	124
Şekil 5.37 : Şebeke tarafı aktif ve reaktif güç (%50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)	125
Şekil 5.38 : DC link gerilimi (%50 gerilim düşmesi, tüm zaman)....	125
Şekil 5.39 : ÇBAG'ün tork değeri (%50 gerilim düşmesi, tüm zaman)	126
Şekil 5.40 : Şebeke tarafı aktif ve reaktif güç (%50 gerilim düşme, tüm zaman).	126
Şekil 5.41 : ÇBAG'nün stator gerilimi (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2)	127
Şekil 5.42 : ÇBAG'ün stator akımı (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2)	127

Şekil 5.43 : ÇBAG'ün rotor akımı (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2) ...	128
Şekil 5.44 : GTD terminal akımı (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2) ...	128
Şekil 5.45 : ŞTD terminal akımı (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2)...	128
Şekil 5.46 : DC link gerilimi (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2) ...	129
Şekil 5.47 : ÇBAG'ün tork değeri (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2) ...	129
Şekil 5.48 : Şebeke tarafı aktif ve reaktif güç (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2)...	129
Şekil 5.49 : Crowbar direnci üzerindeki akım (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2) ...	130
Şekil 5.50 : ÇBAG'nün stator gerilimi (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3) ...	130
Şekil 5.51 : ÇBAG'ün stator akımı (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3) ...	131
Şekil 5.52 : ÇBAG'ün rotor akımı (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3) ...	131
Şekil 5.53 : GTD terminal akımı (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3) ...	131
Şekil 5.54 : ŞTD terminal akımı (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3)...	132
Şekil 5.55 : DC link gerilimi (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3) ...	132
Şekil 5.56 : ÇBAG'ün tork değeri (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3) ...	132
Şekil 5.57 : Şebeke tarafı aktif ve reaktif güç (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3) .	133
Şekil 5.58 : Crowbar direnci üzerindeki akım (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3) ...	133
Şekil 5.59 : Chopper direnci üzerindeki akım (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3)..	133



RÜZGAR TÜRBİN – GENERATÖR SİSTEMLERİNİN MODELLEMESİ, KONTROLÜ VE ŞEBEKE GERİLİM DÜŞMELERİNE KARŞI SİSTEM DAVRANIŞININ ANALİZİ

ÖZET

Son yıllarda fosil yakıtların çevreye verdiği zararlar ve iklim değişikliği politikalarından dolayı yenilebilir enerji kaynaklarına bağlı enerji üretim talepleri artmıştır. Yenilebilir enerji kaynakları arasında en gelişen alanlardan biri rüzgardır. Rüzgar enerjisi, rüzgar türbinleri vasıtasıyla ilk olarak mekanik enerjiye sonra da elektrik enerjisine dönüştürerek tüketicinin kullanımına sunulur. Rüzgar türbinleri maliyet açısından verimliliği ve temiz enerji üretimi açısından etkileri düşünüldüğün de günümüz için oldukça önemli bir alandır.

Rüzgar türbinleri tasarım kriterlerinden dolayı belli rüzgar hızlarında çalışmaktadır. Bu sebepten ötürü rüzgar türbinin konumlandırılacağı bölge büyük öneme sahiptir. Eğer anlık rüzgar hızı, türbinin devreye girme rüzgar hızından düşük veya devreden çıkma rüzgar hızından yüksek olması durumunda, rüzgar türbini devreye girmez. Rüzgar türbinlerinin konumlandırılacağı alanın tespit edilebilmesi için, alanda belli periyotlar ile rüzgar hız ölçümleri gerçekleştirilir. Rüzgar türbinleri üç temel kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, pervane, kule ve nacelle'dan oluşmaktadır. Pervane kısmı hub, shaft ve kanatlardan oluşmaktadır. Nacelle kısmında ise dişli kutusu, generatör, hidrolik sistemler, elektronik cihazlar ve diğer donanımlar bulunmaktadır. Rüzgar, türbinin kanatlarına çarpar ve dönmeye başlar. Dişli kutusu, düşük hızlı dönen shaftı yüksek hızlı shafta dönüştürür ve generatörün nominal hızına yakın dönmesini sağlar. Dönen generatör mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirerek şebeke aktarır.

Rüzgar türbinlerinde şebeke standartlarına uygun ve optimum seviyede güç üretimi için rüzgar türbin-generatör sisteminin modelleme ve kontrol işlemlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. İlk olarak rüzgar türbinlerinde en optimum rüzgar hızını elde etmek için yaw kontrol sistemi incelenecektir. Yaw kontrol sistemi, rüzgar türbinin nacelle kısmını 360 derece döndürerek en uygun rüzgar hızının elde edilmesini sağlar. İkinci olarak kanat açısı kontrolüdür. Rüzgar hızı, nominal rüzgar hızının üzerinde olması durumunda kanat açısı düzenlenir. Böylece nominal gücün üzerinde bir güç üretilmesi engellenir. Şebeke standartlarına uygun ve kontrollü bir güç akışı için, rüzgar türbinlerinde kullanılan çift beslemeli asenkron generatörlerinde modellemesi ve kontrol işlemlerinin yapılması gerekmektedir.

Çift beslemeli asenkron generatörlerin stator terminalleri doğrudan şebekeye, rotor terminalleri ise frekans dönüştürücüsü üzerinden şebekeye bağlanır. Frekans dönüştürücü, şebeke ve generatör tarafı olmak üzere iki adet dönüştürücüdür oluşmaktadır. Çift beslemeli asenkron generatörler senkron altı ve üstü

çalışabilmektedir. Senkron altı çalışması durumunda, şebekeden frekans dönüştürücüsüne doğru bir güç akışı olur.

Senkron üstü çalışması durumunda ise, frekans dönüştürücüsünden şebekeye doğru bir güç akışı olur. Bundan dolayı çift beslemeli asenkron generatör genellikle senkron üstü çalıştırılmak istenir.

Çift beslemeli asenkron generatör modelleme aşamasında stator gerilim ve akı oryantasyonları kullanılır. Böylece üç fazlı sistem iki fazlı DQ eksen takımına indirgenir. Şebeke tarafı dönüştürücü kontrolünde stator gerilim oryantasyonu kullanılarak üç fazlı sistem DQ eksen takımına indirgenir. Senkron referans frame d-eksen referans frame hizalanır. Böylece gerilimin d bileşeni şebeke gerilimine, q bileşeni ise sıfıra eşit olur. Sonuç olarak, her bir bileşen ile bir parametre kontrol edilir. D bileşeni ile DC-link gerilimi, q bileşeni ile de ihtiyaç haline reaktif güç desteği kontrol edilir. Generatör tarafı dönüştürücü kontrolünde stator akı oryantasyonu kullanılarak üç fazlı sistem DQ eksen takımına indirgenir. Stator akı vektörü, q eksene hizalanması ile senkron bir şekilde dönen referans frame elde edilir. Böylece stator taraftaki aktif ve reaktif güç ayrı ayrı kontrol edilebilir. Rotor akımının D bileşeni ile statorun aktif gücü, q bileşeni ile statorun reaktif gücü kontrol edilmektedir. Hem şebeke tarafı hem de generatör tarafı dönüştürücü de kaskad yapıli kontrol yöntemi kullanılmıştır.

Rüzgar türbinlerinde 4 farklı çalışma bölgesi mevcuttur. 1. bölge düşük rüzgar hızı (rüzgar hızı $< 3 \text{ m/s}$) ve 4. Bölge ise yüksek rüzgar hızından (rüzgar hızı $> 22 \text{ m/s}$) dolayı rüzgar türbini devreye girmez. Rüzgar hızı, nominal rüzgar hızından düşükse mümkün olan maksimum güç üretilmesi için maksimum güç noktası izleme kontrolü yapılır. Bu bölgede yeterli rüzgar hızı olmadığından dolayı kanat açısı sıfıra eşittir. Ancak generatör hızı ayarlayarak optimum uç hız oranı elde edilir. Sonuç olarak en uygun güç katsayısı elde edilir. Böylece mümkün olan güç üretilmesi sağlanır. Rüzgar hızı, nominal rüzgar hızının üstüne çıkması durumunda rüzgar türbini 3. bölgede çalışmaya başlar. Bu çalışma bölgesinde, rüzgar türbini kontrol sistemi kanat açısını düzenleyerek nominal gücün üzerinde güç üretilmesine izin vermez. Bu bölgede şebekeye doğru nominal güç akışı olur.

Tez kapsamında, rüzgar türbin-generatör sistem modellemesi ve kontrolü MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilecektir. İlk olarak şebeke tarafı dönüştürücü sonrasında da generatör tarafı dönüştürücüsünün modellemesi ve kontrolü yapılacaktır. 2. ve 3. çalışma bölgeleri dikkate alınarak MATLAB ortamında geliştirilen model üzerinde maksimum güç noktası izleme ve kanat açısı kontrolleri eklenecektir. Maksimum güç noktası izleme kontrolünde gerekli olan güç katsayısının elde edilmesi için uç hız oranı ve kanat açısının düzenlenmesi gerekir. Uç hız oranı ve güç katsayısı grafiklerine bağlı olarak en optimum güç katsayısı elde edilir. Böylece rüzgar türbinleri nominal rüzgar hızının altında iken mümkün olan en yüksek güç üretimini sağlar. Kanat açısı kontrolünde de, rüzgar hızına bağlı olarak kanat açısı düzenlemesi yapılır. Sonuç olarak rüzgar türbinin nominal gücün üzerinde güç üretmesi engellenir. MATLAB ortamında geliştirilen model üzerinde maksimum güç noktası izleme ve kanat açısı kontrol yöntemleri eklendikten sonra rüzgar türbin-generatör sistem davranışını incelemek için simülasyon çalışmaları yapılacaktır.

İlk olarak sistemin performans analiz testleri için, çift beslemeli asenkron generatör senkron altı, senkron üstü ve hem senkron altı hem de senkron üstü çalıştırılacaktır.

Her bir çalışma durumu için simülasyon çalışmaları yapılarak sistemin davranışı ve performansı değerlendirilecektir. Bu analizlerden sonra, maksimum güç noktasını izleme ve kanat açısı kontrollerini test etmek için MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen model üzerinde gerekli rüzgar hızları ayarlanacaktır. Her bir kontrolü test etmek için ayrı ayrı simülasyon çalışması yapılacaktır.

Çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbinleri dengesiz şebeke koşullarında ciddi zorlanmalarının yanı sıra kontrol sisteminin işlevliğini de olumsuz yönde etkilemektedir. Şebeke gerilim genliği, frekans ve faz sırasının standartlarda belirtildiği sınırlar içinde olması durumunda güç akışı sağlanır. Ancak bu sınırların dışına çıkması durumunda rüzgar türbinlerinin zarar görmesi engellemek için kontrol yöntemleri ve koruma sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu kapsamda tez çalışmasında, şebeke geriliminin düşmesi durumunda rüzgar türbin-generatör sisteminin davranışını incelemek için simülasyon çalışmaları yapılacaktır. Bu kapsamda üç adet kontrol yöntemi geliştirilecektir. Birinci kontrol yönteminde arıza süresi boyunca şebeke ve generatör tarafı dönüştürücülerin akım kontrolör katsayıları güncellenmesi, ikinci kontrol yönteminde arıza süresi boyunca crowbar koruma sisteminin devreye girmesi ve son olarak ta hem crowbar hem de chopper koruma sisteminin devreye girmesidir. Her bir kontrol yöntemi için ayrı ayrı çalışma senaryoları geliştirilmiştir. Bu çalışma senaryolarına bağlı olarak simülasyon çalışmaları yapılacaktır.

İlk olarak şebekeye doğru nominal güç akışında, şebekede %25 gerilim düşümü olması durumunda, rüzgar türbin-generatör sisteminin davranışı incelenecektir. Şebeke gerilimi 0.9pu'nun altına düşmesinden dolayı şebeke gerilim arızası ortaya çıkar. Arızanın ortadan kalkmasından sonra tekrardan rüzgar türbini şebekeye doğru nominal güç akışına devam eder. Bu koşullara bağlı olarak %25 gerilim düşümünde simülasyon çalışmaları yapılacaktır.

İkinci olarak şebekeye doğru nominal güç akışında, şebekede %50 gerilim düşümü olması durumunda rüzgar türbin-generatör sisteminin davranışı incelenecektir. Bu süreçte, ilk simülasyon çalışmasındaki gibi şebeke ve generatör tarafı dönüştürücü kontrol sistemlerinde mevcut akım kontrolör katsayıları kullanılarak analiz çalışmaları yapılacaktır. İkinci simülasyon çalışmasında ise arıza süresi boyunca akım kontrolör katsayıları güncellenecektir (Yöntem 1). Arıza ortadan kalktıktan sonra rüzgar türbini tekrardan nominal güç akışına devam eder. Her iki simülasyon çalışması için performans değerlendirilmesi yapılacaktır.

En son olarak ta şebekeye doğru nominal güç akışında, şebekede %75 gerilim düşümü olması durumunda, rüzgar türbin-generatör sisteminin incelenecektir. Simülasyon çalışmaları yapılmadan önce, MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen model üzerine crowbar ve chopper koruma sistemleri eklenecektir. Bu hususta, crowbar ve chopper koruma sistemleri için çalışma senaryoları (Yöntem 2 ve 3) ve donanım alt yapısı geliştirilecektir. İlk simülasyon çalışmasında, %75 gerilim düşümü olması durumunda sistem modeli üzerinde sadece crowbar koruma sistemi olacaktır. İkinci

simülasyon çalışmasında da sistem modeli üzerinde hem crowbar hem chopper koruma sistemleri eklenerek tekrardan simülasyon çalışmaları yapılacaktır.



SYSTEM BEHAVIOUR ANALYSIS AGAINST NETWORK VOLTAGE DROPS AND MODELING, CONTROL OF WIND TURBINE-GENERATOR SYSTEMS

SUMMARY

In recent years, energy production demands connected to renewable energy sources has increased because of the environmental impacts of fossil fuels and climate change policies. Wind is one of the most developing source of renewable energy sources. Wind energy converts to mechanical energy through wind turbine systems. Then, mechanical energy is converted to electrical energy by generator. Finally, it is presented to use consumer. Wind turbine is quite important due to cost efficiency and clean energy production for nowadays.

Wind turbines run at certain wind speed because of design criteria. Thus, location of wind turbines has a great importance. If wind speed is inadequate or excessive, wind turbine don't run. First, wind speed measurements are carried out at certain intervals for place where wind turbine will be position.

Wind turbines consist of three basic parts. These are propeller, tower and nacelle. The propeller' part consist of hub, shaft and blades. There are gearbox, generator, hydraulic systems, electronic vehicles and other equipments in nacelle' part. The wind hits the blades of turbine and starts spinning. Gearbox converts from low speed rotating shaft to high speed rotating shaft so it provides that high speed shaft closely rotates to nominal generator speed. Mechanical energy is converted to electrical energy by rotating generator. Then, it flow to network in a controlled way.

Modeling and control processes of some systems are carried out for complying with network standards and power generation at optimum level. First, yaw control system is used to obtaining necessary wind speed at wind turbine. It provides to necessary wind speed by rotating to wind turbine' nacelle part. Secondly, control process of blade angle should be done to adjust to blade angle. As a result of this, it do not allow that wind turbine generate of power above rated power. Designer must done modeling and control of double fed induction generator considering network standards and power generation at optimum level

Stator terminals of double fed induction generators directly connect to network. Rotor terminals of double fed induction generators connect to network through frequency converter. Double fed induction generators can be run sub-synchronous or upper-synchronous. When double fed induction generator is run sub-synchronous, frequency converter draw at certain level power from network.

However, when double fed induction generator is run upper-synchronous, the power flows to network through frequency converter. Thus, double fed induction generators are often requested to be operated in the upper-synchronous.

Frequency converters consist of two converters. These are grid-side and generator-side converters. We use modeling of double fed induction generator to stator voltage and flux orientation. Thanks to this orientation, three phase model of double fed induction generator is reduced two phase (DQ). Control of grid side converter is used stator voltage orientation. Synchronous reference frame is align to d-axis reference frame. As a result of this, the d component of voltage equal to network voltage, the q component of voltage equal to zero. The DC-link voltage can be controlled by the d component of voltage. Moreover, exchange reactive power between frequency converter and network can be controlled by the q component of voltage. Control of generator side converter is used stator flux orientation. Stator flux vector is align to q-axis reference frame. As a result of this, synchronous rotating reference frame can be obtained. Stator active power can be controlled by d component of rotor current. Moreover, stator reactive power can be controlled by q component of rotor current. So, stator active and reactive power can be controlled separately. Cascad control method is used for either grid-side or generator side converter.

There are four operation zone at wind turbines. Wind speed is low in first operation zone (wind speed < 3m/s). Thus, wind turbines don't run. Similarly, when wind speed is high in fourth operation zone (wind speed > 22m/s), it don't run. If wind speed is lower than rated wind speed (3m/s < wind speed < 12m/s), wind turbines should do control of maximum power point track in order to generating highest possible power. This operation zone is second zone. Because wind speed is insufficient at second zone, blade angle equal to zero. However, Optimum tip speed ratio can obtained by adjusting generator speed. As a result of this, necessary power coefficient is calculated. Depending on power coefficient, the highest possible power is produced. If wind speed is higher than rated wind speed, wind turbine runs at third operation zone (12m/s < wind speed < 22m/s). Wind turbine isn't allow generation of power above rated power by adjusting blade angle in this operation zone. Wind turbine provides rated power to network in the third operation zone.

In my thesis, modeling and control of wind turbine-generator system will be carried out on MATLAB/Simulink environmental. Firstly, modeling and control of grid-side and generator side converters are carried out. Control processes of maximum power point tracking and blade are added on the model that developed to MATLAB/Simulink angle taking into account 2. ve 3. operation zone. Tip speed ratio and blade angle are calculated to necessary power coefficient of maximum power point track' control. Optimum power coefficient can be obtained depending on tip speed ratio and blade angle. As a result of this, if wind speed is lower than rated wind speed, wind turbines generate the highest possible power. Blade angle adjust through blade angle' control depending on wind speed. Thanks to blade angle' control, it don't allow that wind turbine produce power above rated power. After control of maximum power point track and blade angle are added on the model that developed to MATLAB/Simulink enviromental, simulation will be performed to examine to system behaviour.

In my first analysis, after all control methods are added on system model, some simulation test will be done. When double fed induction generator runs sub-upper-sub/upper synchronous, Simulation studies are done for each of these in order to realize to system behaviour and testing control methods.

After these analyzes, simulation tests are done for maximum power point tracking control and blade angle control. For these simulation, wind speed will be regulated on system model that developed to MATLAB/Simulink environmental. As a result of these test, performance evaluation will be performed for maximum power point tracking control and blade angle control.

Wind turbine provides power to network accordance to network standards. Network voltage amplitude, frequency and phase sequence must be within the limits specified in the standards. Network voltage must be between 0.9pu and 1.1pu. When it become to this range, wind turbine can provides rated power to network. However, when it goes beyond these limits, wind turbine can't provides power to network.

In my second analysis, when network voltage drop at certain time, simulation studies will be performed to investigate wind turbine-generator system behaviour. Control methods are developed for this simulation studies. At first control method, current controller coefficients of grid side and generator side converter control system will be updated during fault. At second control method, crowbar protection system will be activated during fault. Finally, either crowbar or chopper protection system will be activated during fault. After eliminating the fault, Three control methods is deactivated. Analysis will be done on system model depending on three control method and operation scenarios.

In my first simulation depending on voltage drop, the network voltage will be reduced by 25%. System behaviour will be research in case of 25% voltage drop. Because of network voltage drop at below 0.9pu, network voltage fault occurs. After eliminating the fault, wind turbine provides rated power to network through control system. Taking into account these conditions, analyzes will be done in case of 25% voltage drop.

In my second simulation depending on voltage drop, the network voltage will be reduced by 50%. System behaviour will be research in case of 50% voltage drop. In this process, as first simulation studies, available current controller coefficients will be used for grid side and generator side converter control system. Secondly, current controller coefficients will be updated during fault (Method 1). After eliminating fault, wind turbine continue to power flow to network again. Performance evaluation will be performed each simulation.

Finally, the network voltage will be reduced by 75%. System behaviour will be research in case of 75% voltage drop. Before simulation studies is not done, crowbar and chopper protection systems are added on system model. Operation scenario (Method 2 and 3) ve equipment infrastructures are developed to crowbar and chopper protection systems. First stage, when the network voltage will be reduced by 75% during fault, fault is eliminated by activating to crowbar system. Crowbar system only is added on system model at this stage. Second stage, when the network voltage will

be reduced by 75% during fault, fault is eliminated by activating to crowbar and chopper systems. Either crowbar system or chopper system is added on system model at this stage.



1. GİRİŞ

17. ve 18. yüzyılda hidro elektrikle birlikte en çok kullanılan enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi insanoğlu tarafından yıllarca kullanıldı. 19 yüzyılın sonlarında, yel değirmenleri kullanılarak elektrik üretimi için deneyler yapılmaya başlandı. 1972'deki uluslararası petrol krizinin gerçekleşmesiyle birlikte büyük ölçekte yenilebilir enerji kaynakların kullanılmasına yönelik kararlar alındı. Yenilebilir enerji kaynaklarında en hızlı büyüme rüzgar enerjisinde olmuştur.

Bugün rüzgar enerjisi elektrik piyasaları içinde önemli bir daldır. Ancak yeni rüzgar türbinlerini sadece enerji kazancı olarak düşünmemek gerekir. Çünkü yeni rüzgar türbinleri maliyet verimliliği, çevreye olan etkisi ve elektrik şebekeleri üzerindeki olumlu etkileri düşünüldüğünde günümüz için oldukça önemlidir. Çevresel kirlilikten dolayı ortaya çıkan iklim değişikliği ve biyolojik çeşitliliğin azalması gibi sorunlar, birçok ülkede hükümet düzeyinde rüzgar enerji santrallerinin kurulmasını sebep olmuştur. 2020 yılına kadar, Avrupa tarafından tüketilen gücün %20'sini büyük çapta deniz üstü rüzgar çiftliklerinden elde edileceğini dair raporlar yayınlanmıştır [1,3,37]. Türkiye'de de Enerji Bakanlığı tarafından 2017 yılında 1 GW'lık rüzgar enerji ihalesi yapılmış ve üretim çalışmalarına başlanılmıştır. Buna ek olarak 2018 yılında da 1.2 GW'lık deniz üstü rüzgar ihalesi için Enerji Bakanlığı firmalardan başvuruları almıştır. Bundan sonraki süreçte de rüzgar enerjisinden elektrik üretilmesi için gerekli olan yatırım ve teşviklerin yapılacağı Enerji Bakanlığı tarafından belirtilmiştir.

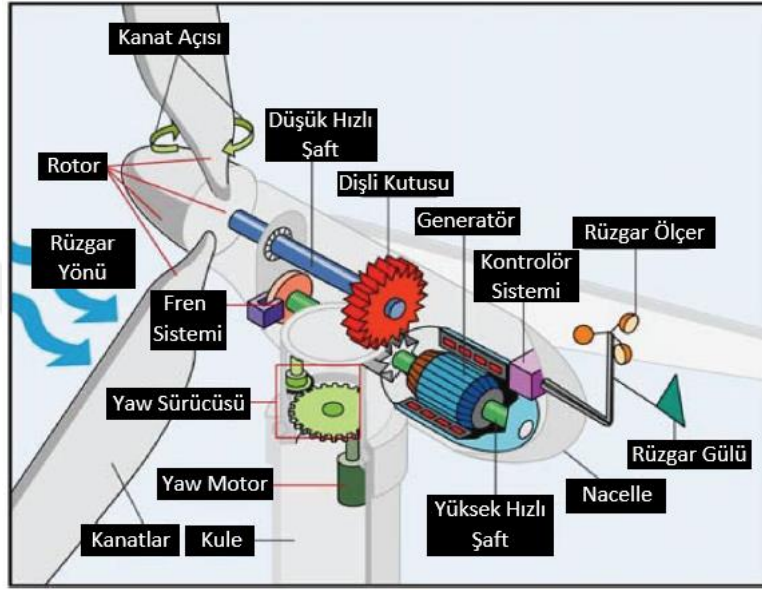
Bu sebeplerden ötürü tez çalışmasında, rüzgar türbin – generatör sistemin modellenmesi, kontrolü ve şebeke gerilim düşmelerine karşı sistem davranışının analizini yapmak için simülasyon çalışmaları yapılacaktır.

1.1 Rüzgar Türbinleri Hakkında Genel Bilgiler

Bu bölümde rüzgar türbinlerinde kullanılan donanım yapısı, farklı türdeki rüzgar türbinleri ve çalışma bölgeleri hakkında bilgiler verilmiştir.

1.1.1 Rüzgar türbinlerinin donanım yapısı

Rüzgar türbinleri üç temel kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; pervane, kule ve nacelle olarak sıralanabilir. Pervane kısmında, hub, şaft ve kanatlar bulunmaktadır. Dişli kutusu, generatör, hidrolik sistemler elektronik cihazlar ve diğer donanımlar, pervane ile bağlantılı olan nacelle içinde bulunur. Rüzgar türbinlerinin temel donanımları Şekil 1.1’de gösterilmiştir [1,2].



Şekil 1.1: Rüzgar türbini-generatör sisteminin donanımları [6]

Rüzgar türbini – generatör sisteminde sürücü sistemi kanatlar, düşük hızlı şaft, dişli kutusu, yüksek hızlı şaft ve generatör kısımlarından oluşur. Düşük hızlı şaft, dişli kutusuna (paralel veya planeter eksenli) bağlantılı iken, yüksek hızlı şaft generatöre bağlanır. Rüzgar türbini sistemlerinde elektrik enerjisinin üretilmesi süreci:

- Rüzgar, türbinin kanatlarına çarpar ve dönmeye neden olur. Düşük hızlı şaft dönmeye başlar.
- Dönen düşük hızlı şaft, dönme hızını artıran dişli kutusuna kinetik enerjiyi aktarır.
- Yüksek hızlı şaft, generatörün nominal hıza yakın dönmesini sağlar.
- Dönen generatör, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür [1].

Genellikle generatörün çıkış gerilimi düşük olduğundan dolayı bir transformatör kullanılır. Böylece generatörün çıkış gerilimi istenilen seviyeye yükseltilir [4].

Rüzgar türbinlerinde rüzgarı optimum seviyede kullanabilmek için, rüzgar yönü tespit edilmeli ve kanatların doğru yönden rüzgarı alması gerekmektedir.

Rüzgar türbinlerinde yön değiştirme işlemini yaw sistemi gerçekleştirir. Yaw sistemi, rüzgarının yön durumuna göre nacelle kısmını döndürür. Aşırı fırtınalı hava koşullarında, mekanik zorlanmalara karşı rüzgar türbini sürücü sistemini korumak için yüksek hızlı şaft kısmı acil mekanik frenleme ile donatılmalıdır [1].

Rüzgar türbinlerinde, sincap kafesli asenkron generatörler, çift beslemeli asenkron generatörler, senkron generatörler veya kalıcı mıknatıslı senkron generatörler kullanılmaktadır [4].

Ek olarak, rüzgar türbinlerinde kanatları kontrol etmek için dahili kontrol sistemleri mevcuttur. Pervane kısmında hub ile bağlantılı olan kanatları döndürmek için pitch motor ve sürücüleri monte edilir. Bu motorlar ve dahili kontrol sistemleri kanatların pitch açısını değiştirebilir. Muhtemel sıkıntılı durumlarda (yüksek rüzgar hızı vs.) pitch açısı değiştirilerek kanatlar yeni konumlarına getirilir. Böylece pervane kısmı frenlenebilir [1,2].

Rüzgar türbinlerini – generatör sisteminin diğer donanımları rüzgar gülü, soğutma fanı ve birtakım sensörler şeklinde sıralanabilir. Bu sensörler anemometre, gerilim ve akım sensörleridir. Rüzgar gülü, rüzgar yönünü ölçer ve yaw kontrol sistemine bu bilgiyi iletir. Yaw sistemi, bu bilgiye bağlı olarak rüzgar türbinin yönünü ayarlar. Elektrik soğutma fanları dişli kutusu, generatör, güç dönüştürücüleri, kontrol sistemlerini soğutmak için kullanılır. Anemometre, maksimum gücü izlemek veya koruma amaçlı rüzgar hızını ölçmek için kullanılan bir sensördür. Rüzgar hızı anlık olarak ölçülür ve belli bir örnekleme ile dahili kontrol sistemine iletir. Böylece düşük veya yüksek rüzgar hızlarında rüzgar türbini sisteminin çalışmasına izin verilmez. Rüzgar türbini sisteminde akım ve gerilim sensörleri kontrol amaçlı kullanılmaktadır [1]. Örneğin; generatörün kontrol edilmesi için akım ve gerilim bilgilerinin güç dönüştürücü kontrol sistemine iletilmesi gerekmektedir. Güç dönüştürücüsü, bu bilgileri kontrol sürecinde kullanır ve generatörün kontrolü sağlar.

1.1.2 Rüzgar türbinlerinin farklı modelleri

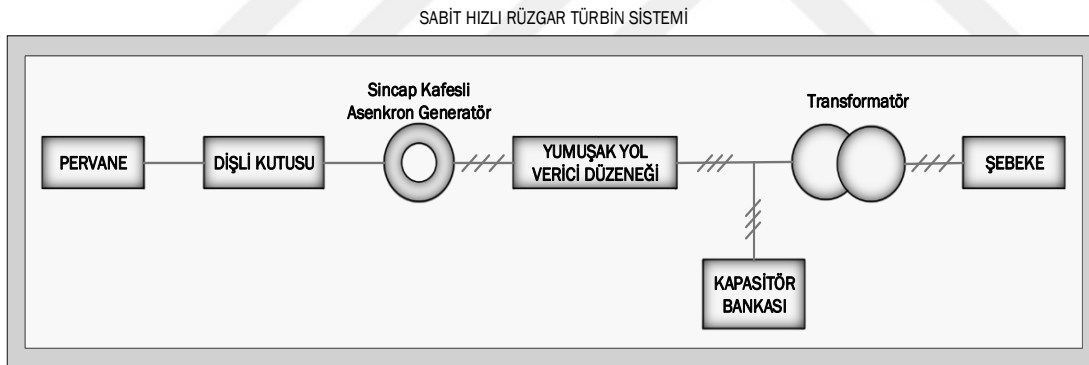
Rüzgar türbini santralleri sabit ve değişken hızda çalışabilir. Sabit hızda çalışan rüzgar türbinlerinde, generatör doğrudan şebekeye bağlanır. Hız neredeyse şebeke frekansına sabitlenir ve kontrol edilemez.

Bu yüzden rüzgar türbülansı olması durumunda sabit hızda çalışan rüzgar türbinlerinde güç değişimleri olur ve şebekenin güç kalitesi olumsuz etkilenir.

Değişken hızlı rüzgar türbinleri güç elektroniği ekipmanları ile kontrol edilir. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde rüzgar değişimi sonucu oluşan güç dalgalanmaları rotor hızı değiştirilerek azaltılır[5]. Rüzgar türbini sistemleri, çalışma hızlarına ve güç dönüştürücüsünün yapısına göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

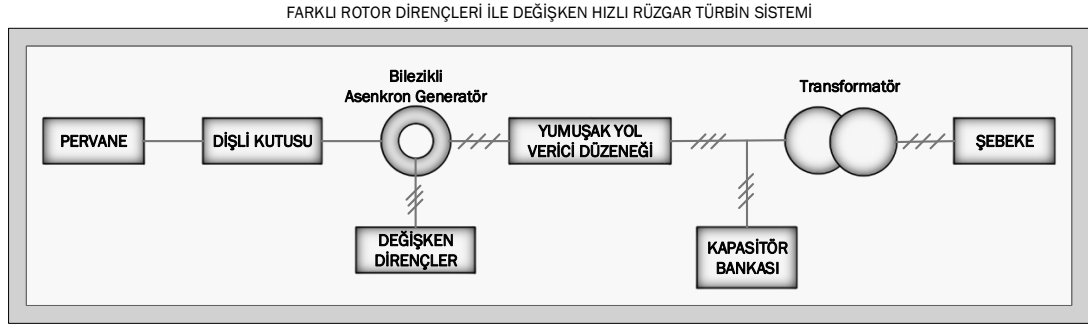
- Sabit hızlı rüzgar türbini sistemleri
- Farklı rotor dirençleri ile değişken hızlı rüzgar türbini sistemleri
- Kısmi ölçekli güç dönüştürücüsü ile değişken hızlı rüzgar türbini sistemleri
- Tam ölçekli güç dönüştürücüsü ile değişken hızlı rüzgar türbini sistemleri [6]

Sabit hızlı rüzgar türbinlerini sisteminde sincap kafesli asenkron generatörler kullanılır. Sincap kafesli asenkron generatörler bir transformatör ile şebekeye doğrudan bağlanır. Sincap kafesli asenkron generatörler sürekli şebekeden güç çekmesinden dolayı, reaktif güç kompanzasyonu için kapasitör bankaları kullanılmalıdır. Reaktif güç kontrolü yapılmadığından dolayı reaktif güç tüketimine, hız ve tork kontrolü olmadığından dolayı da, rüzgar dalgalanmaları mekaniksel dalgalanmalara ve en sonunda da elektriksel dalgalanmalara neden olur. Sabit hızlı rüzgar türbini sisteminin genel yapısı Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



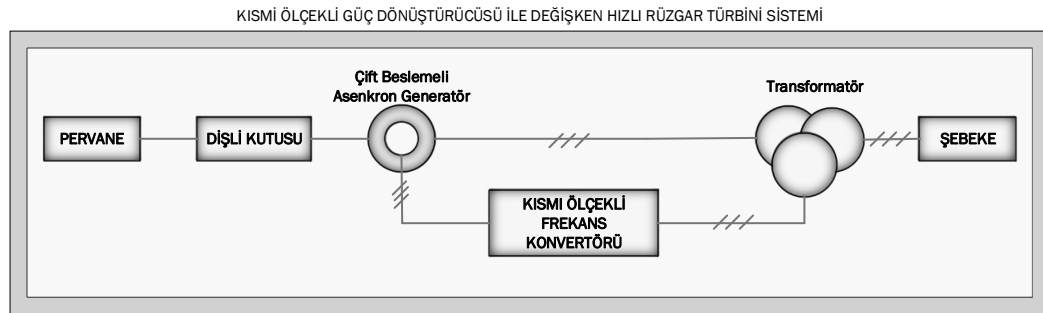
Şekil 1.2: Sabit hızlı rüzgar türbini sisteminin genel yapısı

Farklı rotor dirençleri ile değişken hızlı rüzgar türbini sistemlerinde bilezikli asenkron generatörler kullanılır. Bilezikli asenkron generatörler bir transformatör ile doğrudan şebekeye bağlanır. Generatörün rotor terminallerine seri olarak kontrollü dirençler bağlanır. Toplam rotor direnci değiştirilerek kayma ve çıkış gücü kontrol edilebilir. Seri dirençlerin sınırından dolayı hız aralığı değişimi genellikle küçüktür. Genellikle senkron hızın % 0 -10 üzerinde bir değişim yapılabilmektedir. Farklı rotor dirençleri ile değişken hızlı rüzgar türbini sisteminin genel yapısı Şekil 1.3’te gösterilmiştir.



Şekil 1.3: Farklı rotor dirençleri ile değişken hızlı rüzgar türbini sisteminin genel yapısı

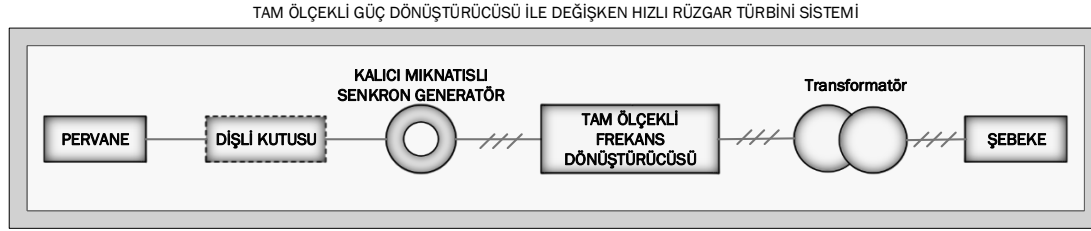
Kısmi ölçekli güç dönüştürücüsü ile değişken hızlı rüzgar türbini sisteminde çift beslemeli asenkron jeneratörler kullanılır. Jeneratörün stator terminalleri bir transformatör ile şebekeye bağlanır. Rotor terminalleri ise frekans dönüştürücüsü (back-to-back konvertörü) üzerinden şebekeye bağlanır. Böylece rotor hızı kontrol edilebilir. Çift beslemeli asenkron jeneratörlerde hız aralığı değişimi senkron hızın $\pm\%30$ civarındadır. Güç konvertörün anma gücü ise genellikle sistem gücünün $\%30$ civarındadır. Çünkü, çift beslemeli asenkron jeneratörün rotor gücü kayma ile ilgilidir. Bu sistemde istenilen reaktif güç kompanzasyonu yapılabilmektedir. Bu sistemin temel dezavantajı, slip ring kullanılması ve şebeke hatalarında koruma planları olarak söylenebilir. Kısmi ölçekli güç dönüştürücüsü ile değişken hızlı rüzgar türbini sisteminin genel yapısı Şekil 1.4’te gösterilmiştir.



Şekil 1.4: Kısmi ölçekli güç dönüştürücüsü ile değişken hızlı rüzgar türbini sisteminin genel yapısı

Tam ölçekli güç dönüştürücüsü ile değişken hızlı rüzgar türbini sistemlerinde kalıcı mıknatıslı senkron jeneratörler kullanılır. Stator terminalleri tam ölçekli bir güç dönüştürücüsü ile şebekeye bağlanır. Bu rüzgar türbini sisteminin bazı türlerinde dişli kutusu kullanılmaz. Onun yerine çok kutuplu jeneratörler tercih edilebilir. Bu rüzgar türbini sistemlerinde tam olarak hız kontrolü gerçekleştirilir.

Bu sistemde kullanılan güç dönüştürücüsü sayesinde reaktif güç kompanzasyonu gerçekleştirilebilir. Tam ölçekli güç dönüştürücüsü ile değişken hızlı rüzgar türbini sisteminin genel yapısı Şekil 1.5’te gösterilmiştir [1,7].



Şekil 1.5: Tam ölçekli güç dönüştürücüsü ile değişken hızlı rüzgar türbini sisteminin genel yapısı

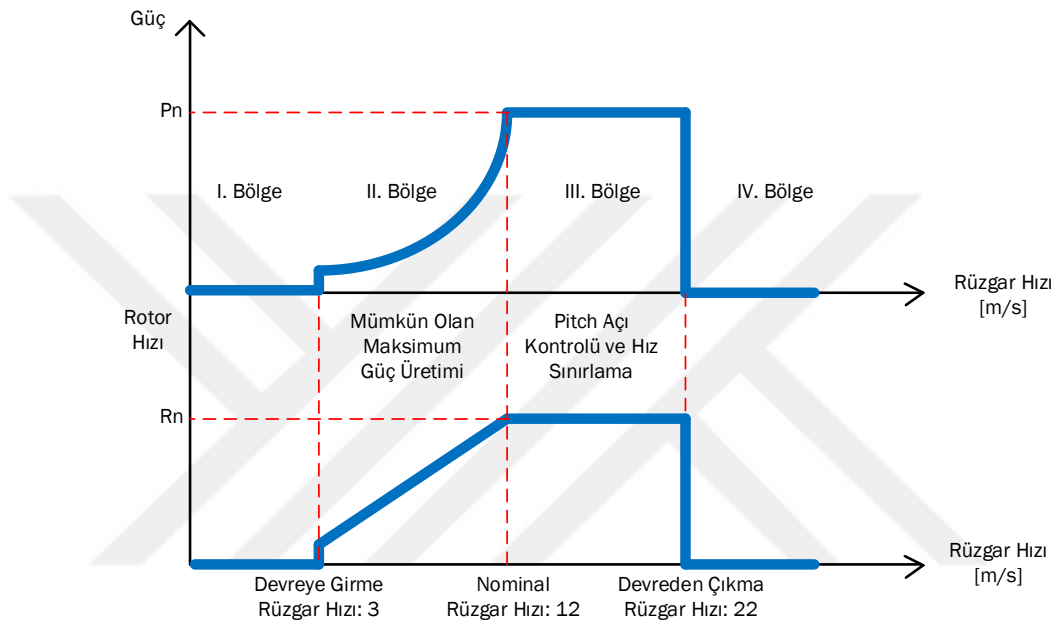
Günümüzde hız, aktif ve reaktif güç kontrolü yapılabilmesi, mekanik gerilmelerin etkisinin az olduğu veya olmadığı, reaktif güç kompanzasyonun yapılabildiği, kısmi ve tam ölçekli güç dönüştürücülü rüzgar türbinleri genellikle kullanılmaktadır. Bu yüzden Tablo 1’de bu iki rüzgar türbinin karşılaştırması yapılmıştır [1,7].

Çizelge 1.1: Çift beslemeli asenkron generatörlü ve kalıcı mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbinlerinin karşılaştırılması [1,6,7,8,9]

Generatör Analiz Koşulları	Çift Beslemeli Asenkron Generatörler	Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör
Generatör – Üretim Maliyeti	Düşük	Yüksek (Kalıcı mıknatıslar)
Aktif ve Reaktif Güç Kontrolü	Mevcut	Mevcut
Hız Kontrolü	Senkron hızın $\pm\%30$	Tam hız kontrolü
Güç Konvertörü - Üretim Maliyeti	Sistem gücünün $\%30$	Sistem gücü
Güç Konvertörü - Kayıplar	Düşük	Yüksek
Güç Konvertörü - Harmonik	Düşük	Yüksek
Dişli Kutusu	Mevcut	İsteğe bağlı
Mekanik Gerilme	Var	Yok
Slip rings	Mevcut	Yok
Bakım	Zor	Kolay
Kontrol	Komplex	Basit

1.1.3 Rüzgar türbinlerinin çalışma bölgeleri

Rüzgar türbinlerinde rüzgar hızına, rotor alanına, kanat tasarımı (pitch açısı) ve hava yoğunluğuna bağlı olarak enerji elde edilir [11]. Rüzgar enerjisinden elde edilen kinetik enerji, mekanik enerjiye sonrasında da elektrik enerjisine dönüştürülür. Anlık rüzgar bilgisine bağlı olarak, rüzgar türbinlerinin çalışma koşulları belirlenir. Rüzgar türbinlerinde çalışma bölgeleri, dört bölge altında incelenebilir. Rüzgar türbinin çalışma bölgeleri Şekil 1.6'da gösterilmiştir.



Şekil 1.6: Rüzgar türbinlerinde farklı çalışma bölgeleri

Bölge 1: Rüzgar türbinleri enerji üretebilmesi için belli bir rüzgar hızına ihtiyaçları vardır. Bu hız değeri, devreye girme rüzgar hızı olarak ifade edilir. Yaklaşık olarak 3.13 ve 4.47 [m/s]'dir [1]. Anlık rüzgar hızının, devreye girme rüzgar hızından düşük olduğu bölgedir. Bu bölgede rüzgar türbini devreye girmediğinden dolayı enerji üretilmez [10].

Bölge 2: Anlık rüzgar hızının, devreye girme rüzgar hızından yüksek ama nominal rüzgar hızından düşük olduğu bölgedir. Bu bölgede rüzgar türbini mümkün olan maksimum gücü elde edecek şekilde çalışmaktadır. Rüzgar hızı arttıkça üretilen güç değeri de artmaktadır. Ancak nominal rüzgar hızına kadar sistemin nominal gücünü üretemez. Bunun yanında, bu bölgede nominal rüzgar hızına kadar şaft hızı yükselir.

Bölge 3: Rüzgar türbinlerinin emniyetli bir şekilde enerji üretebilmesi için belli bir rüzgarın üzerinde çalışmaması gerekmektedir. Aksi takdirde rüzgar türbini zarar görebilir. Bu hız değeri, devreden çıkma rüzgar hızı olarak ifade edilir.

Yaklaşık olarak 22 [m/s]'dir [1]. Anlık rüzgar hızının, nominal rüzgar hızından yüksek ama devreden çıkma rüzgar hızından düşük olduğu bölgedir. Rüzgar hızı, nominal rüzgar hızını aşarsa rüzgar türbininde zarara neden olabilir. Bu yüzden generatör hızı, aero-dinamik tork azaltılarak sınırlandırılması gerekmektedir. Bu sınırlama işlemi kanat açısı (pitch açısı) düzenlenerek yapılır. [1,11].

Bölge 4: Anlık rüzgar hızı, devreden çıkma rüzgar hızından yüksek olduğu bölgeye ifade eder. Rüzgar hızı, devreden çıkma rüzgar hızına ulaştığında, emniyetli olmadığından dolayı rüzgar türbini devreden çıkarılmalıdır. Aksi takdir de rüzgar türbininde ciddi hasarlar oluşabilmektedir [12].

1.2 Literatür Taraması

Bu bölümde, çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbini sistemlerinde daha önceden kullanılmış modelleme, kontrol stratejileri ve farklı güç dönüştürücüleri ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır.

1.2.1 Rüzgar türbin-generatör sistemlerinde modelleme

Rüzgar türbin – generatör sisteminin modellenmesi aero – dinamik, rüzgar türbini sürücü sistemi, çift beslemeli asenkron generatör, güç dönüştürücüsü ve yaw sistemlerinin modellenmesinden oluşmaktadır. Bu sistemlerin modellenmesi üzerine incelemeler yapılmıştır.

- *Aero - dinamik model:*

Rüzgar türbini güç üretimi, rüzgar ve türbin rotoru arasındaki etkileşime bağlıdır. Türbinin kanatları hareketle havadan gelen enerji akışını alır ve dönme enerjisine dönüştürür. Mekanik sürücüler sayesinde bu enerji generatöre iletilir.

Rüzgar türbini etrafındaki hava akışından rüzgar türbininin ürettiği enerji ve güç değerleri hesaplanır. Üretilen gücün değeri rüzgar hızına, hava yoğunluğuna ve kesit alanına bağlıdır. Sonrasında düzgün hava koşullarında rüzgar türbinlerinde güç katsayısı belirlenir. Bu güç katsayıları rüzgar türbini üreticileri tarafından sağlanmaktadır. En son olarak rüzgar hızına bağlı olarak üretilen aero – dinamik güç değeri hava yoğunluğu, rüzgar türbini rotor yarıçapına, eşdeğer rüzgar hızına ve güç katsayısına bağlıdır. Güç katsayıları belirlenmesinde iki parametrenin değeri dikkate alınır. Bunlar rotor kanat açısı (pitch açısı) ve uç hız oranıdır.

Güç katsayıları optimum çalışma noktasında yaklaşık olarak 0,5 civarında olabilir [13,14]. Bu iki parametre hesaplandıktan sonra güç katsayısı tespit edilir. Bu güç katsayısına bağlı olarak ta aero – dinamik güç değeri hesaplanır [13].

Yüksek rüzgar hızından güç değeri kanat açısını artırılarak nominal güç değerinde sınırlandırılır. Düşük rüzgar hızında ve düşük rotor hızı sınırlıysa, kanat açısının değiştirilmesi güç katsayısını ve rüzgardan elde edilen gücü artırabilir. Güç katsayısı ve uç hız oranı arasındaki ilişki Anderson ve Bose tarafından fonksiyonel olarak ifade edilmiştir. Bu iki parametre arasındaki farklı bir yaklaşımda polinom ile gösterimdir.

Aero – dinamik modelleme de lineerleştirme avantajları;

- Net fiziksel ilişkiyi gösteren parametrelerin kullanılması
- Başlangıç değerlerinin doğrudan kullanılması
- Simülasyon çabalarının azalması [14].

- *Rüzgar türbini sürücü sistem modeli:*

Rüzgar türbinlerinde sürücü sistemleri rotor sistemini generatöre bağlayan tüm iletim donanımlarını içerir. Bu sistemde en yaygın teknoloji yüksek hızlı şaftı generatöre bağlayan bağlantı sistemi, dönme hızını yükseltmek için dişli kutusu ve rulmanlar tarafından desteklenen düşük hızlı şafttan oluşan dolaylı sürücü sistemidir. Son zamanlarda, elektroniğin gelişmesiyle, farklı tipte sürücü sistemler geliştirilmeye başlandı. Üç temel kategoride sınıflandırılabilir:

- Dolaylı sürücü sistemleri
- Hibrid sürücü sistemleri
- Doğrudan sürücü sistemleri [16]

Bir başka çalışmada sabit hızlı generatörlerde rüzgar türbini sürücü sisteminde beş ve iki kütleli model yapısı incelenmiştir. Beş kütleli model de frekans analizi yapılarak öz frekanslar belirlenmiştir [15].

Diğer bir çalışmada, 4 farklı tipte sürücü sisteminin modellenmesi ve karşılaştırılması yapılmıştır. Bu sürücü sistemleri;

- 6 kütleli sürücü sistemi modeli
- 3 kütleli sürücü sistemi modeli
- 2 kütleli sürücü sistemi modeli
- 1 kütleli sürücü sistemi modeli

Bu sürücü sistem modellerinde, sürücü parametreleri (atalet, yay ve sönümleme sabitleri) araştırılmıştır [17].

Başka bir çalışmada, sürücü sisteminin sönümlleme etkisinin aktif güç çıkışına salınımları üzerine incelemeler yapılmıştır. İki kütleli sürücü sistemi modeli, geçici analizler ve model karmaşıklığının doğruluğu arasındaki iyi bir denge sağlamaktadır. İki kütleli model yapısının incelemesi ve etkileri incelenmiştir [18].

En son olarak ta, bir çalışmada yatay eksenli rüzgar türbinlerinde kontrol performansı üzerinde sürücü sisteminin esnekliğinin etkisinin incelenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. 1, 2 ve 3 kütleli sürücü modellemesi yapılmış ve kontrol performansı üzerine etkileri incelenmiştir [19].

- *Çift beslemeli asenkron generatör modeli:*

Çift beslemeli asenkron generatörler 3 farklı türde sıralanabilir. Bunlar, standart çift beslemeli asenkron generatörler, ardarda bağlanmış çift beslemeli asenkron generatörler ve fırçasız çift beslemeli asenkron generatörlerdir [5].

Çift beslemeli asenkron generatörün modellenmesinde kullanılan yöntemlerinden biri referans frame sistemidir. Bu yöntem senkron referans frame olarak ta bilinir. DQ eksen sisteminin bu türü stator akısı ile hizalanır. Böylece sistemin matematiksel eşitliklerinin karmaşıklığı azaltılır. DQ eksen takımına dönüşüm yapıldıktan sonra, dq notasyonlu stator ve rotor tarafındaki gerilim, akım ve akı eşitlikleri elde edilir [20]. Çift beslemeli asenkron generatör modeli genellikle stator akısının türevi ihmal edilerek üçüncü dereceden, hem stator hem de rotor akılarının türevleri ihmal edilerek birinci dereceden azaltılmış dereceli model tarafından ifade edilebilir. Literatürde, azaltılmış ve tam dereceli çift beslemeli asenkron generatör modellerinin sistem çıkışlarına olan etkileri incelenmesi üzerine birçok çalışma vardır. İki model arasındaki farkların ortaya konulması açısından bu çalışmalar oldukça önemlidir [1]. Rüzgar türbini sistemlerinde uygulanan çift beslemeli asenkron generatörün dinamik modellemesi geçici kararlılıkta çok önemlidir. Bunun üzerine literatürde rotor dinamik modelin olması veya olmaması durumuna göre sistemin davranışlarının incelenmesi üzerine çalışmalar da yapılmıştır [21].

- *Güç dönüştürücüsü modeli:*

Rüzgar türbinlerinde kullanılan farklı tipte güç dönüştürücüler mevcuttur. Örneğin;

- Frekans dönüştürücüler (AC/DC-DC/AC, back-to-back dönüştürücü)
- Matris dönüştürücüler

Rüzgar türbinlerinde genellikle frekans dönüştürücüleri kullanılmaktadır. Üç fazlı gerilim kaynaklı dönüştürücü modeli kontrol amaçlı olarak abc ve dq eksen takımında ifade edilebilir [1,22]. PWM modülasyon tekniği olarak sinüs veya uzay vektör darbe genişlik modülasyonu teknikleri kullanılmaktadır. Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu, gerilim ve akım kontrolü sürecinde anahtarlama vektör seçim esnekliğinin daha yüksek olmasından dolayı avantajlıdır. Dengesiz koşullarda uzay vektör darbe genişlik modülasyonu ile daha iyi sonuçlar elde edilebilir [23]. Zamanla değişen abc değerlerinden zamanla değişmeyen sürekli hal değerlerini elde etmek için, güç dönüştürücüsü denklemleri çıkış tarafındaki sistemin açısal frekansı dq referans frame aktarılmalıdır. Bu dönüşümü yapılırken bir dönüşüm matrisi kullanılmaktadır. Bu dönüşüm matrisi sayesinde güç dönüştürücüsünün denklemleri abc eksen takımından dq eksen takımına indirgenir. [24].

- *Yaw modeli:*

Gelen rüzgar hızının yönü ile rotor eksenin arasındaki açı yaw açısını ifade eder. Üretilen güç değeri yaw açısının cosinüsüne ($\cos\gamma$) bağlı olarak değişir. Rüzgardan elde edilen güç rüzgarın kütle akışına orantılıdır ve sonuç olarak yaw açısının cosinüsü ile azalır. Yaw açısı sıfırdan farklı olduğunda, rüzgar kanadın ön kenarına dik bir şekilde çarpmaz. Bu yüzden, kanatlar dik akış üreteceği aynı kaldırma kuvvetleri üretmez (kaldırma kuvveti azalır). Eğer gücün hesaplanmasında sadece rüzgarın dik bileşenleri kullanılırsa, yaw açısının cosinüsünün küpü ($\cos^3 \gamma$) ile çarpılarak güç elde edilir. Uç hız oranı düşük olduğunda bu modelin doğruluğu azalır. Daha doğru yaw model sonuçları için hesaplamalı akış dinamikleri kullanılarak yapılabilir [38].

1.2.2 Rüzgar türbin-generatör sistemlerinde kontrol stratejileri

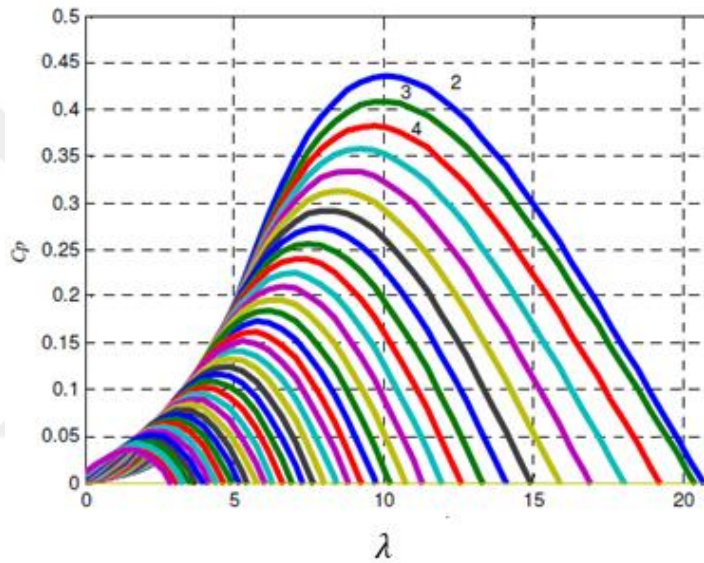
Rüzgar türbini generatör sisteminin güvenli ve optimum performans ile çalışması için kritik öneme sahip bir takım kontrol işlemlerini başarılı bir şekilde gerçekleştirmesi gerekmektedir. Bu kontrol sistemleri aşağıda sıralanmıştır:

- Kanat açısı (pitch açısı) kontrolü
- Yaw kontrolü
- Maksimum güç izleme kontrolü
- Çift beslemeli asenkron generatör kontrolü

Bu bölümde, rüzgar türbini – generatör sistemlerinin kontrol süreçleri ile ilgili yapılan gelişmiş kontrol yöntemleri hakkında incelemeler yapılmıştır.

- *Kanat açısı (pitch) kontrolü:*

Yüksek rüzgar hızlarında, rüzgar türbinlerinde üretilen aero-dinamik gücün kontrolü kanat açısı ve generatörün yükü değiştirilmesi ile gerçekleşir. Rüzgar türbinlerinde aero- dinamik güç değeri güç katsayısının değerine bağlı olarak değişmektedir. Güç katsayısının değeri kanat açısının fonksiyonu olmasından dolayı kanat açısının değişmesi aero – dinamik gücün değişmesine neden olur [25]. Farklı kanat açısı değerlerine karşı gelen güç katsayısı-uç hız oranı grafikleri Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 1.7: Farklı kanat açısı değerleri & güç katsayısı-uç hız oranı grafikleri [26]

Kanat açısında küçük değişimler çıkış gücünü etkileyebilir. Kanat açısının kontrol amacı:

- Nominal rüzgar hızdan düşük rüzgar hızlarında çıkış gücünü optimize etmek
- Nominal rüzgar hızdan yüksek rüzgar hızlarında tasarım sınırlarında rotor gücünü tutmak
- Türbin mekanik bileşenlerin yorulma yüklerini minimize etmek

Geleneksel kanat açısı kontrol yapısında genellikle PI kontrolör kullanılır. Pitch açısı kontrol sürecinde, açısı sınırlayıcılar ve PI kontrolörlü kapalı çevrim bir sistem kullanılır. Farklı kanat açısı değerine bağlı olarak üretilen aero – dinamik güç ve rotor hız değerleri üzerine incelemeler yapılmıştır[26]. PI kontrolün dışında, pitch kontrolünde başka kontrolör yapıları da kullanılmıştır. Örneğin; PID kontrolör, bulanık, bulanık-PID kontrolör yapılarıdır.

Bu kontrolör yapıları karşılaştırıldığında adaptif bulanık – PID kontrolör yapısı ile daha iyi kontrol gerçekleşmiştir. Çünkü, gecikme, yükselme ve yerleşme zamanları daha azdır. Ek olarak tepe aşım değeri de oldukça düşüktür[27].

- *Yaw kontrolü:*

Rüzgar türbinlerinde toplam güç çıkışını maksimum yapmak için, rotor eksenini rüzgar yönü boyunca hizalanmalıdır. Düşey kule eksenini etrafında nacelle'nin döndürülmesi ile hizalama gerçekleşir. İzin verilen sürekli hal düzenleme hatasıyla nacelle'yi rüzgara yönlendirmek için rüzgar gülünden rüzgar yön ölçümleri ve PD veya PID kontrolörler kullanılır. Kontrol sistem performansında ilerlemeyi göstermek ve klasik lineer kontrolör yerine bulanık kontrolör de kullanılmaktadır [28]. Gerçek ve istenen yaw açıları arasındaki uyumsuzluğu minimize etmek için kapalı çevrim sistem yapısı oluşturulur. Kapalı çevrim sistem çıkışından elde edilen bilgiye göre yaw motorları çalıştırılır ve nacelle rüzgar yönüne doğru hareketi sağlanır. Önemli yaw oranı türbin üzerinde büyük yüklere neden olan jiroskopik etkiler üretir. Bundan dolayı jiroskopik etkilerin ihmal edilebilir olması için yaw oranı küçük olması istenir [29].

Bir başka çalışma da yaw kontrolü için geliştirilen algoritmanın adımları:

- Nacelle pozisyonu ve rüzgar yönü arasındaki fark yaw hatasını ifade eder.
- Bu yaw hatası, farklı ortalama süreleriyle üç ortalama birim tarafından ortalaması alınır.
- Ortalama değerlerinden biri önceden tanımlanmış kritik değerden daha büyük ve önceden tanımlanmış kritik zamandan daha fazla sürdüğünde, yaw sistemi aktif edilir ve hedef noktaya hareket eder.
- Yaw hedef noktası ortalama birimlerin çıkışına göre tanımlanır [30].

- *Maksimum güç noktası izleme kontrolü:*

Rüzgar hızı gün boyunca sürekli değişmektedir. Rüzgar hızının değerine bağlı olarak ta çıkış gücü değişmektedir. Eğer anlık rüzgar hızı, devreye girme ve nominal rüzgar hızı arasında ise maksimum güç noktası izleme süreci devreye girer [31]. Maksimum güç noktası izleme kontrol teknikleri aşağıda verilmiştir:

- Uç hız oranı kontrolü
- Optimal tork kontrolü
- Güç sinyali geribesleme kontrolü
- Bozulma & gözlemlenebilirlik kontrolü

- Diğer yöntemler

Uç hız kontrolü; Rüzgar türbinlerinde verilen optimum uç hız oranı rüzgar hızına bakılmaksızın sabittir. Eğer uç hız oranı sürekli sabit tutulursa, çıkış gücünün maksimum olacağı garanti edilir. Referans uç hız oranı, rüzgar ve generatör hızlarının oranı ile kapalı çevrime alınır. Elde edilen hata değeri yok etmek için kontrolör tasarlanır. Böylece uç hız oranı optimum seviyede kalmaya devam eder. Optimal uç hızı oranı korunmasından dolayı, mümkün olan maksimum çıkış gücü elde edilir.

Optimal tork kontrolü; Generatör hızı optimum bir sabit değer ile çarpılarak referans tork değeri elde edilir. Bu referans tork değeri kapalı çevrime alınarak kontrol edilir. Böylece verilen rüzgar hızında maksimum tork referansı göre tork ayarlanır ve mümkün olan maksimum güç elde edilir. Bu yöntem genellikle basit, hızlı ve verimlidir. Ancak verimlilik, uç hız oranı kontrolüne göre düşüktür. Çünkü rüzgar hızı doğrudan ölçülmez.

Güç sinyali geribesleme kontrolü; Optimal tork kontrolünden farklı olarak, referans güç eğrisi deneysel sonuçlardan elde edilir. Maksimum çıkış gücü ve rüzgar türbin hızının veri noktaları lookup tablosuna kaydedilir. Lookup tablosu dönme hızına bağlı olarak optimal güç referansı belirlenir ve kapalı çevrime alınarak kontrol işlemi gerçekleşir [31,32].

Bozulma & gözlemleme kontrolü; Bu kontrol yöntemi Hill Climb Search olarak adlandırılır. Bu yöntem inverter çıkış gücü ve DC link gerilimini algılayarak gücü maksimum yapar. Elektriksel sistemin çıkış gücü ile türbin mekanik gücü arasındaki ilişkiyi kullanarak algoritma oluşturulur [33].

Diğer kontrol yöntemleri; Diğer kontrol yöntemlerindeki problemlerin çoğu yapay zeka ve hibrit yöntemler ile çözülür. Bulanık mantık kontrol yöntemi hızlı yakınsama, parametre duyarsızlığı ve gürültü ve yanlış sinyalleri kabul etme avantajlarına sahiptir. Geleneksel Hill Climb Search için optimal adım boyunun elde edilmesi için de bu kontrol yöntemi kullanılabilir [32].

- *Çift beslemeli asenkron generatör kontrolü:*

Çift beslemeli asenkron generatörlerinde rotor terminal gerilimlerinin düzenlenmesi ile senkron altı ve üstü çalıştırılabilir. Bu sebepten ötürü çift beslemeli asenkron generatörlerin kontrolü komplekstir. Çift beslemeli asenkron generatör kontrolünde birçok yöntem vardır.

Örneğin; vektör kontrolü, doğrudan tork/güç kontrolü, öngörülü kontrol, nonlinear kontrol, sensörsüz kontrol. Bu kısımda alan odaklı kontrol (vektör kontrol) ve doğrudan tork/güç kontrolü üzerine incelemeler yapılmıştır [1].

Alan odaklı kontrol (vektör kontrol): Çift beslemeli asenkron generatörde iki tür alan oryantasyonu vardır. Bunlar; stator gerilim ve stator akı oryantasyonlarıdır. Bu oryantasyonlar sayesinde çift beslemeli asenkron generatörün aktif ve reaktif gücü ayrı bileşenler ile kontrol edilebilir. Stator akı oryantasyonunda q bileşeni ile aktif gücü, d bileşeni ile reaktif güç kontrol edilebilir. Stator gerilim oryantasyonunda ise q bileşeni ile reaktif gücü, d bileşeni ile de aktif güç kontrol edilebilir [1, 34].

Doğrudan güç/tork kontrolü: Doğrudan tork kontrolü temel olarak performansı artırılmış skaler kontrol yöntemidir. Bu kontrol yönteminin temel özelliği optimum inverter anahtarlama vektör seçimi ile doğrudan akı ve tork kontrolü ve dolaylı olarak stator gerilim ve akım kontrolüdür. Doğrudan tork kontrolünün dezavantajı doğası gereği stator akı ve tork dalgalanması ve sonuç parametrelerinin tanımlanmasını gerektiren akı ve tork tahmin edici gerekliliğidir. Biri akı diğer tork olmak üzere iki kontrol döngüsü vardır. Akı kontrolörü, nominal hıza kadar nominal değerde ve nominal hızın üzerindeki hızlarda alan zayıflatma tarafından belirlenen değerde çalışma akısının değerini tutmak için makine çalışma akısını kontrol eder. Tork kontrol döngüsü tork talebini kontrol eder. Bu kontrolörlerin çıkışları akı vektörünün anlık konumu ile birlikte uygun bir gerilim vektörünü seçer. Bu kontrol yönteminde senkron bir şekilde dönen referans frame ihtiyaç yoktur [35, 36].

1.3 Tezin Katkısı

Günümüzde, dünya üzerindeki yenilebilir enerji sektörlerine olan rüzgar türbinin önemi ve yapılan destekler hakkında araştırmalar yapılmıştır. Tez çalışmamda, ilk olarak rüzgar türbinleri hakkında genel incelemeler yapılmıştır. Rüzgar türbinlerin donanım ve çalışma yapısı, modellemesi, kontrol yöntemleri üzerine literatür araştırması yapılmıştır.

İkinci olarak, rüzgar türbin-generatör sistem modellemesi üzerine çalışmalar yapıldı. Bu aşamada rüzgar türbinin aero dinamik ve sürücü sistem modelleri elde edilmiştir. Sonrasında çift beslemeli asenkron generatörün modelinin DQ eksen takımında yazılması, için gerekli adımlar incelendi. Bunun yanında üç fazlı kontrollü bir dönüştürücünün modellemesi yapılmıştır.

Üçüncü olarak, rüzgar türbin-generator sistemi için kontrol stratejileri geliştirilmiştir. Bu süreçte, faz kilitlemeli çevrim kontrolü, frekans dönüştürücüsünün kontrolü, maksimum güç noktası izleme kontrolü ve kanat açısı kontrolü üzerine kontrol yöntemleri geliştirilmiştir.

Dördüncü olarak, rüzgar türbin-generator sistem modeli MATLAB/Simulink ortamında geliştirilmiştir. Çift beslemeli asenkron generatörün senkron altı, üstü ve altı/üstü çalışması durumunda simülasyon çalışmaları yapılarak, sistemin performans analizi yapılmıştır. Ek olarak, maksimum güç noktası izleme ve kanat açısı kontrolleri test etmek için de simülasyon çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

En son olarak, şebeke geriliminin düşmesi sonucunda, sistemin davranışı incelemek için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Şebeke gerilimi düşmesi durumuna karşı, kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Ayrıca arıza durumlarında sistemin koruması için crowbar ve chopper koruma sistemleri tasarlandı. Bu koruma sistemleri için ayrı ayrı çalışma senaryoları geliştirilmiştir.

1.4 Tezin İçeriği

Tez altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm, giriş kısmından oluşmaktadır. Bu bölümde, rüzgar türbinleri hakkında genel bilgi ve rüzgar türbin-generator sistemlerinde modelleme ve kontrol stratejileri üzerine literatür taraması yapılmıştır. İkinci bölüm, rüzgar türbin – generatör sisteminin modellemesi kısmından oluşmaktadır. Bu bölümde, aero-dinamik, sürücü sistem, çift beslemeli asenkron generatör ve frekans dönüştürücüsü modelleri gerçekleştirilmiştir. Üçüncü bölümde, rüzgar türbin-generator sisteminin kontrol stratejileri kısmından oluşmaktadır. Bu bölümde, faz kilitlemeli çevrim, şebeke ve generatör tarafı dönüştürücü, maksimum güç noktası izleme ve kanat açısı kontrol stratejileri geliştirilmiştir. Dördüncü bölüm, rüzgar türbin-generator sistem modelinin performans analizleri kısmından oluşmaktadır. Bu bölümde, çift beslemeli asenkron generatörün senkron altı, üstü, altı/üstü çalışması durumunda performans analizi yapılmıştır. Ek olarak maksimum güç noktası izleme ve kanat açısı kontrol bölgeleri için performans analizi yapılmıştır. Beşinci bölümde, şebeke arızalarında rüzgar türbin-generator sistem modelinin dinamik davranışı kısmından oluşmaktadır. Bu bölümde, %25, %50 ve %75 gerilim düşmesi sonucunda sistemin davranışı incelenmiştir. Son bölüm, sonuç ve öneri kısmından oluşmaktadır.

2. RÜZGAR TÜRBİN – GENERATÖR SİSTEMİNİN MODELLEMESİ

Rüzgar türbinlerinde rüzgar enerjisi çift beslemeli asenkron generatör sayesinde elektrik enerjisine dönüştürülür. Üretilen elektrik enerjisinin şebeke standartlarına uygun elde edilmesi için rüzgar türbini sistemlerinin doğru bir şekilde modellenmesi oldukça önemlidir. Bu bölümde rüzgar türbin-generatör sisteminin modellenmesi yapılacaktır. Bunlar;

- Aero dinamik model
- Sürücü sistem modeli
- Çift beslemeli asenkron generatör modeli
- Frekans dönüştürücü modeli

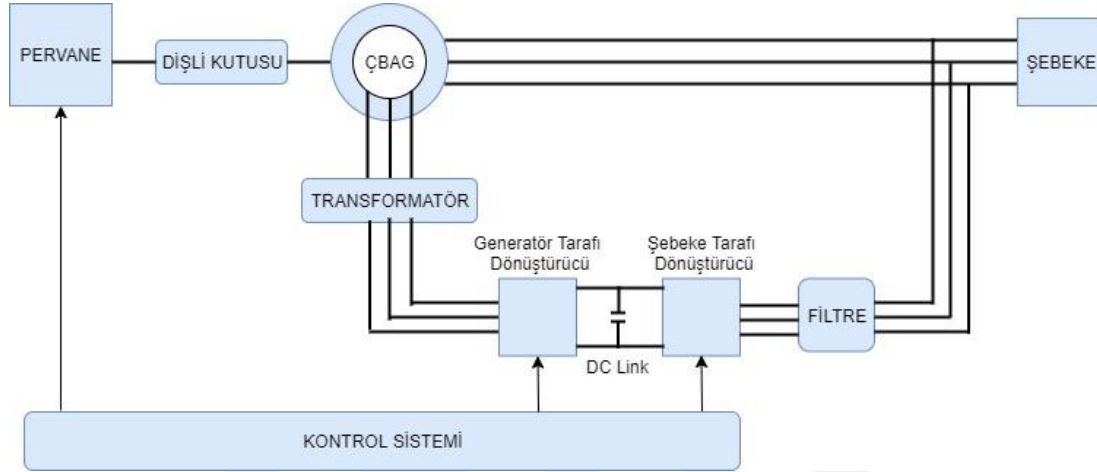
Rüzgar türbinlerinde aero dinamik modelleme ile elde edilen güç ifadesi belirtilmiştir. Güç katsayısının elde edilen güç ifadesine olan etkisi incelenmiş ve güç katsayısını etkileyen uç hız oranı ve kanat açısı parametrelerinden bahsedilmiştir. Literatürde güç katsayısı yaklaşımları gösterilmiştir.

Sürücü sistem modelinde ise, altı kütleli sürücü sistem sistem modelinden iki kütleli sistem modeline geçişten bahsedilmiş ve basitliği ve istenilen hedefleri karşılamasından dolayı iki kütleli sürücü sistem modeli elde edilmiştir.

Çift beslemeli asenkron generatör modeli ilk olarak abc referans frame göre modellenmiştir. Ancak modelin kompleks olmasından dolayı dq eksen takımında eşitliklerin elde edilmesine karar verilmiştir. İlk olarak rotor üzerine sabitlenmiş dq referans frame göre çift beslemeli asenkron generatörün modeli elde edilmiştir. Sonrasında, sırasıyla durağan stator dq referans frame ve senkron bir şekilde dönen dq referans frame göre makine modeli elde edilmiştir. Senkron bir şekilde dönen dq referans frame göre dördüncü dereceden elde edilen makine modeli, ikinci dereceden makine modeline indirgenmiştir.

En son olarak ta, üç faz PWM kontrollü ve gerilim kaynaklı doğrultucu modelinin abc referans frame göre elde edilmiştir.

ABC referans frame göre analiz işlemleri kolay yapılabilmesine rağmen, kontrolör tasarım kolaylığından dolayı dq senkron referans göre de denklemler elde edilmiştir. Değişken hızlı ve çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbini sisteminin gösterimi Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Değişken hızlı ve çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbini sistemi

2.1 Aero-Dinamik Model

Rüzgar türbinlerinde güç üretimi rüzgar ve rüzgar türbini rotoru arasındaki etkileşime bağlıdır. Rüzgar türbinlerinde ilk aero-dinamik analiz Betz ve Glauert tarafından 1920-1930 yılları arasında yapılmıştır. Bu analize göre elde edilen denklem:

$$P_{rüzgar} = \frac{1}{2} \rho A V_{rüzgar}^3 \quad (2.1)$$

ρ : hava yoğunluğu

A : kanat tarafından süpürülen alan

$V_{rüzgar}$: rüzgar hızı

Betz ideal koşullar altında, sonsuz kanatlarla ideal türbin rotoru tarafından maksimum güç elde edilebileceğini kanıtladı. Ancak pratikte, ekonomik ve yapısal koşullardan dolayı rüzgar türbinlerinde iki veya üç kanat bulunmaktadır.

Bu yüzden elde edilen güç mevcut gücün %50'sine yakın olarak elde edilir. Elde edilebilir gücün mevcut güce oranı rotor güç katsayısı olarak ifade edilir.

Elde edilebilir güç ifadesi:

$$P_{rotor} = \frac{1}{2} \rho A V_{rüzgar}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.2)$$

λ : uç hız oranı

β : kanat (pitch) açısı

Elde edilebilir gücün elde edilmesinde önemli parametrelerden biri olan güç katsayısı, uç hız oranı ve kanat açısına bağlı olarak belirlenir. Uç hız oranı, rotor kanat uç hızının rüzgar hızına oranı olarak ifade edilir. Kanat açısında süpürülen alan, genellikle teknik dökümanlarda verilir veya πR^2 ifadesi ile yaklaşık olarak hesaplanır. R , türbin yarıçapı (rotor kanat yarıçapı)'dır [39,40]. Uç hız oranı, rüzgar türbini rotoru tarafından rüzgardan elde edilen gücün değerinin belirlenmesinde önemli bir parametredir. Uç hız oranı ifadesi:

$$\lambda = \frac{w_{rotor} R_{rotor}}{V_{rüzgar}} \quad (2.3)$$

w_{rotor} : rotor açısal hız

R_{rotor} : rotor yarıçapı

$V_{rüzgar}$: rüzgar hızı

Uç hız oranı ve kanat (pitch) açısının hesaplanmasından sonra, rotor güç katsayısı elde edilir. Rüzgar türbinlerinin optimum ve emniyetli işletmesi için kanat açısı değiştirilebilir ve böylece güç katsayısının değeri ayarlanabilir. Böylece güç katsayısı ve elde edilen güç ilişkisinden dolayı güç değerinde de dolaylı olarak düzenleme yapılabilir. Rotor güç katsayısı rotor veriminin bir ölçüsüdür. Güç katsayısının ifadesi:

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{\text{Elde edilen güç}}{\text{Rüzgar güç}} = \frac{P_{rotor}}{P_{rüzgar}} \quad (2.4)$$

Aero-dinamik model, güç katsayı eğrileri (iki boyutlu model) ve güç katsayı eğrileri olmaksızın (lineer model) elde edilebilir.

Güç katsayı eğrilerinin elde edilmesi polinom yaklaşımı ile yapılır. Bu eğriler elde edildikten sonra, her kanat açısı ve tip uç hız oranına karşılık gelen bir güç katsayısı vardır. Lineer model, rüzgar hızı nominal hız civarında olduğunda çok iyi sonuçlar vermez. Bu yüzden genellikle güç katsayısı eğrileri aero-dinamik model elde edilir [40].

Rüzgar türbinlerinde güç katsayısı farklı olasılıklı non-lineer fonksiyonlarla elde edilebilir. En yaygın olarak kullanılan fonksiyonlar:

$$C_p = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2.5)$$

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)^{-1} \quad (2.6)$$

$$C_p = 0.73 \left(\frac{115}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{\frac{18.4}{\lambda_i}} \quad (2.7)$$

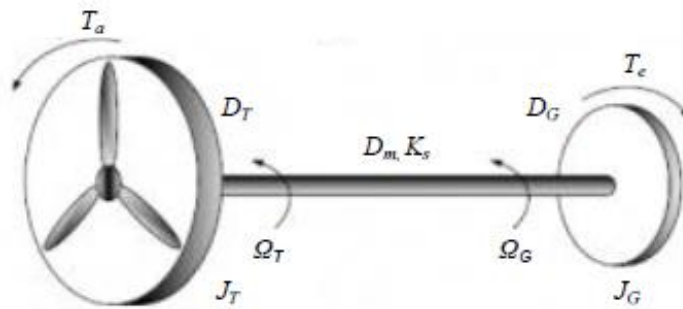
$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda - 0.02\beta} - \frac{0.03}{\beta^3 + 1} \right)^{-1} \quad (2.8)$$

Aero-dinamik tork ifadesi [39]:

$$T_{rotor} = \frac{P_{rotor}}{\omega_{rotor}} = \frac{\frac{1}{2} \rho A V_{rüzgar}^3 C_p(\lambda, \beta)}{\omega_{rotor}} \quad (2.9)$$

2.2 Sürücü Sistem Modeli

Çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbinlerinde en çok kullanılan dört farklı sürücü sistem modeli vardır. Bunlar; altı, üç, iki ve bir kütleli sürücü sistem modelleridir. Altı kütleli sürücü sistemi altı ataletten (üç kanat, hub, dişli kutusu ve generatör) oluşmaktadır. Kanatlar ve hub rüzgar türbin rotoru olarak birleştirilirse, üç kütleli sürücü sisteminin modeli türetilir. İki kütleli sürücü sistem modeli de, dişli kutusu ataletini hem türbin rotoru hem de generatör rotoru ile entegre ederek elde edebiliriz. İki atalet, eşdeğer shaft sertliği ve ortak sönümlenme ile etkileşime girer. İki kütleli sürücü sistem modeli Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: İki kütleli sürücü sistem modeli [41]

Sürücü sistemdeki tüm ataletler tek dönen kütle olarak ifade edilirse(iki kütleli modelden şaft sertliği ve ortak sönümle değeri ihmal edilirse), lumped (toplu) model elde edilir. Lumped (toplu) model ifadesi:

$$J_r \dot{\omega}_m = T_a - T_e - D_r \omega_m \quad (2.10)$$

$$\dot{\omega}_m = \frac{1}{J_r} T_a - \frac{1}{J_r} T_e - \frac{D_r}{J_r} \omega_m \quad (2.11)$$

J_r : Döner sistemin toplam ataleti

T_e : Generatörün elektromagnetik torku

D_r : Döner sistemin sönümleme katsayısı

ω_m : Rotorun mekanik hızı

Toplam mekanik sönümleme değeri ifadesi:

$$D_r = D_T + D_G \quad (2.12)$$

Geçici kararlılık analizi ve model basitliğinden dolayı genellikle iki kütleli model yapısı kullanılır. İki kütleli sürücü sistem modelinin ifadesi:

$$J_T \dot{\omega}_T = T_a - T_s - D_T \omega_T \quad (2.13)$$

$$J_G \dot{\omega}_G = T_s - T_e - D_G \omega_G \quad (2.14)$$

$$T_s = K_s \theta_s + D_s (\omega_T - \omega_G) \quad (2.15)$$

$$\dot{\theta}_s = (\omega_T - \omega_G) \quad (2.16)$$

J_T, J_G : Turbin ve generatör rotor ataleti

ω_T, ω_G : Turbin ve generatör rotorun mekanik hızı

D_T, D_G : Turbin ve generatör self sönümleme değeri

T_s : Düşük hızlı şafttan reaksiyon torku

D_s, K_s : Şaft ortak sönümleme ve sertlik değeri

θ_s : Turbin ve generatör rotorları arasındaki büküm açısı

Reaksiyon torku, türbin ve generatör rotoru arasındaki farktan dolayı dinamik koşulların içinde ortaya çıkar. Differansiyel denklemlerin durum uzayında gösterilmesi:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_T \\ \dot{\omega}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D_T}{J_T} & 0 \\ 0 & -\frac{D_G}{J_G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_T \\ \omega_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_a - T_s \\ T_s - T_e \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Düzenleme yapılırsa [41,42]:

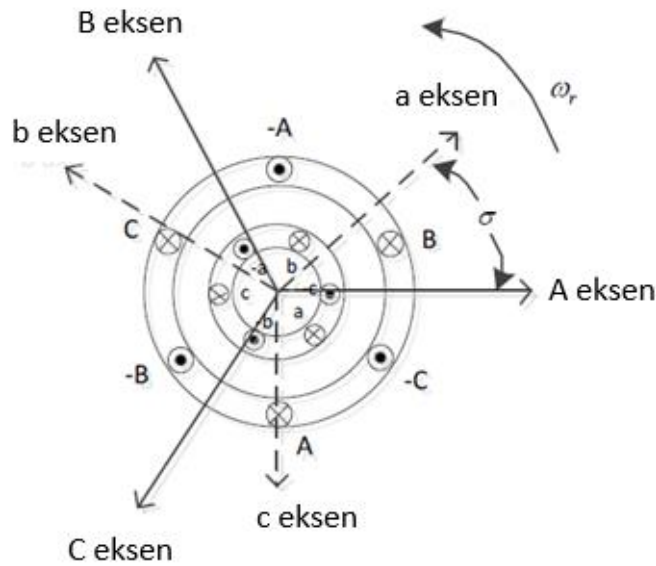
$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_T \\ \dot{\omega}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D_T}{J_T} & 0 \\ 0 & -\frac{D_G}{J_G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_T \\ \omega_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_a - (K_s \theta_s + D_s(\omega_T - \omega_G)) \\ (K_s \theta_s + D_s(\omega_T - \omega_G)) - T_e \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

2.3 Çift Beslemeli Asenkron Generatör Modeli

Rüzgar türbini sistemlerinde generatörün sürekli ve geçici çalışma durumlarında kontrolünün sağlanması için dinamik modelinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu bölümde çift beslemeli asenkron generatörünün abc referans frame ve birkaç farklı dq referans frame göre dinamik modeli elde edilecektir.

- *Çift beslemeli asenkron generatör modeli (ABC) – referans frame:*

Çift beslemeli asenkron generatör ile elektriksel olarak aynı yapıda olmasından dolayı 3 fazlı ve simetrik yapıda bir bilezikli asenkron makinanın modellenmesi incelenmiştir. Bilezikli asenkron generatörün kesit alanı görünümü Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Bilezikli asenkron generatörün kesit alanı görünümü [1]

Stator ve rotor faz sargıları 120°'lik açı ile yerleştirilmiştir. Stator ve rotor fazları arasındaki açı σ 'dir. Rotor hızı:

$$\omega_r = \frac{d\sigma}{dt} \quad (2.19)$$

ABC referans frame’de modelleme için yapılan varsayımlar:

- Stator ve rotor faz sargıları simetriktir. Faz dirençleri, mıknatıslanma ve kaçak endüktans değerleri üç faz için de eşittir.
- Üretilen magneto motor kuvveti, stator çevresi etrafında sinusoidal dağılmıştır. Bu yüzden harmonik bileşen bulunmaz.
- Hava boşluğu sabittir. İki stator faz sargısı ve iki rotor faz sargısı arasındaki ortak endüktans sabittir. Stator faz sargısı ile rotor faz sargısı arasındaki ortak endüktans açısal rotor konumu (σ) ile değişir.
- Ortak endüktanslarda satürasyon ihmal edilir.
- Stator ve rotor faz sargı iletkenlerindeki deri etkisi ihmal edilir. Akım frekansı arttığı zaman, deri etkisi ilk olarak kaçak akı geçirgenliğini artırır, bu da dirençleri artırır ve kaçak endüktansları azaltır.
- Demir kayıpları ihmal edilir. Sadece stator ve rotor faz direncinin kayıpları dikkate alınacaktır.
- Çapraz-doygunluk etkisi ihmal edilir.

Bu varsayımlar dikkate alınarak, Faraday yasasına dayalı stator üzerindeki A, B ve C fazlarının terminal gerilimleri:

$$v_A = r_A i_A + \frac{d\lambda_A}{dt} \quad (2.20)$$

$$v_B = r_B i_B + \frac{d\lambda_B}{dt} \quad (2.21)$$

$$v_C = r_C i_C + \frac{d\lambda_C}{dt} \quad (2.22)$$

$$\lambda_A = (L_{AA}i_A + L_{AB}i_B + L_{AC}i_C + L_{Aa}i_a + L_{Ab}i_b + L_{Ac}i_c) \quad (2.23)$$

$$\lambda_B = (L_{AB}i_A + L_{BB}i_B + L_{BC}i_C + L_{Ba}i_a + L_{Bb}i_b + L_{Bc}i_c) \quad (2.24)$$

$$\lambda_C = (L_{AC}i_A + L_{BC}i_B + L_{CC}i_C + L_{Ca}i_a + L_{Cb}i_b + L_{Cc}i_c) \quad (2.25)$$

Simetrik koşul için, stator faz dirençleri:

$$r_A = r_B = r_C = r_s \quad (2.26)$$

Rotor üzerindeki a, b ve c fazlarının terminal gerilimleri:

$$v_a = r_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (2.27)$$

$$v_b = r_b i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (2.28)$$

$$v_c = r_c i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \quad (2.29)$$

$$\lambda_a = (L_{Aa}i_A + L_{Ba}i_B + L_{Ca}i_C + L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c) \quad (2.30)$$

$$\lambda_b = (L_{Ab}i_A + L_{Bb}i_B + L_{Cb}i_C + L_{ab}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c) \quad (2.31)$$

$$\lambda_c = (L_{Ac}i_A + L_{Bc}i_B + L_{Cc}i_C + L_{ac}i_a + L_{bc}i_b + L_{cc}i_c) \quad (2.32)$$

Rotor faz dirençleri:

$$r_a = r_b = r_c = r_r \quad (2.33)$$

L_{AA}, L_{BB} ve L_{CC} değerleri akı yolları eşit olduğunda dolayı eşittir. Bu endüktanslar rotor konumundan bağımsızdır. Stator faz sargısının self endüktas ifadesi:

$$L_{AA} = L_{BB} = L_{CC} = L_{ss} \quad (2.34)$$

L_{AB}, L_{BC} ve L_{AC} değerleri eşittir. Çünkü bu endüktanslar rotor konumundan bağımsızdır. Stator faz sargılarının ortak endüktası ifadesi:

$$L_{AB} = L_{BC} = L_{AC} = L_{sm} \quad (2.35)$$

Benzer şekilde, rotor endüktansları da rotor konumundan bağımsız olduğundan dolayı aşağıdaki ifadeler elde edilebilir. Rotor faz sargısının self ve ortak endüktas ifadeleri:

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_{rr} \quad (2.36)$$

$$L_{ab} = L_{bc} = L_{ac} = L_{rm} \quad (2.37)$$

Stator ve rotor fazlarının etkileşimine karşılık elde edilen endüktans değerleri rotor konumuna bağlı olarak değişir. Bu endüktansların ifadeleri:

$$L_{Aa} = L_{Bb} = L_{Cc} = L_{srm} \cos(\sigma) \quad (2.38)$$

$$L_{Ab} = L_{Bc} = L_{Ca} = L_{srm} \cos(\sigma + 120^\circ) \quad (2.39)$$

$$L_{Ac} = L_{Ba} = L_{Cb} = L_{srm} \cos(\sigma + 240^\circ) \quad (2.40)$$

L_{srm} : stator ve rotor sargıları arasındaki maksimum ortak endüktans

Rotor konum ifadesi:

$$\sigma = \sigma_0 + \int_0^t \omega_r(t) dt \quad (2.41)$$

Bilezikli asenkron makinasının abc referans frame de durum uzayı modeli:

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \\ \vdots \\ v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & : & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & : & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & : & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & : & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & : & r_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & : & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & : & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ \vdots \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ \vdots \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$\begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} & \vdots & L_{srm} \cos(\sigma) & L_{srm} \cos(\sigma + 120) & L_{srm} \cos(\sigma + 240) \\ L_{sm} & L_{ss} & L_{sm} & \vdots & L_{srm} \cos(\sigma + 240) & L_{srm} \cos(\sigma) & L_{srm} \cos(\sigma + 120) \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ss} & \vdots & L_{srm} \cos(\sigma + 120) & L_{srm} \cos(\sigma + 240) & L_{srm} \cos(\sigma) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{srm} \cos(\sigma) & L_{srm} \cos(\sigma + 240) & L_{srm} \cos(\sigma) & \vdots & L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{srm} \cos(\sigma + 120) & L_{srm} \cos(\sigma) & L_{srm} \cos(\sigma + 240) & \vdots & L_{rm} & L_{rr} & L_{rm} \\ L_{srm} \cos(\sigma + 240) & L_{srm} \cos(\sigma + 120) & L_{srm} \cos(\sigma) & \vdots & L_{rm} & L_{rm} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ \vdots \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Rotor konumuna bağlı endüktans değerleri her zaman adımında yeni değer aldığından dolayı hesaplama süresi artar. Kolay uygulaması, hızlı simülasyon süresi ve denklem eşitliklerinin kolaylığından dolayı abc referans frame göre edilen makine modeli dq0 referans frame göre de ifade edilebilir.

- *Çift beslemeli asenkron generatör modeli (DQ0/dq0) – Rotor üzerinde sabitlenen referans frame:*

Matrix formunda kısaltılmış bilezikli asenkron makinanın dinamik modeli:

$$\overline{V_{ABC}} = \overline{R_{ss}} \overline{I_{ABC}} + \frac{d}{dt} \overline{\Lambda_{ABC}} \quad (2.43)$$

$$\overline{\Lambda_{ABC}} = \overline{L_{ss}} \overline{I_{ABC}} + \overline{L_{sr}} \overline{I_{abc}} \quad (2.44)$$

$$\overline{V_{abc}} = \overline{R_{rr}} \overline{I_{abc}} + \frac{d}{dt} \overline{\Lambda_{abc}} \quad (2.45)$$

$$\overline{\Lambda_{abc}} = \overline{L_{sr}}^T \overline{I_{ABC}} + \overline{L_{rr}} \overline{I_{abc}} \quad (2.46)$$

$\overline{V_{ABC}}, \overline{V_{abc}}$: stator ve rotor gerilim vektörü

$\overline{I_{ABC}}, \overline{I_{abc}}$: stator ve rotor akım vektörü

$\overline{\Lambda_{ABC}}, \overline{\Lambda_{abc}}$: stator ve rotor kaçak akı vektörü

$\overline{R_{ss}}, \overline{R_{rr}}$: stator ve rotor direnç matrisi

$\overline{L_{ss}}, \overline{L_{rr}}$: stator ve rotor self ve ortak endüktans matrisi

$\overline{L_{sr}}$: stator ve rotor arasındaki ortak endüktans matrisi

Stator ve rotor tarafı gerilim, akım ve akı eşitliklerini dq eksen takımında ifade etmek için dönüşüm matrisleri kullanılmaktadır.

Stator tarafı gerilim, akım ve akı denklemleri için dönüşüm matrisi $\overline{T}_s$ olduğuna göre,

$$\overline{I_{DQ0}} = \overline{T}_s \cdot \overline{I_{ABC}} \quad (2.47)$$

$$\overline{V_{DQ0}} = \overline{T}_s \cdot \overline{V_{ABC}} \quad (2.48)$$

$$\overline{\Lambda_{DQ0}} = \overline{T}_s \cdot \overline{\Lambda_{ABC}} \quad (2.49)$$

Rotor tarafı gerilim, akım ve akı denklemleri için dönüşüm matrisi $\overline{T}_r$ olduğuna göre,

$$\overline{I_{dq0}} = \overline{T}_r \cdot \overline{I_{abc}} \quad (2.50)$$

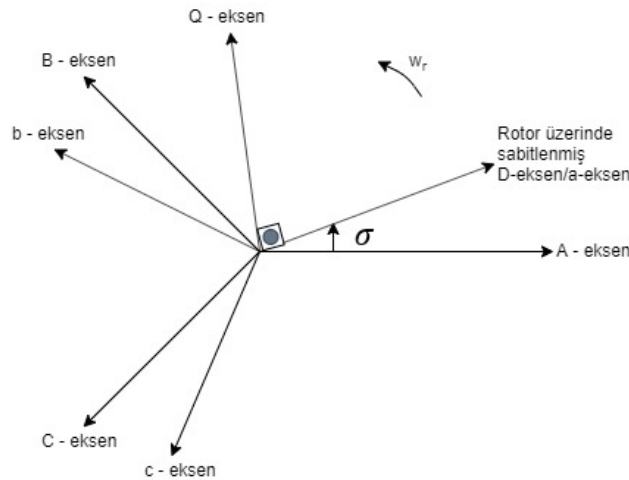
$$\overline{V_{dq0}} = \overline{T}_r \cdot \overline{V_{abc}} \quad (2.51)$$

$$\overline{\Lambda_{dq0}} = \overline{T}_r \cdot \overline{\Lambda_{abc}} \quad (2.52)$$

$\overline{T}_s$ ve $\overline{T}_r$ matrisleri tekil olmayan matrisler olmak zorundadır. (2.43) - (2.46) denklemleri ile (2.47) – (2.52) denklemleri arasında ilişki kurulursa,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \overline{V_{DQ0}} \\ \overline{V_{dq0}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \overline{T}_s \cdot \overline{R_{ss}} \cdot \overline{T}_s^{-1} & 0 \\ 0 & \overline{T}_r \cdot \overline{R_{rr}} \cdot \overline{T}_r^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I_{DQ0}} \\ \overline{I_{dq0}} \end{bmatrix} \\ &+ \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} \overline{T}_s \cdot \overline{L_{ss}} \cdot \overline{T}_s^{-1} & \overline{T}_s \cdot \overline{L_{sr}} \cdot \overline{T}_r^{-1} \\ \overline{T}_r \cdot \overline{L_{sr}^T} \cdot \overline{T}_s^{-1} & \overline{T}_r \cdot \overline{L_{rr}} \cdot \overline{T}_r^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I_{DQ0}} \\ \overline{I_{dq0}} \end{bmatrix} \right\} \\ &- \begin{bmatrix} \overline{\dot{T}_s} \cdot \overline{L_{ss}} \cdot \overline{T}_s^{-1} & \overline{\dot{T}_s} \cdot \overline{L_{sr}} \cdot \overline{T}_r^{-1} \\ \overline{\dot{T}_r} \cdot \overline{L_{sr}^T} \cdot \overline{T}_s^{-1} & \overline{\dot{T}_r} \cdot \overline{L_{rr}} \cdot \overline{T}_r^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I_{DQ0}} \\ \overline{I_{dq0}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.53)$$

DQ0-dq0 referans frame göre bilezikli asenkron makinanın modelini elde etmek için, rotor üzerinde sabitlenmiş referans frame göre stator ve rotor dönüşüm matrislerini elde edilmelidir. Rotor üzerinde sabitlenmiş DQ0-dq0 frame – ABC frame Şekil 2.4’te gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Rotor üzerinde sabitlenmiş DQ0-dq0 referans frame – ABC frame

D ve Q bileşenleri birbirine dik olmasıyla beraber, D bileşeni rotor üzerinde a fazına sabitlenmiştir. Bu referans frame göre stator dönüşüm matrisi:

$$\overline{T_{sr0}} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\sigma) & \cos(\sigma - 120^\circ) & \cos(\sigma - 240^\circ) \\ -\sin(\sigma) & -\sin(\sigma - 120^\circ) & -\sin(\sigma - 240^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

Rotor dönüşüm matrisi:

$$\overline{T_{rr0}} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & 0.866 & -0.866 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

Bilezikli asenkron makinanın modelini bu dönüşüm matrisleri ile düzenlersek:

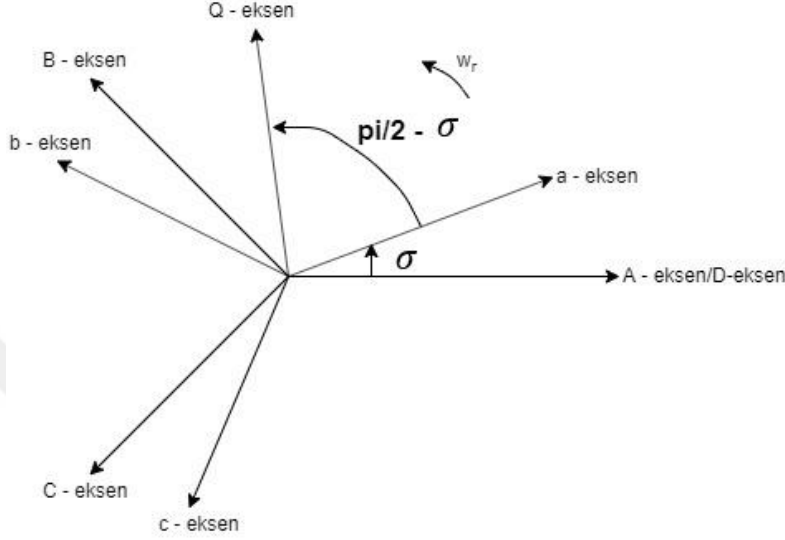
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \overline{V_{DQ0}} \\ \overline{V_{dq0}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \overline{T_{sr0}} \cdot \overline{R_{ss}} \cdot \overline{T_{sr0}}^{-1} & 0 \\ 0 & \overline{T_{rr0}} \cdot \overline{R_{rr}} \cdot \overline{T_{rr0}}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I_{DQ0}} \\ \overline{I_{dq0}} \end{bmatrix} \\ &+ \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} \overline{T_{sr0}} \cdot \overline{L_{ss}} \cdot \overline{T_{sr0}}^{-1} & \overline{T_{sr0}} \cdot \overline{L_{sr}} \cdot \overline{T_{rr0}}^{-1} \\ \overline{T_{rr0}} \cdot \overline{L_{sr}^T} \cdot \overline{T_{sr0}}^{-1} & \overline{T_{rr0}} \cdot \overline{L_{rr}} \cdot \overline{T_{rr0}}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I_{DQ0}} \\ \overline{I_{dq0}} \end{bmatrix} \right\} \\ &- \begin{bmatrix} \overline{\dot{T}_{sr0}} \cdot \overline{L_{ss}} \cdot \overline{T_{sr0}}^{-1} & \overline{\dot{T}_{sr0}} \cdot \overline{L_{sr}} \cdot \overline{T_{rr0}}^{-1} \\ \overline{\dot{T}_{rr0}} \cdot \overline{L_{sr}^T} \cdot \overline{T_{sr0}}^{-1} & \overline{\dot{T}_{rr0}} \cdot \overline{L_{rr}} \cdot \overline{T_{rr0}}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I_{DQ0}} \\ \overline{I_{dq0}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.56)$$

Rotor üzerine sabitlenmiş DQ0-dq0 referans frame göre elde edilen bilezikli asenkron makinanın modeli aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{Dr0} \\ v_{Qr0} \\ v_{Or0} \\ \dots \\ v_{dr0} \\ v_{qr0} \\ v_{or0} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & r_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Dr0} \\ i_{Qr0} \\ i_{Or0} \\ \dots \\ i_{dr0} \\ i_{qr0} \\ i_{or0} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} L_{ss} - L_{sm} & 0 & 0 & \vdots & 1.5L_{srm} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ss} - L_{sm} & 0 & \vdots & 0 & 1.5L_{srm} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ss} + 2L_{sm} & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ 1.5L_{srm} & 0 & 0 & \vdots & L_{rr} - L_{rm} & 0 & 0 \\ 0 & 1.5L_{srm} & 0 & \vdots & 0 & L_{rr} - L_{rm} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & L_{rr} + 2L_{rm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{Dr0} \\ \dot{i}_{Qr0} \\ \dot{i}_{Or0} \\ \dots \\ \dot{i}_{dr0} \\ \dot{i}_{qr0} \\ \dot{i}_{or0} \end{bmatrix} \\ &+ \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -(L_{ss} - L_{sm}) & 0 & \vdots & 0 & -1.5L_{srm} & 0 \\ L_{ss} - L_{sm} & 0 & 0 & \vdots & 1.5L_{srm} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Dr0} \\ i_{Qr0} \\ i_{Or0} \\ \dots \\ i_{dr0} \\ i_{qr0} \\ i_{or0} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.57)$$

- Çift beslemeli asenkron generatör modeli (DQ0/dq0) – Durağan stator referans frame

Bu analize göre bilezikli asenkron makinanın statordaki a fazına D bileşeni sabitlendiği varsayımına dayanır. Durağan stator referans frame gösterimi Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Stator üzerine sabitlenmiş DQ0-dq0 referans frame – ABC frame

Durağan stator referans frame göre stator dönüşüm matrisi:

$$\overline{T}_{sst} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & 0.866 & -0.866 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

Durağan stator referans frame göre rotor dönüşüm matrisi:

$$\overline{T}_{rst} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\sigma) & \cos(\sigma + 120) & \cos(\sigma + 240) \\ \sin(\sigma) & \sin(\sigma + 120) & \sin(\sigma + 240) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

Bilezikli asenkron makinanın modelini bu dönüşüm matrisleri ile düzenlersek:

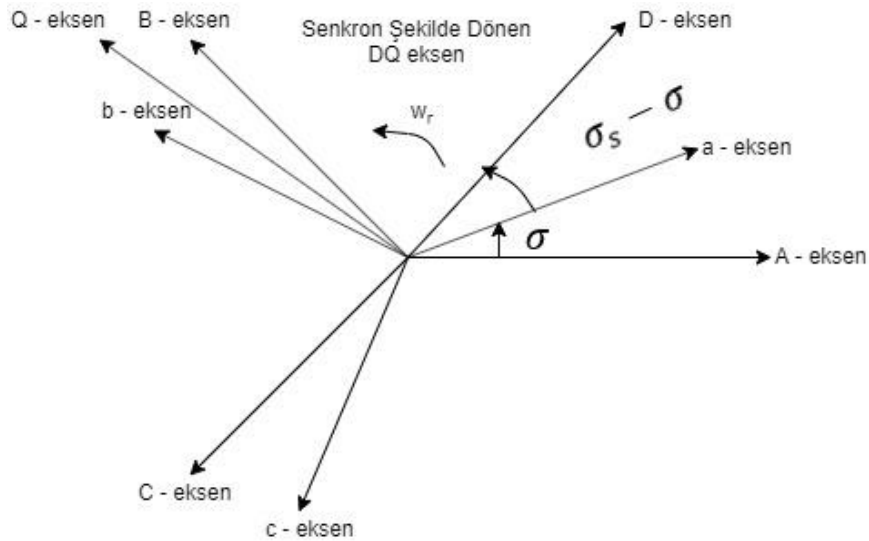
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \overline{V}_{DQ0} \\ \overline{V}_{dq0} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \overline{T}_{sst} \cdot \overline{R}_{ss} \cdot \overline{T}_{sst}^{-1} & 0 \\ 0 & \overline{T}_{rst} \cdot \overline{R}_{rr} \cdot \overline{T}_{rst}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I}_{DQ0} \\ \overline{I}_{dq0} \end{bmatrix} \\ &+ \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} \overline{T}_{sst} \cdot \overline{L}_{ss} \cdot \overline{T}_{sst}^{-1} & \overline{T}_{sst} \cdot \overline{L}_{sr} \cdot \overline{T}_{rst}^{-1} \\ \overline{T}_{rst} \cdot \overline{L}_{sr} \cdot \overline{T}_{sst}^{-1} & \overline{T}_{rst} \cdot \overline{L}_{rr} \cdot \overline{T}_{rst}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I}_{DQ0} \\ \overline{I}_{dq0} \end{bmatrix} \right\} \\ &- \begin{bmatrix} \overline{T}_{sst} \cdot \overline{L}_{ss} \cdot \overline{T}_{sst}^{-1} & \overline{T}_{sst} \cdot \overline{L}_{sr} \cdot \overline{T}_{rst}^{-1} \\ \overline{T}_{rst} \cdot \overline{L}_{sr} \cdot \overline{T}_{sst}^{-1} & \overline{T}_{rst} \cdot \overline{L}_{rr} \cdot \overline{T}_{rst}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I}_{DQ0} \\ \overline{I}_{dq0} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.60)$$

Durağan stator referans frame üzerine sabitlenmesi ile elde edilen bilezikli asenkron makinanın modeli aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} v_{Dst} \\ v_{Qst} \\ v_{Ost} \\ \dots \\ v_{dst} \\ v_{qst} \\ v_{ost} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & : & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & : & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & : & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & : & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & : & r_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & : & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & : & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Dst} \\ i_{Qst} \\ i_{Ost} \\ \dots \\ i_{dst} \\ i_{qst} \\ i_{ost} \end{bmatrix} \\
+ \begin{bmatrix} L_{ss} - L_{sm} & 0 & 0 & : & 1.5L_{srm} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ss} - L_{sm} & 0 & : & 0 & 1.5L_{srm} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ss} + 2L_{sm} & : & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & : & \dots & \dots & \dots \\ 1.5L_{srm} & 0 & 0 & : & L_{rr} - L_{rm} & 0 & 0 \\ 0 & 1.5L_{srm} & 0 & : & 0 & L_{rr} - L_{rm} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & : & 0 & 0 & L_{rr} + 2L_{rm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{l}_{Dst} \\ \dot{l}_{Qst} \\ \dot{l}_{Ost} \\ \dots \\ \dot{l}_{dst} \\ \dot{l}_{qst} \\ \dot{l}_{ost} \end{bmatrix} \\
+ \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & : & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & : & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & : & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & : & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 1.5L_{srm} & 0 & : & 0 & (L_{rr} - L_{rm}) & 0 \\ -1.5L_{srm} & 0 & 0 & : & -(L_{rr} - L_{rm}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & : & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Dst} \\ i_{Qst} \\ i_{Ost} \\ \dots \\ i_{dst} \\ i_{qst} \\ i_{ost} \end{bmatrix} \quad (2.61)
\end{aligned}$$

- Çift beslemeli asenkron generatör modeli (DQ0/dq0) – Senkron bir şekilde dönen referans frame

Senkron bir şekilde dönen referans frame göre sabitlenen bilezikli asenkron modeli, zamanla değişen değişkenlerin (stator ve rotor akım ve gerilimleri) sabit hale gelmesini sağlar. Bu özellik D eksenini stator veya rotor üzerinde sabitlemek yerine senkron hızda dönmesi sonucu modellemeyi ifade eder. Senkron hızda dönen referans frame Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Senkron bir şekilde dönen DQ0-dq0 referans frame – ABC frame

Stator A fazı ile senkron bir şekilde dönen D bileşeni arasındaki açı σ_s 'dir.

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + \int_0^t \omega_s(t) dt = \sigma_{s0} + \omega_s t \quad (2.62)$$

ω_s : senkron hız

$$\overline{T}_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\sigma_s) & \cos(\sigma_s - 120^\circ) & \cos(\sigma_s - 240^\circ) \\ -\sin(\sigma_s) & -\sin(\sigma_s - 120^\circ) & -\sin(\sigma_s - 240^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

$$\overline{T}_r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\sigma_s - \sigma) & \cos((\sigma_s - \sigma) - 120^\circ) & \cos((\sigma_s - \sigma) - 240^\circ) \\ -\sin((\sigma_s - \sigma)) & -\sin((\sigma_s - \sigma) - 120^\circ) & -\sin((\sigma_s - \sigma) - 240^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

Senkron bir şekilde dönen DQ0-dq0 referans frame göre elde edilen bilezikli asenkron makinanın modeli aşağıda verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} v_D \\ v_Q \\ v_O \\ \dots \\ v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & r_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \\ i_O \\ \dots \\ i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

$$+ \begin{bmatrix} L_{ss} - L_{sm} & 0 & 0 & \vdots & 1.5L_{srm} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ss} - L_{sm} & 0 & \vdots & 0 & 1.5L_{srm} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ss} + 2L_{sm} & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ 1.5L_{srm} & 0 & 0 & \vdots & L_{rr} - L_{rm} & 0 & 0 \\ 0 & 1.5L_{srm} & 0 & \vdots & 0 & L_{rr} - L_{rm} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & L_{rr} + 2L_{rm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \\ i_O \\ \dots \\ i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s(L_{ss} - L_{sm}) & 0 & \vdots & 0 & -1.5\omega_s L_{srm} & 0 \\ \omega_s(L_{ss} - L_{sm}) & 0 & 0 & \vdots & 1.5\omega_s L_{srm} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & -1.5(\omega_s - \omega_r)L_{srm} & 0 & \vdots & 0 & -(\omega_s - \omega_r)(L_{rr} - L_{rm}) & 0 \\ 1.5(\omega_s - \omega_r)L_{srm} & 0 & 0 & \vdots & (\omega_s - \omega_r)(L_{rr} - L_{rm}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \\ i_O \\ \dots \\ i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}$$

Senkron bir şekilde dönen referans frame göre elde edilen tork ifadesi giriş gücünden elde edilebilir. Giriş gücü ifadesi:

$$P_g = \overline{I_{ABC}^T} \cdot \overline{V_{ABC}} + \overline{I_{abc}^T} \cdot \overline{V_{abc}} \quad (2.66)$$

ABC referans frame göre yazılan mekanik güç ifadesi:

$$P_{mek} = P_g - \overline{I_{ABC}^T} \cdot \overline{R_{ss}} \cdot \overline{I_{ABC}} - \overline{I_{abc}^T} \cdot \overline{R_{rr}} \cdot \overline{I_{abc}} \quad (2.67)$$

$$P_{mek} = \overline{I_{ABC}^T} \cdot \left(\frac{d}{dt} \overline{\Lambda_{ABC}} \right) + \overline{I_{abc}^T} \cdot \left(\frac{d}{dt} \overline{\Lambda_{abc}} \right) \quad (2.68)$$

DQ referans frame göre yazılan mekanik güç ifadesi:

$$P_{mek} = \left(\overline{T_s^{-1}} \cdot \overline{I_{DQ0}} \right)^T \left(\frac{d}{dt} \left(\overline{T_s^{-1}} \cdot \overline{\Lambda_{DQ0}} \right) \right) + \left(\overline{T_r^{-1}} \cdot \overline{I_{dq0}} \right)^T \left(\frac{d}{dt} \left(\overline{T_r^{-1}} \cdot \frac{d}{dt} \overline{\Lambda_{dq0}} \right) \right) \quad (2.69)$$

$$P_{mek} = \overline{I_{DQ0}^T} \cdot \left(\overline{T_s^{-1}} \right)^T \cdot \left(\overline{T_s^{-1}} \cdot \frac{d}{dt} \overline{\Lambda_{DQ0}} - \overline{T_s^{-1}} \cdot \overline{\dot{T}_s} \cdot \overline{T_s^{-1}} \cdot \overline{\Lambda_{DQ0}} \right) + \overline{I_{dq0}^T} \cdot \left(\overline{T_r^{-1}} \right)^T \cdot \left(\overline{T_r^{-1}} \cdot \frac{d}{dt} \overline{\Lambda_{dq0}} - \overline{T_r^{-1}} \cdot \overline{\dot{T}_r} \cdot \overline{T_r^{-1}} \cdot \overline{\Lambda_{dq0}} \right) \quad (2.70)$$

(2.63) ve (2.64) denklemleri mekanik güç ifadesinde yerine konulursa, üretilen tork ifadesi:

$$T_{pro} = \frac{P_{mek}}{\omega_{rm}} = \frac{P_{mek} p}{2\omega_r} \quad (2.71)$$

p : kutup sayısı

ω_{rm} : mekaniksel dönme hızı

(2.65) denklemden, stator ve rotor akı ifadeleri:

$$\overline{\Lambda_{DQ0}} = \begin{bmatrix} \Lambda_D \\ \Lambda_Q \\ \Lambda_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} - L_{sm} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ss} - L_{sm} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ss} + 2L_{sm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.5L_{srm} & 0 & 0 \\ 0 & 1.5L_{srm} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

$$\overline{\Lambda_{dq0}} = \begin{bmatrix} \Lambda_d \\ \Lambda_q \\ \Lambda_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.5L_{srm} & 0 & 0 \\ 0 & 1.5L_{srm} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{rr} - L_{rm} & 0 & 0 \\ 0 & L_{rr} - L_{rm} & 0 \\ 0 & 0 & L_{rr} + 2L_{rm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

Detaylı üretilen tork ifadesi:

$$T_{pro} = -\frac{3}{2\omega_{rm}} [\omega_s (i_D \lambda_Q - i_Q \lambda_D) + (\omega_s - \omega_r) (i_d \lambda_q - i_q \lambda_d)] \quad (2.74)$$

$$T_{pro} = -\frac{3}{2\omega_{rm}} [\omega_s (i_D \lambda_Q - i_Q \lambda_D + i_d \lambda_q - i_q \lambda_d) - \omega_r (i_d \lambda_q - i_q \lambda_d)] \quad (2.75)$$

Akı eşitlikleri (2.72 ve 2.73) ile birlikte (2.75)'deki denklem birleştirilirse aşağıda eşitlik elde edilir. Rotor akı ve akımları cinsinden tork ifadesi:

$$\omega_s(i_D\lambda_Q - i_Q\lambda_D + i_d\lambda_q - i_q\lambda_d) = 0 \quad (2.76)$$

$$T_{pro} = -\frac{3}{2}\left(\frac{P}{2\omega_r}\right)[- \omega_r(i_d\lambda_q - i_q\lambda_d)] = \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)[(i_d\lambda_q - i_q\lambda_d)] \quad (2.77)$$

Akı ifadeleri yerine endüktans değerleri yazılırsa,

$$T_{pro} = \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)(i_d(1.5L_{srm}i_Q + (L_{rr} - L_{rm})i_q) - i_q(1.5L_{srm}i_D + (L_{rr} - L_{rm})i_d)) \quad (2.78)$$

$$T_{pro} = \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)(1.5L_{srm})(i_Qi_d - i_Di_q) \quad (2.79)$$

Stator akı ve akımları cinsinden tork ifadesinin yazılması:

$$\begin{aligned} T_{pro} &= \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)(1.5L_{srm})(i_Qi_d - i_Di_q) \\ &= \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)[1.5L_{srm}i_Qi_d + i_Q(L_{ss} - L_{sm})i_D - 1.5L_{srm}i_Di_q - i_Q(L_{ss} - L_{sm})i_D] \\ &= \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)[i_Q(1.5L_{srm}i_d + (L_{ss} - L_{sm})i_D) - i_D(1.5L_{srm}i_q + i_Q(L_{ss} - L_{sm}))] \end{aligned} \quad (2.80)$$

Akı eşitlikleri ile birlikte aşağıda eşitlik elde edilir.

$$T_{pro} = \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)(i_Q\lambda_D - i_D\lambda_Q) \quad (2.81)$$

Bilezikli asenkron makinasında stator terminallerinde aktif ve reaktif güç ifadesi:

$$P_s = \frac{3}{2}Re(\vec{V} \cdot \vec{I}^*) = \frac{3}{2}Re(v_D + jv_Q) \cdot (i_D - ji_Q) = \frac{3}{2}(v_Di_D + v_Qi_Q) \quad (2.82)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}Im(\vec{V} \cdot \vec{I}^*) = \frac{3}{2}Im(v_D + jv_Q) \cdot (i_D - ji_Q) = \frac{3}{2}(v_Qi_D - v_Di_Q) \quad (2.83)$$

v_D, v_Q : gerilimin anlık D ve Q bileşenleri

i_D, i_Q : akımın anlık D ve Q bileşenleri

- Çift beslemeli asenkron generatör modeli (İki derece azaltılmış modeli, DQ0/dq0)
- Senkron bir şekilde dönen referans frame

Denklem (2.65) incelendiğinde, aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$v_D = r_s i_D + (L_{ss} - L_{sm}) \dot{i}_D + 1.5 L_{srm} \dot{i}_d - \omega_s (L_{ss} - L_{sm}) i_Q - 1.5 \omega_s L_{srm} i_q \quad (2.84)$$

$$v_Q = r_s i_Q + (L_{ss} - L_{sm}) \dot{i}_Q + 1.5 L_{srm} \dot{i}_q + \omega_s (L_{ss} - L_{sm}) i_D + 1.5 \omega_s L_{srm} i_d \quad (2.85)$$

$$v_d = r_r i_d + (L_{rr} - L_{rm}) \dot{i}_d + 1.5 L_{srm} \dot{i}_D - (\omega_s - \omega_r) (L_{rr} - L_{rm}) i_q - 1.5 (\omega_s - \omega_r) L_{srm} i_Q \quad (2.86)$$

$$v_q = r_r i_q + (L_{rr} - L_{rm}) \dot{i}_q + 1.5 L_{srm} \dot{i}_Q + (\omega_s - \omega_r) (L_{rr} - L_{rm}) i_d + 1.5 (\omega_s - \omega_r) L_{srm} i_D \quad (2.87)$$

$$L_s = L_{ss} - L_{sm} \quad (2.88)$$

$$L_r = L_{rr} - L_{rm} \quad (2.89)$$

$$L_m = 1.5 L_{srm} \quad (2.90)$$

L_s : stator kaçak endüktansı

L_r : rotor kaçak endüktansı

L_m : mıknatıslanma endüktansı

(2.84) ve (2.87) arasındaki denklemler yeniden düzenlenirse,

$$v_D = r_s i_D + L_s \dot{i}_D + L_m \dot{i}_d - \omega_s L_s i_Q - \omega_s L_m i_q \quad (2.91)$$

$$v_Q = r_s i_Q + L_s \dot{i}_Q + L_m \dot{i}_q + \omega_s L_s i_D + \omega_s L_m i_d \quad (2.92)$$

$$v_d = r_r i_d + L_r \dot{i}_d + L_m \dot{i}_D - (\omega_s - \omega_r) L_r i_q - (\omega_s - \omega_r) L_m i_Q \quad (2.93)$$

$$v_q = r_r i_q + L_r \dot{i}_q + L_m \dot{i}_Q + (\omega_s - \omega_r) L_r i_d + (\omega_s - \omega_r) L_m i_D \quad (2.94)$$

(2.91), (2.92), (2.93) ve (2.94) denklemlerinde direnç üzerindeki gerilim düşümleri ihmal edilerek elde edilen kaçak akı ifadeleri:

$$\lambda_D = L_s i_D + L_m i_d \quad (2.95)$$

$$\lambda_Q = L_s i_Q + L_m i_q \quad (2.96)$$

$$\lambda_d = L_r i_d + L_m i_D \quad (2.97)$$

$$\lambda_q = L_r i_q + L_m i_Q \quad (2.98)$$

DQ ekseninde stator gerilim ve akım sembolleri $v_D \equiv v_{ds}, i_D \equiv i_{ds}, v_Q \equiv v_{qs}, i_Q \equiv i_{qs}$, dq ekseninde rotor gerilim ve akım sembolleri $v_d \equiv v_{dr}, i_d \equiv i_{dr}, v_q \equiv v_{qr}, i_q \equiv i_{qr}$, dq ekseninde stator kaçak akı sembolleri $\lambda_D \equiv \lambda_{ds}, \lambda_Q \equiv \lambda_{qs}$, dq ekseninde rotor kaçak akı sembolleri $\lambda_d \equiv \lambda_{dr}, \lambda_q \equiv \lambda_{qr}$ olarak ifade edildi. Yeni semboller ile stator ve rotor gerilimlerin ifadesi [Dördüncü dereceden model (tam model)]:

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + \dot{\lambda}_{ds} - \omega_s \lambda_{qs} \quad (2.99)$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \dot{\lambda}_{qs} + \omega_s \lambda_{ds} \quad (2.100)$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} + \dot{\lambda}_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (2.101)$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + \dot{\lambda}_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (2.102)$$

Yeni semboller ile kaçak akı ifadeleri:

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (2.103)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (2.104)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (2.105)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (2.106)$$

Yeni semboller ile üretilen tork, aktif ve reaktif güç ifadeleri:

$$T_{pro} = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) (i_{qs} \lambda_{ds} - i_{ds} \lambda_{qs}) \quad (2.107)$$

$$P_s = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \quad (2.108)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \quad (2.109)$$

Stator kaçak akı ifadelerinin türevlerini sıfıra eşitleyerek, ikinci dereceden model ifadesini elde edebiliriz. (2.99), (2.100), (2.103) ve (2.104) denklemleri birleştirilerek ve stator kaçak akının türevleri sıfıra eşitlenerek elde edilen stator gerilim ifadeleri:

$$\dot{\lambda}_{ds} = 0 = L_s \dot{i}_{ds} + L_m \dot{i}_{dr} \rightarrow \dot{i}_{ds} = -\frac{L_m}{L_s} \dot{i}_{dr} \quad (2.110)$$

$$\dot{\lambda}_{qs} = 0 = L_s \dot{i}_{qs} + L_m \dot{i}_{qr} \rightarrow \dot{i}_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} \dot{i}_{qr} \quad (2.111)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \omega_s (L_s i_{qs} + L_m i_{qr}) \quad (2.112)$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega_s (L_s i_{ds} + L_m i_{dr}) \quad (2.113)$$

(2.112) ve (2.113) denklemi kullanılarak stator akımları rotor akımlarının fonksiyonu olarak edilebilir.

$$i_{ds} = \frac{r_s v_{ds} + \omega_s L_s v_{qs} - \omega_s^2 L_s L_m i_{dr} + \omega_s r_s L_m i_{qr}}{\omega_s^2 L_s^2 + r_s^2} \quad (2.114)$$

$$i_{qs} = \frac{r_s v_{qs} - \omega_s L_s v_{ds} - \omega_s^2 L_s L_m i_{qr} - \omega_s r_s L_m i_{dr}}{\omega_s^2 L_s^2 + r_s^2} \quad (2.115)$$

(2.101), (2.102), (2.105) ve (2.106) denklemleri kullanılarak, elde edilen rotor gerilim ifadeleri:

$$v_{dr} = r_r i_{dr} + \frac{d(L_r i_{dr} + L_m i_{ds})}{dt} - (\omega_s - \omega_r)(L_r i_{qr} + L_m i_{qs}) \quad (2.116)$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{d(L_r i_{qr} + L_m i_{qs})}{dt} + (\omega_s - \omega_r)(L_r i_{dr} + L_m i_{ds}) \quad (2.117)$$

(2.116), (2.117), (2.110) ve (2.111) denklemleri kullanılarak rotor gerilimleri düzenlenmesi sonucu elde edilen rotor gerilim ifadeleri:

$$v_{dr} = r_r i_{dr} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{di_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r)(L_r i_{qr} + L_m i_{qs}) \quad (2.118)$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{di_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r)(L_r i_{dr} + L_m i_{ds}) \quad (2.119)$$

(2.118) ve (2.119) denklemlerine (2.114) ve (2.115) denklemleri eklersek ikinci dereceden model elde edilebilir. (2.112), (2.113), (2.118) ve (2.119) denklemlerinde türevli ifadeler ihmal edilebilir. Stator ve rotorun kaçak akı ifadelerinin türevlerini sıfıra ayarlanmasıyla stator ve rotorun geçici durumları ihmal edilebilir. Böylece makinanın sürekli hal modeli kolayca elde edilebilir [1, 6, 43].

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \omega_s (L_s i_{qs} + L_m i_{qr}) = r_s i_{ds} - \omega_s \lambda_{qs} \quad (2.120)$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega_s (L_s i_{ds} + L_m i_{dr}) = r_s i_{qs} + \omega_s \lambda_{ds} \quad (2.121)$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r)(L_r i_{qr} + L_m i_{qs}) = r_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (2.122)$$

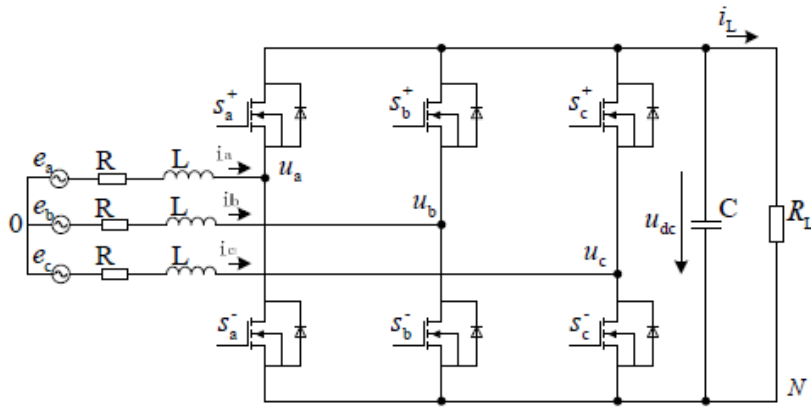
$$v_{qr} = r_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r)(L_r i_{dr} + L_m i_{ds}) = r_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (2.123)$$

2.4 Frekans Dönüştürücü Modeli

Rüzgar türbinlerinde, çift beslemeli asenkron generatörler rüzgar hızına bağlı olarak senkron altı veya üstü çalışabilirler. Bu yüzden, güç dönüştürücüsünün çift yönlü çalışma yeteneği olmalıdır. Frekans dönüştürücüsü literatürde back-to-back dönüştürücü olarak da adlandırılır. Frekans dönüştürücüsü iki güç dönüştürücüsünden (şebeke tarafı dönüştürücü ve generatör tarafı dönüştürücü) oluşmaktadır. Bu iki güç dönüştürücü arasından DC-link kapasitörler mevcuttur. Şebeke tarafı dönüştürücü DC-link kapasitörlerindeki gerilim seviyesinin kontrolünde görev alır. Generatör tarafı dönüştürücü ise generatör hızı veya güç kontrolünü sağlar. Şebeke tarafı dönüştürücü üç fazlı PWM kontrollü doğrultucu devresi ile aynı yapıdadır. Üç fazlı PWM gerilim kaynaklı doğrultucu modeli ilk olarak abc referans frame göre elde edildi. Sonrasında kontrolör tasarımı basit bir şekilde gerçekleştirmek için abc referans frame göre elde edilen denklemler dq senkron referans frame göre tekrardan düzenlenmiştir.

- *Üç fazlı gerilim kaynaklı dönüştürücü modeli – ABC referans frame*

Üç fazlı gerilim kaynaklı dönüştürücünün elektriksel devresi Şekil 2.7’de elde edilmiştir. Bu dönüştürücü 6 adet IGBT devresi, DC-link eşdeğer kapasitörler ve şebeke tarafı endüktans ve direnç değerlerinden oluşmaktadır.



Şekil 2.7: Üç fazlı PWM kontrollü gerilim kaynaklı dönüştürücü devresi [44]

$e_a(t), e_b(t), e_c(t)$: üç faz gerilim kaynağı

R_g, L_g : şebeke tarafı direnci ve endüktansı

i_{ag}, i_{bg}, i_{cg} : üç faz PWM doğrultucunun giriş akımları

i_{dc} : üç faz PWM doğrultucunun çıkış akımı

C_{dc}, R_L : DC link kapasitörü, yük direnci

i_L : Yük akımı

V_{dc} : DC link gerilimi

Kirchoff's yasasına bağlı olarak, PWM kontrollü doğrultucu devresinin giriş akımlarının anlık değerleri:

$$L_g \frac{d_{ia_g}}{dt} = e_a - R_g i_{a_g} - v_{(a,0)} \quad (2.124)$$

$$L_g \frac{d_{ib_g}}{dt} = e_b - R_g i_{b_g} - v_{(b,0)} \quad (2.125)$$

$$L_g \frac{d_{ic_g}}{dt} = e_c - R_g i_{c_g} - v_{(c,0)} \quad (2.126)$$

$v_{(a,0)}, v_{(b,0)}, v_{(c,0)}$: Doğrultucu AC tarafından 0 noktasına kadar olan gerilim farkı

$$v_{(a,0)} = v_{(a,N)} + v_{(N,0)} \quad (2.127)$$

$$v_{(b,0)} = v_{(b,N)} + v_{(N,0)} \quad (2.128)$$

$$v_{(c,0)} = v_{(c,N)} + v_{(N,0)} \quad (2.129)$$

$v_{(N,0)}$: N noktasından 0 noktasına kadar gerilim farkı

$v_{(a,N)}$: PWM rectifier AC tarafından N noktasına kadar olan gerilim farkı

$v_{(b,N)}$: PWM rectifier AC tarafından N noktasına kadar olan gerilim farkı

$v_{(c,N)}$: PWM rectifier AC tarafından N noktasına kadar olan gerilim farkı

Dengeli üç fazlı bir sistemde,

$$v_{(a,0)} + v_{(b,0)} + v_{(c,0)} = 0 \quad (2.130)$$

(2.127), (2.128), (2.129), ve (2.130) denklemleri birleştirilerek, aşağıdaki denklem elde edilebilir.

$$v_{(N,0)} = -\frac{v_{(a,N)} + v_{(b,N)} + v_{(c,N)}}{3} \quad (2.131)$$

A fazı incelediğimizde, üstteki IGBT devrede, alttaki IGBT devrede değil iken, S_a : anahtar = 1, $v_{(a,N)} = v_{dc}$. Tam tersi durumda, yani üstteki IGBT devrede değil alttaki IGBT devrede iken, S_a : anahtar = 0, $v_{(a,N)} = 0$. Bu durum her faz için geçerlidir. Bunun sonucunda aşağıdaki denklemler elde edilebilir.

$$v_{(a,N)} = S_a v_{dc}, v_{(b,N)} = S_b v_{dc}, v_{(c,N)} = S_c v_{dc} \quad (2.132)$$

$$v_{(N,0)} = -\frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c)v_{dc} \quad (2.133)$$

(2.124), (2.125), (2.126) denklemlerini, (2.127), (2.128), (2.129), (2.130), (2.131), (2.132), ve (2.133) denklemleri ile birleştirerek yeniden düzenlersek:

$$L_g \frac{d_{ia_g}}{dt} = e_a - R_g i_{a_g} - v_{dc} (S_a - \frac{1}{3} \sum_{k=a,b,c} S_k) \quad (2.134)$$

$$L_g \frac{d_{ib_g}}{dt} = e_b - R_g i_{b_g} - v_{dc} (S_b - \frac{1}{3} \sum_{k=a,b,c} S_k) \quad (2.135)$$

$$L_g \frac{d_{ic_g}}{dt} = e_c - R_g i_{c_g} - v_{dc} (S_c - \frac{1}{3} \sum_{k=a,b,c} S_k) \quad (2.136)$$

Dirençler üzerindeki kayıplar ihmal edilerek, AC ve DC taraf arasındaki güç ilişkisi ifade edilebilir.

$$\sum_{k=a,b,c} i_{kg}(t) v_{kn}(t) = i_{dc}(t) v_{dc} \quad (2.137)$$

(2.132) ve (2.137) denklemleri birleştirilerek,

$$i_{dc}(t) = i_{ag}(t) S_a + i_{bg}(t) S_b + i_{cg}(t) S_c \quad (2.138)$$

DC taraf için elde edilen denklem eşitlikleri:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_c = C_{dc} \frac{d}{dt} (v_{dc}) \\ i_{dc} = i_c + I_L \\ i_{dc} = S_a i_{ag} + S_b i_{bg} + S_c i_{cg} \\ I_L = \frac{v_{dc}}{R_L} \end{array} \right\} \quad (2.139)$$

Dengeli üç fazlı bir sistemde:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_a + e_b + e_c = 0 \\ i_{ag} + i_{bg} + i_{cg} = 0 \end{array} \right\} \quad (2.140)$$

ABC referans frame göre, üç fazlı PWM kontrollü doğrultucu modelinin eşitlikleri aşağıda verilmiştir [1].

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{dc} \frac{d}{dt} (v_{dc}) = \sum_{k=a,b,c} S_k i_{kg} - i_L \\ L_g \frac{d_{ikg}}{dt} + R_g i_{kg} = e_k - v_{dc} \left(S_k - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} S_j \right), \quad k = a, b, c \\ \sum_{k=a,b,c} e_k = \sum_{k=a,b,c} i_{kg} = 0 \end{array} \right\} \quad (2.141)$$

- Üç fazlı gerilim kaynaklı dönüştürücü modeli – DQ senkron referans frame

ABC referans frame göre elde edilen denklemler, kontrolör tasarımıdaki kolaylığından dolayı senkron hızda dönen dq referans frame dönüştürülür. Böylece üç fazlı olan gerilim ve akım bileşenleri DC değerlere dönüştürülür.

ABC referans frame göre elde edilen denklemler bir dönüşüm matrisi ile senkron hızda dönen dq referans frame göre elde edilebilir.

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta - 240^\circ) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta - 240^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (2.142)$$

θ : senkron referans frame ile durağan referans frame arasındaki açı

$$\theta = \omega_s t + \theta_0 \quad (2.143)$$

ω_s : şebeke tarafı gerilimlerin senkron hızı

Dengeli bir sistemde dq frame geçişinde 0 bileşen gözardı edilebilir. (2.141) denklemlerine dönüşüm matrisi uygulanırsa, dq referans frame göre, PWM kontrollü doğrultucu modelinin eşitlikleri elde edilir [44, 45].

$$\begin{cases} C_{dc} \frac{d}{dt}(v_{dc}) = \frac{3}{2}(i_{dg}S_d + i_{qg}S_q) - i_L \\ L_g \frac{di_{dg}}{dt} - \omega_s L_g i_{qg} + R_g i_{dg} = e_d - v_d \\ L_g \frac{di_{qg}}{dt} + \omega_s L_g i_{dg} + R_g i_{qg} = e_q - v_q \\ v_d = v_{dc}S_d, \quad v_q = v_{dc}S_q \end{cases} \quad (2.144)$$

S_d, S_q : DQ referans frame göre ifade edilen anahtarlama fonksiyonları

i_{dg}, i_{qg}, e_d, e_q : DQ referans frame göre ifade edilen PWM doğrultucu devrenin giriş akım ve gerilimleri



3. RÜZGAR TÜRBİN – GENERATÖR SİSTEMİNİN KONTROL STRATEJİLERİ

Değişken hızlı rüzgar türbin generatör sistemlerinde, generatör üzerinden şebekeye doğru kontrollü bir şekilde güç aktarımı için frekans dönüştürücü kullanılmaktadır. Frekans dönüştürücüsü iki farklı dönüştürücüden oluşmaktadır. Bunlar, şebeke tarafı ve generatör tarafı dönüştürücüler olarak adlandırılır. Rüzgar hızına bağlı olarak, rüzgar türbin – generatör sistemlerinde farklı kontrol stratejileri uygulanır. Nominal rüzgar hızının altında bir rüzgar hızında, maksimum güç aktarılması için maksimum güç noktası izleme (MGNI) kontrolü gerçekleştirilir. Eğer rüzgar hızı nominal rüzgar hızından üzerinde ise nominal güç aktarımı için kanat (pitch) açısı kontrolü yapılmalıdır. Bu bölümde, ÇBAG tabanlı rüzgar türbini sistemlerindeki kontrol stratejileri gösterilecektir. İlk olarak, şebeke senkronizasyonunun sağlanması için faz kilitlemeli çevrim kontrolünün gerçekleşmesi, ikinci olarak şebeke tarafı dönüştürücünün kontrolü ile, güç faktörü düzenlemesi ve sabit DC link geriliminin elde edilmesi sağlanacaktır. Üçüncü olarak, generatör tarafı dönüştürücü kontrolü ile stator tarafındaki aktif ve reaktif güç düzenlemesi yapılacaktır. Dördüncü olarak, nominal rüzgar hızlarından düşük rüzgar hızlarında mümkün olan maksimum güç aktarılması için maksimum güç noktası izleme kontrolü gerçekleştirilecektir. En son olarak ta, nominal rüzgar hızından yüksek rüzgar hızlarında nominal gücün üzerinde güç aktarılmasını engellemek için kanat açısı kontrolü yapılacaktır.

3.1 Faz Kilitlemeli Çevrim Kontrolü

Faz kilitlemeli çevrim kontrolü ile şebeke senkronizasyonun sağlanması ve abc/dq eksen takımlarında dönüşümlerde kullanılan şebeke açısının elde edilir. Faz kilitlemeli çevrim kontrolünde, stator gerilimi d eksenini boyunca hizalanır. Böylece stator geriliminin d bileşeni nominal gerilime, q bileşeni ise sıfır değerine eşit olur. Şebeke açısının elde edilmesi için gerilim hata sinyali PI kontrolü üzerinden geçirilir [46].

Faz kilitlemeli çevrim kontrolü,

$$V_{qs} = -V_s \sin(\theta_i - \theta_s) \rightarrow 0 = -V_s \sin(\theta_i - \theta_s) \rightarrow \theta_i = \theta_s \quad [3.1]$$

V_s : stator gerilimi

V_{ds}, V_{qs} : stator geriliminin d ve q bileşenleri

Gerilimin q bileşeninde oluşan hata sinyali,

$$0 - V_{qs} = V_s \sin(\theta_i - \theta_s) \quad [3.2]$$

Eğer $\sin(\theta_i - \theta_s)$ yeterince küçük ise, $(\theta_i - \theta_s) \approx \sin(\theta_i - \theta_s)$

$$F_{pll} = k_{p_{pll}} + \frac{k_{i_{pll}}}{s} \quad [3.3]$$

$$V_s \sin(\theta_i - \theta_s) F_{pll} = w_e \quad [3.4]$$

$$V(\theta_i - \theta_s) F_{pll} = w_e = \frac{d}{dt}(\theta_s) \quad [3.5]$$

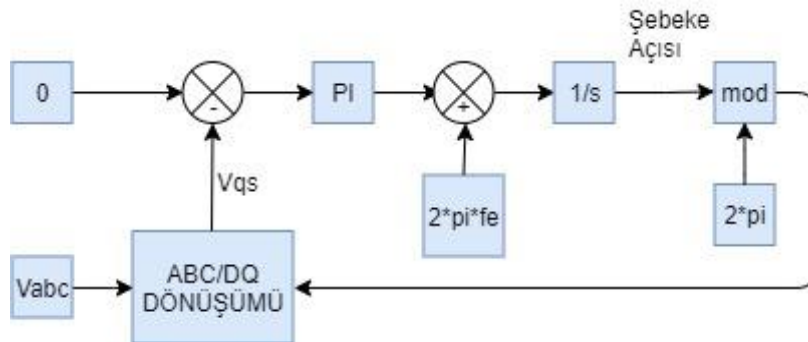
$$\frac{1}{V_s} \frac{d}{dt}(\theta_s) = (\theta_i - \theta_s) F_{pll} \quad [3.6]$$

Faz kilitlemeli çevrim kontrolünde transfer fonksiyonu,

$$\frac{1}{V_s} s(\theta_s) = (\theta_i - \theta_s) \left(k_{p_{pll}} + \frac{k_{i_{pll}}}{s} \right) \quad [3.7]$$

$$\frac{\theta_s}{\theta_i} = \frac{V_s k_{p_{pll}} s + k_{i_{pll}} V_s}{s^2 + V_s k_{p_{pll}} s + k_{i_{pll}} V_s} \quad [3.8]$$

Faz kilitlemeli çevrim kontrolü blok diyagramı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Faz kilitlemeli çevrim kontrolü blok diyagramı

Faz kilitlemeli çevrim kontrolünde elde edilen transfer fonksiyonu ve denklemleri kullanılarak kontrolör tasarımı gerçekleştirilir.

Bu aşamada ikinci dereceden transfer fonksiyonun karakteristik denklemi ile faz kilitlemeli çevrim kontrolünün karakteristik denklemi karşılaştırıldığında faz kilitlemeli çevrimin kontrolör katsayıları,

$$s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2$$

ζ : sönümlleme katsayısı (0.7 – 0.95 arasında seçilebilir.)

w_n : doğal frekans

w_{npll} : faz kilitlemeli çevrim sisteminin doğal frekansı

k_{ppll} : faz kilitlemeli çevrim kontrolündeki oransal kazanç

k_{ipll} : faz kilitlemeli çevrim kontrolündeki integral kazanç

f_{sw}, w_{sw} : anahtarlama frekansı ve doğal frekansı

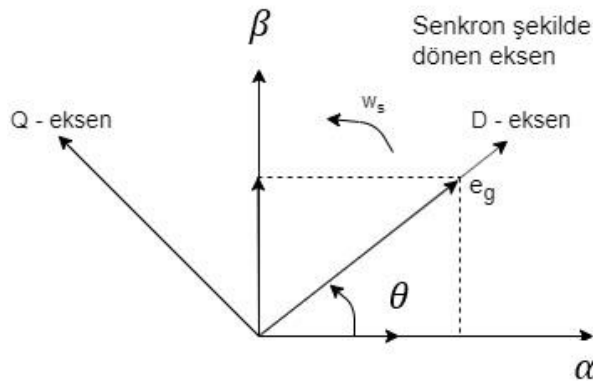
$$k_{ppll} = \frac{2\zeta w_{npll}}{V_s} \quad [3.9]$$

$$k_{ipll} = \frac{w_{npll}^2}{V_s} \quad [3.10]$$

$$w_{npll} = \frac{w_{sw}}{25} \quad ; \quad w_{sw} = 2\pi f_{sw} \quad [3.11]$$

3.2 Şebeke Tarafı Dönüştürücü Kontrolü

Şebeke tarafı dönüştürücü kontrolünün amacı DC-link geriliminin kontrolü ve ihtiyaç halinde şebekeye reaktif güç sağlamasıdır. Şebeke tarafı dönüştürücü kontrolünde, vektör kontrol yöntemi (stator gerilim oryantasyonu) kullanılarak üç fazlı sistem iki fazlı (dq eksen takımına) indirgenir. Her bir eksen takımı ile bir kontrol değişkeni kontrol edilir. Şebeke tarafı dönüştürücü için DQ senkron referans frame nin vektör diyagramı Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2: Şebeke tarafı dönüştürücü için DQ senkron referans frame nin vektör diyagramı

Şebeke tarafı dönüştürücü kontrolünde uygun anahtarlama sinyallerini elde etmek için elde edilen d ve q eksenlerinin modülasyon indeksleri,

$$M_{qf} = [F_{if_q}(I_{qf}^* - I_{qf}) + w_e L_f I_{df} + V_q] \frac{2}{V_{dc}} \quad [3.16]$$

$$M_{df} = [F_{if_d}(I_{df}^* - I_{df}) - w_e L_f I_{qf} + V_d] \frac{2}{V_{dc}} \quad [3.17]$$

Akım kontrolünün transfer fonksiyonu,

$$\frac{I_{df}}{I_{df}^*} = \frac{I_{qf}}{I_{qf}^*} = \frac{\frac{1}{L_f} (s k_{pi} + k_{ii})}{s^2 + s \frac{1}{L_f} (r_f + k_{pi}) + \frac{1}{L_f} k_{ii}} \quad [3.18]$$

Şebeke tarafı dönüştürücü kontrolünde elde edilen transfer fonksiyonları ve denklemler dikkate alınarak kontrolör katsayıları elde edilir. Bu aşamada ikinci dereceden transfer fonksiyonun karakteristik denklemi ile akım kontrolünün karakteristik denklemi karşılaştırıldığında akım kontrolör katsayıları,

$$s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2$$

ζ : sönümlleme katsayısı (0.7 – 0.95 arasında seçilebilir.)

w_{oc} : STD sisteminde akım kontrolünün doğal frekansı

k_{pi} : STD sisteminde akım kontrolünün oransal kazancı

k_{ii} : STD sisteminde akım kontrolünün integral kazancı

L_f : STD sisteminde endüktans filtre değeri

r_f : STD sisteminde endüktans filtresinin iç direnci

$$F_{if_d} = F_{if_q} = k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s} \quad [3.19]$$

$$k_{pi} = 2\zeta w_{oc} L_f - r_f \quad [3.20]$$

$$k_{ii} = L_f w_{oc}^2 \quad [3.21]$$

$$w_{oc} = \frac{w_{sw}}{100} \quad [3.22]$$

Şebeke tarafı dönüştürücü de iç çevrim olan akım kontrolünde tasarımlarının tamamlanmasından sonra, dış çevrim olan DC link gerilim kontrolünün transfer fonksiyonun elde edilecektir. DC link gerilim kontrolünün transfer fonksiyonu,

$$C_{dc} \frac{d}{dt} V_{dc} = F_{dc} (V_{dc}^* - V_{dc}) \quad [3.23]$$

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{\frac{1}{C_{dc}}(sk_{pdc} + k_{idc})}{s^2 + s\frac{1}{C_{dc}} + \frac{1}{C_{dc}}k_{ii}} \quad [3.24]$$

C_{dc} : DC link kapasitörler

V_{dc} : DC link gerilimi

DC link gerilim kontrolünde elde edilen transfer fonksiyonları ve denklemler dikkate alınarak kontrolör katsayıları belirlenir. Bu süreçte ikinci dereceden transfer fonksiyonun karakteristik denklemi ile DC link gerilim kontrolünün karakteristik denklemi karşılaştırıldığında dc link gerilim kontrolör katsayıları[6],

$$s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2$$

ζ : sönümlleme katsayısı (0.7 – 0.95 arasında seçilebilir.)

w_{oc} : STD sisteminde dc link gerilim kontrolünün doğal frekansı

k_{pdc} : DC link gerilim kontrolünün oransal kazancı

k_{idc} : DC link gerilim kontrolünün integral kazancı

$$F_{dc} = k_{pdc} + \frac{k_{idc}}{s} \quad [3.25]$$

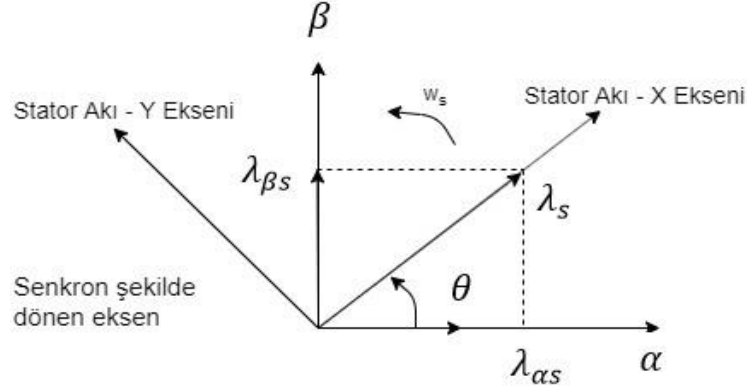
$$k_{pdc} = 2\zeta w_{odc} C_{dc} \quad [3.26]$$

$$k_{idc} = C_{dc} w_{odc}^2 \quad [3.27]$$

$$w_{odc} = \frac{w_i}{20} = \frac{\frac{w_{sw}}{30}}{20} = \frac{w_{sw}}{600} \quad [3.28]$$

3.3 Generatör Tarafı Dönüştürücü Kontrolü

Çift beslemeli asenkron generatör stator akı vektörünün (stator akı oryantasyonu) konumu q eksen ile hizalanması ile senkron bir şekilde dönen referans frame kullanılarak kontrol edilir. Böylece üç fazlı eksen takımı dq eksen takımına indirgenir ve stator taraftaki aktif ve reaktif güçler ayrı ayrı kontrol edilebilir. Durağan referans frame ile stator akı referans frame arasındaki ilişkiyi gösteren uzay vektörü Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Stator akı ve durağan referans arasındaki ilişkiyi gösteren uzay vektörü

Stator akı oryantasyonunda, stator direncinin etkisi küçük olduğundan ihmal edilir. Stator akısının d bileşeni sıfır, q bileşeni ise sabit bir değerdir. Bu koşullar altında, stator akı reference frame ile ifade edilen ÇBAG'nün modeli:

$$|\lambda_s| = L_m i_{ms} = \lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad [3.29]$$

$$i_{qs} = \frac{L_m i_{ms} - L_m i_{qr}}{L_s} = \frac{\lambda_{qs} - L_m i_{qr}}{L_s} \quad [3.30]$$

$$\lambda_{ds} = 0 = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad [3.31]$$

$$i_{ds} = -\frac{L_m i_{dr}}{L_s} \quad [3.32]$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} = L_r i_{dr} + L_m \left(-\frac{L_m i_{dr}}{L_s} \right) = L_r i_{dr} - \frac{L_m^2 i_{dr}}{L_s} \quad [3.33]$$

$$\begin{aligned} \lambda_{qr} &= L_r i_{qr} + L_m i_{qs} = L_r i_{qr} + L_m \left(\frac{L_m i_{ms} - L_m i_{qr}}{L_s} \right) = L_r i_{qr} + \frac{L_m^2 i_{ms} - L_m^2 i_{qr}}{L_s} \\ &= L_r i_{qr} + \frac{L_m^2 i_{ms}}{L_s} - \frac{L_m^2 i_{qr}}{L_s} = L_r i_{qr} + \frac{L_m \lambda_{qs}}{L_s} - \frac{L_m^2 i_{qr}}{L_s} \end{aligned} \quad [3.34]$$

$$w_{slip} = w_s - w_r \quad [3.35]$$

$$\begin{aligned} v_{dr} &= r_r i_{dr} + \frac{d}{dt} (\lambda_{dr}) - w_{slip} (\lambda_{qr}) \\ &= r_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \left(L_r i_{dr} - \frac{L_m^2 i_{dr}}{L_s} \right) - w_{slip} \left(L_r i_{qr} + \frac{L_m \lambda_{qs}}{L_s} - \frac{L_m^2 i_{qr}}{L_s} \right) \\ &= r_r i_{dr} + \frac{di_{dr}}{dt} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) - w_{slip} \left(L_r i_{qr} + \frac{L_m \lambda_{qs}}{L_s} - \frac{L_m^2 i_{qr}}{L_s} \right) \end{aligned} \quad [3.36]$$

$$\begin{aligned}
v_{qr} &= r_r i_{qr} + \frac{d}{dt}(\lambda_{qr}) + w_{slip}(\lambda_{dr}) \\
&= r_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \left(L_r i_{qr} + \frac{L_m \lambda_{qs}}{L_s} - \frac{L_m^2 i_{qr}}{L_s} \right) + w_{slip} \left(L_r i_{dr} - \frac{L_m^2 i_{dr}}{L_s} \right) \\
&= r_r i_{qr} + \frac{di_{qr}}{dt} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) + w_{slip} \left(L_r i_{dr} - \frac{L_m^2 i_{dr}}{L_s} \right) ; \frac{d}{dt} \left(\frac{L_m \lambda_{qs}}{L_s} \right) \\
&= 0
\end{aligned} \tag{3.37}$$

Stator akı oryantasyonu ile ifade edilen tork, stator aktif ve reaktif güç değerleri:

$$\lambda_{ds} = 0, \quad \lambda_{qs} = \text{sabit} \tag{3.38}$$

$$v_{ds} = r_r i_{ds} + \frac{d}{dt}(\lambda_{ds}) - w_{slip}(\lambda_{qs}) = \text{sabit} \tag{3.39}$$

$$v_{qs} = r_r i_{qs} + \frac{d}{dt}(\lambda_{qs}) + w_{slip}(\lambda_{ds}) = 0 \tag{3.40}$$

$$\begin{aligned}
T &= 1.5 \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) = 1.5 \frac{P}{2} (-\lambda_{qs} i_{ds}) \\
&= 1.5 \frac{P}{2} (-(L_s i_{qs} + L_m i_{qr}) \times i_{ds})
\end{aligned} \tag{3.41}$$

$$P_s = 1.5(v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) = 1.5(v_{ds} i_{ds}) = 1.5(v_{ds}) \left(-\frac{L_m i_{dr}}{L_s} \right) \tag{3.42}$$

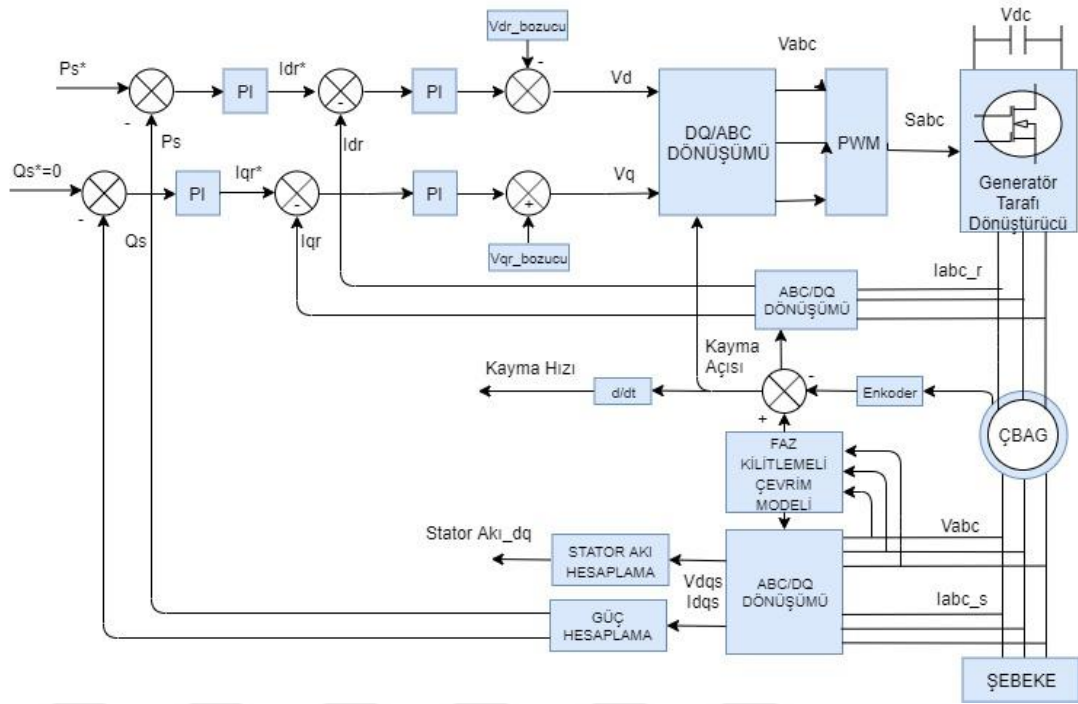
$$Q_s = 1.5(v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) = -1.5(v_{ds} i_{qs}) = -1.5(v_{ds}) \left(\frac{\lambda_{qs} - L_m i_{qr}}{L_s} \right) \tag{3.43}$$

Generatör tarafı dönüştürücü de elde edilen dq eksenindeki kontrol sinyalleri:

$$v_{ds}^* = \Delta v_{dr} - w_{slip} \left(L_r i_{qr} + \frac{L_m \lambda_{qs}}{L_s} - \frac{L_m^2 i_{qr}}{L_s} \right) \tag{3.44}$$

$$v_{qs}^* = \Delta v_{qr} + w_{slip} \left(L_r i_{dr} - \frac{L_m^2 i_{dr}}{L_s} \right) \tag{3.45}$$

Bu kontrol sinyalleri elde edilerek generatör tarafı dönüştürücüsündeki anahtarlama elemanları için modülasyon indeksleri ve PWM'ler üretilir. Generatör tarafı dönüştürücü kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Bu sistemin kontrolünde de kaskad yapılı kontrol kullanılmıştır. Kaskad yapılı kontrol sisteminin iç kontrolünde akım, dış kontrolünde ise stator terminallerindeki aktif ve reaktif güç kontrol edilmektedir.



Şekil 3.5: Generatör tarafı dönüştürücüsünün kontrol sistemi

Generatör tarafı dönüştürücü kontrolünde, ilk olarak iç çevrim olan rotor akım kontrolü için denklemler elde edilecektir. DQ eksenindeki rotor gerilim denklemleri:

$$\begin{aligned}
 v_{dr} &= r_r i_{dr} + \frac{d}{dt}(\lambda_{dr}) - w_{slip}(\lambda_{qr}) \\
 &= r_r i_{dr} + \frac{di_{dr}}{dt} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) - w_{slip} \left(L_r i_{qr} + \frac{L_m \lambda_{qs}}{L_s} - \frac{L_m^2 i_{qr}}{L_s} \right) \quad [3.46]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v_{qr} &= r_r i_{qr} + \frac{d}{dt}(\lambda_{qr}) + w_{slip}(\lambda_{dr}) \\
 &= r_r i_{qr} + \frac{di_{qr}}{dt} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) + w_{slip} \left(L_r i_{dr} - \frac{L_m^2 i_{dr}}{L_s} \right) \quad [3.47]
 \end{aligned}$$

Generatör tarafı dönüştürücü kontrolünde, ÇBAG'den gelen kompanzasyon terimleri:

$$v_{dr_bozucu} = w_{slip} \left(L_r i_{qr} + \frac{L_m \lambda_{qs}}{L_s} - \frac{L_m^2 i_{qr}}{L_s} \right) \quad [3.48]$$

$$v_{qr_bozucu} = w_{slip} \left(L_r i_{dr} - \frac{L_m^2 i_{dr}}{L_s} \right) \quad [3.49]$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} + \frac{d}{dt}(\lambda_{dr}) - w_{slip}(\lambda_{qr}) = r_r i_{dr} + \frac{di_{dr}}{dt} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) - v_{dr_bozucu} \quad [3.50]$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{d}{dt}(\lambda_{qr}) + w_{slip}(\lambda_{dr}) = r_r i_{qr} + \frac{di_{qr}}{dt} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) + v_{qr_bozucu} \quad [3.51]$$

$$v_{dr} + v_{dr_bozucu} = r_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \left(L_r i_{dr} - \frac{L_m^2 i_{dr}}{L_s} \right) = r_r i_{dr} + \frac{di_{dr}}{dt} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \quad [3.52]$$

$$\begin{aligned} v_{qr} + v_{qr_bozucu} &= r_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \left(L_r i_{qr} + \frac{L_m \lambda_{qs}}{L_s} - \frac{L_m^2 i_{qr}}{L_s} \right) \\ &= r_r i_{qr} + \frac{di_{qr}}{dt} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \quad ; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{L_m \lambda_{qs}}{L_s} : sabit \right) = 0 \end{aligned} \quad [3.53]$$

DQ eksen takımındaki rotor gerilimlerinde düzenleme yapılırsa[1],

$$v_{dr}^* = r_r i_{dr} + \frac{di_{dr}}{dt} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) - v_{dr_bozucu} \quad [3.54]$$

$$v_{qr}^* = r_r i_{qr} + \frac{di_{qr}}{dt} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) + v_{qr_bozucu} \quad [3.55]$$

Kontrolör tasarımı için elde edilen rotor akımlarının transfer fonksiyonları,

$$v_{dr}' = \left(k_{p_d} + \frac{k_{i_d}}{s} \right) (I_{dr_ref} - I_{dr}) \quad [3.56]$$

$$v_{qr}' = \left(k_{p_q} + \frac{k_{i_q}}{s} \right) (I_{qr_ref} - I_{qr}) \quad [3.57]$$

$$r_r I_{dr} + I_{dr} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) s = \left(k_{p_d} + \frac{k_{i_d}}{s} \right) (I_{dr_ref} - I_{dr}) \quad [3.58]$$

$$r_r I_{qr} + I_{qr} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) s = \left(k_{p_q} + \frac{k_{i_q}}{s} \right) (I_{qr_ref} - I_{qr}) \quad [3.59]$$

$$\begin{aligned} \frac{I_{dr}}{I_{dr_ref}} &= \frac{\left(k_{p_d} + \frac{k_{i_d}}{s} \right) s L_s}{r_r L_s s + L_s L_r s^2 - L_m^2 s^2 + k_{p_d} L_s s + k_{i_d} L_s} \\ &= \frac{k_{p_d} L_s s + k_{i_d} L_s}{s^2 (L_s L_r - L_m^2) + s (r_r L_s + k_{p_d} L_s) + k_{i_d} L_s} \end{aligned} \quad [3.60]$$

$$\begin{aligned} \frac{I_{qr}}{I_{qr_ref}} &= \frac{\left(k_{p_q} + \frac{k_{i_q}}{s} \right) s L_s}{r_r L_s s + L_s L_r s^2 - L_m^2 s^2 + k_{p_q} L_s s + k_{i_q} L_s} \\ &= \frac{k_{p_q} L_s s + k_{i_q} L_s}{s^2 (L_s L_r - L_m^2) + s (r_r L_s + k_{p_q} L_s) + k_{i_q} L_s} \end{aligned} \quad [3.61]$$

Rotor akım kontrolünde elde edilen transfer fonksiyonları ve denklemler dikkate alınarak kontrolör tasarımı gerçekleştirilir. İkinci dereceden transfer fonksiyonun karakteristik denklemi ile rotor akım kontrolünün karakteristik denklemi karşılaştırıldığında rotor akım kontrolör katsayıları,

$$s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2$$

ζ : sönümlleme katsayısı (0.7 – 0.95 arasında seçilebilir.)

w_n : GTD sisteminde rotor akım kontrolünün doğal frekansı

$$F_{id} = F_{iq} = k_{p_{d/q}} + \frac{k_{i_{d/q}}}{s} \quad [3.62]$$

$$k_{i_d}, k_{i_q} = w_n^2 \frac{(L_s L_r - L_m^2)}{L_s} \quad [3.63]$$

$$k_{p_d}, k_{p_q} = \frac{2\zeta w_n (L_s L_r - L_m^2) - r_r L_s}{L_s} \quad [3.64]$$

$$w_n = \frac{w_{sw}}{100} \quad [3.65]$$

Generatör tarafı dönüştürücü kontrolünde, rotor akımlarının d bileşeni ile stator terminallerindeki aktif güç veya hız kontrolü yapılabilmektedir. Rotor akımlarının q bileşeni ile de stator terminallerindeki reaktif güç kontrolü yapılmaktadır. İlk olarak stator terminallerindeki aktif güç kontrolünün tasarımında denklemler,

$$P_s = 1.5(v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs}) = 1.5(v_{ds}i_{ds}) \quad [3.66]$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d}{dt}(\lambda_{ds}) - w_s \lambda_{qs} \quad [3.67]$$

$$P_s = 1.5(v_{ds}i_{ds}) = 1.5 \left(r_s i_{ds} + \frac{d}{dt}(\lambda_{ds}) - w_s \lambda_{qs} \right) (i_{ds}) \quad ; \quad r_s: ihmal \quad [3.68]$$

$$i_{ds} = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} \lambda_{ds} - \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \lambda_{dr} \quad [3.69]$$

$$\begin{aligned} P_s &= 1.5 \left(\frac{d}{dt}(\lambda_{ds}) - w_s \lambda_{qs} \right) (i_{ds}) \\ &= 1.5 \left(\frac{d}{dt}(\lambda_{ds}) - w_s \lambda_{qs} \right) \left(\frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} \lambda_{ds} - \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \lambda_{dr} \right) \end{aligned} \quad [3.70]$$

$$P_s = 1.5 \times \left[\frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \right] \times \left[\frac{d}{dt}(\lambda_{ds}) - w_s \lambda_{qs} \right] \times [L_r \lambda_{ds} - L_m \lambda_{dr}] \quad [3.71]$$

$\lambda_{ds} = 0$, $\lambda_{qs} = sabit$ ifadesi dikkate alınarak,

$$P_s = 1.5 \times \left[\frac{1}{L_s L_r - L m^2} \right] \times [-w_s \lambda_{qs} L_r \lambda_{ds} + w_s \lambda_{qs} L_m \lambda_{dr}] ; -w_s \lambda_{qs} L_r \lambda_{ds} = 0 \quad [3.72]$$

$$P_s = 1.5 \times \left[\frac{1}{L_s L_r - L m^2} \right] \times [w_s \lambda_{qs} L_m \lambda_{dr}] \quad [3.73]$$

$$\frac{d}{dt}(P_s) = 1.5 \times \left[\frac{w_s \lambda_{qs} L_m}{L_s L_r - L m^2} \right] \times \left[\frac{d}{dt} \lambda_{dr} \right] \quad [3.74]$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} + \frac{d}{dt}(\lambda_{dr}) - w_{slip}(\lambda_{qr}) \quad [3.75]$$

$$\frac{d}{dt}(P_s) = 1.5 \times \left[\frac{w_s \lambda_{qs} L_m}{L_s L_r - L m^2} \right] \times [v_{dr} - r_r i_{dr} + w_{slip}(\lambda_{qr})] \quad [3.76]$$

$$\frac{2}{3} \left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m} \right) \times \frac{d}{dt}(P_s) = \Delta P_s = F_{Ps} (P_{sref} - P_s) \quad [3.77]$$

Aktif güç kontrolü için tasarlanan PI kontrolörü,

$$F_{Ps} = \left(k_{pPs} + \frac{k_{iPs}}{s} \right) \quad [3.78]$$

$$I_{dr}^* = \frac{1}{r_r} [v_{dr} + w_{slip}(\lambda_{dr}) - \Delta P_s] ; \lambda_{qs}: sabit \quad [3.79]$$

Aktif güç kontrolü için elde edilen transfer fonksiyonu,

$$\frac{2}{3} \left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m} \right) \times s(P_s) = \left(k_{pPs} + \frac{k_{iPs}}{s} \right) P_{sref} - \left(k_{pPs} + \frac{k_{iPs}}{s} \right) P_s \quad [3.80]$$

$$P_s \left[\frac{2}{3} \left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m} \right) s + \left(k_{pPs} + \frac{k_{iPs}}{s} \right) \right] = \left(k_{pPs} + \frac{k_{iPs}}{s} \right) P_{sref} \quad [3.81]$$

$$\begin{aligned}
\frac{P_s}{P_{sref}} &= \frac{\left(k_{p_{Ps}} + \frac{k_{i_{Ps}}}{s}\right)}{\left[\frac{2}{3}\left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m}\right)s + \left(k_{p_{Ps}} + \frac{k_{i_{Ps}}}{s}\right)\right]} = \frac{\left(k_{p_{Ps}} + \frac{k_{i_{Ps}}}{s}\right)}{\frac{2}{3}\left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m}\right)s^2 + k_{p_{Ps}}s + k_{i_{Ps}}} \\
&= \frac{k_{p_{Ps}}s + k_{i_{Ps}}}{\frac{2}{3}\left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m}\right)s^2 + k_{p_{Ps}}s + k_{i_{Ps}}} \\
&= \frac{\frac{k_{p_{Ps}}s + k_{i_{Ps}}}{\frac{2}{3}\left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m}\right)}}{s^2 + \frac{k_{p_{Ps}}}{\frac{2}{3}\left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m}\right)}s + \frac{k_{i_{Ps}}}{\frac{2}{3}\left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m}\right)}} \\
&= \frac{\frac{k_{p_{Ps}}s + k_{i_{Ps}}}{a}}{s^2 + \frac{k_{p_{Ps}}}{a}s + \frac{k_{i_{Ps}}}{a}} ; \quad a = \frac{2}{3}\left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m}\right) \quad [3.82]
\end{aligned}$$

Aktif güç kontrolünde elde edilen transfer fonksiyonları ve denklemler dikkate alınarak kontrolör tasarımı gerçekleştirilir. İkinci dereceden transfer fonksiyonun karakteristik denklemi ile aktif güç kontrolünün karakteristik denklemi karşılaştırıldığında aktif güç kontrolör katsayıları,

$$s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2$$

ζ : sönümlleme katsayısı (0.7 – 0.95 arasında seçilebilir.)

w_n : GTD sisteminde stator aktif güç kontrolünün doğal frekansı

$$k_{i_{Ps}} = \frac{2}{3}\left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m}\right) \times w_{np}^2 \quad [3.83]$$

$$k_{p_{Ps}} = \frac{2}{3}\left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m}\right) \times 2 \times \zeta \times w_{np} \quad [3.84]$$

$$w_{np} = \frac{w_n}{25} = \frac{\frac{w_{sw}}{100}}{25} = \frac{w_{sw}}{2500} \quad [3.85]$$

D eksen takımının dış çevriminde aktif güç kontrolüne alternatif olarak hız kontrolü de yapılabilir. Hız kontrolü denklemleri,

$$\frac{2J}{P} \frac{d}{dt}(w_r) = T_m - T_e = \Delta_{wr} = F_{wr}(w_r^* - w_r) \quad [3.86]$$

Hız kontrolü için tasarlanan PI kontrolörü,

$$F_{wr} = k_{p_{wr}} + \frac{k_{i_{wr}}}{s} \quad [3.87]$$

Kontrolör tasarımı için elde edilen hız kontrolünün transfer fonksiyonu,

$$\frac{2J}{P}(w_r)s = (k_{p_{wr}} + \frac{k_{i_{wr}}}{s})(w_r^* - w_r) \quad [3.88]$$

$$\frac{2J}{P}(w_r)s = (k_{p_{wr}} + \frac{k_{i_{wr}}}{s})w_r^* - (k_{p_{wr}} + \frac{k_{i_{wr}}}{s})w_r \quad [3.89]$$

$$w_r \left(\frac{2J}{P}s + k_{p_{wr}} + \frac{k_{i_{wr}}}{s} \right) = (k_{p_{wr}} + \frac{k_{i_{wr}}}{s})w_r^* \quad [3.90]$$

$$\frac{w_r}{w_r^*} = \frac{(k_{p_{wr}} + \frac{k_{i_{wr}}}{s})}{\frac{2J}{P}s + k_{p_{wr}} + \frac{k_{i_{wr}}}{s}} = \frac{(k_{p_{wr}} + \frac{k_{i_{wr}}}{s})}{\frac{2J}{P}s^2 + k_{p_{wr}}s + \frac{k_{i_{wr}}}{s}} = \frac{k_{p_{wr}}s + k_{i_{wr}}}{\frac{2J}{P}s^2 + k_{p_{wr}}s + \frac{k_{i_{wr}}}{s}} \quad [3.91]$$

$$\frac{w_r}{w_r^*} = \frac{\frac{P}{2J}(k_{p_{wr}}s + k_{i_{wr}})}{s^2 + s\frac{Pk_{p_{wr}}}{2J} + \frac{Pk_{i_{wr}}}{2J}} \quad [3.92]$$

Hız kontrolünde elde edilen transfer fonksiyonları ve denklemler dikkate alınarak kontrolör tasarımı gerçekleştirilir. İkinci dereceden transfer fonksiyonun karakteristik denklemi ile hız kontrolünün karakteristik denklemi karşılaştırıldığında hız kontrolör katsayıları,

$$s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2$$

ζ : sönümlleme katsayısı (0.7 – 0.95 arasında seçilebilir.)

w_n : GTD sisteminde hız kontrolünün doğal frekansı

$$k_{i_{wr}} = w_{nw}^2 \times \frac{2J}{P} \quad [3.93]$$

$$k_{p_{wr}} = \frac{2J}{P} \times 2 \times \zeta \times w_{nw} \quad [3.94]$$

$$w_{nw} = \frac{w_n}{1250} = \frac{\frac{w_{sw}}{100}}{1250} = \frac{w_{sw}}{125000} \quad [3.95]$$

Stator terminallerindeki reaktif güç kontrolü q eksen takımı ile gerçekleşir. Reaktif güç kontrolünün kontrolör tasarımları için denklemlerin elde edilmesi gerekmektedir.

Bu denklemler,

$$Q_s = 1.5(v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs}) = -1.5(v_{ds}i_{qs}) \quad [3.96]$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d}{dt}(\lambda_{ds}) - w_s \lambda_{qs} \quad [3.97]$$

$$Q_s = -1.5 \left[r_s i_{ds} + \frac{d}{dt}(\lambda_{ds}) - w_s \lambda_{qs} \right] [i_{qs}] \quad ; \quad r_s: ihmal \quad [3.98]$$

$$i_{qs} = \frac{L_r}{L_s L_r - L m^2} \lambda_{qs} - \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \lambda_{qr} \quad [3.99]$$

$$\begin{aligned} Q_s &= -1.5 \left[\frac{d}{dt}(\lambda_{ds}) - w_s \lambda_{qs} \right] [i_{qs}] \\ &= -1.5 \left[\frac{d}{dt}(\lambda_{ds}) - w_s \lambda_{qs} \right] \left[\frac{L_r}{L_s L_r - L m^2} \lambda_{qs} - \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \lambda_{qr} \right] \end{aligned} \quad [3.100]$$

$$Q_s = -1.5 \times \left[\frac{1}{L_s L_r - L m^2} \right] \times \left[\frac{d}{dt}(\lambda_{ds}) - w_s \lambda_{qs} \right] \times [L_r \lambda_{qs} - L_m \lambda_{qr}] \quad [3.101]$$

$\lambda_{ds} = 0, \lambda_{qs} = \text{sabit}$ dikkate alınarak,

$$\begin{aligned} Q_s &= -1.5 \times \left[\frac{1}{L_s L_r - L m^2} \right] \\ &\times [-w_s L_r \lambda_{qs}^2 + w_s \lambda_{qs} L_m \lambda_{qr}] \quad ; \quad -w_s L_r \lambda_{qs}^2: \text{sabit} \end{aligned} \quad [3.102]$$

$$\frac{d}{dt}(Q_s) = -1.5 \times \left[\frac{1}{L_s L_r - L m^2} \right] \times \left[w_s \lambda_{qs} L_m \frac{d}{dt} \lambda_{qr} \right] \quad [3.103]$$

$$\frac{d}{dt}(Q_s) = -1.5 \times \left[\frac{w_s \lambda_{qs} L_m}{L_s L_r - L m^2} \right] \times \left[\frac{d}{dt} \lambda_{qr} \right] \quad [3.104]$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{d}{dt}(\lambda_{qr}) + w_{slip}(\lambda_{dr}) \quad [3.105]$$

$$\frac{d}{dt}(Q_s) = -1.5 \times \left[\frac{w_s \lambda_{qs} L_m}{L_s L_r - L m^2} \right] \times [v_{qr} - r_r i_{qr} - w_{slip}(\lambda_{dr})] \quad [3.106]$$

$$\frac{2}{3} \left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m} \right) \times \frac{d}{dt}(Q_s) = \Delta Q_s = F_{Qs} (Q_{sref} - Q_s) \quad [3.107]$$

Reaktif güç kontrolü için tasarlanan PI kontrolör,

$$F_{Qs} = \left(k_{p_{Qs}} + \frac{k_{i_{Qs}}}{s} \right) \quad [3.108]$$

$$I_{qr}^* = \frac{1}{r_r} [v_{qr} - w_{slip}(\lambda_{dr}) + \Delta Q_s] \quad ; \quad \lambda_{qs}: \text{sabit} \quad [3.109]$$

Kontrolör tasarımı için elde edilen reaktif güç kontrolünün transfer fonksiyonu,

$$\frac{2}{3} \left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m} \right) \times s(Q_s) = \left(k_{p_{Qs}} + \frac{k_{i_{Qs}}}{s} \right) Q_{sref} - \left(k_{p_{Qs}} + \frac{k_{i_{Qs}}}{s} \right) Q_s \quad [3.110]$$

$$Q_s \left[\frac{2}{3} \left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m} \right) s + \left(k_{p_{Qs}} + \frac{k_{i_{Qs}}}{s} \right) \right] = \left(k_{p_{Qs}} + \frac{k_{i_{Qs}}}{s} \right) Q_{sref} \quad [3.111]$$

$$\begin{aligned} \frac{Q_s}{Q_{sref}} &= \frac{\left(k_{p_{Qs}} + \frac{k_{i_{Qs}}}{s} \right)}{\left[\frac{2}{3} \left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m} \right) s + \left(k_{p_{Qs}} + \frac{k_{i_{Qs}}}{s} \right) \right]} \\ &= \frac{\left(k_{p_{Qs}} + \frac{k_{i_{Qs}}}{s} \right)}{\frac{2}{3} \left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m} \right) s + \left(\frac{k_{p_{Qs}} s + k_{i_{Qs}}}{s} \right)} \\ &= \frac{\left(k_{p_{Qs}} + \frac{k_{i_{Qs}}}{s} \right)}{\frac{2 \left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m} \right) s^2 + k_{p_{Qs}} s + k_{i_{Qs}}}{s}} \\ &= \frac{k_{p_{Qs}} s + k_{i_{Qs}}}{\frac{2}{3} \left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m} \right) s^2 + k_{p_{Qs}} s + k_{i_{Qs}}} \\ &= \frac{\frac{k_{p_{Qs}} s + k_{i_{Qs}}}{\frac{2}{3} \left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m} \right)}}{s^2 + \frac{k_{p_{Qs}}}{\frac{2}{3} \left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m} \right)} s + \frac{k_{i_{Qs}}}{\frac{2}{3} \left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m} \right)}} \\ &= \frac{\frac{k_{p_{Qs}} s + k_{i_{Qs}}}{a}}{s^2 + \frac{k_{p_{Qs}} s}{a} + \frac{k_{i_{Qs}}}{a}} ; a = \frac{2}{3} \left(\frac{L_s L_r - L m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m} \right) \end{aligned} \quad [3.112]$$

Reaktif güç kontrolünde elde edilen transfer fonksiyonları ve denklemler dikkate alınarak kontrolör tasarımı gerçekleştirilir. İkinci dereceden transfer fonksiyonun karakteristik denklemi ile reaktif güç kontrolünün karakteristik denklemi karşılaştırıldığında reaktif güç kontrolör katsayıları[6],

$$s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2$$

ζ : sönümleme katsayısı (0.7 – 0.95 arasında seçilebilir.)

w_n : GTD sisteminde stator reaktif güç kontrolünün doğal frekansı

$$k_{i_{qs}} = \frac{2}{3} \left(\frac{L_s L_r - L_m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m} \right) \times w_{nq}^2 \quad [3.113]$$

$$k_{p_{qs}} = \frac{2}{3} \left(\frac{L_s L_r - L_m^2}{w_s \lambda_{qs} L_m} \right) \times 2 \times \zeta \times w_{nq} \quad [3.114]$$

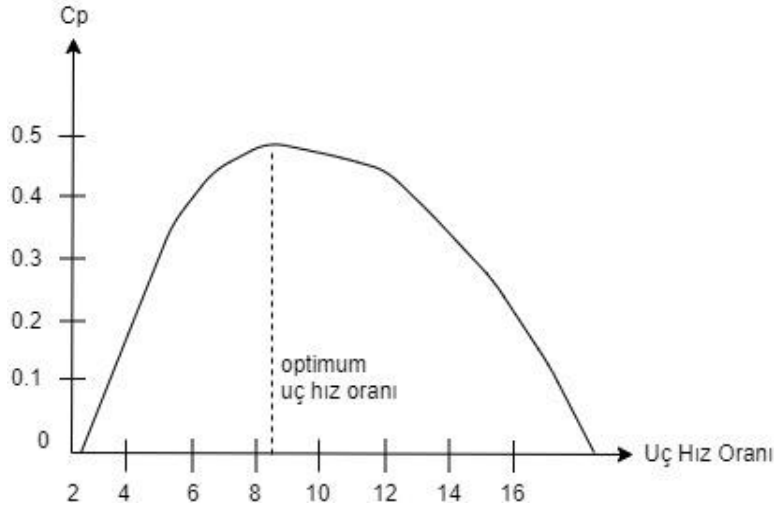
$$w_{nq} = \frac{w_n}{12.5} = \frac{\frac{w_{sw}}{100}}{12.5} = \frac{w_{sw}}{1250} \quad [3.115]$$

3.4 Maksimum Güç Noktası İzleme Kontrolü

Rüzgar hızı nominal rüzgar hızının altında olması durumunda, çift beslemeli asenkron generatör nominal güç değerini üretemez. Bu yüzden, nominal rüzgar hızının altında bir rüzgar hızı olması durumunda mümkün olan maksimum güç değerinin üretilmesi için maksimum güç noktası izleme kontrolü yapılmaktadır[47]. Türbin mekanik çıkış gücü,

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad [3.116]$$

Burada C_p katsayısı, kanat açısı ve uç hız oranı parametrelerine bağlıdır. Bu katsayının değeri, Şekil 3.6’da örnek olarak verilen her bir kanat açısı değeri için çizdirilen $C_p - \lambda$ eğrilerine bağlı olarak belirlenir. Nominal rüzgar hızın altında bir rüzgar hızı mevcut iken, maksimum güç elde edebilmek için kanat açısı sabit ve sıfıra eşittir. Bunun yanında mevcut hız durumunda en yüksek C_p değerini elde etmek için, generatör hızı düzenlenir ve en uygun uç hız oranı elde edilir. Eğer kanat açısı sıfır iken, rüzgar hızı nominal değerine ulaşırsa üretilen güç değeri maksimum değerine ulaşır. Rüzgar hızı artmaya devam ederse, kanat açısı düzenlemesi yapılarak üretilen güç değeri nominal değerini aşması engellenir.



Şekil 3.6: $C_p - \lambda$ eğrisi

Maksimum güç noktası izleme kontrolü sonucu elde edilen güç değeri referans alınarak, generatör tarafı dönüştürücü modelinde stator aktif güç referansı belirlenir.

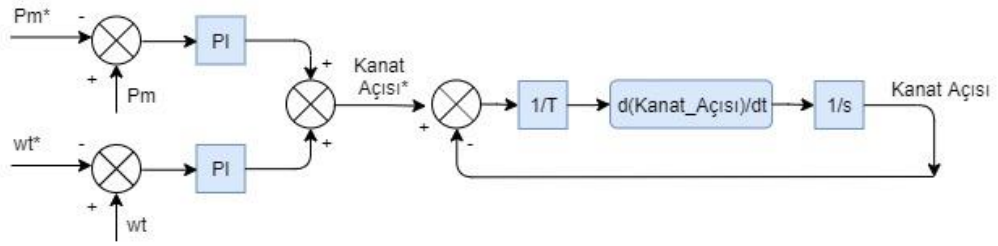
3.5 Kanat Açı Kontrolü

Rüzgar türbin-generatör sistemlerinde rüzgar gücünü efektif kullanabilmek için kullanılan kontrol yöntemlerinden biridir. Rüzgar hızı, nominal rüzgar hızının altında ise, rüzgar türbinin güç katsayısını maksimum olması için kanat açısı sıfır olarak ayarlanır. Eğer rüzgar hızı, nominal rüzgar hızının üzerindeyse rüzgar türbinin çıkış gücünü nominal değerinde sınırlandırılması için kanat açısı kontrolü yapılır [48].

Kanat açısı kontrolünde referans kanat açısının değeri çeşitli giriş değerlerine bağlı olarak elde edilir. Bunlar;

- Rüzgar hızı, kanat açısı referans değeri, rüzgar hızına karşılık gelen kanat açısı eğrilerinden elde edilir.
- Generatör rotor hızı, kontrollü rotor hızı ve onun referans değeri arasındaki fark PI kontrolörü üzerinde geçirilir. PI kontrolör çıkışından kanat açısı referans değeri elde edilir.
- Generatör gücü, generatör gücü ile onun nominal gücü arasındaki fark PI kontrolörü üzerinden geçirilir. PI kontrolör çıkışından kanat açısı referans değeri elde edilir.

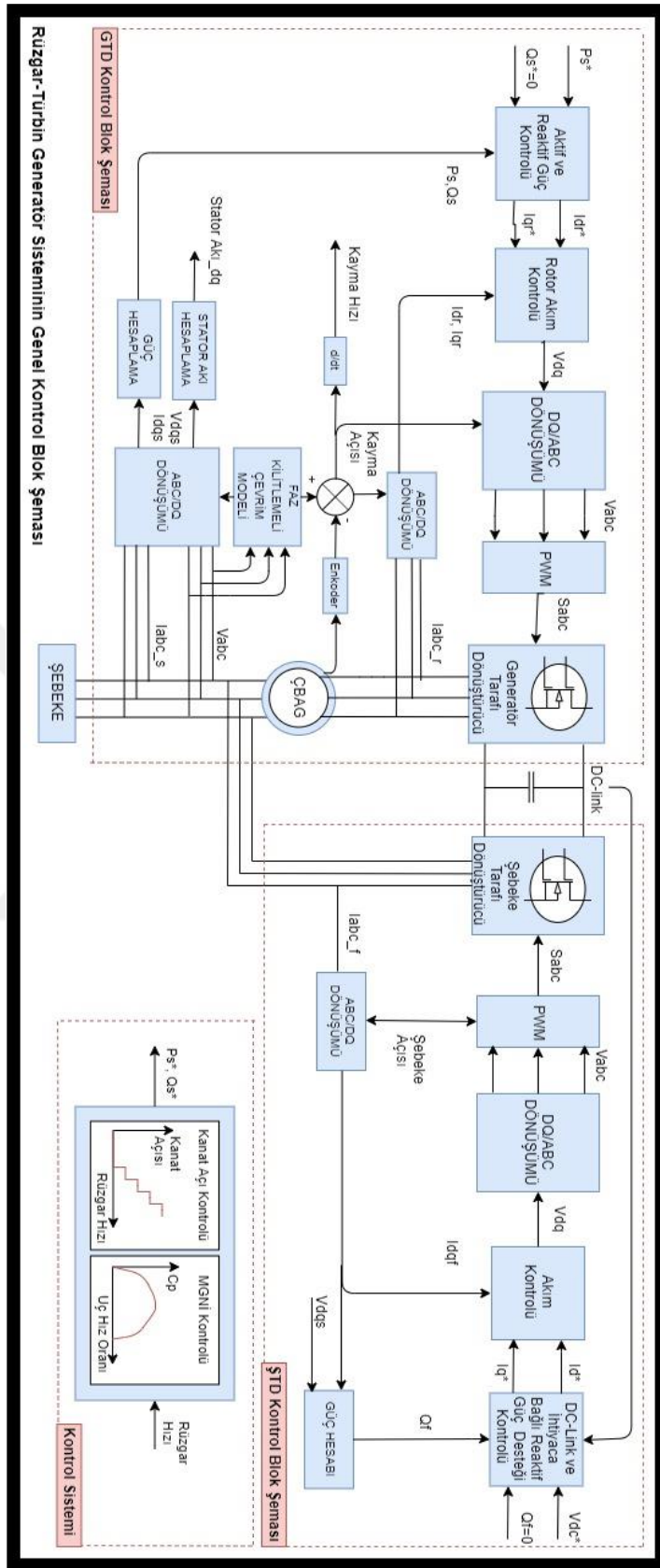
Güç ve hız değerlerinebağlı olarak PI kontrollü kanat açısının kontrol şeması Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7: PI kontrolörü kullanılarak çizilen kanat açısı kontrol şeması

Kanat açılarını uygun pozisyona getirebilmek için kanat servo sistemleri kullanılır. Normal çalışma sürecinde, her saniyede yaklaşık olarak 5-10 derece dönme hızları ile kanat açısı düzenlemesi yapılması beklenir [49].

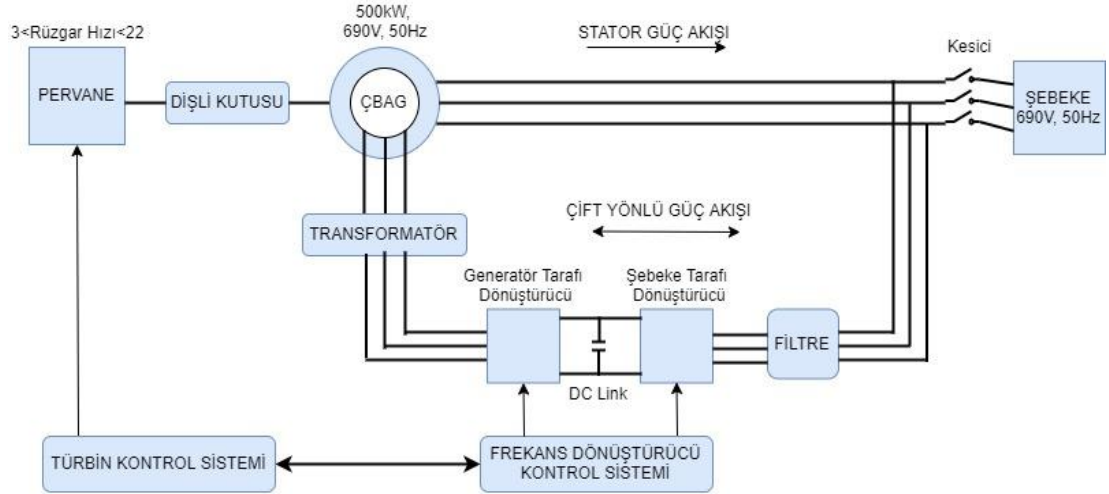
Şebeke tarafı, generatör tarafı, maksimum güç noktası izleme kontrolü ve en son olarak türbin kontrol stratejileri incelendikten sonra, tüm kontrol stratejileri birleştirilmiştir. Rüzgar türbin-generatör sisteminin genel kontrol yapısını Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8: Rüzgar türbin – generatör sisteminin genel kontrol yapısı

4. RÜZGAR TÜRBİN – GENERATÖR SİSTEM MODELİNİN PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde Bölüm 3’de geliştirilen kontrol stratejilerinin performansını incelemek için MATLAB/Simulink ortamında ÇBAG’ünün modellenmesi ve kontrol stratejileri gerçekleştirilecektir. Farklı rüzgar hızlarında, MATLAB/Simulink ortamında kurulan rüzgar türbin-generator sistem modelinin performans analizleri yapılacaktır. MATLAB/Simulink ortamında kurulan sistem modelinin blok diyagramı Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1: MATLAB/Simulink ortamında kurulan sistem modeli

MATLAB/Simulink ortamında kurulan modelin kontrol bilgileri ve teknik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Model kontrol bilgileri ve teknik özellikler

Model Bilgileri	Özellikler
Makina	ÇBAG
Makina Sürücü Sistemi	Frekans dönüştürücü (AC/DC – DC/AC)
Şebeke Tarafı Dönüştürücü	Stator gerilim oryantasyonu, kaskad kontrol yapısı
Generatör Tarafı Dönüştürücü	Stator akı oryantasyonu, kaskad kontrol yapısı
Senkronizasyon	Faz kilitlemeli çevrim modeli
Kanat Açısı Kontrolü	Rüzgar hızı - kanat açısı eğrileri
Maksimum Güç Noktası İzleme Kontrolü	Rüzgar hızına bağlı olarak, C_p -uç hız oranı eğrileri

MATLAB/Simulink ortamında kullanılan frekans dönüştürücüsünün teknik özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2: Frekans dönüştürücüsünün teknik özellikler

Frekans Dönüştürücüsü	Özellikler
Şebeke Tarafı Dönüştürücü	3 fazlı IGBT-diode yapısı, DC-link gerilim kontrolü, reaktif güç ihtiyacı
Generatör Tarafı Dönüştürücü	3 fazlı IGBT-diode yapısı, stator terminallerinde aktif ve reaktif güç kontrolü
DC-Link Gerilimi	1200Vdc
Anahtarlama Frekansı	4kHz
Darbe Genişlik Modülasyonu	Sinüs PWM

MATLAB/Simulink ortamında kullanılan türbin ve ÇBAG’nün teknik özellikleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3: Türbin ve ÇBAG’ün teknik özellikler

Teknik Özellikler	Değeri	Birim
Kanat Uzunluğu	21.5	m
Rotor Çapı	45	m
Rüzgar Hızı (Alt Sınır)	3	m/s
Nominal Rüzgar Hızı	12	m/s
Rüzgar Hızı (Üst Sınır)	25	m/s
Nominal Generatör Gücü	500	kW
Nominal Generatör Hızı	850	d/dk
Generatör Senkron Hız	750	d/dk
Nominal Gerilim	690	V
Frekans	50	Hz
Kutup Sayısı	4	
Stator Direnci	0.015	Ohm
Rotor Direnci	0.015	Ohm
Ortak Endüktans	0.0106	H
Stator Endüktans	0.0113	H
Rotor Endüktans	0.0116	H
Çevirme Oranı	3.8	
Maksimum Kayma Aralığı	± 0.2	

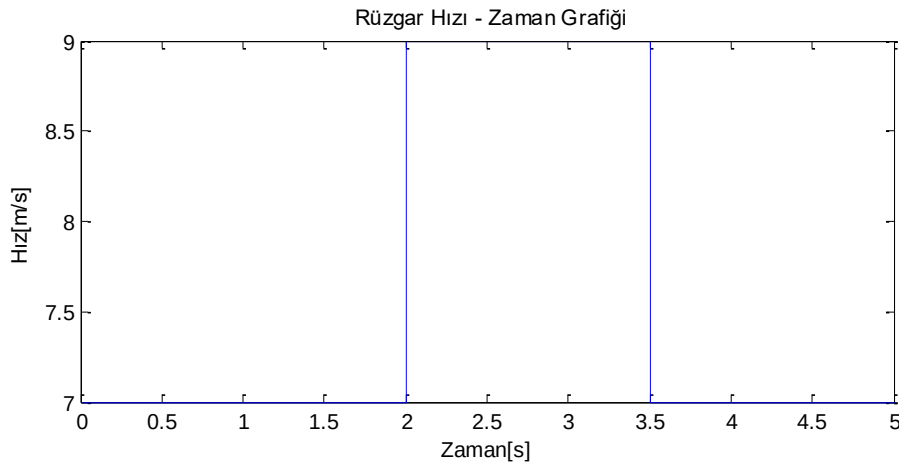
Çift beslemeli asenkron generatörler, rüzgar hızına bağlı olarak hem senkron altı ve hem de üstü çalışabilir. Generatörün hızı senkron hızdan düşük ise generatör senkron altında çalışır. Ancak bu çalışma durumunda şebekeden frekans dönüştürücüsüne doğru bir güç akışı olur. Eğer generatör hızı senkron hızdan yüksek ise, generatör senkron üstü çalışır.

Bu durumda ise, frekans dönüştürücüsünden şebekeye doğru güç akışı olur. Bu sebepten dolayı çift beslemeli asenkron generatörlerin senkron üstü çalışması istenmektedir.

Bu bölümde ilk olarak generatörün senkron altı çalışması, ikinci olarak senkron üstü ve üçüncü olarak hem senkron altı hem senkron üstü çalışması durumlarında geliştirilen model ve kontrol stratejilerinin simülasyonları yapılacaktır. Her bir çalışma durumu için performans değerlendirmesi yapılacaktır. Bu simülasyon çalışmalara ek olarak, nominal rüzgar hızından daha düşük rüzgar hızlarında mümkün olan maksimum güç üretimi için geliştirilen maksimum güç noktası izleme kontrolü için simülasyon çalışmaları yapılacaktır. Son olarak nominal rüzgar hızının üzerinde bir rüzgar hızı uygulanarak kanat açısı kontrolünün simülasyon çalışmaları yapılacaktır. Bu simülasyon çalışmalarının analizleri ve performans değerlendirmesi yapılacaktır.

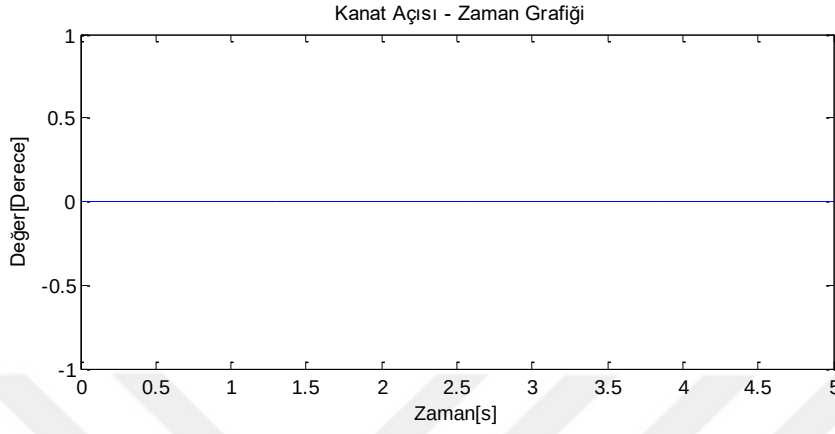
4.1 Senkron Altı Çalışması Durumunda Performans Analizi

Bu çalışmada, çift beslemeli asenkron generatör senkron hızdan daha düşük hızlarda çalıştırılmıştır. Bundan dolayı uygulanan rüzgar hızı, 0-2sn boyunca 7m/s, 2-3.5sn boyunca 9m/s, 3.5-5sn boyunca tekrardan 7m/s düşmektedir. 0-0.5sn aralığında senkronizasyonun sağlanmasından dolayı herhangi bir güç akışı olmaz. Bu zaman aralığında aktif güç referansı sıfırdır. 0.5sn'den sonra rüzgar hızına bağlı olarak şebekeye doğru güç akışı gerçekleşir. Uygulanan rüzgar hızı Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Bu rüzgar hızına bağlı olarak, MATLAB ortamında kurulan model üzerinde yapılan simülasyon çalışmalarının sonuçları aşağıda verilmiştir.

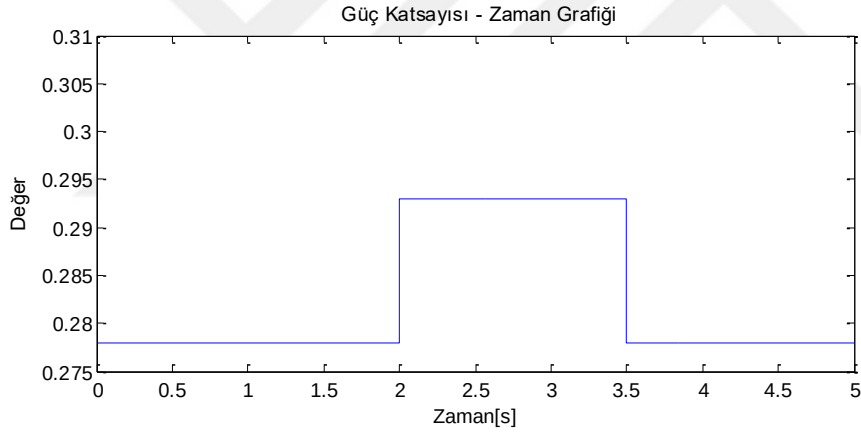


Şekil 4.2: Sistem modeli üzerinde uygulanan rüzgar hızı (senkron altı)

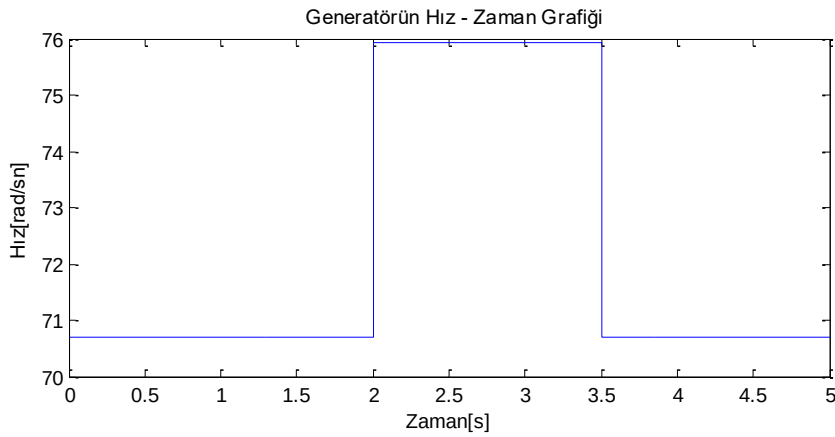
Senkron altı çalışmada yapılan analiz sonucunda rüzgar hızı, nominal rüzgar hızından düşük olmasından dolayı kanat açısı sıfırdır. Uygulanan rüzgar hızına bağlı olarak elde edilen kanat açısı, güç katsayısı ve generatör hızı sonuçları sırasıyla Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.3: Kanat açısı (senkron altı)

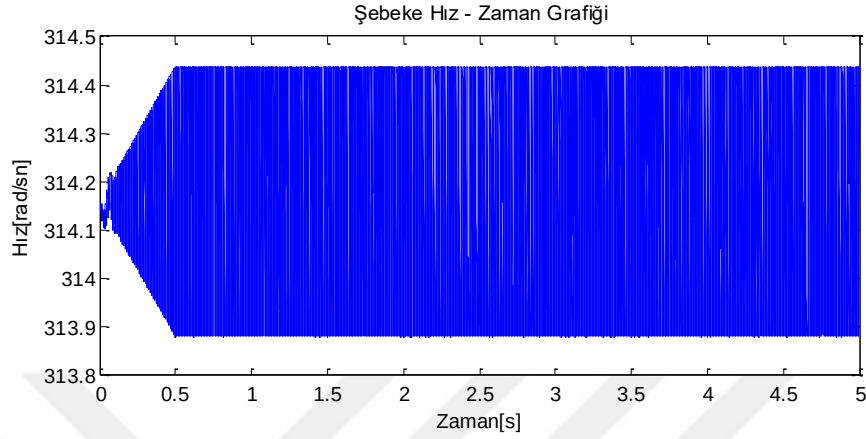


Şekil 4.4: Güç katsayısı (senkron altı)

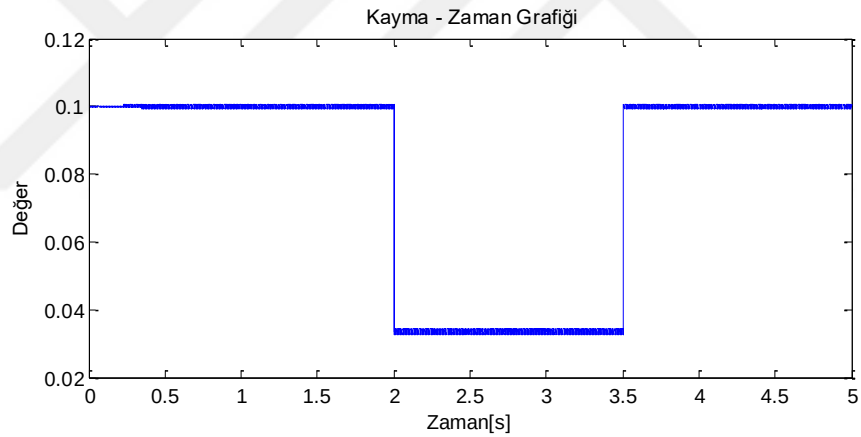


Şekil 4.5: ÇBAG'ün hızı (senkron altı)

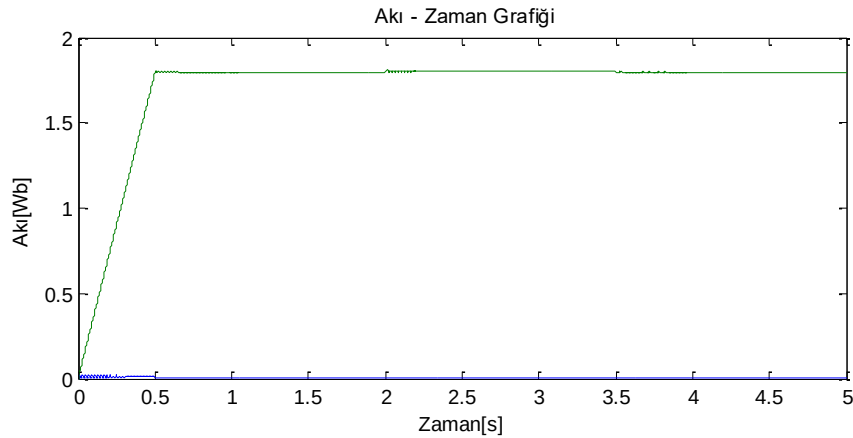
Senkron altı çalışmada yapılan analizlerde, rüzgar değişimine bağlı olarak generatör hızı değiştiği için ÇBAG’ünde kayma değeri değişmektedir. Uygulanan rüzgar hızına bağlı olarak elde edilen şebeke açısıl frekansı, kayma değeri ve stator akı değerinin sonuçları sırasıyla Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.6: Şebeke açısıl frekansı (senkron altı)

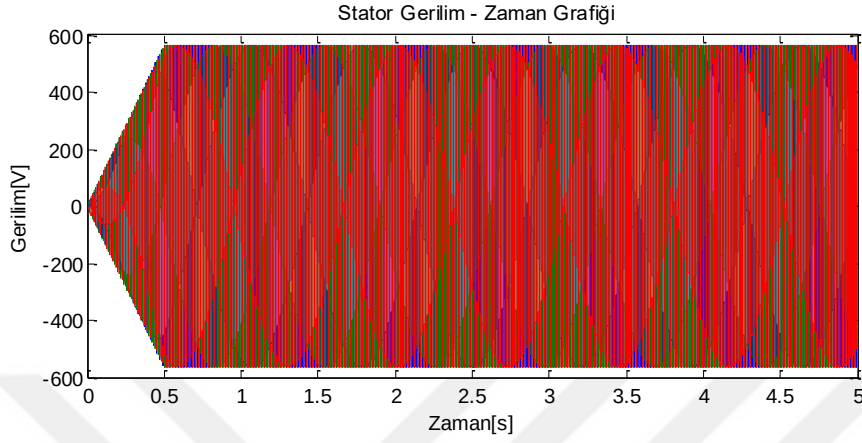


Şekil 4.7: ÇBAG’ün kayma değeri (senkron altı)

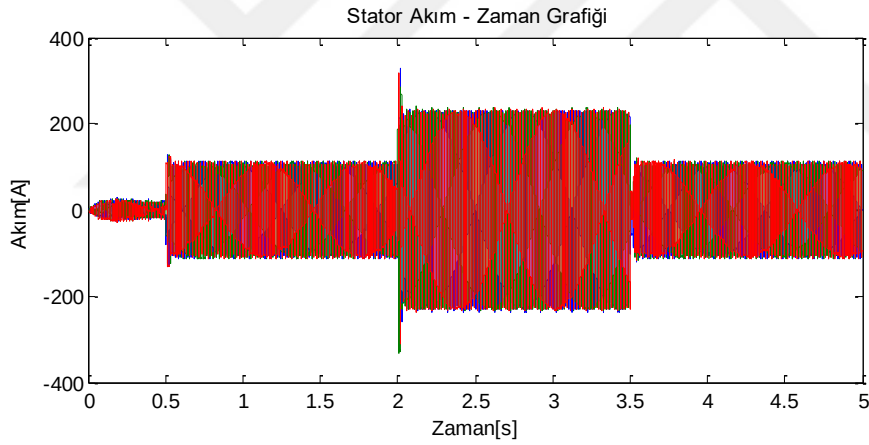


Şekil 4.8 ÇBAG’de stator akı değeri (DQ, senkron altı)

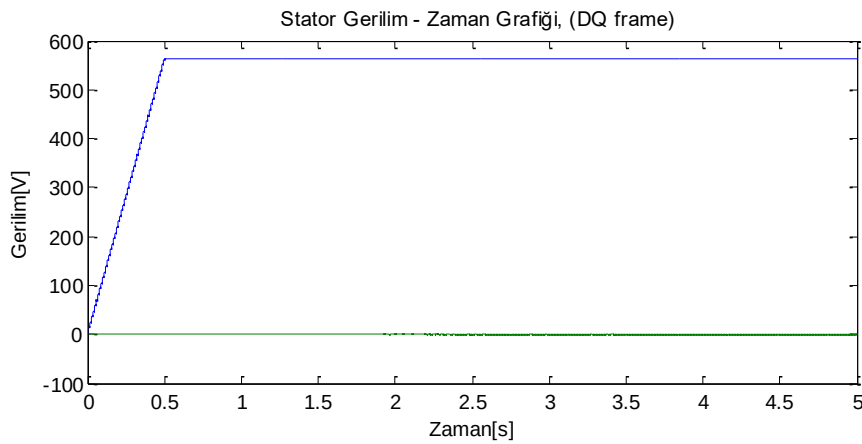
Senkron altı çalışmada yapılan analizlerde, rüzgar değişimine bağlı olarak stator aktif güç referansı değişmesinden dolayı stator akım değerleri değişmektedir. Uygulanan rüzgar hızına bağlı olarak elde edilen stator gerilim, stator akım ve stator gerilim (DQ) sonuçları sırasıyla Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.9: ÇBAG’ün stator gerilimi (senkron altı)

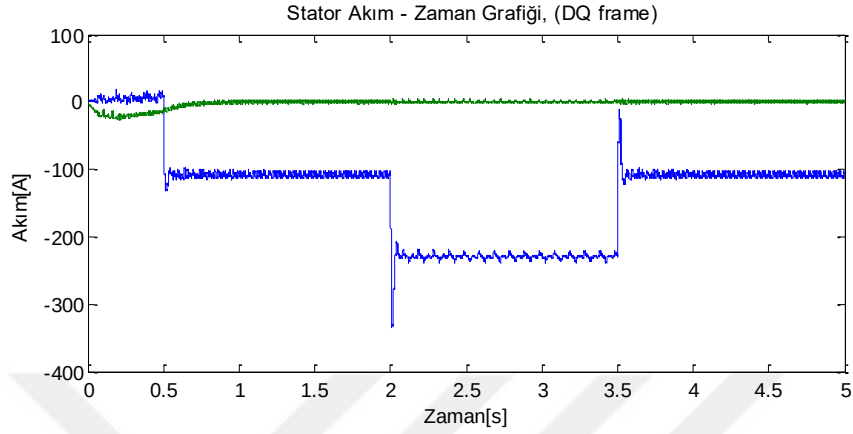


Şekil 4.10: ÇBAG’ün stator akımı (senkron altı)

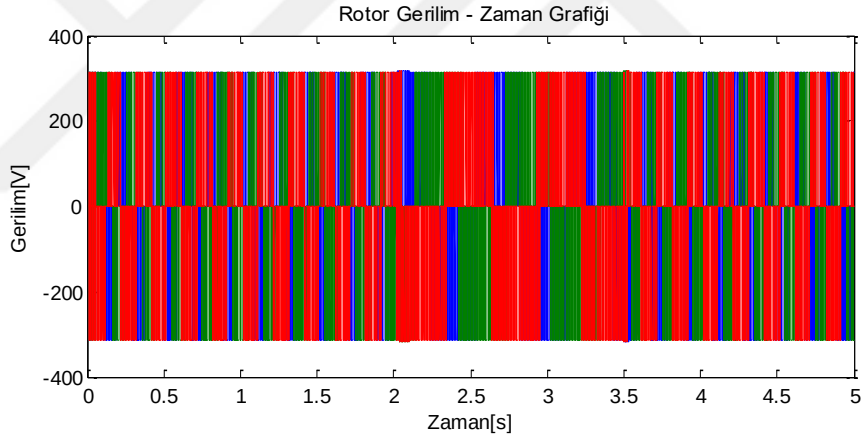


Şekil 4.11: ÇBAG’ün stator gerilimi (DQ, senkron altı)

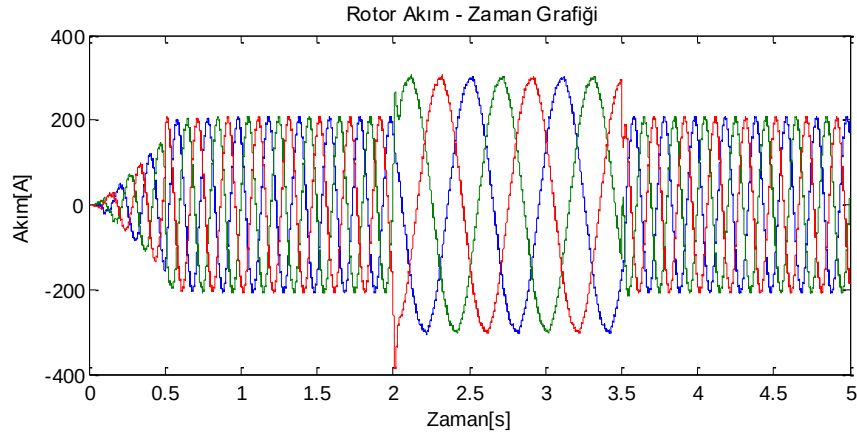
Rüzgar hızı 7m/s iken, üretilen stator akımı yaklaşık olarak 120 A'dır. Rüzgar hızının 9m/s çıkmasıyla birlikte stator akım değeri yaklaşık olarak 235 A değerine ulaşır. Uygulanan rüzgar hızına bağlı olarak elde edilen stator akım (DQ), rotor gerilim ve rotor akım sonuçları sırasıyla Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de verilmiştir.



Şekil 4.12: ÇBAG'ün stator akımı (DQ, senkron altı)

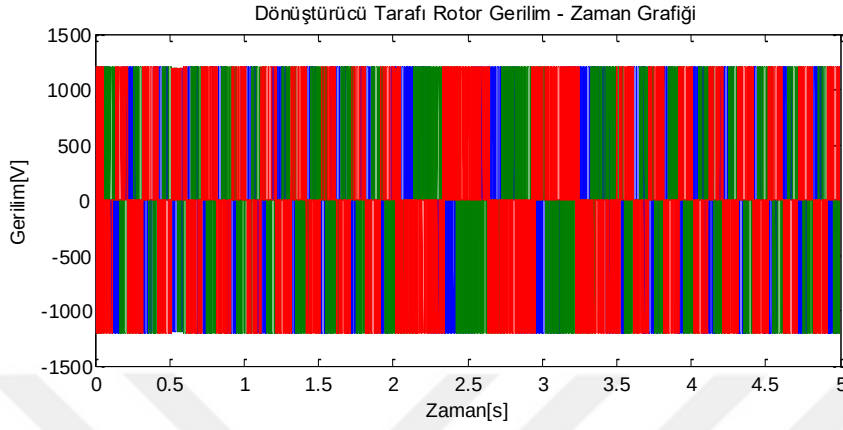


Şekil 4.13: ÇBAG'ün rotor gerilimi (senkron altı)

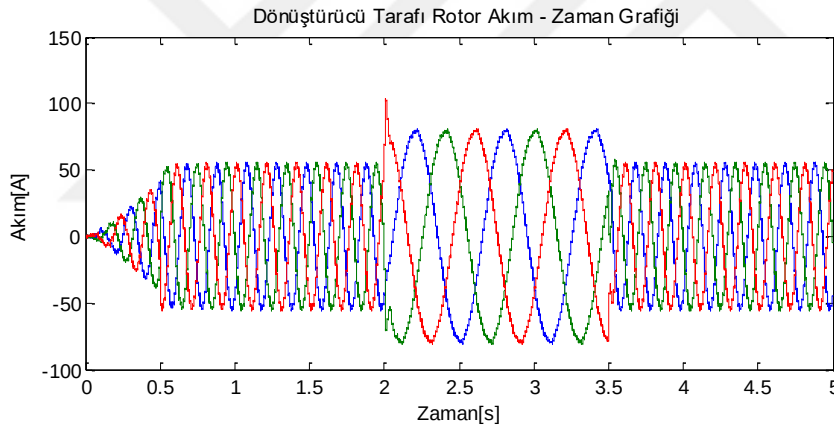


Şekil 4.14: ÇBAG'ün rotor akımı (senkron altı)

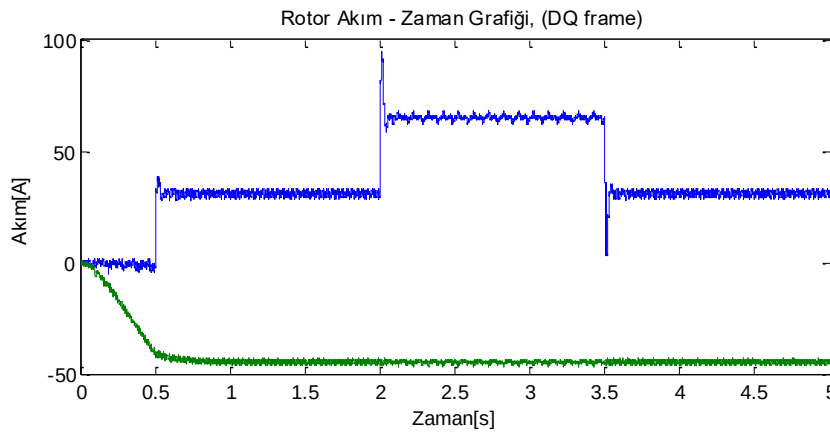
Rüzgar türbinlerinde rüzgar hızının değişmesi sonucu türbin kontrolü stator güç referansını güncellemesi sonucunda, yeni rotor akım güç referans üretilir. Senkron altı çalışmada, GTD terminalleri üzerindeki gerilim, GTD terminalleri üzerindeki akım ve rotor akım (DQ) sonuçları sırasıyla Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.15: GTD terminalleri üzerindeki gerilim (senkron altı)

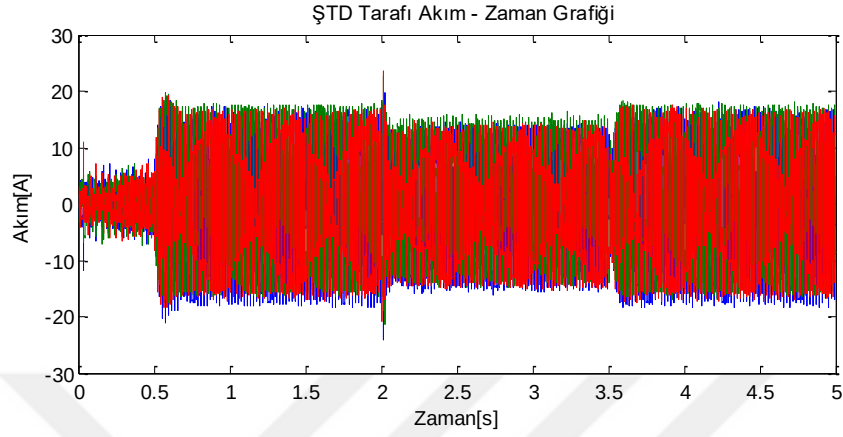


Şekil 4.16: GTD terminalleri üzerinden akan akım (senkron altı)

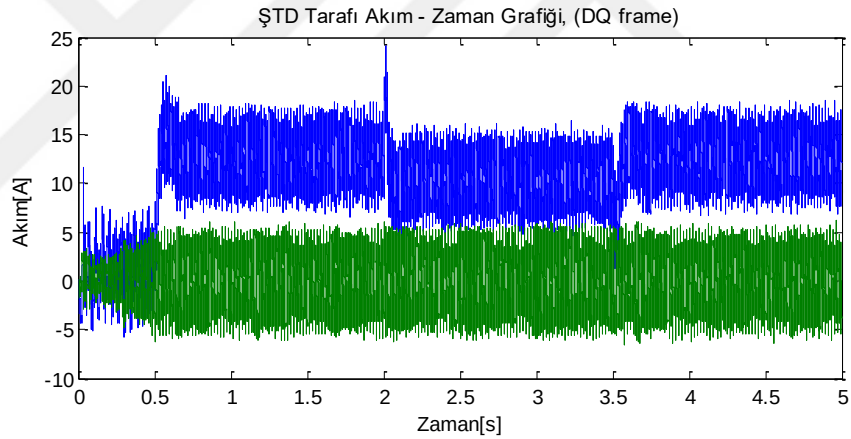


Şekil 4.17: Rotor akımı (DQ, senkron altı)

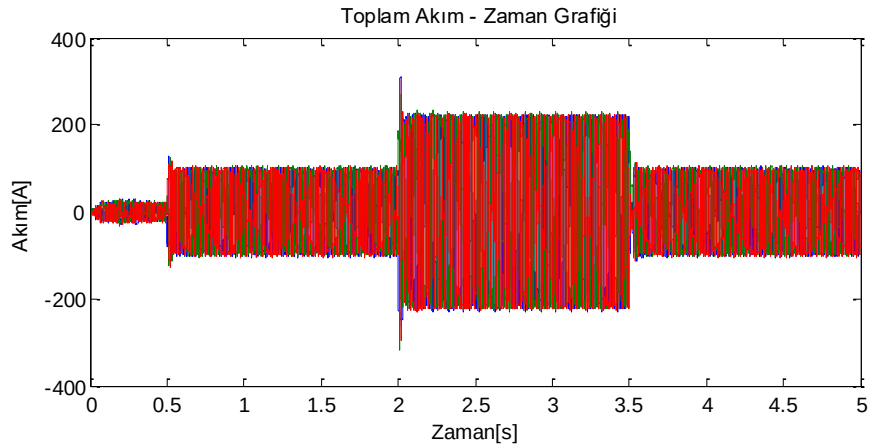
Senkron altı çalışma kapsamında yapılan analizlerde elde edilen ŞTD tarafı filtre üzerinden akan akım, ŞTD tarafı filtre üzerinden akan akım (DQ) ve şebeke terminalleri üzerinden akan toplam akım değerinin sonuçları sırasıyla Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.18: ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (senkron altı)

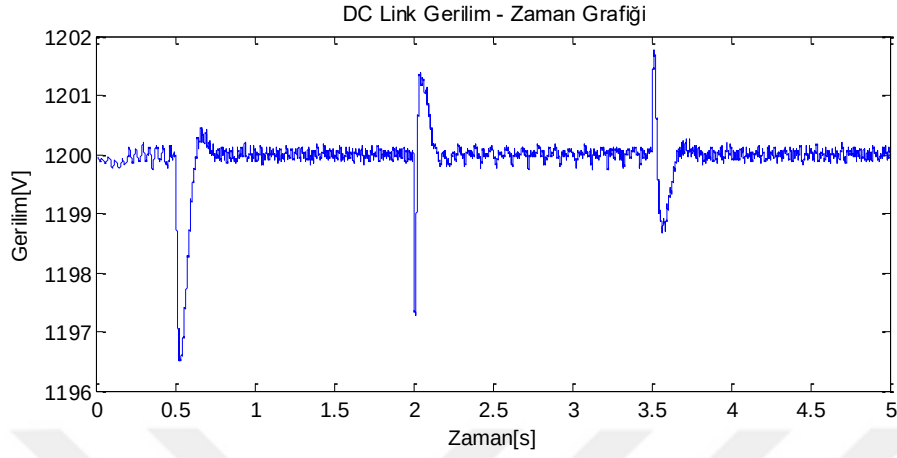


Şekil 4.19: ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (DQ, senkron altı)

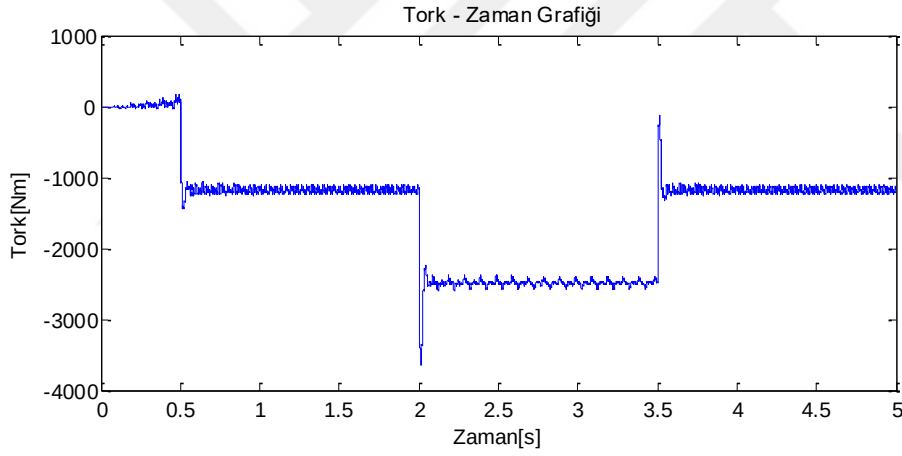


Şekil 4.20: Şebeke terminalleri üzerindeki toplam akım (senkron altı)

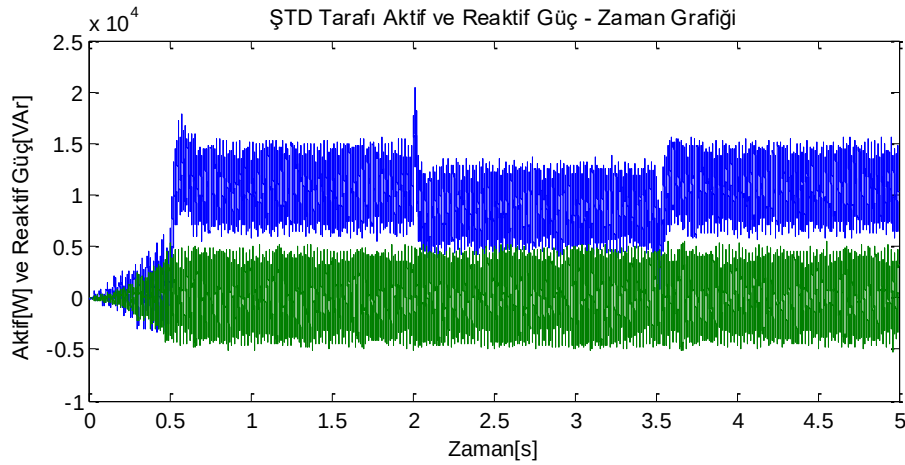
Senkron altı analiz çalışmasında, uygulanan rüzgar hızına bağlı olarak elde edilen DC link gerilim, ÇBAG'ün tork değeri ve ŞTD terminalleri üzerindeki aktif ve reaktif güç sonuçları sırasıyla Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'de verilmiştir.



Şekil 4.21: DC-link gerilimi (senkron altı)

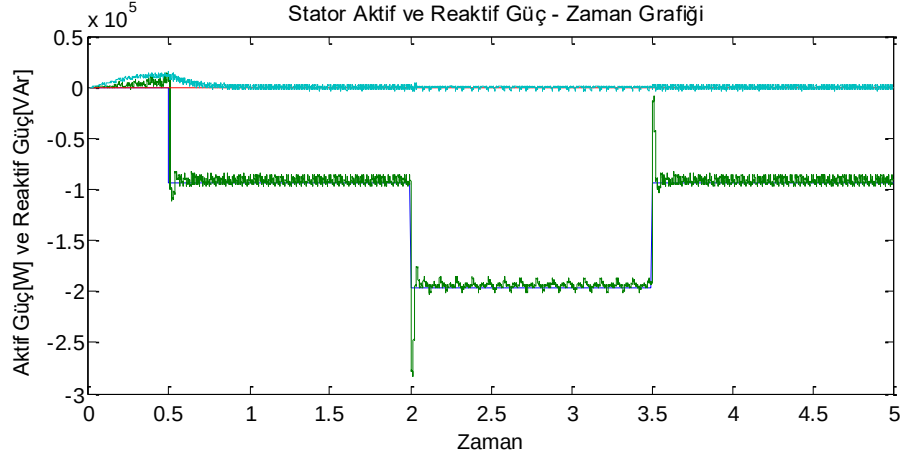


Şekil 4.22: ÇBAG'de üretilen tork değeri (senkron altı)

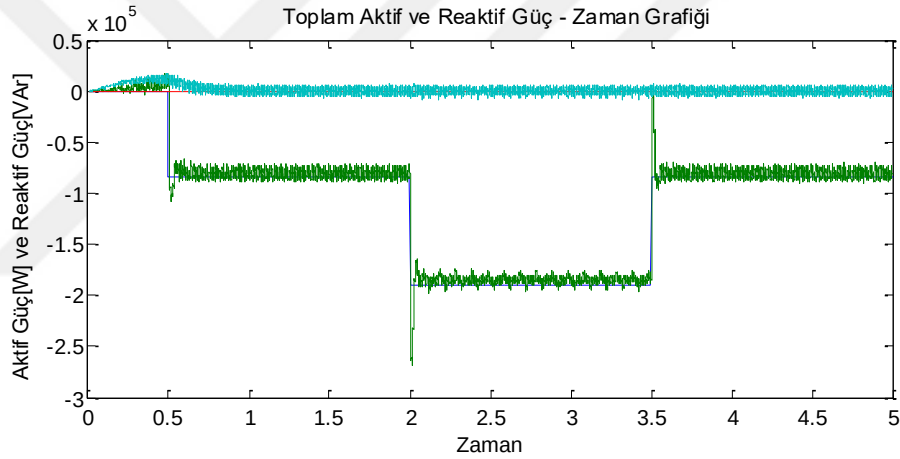


Şekil 4.23: ŞTD terminali üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron altı)

Stator terminalleri üzerindeki aktif ve reaktif güç ve şebeke terminalleri üzerindeki aktif ve reaktif güç sonuçları sırasıyla Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’de verilmiştir.



Şekil 4.24: Stator terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron altı)



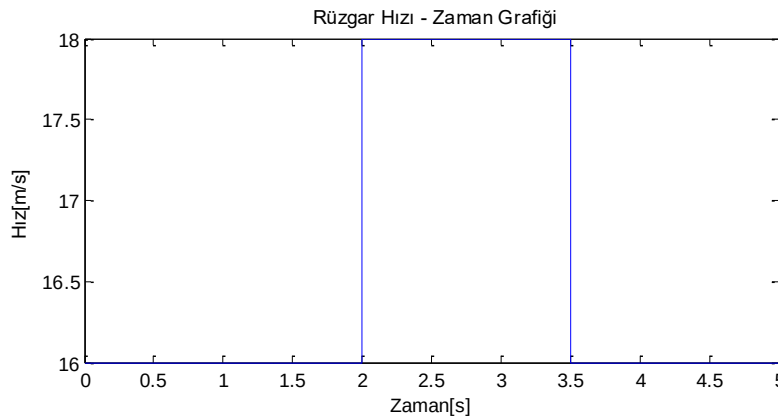
Şekil 4.25: Şebeke terminal üzerindeki toplam aktif ve reaktif güç (senkron altı)

Uygulanan rüzgar hızı, nominal rüzgar hızının altında olmasından dolayı maksimum güç noktası izleme modunda çalışmaktadır. Bu rüzgar hızlarında mümkün olan maksimum güç değeri üretilir. Nominal rüzgar hızının altında bir rüzgar hızı uygulanmasından dolayı kanat açısı sıfır derecedir. Rüzgar hızının değiştiği anlarda maksimum güç üretilmesi için güç katsayısı güncellenir. Güncellenen güç katsayısına bağlı olarak kontrol sistemi mümkün olan maksimum gücü üretebilmek için yeni aktif güç referansını hesaplar. Bu yeni aktif güç referansına bağlı olarak güç akışı sağlanır. 7 m/s’de ve 9 m/s’de uygulanan aktif güç referansı sırasıyla 85kW ve 190kW’dır. Generatör tarafı dönüştürücünün kontrol sisteminde bu aktif güç referansları dikkate alınarak, stator aktif güç referansı belirlenir. Stator reaktif güç referansı ise sıfırdır.

Rüzgar hızının değiştiği anlarda aktif güç referansı değişmesinden dolayı generatörün stator akımı, rotor akımı ve tork değeri de değişmektedir. Bunun yanında DC-link geriliminde anlık ve geçici sıçramalar ($1200V_{dc} \pm 3V_{dc}$) olduğu görülmüştür. Generatörün senkron hızı 750 d/dk (78.5 rad/sn)'dir. Generatör hızı, senkron hızdan düşük olması sebebiyle generatör senkron altı çalışmaktadır. Generatörün senkron altı çalışmasından dolayı şebekeden frekans dönüştürücüsüne doğru bir güç akışı olur. Bu güç akışının değeri generatör stator aktif gücüne ve kayma değerine bağlıdır. Generatör hızının değişmesine bağlı olarak generatörün kayma değeri değişmektedir. Generatör hızı, senkron hıza eşit olduğu anda kayma değeri sıfırdır. Bu anda generatörün rotor terminallerinden herhangi bir güç akışı olmaz. Generatörün stator terminallerinden ise şebekeye doğru bir güç akışı devam eder. Ancak generatör senkron altı çalışmasından (şebekeden frekans dönüştürücüsüne doğru güç akışı) dolayı stator terminallerinden şebekeye aktarılan aktif güç değeri, şebeke terminalleri üzerindeki aktif güç değerine göre daha yüksektir.

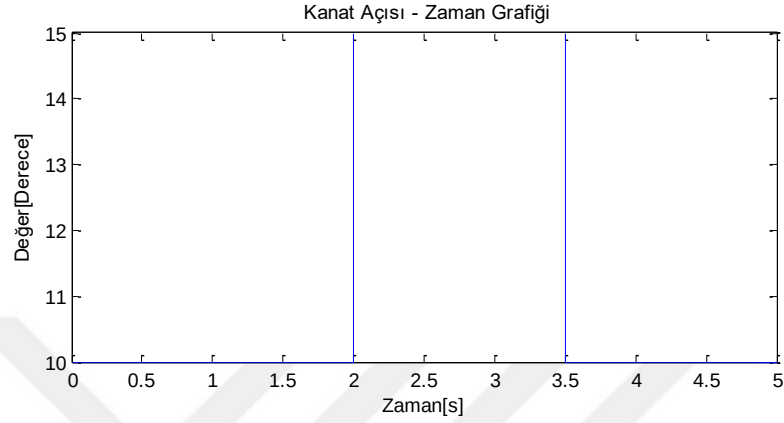
4.2 Senkron Üstü Çalışması Durumunda Performans Analizi

Bu çalışmada, çift beslemeli asenkron generatör senkron hızdan daha yüksek hızlarda çalıştırılmaktadır. Bundan dolayı uygulanan rüzgar hızı, 0-2sn boyunca 16m/s, 2-3.5sn boyunca 18m/s, 3.5-5sn boyunca tekrardan 16m/s düşmektedir. 0-0.5sn aralığında senkronizasyonun sağlanmasından dolayı herhangi bir güç akışı olmaz. 0.5sn'den sonra rüzgar hızına bağlı olarak şebekeye doğru güç akışı olur. Uygulanan rüzgar hızı Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Bu rüzgar hızına bağlı olarak MATLAB ortamında kurulan model üzerinde yapılan simülasyon çalışmalarının sonuçları aşağıda verilmiştir.

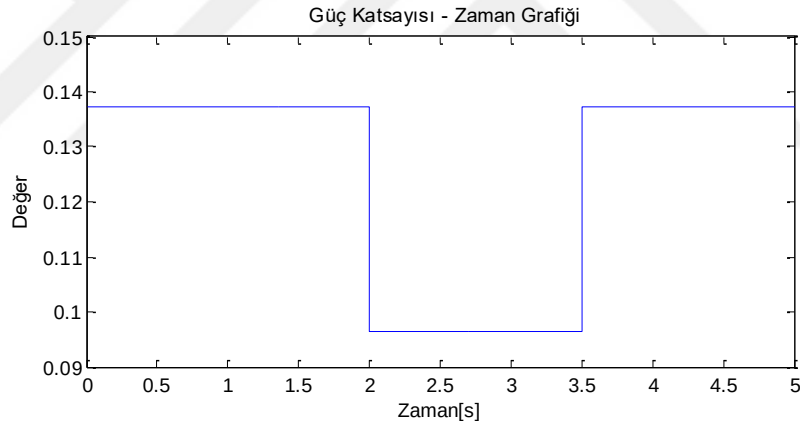


Şekil 4.26: Sistem modeli üzerinde uygulanan rüzgar hızı (senkron üstü)

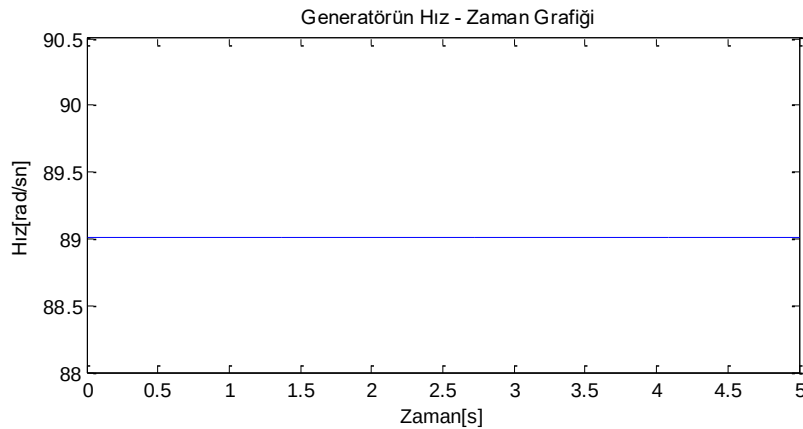
Rüzgar türbinlerinde anlık rüzgar hızı nominal rüzgar hızı (12 m/s) üzerine çıkması sonucunda kanat açısı düzenlenmesi yapılır. Rüzgar hızı 18 m/s gelmesiyle birlikte kanat açısı değeri 15 derece ayarlanır. Bu kanat açısı değerinde güç katsayısı 0.097'dir. Senkron üstü analiz çalışmasında elde edilen kanat açısı, güç katsayısı ve generatör hız sonuçları sırasıyla Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.27: Kanat açısı (senkron üstü)

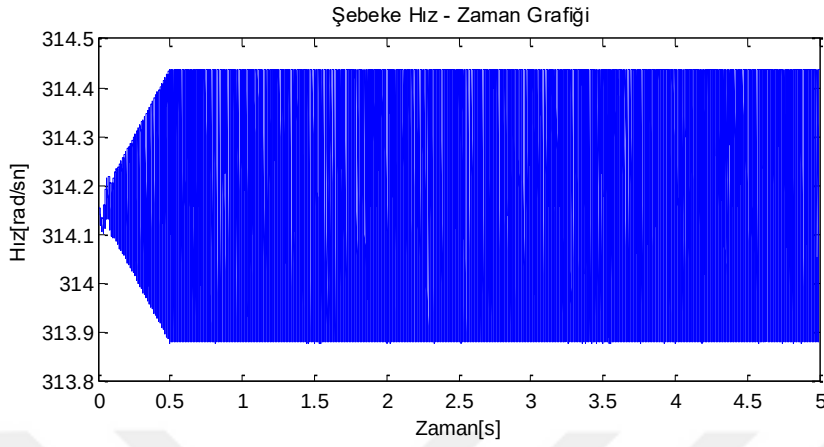


Şekil 4.28: Güç katsayısı (senkron üstü)

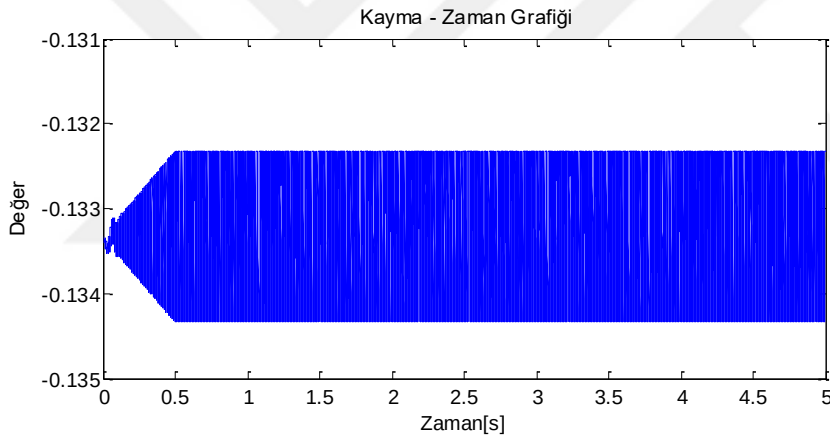


Şekil 4.29: ÇBAG'ün hızı (senkron üstü)

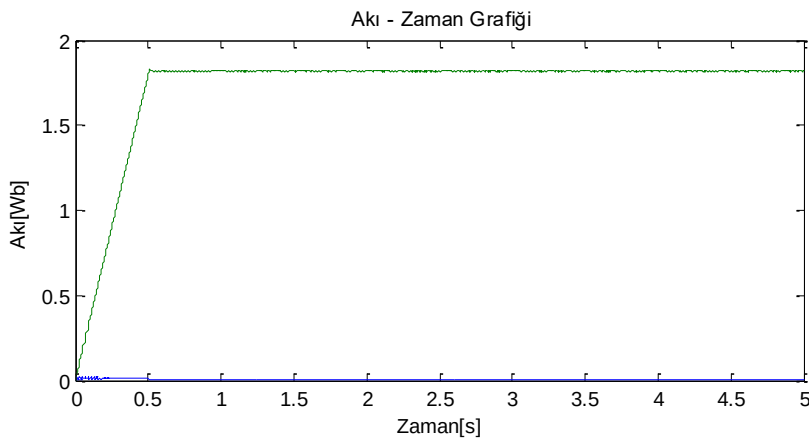
Nominal güç akışı esnasında kayma değeri -0.133'dür. Stator akı değeri Senkron üstü analiz çalışmasında elde edilen şebeke açısal frekansı, kayma ve stator akı değerinin sonuçları sırasıyla Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de verilmiştir.



Şekil 4.30: Şebeke açısal frekansı (senkron üstü)

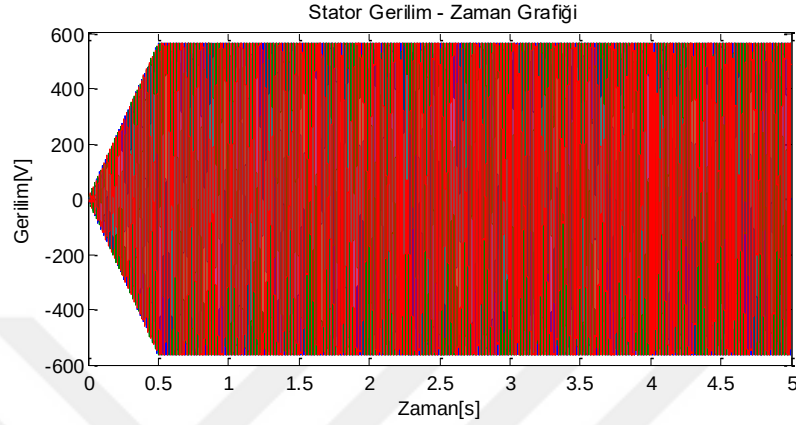


Şekil 4.31: ÇBAG'ün kayma değeri (senkron üstü)

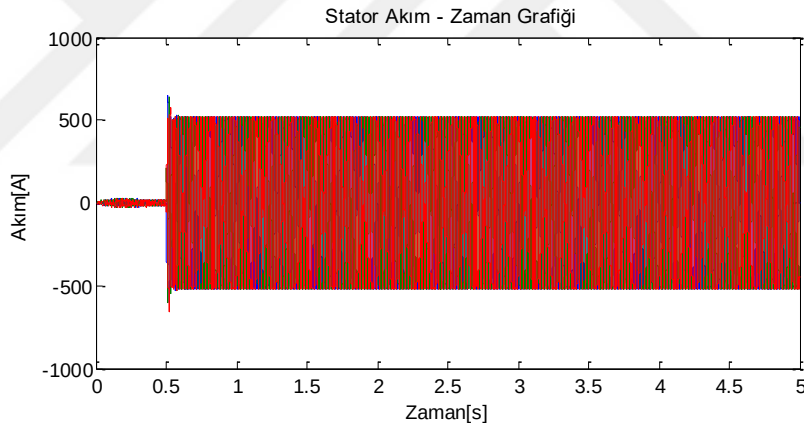


Şekil 4.32: ÇBAG'de stator akı değeri (DQ, senkron üstü)

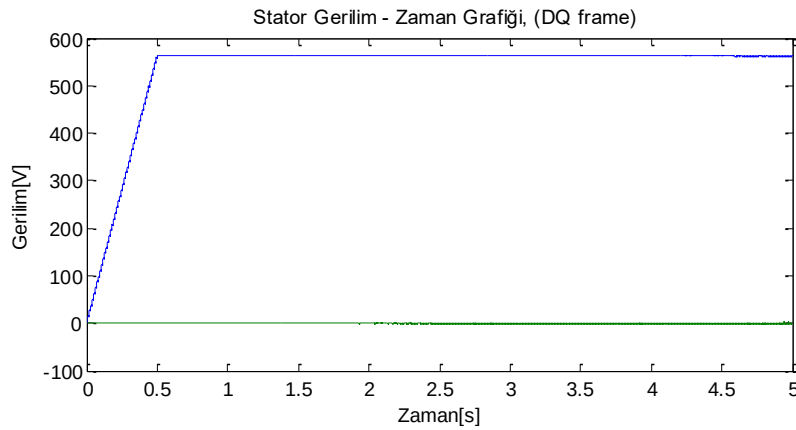
Anlık rüzgar hızı, nominal rüzgar hızından (12 m/s) yüksek olmasından dolayı ÇBAG'ün stator akımı nominal değerdedir. Bu değer yaklaşık olarak 512 A'dır. Uygulanan rüzgar hızına bağlı olarak elde edilen ÇBAG'ün stator gerilimi, stator akımı ve stator gerilim (DQ) sonuçları sırasıyla Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'de verilmiştir.



Şekil 4.33: ÇBAG'ün stator gerilimi (senkron üstü)

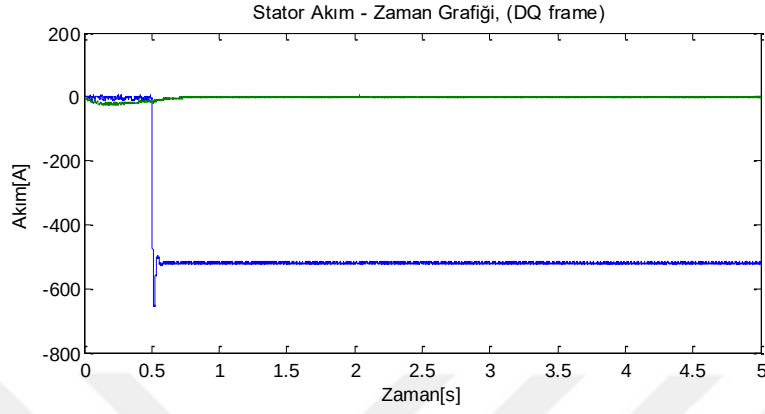


Şekil 4.34: ÇBAG'ün stator akımı (senkron üstü)

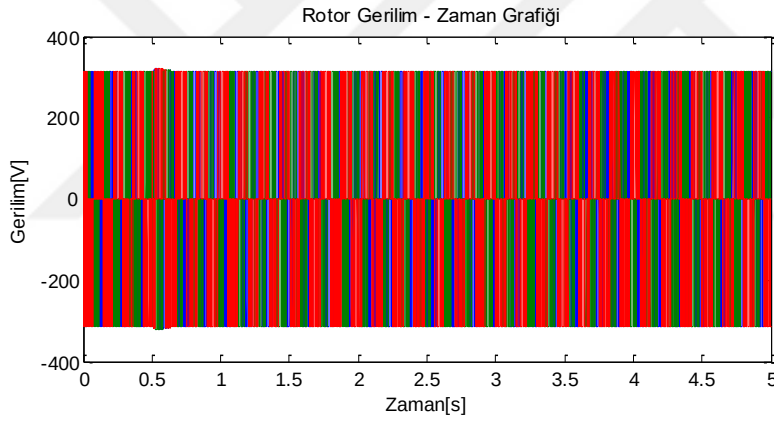


Şekil 4.35: ÇBAG'ün stator gerilimi (DQ, senkron üstü)

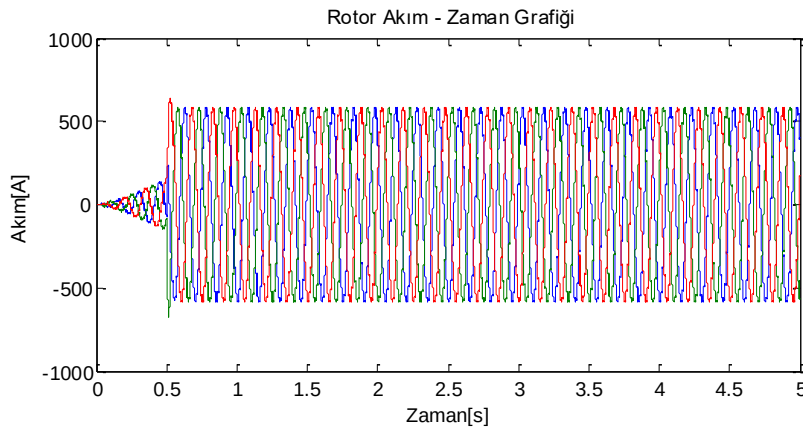
ÇBAG'ün rotor gerilimi, frekans dönüştürücüsündeki anahtarlamasından dolayı anahtarlama bir gerilim elde edilir. Bu analizde rotor akım değeri de yaklaşık olarak 520 A civarındadır. ÇBAG'ün stator akımı (DQ), rotor gerilimi ve rotor akım sonuçları sırasıyla Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de verilmiştir.



Şekil 4.36 ÇBAG'ün stator akımı (DQ, senkron üstü)

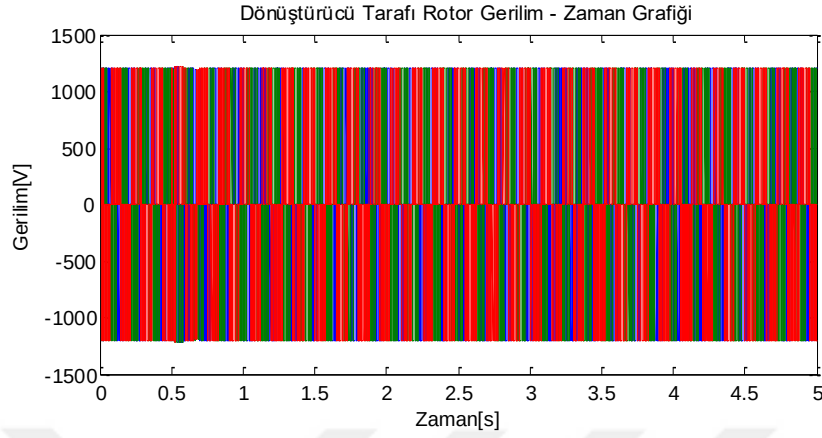


Şekil 4.37: ÇBAG'ün rotor gerilimi (senkron üstü)

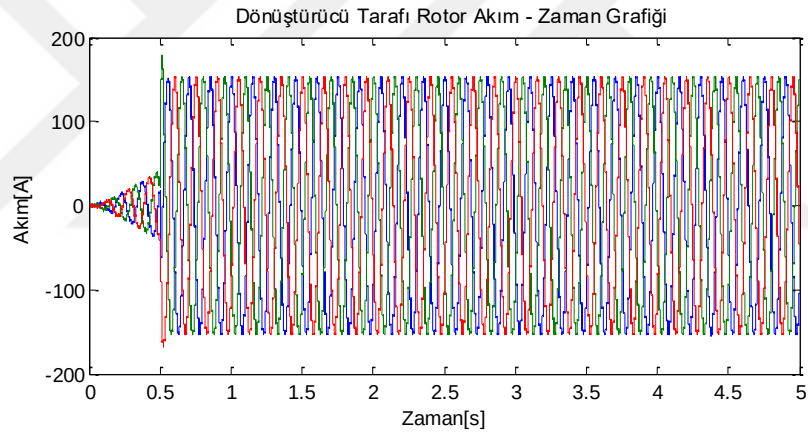


Şekil 4.38: ÇBAG'ün rotor akımı (senkron üstü)

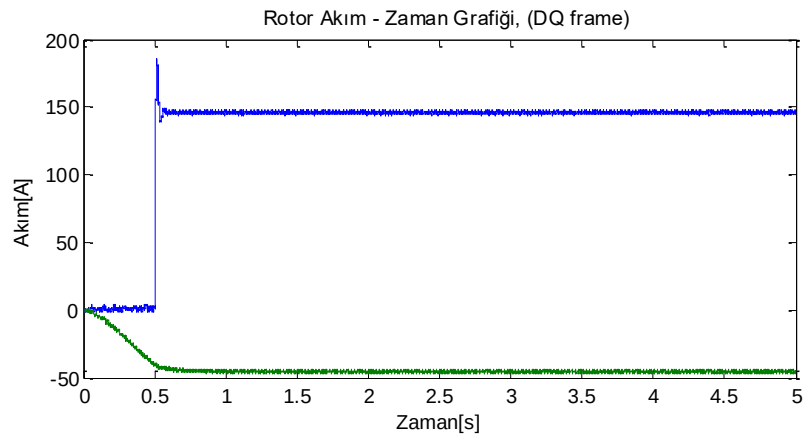
Senkron üsü analiz çalışmasında, GTD terminalleri üzerindeki gerilim, GTD terminalleri üzerinden akan akım ve rotor akım (DQ) sonuçları sırasıyla Şekil 4.39, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de verilmiştir.



Şekil 4.39: GTD terminalleri üzerindeki gerilim (senkron üstü)

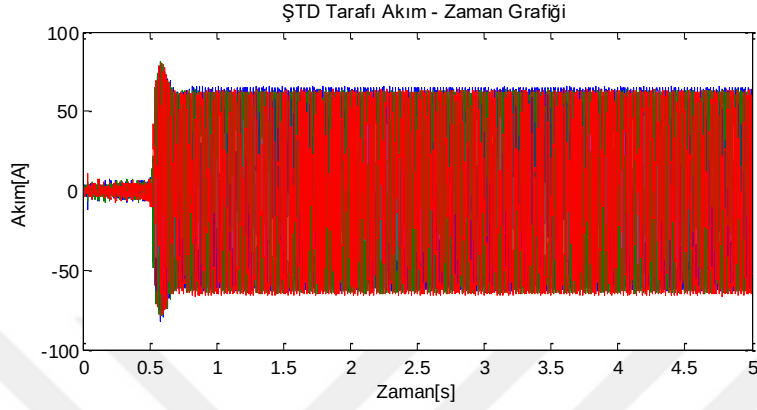


Şekil 4.40: GTD terminalleri üzerinden akan akım (senkron üstü)

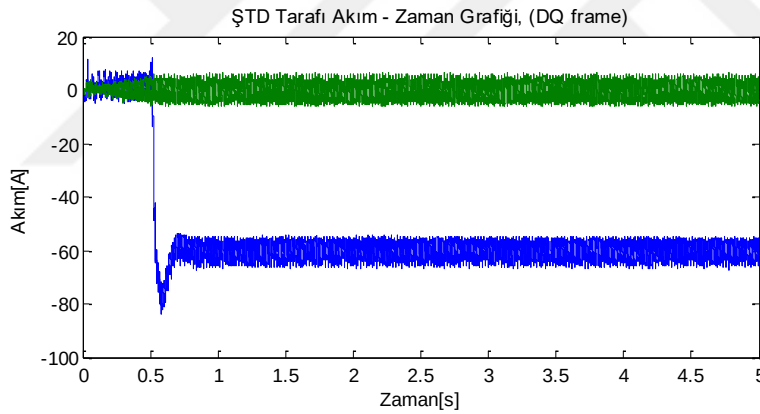


Şekil 4.41: Rotor akımı (DQ, senkron üstü)

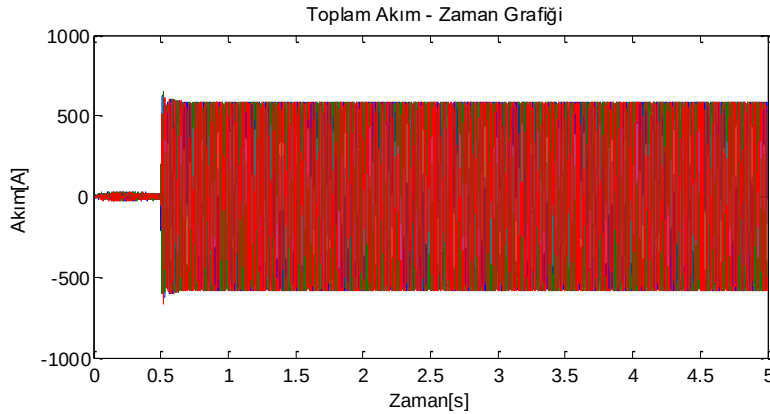
Rüzgar türbinlerinde ÇBAG'ün senkron üstü çalışması durumunda, frekans dönüştürücüsü üzerinden şebekeye doğru 58 A akar. ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım, ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (DQ) ve şebeke terminalleri üzerindeki toplam akım sonuçları sırasıyla Şekil 4.42, Şekil 4.43 ve Şekil 4.44'de verilmiştir.



Şekil 4.42: ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (senkron üstü)

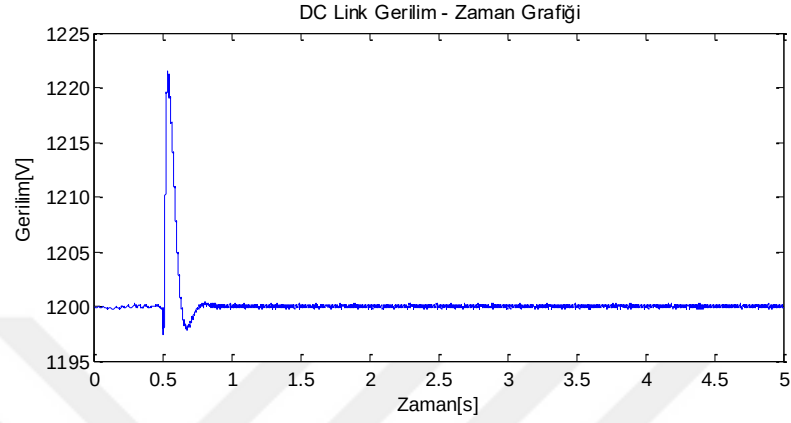


Şekil 4.43: ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (DQ, senkron üstü)

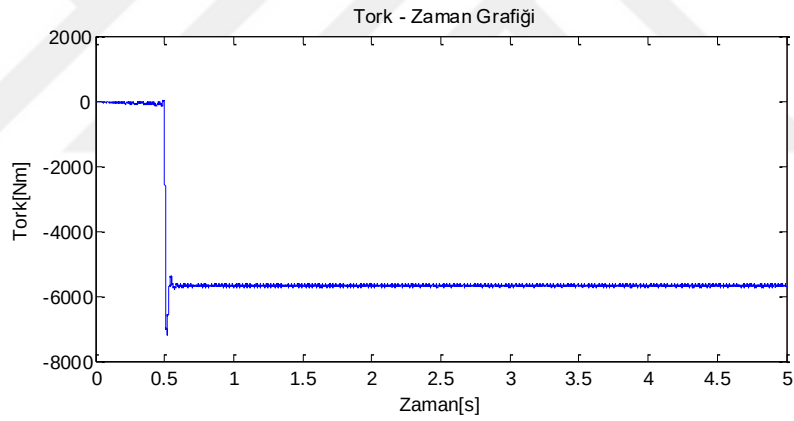


Şekil 4.44: Şebeke terminalleri üzerindeki toplam akım (senkron üstü)

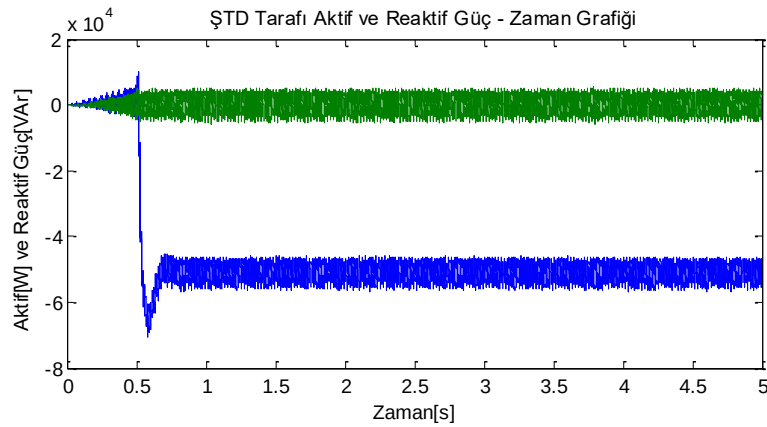
Senkron üstü analizde, ÇBAG'ün tork değeri yaklaşık olarak 5900 Nm ve ŞTD terminaller üzerinden şebekeye aktarılan aktif güç değeri de 58 kW'dır. Senkron üstü analiz çalışması kapsamında elde edilen DC-link gerilim, ÇBAG'ün tork değeri ve ŞTD terminalleri üzerindeki aktif ve reaktif güç sonuçları sırasıyla Şekil 4.45, Şekil 4.46 ve Şekil 4.47'de verilmiştir.



Şekil 4.45: DC-link gerilimi (senkron üstü)

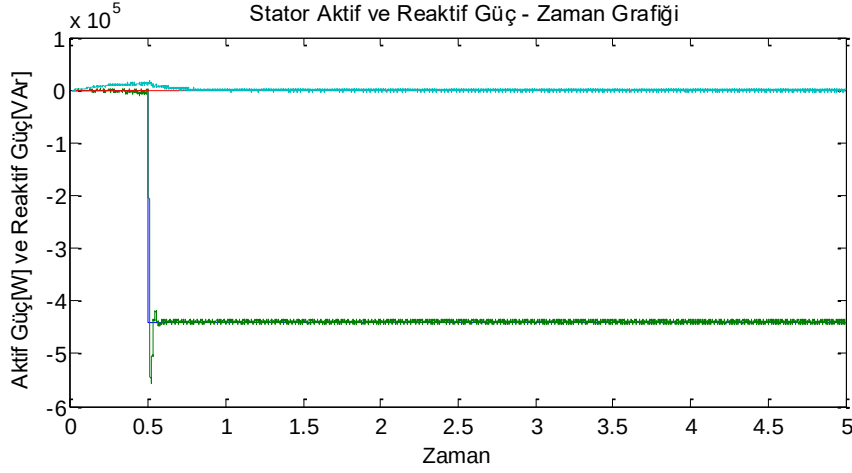


Şekil 4.46: ÇBAG'de üretilen tork değeri (senkron üstü)

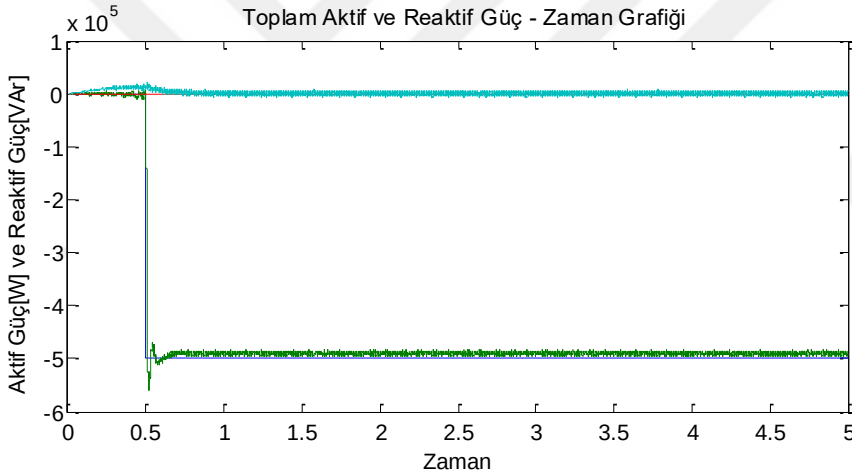


Şekil 4.47: ŞTD terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron üstü)

Stator terminalleri üzerindeki aktif ve reaktif güç ile şebeke terminalleri üzerindeki aktif ve reaktif güç sonuçları sırasıyla Şekil 4.48 ve Şekil 4.49’da verilmiştir.



Şekil 4.48: Stator terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron üstü)



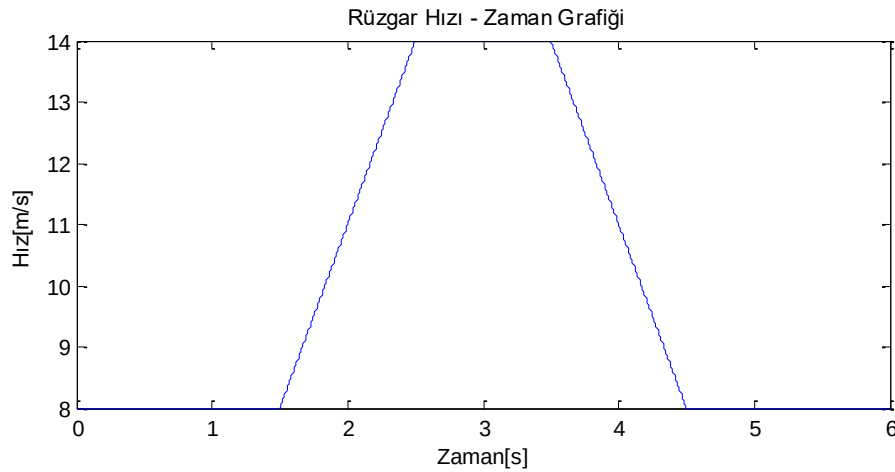
Şekil 4.49: Şebeke terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron üstü)

Uygulanan rüzgar hızı, nominal rüzgar hızının üstünde olmasından dolayı kanat açısı kontrolü yaparak çalışmaktadır. Bu rüzgar hızlarında, kontrol sistemi generatörün hızı ayarlar ve generatörün nominal gücünün üzerinde bir güç üretmesine izin vermez. Nominal rüzgar hızının üstünde bir rüzgar hızı uygulanmasından dolayı rüzgar hızına bağlı olarak kanat açısı değişmektedir. Rüzgar hızının yükseldiği zamanlarda generatörün nominal gücünün üzerine çıkmaması için kanat açısı düzenlenir ve buna bağlı olarak güç katsayısı güncellenir. Güncellenen güç katsayısına bağlı olarak kontrol sistemi generatör için nominal güç referansı ($P_{ref}=500kW$) üretmeye devam eder. Bu güç referansına bağlı olarak generatör tarafı dönüştürücü kontrol sistemindeki stator aktif güç referansı belirlenir. Stator reaktif güç referansı ise sıfırdır.

Rüzgar hızının değiştiği anlarda nominal güç referans değeri korunduğu için üretilen aktif güç değeri değişmez. Bundan dolayı generatörün stator akımı, rotor akımı ve tork değeri de değişmemektedir. Bunun yanında DC bağlantı gerilimdeki anlık ve geçici sıçrama sadece 0.5s’de aktif güç referansı uygulanmaya başladığı zamanda olur. DC bağlantı gerilimindeki geçici sıçrama $1200V_{dc} + 20V_{dc}$ ’dir. 20V’luk sıçrama kabul edilebilir seviyededir. Uygun yerleşme süresi içinde DC bağlantı gerilimi tekrardan 1200Vdc ulaşır. Generatör hızı, senkron hızdan yüksek olması sebebiyle generatör senkron üstü çalışmaktadır. Generatörün senkron üstü çalışmasından dolayı frekans dönüştürücüsünden şebekeye doğru bir güç akışı olur. Bu sebepten ötürü generatör senkron üstü çalıştığında stator terminallerinden şebekeye aktarılan aktif güç, şebeke terminalleri üzerindeki aktif güce göre daha düşüktür. Bu yüzden çift beslemeli asenkron generatörler yeterli rüzgar hızında senkron üstünde çalıştırılmak istenir.

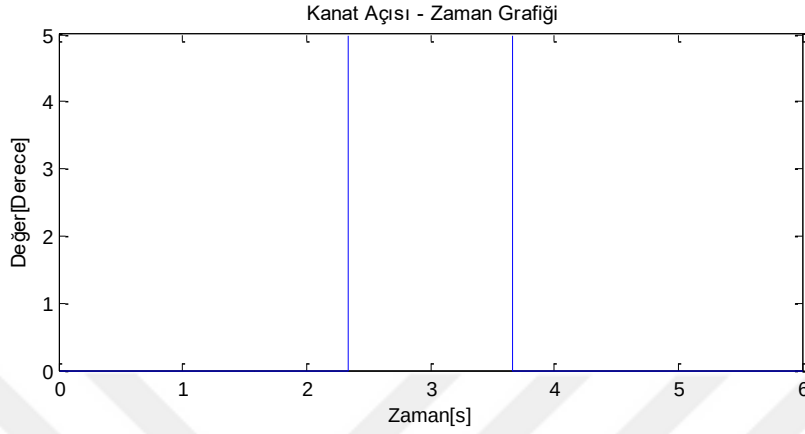
4.3 Senkron Altı/Üstü Çalışması Durumunda Performans Analizi

Bu çalışmada, çift beslemeli asenkron generatör hem senkron hızdan daha düşük hem de daha yüksek hızlarda çalıştırılmaktadır. Bundan dolayı uygulanan rüzgar hızı, 0-1.5sn boyunca 8m/s, 1.5-2.5sn boyunca 8 m/s’den 14m/s çıkıyor, 2.5-3.5sn boyunca 14m/s, 3.5-4.5sn boyunca 14m/s’den 8m/s iniyor, 4.5-6sn boyunca ise tekrardan 8m/s hızla devam ediyor. 0-0.5sn aralığında senkronizasyonun sağlanmasından dolayı herhangi bir güç akışı olmaz. 0.5sn’dan sonra rüzgar hızına bağlı olarak şebekeye doğru güç akışı olur. Uygulanan rüzgar hızı Şekil 4.50’de gösterilmiştir. Bu rüzgar hızına bağlı olarak MATLAB ortamında kurulan model üzerinde yapılan simülasyon çalışmalarının sonuçları aşağıda verilmiştir.

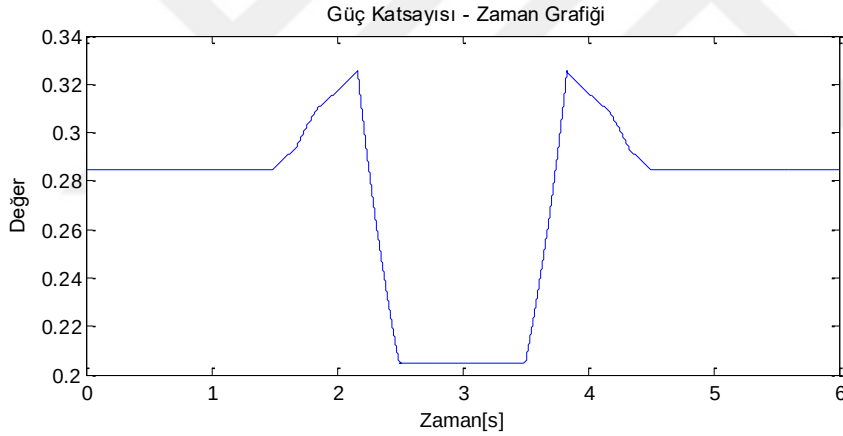


Şekil 4.50: Sistem modeli üzerinde uygulanan rüzgar hızı (senkron altı/üstü)

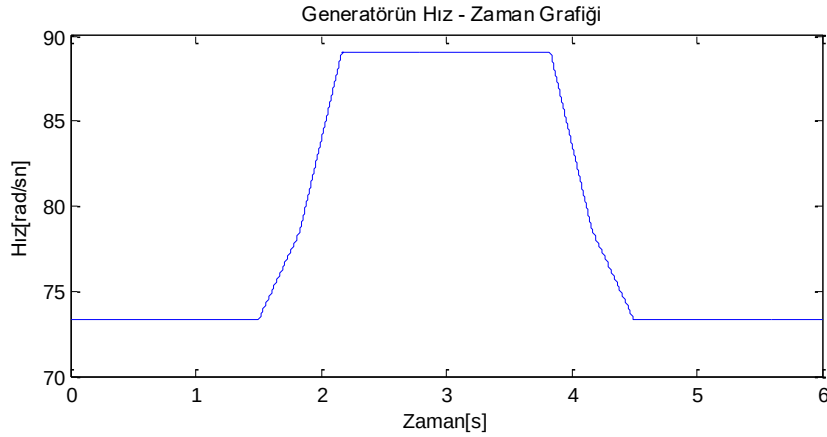
Rüzgar türbinlerinde hem senkron altı hem de senkron üstü çalışması durumunda, kanat açısı ve uç hız oranı sürekli güncellenir. Sonuç olarak sürekli yeni bir güç katsayısı değeri hesaplanır. Senkron altı/üstü analizlerinde, kanat açısı, güç katsayısı ve ÇBAG'ün hız sonuçları sırasıyla Şekil 4.51, Şekil 4.52 ve Şekil 4.53'te verilmiştir.



Şekil 4.51: Kanat açısı (senkron altı/üstü)

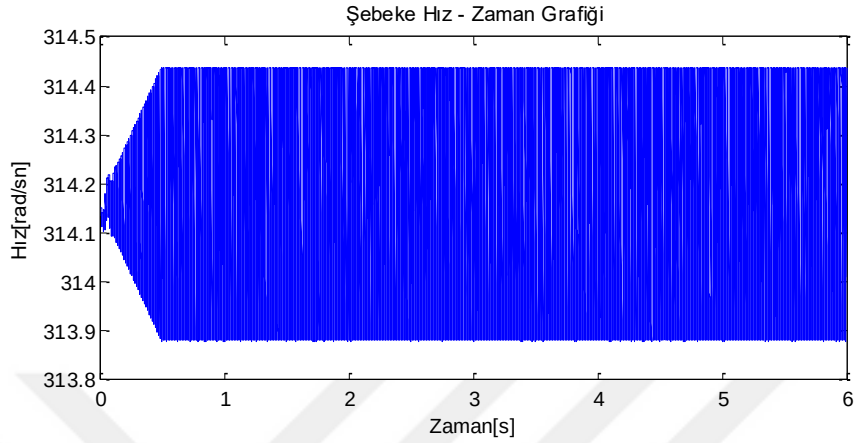


Şekil 4.52: Güç katsayısı (senkron altı/üstü)

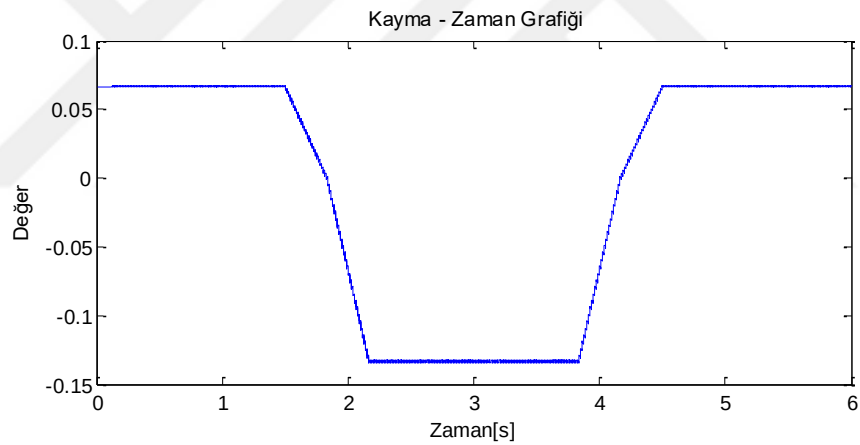


Şekil 4.53: ÇBAG'ün hızı (senkron altı/üstü)

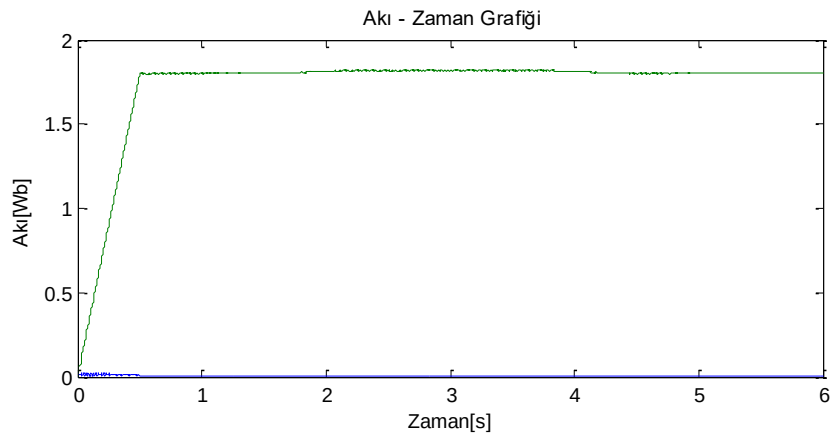
Anlık rüzgar hızının değişmesinden dolayı, ÇBAG'ün kayma değeri sürekli değişir. Rüzgar hızı 14 m/s ulaşmasında sonra kayma değeri -0.133 değerine ulaşır. Senkron altı/üstü analizlerinde, şebeke açısal frekans, generatör kayma değeri ve stator akı sonuçları sırasıyla Şekil 4.54, Şekil 4.55 ve Şekil 4.56'da verilmiştir.



Şekil 4.54: Şebeke açısal frekans (senkron altı/üstü)

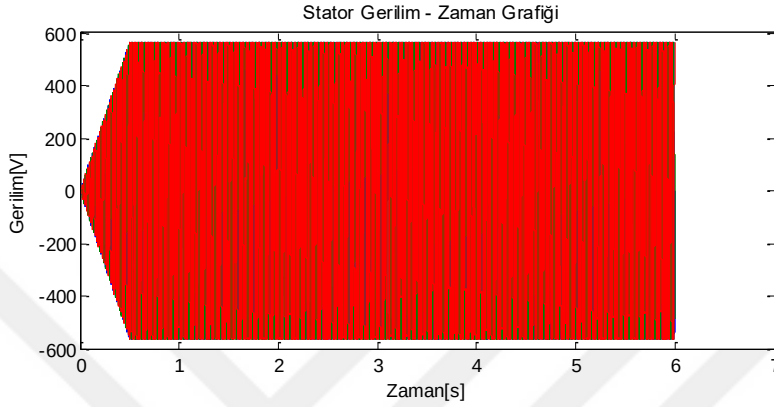


Şekil 4.55: ÇBAG'ün kayma değeri (senkron altı/üstü)

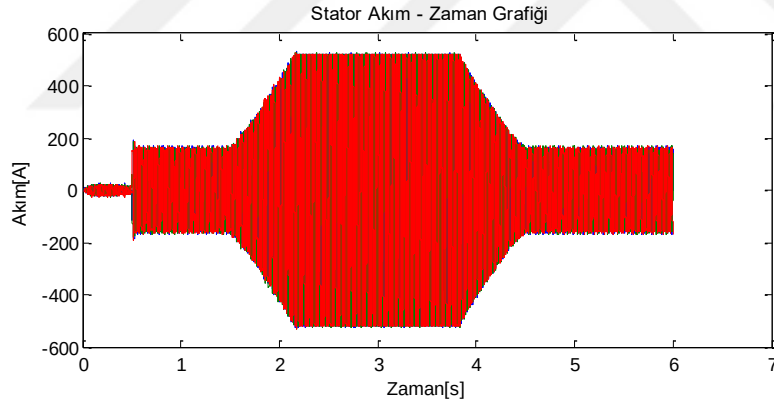


Şekil 4.56: ÇBAG'ün stator akı değeri (DQ, senkron altı/üstü)

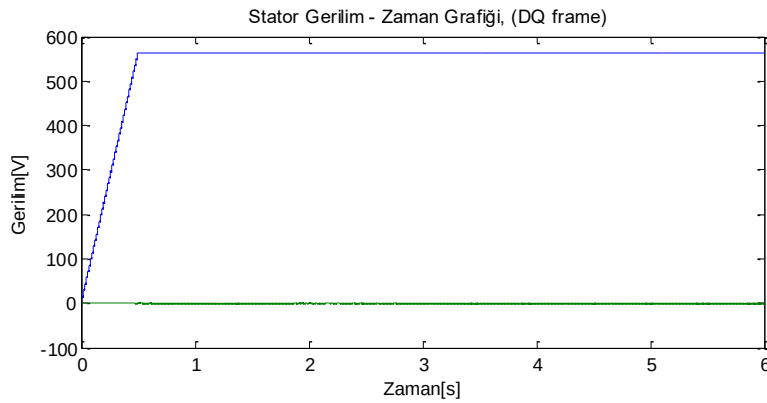
Senkron altı/üstü analizlerde olduğu gibi anlık rüzgar hızı sürekli değişirse, kontrol sistemi sürekli olarak yeni bir güç referansı değeri üretir. Bu sebepten ötürü ÇBAG'ün akım ve güç değerlerinde değişimlere olur. Rüzgar hızı 8 m/s'den 14 m/s'ye çıkmasıyla, stator akımının değeri de 180 A'den 512 A değerine çıkar. Senkron altı/üstü analizlerinde, ÇBAG'ün stator gerilimi, stator akımı ve stator gerilim (DQ) sonuçları sırasıyla Şekil 4.57, Şekil 4.58 ve Şekil 4.59'da verilmiştir.



Şekil 4.57: ÇBAG'ün stator gerilimi (senkron altı/üstü)

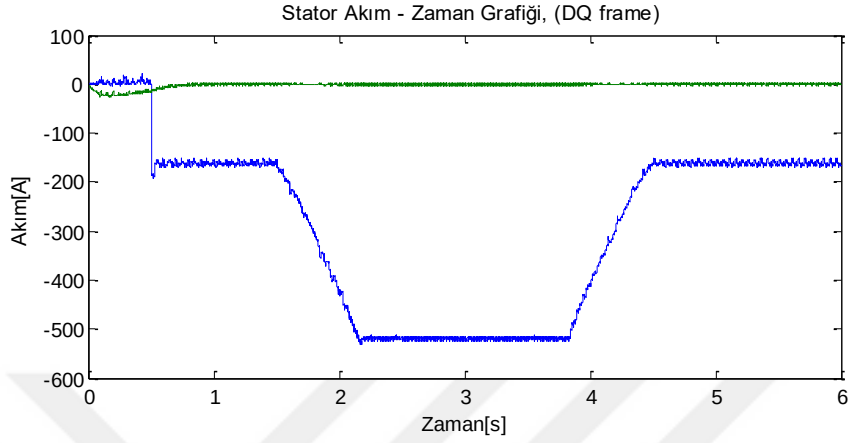


Şekil 4.58: ÇBAG'ün stator akımı (senkron altı/üstü)

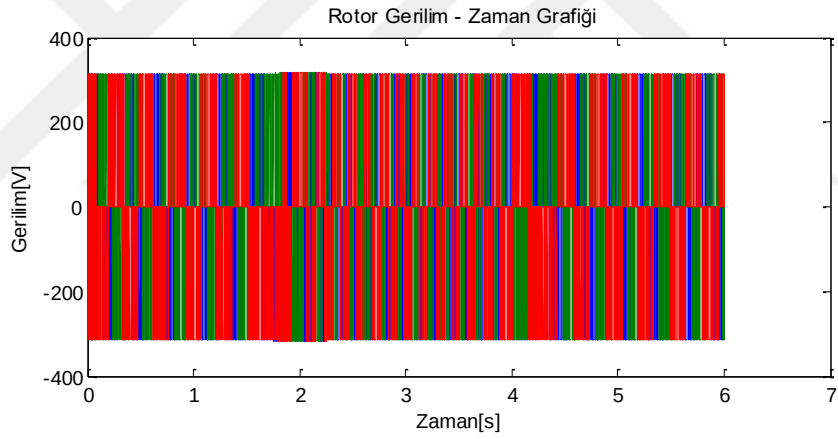


Şekil 4.59: ÇBAG'ün stator gerilimi (DQ, senkron altı/üstü)

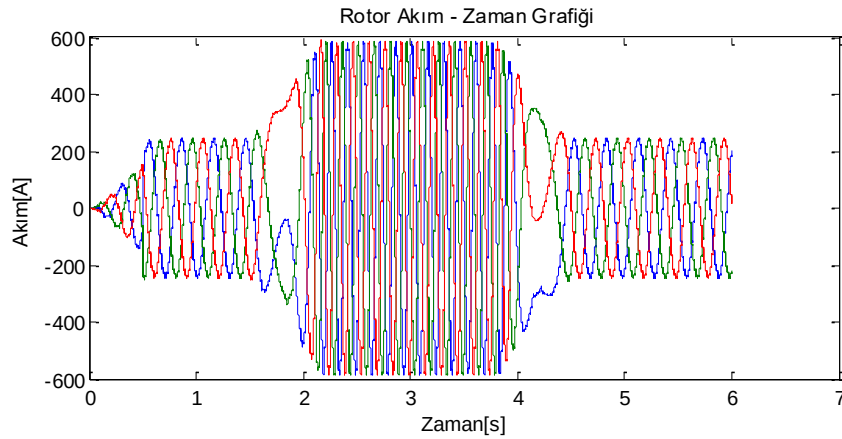
Kayma değerinin 0 değerine ulaştığı anda, anlık olarak rotor terminallerinde g akışı olmaz. şekil 4.62’de gsterilen rotor akım sonularındadır. Senkron altı/st analizlerinde, BAG’n stator akım (DQ) ve rotor gerilim sonuları sırasıyla şekil 4.60 ve şekil 4.61’de verilmiştir.



şekil 4.60: BAG’n stator akımı (DQ, senkron altı/st)

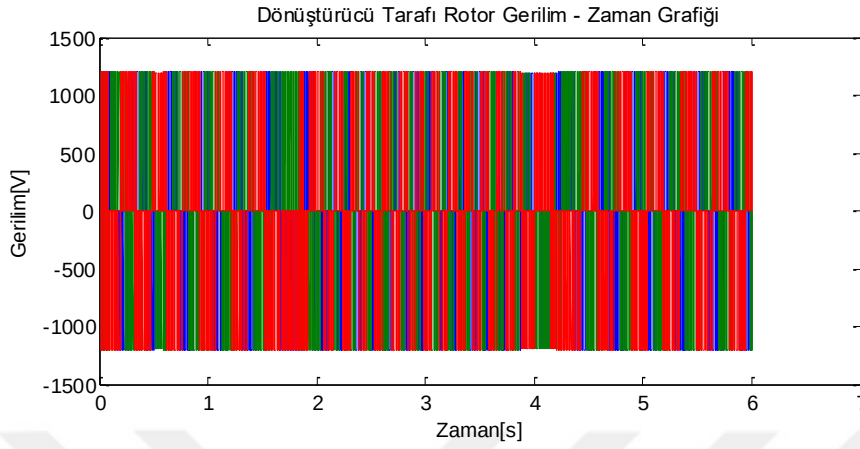


şekil 4.61 BAG’n rotor gerilimi (senkron altı/st)

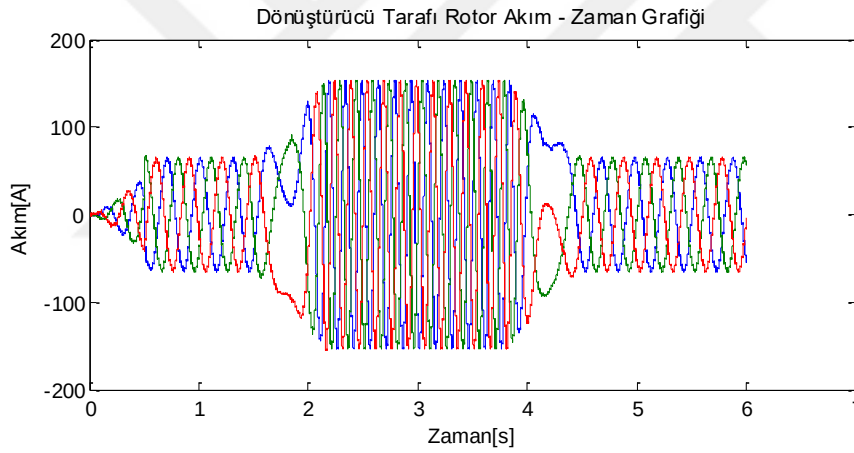


şekil 4.62: BAG’n rotor akımı (senkron altı/st)

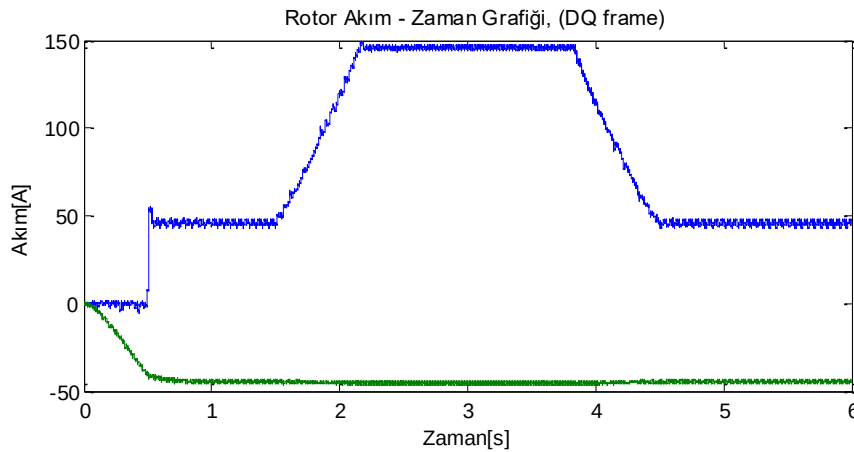
Senkron altı/üstü analiz çalışmasında, rüzgar hızına bağlı olarak elde edilen GTD terminalleri üzerindeki gerilim, GTD terminalleri üzerinden akan akım ve rotor akım (DQ) sonuçları sırasıyla Şekil 4.63, Şekil 4.64 ve Şekil 4.65'te verilmiştir.



Şekil 4.63: GTD terminalleri üzerindeki gerilim (senkron altı/üstü)

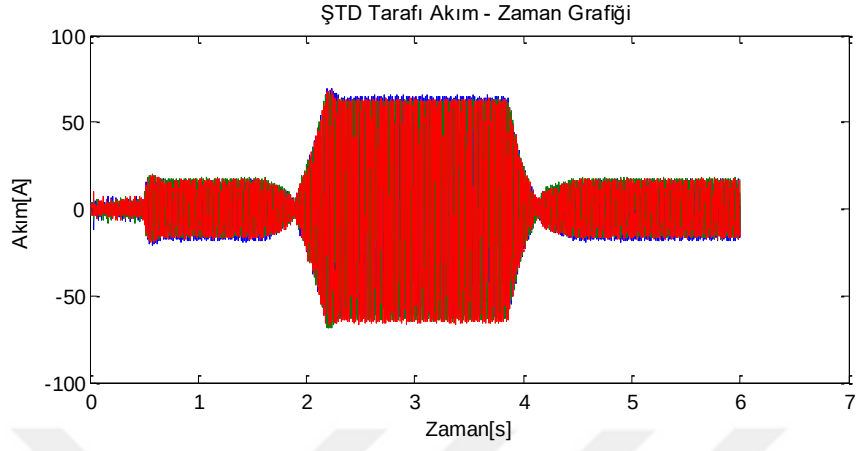


Şekil 4.64: GTD terminalleri üzerinden akan akım (senkron altı/üstü)

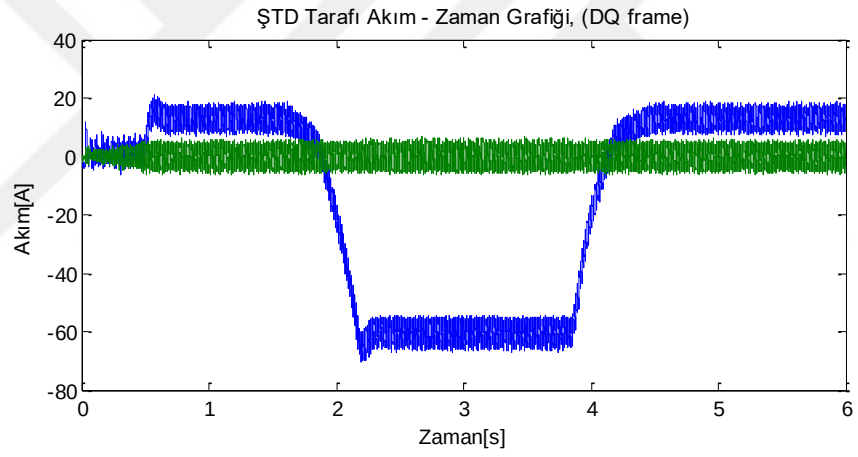


Şekil 4.65: Rotor akımı (DQ, senkron altı/üstü)

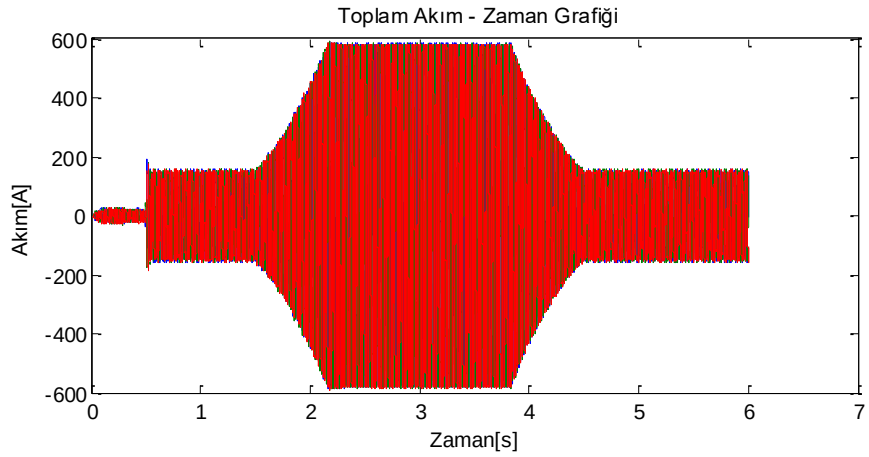
ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (ABC), akım (DQ) ve şebeke terminalleri üzerindeki toplam akım sonuçları sırasıyla Şekil 4.66, Şekil 4.67 ve Şekil 4.68’de verilmiştir.



Şekil 4.66: ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (senkron altı/üstü)

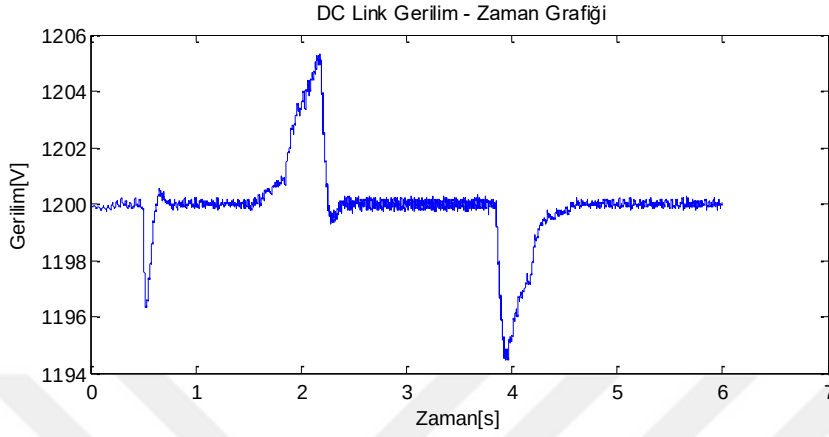


Şekil 4.67: ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (DQ, senkron altı/üstü)

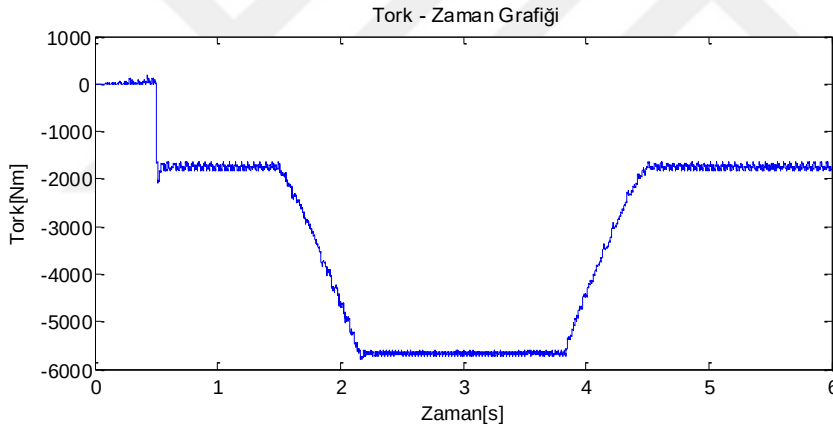


Şekil 4.68: Şebeke terminalleri üzerindeki toplam akım (senkron altı/üstü)

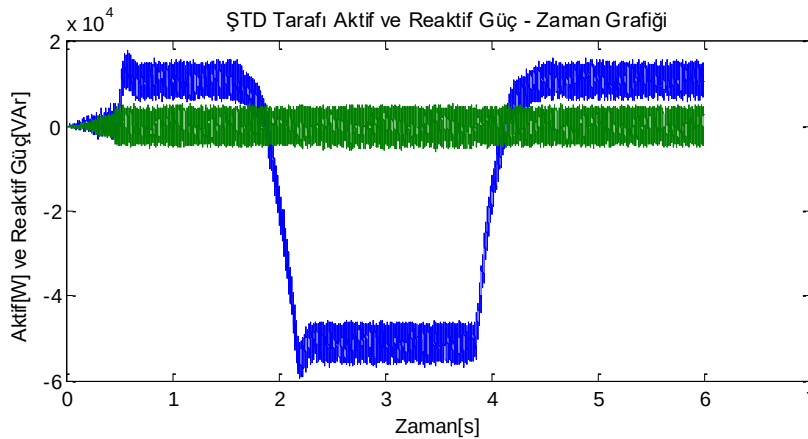
Bu analizde ÇBAG senkron altı çalıştığı anlarda şebekeden frekans dönüştürücüsüne doğru yaklaşık olarak 10kW akmaktadır. Rüzgar hızının artmasıyla birlikte, güç akışı yönü değiştiği Şekil 4.71’de görülmektedir. DC-link gerilim ve ÇBAG’de üretilen tork güç sonuçları sırasıyla Şekil 4.69 ve Şekil 4.70’de verilmiştir.



Şekil 4.69: DC-link gerilimi (senkron altı/üstü)

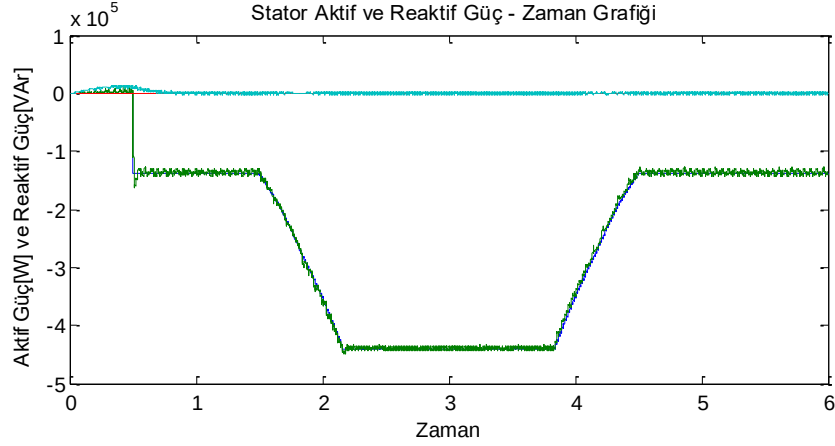


Şekil 4.70: ÇBAG’de üretilen tork değeri (senkron altı/üstü)

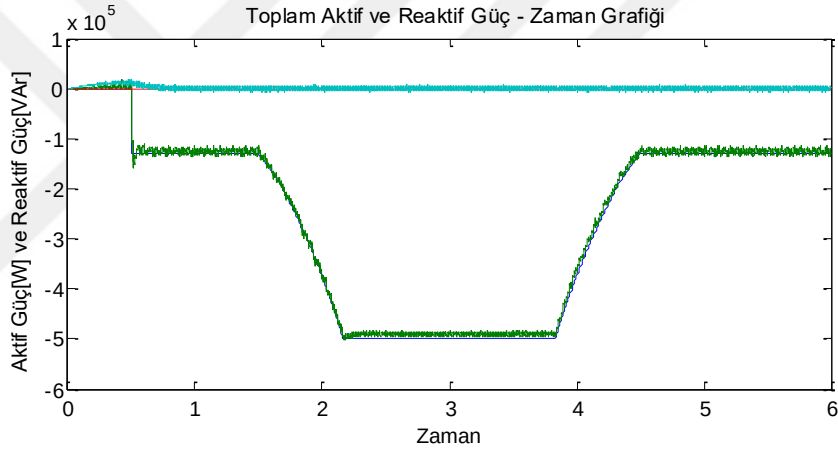


Şekil 4.71: ŞTD terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron altı/üstü)

Stator terminalleri ve şebeke terminalleri üzerindeki aktif ve reaktif güç sonuçları sırasıyla Şekil 4.72 ve Şekil 4.73 verilmiştir.



Şekil 4.72: Stator terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron altı/üstü)



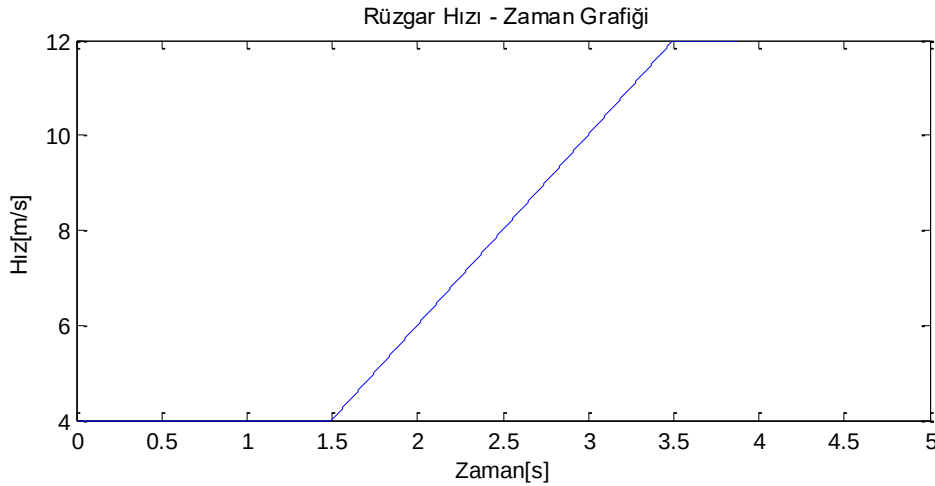
Şekil 4.73: Şebeke terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (senkron altı/üstü)

Uygulanan rüzgar hızı, nominal rüzgar hızının hem altında hem de üstünde olmasından dolayı maksimum güç noktası izleme ve kanat açısı kontrolü birlikte çalışmaktadır. Rüzgar hızının değiştiği anlarda mümkün olan gücün elde edilmesi için güç katsayısı güncellenir. Güncellenen güç katsayısına bağlı olarak kontrol sistemi uygun aktif güç referansını üretir. Bu aktif güç referansına bağlı olarak şebekeye doğru güç akışı sağlanır. 0-1.5sn boyunca rüzgar hızı 8 m/s'dir. Bu rüzgar hızında aktif güç referansı 130kW'dır. Ancak bu hızda generatör senkron hızın altında olduğu için şebeke terminalleri üzerindeki aktif güç, stator terminallerinden aktarılan aktif güce göre düşüktür. Ancak 1.5sn'den sonra rüzgar hızı artmaya başlar. Rüzgar hızı 10m/s'ye ulaştığında tam olarak generatör senkron hıza ulaşır. Bu anda kayma değeri sıfırdır. Bundan dolayı rotor terminalleri üzerinde herhangi bir güç üretimi olmaz.

Rüzgar hızının artmasına bağlı olarak stator terminallerinden ise şebekeye aktarılan aktif güç değeri de artar. Rüzgar hızı 10m/s'nin üzerinde olduğunda generatör senkron üstü çalışmaktadır. Bu andan itibaren frekans dönüştürücüsünden şebekeye doğru güç akışı başlar. Bu yüzden şebeke terminalleri üzerindeki aktif güç değeri, stator terminallerinden aktarılan aktif güç değerinden daha yüksektir. Rüzgar hızı 12m/s ulaştığında anda, generatörden şebekeye doğru generatörün nominal gücü kadar bir güç akışı ($P_{ref}=500kW$) olur. Rüzgar hızı artmaya devam ederse, kanat açısı kontrolü sayesinde şebekeye aktarılan aktif güç değeri generatörün nominal gücünü geçmeyecek şekilde sınırlandırılır.

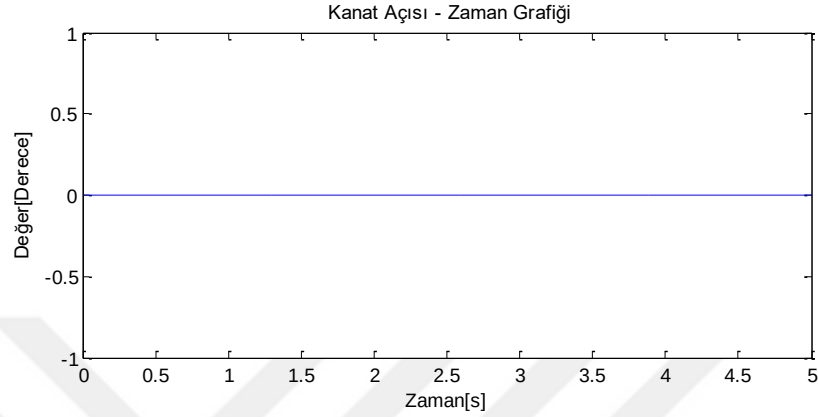
4.4 Maksimum Güç Noktası İzleme Bölgesindeki Performans Analizi

Bu çalışmada, çift beslemeli asenkron generatör nominal rüzgar hızının altındaki rüzgar hızlarında çalıştırılmıştır. Böylece maksimum güç noktası izleme kontrolünün performans incelemesi yapılmıştır. Uygulanan rüzgar hızı, 0-1.5sn boyunca 4m/s, 1.5-3.5sn boyunca 4m/s'den 12m/s çıkıyor, 3.5-5sn boyunca 12m/s hız ile devam etmektedir. 0-0.5sn aralığında senkronizasyonun sağlanmasından dolayı herhangi bir güç akışı olmaz. 0.5sn'den sonra rüzgar hızına bağlı olarak şebekeye doğru güç akışı olur. Uygulanan rüzgar hızı Şekil 4.74'de gösterilmiştir. Bu rüzgar hızına bağlı olarak MATLAB ortamında kurulan model üzerinde yapılan simülasyon çalışmalarının sonuçları aşağıda verilmiştir.

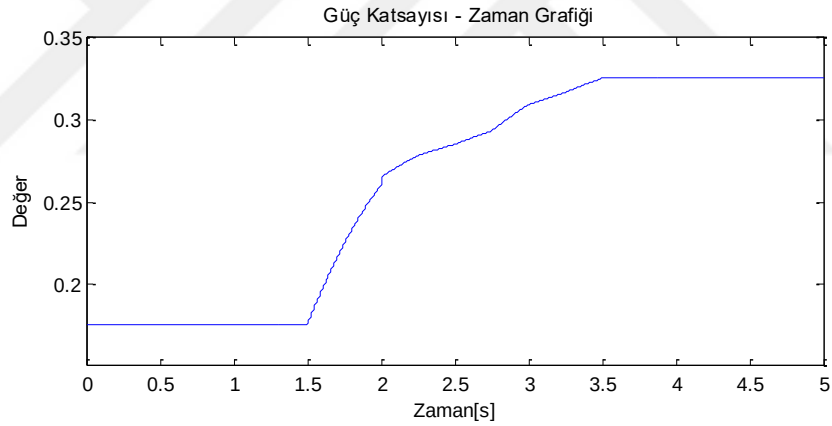


Şekil 4.74: Sistem modeli üzerinde uygulanan rüzgar hızı (MGNI)

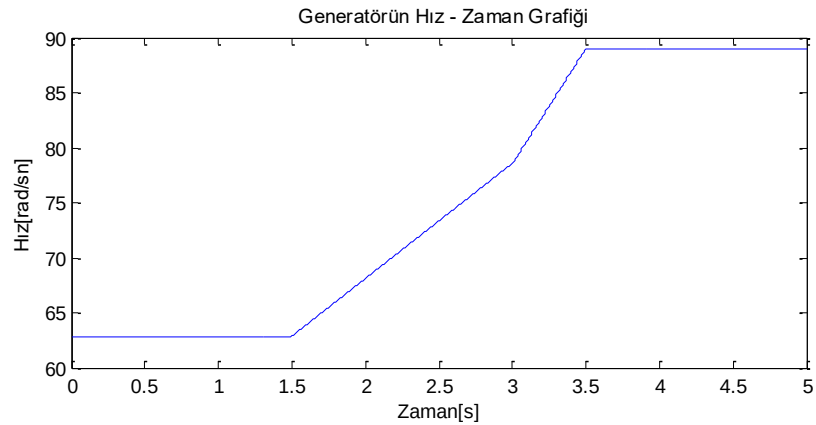
Rüzgar hızı, 4 m/s'den 12 m/s'ye arasında optimum güç referans değerlerini takip etmesi için, türbin kontrolü güç katsayısı değerini 0.1'den 0.33'e yükseltir. Bunun yanında ÇBAG'ün generatör hızı da doğru orantılı olarak artar. Maksimum güç noktası izleme kontrolünde yapılan analizde, kanat açısı, güç katsayısı ve ÇBAG'ün hız sonuçları sırasıyla Şekil 4.75, Şekil 4.76 ve Şekil 4.77'de verilmiştir.



Şekil 4.75: Kanat açısı (MGNİ)

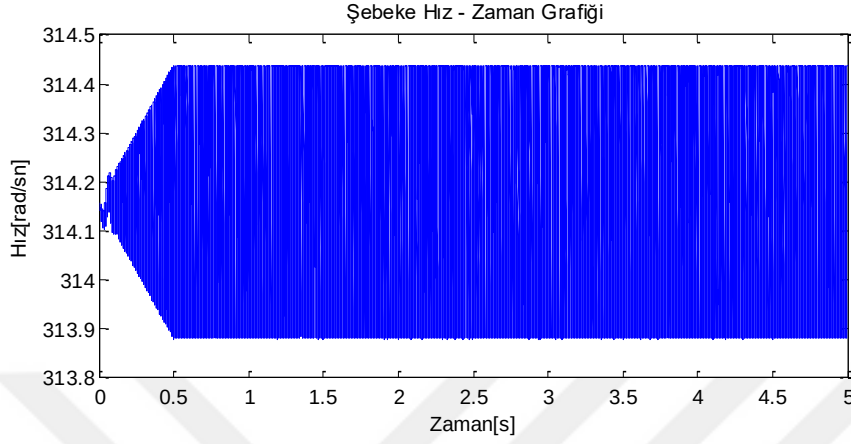


Şekil 4.76: Güç katsayısı (MGNİ)

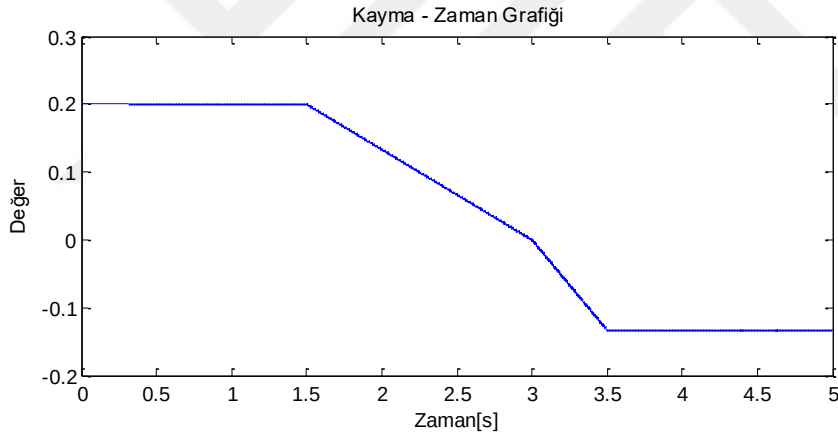


Şekil 4.77: ÇBAG'ün hızı (MGNİ)

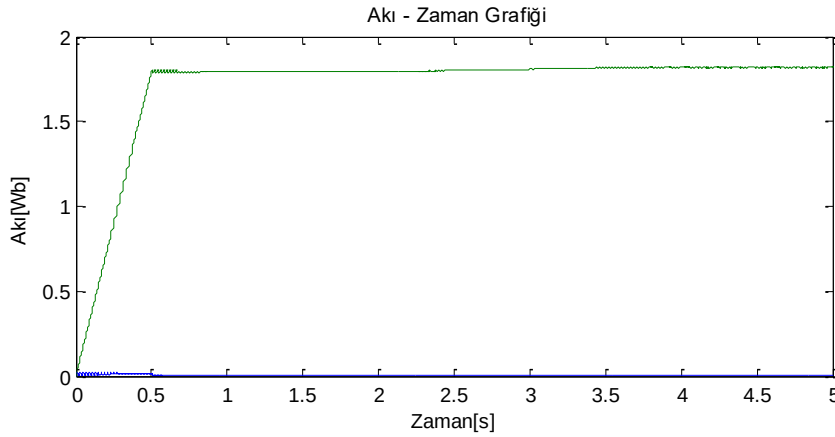
Generatör hızının değişmesine bağlı olarak kayma değeri sürekli olarak değişir. Kayma değeri, 1.5 s ve 3.5 s aralığında 0.2’den -0.133 değerine ulaştığı Şekil 4.79’da gösterilmiştir. Şebeke açısai frekans ve stator akı sonuçları sırasıyla Şekil 4.78 ve Şekil 4.80’de verilmiştir.



Şekil 4.78: Şebeke açısai frekansı (MGNİ)

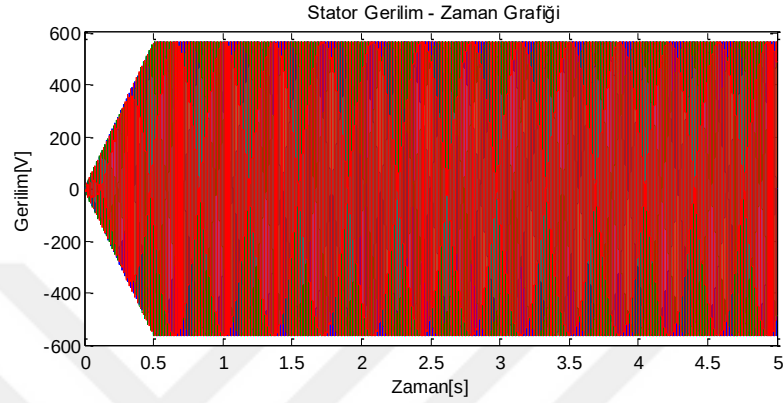


Şekil 4.79: ÇBAG'ün kayma değeri (MGNİ)

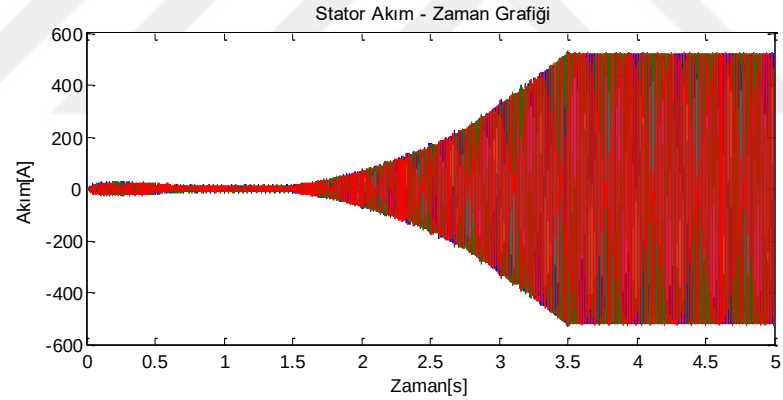


Şekil 4.80: ÇBAG'de stator akı değeri (DQ, MGNİ)

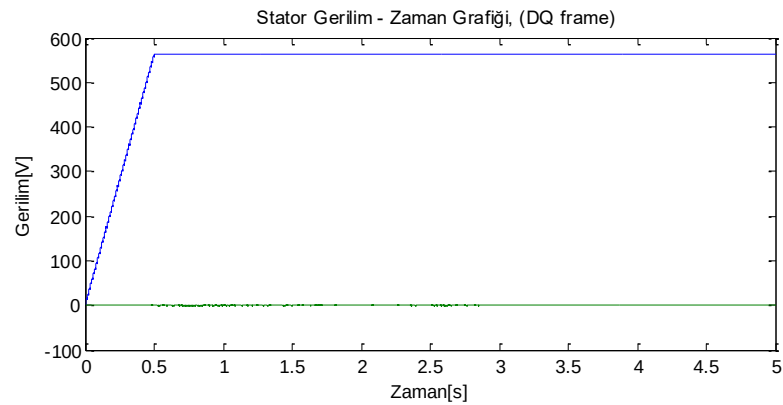
Anlık rüzgar hızı 4 m/s'den 12 m/s'ye kadar sürekli artırılmasından stator terminallerinde üretilen güç değeri de nominal değerine kadar sürekli artar. Paralel olarak stator akım değeri de 12 m/s'de 512 A ulaşarak nominal değerine ulaşır. Stator akım sonucu Şekil 4.82'de verilmiştir. Maksimum güç noktası izleme kontrolü kapsamında, ÇBAG'ün stator gerilim (ABC) ve stator gerilim (DQ) sonuçları sırasıyla Şekil 4.81 ve Şekil 4.83'de verilmiştir.



Şekil 4.81: ÇBAG'ün stator gerilimi (MGNİ)

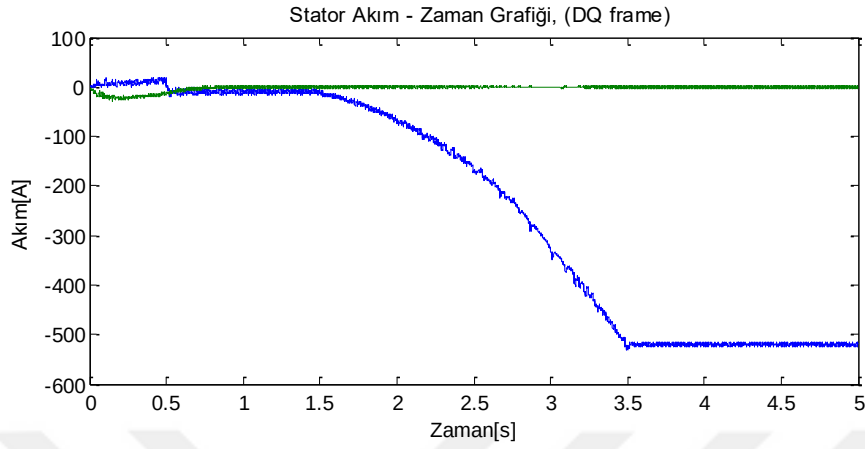


Şekil 4.82: ÇBAG'ün stator akımı (MGNİ)

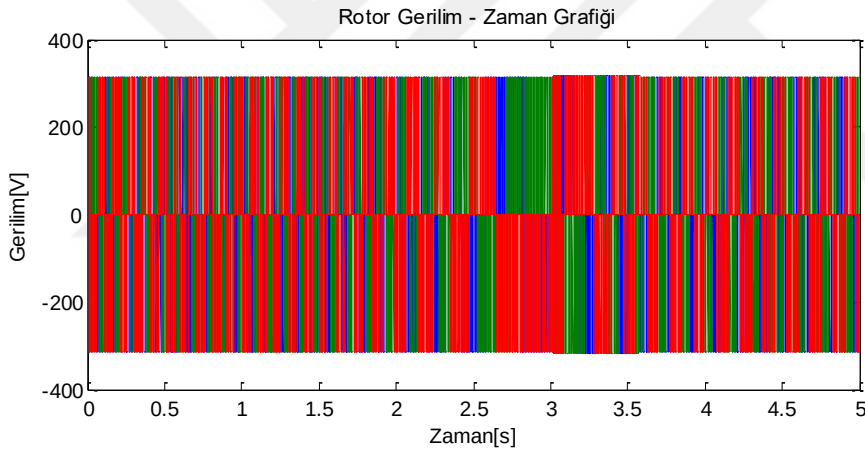


Şekil 4.83: ÇBAG'ün stator gerilimi (DQ, MGNİ)

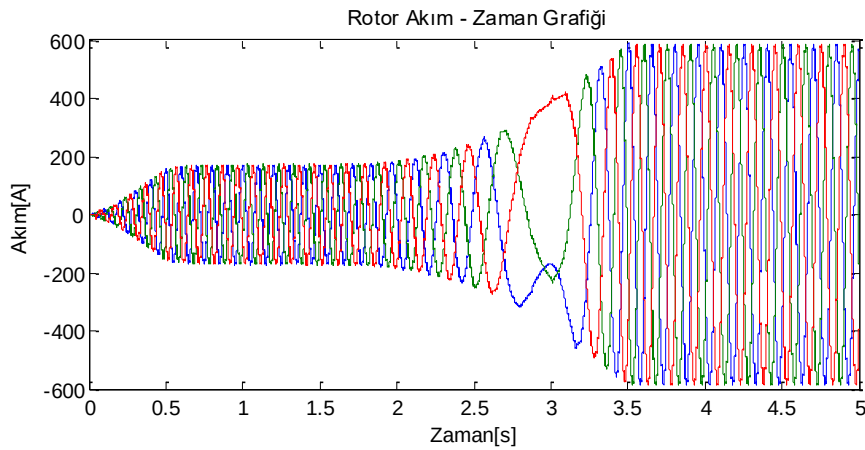
Maksimum güç noktası izleme kontrolü kapsamında yapılan analiz çalışmasında elde edilen ÇBAG'ün stator akım (DQ), ÇBAG'ün rotor gerilimi ve ÇBAG'ün rotor akım sonuçları sırasıyla Şekil 4.84, Şekil 4.85 ve Şekil 4.86'da verilmiştir.



Şekil 4.84: ÇBAG'ün stator akımı (DQ, MGNİ)

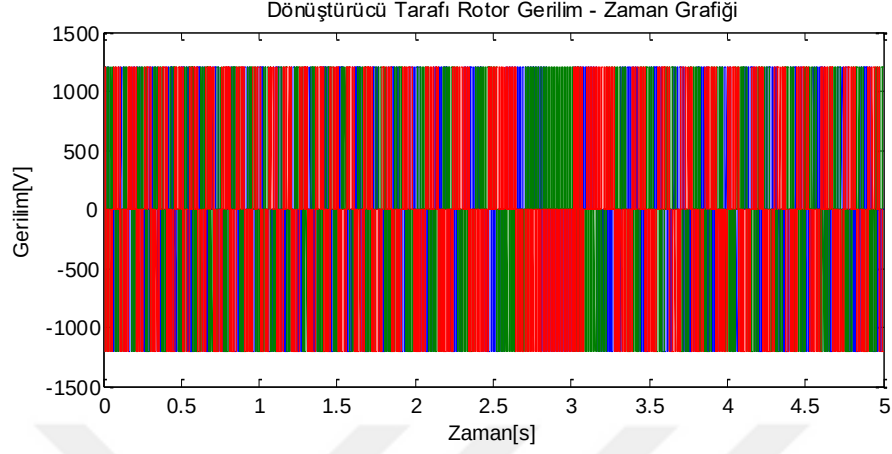


Şekil 4.85: ÇBAG'ün rotor gerilimi (MGNİ)

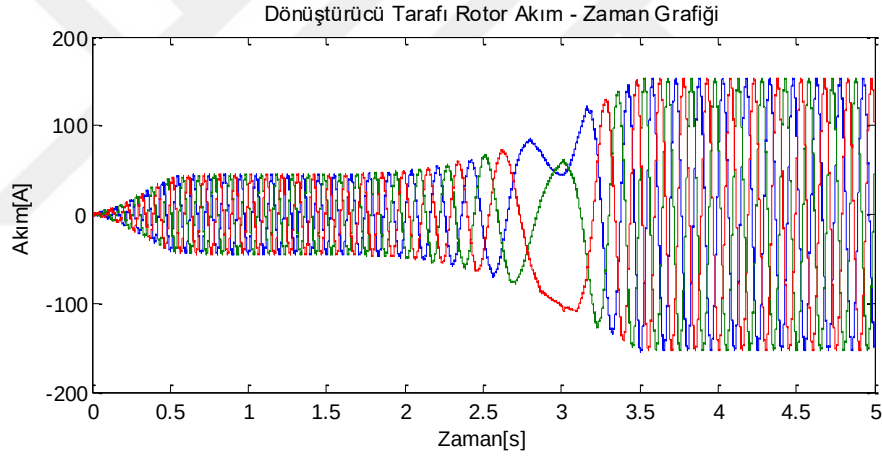


Şekil 4.86: ÇBAG'ün rotor akımı (MGNİ)

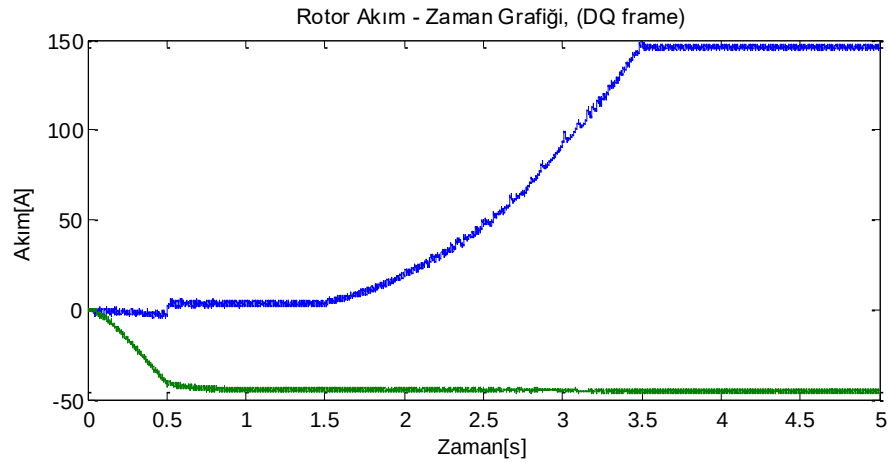
Analiz kapsamında, uygulanan rüzgar hızına bağlı olarak GTD terminalleri üzerindeki gerilim, GTD terminalleri üzerinden akan akım ve rotor akım (DQ) sonuçları sırasıyla Şekil 4.87, Şekil 4.88 ve Şekil 4.89’da verilmiştir.



Şekil 4.87: GTD terminalleri üzerindeki gerilim (MGNI)

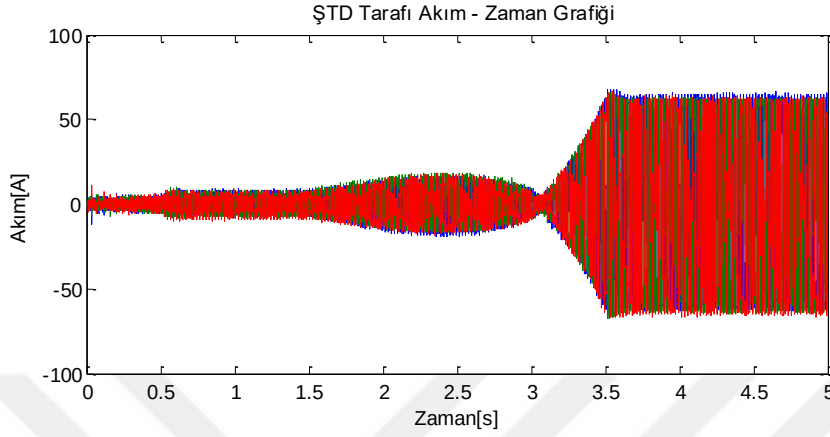


Şekil 4.88: GTD terminalleri üzerinden akan akım (MGNI)

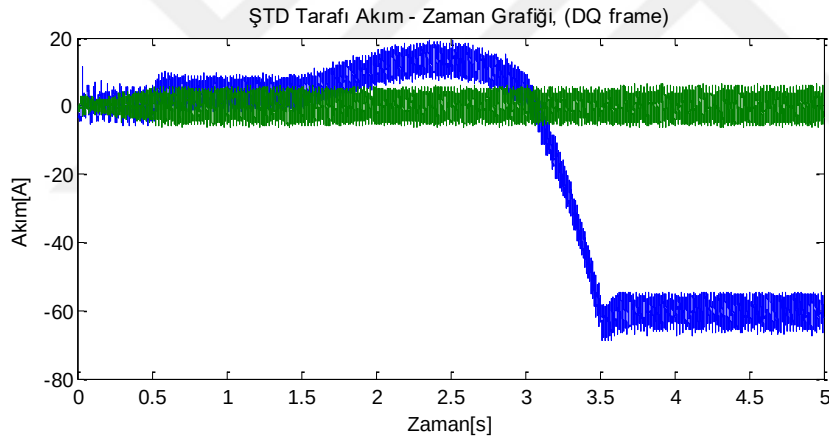


Şekil 4.89: Rotor akımı (DQ, MGNI)

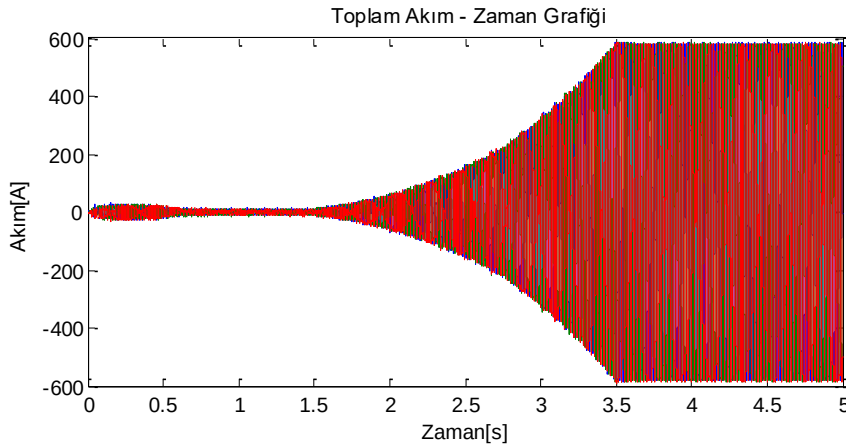
ŞTD tarafı filtre üzerinde akan akım değeri, ÇBAG senkron üstü çalışmasından sonra 3.5 s’de yaklaşık olarak 60 A’dır. ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (ABC), akım (DQ) ve şebekeye terminalleri üzerindeki toplam akım sonuçları sırasıyla Şekil 4.90, Şekil 4.91 ve Şekil 4.92’de verilmiştir.



Şekil 4.90: ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (MGNI)

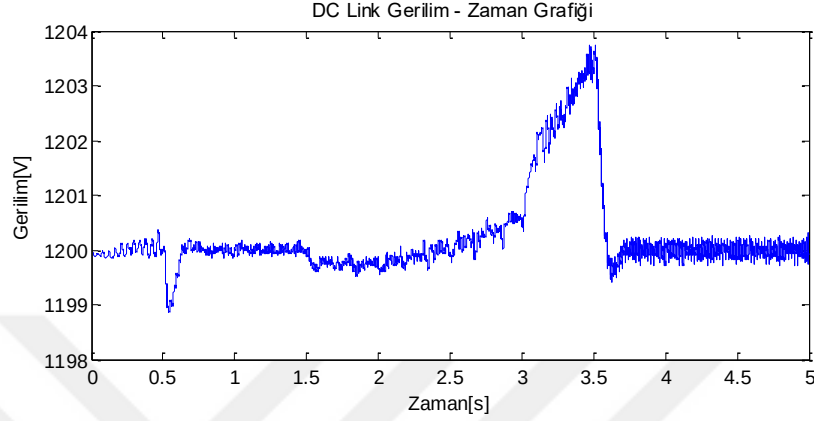


Şekil 4.91: ŞTD tarafındaki filtre üzerinden akan akım (DQ, MGNI)

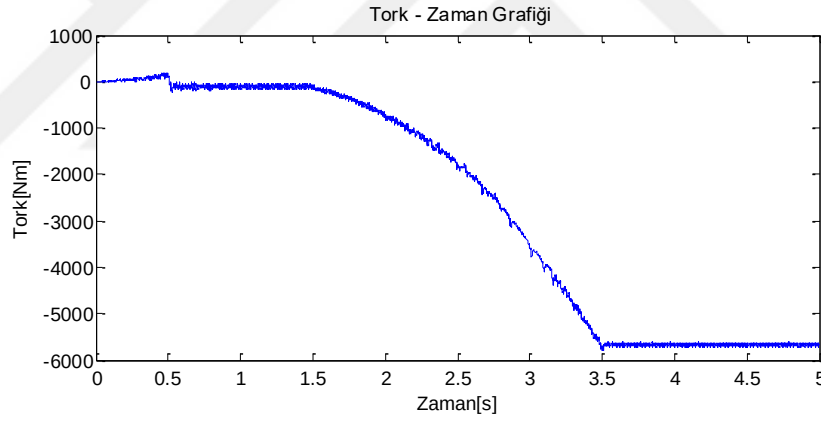


Şekil 4.92: Şebekeye terminalleri üzerindeki toplam akım (MGNI)

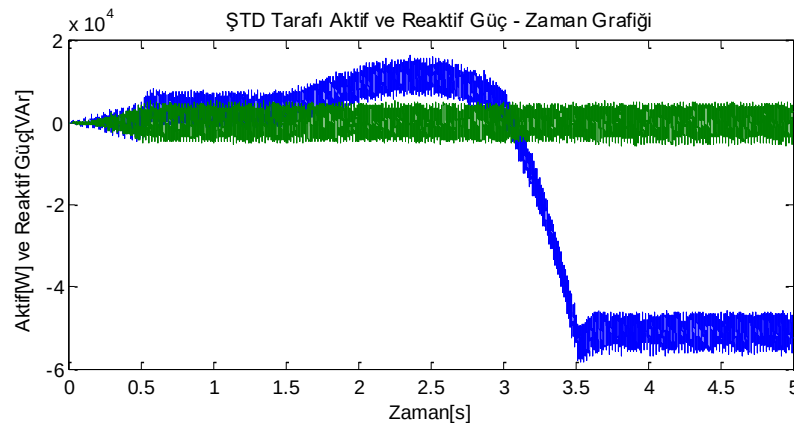
DC link gerilimi güç değişimlerinden belli oranda etkilenir. Ancak şebeke tarafı dönüştürücü sisteminde geliştirilen kontrol sistemi DC-link gerilimini nominal değerde tutmaya çalışır. Güç değişimlerin etkisi DC-link gerilimi üzerinde en fazla 4 V olduğu Şekil 4.93’de görülmektedir. ÇBAG’ün tork değeri ve ŞTD tarafı aktif ve reaktif güç sonuçları sırasıyla Şekil 4.94 ve Şekil 4.95’de verilmiştir.



Şekil 4.93: DC-link gerilimi (MGNİ)

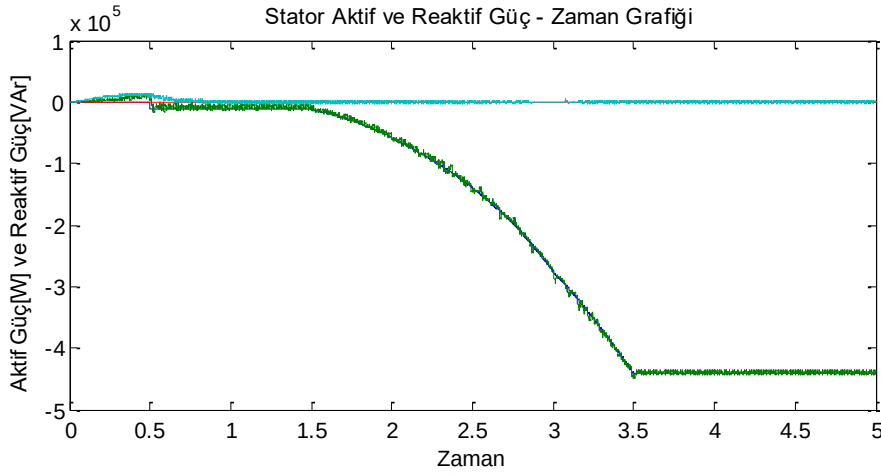


Şekil 4.94: ÇBAG’de üretilen tork değeri (MGNİ)

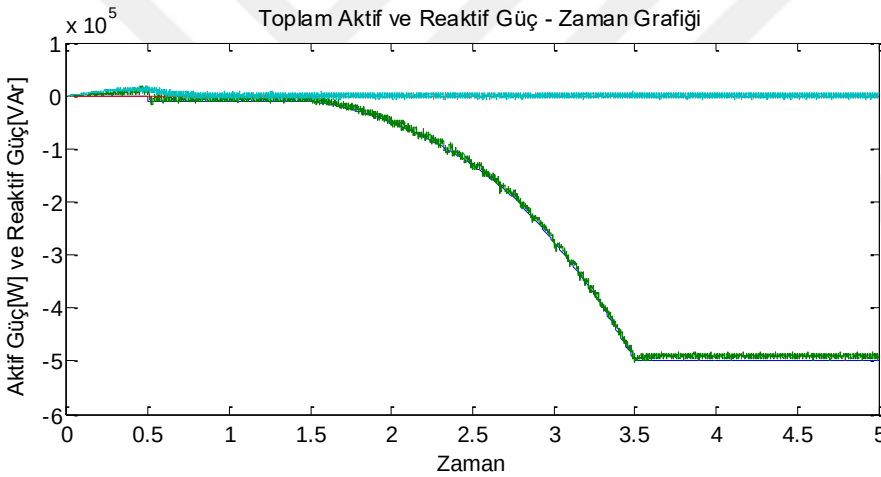


Şekil 4.95: ŞTD terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (MGNİ)

Stator ve şebeke terminalleri üzerindeki aktif ve reaktif güç sonuçları sırasıyla Şekil 4.96 ve Şekil 4.97’de verilmiştir.



Şekil 4.96: Stator terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (MGNI)

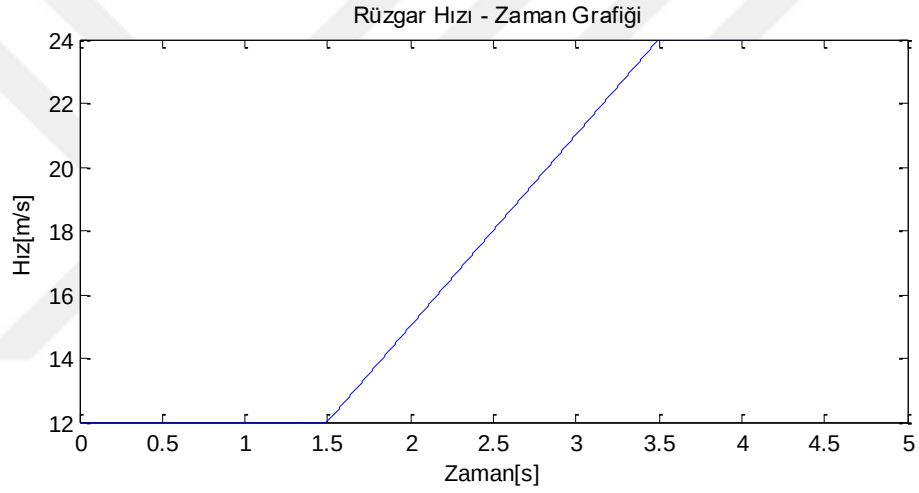


Şekil 4.97: Şebeke terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (MGNI)

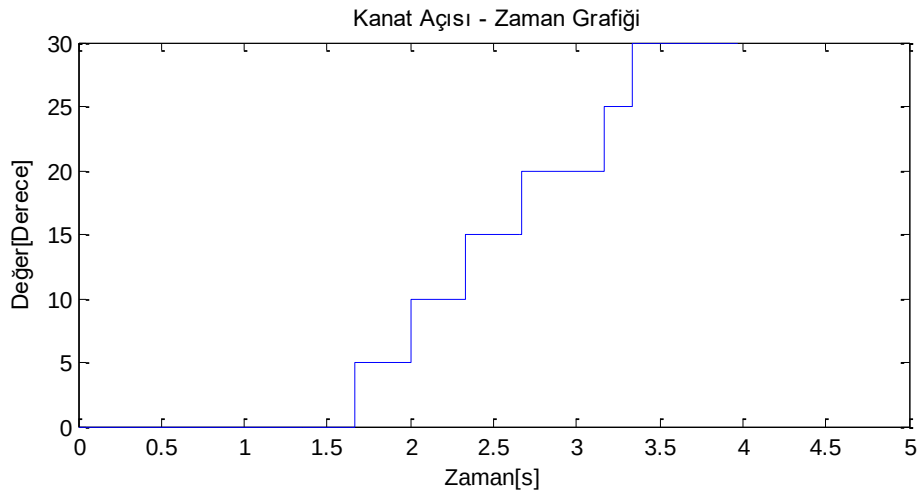
Uygulanan rüzgar hızı, nominal rüzgar hızının altında olmasından dolayı maksimum güç noktası izleme kontrolü ile birlikte çalışmaktadır. Rüzgar hızı, 1.5-3.5sn aralığında 4m/s’den 12m/s’ye çıkmaktadır. Bu zaman aralığında güç katsayıları sürekli olarak güncellenir. En optimum güç katsayı değerleri elde edilir. Güncellenen güç katsayısına bağlı olarak kontrol sistemi mümkün olan maksimum güç referansını üretir ve bu güç referansına bağlı olarak güç akışı sağlanır. Kanat açısı, rüzgar hızı nominal rüzgar hızının altında olmasından dolayı sıfırdır. 1.5-3.5sn aralığında rüzgar hızının sürekli artmasından dolayı aktif güç referansı artar. Aktif güç referansının artmasında dolayı generatörün stator akımı, rotor akımı ve tork değeri de artar.

4.5 Kanat Açısı Kontrol Bölgesindeki Performans Analizi

Bu çalışmada, çift beslemeli asenkron generatör nominal rüzgar hızının üstünde rüzgar hızlarında çalıştırılmıştır. Böylece kanat açısı kontrolünün performans incelemesi yapılmıştır. Uygulanan rüzgar hızı, 0-1.5sn boyunca 12m/s, 1.5-3.5sn boyunca 12m/s'den 24m/s çıkıyor, 3.5-5sn boyunca 24m/s hız ile devam etmektedir. 0-0.5sn aralığında senkronizasyonun sağlanmasından dolayı herhangi bir güç akışı olmaz. 0.5sn'den sonra rüzgar hızına bağlı olarak şebekeye doğru güç akışı olur. Uygulanan rüzgar hızı ve kanat açısı sırasıyla Şekil 4.98 ve 4.99'da gösterilmiştir. Bu rüzgar hızına bağlı olarak MATLAB ortamında kurulan model üzerinde yapılan simülasyon çalışmalarının sonuçları aşağıda verilmiştir.

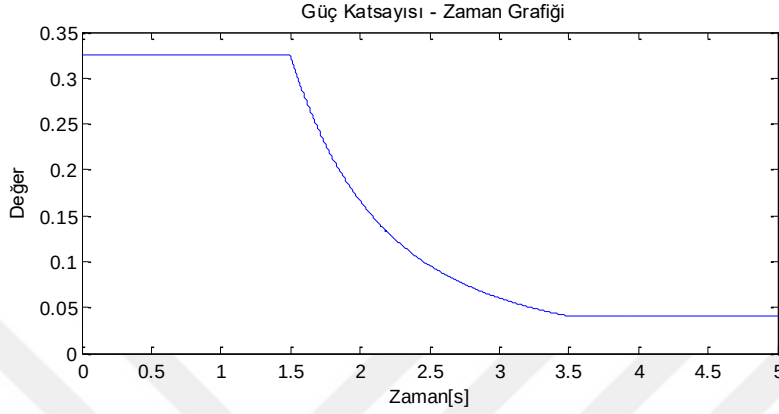


Şekil 4.98: Sistem modeli üzerinde uygulanan rüzgar hızı (kanat açısı kontrol)

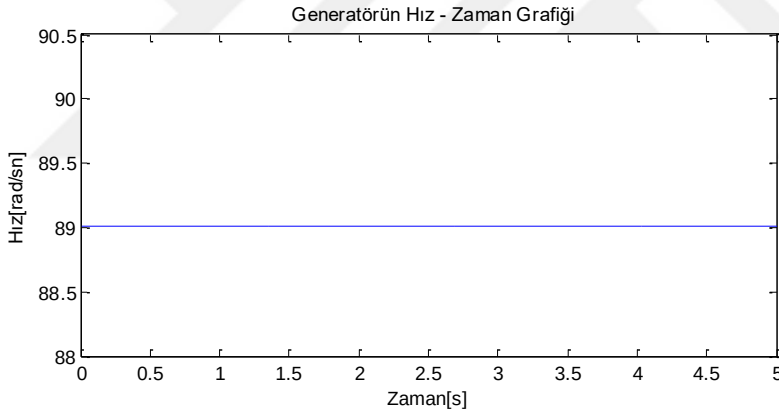


Şekil 4.99: Kanat açısı (kanat açısı kontrol)

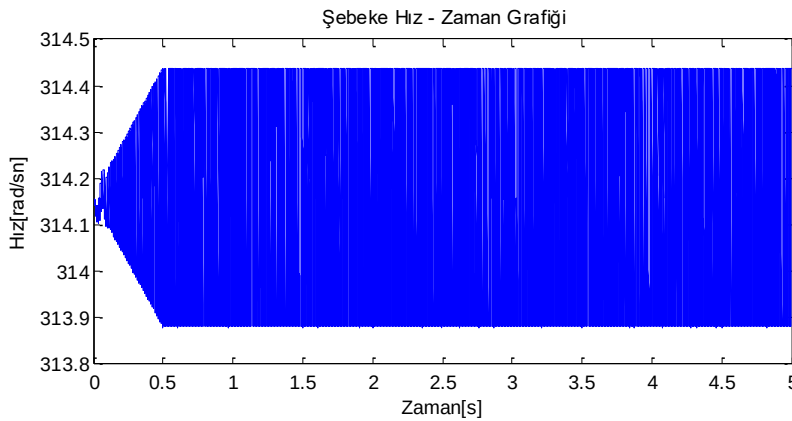
Anlık rüzgar hızı, 12 m/s'den 24 m/s'ye yaklaşık olarak 2 s'de çıkarıldığında, nominal gücünün üzerinde güç üretilmemesi için bu zaman aralığında kanat açısı sürekli değişir. Kanat açısının değişimiyle, güç katsayısı 0.33'den 0.04 değerine kadar düştüğü Şekil 4.100'de görülmektedir. ÇBAG'ün hızı ve şebeke açısal frekans sonuçları da sırasıyla Şekil 4.101 ve Şekil 4.102'de verilmiştir.



Şekil 4.100: Güç katsayısı (kanat açısı kontrol)

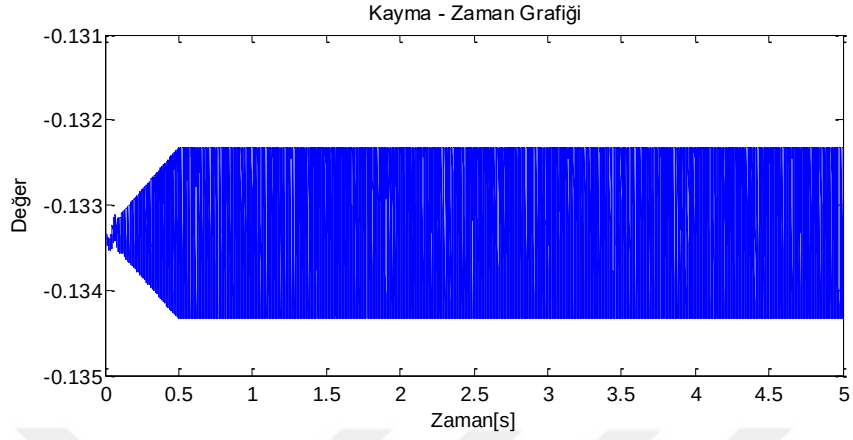


Şekil 4.101: ÇBAG'ün hızı (kanat açısı kontrol)

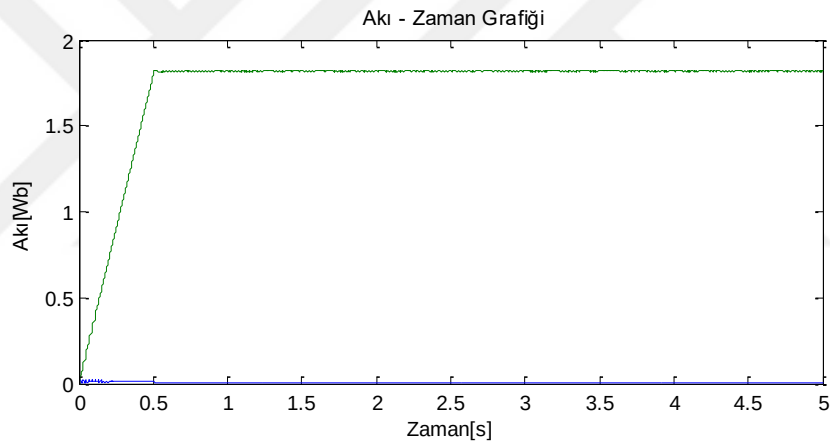


Şekil 4.102: Şebeke açısal frekansı (kanat açısı kontrol)

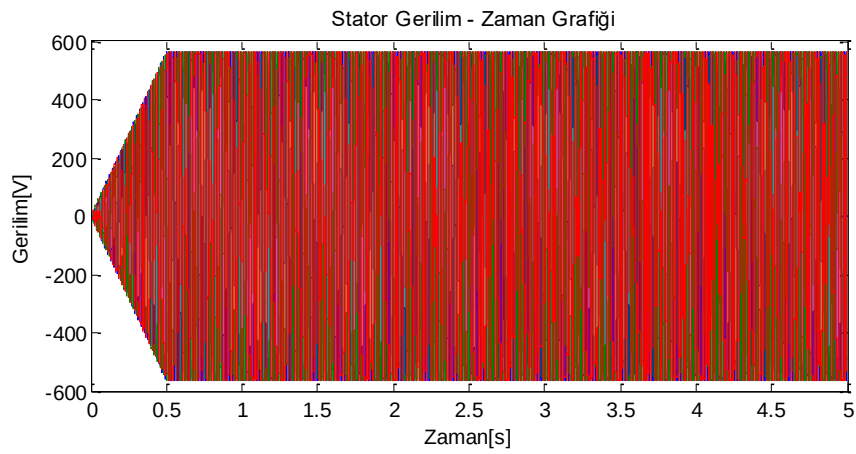
Kanat aç ı kontrol kapsamında yapılan analizlerde, ÇBAG' ın kayma değ eri, stator ak ı ve stator gerilim sonuçları sırasıyla Ş ekil 4.103, Ş ekil 4.104 ve Ş ekil 4.105' de verilmiştir.



Ş ekil 4.103: ÇBAG' ın kayma değ eri (kanat aç ı kontrol)

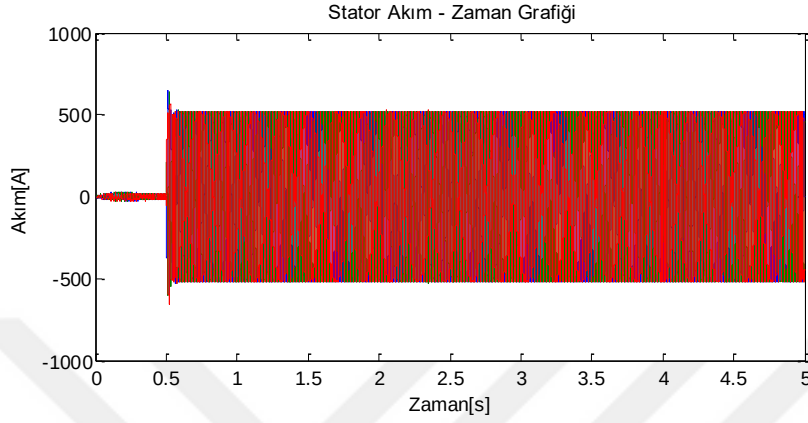


Ş ekil 4.104: ÇBAG' ın stator ak ı değ eri (DQ, kanat aç ı kontrol)

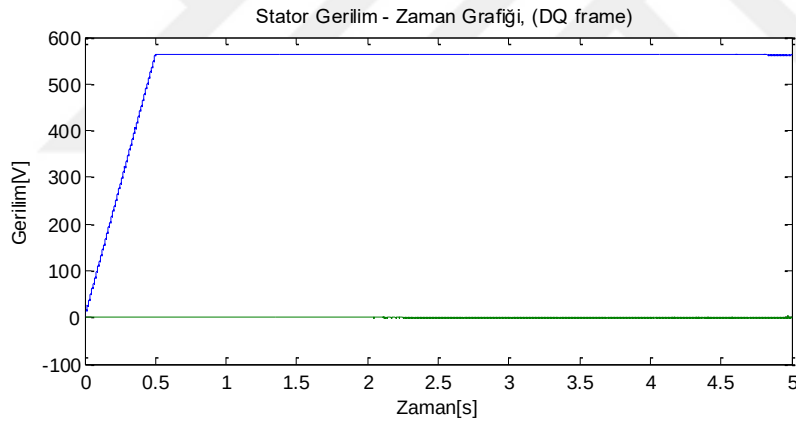


Ş ekil 4.105: ÇBAG' ın stator gerilimi (kanat aç ı kontrol)

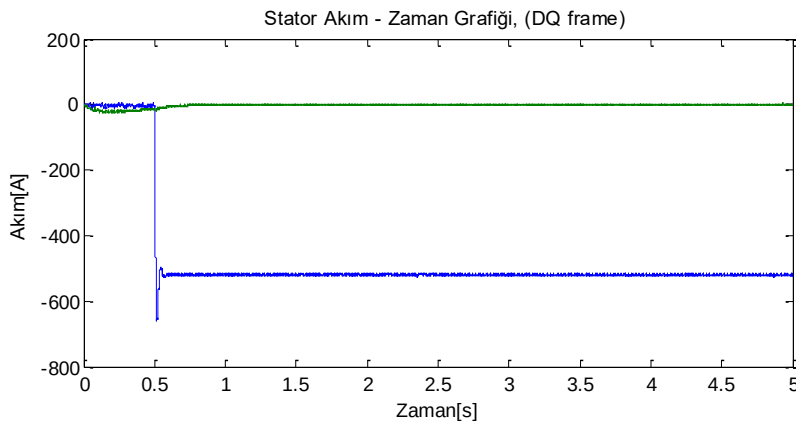
Anlık rüzgar hızı, sürekli olarak nominal rüzgar hızının üzerinde olmasından dolayı stator akım değeri nominal değerinde seyreder. Stator akım değeri, 0.5s’de güç referansı uygulanmaya başlamasıyla birlikte 512 A değerine ulaştığı Şekil 4.106’da görülmektedir. Analiz kapsamında, ÇBAG’ün stator gerilim (DQ) ve stator akım (DQ) sonuçları sırasıyla Şekil 4.107 ve Şekil 4.108’de verilmiştir.



Şekil 4.106: ÇBAG’ün stator akımı (kanat açısı kontrol)

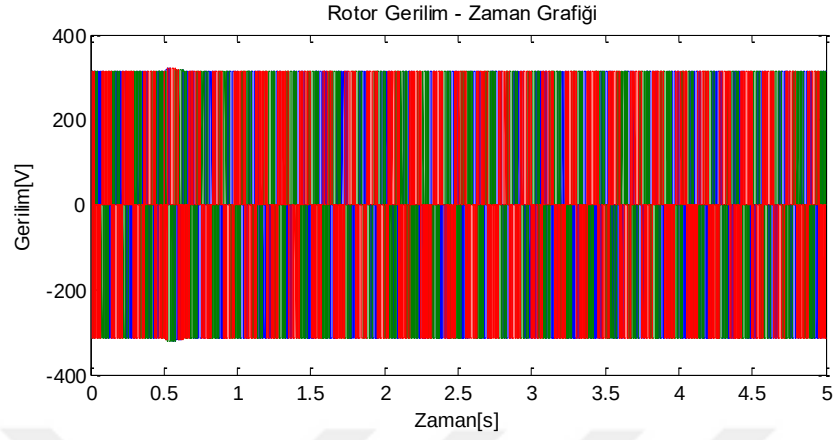


Şekil 4.107: ÇBAG’ün stator gerilimi (DQ, kanat açısı kontrol)

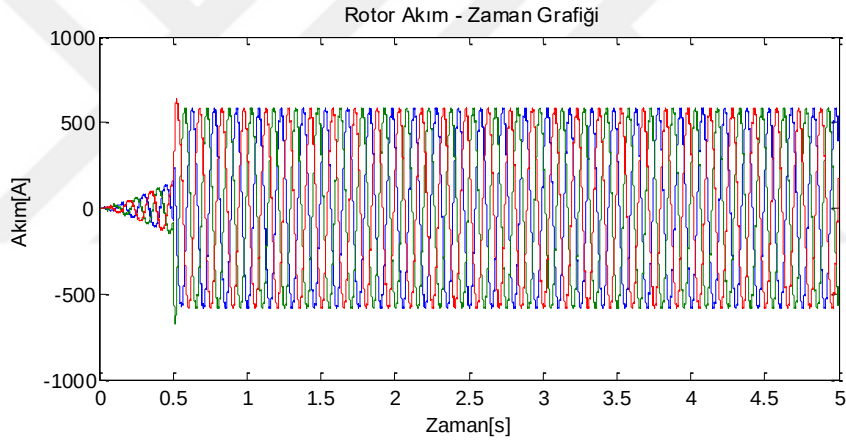


Şekil 4.108: ÇBAG’ün stator akımı (DQ, kanat açısı kontrol)

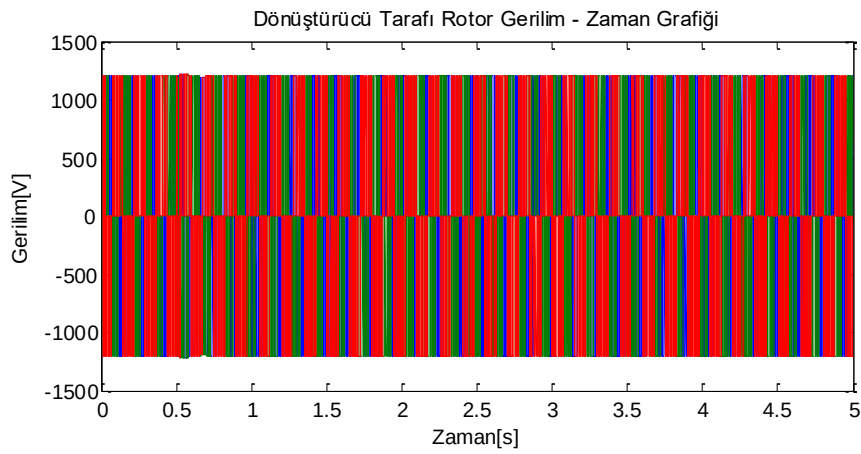
Kanat açi kontrolü kapsamında yapılan analizlerde, ÇBAG'ün rotor gerilimi, rotor akımı ve GTD terminalleri üzerindeki gerilim sonuçları sırasıyla Şekil 4.109, Şekil 4.110 ve Şekil 4.111'de verilmiştir.



Şekil 4.109: ÇBAG'ün rotor gerilimi (kanat açi kontrol)

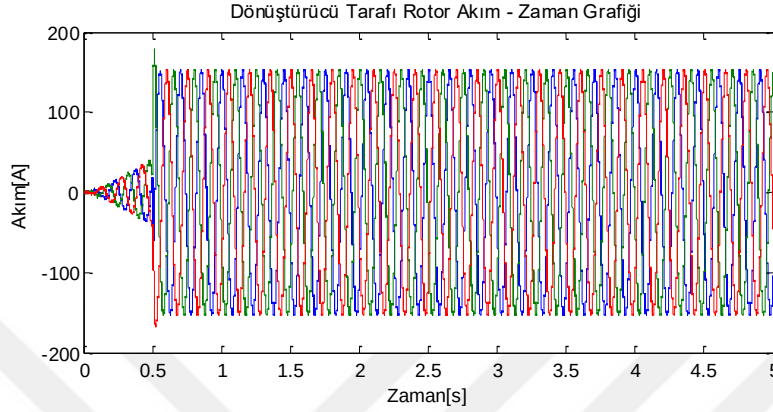


Şekil 4.110: ÇBAG'ün rotor akımı (kanat açi kontrol)

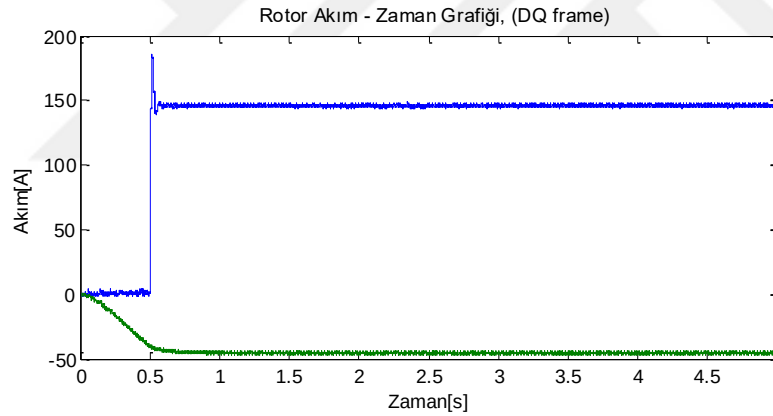


Şekil 4.111: GTD terminalleri üzerindeki gerilim (kanat açi kontrol)

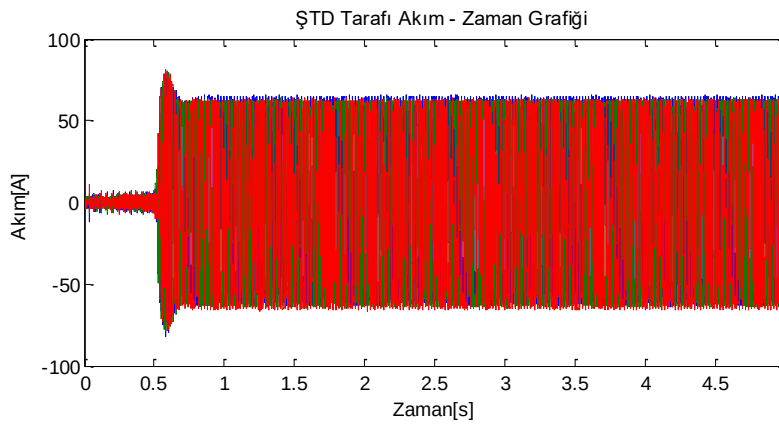
0.5 s'den sonra rüzgar türbinine nominal aktif güç referansı uygulandığı için dönüştürücü tarafı rotor akım değeri 144 A değerini takip eder. Rotor akım sonuçları Şekil 4.113'de verilmiştir. Buna ek olarak, GTD terminalleri üzerinden akan akım ve ŞTD tarafı filtre üzerinden akan akım sonuçları sırasıyla Şekil 4.112 ve Şekil 4.114'de verilmiştir.



Şekil 4.112: GTD terminalleri üzerinden akan akım (kanat açma kontrol)

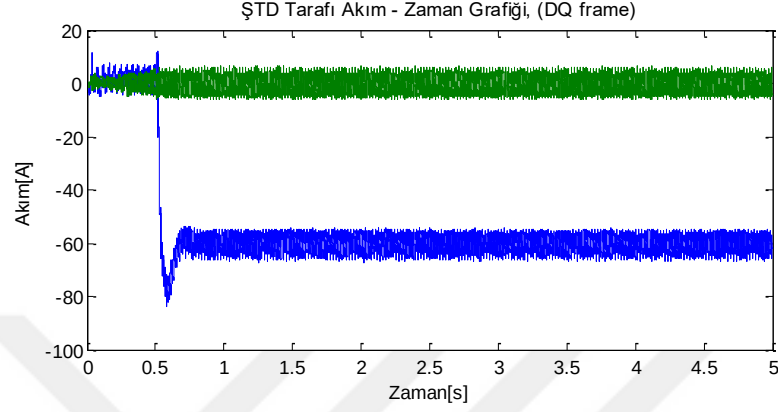


Şekil 4.113: Rotor akımı (DQ, kanat açma kontrol)

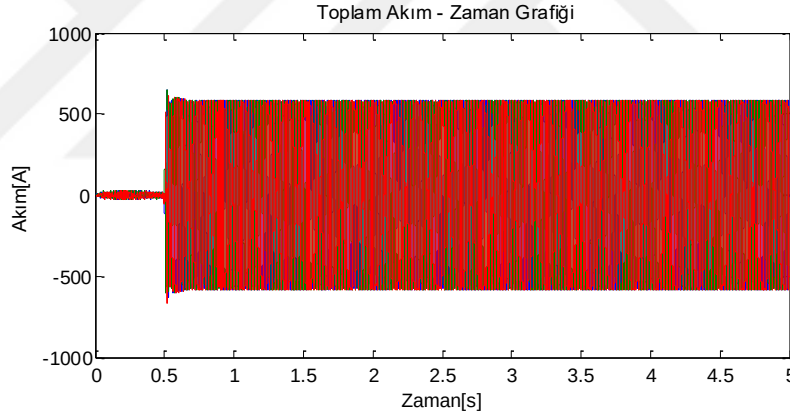


Şekil 4.114: ŞTD tarafı filtre üzerinden akan akım (kanat açma kontrol)

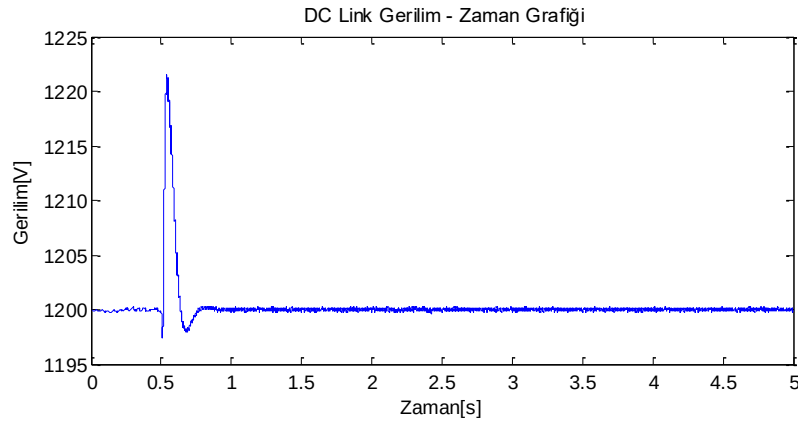
0.5 s’de yeterli rüzgar hızı olmasından dolayı direk olarak nominal aktif güç referansı uygulanır. Ani yüklenmesinden dolayı DC-link gerilimde anlık olarak 20 V civarında bir sıçrama olmaktadır. Ek olarak bu zamanda ŞTD tarafı filtre üzerinde akan akımda ise 20 A aşım olmaktadır. ŞTD tarafı filtre üzerinden akan akım, toplam akım ve DC-link gerilim sonuçları sırasıyla Şekil 4.115, Şekil 4.116 ve Şekil 4.117’de verilmiştir.



Şekil 4.115: ŞTD tarafı filtre üzerinden akan akım (DQ, kanat aç kontrol)

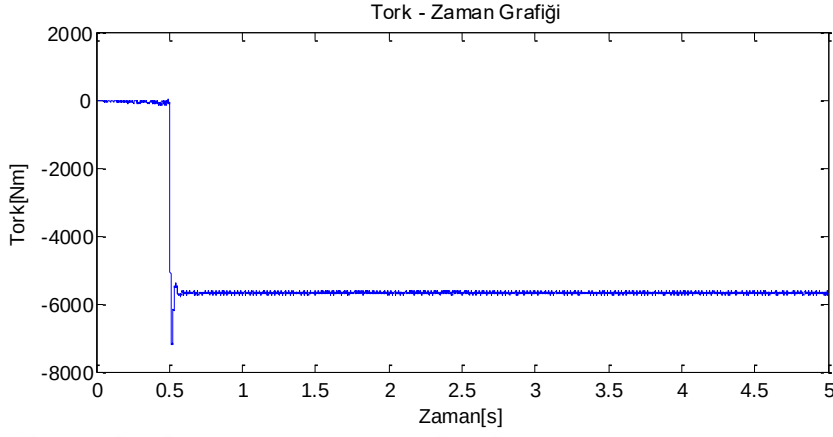


Şekil 4.116: Şebeke terminalleri üzerindeki toplam akım (kanat aç kontrol)

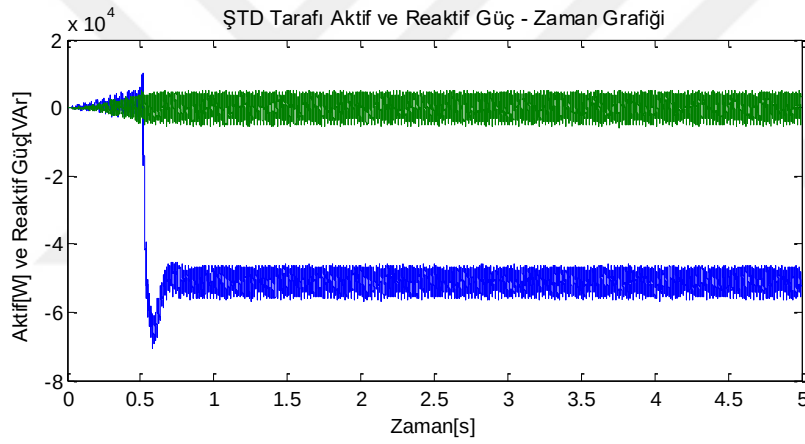


Şekil 4.117: DC-link gerilimi (kanat aç kontrol)

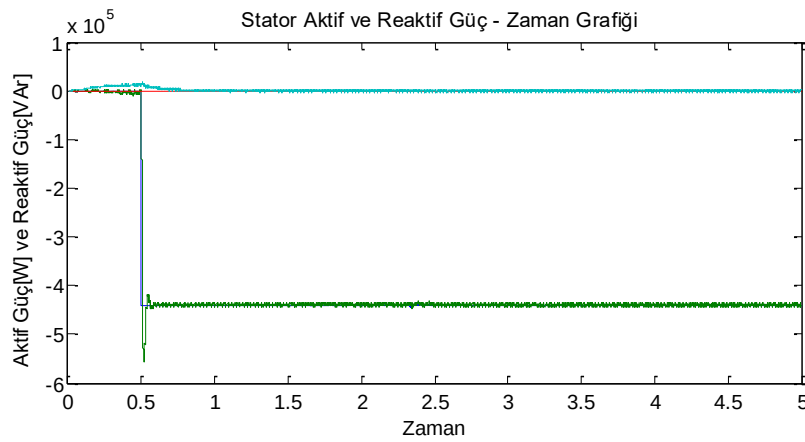
Analiz kapsamında, ÇBAG'ün tork değeri, ŞTD tarafı aktif ve reaktif güç, stator ve şebeke terminalleri üzerindeki aktif ve reaktif güç sonuçları sırasıyla Şekil 4.118, Şekil 4.119, Şekil 4.120 ve Şekil 4.121'de verilmiştir.



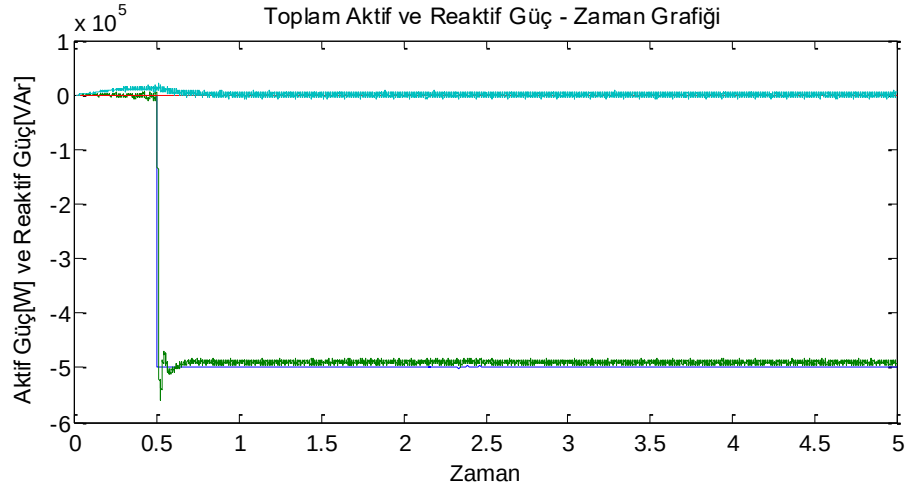
Şekil 4.118: ÇBAG'de üretilen tork değeri (kanat açısı kontrol)



Şekil 4.119: ŞTD terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (kanat açısı kontrol)



Şekil 4.120: Stator terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (kanat açısı kontrol)



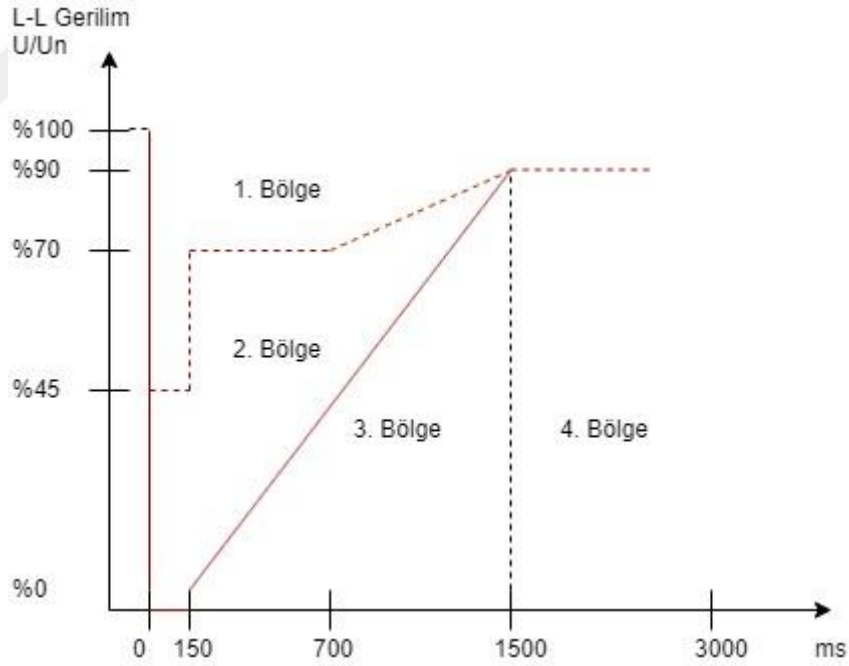
Şekil 4.121: Şebeke terminal üzerindeki aktif ve reaktif güç (kanat açısı kontrol)

Uygulanan rüzgar hızı, nominal rüzgar hızının üstünde olmasından dolayı kanat açısı kontrolü ile birlikte çalışmaktadır. Rüzgar hızı, 1.5-3.5sn aralığında 12m/s'den 24m/s'ye çıkmaktadır. Rüzgar hızına bağlı olarak, generatörün nominal gücünün üzerinde bir güç üretmemek için, 1.5-3.5sn boyunca sürekli olarak kanat açısı ayarlanır. Güncellenen kanat açısı ve uç hız oranına bağlı olarak güç katsayıları sürekli olarak yeniden hesaplanır. Hesaplanan yeni güç katsayısına bağlı olarak kontrol sistemi nominal güç referansının üzerinde bir güç üretmesine izin vermez. Bundan dolayı, 1.5-3.5sn aralığına generatörden şebekeye doğru nominal güç ($P_{ref}=500kW$) akışı olur. 0.5-1.5sn aralığında rüzgar hızı 12m/s, 3.5-5sn aralığında ise 24m/s'dir. Bu zaman aralıklarında da rüzgar hızı nominal rüzgar hızının üzerinde olması sebebiyle generatörün nominal gücü kadar şebekeye doğru güç akışı olur. 0.5-5sn aralığında güç referansı sürekli sabit kaldığı için, stator akım, rotor akım ve tork değerleri de değişmemektedir.



5. ŞEBEKE GERİLİM DÜŞMELERİNDE RÜZGAR TÜRBİN-GENERATÖR SİSTEM MODELİNİN DİNAMİK DAVRANIŞ ANALİZİ

Rüzgar türbinlerinin çalışması süresince düzgün bir şekilde güç akışının sağlanması için şebeke değerlerinin (gerilim, frekans vs.) belli sınırlar içinde olması gerekmektedir. Ancak şebeke değerleri her zaman sınır değerlerinin içinde kalmaz. Şebeke dengesizliğinde, çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbinlerinde ciddi zorlanmalar meydana gelmektedir. Bu gibi durumlarda rüzgar türbinlerinin zarar görmesini engellemek ve sistem davranışını iyileştirmek için şebeke arızalarına karşı koruma yöntemlerinin ve kontrol stratejilerinin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Şebeke gerilim düşümü ve geçen zamanın sınır değerleri Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

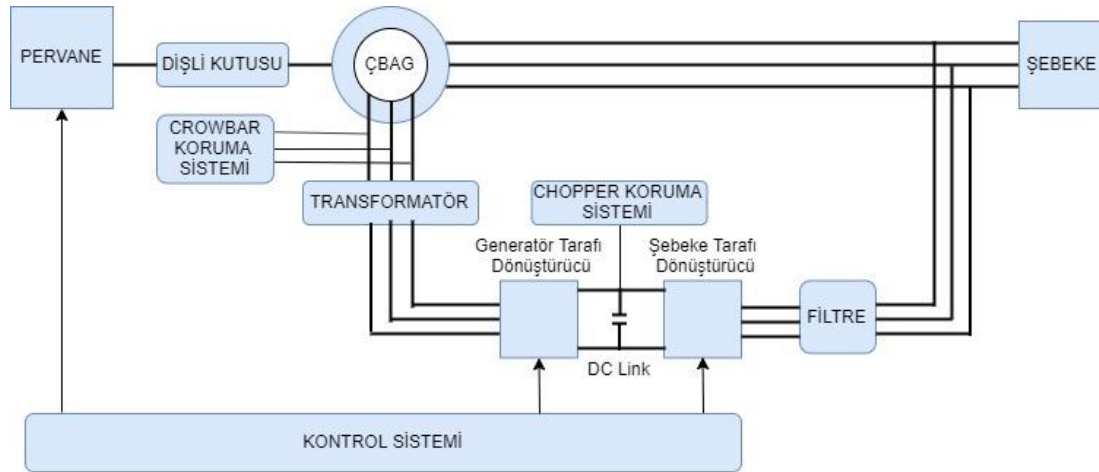


Şekil 5.1: Şebeke gerilim düşümü ve geçen zamanın sınır değerleri

Şebeke de gerilim düşümü olduğu zaman, gerilim düşümü 1 numaralı bölgede ise rüzgar türbini aktif gücü, gerilim tekrardan nominal değerine ulaştıktan sonra saniyede nominal aktif gücünün en az %20'si kadar artırılarak, nominal aktif güç değerine ulaşmalıdır.

Eğer gerilim düşümü 2 numaralı bölge içinde ise gerilim düşümü nominal değerine ulaştıktan sonra nominal aktif gücünün en az %5'i kadar artırılarak, nominal aktif güç değerine ulaşmalıdır. 1 ve 2 numaralı bölgelerde rüzgar türbinlerinin şebekeden ayrılmasına gerek yoktur [50, 51].

Rüzgar türbin-generatör sistemlerinde şebeke arızalarına karşı sistemi korumak için geliştirilen birkaç tane yöntem mevcuttur. Bunlardan en yaygın olanları crowbar ve chopper koruma sistemleridir. Bu koruma sistemlerinde mevcut olduğu rüzgar türbin generatör sistemi Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Crowbar sistemi üç fazlı kontrolsüz veya kontrollü doğrultucu devre olarak kullanılabilir. Bu sistem ÇBAG'nün rotor terminallerine doğrudan bağlanır. İkinci koruma sistemi olan chopper sisteminde, kontrollü tek anahtarlama elemanı kullanılır. Şebeke geriliminde düşme olması durumunda generatörün rotor akımında hızlı bir artış olur. Bu artış DC-link geriliminin yükselmesine neden olur. Eğer DC-link gerilimi belli bir seviyeye ulaşırsa ilk olarak chopper sistemi devreye girer ve fazla enerji chopper sistemi üzerindeki dirençlerde yok edilmeye çalışılır. Ancak chopper sistemi devreye girmesine rağmen DC-link geriliminde yükselme devam ederse belli bir seviyede bu sefer crowbar sistemi devreye girer. Crowbar sisteminin devreye girmesi ile rotor terminalleri üzerindeki fazla enerji dirençler üzerinde yok edilir. Böylece sistemin zarar görmesinin önüne geçilmiş olur.



Şekil 5.2: Rüzgar türbin-generatör ve koruma sistemleri

Bu bölümde bu problemlere çözüm bulmak ve sistem davranışının iyileştirilmesi için MATLAB/Simulink ortamında kurulan rüzgar türbin – generatör sistem modeli üzerinde şebeke geriliminin düşmesi durumlarına karşı geliştirilen koruma yöntemleri ve kontrol stratejileri uygulanarak, analiz çalışmaları yapılacaktır.

5.1 Model ve Kontrol Stratejileri

Bu çalışma kapsamında şebekede gerilim düşmelerine karşı üç farklı yöntem geliştirilmiştir. İlk olarak rüzgar türbin-generatör sistem modelinde şebeke ve generatör tarafı kontrol sistemleri için hata süresi boyunca devrede olan yeni kontrolör katsayıları geliştirilmiştir. İkinci olarak crowbar koruma sistemi, mevcut rüzgar türbin-generatör sistem modeline eklenmiştir. En son olarak ise, mevcut rüzgar türbin-generatör sistem modelinde hem crowbar hem de chopper koruma sistemi eklenmiştir. Bu üç yöntem için model ve kontrol stratejileri geliştirilmiş ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

- Yöntem 1: Hata süresince güncellenen kontrolör katsayıları:

Bu yöntemde, şebeke gerilimi belli bir seviyenin altına düştüğü anda rüzgar türbin – generatör sistemi arızayı algılar ve belli bir süre sonra güç referansını sıfıra çeker. Aynı zamanda arıza süresince şebeke tarafı ve generatör tarafı dönüştürücülerin kontrol sisteminde akım kontrolör katsayıları güncellenir. Hata süresince güncellenen kontrolör katsayıları devrede kalır. Şebeke gerilimi tekrardan nominal seviyeye ulaşmasından sonra kontrol sisteminde eski akım kontrolör katsayıları tekrardan devreye girer. Aynı zamanda arızanın ortadan kalkması ve şebeke gerilimi tekrardan nominal seviye ulaşmasından sonra güç referansı tekrardan uygulanmaya başlar ve sistem çalışmaya devam eder.

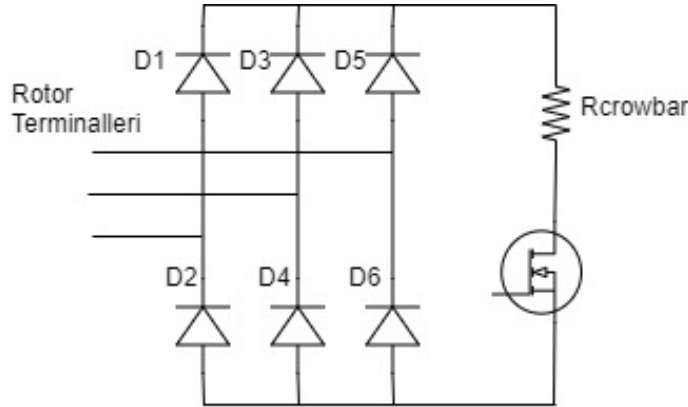
Hata süresince şebeke ve generatör tarafı dönüştürücüleri için güncel akım kontrolör katsayıları Denklem 5.1'e göre seçilir.

$$w_{oc} = \frac{w_{sw}}{30}; w_n = \frac{w_{sw}}{44} \quad [5.1]$$

- Yöntem 2: Crowbar koruma sistemi

Bu yöntemde, şebeke gerilimi belli bir seviyenin altına düştüğü anda rüzgar türbin – generatör sistemi arızayı algılar ve belli bir süre sonra güç referansını sıfıra çeker. Crowbar koruma sistemi devreye girmeden önce, generatör tarafı dönüştürücü sistemi devre dışı bırakılır. Arızanın oluşmasından sonra DC-link gerilimi belli bir seviyeye ulaşmasından sonra crowbar sistemi devreye girer ve fazla enerji crowbar sistemi tarafından ortadan kaldırılır. Fazla enerji ortadan kalktıktan sonra, crowbar sistemi devreden çıkar. Şebeke gerilimi tekrardan nominal seviye ulaştıktan sonra generatör tarafı dönüştürücü sistemi tekrardan devreye girer. En son olarak güç referansı uygulanır ve sistem çalışmaya devam eder.

Crowbar koruma sistemi üç fazlı kontrolsüz doğrultucu ve direnç elemanlarından oluşmaktadır. Crowbar koruma sistemi Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3: Crowbar koruma sistemi

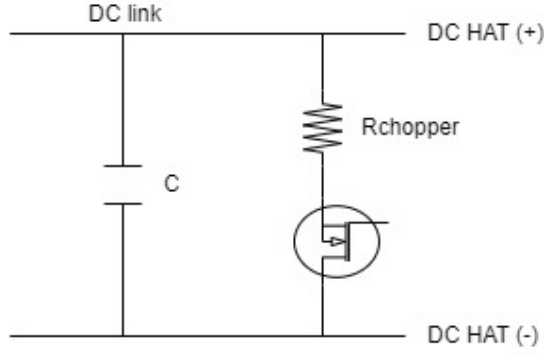
Crowbar direncinin elde edilmesi için kullanılan denklem 5.2’de verilmiştir. Maksimum crowbar direnci yaklaşık olarak olarak rotor direncinin yaklaşık 24 katıdır [52].

$$\frac{L_m w_r}{L_s w_s} \frac{R_{crow_maks}}{\sqrt{(R'_r + R_{crow_maks})^2 + (L'_r w_r)^2}} \leq V_{dc_{pu}} \quad [5.2]$$

- Yöntem 3: Crowbar ve chopper koruma sistemi

Bu yöntemde, şebeke gerilimi belli bir seviyenin altına düştüğü anda rüzgar türbin – generatör sistemi arızayı algılar ve belli bir süre sonra güç referansını sıfıra çeker. Arızanın oluşmasından sonra DC-link gerilimi belli bir seviyeye ulaşmasından sonra chopper sistemi devreye girer ve fazla enerji yok edilmeye çalışılır. Ancak DC-link gerilimi, chopper sistemi devrede olmasına rağmen yükselmeye devam edebilir. Bu durumda generatör tarafı dönüştürücü sistemi devre dışı bırakılır. DC-link gerilimi belli bir seviyeye ulaştıktan sonra crowbar sistemi devreye girer ve fazla enerji crowbar sistemi tarafından ortadan kaldırılır. Fazla enerji ortadan kalktıktan sonra, chopper ve crowbar sistemi devreden çıkar. Şebeke gerilimi tekrardan nominal seviye ulaştıktan sonra generatör tarafı dönüştürücü sistemi tekrardan devreye girer. En son olarak güç referansı uygulanır ve sistem çalışmaya devam eder.

Chopper koruma sistemi tek kontrollü anahtarlama elemanı ve direnç elemanlarından oluşmaktadır. Chopper koruma sistemi Şekil 5.4’de gösterilmiştir.



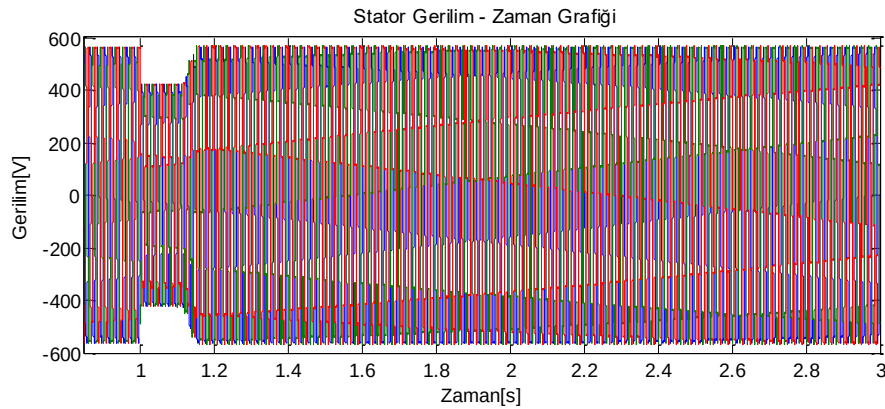
Şekil 5.4: Chopper koruma sistemi

Chopper direncinin seçimi, frekans dönüştürücü nominal güç değeri ile DC-link geriliminin maksimum üst sınırına bağlı olarak seçilir [53].

$$R_{chopper} = \frac{V_{dc_{maks}}^2}{P_{dc_{maks}}} \quad [5.3]$$

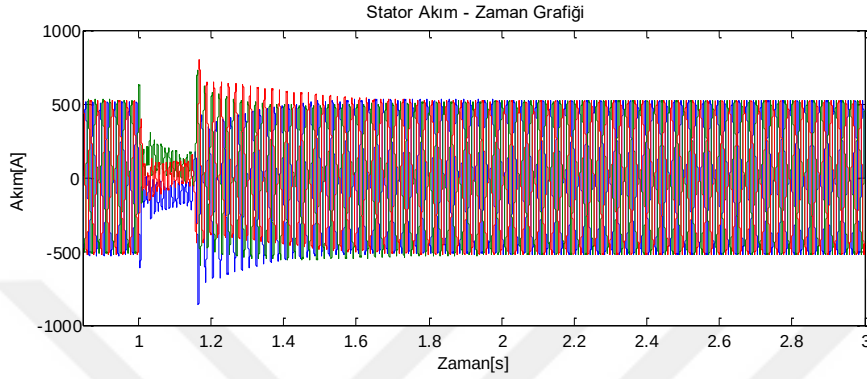
5.2 %25 Gerilim Düşmesi Durumunda Sistemin Dinamik Davranışının Analizi

Bu analizde, gerilim düşümü 1-1.1sn aralığında oluşmaktadır. 1.1-1.15sn aralığında gerilim değeri tekrardan nominal seviyeye ulaşmaktadır. Hata süresi 100ms olduğu için şebeke ile bağlantı devam etmektedir. Bu gerilim düşümünde, arıza süresi boyunca şebeke ve generatör tarafı dönüştürücülerin kontrol sisteminde mevcut kontrolör katsayıları kullanılmıştır. 1.15sn'den sonra nominal güç referansı tekrardan uygulanır ve sistem normal işletme altında çalışmaya devam eder. Bu koşullara bağlı olarak rüzgar hızı 14m/s ve şebekeye doğru nominal güç akışı esnasında, şebeke geriliminin %25 düşmesi durumunda, MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen model üzerinde yapılan simülasyon çalışmaları aşağıda verilmiştir. %25 gerilim düşümünde, ÇBAG'ün stator gerilim sonucu Şekil 5.5'de verilmiştir.

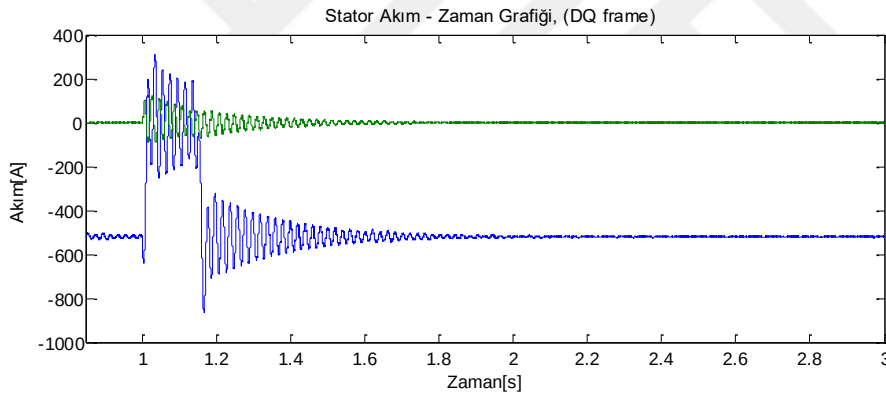


Şekil 5.5: ÇBAG'ün stator gerilimi (%25 gerilim düşmesi)

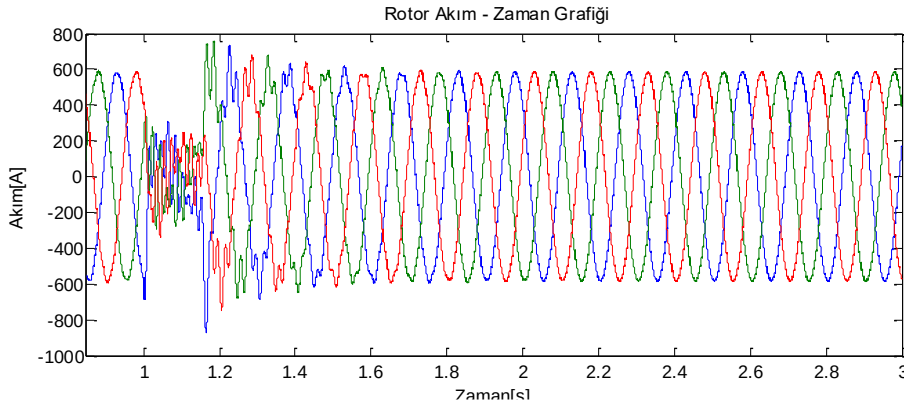
ÇBAG'lı rüzgar türbini, 500kW yük altında %25 gerilim düşmesi sonucunda generatör üzerinde zorlanmalar meydana gelir. Stator akım değeri 800 A değerlerine ulaştığı Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Arıza süresince (1-1.1 s) stator akım değerinde salınımlar ÇBAG'ü negatif anlamda zorlamaktadır. Bu salınımları Şekil 5.7'de stator akım (DQ) sonucunda görülmektedir. %25 gerilim düşmesinde ÇBAG'ün rotor akım değişimi Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.6: ÇBAG'ün stator akımı (%25 gerilim düşmesi)

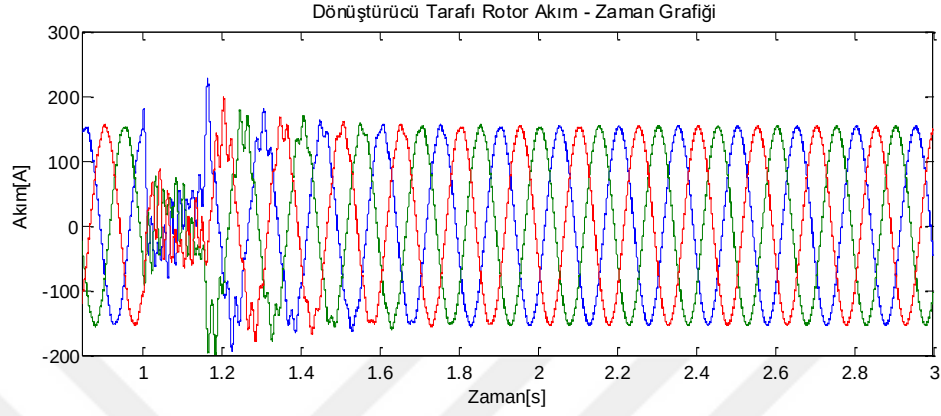


Şekil 5.7: ÇBAG'ün stator akımı (DQ, %25 gerilim düşmesi)

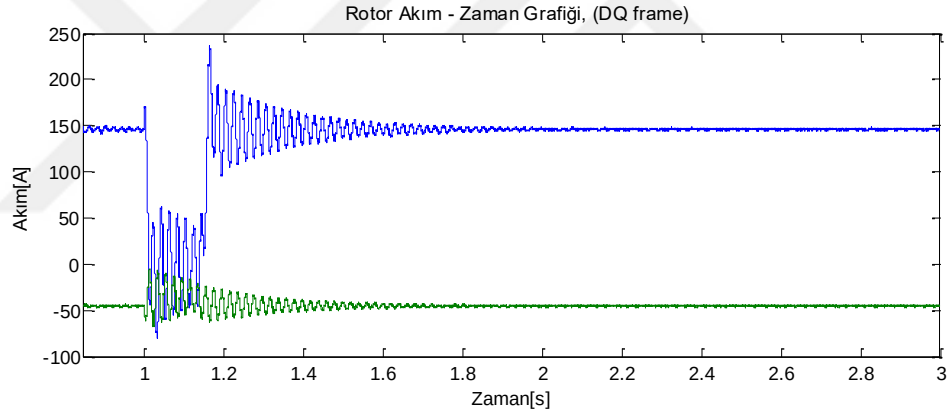


Şekil 5.8: ÇBAG'ün rotor akımı (%25 gerilim düşmesi)

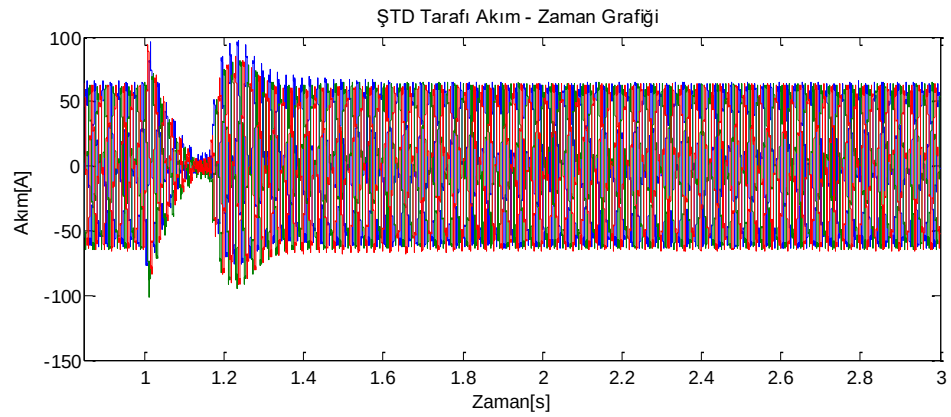
GTD terminalleri üzerinde akan akım Şekil 5.9’da verilmiştir. Rotor akımlarında (DQ) arıza süresince $\pm 50 A$ salınım olduğu Şekil 5.10’da görülmektedir. Bunun yanında arıza ortadan kalktıktan sonra 1.6 s’de tekrardan referans değerini takip ettiği görülmüştür. ŞTD terminalleri üzerinden akan akım sonucu Şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5.9: GTD terminal akımı (%25 gerilim düşmesi)

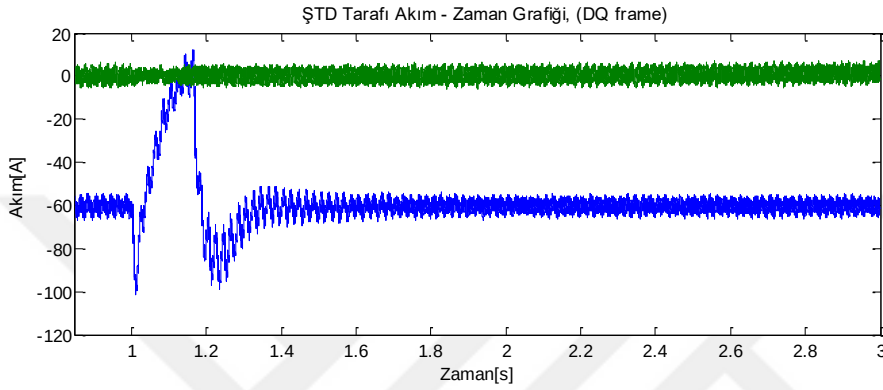


Şekil 5.10: ÇBAG’ün rotor akımı (DQ, %25 gerilim düşmesi)

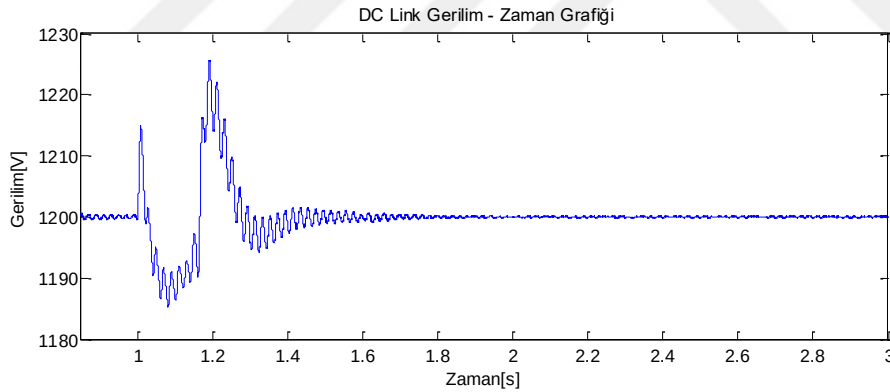


Şekil 5.11: ŞTD terminal akımı (%25 gerilim düşmesi)

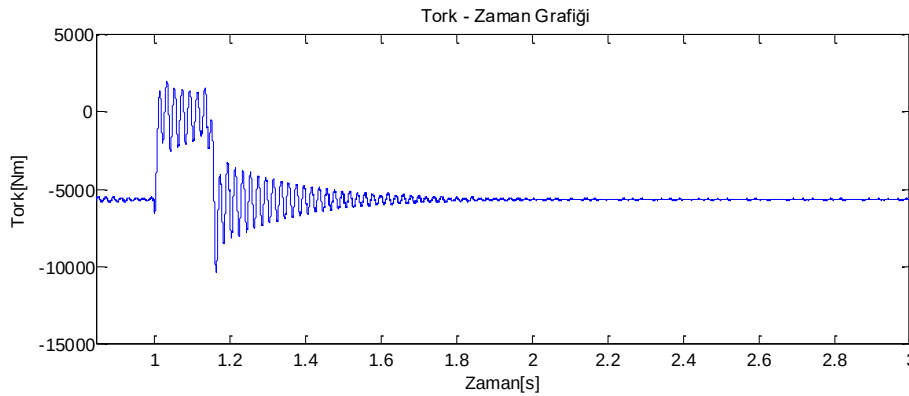
Rüzgar türbinlerinde gerilim düşmesi durumunda ÇBAG'ın stator ve rotor akımları etkilenmesi, rüzgar türbini sistemi üzerindeki diğer parametrelerin etkilemesine neden olur. Rotor akımlarındaki artış, DC-link gerilimine etkiler. Arıza süresince DC-link gerilim değişimi Şekil 5.13'de görülmektedir. Şekil 5.12'de ŞTD terminalleri üzerinde akan akım sonucu verilmiştir. ÇBAG'ın tork değeri, arıza süresince oluşturacağı salınımlar rüzgar türbini şaftında zorlanmalara neden olur. Bu salınımlar minimum seviyede tutulması gerekmektedir. Bu tork salınımları Şekil 5.14'de görülmektedir.



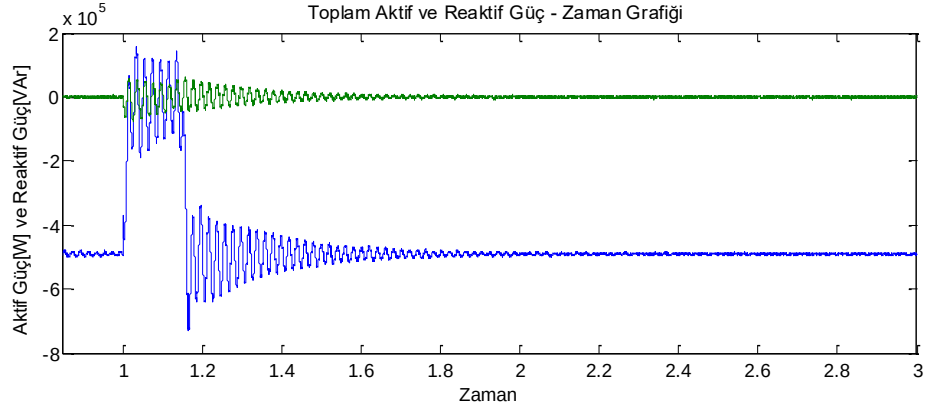
Şekil 5.12: ŞTD terminal akımı (DQ, %25 gerilim düşmesi)



Şekil 5.13: DC link gerilimi (%25 gerilim düşmesi)



Şekil 5.14: ÇBAG'ın tork değeri (%25 gerilim düşmesi)



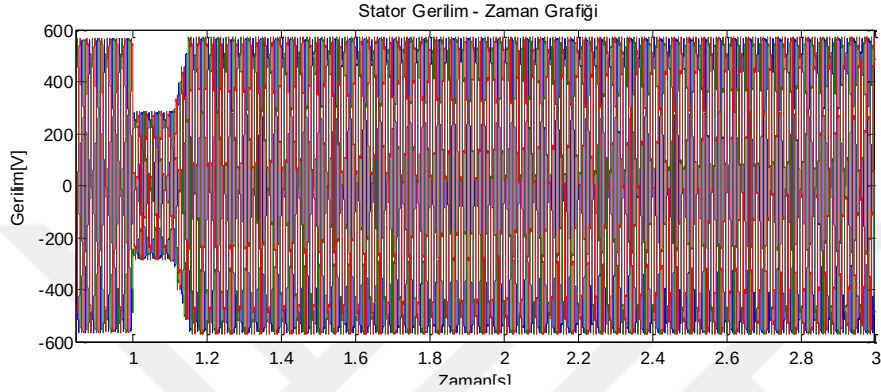
Şekil 5.15: Şebeke tarafı aktif ve reaktif güç (%25 gerilim düşmesi)

%25 gerilim düşmesi sonucunda şebeke tarafındaki aktif ve reaktif güç sonucu Şekil 5.15’de verilmiştir. Rüzgar türbin – generatör sisteminde şebeke gerilimi 0.9-1.1pu arasında olduğu zamanlarda nominal güç akışı sağlanır. Eğer şebeke de %25 gerilim düşümü olması durumunda, stator ve rotor akımlarında ani artışlar (yaklaşık olarak 1.5 katı) meydana gelir. Rotor akımlarındaki bu ani artışlar DC-link geriliminin yükselmesine neden olur. Arıza süresi boyunca DC-link gerilim değişimi (1185-1225V) arasındadır. Arıza süresi boyunca generatörün tork değerinde salınımlar oluşmaktadır. Bu salınımlar rüzgar türbin generatör sisteminde shaftın zorlanmasına neden olmaktadır. Arızanın ortadan kalkmasından sonra rüzgar türbin – generatör sistemi tekrardan nominal güç üretimine devam eder.

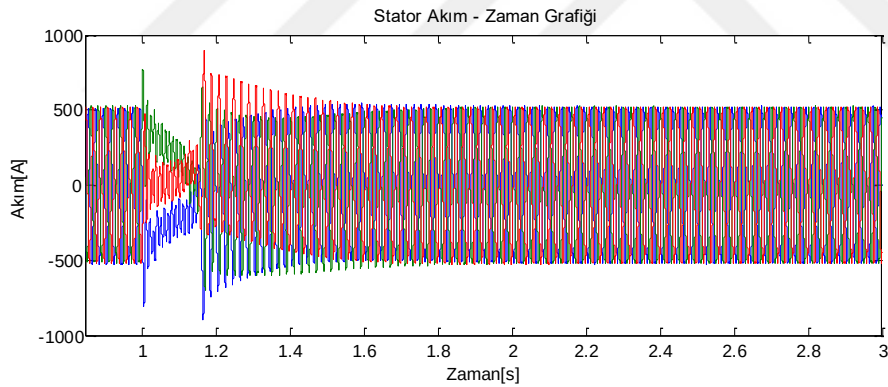
5.3 %50 Gerilim Düşmesi Durumunda Sistemin Dinamik Davranışının Analizi

Bu analizde, gerilim düşümü 1-1.1sn aralığında oluşmaktadır. 1.1-1.15sn aralığında gerilim değeri tekrardan nominal seviyeye ulaşmaktadır. Hata süresi 100ms olduğu için şebeke ile bağlantı devam etmektedir. Bu gerilim düşümünde, ilk olarak arıza süresi boyunca şebeke ve generatör tarafı dönüştürücülerin kontrol sisteminde akım kontrolör katsayıları aynen kalır. İkinci simülasyon çalışmasında dönüştürücü kontrol sistemlerindeki akım kontrolör katsayıları güncellenir (Yöntem 1). 1.15sn’den sonra nominal güç referansı tekrardan uygulanır ve sistem normal işletme altında çalışmaya devam eder. Bu koşullara bağlı olarak rüzgar hızı 14m/s ve şebekeye doğru nominal güç akışı esnasında, şebeke geriliminin %50 düşmesi durumunda, MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen model üzerinde yapılan simülasyon çalışmaları aşağıda verilmiştir.

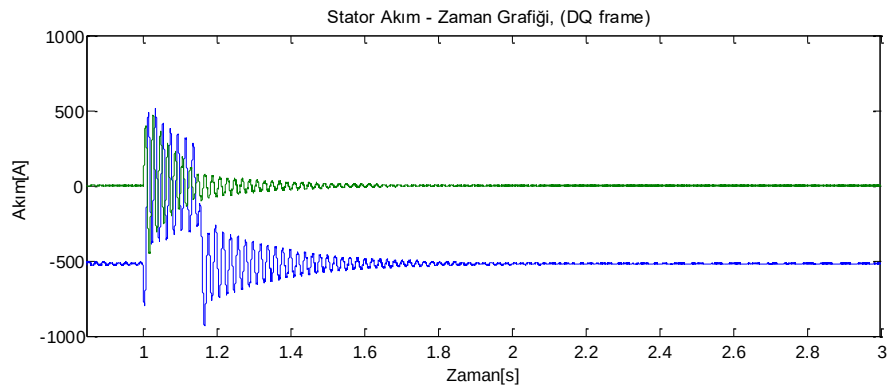
- Mevcut akım kontrolör katsayılarının simülasyon süresi boyunca uygulanması: Arıza süresince normal işletme altında hesaplanan kontrolörler kullanılarak analizler yapılmıştır. ÇBAG'ün stator gerilim sonucu Şekil 5.16'da verilmiştir. Şebeke gerilimi %50 düşmesi sonucunda stator akım değeri 900A seviyelerine yükselmiştir. Şekil 5.17'de ve Şekil 5.18'de ÇBAG'ün stator akım ve stator akım (DQ) sonuçları görülmektedir. Arıza ortadan kalktıktan sonra tekrardan 1.7 s'de referans değeri takip ettiği görülmüştür.



Şekil 5.16: ÇBAG'nün stator gerilimi (%50 gerilim düşmesi)

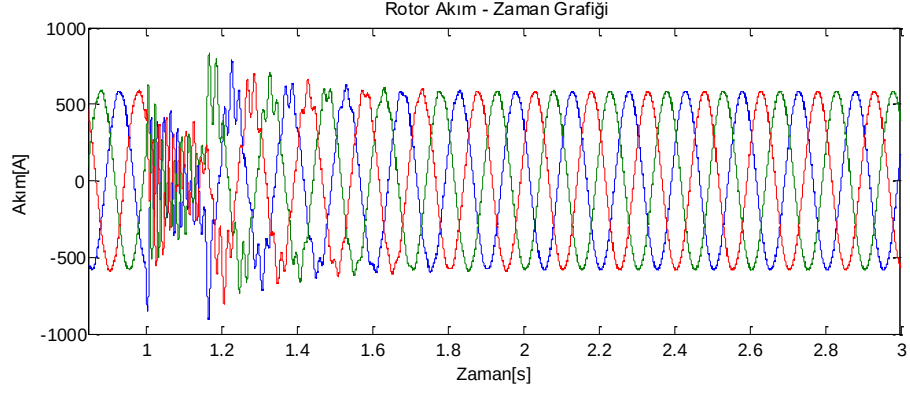


Şekil 5.17: ÇBAG'ün stator akımı (%50 gerilim düşmesi)

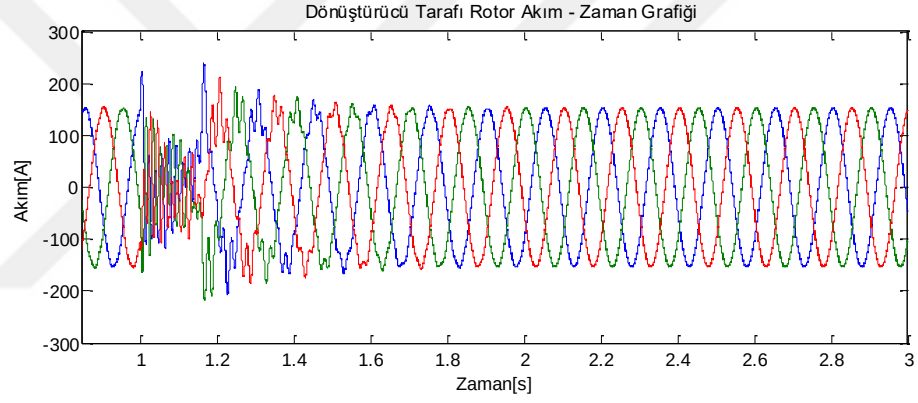


Şekil 5.18: ÇBAG'ün stator akımı (DQ, %50 gerilim düşmesi)

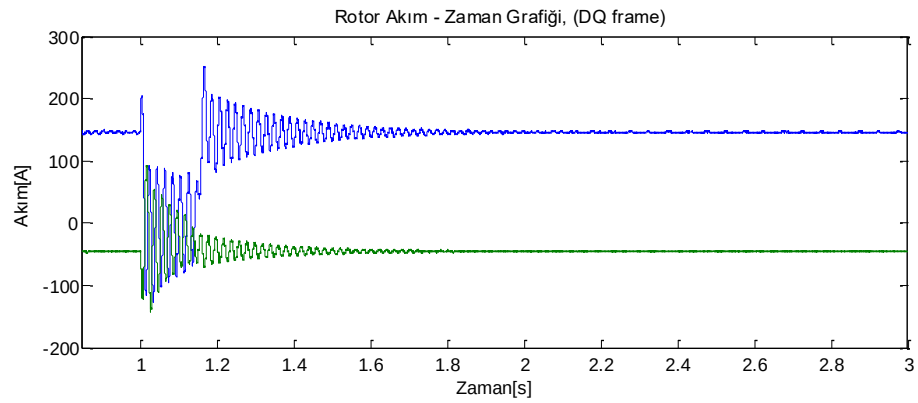
Şebeke gerilimi %50 düşmesi sonucunda ÇBAG'ın rotor akım, GTD terminalleri üzerinden akan akım ve rotor akım (DQ) sonuçları sırasıyla Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de verilmiştir.



Şekil 5.19: ÇBAG'ın rotor akımı (%50 gerilim düşmesi)

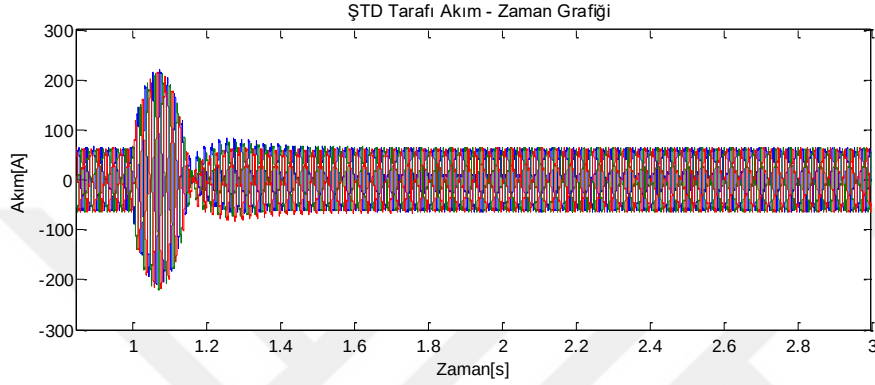


Şekil 5.20: GTD terminal akımı (%50 gerilim düşmesi)

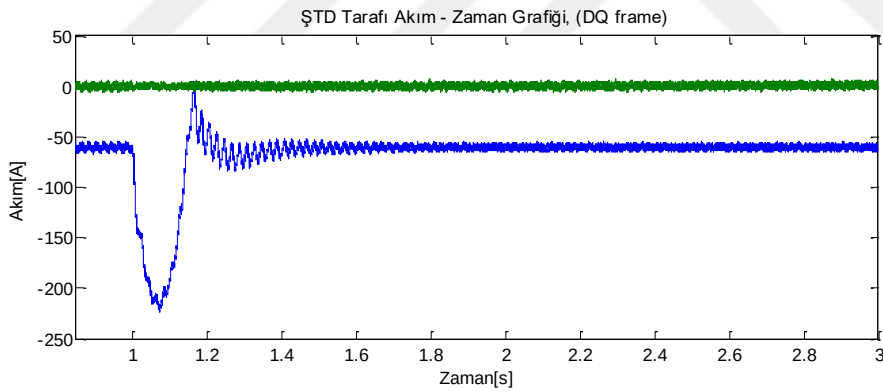


Şekil 5.21: ÇBAG'ın rotor akımı (DQ, %50 gerilim düşmesi)

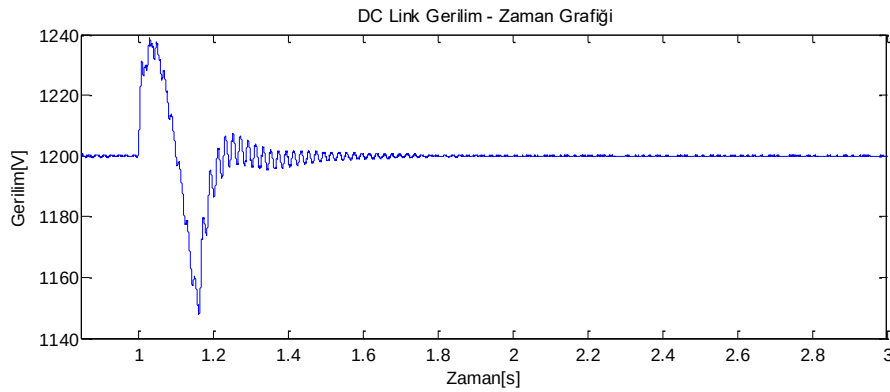
Şebeke gerilim düşümü olması durumunda rotor akımları DC-link gerilim değerini yükseltmesinden dolayı, ŞTD terminalleri üzerinden akan akım değerinde yükselmeler meydana gelir. ŞTD terminalleri üzerinden akan akım arıza anında 200 A değerlerine ulaştığı Şekil 5.22’de görülmektedir. ŞTD terminalleri üzerinden akan akımın (DQ) sonucu Şekil 5.23’de verilmiştir. 1-1.1 s aralığında DC-link gerilimlerdeki artış ise, yaklaşık olarak 40 V seviyelerindedir. 1.5 s’de tekrardan 1200V seviyesine ulaşmaktadır. DC-link gerilim sonucu Şekil 5.24’te verilmiştir.



Şekil 5.22: ŞTD terminal akımı (%50 gerilim düşmesi)

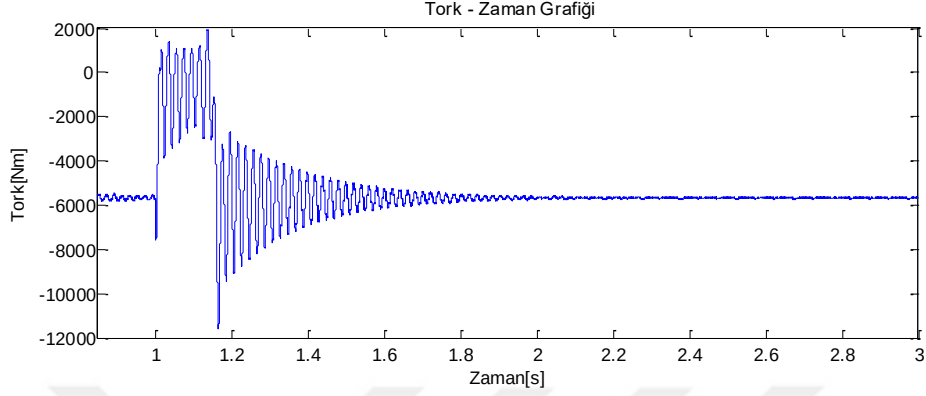


Şekil 5.23: ŞTD terminal akımı (DQ, %50 gerilim düşmesi)

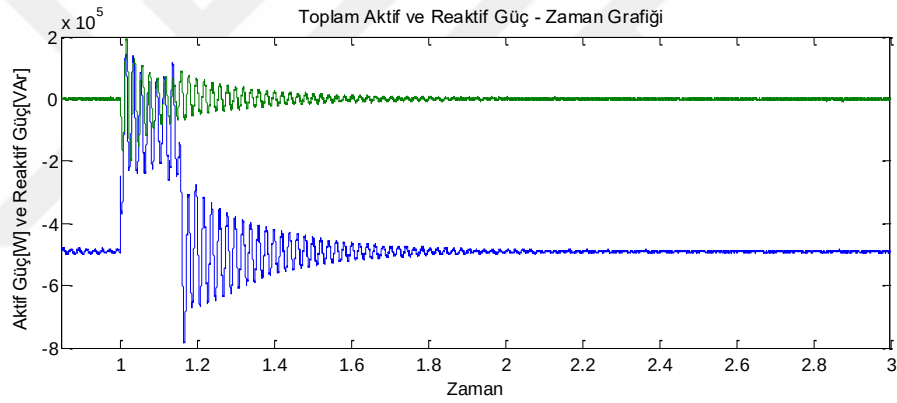


Şekil 5.24: DC link gerilimi (%50 gerilim düşmesi)

Şebeke gerilim düşümünün artmasıyla birlikte arıza süresince ÇBAG'ün tork değerindeki salınımlarda artış olduğu görülmektedir. Bu salınımlar yaklaşık olarak 2000 Nm seviyesindedir. ÇBAG'ün tork ve şebeke tarafındaki aktif ve reaktif güç sonuçları sırasıyla Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da verilmiştir.

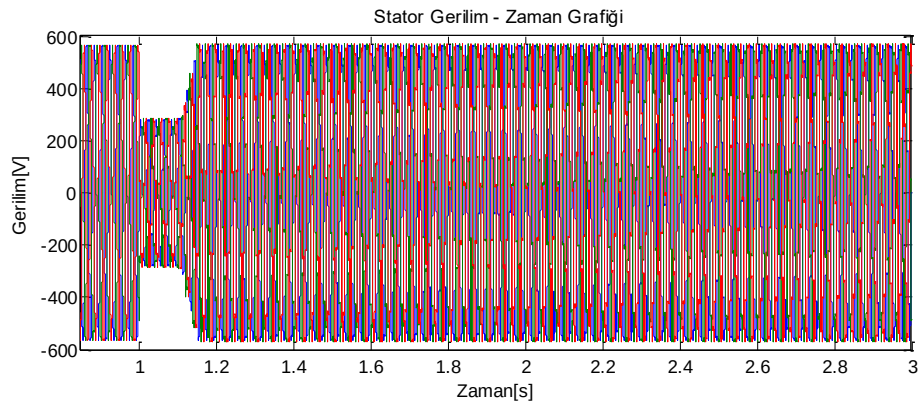


Şekil 5.25: ÇBAG'ün tork değeri (%50 gerilim düşmesi)



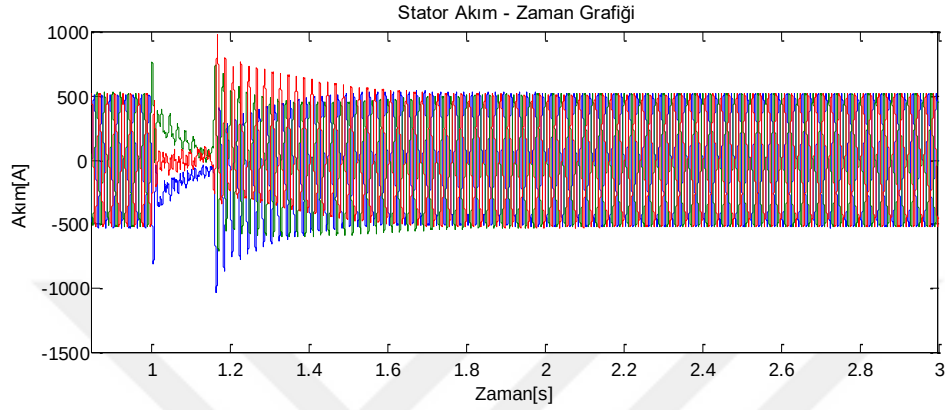
Şekil 5.26: Şebeke tarafı aktif ve reaktif güç (%50 gerilim düşmesi)

- Güncellenen akım kontrolör katsayılarının arıza süresi boyunca uygulanması: Bu analizde, arıza süresince hesaplanan kontrolörler 1-1.15s aralığında kullanılmıştır.

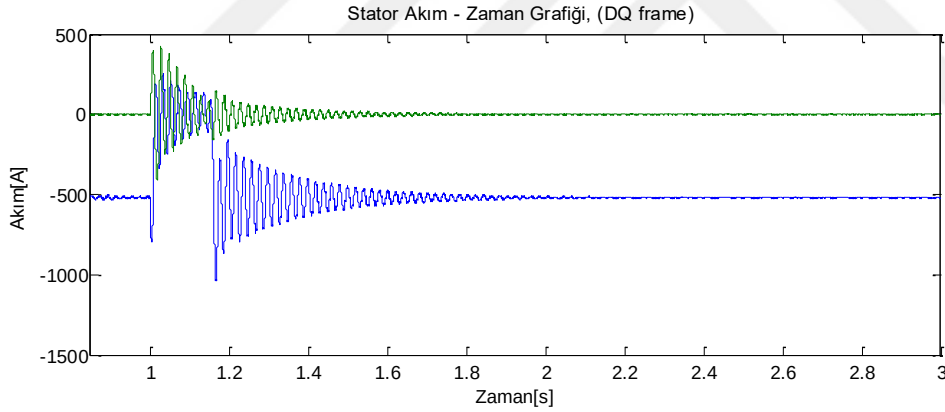


Şekil 5.27: ÇBAG'nün stator gerilimi (%50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)

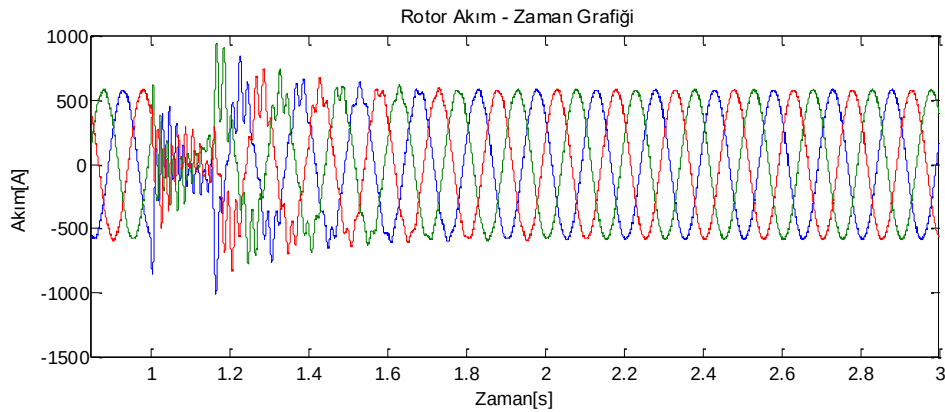
Şebeke gerilimi %50 düştüğü zaman stator akım değeri 1000A seviyelerine ulaştığı Şekil 5.28’de görülmektedir. Arıza ortadan kalktıktan sonra tekrardan nominal değerine (512 A) ulaşması 1.7 s’de gerçekleşmektedir. Stator akım (DQ) sonucu da Şekil 5.29’da verilmiştir. Arıza süresince ÇBAG’ün rotor akımları 1.5 s’de tekrardan nominal değerine ulaştığı ve yaklaşık olarak nominal değerinin 2 katı değerinde sıçramalar yaptığı Şekil 5.30’da görülmektedir.



Şekil 5.28: ÇBAG’ün stator akımı (%50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)

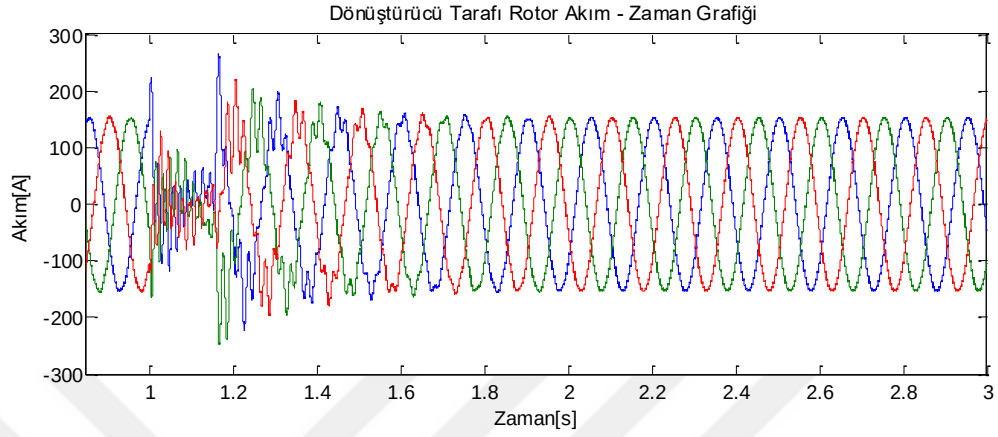


Şekil 5.29: ÇBAG’ün stator akımı (DQ, %50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)

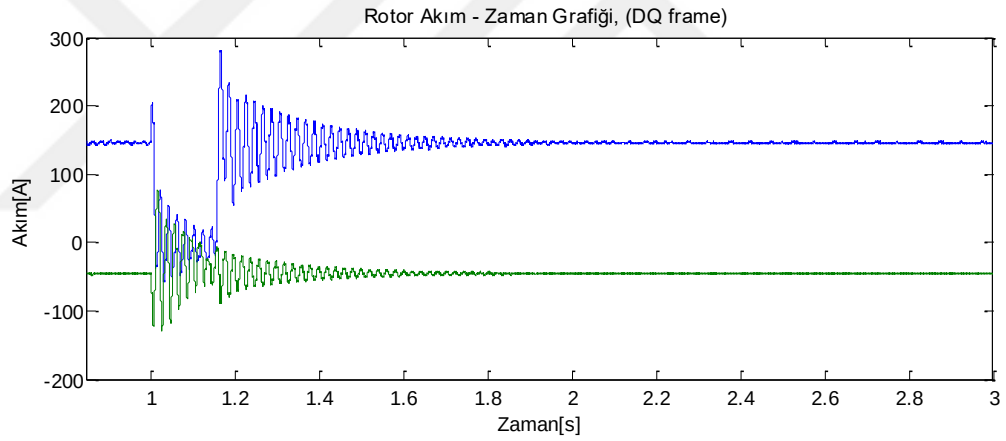


Şekil 5.30: ÇBAG’ün rotor akımı (%50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)

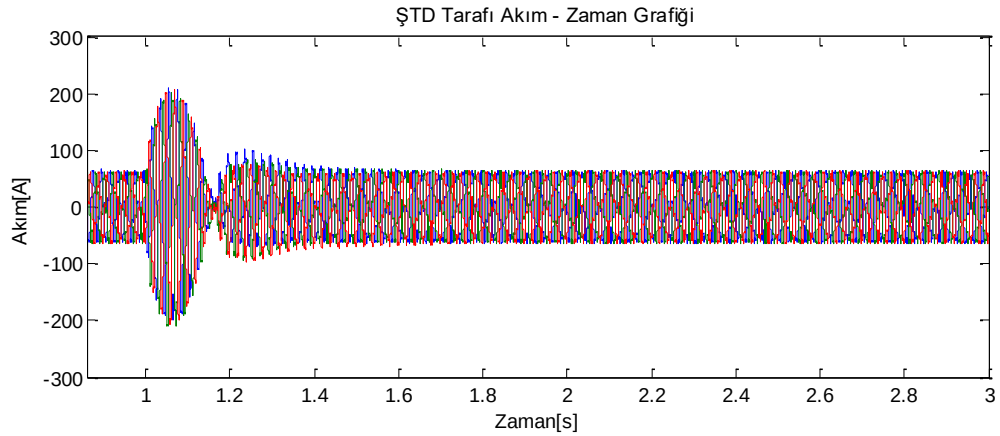
Şebeke gerilimi %50 düşmesi sonucunda ve arıza süresince güncellenen kontrolörler ile birlikte yapılan analizde, GTD terminalleri üzerinden akan akım, ÇBAG'ün rotor akım (DQ) ve ŞTD terminalleri üzerinden akan akım sonuçları sırasıyla Şekil 5.31, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'de verilmiştir.



Şekil 5.31: GTD terminal akımı (%50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)

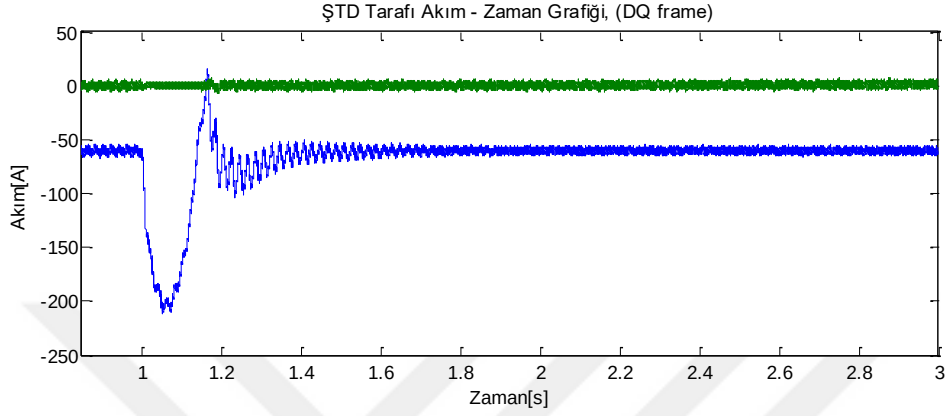


Şekil 5.32: ÇBAG'ün rotor akımı (DQ, %50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)

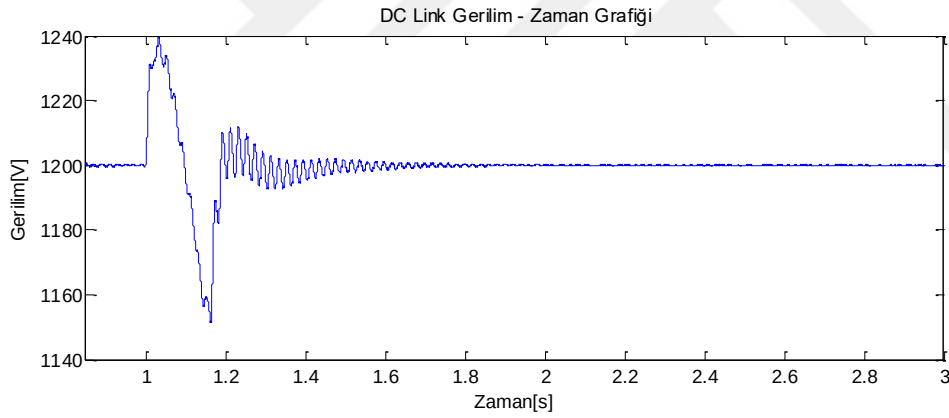


Şekil 5.33: ŞTD terminal akımı (%50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)

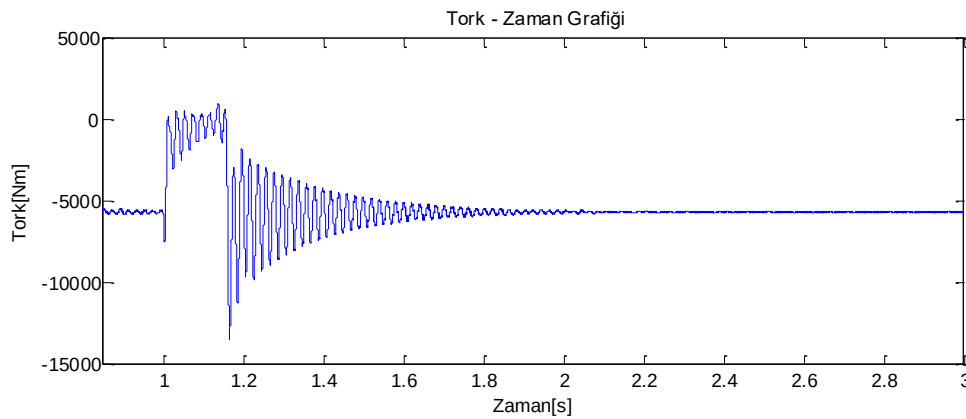
1-1.15 s aralığında tork salınımların düşürülmesi sonucunda şafttaki zorlanmaların azaldığından mekanik ömrü uzayacaktır. %50 gerilim düşmesi sonucunda, arıza süresince güncel kontrolör ile birlikte yapılan analiz sonucunda elde edilen ŞTD terminalleri üzerinden akan akım, DC-link gerilim ve ÇBAG'ün tork sonuçları sırasıyla Şekil 5.34, Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'da verilmiştir.



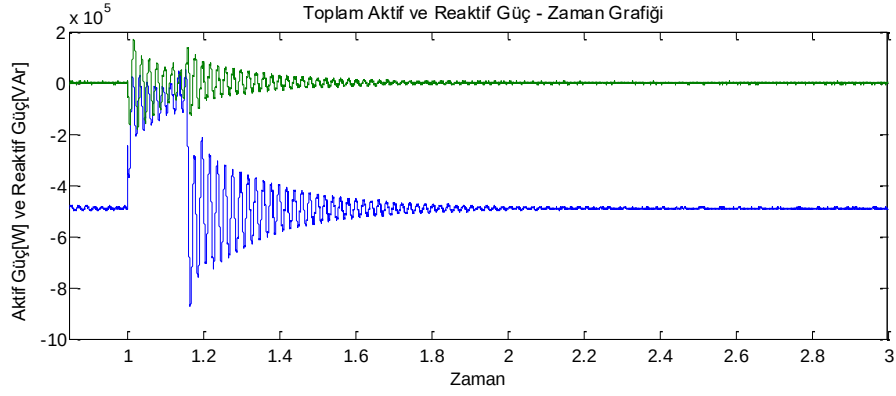
Şekil 5.34: ŞTD terminal akımı (DQ, %50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)



Şekil 5.35: DC link gerilimi (%50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)



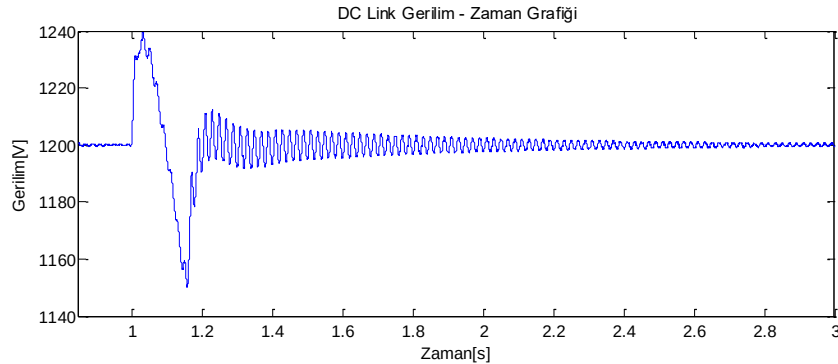
Şekil 5.36: ÇBAG'ün tork değeri (%50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)



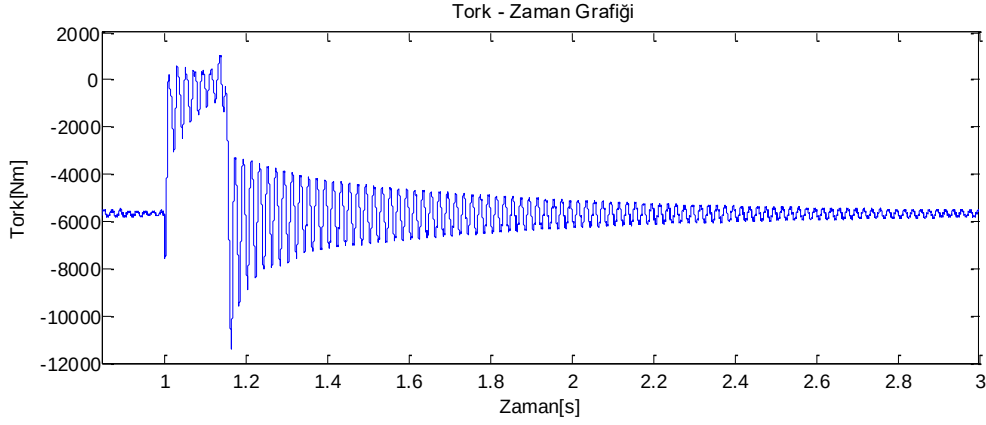
Şekil 5.37: Şebeke tarafı aktif ve reaktif güç (%50 gerilim düşmesi, Yöntem 1)

Şebeke tarafındaki aktif ve reaktif güç sonucu Şekil 5.37’de verilmiştir. Şebeke geriliminde %50 düşme olması durumunda, mevcut akım kontrolör katsayıları ile yapılan analizlerde stator ve rotor akımlarında ani artışlar (yaklaşık olarak 1.8 katı) meydana gelir. Rotor akımlarındaki bu ani artışlar DC-link geriliminin yükselmesine neden olur. DC-link gerilimi, arıza süresince 1150-1240V arasında değişmiştir. Arıza süresi boyunca generatörün tork değerinde de salınımlar oluşmaktadır. Bu salınımlar arıza süresi boyunca şaftta zorlanmalara neden olacağından dolayı mümkün olan minimum seviye indirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden arıza süresi boyunca akım kontrolör katsayılarında güncelleme yapılmıştır (Yöntem 1). Akım kontrolör katsayılarında güncelleme yapılmasından sonra yapılan analizlerde tork ve aktif güç değerindeki salınımların ciddi oranda azaldığı görülmektedir. Arızanın ortadan kalkmasından sonra da rüzgar türbin – generatör sistemi tekrardan nominal güç üretimine devam eder.

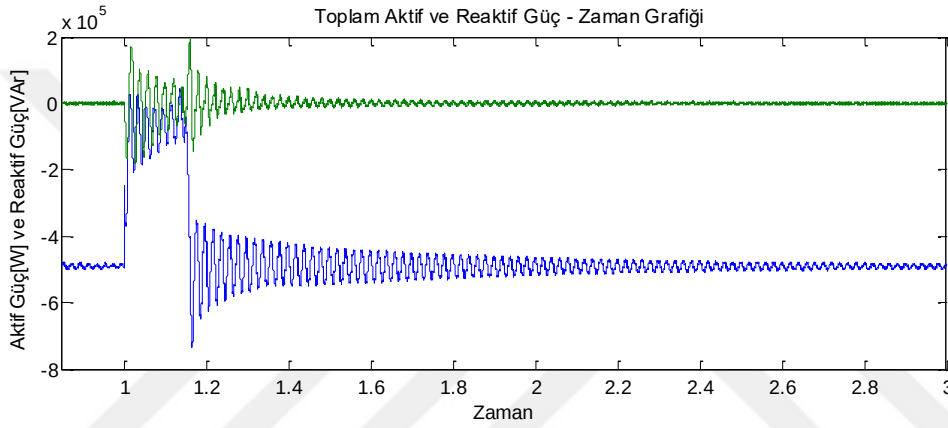
- Güncellenen akım kontrolör katsayılarının simülasyon süresi boyunca uygulanması: Bu çalışma, arıza süresince kullanılan kontrolörler tüm simülasyon boyunca uygulanarak yapılmıştır. Analiz sonucunda DC-link gerilimi Şekil 5.38’de verilmiştir.



Şekil 5.38: DC link gerilimi (%50 gerilim düşmesi, tüm zaman)



Şekil 5.39: ÇBAG'ın tork değeri (%50 gerilim düşmesi, tüm zaman)



Şekil 5.40: Şebeke tarafı aktif ve reaktif güç (%50 gerilim düşme, tüm zaman)

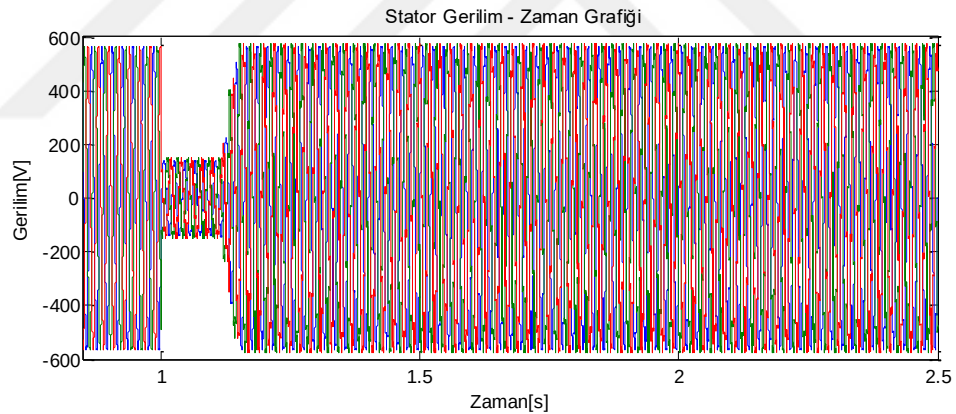
Bu analizde elde edilen ÇBAG'ın tork ve şebeke tarafındaki aktif ve reaktif güç sonuçları sırasıyla Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'da verilmiştir. Güncellenen akım kontrolünün tüm simülasyon süresi boyunca uygulanması durumunda ise, arızanın ortadan kalktıktan sonra generatörün tork değeri, DC-link gerilimi, şebeke aktarılan aktif güç değeri ve diğer makine parametrelerin yerleşme zamanı artmıştır. Hatanın ortadan kalkması 1.15sn'de olmasına rağmen, yerleşme zamanı yaklaşık olarak 2.8sn'de gerçekleşmektedir. Bu durum kabul edilebilir olmadığından dolayı sadece arıza süresi boyunca güncellenen akım kontrolör katsayılarının kullanılması en optimum sonuçları verdiği görülmüştür.

5.4 %75 Gerilim Düşmesi Durumunda Sistemin Dinamik Davranışının Analizi

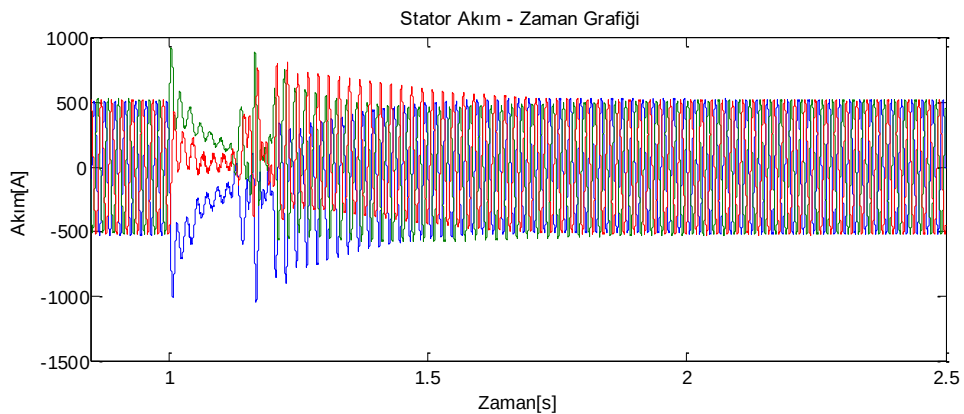
Bu analizde, gerilim düşümü 1-1.1sn aralığında oluşmaktadır. 1.1-1.15sn aralığında gerilim tekrardan nominal gerilim değerine ulaşmaktadır. Hata süresi 100ms olduğu için şebeke ile bağlantı devam etmektedir.

Bu gerilim düşümünde, arıza süresi boyunca şebeke ve generatör tarafı dönüştürücülerin kontrol sisteminde akım kontrolör katsayıları güncellenir (Yöntem 1). Bunun yanında DC-link gerilimi takip edilerek crowbar ve chopper koruma sistemleri de devreye girer (Yöntem 2 ve 3). 1.15sn'den sonra nominal güç referansı tekrardan uygulanır ve sistem normal işletme altında çalışmaya devam eder. İlk simülasyon çalışmasında, rüzgar türbin-generatör sistem modeline sadece crowbar koruma sistemi eklenmiştir. İkinci simülasyon çalışmasında ise, hem crowbar hem de chopper sistemi eklenerek analiz çalışmaları yapılmıştır. Bu koşullara bağlı olarak rüzgar hızı 14m/s ve şebekeye doğru nominal güç akışı esnasında, şebeke geriliminin %75 düşmesi durumunda, MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen model üzerinde yapılan simülasyon çalışmaları aşağıda verilmiştir.

- İlk simülasyon çalışması: Rüzgar türbinlerinde şebekede %75 gerilim düşümü olması durumunda crowbar koruma sistemi ile birlikte yapılan analiz sonuçlarıdır. Analiz kapsamında ÇBAG'ün stator gerilim ve stator akım sonuçları sırasıyla Şekil 5.41 ve Şekil 5.42'de verilmiştir.

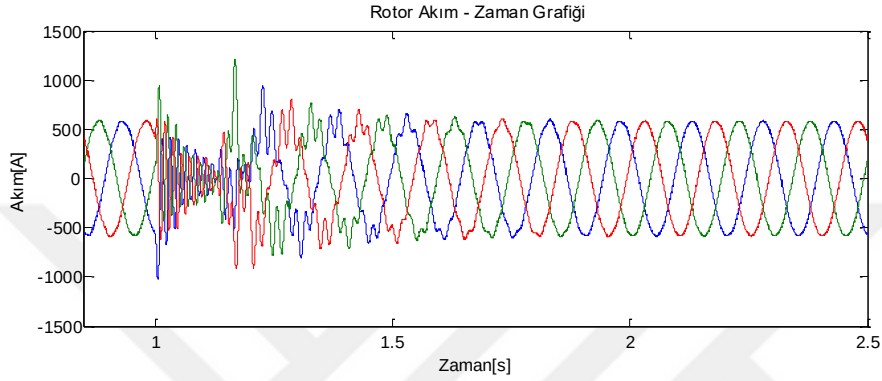


Şekil 5.41: ÇBAG'nün stator gerilimi (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2)

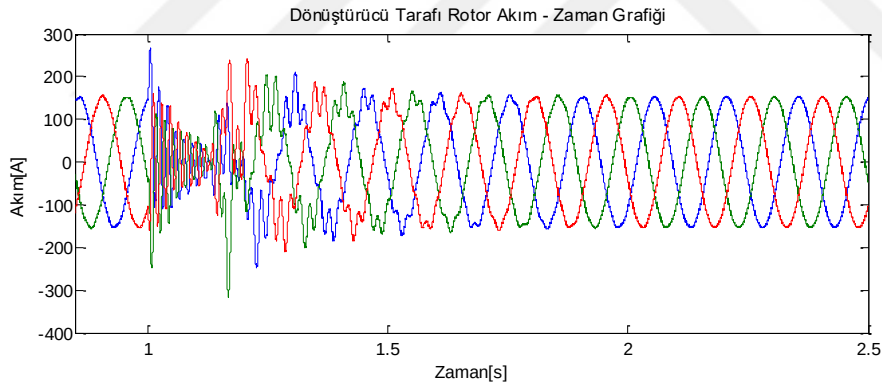


Şekil 5.42: ÇBAG'nün stator akımı (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2)

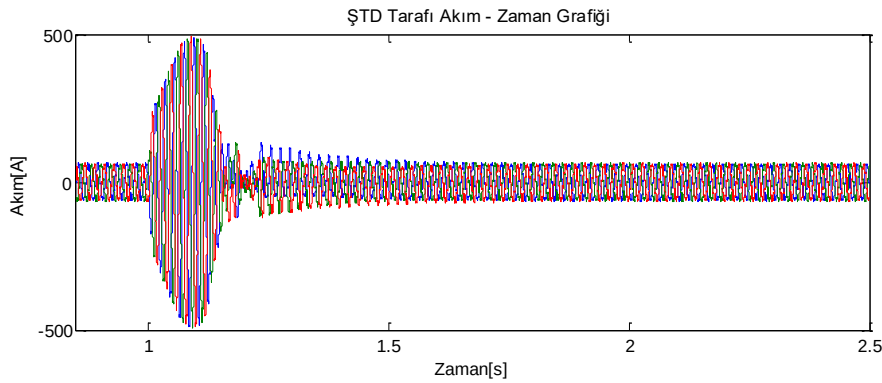
Şekil 5.42’de görüldüğü üzere, şebeke de gerilim düşümünün artmasıyla stator akım değerlerinde ani sıçramalar artmaktadır. Bu sebepten ötürü fazla enerji crowbar koruma sistemi ile yok edilmektedir. Crowbar koruma sisteminin devreye girmemesi durumunda fazla enerji sistem üzerindeki donanımlara zarar verir. Şekil 5.43’de görüldüğü gibi rotor akımlarının nominal değerinin yaklaşık 2.5 katı değerlere ani olarak sıçrar. GTD terminal üzerinden akan akım ve ŞTD terminalleri üzerinden akan akım sonuçları sırasıyla Şekil 5.44 ve Şekil 5.45’de verilmiştir.



Şekil 5.43: ÇBAG’ün rotor akımı (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2)

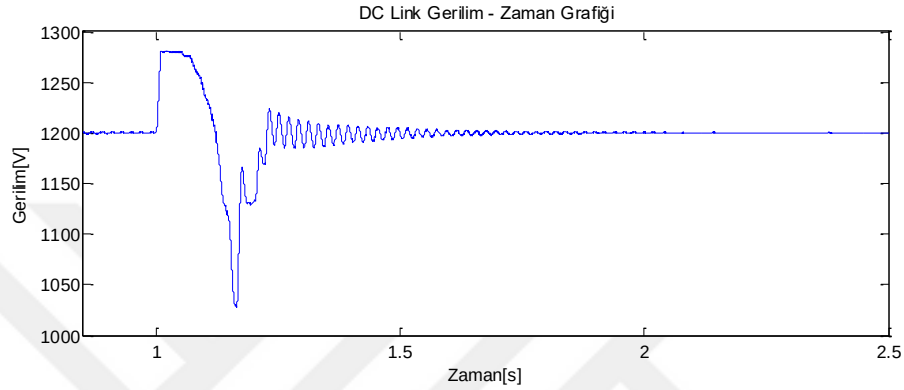


Şekil 5.44: GTD terminal akımı (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2)

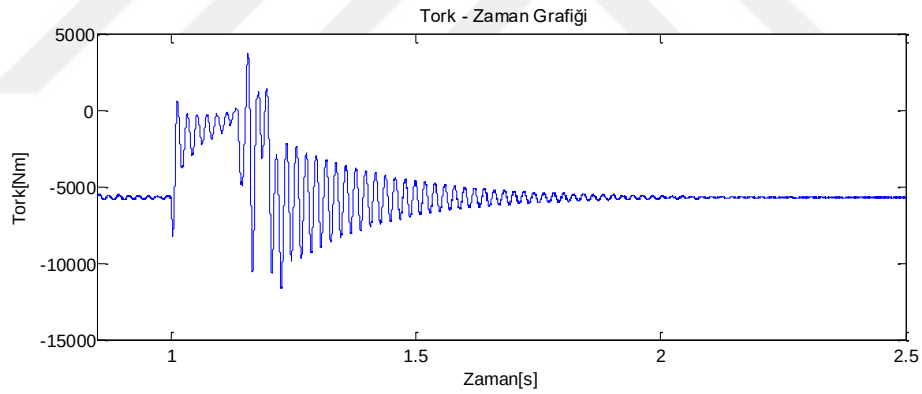


Şekil 5.45: ŞTD terminal akımı (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2)

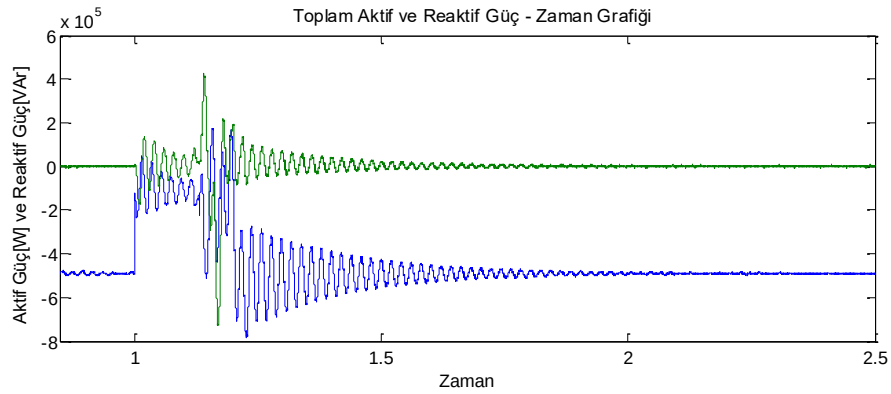
Şebeke gerilimi %75 düşmesi durumunda, arıza ortadan kalktıktan sonra tekrardan ÇBAG'ün tork değeri nominal değer ulaşana kadar yaklaşık olarak nominal değerinin 2.5 katı değerlere sıçrar ve 1.7 s'de ise nominal değerini takip ettiği Şekil 5.47'de görülmektedir. DC-link gerilimi ise, arıza süresince nominal değerinin 1.1 katına kadar çıkar ve arıza ortadan kalktıktan sonra (1.15 s) 1.5s 'de ise nominal değerini tekrardan takip ettiği Şekil 5.46'da gözlemlenmiştir. Şebeke tarafındaki aktif ve reaktif güç sonucu ise Şekil 5.48'de verilmiştir.



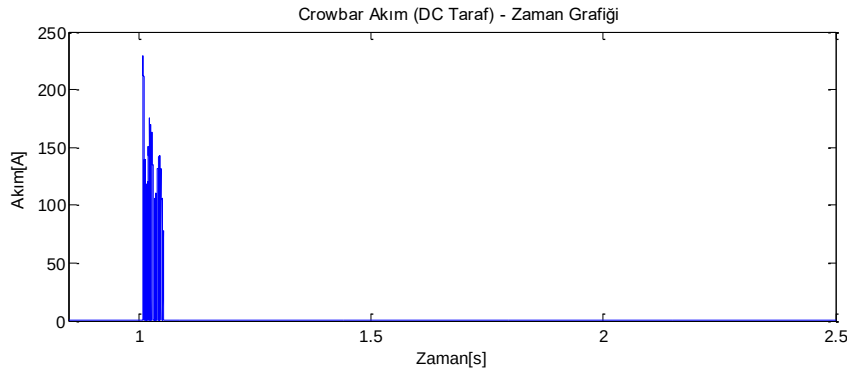
Şekil 5.46: DC link gerilimi (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2)



Şekil 5.47: ÇBAG'ün tork değeri (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2)



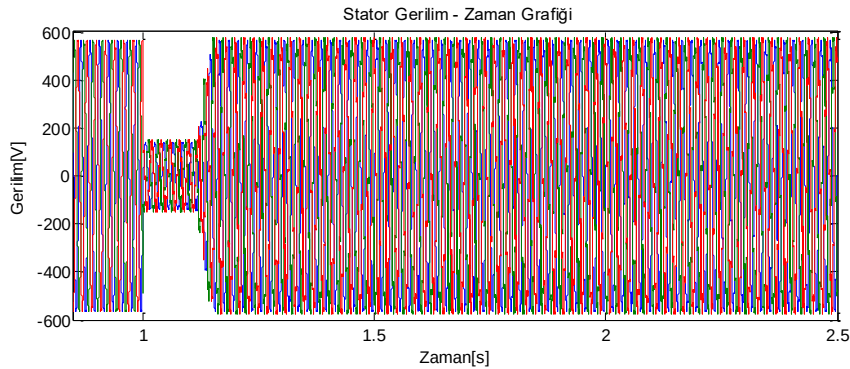
Şekil 5.48: Şebeke tarafı aktif ve reaktif güç (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2)



Şekil 5.49: Crowbar direnci üzerindeki akım (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 2)

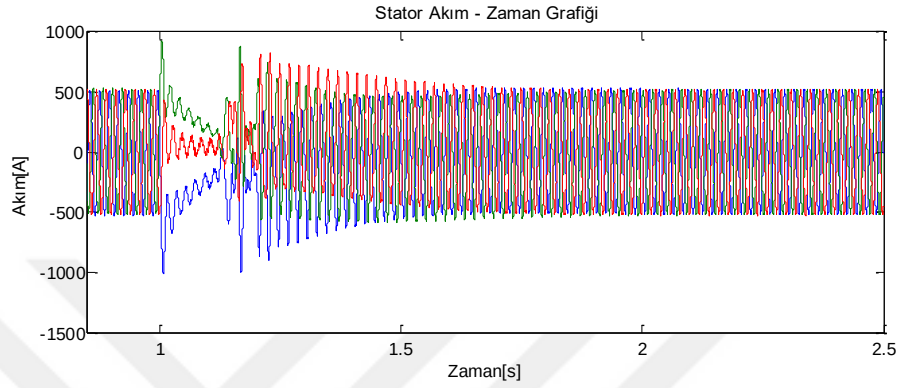
Bu analizde crowbar direnci üzerinden akan akım değeri Şekil 5.49’da verilmiştir. Şebeke geriliminde %75 düşme olduğu zaman, stator ve rotor akımları ani artışlar olur. Bu ani artışlar yaklaşık olarak nominal değerinin 2 katı kadardır. Rotor akımlarındaki bu artış, DC link geriliminin yükselmesine neden olur. DC link gerilimi 1280V seviyesine ulaşmasından sonra crowbar koruma sistemi devreye girer ve fazla enerji crowbar direnci ($R_{crow} = 25R_r = 5.415$) üzerinde yok edilir. Böylece DC-link geriliminin daha fazla yükselmesine izin verilmez. Crowbar koruma sistemi devreye girdikten sonra stator ve rotor akımlarının düştüğü görülmüştür. Arıza süresince şebeke tarafı dönüştürücü terminalleri üzerinde akımda yükselme olur. Ancak arıza ortadan kalktıktan sonra tekrardan nominal seviyeye ulaşmaktadır. Arıza ortadan kalktıktan sonra, crowbar koruma sistemi devreden çıkar. 1.15s’de tekrardan şebeke gerilimi nominal seviyeye ulaştıktan sonra generatör tarafı dönüştürücü sistemi devreye girer ve rüzgar türbini normal işletme altında nominal güç akışını şebekeye doğru sağlamaya devam eder.

- İkinci simülasyon çalışması: Hem crowbar koruma hem de chopper koruma sistemi ile birlikte yapılan analiz sonuçlarıdır.

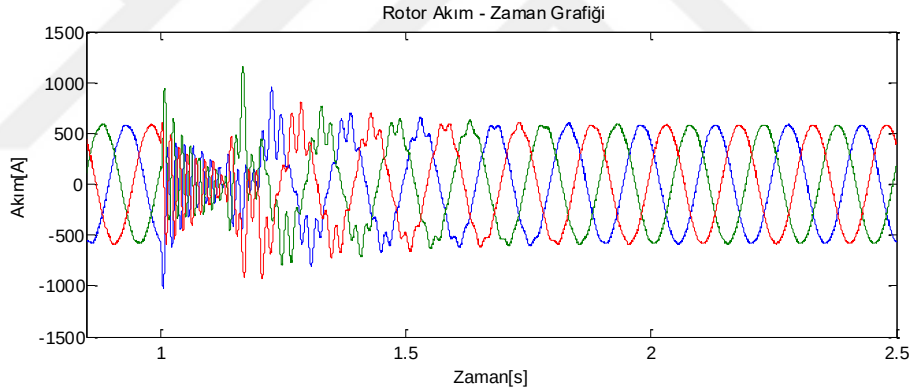


Şekil 5.50: ÇBAG’nün stator gerilimi (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3)

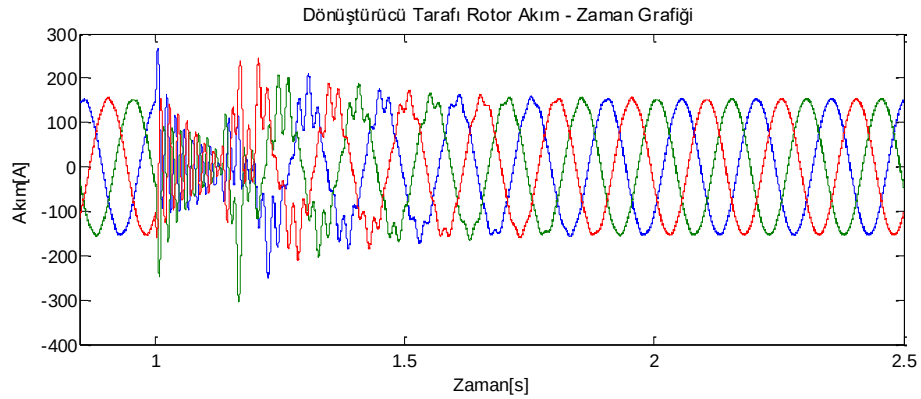
Arıza süresince, stator ve rotor akımları nominal değerinin yaklaşık olarak 2 katına ani olarak yükselir. Bu yükselmeler geliştirilen koruma sistemleri ile azaltılır. Şebeke geriliminin %75 düşmesi durumunda, crowbar ve chopper koruma sistemleri ile birlikte yapılan analiz sonucunda elde edilen ÇBAG'ün stator gerilimi, stator akımı, rotor akımı ve GTD terminalleri üzerinden akan akım sonuçları sırasıyla Şekil 5.50, Şekil 5.51, Şekil 5.52 ve Şekil 5.53'de verilmiştir.



Şekil 5.51: ÇBAG'ün stator akımı (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3)

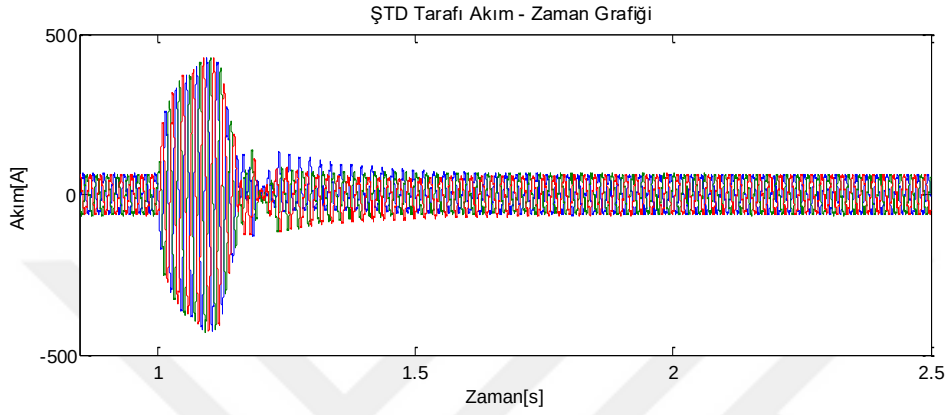


Şekil 5.52: ÇBAG'ün rotor akımı (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3)

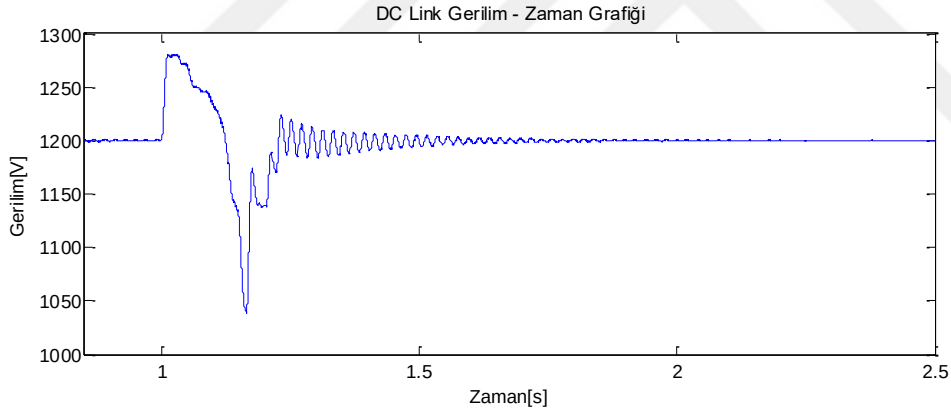


Şekil 5.53: GTD terminal akımı (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3)

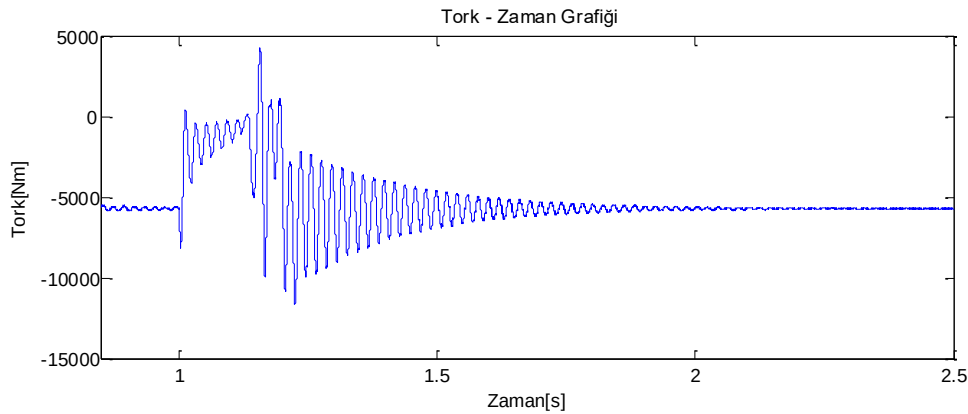
ŞTD terminalleri üzerinden akan akım arıza anında 475A civarına yükselir. Bu yükselme, rotor akımlarının DC-link gerilimi üzerindeki etkisi sonucu ortaya çıkar. ŞTD terminalleri üzerindeki değişimi Şekil 5.54’de incelenmiştir. Şebeke geriliminin 1 s’de düştüğü anda arıza algılanır. DC-link değişimi takip edilir. DC-link değişimi Şekil 5.55 verilmiştir. Arıza boyunca tork değerindeki salınım gittikçe azalan bir değişim sergiler. ÇBAG’ün tork salınımları Şekil 5.56’de incelenebilir.



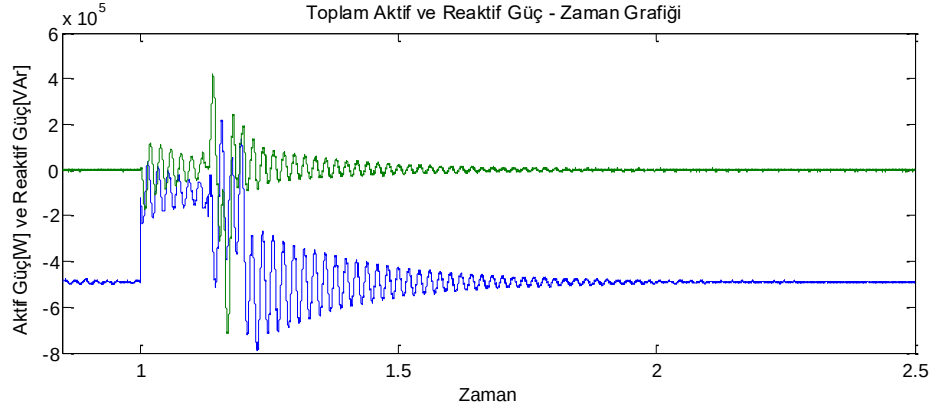
Şekil 5.54: ŞTD terminal akımı (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3)



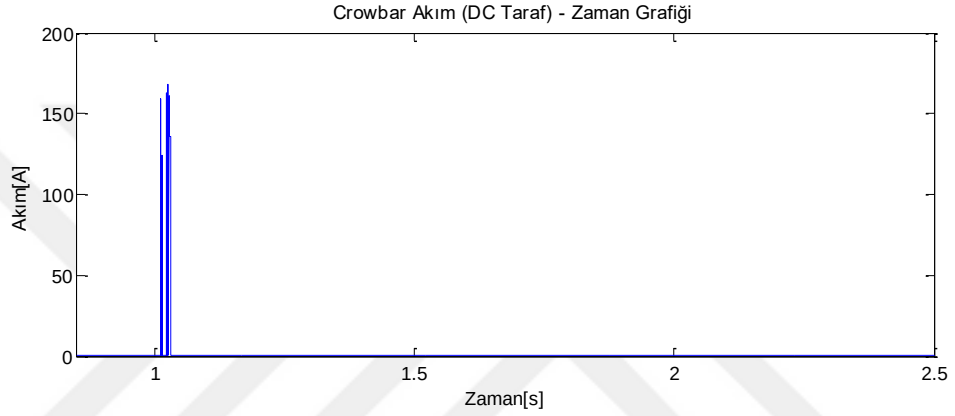
Şekil 5.55: DC link gerilimi (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3)



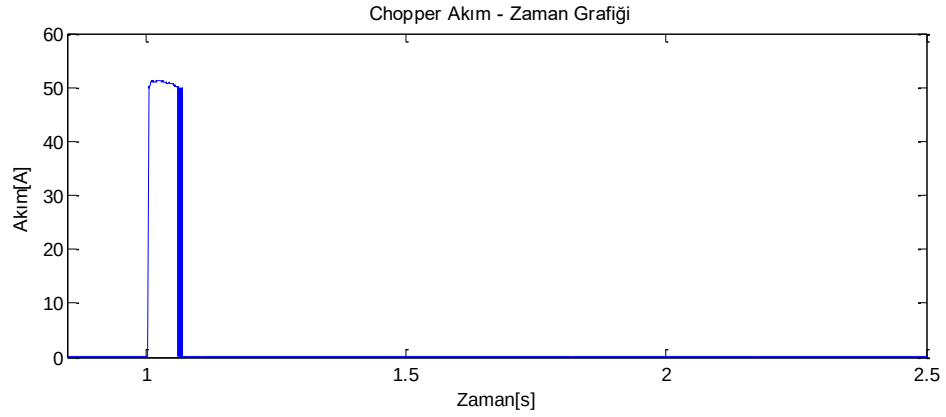
Şekil 5.56: ÇBAG’ün tork değeri (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3)



Şekil 5.57: Şebeke tarafı aktif ve reaktif güç (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3)



Şekil 5.58: Crowbar direnci üzerindeki akım (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3)



Şekil 5.59: Chopper direnci üzerindeki akım (%75 gerilim düşmesi, Yöntem 3)

Şebeke tarafı aktif ve reaktif güç, crowbar ve chopper koruma dirençleri üzerinden akan akım sonuçları sırasıyla Şekil 5.57, Şekil 5.58 ve Şekil 5.59’da verilmiştir. Bu analizde şebeke geriliminin %75 düştüğü anda, stator ve rotor akımları ani artışlar olur. Bu ani artışlar yaklaşık olarak nominal değerinin 2 katı kadardır. Rotor akımlarındaki bu artış, DC link geriliminin yükselmesine neden olur.

DC-link gerilimi 1250V seviyesine ulaşmasından sonra chopper koruma sistemi ($R_{chop} = 25 \text{ ohm}$) devreye giriyor. Ancak arızanın ortadan kalkması için chopper koruma sisteminin yeterli gelmediği görülür. Çünkü DC-link geriliminde yükselme devam eder. DC link gerilimi 1280V seviyesine ulaşmasından sonra da crowbar koruma sistemi devreye girer ve fazla enerji crowbar direnci ($R_{crow} = 25R_r = 5.415 \text{ ohm}$) üzerinde yok edilir. Crowbar koruma sistemi devreye girdikten sonra stator ve rotor akımları düşmeye başlar. Arıza süresince şebeke tarafı dönüştürücü terminalleri üzerindeki akım değerinde yükselme olur. Ancak sadece crowbar koruma sistemi devreye girdiğinde bu yükselme daha fazla olmaktaydı. Aynı zamanda hem chopper hem crowbar koruma sistemi devreye girdiğinde DC-link gerilim grafiğinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Fazla enerji yok edildikten sonra, sırasıyla crowbar ve chopper koruma sistemi devreden çıkar. 1.15s’de tekrardan şebeke gerilimi nominal seviyeye ulaşmasıyla generatör tarafı dönüştürücü sistemi devreye girer ve nominal güç referansı uygulanır. Bu süreden sonra rüzgar türbini normal işletme altında nominal güç akışı ile çalışmaya devam eder.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbinlerinde normal işletme ve dengesiz şebeke koşullarındaki işletme koşullarını belirlenmesi için tez kapsamında, rüzgar türbin-generatör sistemin modellenmesi ve kontrolü ele alınmıştır. Normal işletme kapsamında geliştirilen sistem modeli ve kontrol stratejileri MATLAB/Simulink ortamında kurulmuştur. Geliştirilen rüzgar türbin-generatör sistem modeli ve kontrol stratejilerinin performans değerlendirilmesini yapmak için birtakım analiz çalışmaları yapılmıştır. İlk etapta, çift beslemeli asenkron generatör senkron altı, senkron üstü ve hem senkron altı hem de senkron üstü çalışması koşullarına göre simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Böylece düşük ve yüksek rüzgar hızlarında çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbinlerinin dinamik davranışı incelenmiştir. Her bir simülasyon çalışmasında, rüzgar hızı değiştiği anda sistem parametreleri yeni değerine düşük aşım ve en kısa sürede ulaştığı gözlemlenmiştir. Aşım ve yerleşme zamanlarının düşük olması için, frekans dönüştürücü kontrol sistemlerinde kontrolör katsayılarında optimizasyon çalışması yapılmıştır. Ayrıca, rüzgar türbinin nominal rüzgar hızının altında verimli çalışması için maksimum güç noktası izleme kontrol yöntemi geliştirilmiş ve analiz çalışmaları yapılmıştır. Rüzgar hızı, nominal rüzgar hızının üzerinde olduğu zamanlarda, çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar türbini korumak için kanat açısı kontrolü geliştirilmiş ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Her bir analiz sonucu incelenerek, performans değerlendirilmesi yapılmıştır.

Rüzgar türbin-generatör sistem modeli normal işletme şartlarında performans analizleri yapıldıktan sonra, dengesiz şebeke koşullarında sistem davranışını incelemek için şebeke arıza koşulları belirlenmiştir. Şebeke arıza koşulları kapsamında gerilim düşmesi durumları incelenmiştir. Bu süreçte, rüzgar türbin-generatör sistem modelinde meydana gelebilecek zorlanmaları ortadan kaldırmak ve sistem davranışını iyileştirmek için kontrol stratejileri geliştirilmiştir. İlk olarak, şebeke geriliminin %25 düşmesi durumunda, arıza süresince tork, rotor ve stator akımlarında salınımlar olduğu görülmüştür. Torktaki bu salınımlar şaftta zorlanmalara neden olacaktır. Bu negatif etkiyi ortadan kaldırmak ve sistem parametrelerindeki salınımları minimuma indirmek

için arıza süresi boyunca frekans dönüştürücü kontrol sisteminde akım kontrolör katsayılarında güncellemeler yapıldı (Yöntem 1). İkinci olarak, şebeke geriliminin %50 düşmesi durumunda arıza süresi boyunca frekans dönüştürücüsü kontrol sisteminde mevcut kontrolör katsayıları kullanılarak, bu salınımların daha arttığı görülmüştür. Sonrasında, arıza süresi boyunca frekans dönüştürücüsü kontrol sisteminde güncellenen kontrolör katsayıları kullanılmıştır. Bu koşullar altında yapılan analizler sonucunda salınımların ciddi oranda azaldığı görülmüştür. Çift beslemeli asenkron generatörün tork, stator ve rotor akımlarının değeri yaklaşık olarak 3-4 kat oranında düşmeler meydana gelmiştir. En son olarak şebeke geriliminin %75 düşmesi durumunda, rüzgar türbinlerinde hem ciddi zorlanmalar olmakta hem de kontrol sisteminin performansında düşmeler meydana gelir. Bu problemleri çözmek ve sistemin zarar görmesini engellemek için ilk aşamada crowbar sistemi geliştirilmiştir. Crowbar koruma sistemi için donanım alt yapısı ve çalışma senaryoları geliştirilmiştir. Şebeke geriliminin %75 düşmesi durumunda, crowbar koruma sistemi de eklenerek sistem modeli üzerinde simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Arıza olduğu anda, DC-link gerilimi nominal değerinin yaklaşık olarak 1.1 katına çıktığı anda, crowbar koruma sistemi devreye girmiş ve fazla enerjiyi direnç üzerinde yok etmiştir. Sistem davranışını daha da iyileştirmek için, chopper koruma sistemi geliştirilmiştir. Son simülasyon çalışmasında ise, şebeke geriliminin %75 düşmesi durumunda, hem crowbar hem de chopper koruma sistem eklenerek sistem modeli üzerinde simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Arıza olduğu anda, DC-link gerilimi nominal değerinin yaklaşık olarak 1.05 katına çıktığı anda, chopper koruma sistemi devreye girer. Chopper koruma sistemi arızayı ortadan kaldırmak için yetersiz kaldığından dolayı DC-link gerilimi yükselmeye devam etmiştir. DC-link gerilimi nominal değerinin yaklaşık olarak 1.1 katına çıktığı anda crowbar koruma sistemi devreye girerek, fazla enerji ortadan kaldırılmıştır. Arıza ortadan kalktıktan sonra, rüzgar türbin-generatör sistemi normal işletme altında başarı ile çalışmaya devam etmiştir.

- Gelecek çalışmalar için öneriler:
 - Rüzgar türbinlerinin deniz aşırı kurulumu üzerine sistem modelinin geliştirilmesi ve iletim hatları üzerinde arıza durumların analiz edilmesi,
 - Çift beslemeli asenkron generatör sistemlerinde çalıştırılmasında kullanılan frekans dönüştürücü sistemi yerine daha modern dönüştürücü sistemlerinin kullanılması ve analiz çalışmalarının yapılması,

KAYNAKLAR

- [1] **Jing, X.** (2012). *Modeling and Control of a Doubly-Fed Induction Generator for Wind Turbine-Generator Systems* (Master's Thesis). Marquette Üniversitesi, Wisconsin.
- [2] **Rashid, M., H.** (2011). *Power Electronics, Devices, Circuits and Applications*, Third Edition.
- [3] **Tchakoua, P., Wamkeue, R.** (2016). *A Review of Concepts and Methods for Wind Turbines Condition Monitoring*. Research Gate, DOI:10.1109/WCCIT.2013.6618706.
- [4] **Molina, M., G., Mercado, P., E.** (2014). *Modelling and Control Design of Pitch-Controlled Variable Speed Wind Turbines*. Instituto de Energia Electrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, ResearchGate, DOI:10.5772/15880.
- [5] **Petersson, A.** (2003). *Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines* (Thesis). Chalmers University of Technology, Sweden.
- [6] **Pokharel, B.** (2011). *Modeling, Control and Analysis of Doubly Fed Induction Generator Based Wind Turbine System with Voltage Regulation* (Master's Thesis). Tennessee Technological University, ABD.
- [7] **Hansen, A., D., Lov, F.** (2004). *Review of Contemporary Wind Turbine Concepts and their Market Penetration*. Wind Engineering Volume 28, No. 3, pp:247-263, Institute of Energy Technology, Aalborg University, Denmark.
- [8] **Müller, S., Deicke, M.** (2002). *Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines*. IEEE Industry Applications Magazine, 1077-2618.
- [9] **Kadam, D., P., Kushare, B., E.** (2012). *Overview of Different Wind Generator Systems and Their Comparisons*. IJESAT, ISSN: 2250-3676, Volume-2, Issue-4, 1076-1081.
- [10] **Aho, J., Buckspan, A., Laks, J.** (2012). *Tutorial of Wind Turbine Control for Supporting Grid Frequency through Active Power Control*. NREL, NREL/CP-5000-54605.
- [11] **Kulka, A., (2004).** *Pitch and Torque Control of Variable Speed Wind Turbines* (Master's Thesis). Chalmers University of Technology, Sweden.
- [12] **Beltran, B., Ahmed-Ali, T.** (2008). *Sliding Mode Power Control of Variable-Speed Wind Energy Conversion Systems*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume-23, No.2.
- [13] **Tao, Sun,** (2004). *Power Quality of Grid-Connected Wind Turbines with DFIG and Their Interaction with the Grid* (Doctore's Thesis). Aalborg University, Denmark.
- [14] **Fortman, J.** (2015). *Modeling of Wind Turbines with Doubly Fed Generator System*. Springer Fachmedien Wiesbaden, DOI 10.1007/978-3-658-06882-0_2.

- [15] **Singh, M., Muljadi, E., Jonkman, J.** (2014). *Simulation for Wind Turbine Generators-With FAST and MATLAB-Simulink Modules*. NREL, NREL/TP-5D00-59195.
- [16] **Baldo, F.** (2012). *Modeling of Load Interfaces for a Drive Train of a Wind Turbine* (Master's Thesis). Chalmers University of Technology, Sweden.
- [17] **Muyeen, S., M., Tamura, J., Murata, T.** (2009). *Stability Augmentation of a Grid-Connected Wind Farm*. Springer, ISBN: 978-1-84800-315-6.
- [18] **Liu, B.,** *The Implementation of Variable Speed Wind Turbine Aerodynamic and Drive Train Modeling for Transient Analysis*. The European Academy of Wind Energy, 4th PhD Seminar on Wind Energy in Europe, Norway.
- [19] **Tahiri, M., Djebli, A., Mimet, A.** (2017). *Drive Train Flexibility Effect on Control Performance of a Horizontal Axis Wind Turbine*. IJAER, ISSN: 0973-4562, Volume 12, Number 6, pp:5511-5519, Morocco.
- [20] **Lima, F., K., A., Luna, A., Rodriquez, P.** (2009). *Study of a Simplified Model for DFIG-Based Wind Turbines*. IEEE, 978-1-4244-2893-9/09.
- [21] **Döşoğlu, M., K., Arsoy, A., B.** (2006). *Enhancement of A Reduced Order Doubly Fed Induction Generator Model for Wind Farm Transient Stability Analyses*. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, TÜBİTAK, DOI:10.3906/elk-1402-195.
- [22] **Melicio, R., Mendes, V., M., F., Catalao, J., P., S.** (2009). *Full-Power Converter Wind Turbines with Permanent Magnet Generator: Modeling, Control and Simulation*. IEEE, 978-1-4244-4252-2/09.
- [23] **PanduRangaReddy, G., Venkateshwarlu, M., Kumar, M., V.,** "Diode Clamed Multilevel Matrix Converter for DFIG Based Wind Energy Conversion System", 2. International Conference On Innovations in Electrical & Electronics Engineering, (IOSR-JEEE), e-ISSN:2278-1676, p-ISSN:2320-3331, 44-52.
- [24] **Barakati, S., M.** (2008). *Modeling and Controller Design of a Wind Energy Conversion System Including a Matrix Converter* (Doktora Tezi). Waterloo Üniversitesi, Canada.
- [25] **Muljadi, E., Butterfield, C., P.** (1999). *Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation*. NREL, NREL/CP-500-27143, Arizona.
- [26] **Hwas, A., Katebi, R.** (2012). *Wind Turbine Control Using PI Pitch Angle Controller*. IFAC Conference on Advances in PID Control, University of Strathclyde, UK.
- [27] **Baburajan, S., Ismail, A.** (2017). *Pitch Control of Wind Turbine through PID, Fuzzy and an Adaptive Fuzzy-PID Controller*. IRJET, e-ISSN: 2395-0056, p-ISSN:2395-0072, Volume:4, Issue:09, Rochester Institute of Technology.
- [28] **Hure, N., Turnar, R., Vasak, M.,** *Optimal Wind Turbine Yaw Control Supported with Very Short-Term Wind Predictions*. Zagreb Üniversitesi. Retrieved from: <https://bib.irb.hr/datoteka/760204.ICIT.pdf>
- [29] **Stotsky, A.** (2016). *Nonlinear Speed and Yaw Control for Wind Turbine Powered Vessels*. Systems and Control Engineering of Journal, DOI: 10.1177/0959651815623709.

- [30] **Song, D., Yang, J., Su, M.** (2017). *Wind Direction Prediction for Yaw Control of Wind Turbines*. International Journal of Control Automation and Systems, ResearchGate, DOI:10.1007/s12555-017-0289-6.
- [31] **Thongam, J., Quhrouche, M.** (2014). *MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems*. ResearchGate, DOI:10.5772/21657, Canada.
- [32] **Abdullah, M., A., Yatim, A., H., M., Tan, C., W.** (2016). *A Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy Systems*, ELSEVIER, ResearchGate, DOI:10.1016/j.rser.2012.02.016.
- [33] **Hui, J.** (2008). *An Adaptive Control Algorithm for Maximum Power Point Tracking For Wind Energy Conversion Systems* (Master's Thesis). Queen's University, Canada.
- [34] **Okedu, K., E., Muyeen, S., M., Takahashi, R.** (2012). *Wind Farm Stabilization by Using DFIG with Current Controlled Voltage Source Converters Taking Grid Codes into Consideration*. IEEJ Trans. PE (B), Vol.132, No:3, Japan.
- [35] **Rao, Y., S., Laxmi, A., J.** (2012). *Direct Torque Control of Doubly Fed Induction Generator Based Wind Turbine Under Voltage Dips*. IJAET, ISSN: 2231-1963, Vol.:3, Issue:2, pp:711-720.
- [36] **Pimple, B., B., Vekhande, V., Y., Fernandes, B., G.** (2010). *New Direct Torque Control of DFIG under Balanced and Unbalanced Grid Voltage*. IEEE, 978-1-4244-6890-4/10.
- [37] **Petru, T.** (2001). *Modeling of Wind Turbines for Power System Studies* (Thesis). Chalmers University of Technology, Sweden.
- [38] **Zutter, S., D., Kooning, J., D., M., D., Samani, A., E.,** *Modeling of Active Yaw Systems for Small and Medium Wind Turbines*. Ghent University, Electrical Energy Laboratory, Belgium, Retrieved from: <https://biblio.ugent.be/publication/8530636/file/8530643.pdf>
- [39] **Singh, M., Santoso, S.** (2011). *Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants*. NREL, NREL/SR-5500-52780, University of Texas.
- [40] **Dai, Z.** (2014). *Generic Wind Turbine Generator Model Comparison Based on Optimal Parameter Fitting* (Master's Thesis). University of Toronto, Canada.
- [41] **Lei, T.** (2014). *Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbine Modelling, Control and Reliability* (Doctore's Thesis). University of Manchester, Manchester.
- [42] **Akhmatov, V.** (2003). *Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power* (Doctore's Thesis). Technical University of Denmark, Denmark.
- [43] **Salman, S., K., Badrzadeh, B.** (2015). *New Approach for Modelling Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) for Grid-Connection Studies*. ResearchGate, Robert Gordon University, UK.
- [44] **Ende, W., Shenghua, H.** (2013). *Robust Control of The Three-Phase Voltage-Source PWM Rectifier Using EKF Load Current Observer*. Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R.89 NR, Huazhong University of Science and Technology, China.

- [45] **Reddy, N., P., Hymavathi, P.** (2012). *Mitigation of Harmonics by Three-Phase Voltage Source PWM Rectifier*. International Journal of Scientific and Research Publications, ISSN: 2250-3153, Volume:2, Issue:9, India.
- [46] **Yu, L., Li, R., Xu, L.** (2017). *Distributed PLL-based Control of Offshore Wind Turbines Connected with Diode-Rectifier based HVDC Systems*. IEEE.
- [47] **Abdou, E., Youssef, A., Kamel, S., Aly, M.,** (2018). *Sensorless Wind Speed Control of 1.5 MW DFIG Wind Turbines for MPPT*. 28 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), 978-1-5386-6654-8/18.
- [48] **Sirouni, Y., Hani, S., Naseri, N., Aghmadi A., Harouri, K.** (2018). *Design and Control of Small Scale Wind Turbine Emulator with a DC Motor*. IEEE, 978-1-7281-1182-7/18.
- [49] **Jianzhong Zhang, Ming Cheng, Zhe Chen, Xiaofan Fu** (2008). *Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines*. Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp.2691-2696.
- [50] **Erlich, I., Wrede, H., Feltes, C.,** (2007). *Dynamic Behavior of DFIG-Based Wind Turbines during Grid Faults*. IEEE, 1-4244-0844-X/07.
- [51] **30046 Sayılı Elektrik Şebeke Yönetmeliği.** *Rüzgar ve Güneş Enerjisine Dayalı Fotovoltaik Üretim Tesislerinin Şebeke Bağlantı Kriterleri*. T.C. Resmi Gazete, 22 Nisan 2017.
- [52] **Rahimi, M., Azizi, A.** (2018). *Transient Behavior Representation, Contribution to Fault Current Assessment, and Transient Response Improvement in DFIG-Based Wind Turbines Assisted with Crowbar Hardware*. Wiley, DOI:10.1002/etep.2698.
- [53] **Sartika, L., Umemura, A., Takahashi, R.** (2017). *Enhancement of DC-Link Protection of PMSG Based Wind Turbine Under Network Disturbance by Using New Buck Controller System*. Journal of Mechanics Engineering and Automation, DOI:10.17265/2159-5275/2017.04.001, Japan.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Ozan AYKUT
Doğum Tarihi ve Yeri : 27.04.1990, İstanbul
E-posta : aykuto@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
- **Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği (Çift Anadal Programı)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2013 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde elektrik mühendisliği lisans eğitimini tamamladım.
- 2014 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde çift anadal programı ile kontrol ve otomasyon bölümü lisans eğitimini tamamladım.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **KÖMÜRGÖZ, G, ULU, C., AYKUT, O.**, “Rüzgar Türbini Uygulamaları için Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tasarımı, Modellenmesi ve Kontrolü”, IV Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu, Nisan 18-20, 2018, Edirne, Türkiye.

