

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞEBEKEYE PARALEL BAĞLI RÜZGAR ELEKTRİK SANTRALLERİNDE
NONLİNEER YÜKLENMENİN VE AÇMA-KAPAMA OLAYLARININ
İNCELENMESİ**

ALTUĞ BOZKURT

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. CELAL KOCATEPE**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞEBEKEYE PARALEL BAĞLI RÜZGAR ELEKTRİK SANTRALLERİNDE
NONLİNEER YÜKLENMENİN VE AÇMA-KAPAMA OLAYLARININ
İNCELENMESİ

Altuğ BOZKURT tarafından hazırlanan tez çalışması 15.08.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Celal KOCATEPE

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Celal KOCATEPE

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Serhat ŞEKER

İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hakan ÜNDİL

İstanbul Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasındaki katkılarından dolayı değerli danışman hocam Prof. Dr. Celal KOCATEPE'ye, çalışmalarım süresince her zaman yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen hocalarım ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca her zaman maddi ve manevi destekleri ile yanımda olan anneme, babama ve eşime teşekkürü bir borç bilirim.

Ağustos, 2012

Altuğ BOZKURT

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	3
1.2 Tezin Amacı	8
1.3 Orijinal Katkı	9
BÖLÜM 2	
RÜZGAR SANTRALLERİNİN TANITIMI	11
2.1 Rüzgardan Güç Elde Edilmesi	12
2.2 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması	13
2.2.1 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinler	14
2.2.2 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri	15
2.3 Rüzgar Türbinlerinin Yapısı	16
2.3.1 Kule	16
2.3.2 Rotor	17
2.3.3 Dişli Kutusu	17
2.3.4 Generatör	17
2.3.4.1 Asenkron Generatörler	18
2.3.4.1.1 Sincap Kafesli Asenkron Generator (SKAG)	18
2.3.4.1.2 Rotoru Sargılı Asenkron Generatör (RSAG)	19
2.3.4.2 Senkron Generatörler	19

2.3.4.2.1	Rotoru Sargılı (Alan Sargılı) Senkron Generatör (RSSG).....	20
2.3.4.2.2	Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör (SMSG)	20
2.4	Rüzgar Santrallerinin Güç Kalitesine Etkileri.....	20
2.4.1	Gerilim Dalgalanmaları	20
2.4.1.1	Reaktif Güce Bağlı Gerilim Değişimleri	21
2.4.1.2	Gerilim Flikerleri	22
2.4.2	Gerilim Çökmeleri	22
2.4.3	Harmonikler.....	23
2.5	Rüzgar Türbinlerinin Şebeke Entegrasyonu.....	23
2.5.1	Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörlü Değişken Hızlı Rüzgar Türbini.....	23
BÖLÜM 3		
GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ		26
3.1	Harmonikler İle İlgili Elektriksel Büyüklükler	26
3.2	Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)	29
3.3	Harmonik Kaynakları	30
3.3.1	Generatörler	31
3.3.2	Transformatörler	31
3.3.3	Konverterler	31
3.3.4	Ark Fırınları	32
3.4	Harmoniklerin Güç Sisteminde Meydana Getirdiği Etkiler.....	32
3.5	Harmonik Standartları	33
BÖLÜM 4		
SİSTEM TANITIMI.....		36
4.1	Türbin Modeli.....	37
4.2	Generatör Modeli.....	39
4.2.1	Park Dönüşümü	40
4.2.2	Ters Park Dönüşümü.....	41
4.3	AC / DC Dönüştürücü (Doğrultucu)	41
4.4	DC / DC Dönüştürücü (Boost)	42
4.5	DC / AC Dönüştürücü (İnverter)	42
4.6	Transformatör	43
4.7	İletim Hattı	44
4.8	Yük Modeli	45
4.9	Şebeke	46
BÖLÜM 5		
SAYISAL UYGULAMA.....		47
5.1	Giriş.....	47
5.2	Sayısal uygulama 1 (Çalışma Modu 1)	54
5.3	Sayısal uygulama 2	60
5.3.1	Lineer Yüklenme (Çalışma Modu 2.1).....	60
5.3.2	Nonlineer Yüklenme (Çalışma Modu 2.2)	62

5.3.3	Nonlinear Yükün Artması (Çalışma Modu 2.3).....	65
5.3.4	Sabit Rüzgar Hızında (12 m/sn) Farklı Yüklenme (Çalışma Modu 2.4)	69
5.3.5	Farklı Rüzgar Hızları ve Yüklenme Durumları için Ölçüm Noktalarındaki Gerilim ve Akımdaki THD Değişimleri	73
5.4	Sayısal Uygulama 3	75
5.4.1	Lineer Yüklenme Durumunda Farklı Rüzgar Hızları İçin Rüzgar Çiftliği Tarafında Anahtarlama Yapılması Durumu (Çalışma Modu 3.1)	78
5.4.2	Nonlinear Yüklenme Durumunda Farklı Rüzgar Hızları İçin Rüzgar Çiftliği Tarafında Anahtarlama Yapılması Durumu (Çalışma Modu 3.2).....	83
5.4.3	Sabit Rüzgar Hızında Rüzgar Çiftliği Tarafında Anahtarlama Olması Halinde Lineer Ve Nonlinear Yüklenme Durumlarının Karşılaştırılması (Çalışma Modu 3.3)	85
5.5	Sayısal Uygulama 4	90
5.5.1	Lineer Yüklenme Durumunda Farklı Rüzgar Hızları İçin Rüzgar Çiftliğindeki 2 Türbinde Anahtarlama Olması Durumu (Çalışma Modu 4.1)	91
5.5.2	Nonlinear Yüklenme Durumunda Farklı Rüzgar Hızları İçin Rüzgar Çiftliğindeki Türbinlerde 2 Tanesinin Devre Dışı Kalması Durumu (Çalışma Modu 4.2).....	96
5.5.3	Sabit Rüzgar Hızında Rüzgar Çiftliğindeki Türbinlerden 2 Tanesinde Anahtarlama Olması Halinde Yükün Nonlinear ve Lineer Yük Durumlarının Karşılaştırılması (Çalışma Modu 4.3).....	98
5.5.4	Farklı Rüzgar Hızları için Rüzgar Çiftliğinde ve Rüzgar Çiftliğindeki Türbinlerden 2 Tanesinde Anahtarlama Olması Halinde Nonlinear ve Lineer Yük Durumlarının Karşılaştırılması	103
 BÖLÜM 6		
SONUÇ VE ÖNERİLER		107
KAYNAKLAR.....		116
ÖZGEÇMİŞ		121

SİMGE LİSTESİ

A	Alan
C_p	Performans katsayısı
D	Distorsiyon gücü
E_k	Kinetik enerji
I	Efektif akım
I_0	Akımın dc (doğru akım) bileşeni
I_n	n. harmonik akımının efektif değeri
i_d	d eksenli stator akımı
i_n	n. harmonik akımının ani değeri
i_q	q eksenli stator akımı
L_d	d eksenli manyetik endüktansı
L_q	q eksenli manyetik endüktansı
m	Kütle
n	Harmonik mertebesi
P	Aktif güç
P_e	Generatör gücü
P_m	Mekanik güç
P_w	Rüzgar gücü
P	Çift kutup sayısı
R	Kanat yarıçapı
R_s	Stator direnci
Q	Reaktif Güç
S	Görünür güç
T_e	Generatör momenti
T_m	Mekanik moment
t	Zaman
V	Efektif gerilim
V_n	Harmonik geriliminin efektif değeri
V_0	Gerilimin dc bileşeni
v	Hacim
v_d	d eksenli stator gerilimi
v_n	n. harmonik geriliminin ani değeri
v_q	q eksenli stator gerilimi
ω_1	Temel frekansa ait açısal frekans
ω_e	Elektriksel açısal hızı

ω_m	Elektriksel açısal hız
ω_m	Rotor açısal hızı
δ_n	n. harmonik akımının faz açısı
θ_n	n. harmonik geriliminin faz açısı
ρ	Hava yoğunluğu
β	Kanat açısı
λ	Çevresel hız oranı
ψ_f	Sürekli mıknatıs akısı

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım (Alternative Current)
CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Plastik (Carbon Fiber Reinforced Plastic)
ÇBAG	Çift Beslemeli Asenkron Generatör
DC	Doğru Akım (Direct Current)
GF	Güç Faktörü
GRF	Cam Takviyeli Plastik (Glass Reinforced Plastic)
HD	Harmonik Distorsiyon
OSAG	Opti Slip Asenkron Generatör
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
RES	Rüzgar Elektrik Santrali
RSAG	Rotoru Sargılı Asenkron Generatör
RSSG	Rotoru Sargılı Senkron Generatör
SKAG	Sincap Kafesli Asenkron Generatör
SMSG	Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör
STATCOM	Statik Senkron Kompanzatör (Static Synchronous Compensator)
SVC	Statik VAR Kompanzasyon (Static VAR Compansation)
THD	Toplam Harmonik Bozulma (Total Harmonic Distortion)
THD _I	Akımdaki Toplam Harmonik Bozulma
THD _V	Gerilimdeki Toplam Harmonik Bozulma

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Yatay eksenli rüzgar türbini [34]	14
Şekil 2.2 Dikey eksenli rüzgar türbini [34]	15
Şekil 2.3 Yatay eksenli rüzgar türbini genel yapısı [34]16	
Şekil 2.4 Sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbini yapısı ve kontrol algoritması [44]	24
Şekil 2.5 Diyot doğrultuculu SMSG şebeke bağlantısı [45]	25
Şekil 2.6 Diyot doğrultucu ve DC/DC dönüştürücülü SMSG şebeke bağlantısı [45] ...	25
Şekil 3.1 Nonsinüsoidal gerilime ait dalga şekli	28
Şekil 4.1 Sistem modeli	37
Şekil 4.2 Kanat açısı ve çevresel hız oranına bağlı C_p değişimi	38
Şekil 4.3 Rüzgar türbini Matlab/Simulink blok diyagramı	39
Şekil 4.4 AC/DC dönüştürücü devre şeması	41
Şekil 4.5 DC/DC dönüştürücü devre şeması	42
Şekil 4.6 DC / DC dönüştürücü kontrolü	42
Şekil 4.7 DC / AC dönüştürücü devre şeması	43
Şekil 4.8 DC / AC dönüştürücü kontrolü.....	43
Şekil 4.9 Güç transformatörü	44
Şekil 4.10 Orta uzunluktaki iletim hattına ait tez faz eşdeğer devreleri	45
Şekil 4.11 Sabit güç yük modelleri	45
Şekil 4.12 Nonlineer yük modeli	46
Şekil 5.1 Sayısal uygulamada kullanılan sistemin tek hat şeması.....	49
Şekil 5.2 Yükün bir fazına ait akım harmoniği spektrumu.....	51
Şekil 5.3 Modellenen örnek güç sistemi.....	55
Şekil 5.4 Rüzgar hızı zamana bağlı değişimi.....	56
Şekil 5.5 DC bara gerilim değişimi.....	56
Şekil 5.6 Rüzgar çiftliği tarafından (Ölçüm Noktası 3) çekilen akımın bir fazına ait değişim	57
Şekil 5.7 Şebekenin 380 kV tarafından (Ölçüm Noktası 5) çekilen akımın bir fazına ait değişim	58
Şekil 5.8 Yükün çektiği akımın bir fazına ait değişim	58
Şekil 5.9 Yükün bağlı olduğu 380 kV gerilim seviyesindeki bara geriliminin değişimi	59
Şekil 5.10 Farklı rüzgar hızlarında rüzgar çiftliğinden çekilen akımın bir fazına ait değişim	61
Şekil 5.11 Çalışma modu 2.1 için şebekeden çekilen akımın bir faz değişimi	62
Şekil 5.12 Çalışma modu 2.2 için bir faza ait yük akımı değişimi.....	63

Şekil 5.13	Çalışma modu 2.2 için farklı rüzgar hızlarında rüzgar çiftliğinden (Ölçüm Noktası 3) çekilen akımın bir faz için değişimi	64
Şekil 5.14	Çalışma modu 2.2 için farklı rüzgar hızlarında şebekeden (Ölçüm Noktası 5) çekilen akımın bir faz değişimi	65
Şekil 5.15	Nonlineer yüke ait harmonik bileşenlerinin 2 kat olması durumunda rüzgar çiftliğinden (Ölçüm noktası 3) çekilen akımın değişimi	66
Şekil 5.16	Nonlineer yüke ait akım harmonik bileşenlerinin 2 kat olması durumunda şebekeden (Ölçüm Noktası 5) çekilen akım değişimi	67
Şekil 5.17	Nonlineer yüke ait akım harmonik bileşenlerinin 2 kat olması durumunda yük akımı değişimi (Ölçüm Noktası 4)	68
Şekil 5.18	Nonlineer yüke ait akım harmonik bileşenlerinin 2 kat olması durumunda yükün bağlı olduğu bara gerilimi değişimi	68
Şekil 5.19	Farklı yük durumlarında, 12 m/ sn rüzgar hızında ölçüm noktası 3'teki akım değişimi	69
Şekil 5.20	Farklı yük durumlarında, 12 m/ sn rüzgar hızında ölçüm noktası 5'teki akım değişimi	70
Şekil 5.21	Farklı yük durumlarında, 12 m/ sn rüzgar hızında Ölçüm Noktası 6'daki akım değişimi	71
Şekil 5.22	Farklı yük durumlarında, 12 m/sn rüzgar hızında yükün (Ölçüm Noktası 4) akımının değişimi	72
Şekil 5.23	Farklı yük durumlarında, 12 m/ sn rüzgar hızında yükün bağlı olduğu bara geriliminin değişimi	72
Şekil 5.24	Rüzgar çiftliği anahtarlama durumu	77
Şekil 5.25	Farklı rüzgar hızları için lineer yüklenme durumunda ölçüm noktası 3'den çekilen akımın değişimi	78
Şekil 5.26	Farklı rüzgar hızları için lineer yüklenme durumunda ölçüm noktası 5'den çekilen akımın değişimi	79
Şekil 5.27	Farklı rüzgar hızları için lineer yüklenme olması durumunda yük akımının değişimi	81
Şekil 5.28	Rüzgar çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda lineer yüklenme için 380 kV'luk baradaki 3 faz gerilim değişimi	82
Şekil 5.29	Farklı rüzgar hızları için nonlineer yüklenme durumunda ölçüm noktası 3'den çekilen akımın değişimi	83
Şekil 5.30	Farklı rüzgar hızları için nonlineer yüklenme durumunda ölçüm noktası 5'den çekilen akımın değişimi	84
Şekil 5.31	Farklı rüzgar hızları için nonlineer yüklenme durumunda ölçüm noktası 4'den çekilen yük akımının değişimi	85
Şekil 5.32	Sabit rüzgar hızında (12 m/sn) lineer ve nonlineer yüklenme durumları için ölçüm noktası 3'den çekilen akımın değişimi	86
Şekil 5.33	Sabit rüzgar hızında (12 m/sn) lineer ve nonlineer yüklenme durumları için ölçüm noktası 5'den çekilen akımın değişimi	87
Şekil 5.34	Sabit rüzgar hızında (12 m/sn) lineer ve nonlineer yüklenme durumları için ölçüm noktası 6'dan çekilen akımın değişimi	88
Şekil 5.35	Yükün bağlı olduğu 380 kV'luk bara geriliminin değişimi	90
Şekil 5.36	Farklı rüzgar hızları için lineer yüklenme durumunda ölçüm noktası 3'den çekilen akımın değişimi	91

Şekil 5.37	Farklı rüzgar hızları için lineer yüklenme durumunda ölçüm noktası 5'den çekilen akımın değişimi	92
Şekil 5.38	Rüzgar çiftliğinde 2 türbinde anahtarlama olması durumunda lineer yüklenme için 380 kV'luk baradaki 3 faz gerilim değişimi.....	95
Şekil 5.39	Farklı rüzgar hızları için nonlineer yüklenme durumunda ölçüm noktası 3'den çekilen akımın değişimi.....	96
Şekil 5.40	Farklı rüzgar hızları için lineer yüklenme durumunda ölçüm noktası 5'den çekilen akımın değişimi	97
Şekil 5.41	Sabit rüzgar hızında (12 m/sn) lineer ve nonlineer yüklenme durumları için ölçüm noktası 3'den çekilen akımın değişimi	99
Şekil 5.42	Sabit rüzgar hızında (12 m/sn) lineer ve nonlineer yüklenme durumları için ölçüm noktası 5'den çekilen akımın değişimi.....	100
Şekil 5.43	Yükün bağlı olduğu 380 kV'luk bara geriliminin değişimi.....	103

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1	Çeşitli ülkelerde kullanılan gerilim harmonik standartları [47].....33
Çizelge 3.2	IEEE Standartlarına göre gerilimin THD sınır değerleri [52].....33
Çizelge 3.3	Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği 380 kV THD sınır değerleri34
Çizelge 3.4	Akım harmoniği sınır değerleri35
Çizelge 5.1	Rüzgar türbini parametreleri.....49
Çizelge 5.2	Sabit mıknatıslı senkron generatör parametreleri50
Çizelge 5.3	Yükün bir fazına ait ölçülen elektriksel büyüklükleri50
Çizelge 5.4	Yükün bir fazının akım harmonik bileşenlerine ait ölçülen değerler.....51
Çizelge 5.5	Ölçümü yapılan 174 km uzunluğundaki hatta ait parametreler52
Çizelge 5.6	Sayısal uygulamaya ait analizler53
Çizelge 5.7	Nonlineer yüklenme durumunda farklı rüzgar hızları için 3 ve 5 nolu ölçüm noktalarındaki akıma ait toplam harmonik distorsiyonları63
Çizelge 5.8	Nonlineer yüke ait harmonik bileşenlerin 2 kat olması durumunda farklı rüzgar hızları için ölçüm noktaları 3 ve 5'teki THD _i değişimleri.....66
Çizelge 5.9	Nonlineer yüke ait harmonik bileşenlerin 2 kat olması durumunda farklı rüzgar hızları için ölçüm noktaları 3 ve 5'teki THD _i artış oranları.....66
Çizelge 5.10	Farklı yük durumları için 12 m/sn rüzgar hızındaki ölçüm noktası 5'teki THD değerleri69
Çizelge 5.11	Farklı yük durumları için 12 m/sn rüzgar hızındaki ölçüm noktası 5'teki THD değerleri70
Çizelge 5.12	Farklı yük durumları için 12 m/sn rüzgar hızındaki ölçüm noktası 6'daki THD değerleri71
Çizelge 5.13	Yükün akım bozuluma bağlı olarak bara geriliminin THD _v değerleri ..73
Çizelge 5.14	Farklı rüzgar hızlarında lineer yük, nonlineer yük 1 ve nonlineer yük 2 durumundaki akım ve gerilimin THD oranları74
Çizelge 5.15	Rüzgar Çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda lineer yüklenme hali için ölçüm noktası 3'ten çekilen akımın genliğindeki maksimum artış79
Çizelge 5.16	Rüzgar Çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda lineer yüklenme hali için ölçüm noktası 5'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış80
Çizelge 5.17	Rüzgar Çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda lineer yüklenme hali için bara geriliminin genliğindeki maksimum artış83

Çizelge 5.18	Rüzgar Çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda nonlinear yüklenme hali için ölçüm noktası 3'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış	84
Çizelge 5.19	Rüzgar Çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda nonlinear yüklenme hali için ölçüm noktası 5'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış	85
Çizelge 5.20	Rüzgar Çiftliği tarafında 12 m/sn rüzgar hızında anahtarlama olması durumunda lineer ve nonlinear yüklenme için ölçüm noktası 3'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış	86
Çizelge 5.21	Rüzgar Çiftliği tarafında 12 m/sn rüzgar hızında anahtarlama olması durumunda lineer ve nonlinear yüklenme için ölçüm noktası 5'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış	87
Çizelge 5.22	Rüzgar Çiftliği tarafında 12 m/sn rüzgar hızında anahtarlama olması durumunda lineer ve nonlinear yüklenme için ölçüm noktası 6'dan çekilen akımın genliğindeki maksimum artış	88
Çizelge 5.23	Rüzgar çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda lineer ve nonlinear yüklenme hali için bara geriliminin genliğindeki maksimum artış	90
Çizelge 5.24	Rüzgar çiftliği tarafında 2 türbinde anahtarlama olması durumunda lineer yüklenme hali için ölçüm noktası 3'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış	92
Çizelge 5.25	Rüzgar çiftliği tarafında 2 türbinde anahtarlama olması durumunda lineer yüklenme hali için ölçüm noktası 5'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış	93
Çizelge 5.26	Rüzgar çiftliğinde 2 türbinde anahtarlama olması durumunda lineer yüklenme hali için bara geriliminin genliğindeki maksimum artış	95
Çizelge 5.27	Rüzgar çiftliği tarafında 2 türbinde anahtarlama olması durumunda nonlinear yüklenme hali için ölçüm noktası 3'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış	97
Çizelge 5.28	Rüzgar çiftliği tarafında 2 türbinde anahtarlama olması durumunda nonlinear yüklenme hali için ölçüm noktası 5'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış	98
Çizelge 5.29	Rüzgar Çiftliği tarafında 2 türbinde 12 m/sn rüzgar hızında anahtarlama olması durumunda lineer ve nonlinear yüklenme için ölçüm noktası 3'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış	100
Çizelge 5.30	Rüzgar Çiftliği tarafında 2 türbinde 12 m/sn rüzgar hızında anahtarlama olması durumunda lineer ve nonlinear yüklenme için ölçüm noktası 5'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış	101
Çizelge 5.31	Rüzgar çiftliğinde 2 türbinde anahtarlama olması durumunda lineer ve nonlinear yüklenme hali için bara geriliminin genliğindeki maksimum artış	101
Çizelge 5.32	Farklı rüzgar hızlarında lineer ve nonlinear yüklenme için farklı anahtarlama durumlarında ölçüm noktası 3'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış	104
Çizelge 5.33	Farklı rüzgar hızlarında lineer ve nonlinear yüklenme için farklı anahtarlama durumlarında ölçüm noktası 5'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış	105

Çizelge 5.34	Farklı rüzgar hızlarında lineeer ve nonlineer yüklenme için farklı anahtarlama durumlarında V_{Bara} geriliminin genliğindeki maksimum artış	106
--------------	--	-----

ŞEBEKEYE PARALEL BAĞLI RÜZGAR ELEKTRİK SANTRALLERİNDE NONLİNEER YÜKLENMENİN VE AÇMA-KAPAMA OLAYLARININ İNCELENMESİ

Altuğ BOZKURT

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Celal KOCATEPE

Günümüzde, elektrik enerjisine olan talebin artması, fosil yakıtların tükenmeye başlaması ve temiz enerji elde etme isteği yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretiminin önemini arttırmıştır. Bu kaynaklardan en çok kullanılanı olarak rüzgar enerjisi öne çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisinden elektrik elde etmek için kullanılan rüzgar türbinleri de gün geçtikçe gelişmekte ve şebekeye bağlantısı esnasında karşılaşılan problemler de iyileştirilmektedir.

Rüzgar elektrik santrallerinin (RES) meydana getirdiği problemler ve rüzgar türbinlerinin bulunduğu güç sistemlerinde yaşanan problemlerin RES’ler üzerindeki etkileri ile ilgili bir çok araştırma ve yayın yapılmıştır. Bu konudaki çalışmalar günümüzde de hızla devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında, genel olarak şebeke ile RES’in birlikte çalışmasına ait analizler MATLAB & Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Paralel çalışan böyle bir sistemin lineer ve nonlineer yüklenme şartları irdelenmiştir. Yapılan çalışmada, güç sistemindeki anahtarlama (açma-kapama) olaylarının, RES’nin farklı rüzgar hızlarında sistem davranışı üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

Bu kapsamda, tez çalışmasında “TÜBİTAK Güç Kalitesi Milli Projesi” kapsamında ölçümler gerçekleştirilen 174 km uzunluğunda 380 kV’luk bir yüksek gerilim iletim hattından beslenen yük ve TEİAŞ’tan alınan hat parametreleri kullanılarak gerçek bir sistem modellenmiştir. Bu sisteme ek olarak, oluşturulan senaryo dahilinde yük

yakınlarına 2 MW gücündeki 4 adet rüzgar türbininden oluşan bir RES'nin kurulması ve şebekeye paralel olarak yükü beslemesi durumu incelenmiştir.

Yapılan çalışmanın sonunda, herhangi bir yükün şebekeyle paralel bağlı olan RES tarafından beslenmesi halinde, bu sistem üzerinde rüzgar hızının, yük profilinin ve açma-kapama olaylarının önemli etkilerinin olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar Elektrik Santrali, Harmonikler, Toplam Harmonik Distorsiyon, Anahtarlama

ABSTRACT

ANALYSIS OF NONLINEER LOADING AND SWITCH ON / OFF CONDITIONS ON GRID CONNECTED WIND POWER PLANTS

Altuğ BOZKURT

Department of Electrical Engineering
PhD. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Celal KOCATEPE

Increased demand for electrical energy, depletion of fossil fuels and the wish for clean energy have recently raised the importance of electrical energy production from renewable energy sources. Wind energy is the most used renewable energy source amongst all renewable energy sources. Wind turbines, used for electrical energy production from wind power, have been developing and problems encountered during the grid connection have also been addressed.

In literature, research has mainly focused on problems caused by wind power plants (WPP) and the effect of power system disturbances on the WPP. Studies in this field are continuously growing.

In this thesis, analyses for a grid connected operation of WPP are carried out by using MATLAB&Simulink Software. Linear and non-linear loading conditions of such a grid connected system are considered. The effects of switching (on and off) transients on system behavior are exhibited by considering the WPP operated at various wind speeds.

Within this concept, a real system is modeled using measured loading of a 380 kV, 174 km long transmission line under “TUBITAK National Power Quality Project” and using line parameters obtained from TEIAS. In addition to this system, grid parallel operation of a WPP consisting of four 2 MW wind turbines is considered.

It is shown that wind speed, load profile and transients (on/off events) have considerable effects on any load supplied through a grid paralleled WPP.

Key words: Wind Power Plant, Harmonics, Total Harmonic Distortion, Switching

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İnsanoğlunun enerjiye olan ihtiyacı her zaman olmuştur. Isı enerjisinden, ışık enerjisine, elektrik enerjisinden, mekanik enerjiye kadar pek çok enerji türüne sürekli olarak ihtiyaç duyulmaktadır. Giderek çeşitlenen ve daha da önem kazanan bu ihtiyacı kolay, ucuz ve temiz bir şekilde karşılamak için sürekli çalışmalar yapılmış ve halen yapılmaya devam edilmektedir. Elektrik enerjisi enerji çeşitleri içerisinde en önemlilerindendir. Geçmişten günümüze kadar artan elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için çeşitli kaynaklar kullanılmıştır. Artan temiz ve yenilenebilir enerji ihtiyaçlarına/isteklerine cevap verebilmek üzere son yıllarda giderek artan bir şekilde rüzgar, güneş, dalga ... v.b. enerji kaynaklarına yönelim olmuştur. Günümüzde bunlar arasında en öne çıkan rüzgar enerjisi olmaktadır.

Rüzgar elektrik santrallerinde (RES) kullanılan çeşitli tiplerdeki (yatay eksen, dikey eksen, sabit hızlı, değişken hızlı, senkron generatörlü, asenkron generatörlü) ve güçlerdeki (küçük güçlü, büyük güçlü) rüzgar türbinleri sayesinde hızla artan oranda elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmektedir.

RES'ler ile gerçekleştirilen elektrik üretiminin, genel üretim içerisindeki oranının artması çeşitli problemleri de beraberinde getirmektedir. Yapılan çalışmalar neticesinde, şebekeye bağlantı kriterleri, oluşturduğu sorunlar, güvenilirlik ve süreklilik konularında önemli ölçüde yol alınmakla beraber konu ile ilgili araştırmalara devam edilmektedir.

Büyük güçlü RES'lerin şebeke ile paralel çalışması gerekliliği bilinen bir gerçektir. Paralel çalışma esnasında, rüzgar hızındaki azalmaya karşılık RES'lerde meydana gelecek

Üretim azalmasının karşılanması bakımından büyük güçlü şebekelere bağlantı yapılması gerekmektedir. Aksi halde, enterkonnekte sistem içerisinde, karşılanamayan g ihtiyaı nedeniyle, aşırı yüklenmeler ve bölgesel enerji kesintileri meydana gelebilmektedir.

Ayrıca, kullanılan güç elektroniği elemanları nedeniyle RES'ler tarafından oluşacak güç kalitesi bozulmaları ve şebekedeki mevcut güç kalitesi bozulmalarının RES'ler üzerindeki etkileri de incelenmesi gereken önemli konulardandır.

Bunların dışında, güç sistemindeki normal çalışma şartlarında veya arızalar sebebiyle gerçekleşen / gerçekleştirilen anahtarlama operasyonlarının etkilerinin de incelenmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, "TÜBİTAK G Kalitesi Milli Projesi" kapsamında ölçümleri gerçekleştirilen 174 km uzunluğundaki 380 kV'luk bir yüksek gerilim iletim hattından beslenen yk ve TEİAş'tan alınan hat parametreleri kullanarak RES ile şebekenin paralel çalışmasına ait analizler yapılmıştır.

lm alınan yük ve belirlenen hat parametrelerinden faydalanılarak, mevcut bulunan yükün şebeke ile birlikte aynı zamanda yk yakınlarına kurulan bir RES tarafından da paralel olarak beslenmesi durumu senaryo olarak ele alınmıştır.

RES, 4 adet 2 MW gücündeki sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbininden oluşturularak modellemeler gerçekleştirilmiştir. Modellemelerde şebeke, sonsuz güçlü şebeke olarak, 174 km uzunluğundaki iletim hattı orta uzunluktaki iletim hattı olarak ve yk ölçüm değerleri kullanarak modellenmiştir.

Modelleme gerçekleştirildikten sonra, rüzgar hızı değişimlerinin, farklı yüklenme durumlarının ve anahtarlama (açma / kapama) operasyonlarının sistem üzerindeki etkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar ortaya konmuştur.

Bu tez çalışması ile özellikle g sistemlerindeki etkisi giderek artan harmoniklerin, kurulan sistem üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Yapılan çalışmada enerji kaynağı olarak rüzgar santrallerinin şebeke ile birlikte çalışma şartları araştırılmıştır. Çalışmada, yüklenme olarak g sisteminde, sayıları ve etkinlikleri giderek artan nonlinear elemanların bulunması hali ele alınmış ve bunların

etkileri araştırılmıştır. Şebeke ve rüzgar santrallerinin beraber çalışması halinde sistemdeki nonlineer yükler nedeniyle oluşan harmonik bileşenlerin etkinliği analiz edilmiştir. Enerji sisteminin gerçek nonlineer yüklenmesi ve nonsinüoidal büyüklükleri içermesi durumunda yine gerçek bir sistemdeki gibi şebeke ve rüzgar santrallerinden beslenmesi orijinal olarak incelenmiştir.

Tez çalışmasının ilk bölümünde, rüzgar türbinlerinin güç kalitesine etkileri ve sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbini sistemleri ile ilgili literatür çalışması yapılmıştır. Genel olarak tez çalışmasında simülasyonu gerçekleştirilen sistemin tanıtımı yapılmış, tezin amacı yapılan çalışmanın orijinal katkısı anlatılmıştır.

Teze ait 2. Bölüm’de, rüzgardan güç elde edilmesi, rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması, rüzgar türbinlerinin yapısından, rüzgar türbin sistemlerinde kullanılan generatör tiplerinden, rüzgar türbin sistemlerinin güç kalitesine olan etkilerinden, tez çalışmasında modellenen generatöre ait şebeke bağlantı yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Çalışmanın 3. Bölümünde günümüzde etkinliği giderek artan harmonik bileşenler ile ilgili bilgiler verilmiş, harmoniklerin oluşmasına sebep olan nonlineer elemanlardan bahsedilmiş ve harmoniklerin güç sisteminde meydana getirdiği etkiler açıklanmıştır.

Tezin 4. Bölüm’ünde tez çalışmasında modeli gerçekleştirilen sistemin tanıtımı yapılmıştır. Rüzgar elektrik santralinde bulunan her bir eleman hakkında bilgiler verilmiş ve sistemde kullanılan kontrol algoritması anlatılmıştır.

Çalışmaya ait Bölüm 5’de tez çalışması kapsamında, şebeke ve rüzgar çiftliğinden paralel olarak beslenen yükün simülasyonu gerçekleştirilirken, temel olarak 4 farklı sayısal uygulama ile analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tezin son bölümünde, tez çalışması sonucunda elde edilen tespitler ve değerlendirmeler verilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar ortaya konmuş, sonuç ve öneriler sunulmuştur.

1.1 Literatür Özeti

Bugüne kadar rüzgar çiftlikleri ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda, rüzgar çiftliklerinin harmonik etkinliği, harmonik yük akışı, fliker etkisi,

transient kararlılık analizleri, kontrol sistemleri, gerilim ve reaktif güç kontrolleri irdelenmiştir. Tez çalışmasına yakın konulardaki çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

Estanqueiro ve arkadaşları 2007 yılında, şebeke bağlantılı rüzgar çiftliklerinin güç kalitesi parametrelerini incelemişler ve değerlendirmişlerdir. Rüzgar çiftliklerinde kullanılan frekans dönüştürücülerinin, sistemdeki harmonik bozulmanın artmasına sebep olduğunu tespit etmişlerdir [1].

2005 yılında, Papathanassiou ve arkadaşları, yüksek gerilim sualtı kablosuyla şebekeye bağlı rüzgar çiftliğinin sistem modelini oluşturmuş ve harmonikli yük akışı analizlerini yapmışlardır. Farklı yüklenme durumları için harmonik empedans ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Farklı baralarda yapılan incelemeler sonucunda, rüzgar çiftliğine yakın baralardaki harmonik bozulmanın daha fazla olduğu ve daha az yüklenmede daha fazla bozulma olduğunu belirlemişlerdir [2].

Papathanassiou ve arkadaşlarının yapmış olduğu diğer çalışmada, çeşitli çalışma şartları ve değişik konfigürasyonlarda şebeke bağlantılı rüzgar çiftliğinde sistemin harmonik empedansını araştırmışlardır. Ele alınan sistem üzerinde IEC standardında tavsiye edilen harmonik distorsiyonu değerlerini elde etmek için kullanılan basitleştirilmiş yöntem ile harmonik yük akışını karşılaştırmışlardır [3].

Tentzerakis ve arkadaşları, değişken hızlı rüzgar türbinlerinden oluşan bir rüzgar çiftliğinin ortak kuplaj noktasındaki akım ve gerilime ait harmonik ölçümlerini yapmışlardır. Harmonik akımların karakteristiklerini alan ölçümleri metoduyla analiz etmişler ve ortak kuplaj noktasındaki harmonik distorsiyonuna şebeke ve rüzgar çiftliğinin katkılarını iyileştirmek için araştırmalar gerçekleştirmişlerdir [4].

Mutlu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Alaçatı'daki güç sistemine bağlı rüzgar çiftliğinin güç kalitesine etkilerini incelemişlerdir. Sistemin ortak kuplaj noktasındaki 3 faz gerilim ve akım, aktif ve reaktif güç büyüklükleri analiz edilmiştir. PSCAD programı kullanılarak rüzgar çiftliği modellenerek, simulasyon gerçekleştirmişler, tahmin edilen ve ölçülen değişkenler mukayese edilmiştir. Modellenen sisteme kanat açısı kontrolünün dahil edilmesi durumunda rüzgar hızına bağlı güç kalitesi bozulmalarının hassas olarak tahmin edilebileceği belirtilmiştir [5].

Jorgensen ve arkadaşları, bir dağıtım sisteminde şebeke bağlantılı rüzgar çiftliklerinin güç kalitesine etkisini özellikle kararlı gerilim durumları, fliker ve harmonikler açısından incelemişlerdir. Şebekeye bağlı rüzgar türbinlerinde gerilim kararlılığı için bir olasılık metodu geliştirmişlerdir. Rüzgar türbinlerindeki frekans konverterlerinin harmoniklere sebep olduğu ve farklı anahtarlama frekanslarında harmonik problemlerinin azaltılabileceği, pasif filtre veya şebekenin güçlendirilmesiyle bu problemlerin azaltılabileceği öngörülmüştür [6].

Martins ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, IEC standartlarına göre bir rüzgar türbininin performansı ve güç kalitesi analizleri ile ilgili çalışma yapmışlardır. Gerçek zamanlı veri işleyen, yeniden programlanabilen, geniş uygulama alanına sahip, rüzgar türbinine ait bütün güç kalitesi ve güç üretimi değerlendirmesini eş zamanlı yapabilen iki modülden oluşan bir sistem önerisinde bulunmuşlardır [7].

Kocatepe ve arkadaşları, Türkiye'deki gerçek rüzgar santrallerine ait güç kalitesi ölçümlerini sunmuşlardır. Ölçümler kapsamında harmonik, fliker ve güç kalitesi olaylarına ait değerlendirmeler yapılmıştır [8].

Linh, şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinde ortak kuplaj noktasındaki anlık güç üretimi ve gerilimini etkileyen faktörleri incelemek için MATLAB/Simulink programını kullanarak bir simülasyon çalışması yapmıştır. Bu çalışmada, şebeke gücünün ve şebekeye ait X/R oranının, şebeke dalgalanmalarını büyük oranda etkilediği anlaşılmıştır [9].

Hansen ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, şebeke bağlantılı rüzgar çiftliklerinde, rüzgar türbinin güç kalitesi parametrelerini, reaktif güç tüketimini ve fliker emülsiyonunun incelenmesi amacıyla elektriksel, mekaniksel ve aerodinamik parametrelerin dikkate alındığı bir simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir [10].

Dettmann ve arkadaşları, şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinin dengesiz yük beslemeleri durumunda ortak kuplaj noktası ve rüzgar türbinin bağlı olduğu baralardaki harmonik akımları incelemiştir. Çalışmada, asimetric durumun sıfır sequence harmoniklerin, pozitif ve negatif sequence harmoniklerine dönüşmesine sebep olduğunu gözlemlemişlerdir [11].

Hou ve arkadaşları, kararlı çalışma koşullarında güç faktörü 1 olan çift beslemeli indüksiyon generatörlü rüzgar türbini ve aynı kapasiteli güç sistemi arasındaki transient kararlılık karakteristiklerini incelemişlerdir. 3 faz arızası durumunda, rüzgar çiftliğinin güç kapasitesi arttıkça arıza kritik temizleme açısının arttığı, şebekenin nominal çalışma koşullarına ulaşmasının daha uzun süre aldığı görülmüştür [12].

Zhang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, şebeke bağlantılı sincap kafesli asenkron generatör (SKAG) ve çift beslemeli asenkron generatöre (ÇBAG) ait transient çalışma karakteristikleri incelenmiştir. Çift beslemeli asenkron generatörün transient performansını iyileştirmek için yeni bir kontrol ölçümü geliştirmişler ve sincap kafesli asenkron generatör üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Geliştirdikleri yöntem sonucunda SKAG'ın transient performansının iyileştiği, ÇBAG'ün performansında gözle görülür bir iyileşme olmadığı fakat daha hızlı toparlandığı görülmüştür [13].

Grigorescu ve arkadaşları, dağıtım şebekesine bağlı rüzgar türbinlerindeki anahtarlama durumlarında oluşan fliker seviyesinin türbin çıkış gücüne bağlı değişimlerini ve farklı rüzgar hızları ve generatör güçleri için harmonik bileşenleri incelemişlerdir. Ortalama ve en düşük rüzgar hızlarında, şebeke empedans açısına bağlı fliker faktörleri ölçülmüş ve P_{st} ile P_{lt} değerleri hesaplanmıştır. Generatör hızının artmasına bağlı olarak inverterin filtre görevi gördüğü, harmonik bileşenlerin genliğinin düştüğü görülmüştür [14].

Melicio ve arkadaşlarının 2011 yılında yaptığı çalışmada, değişken hızlı sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbinleri için kısmi sıralı kontrol stratejisi geliştirilmiş, rüzgar hızının bozulması ve aç kontrol arıza durumlarında transient analizi yapılarak klasik tam sayılı sıralı kontrol ile karşılaştırmışlardır [15].

Muyeen ve arkadaşları 2007 yılında yaptıkları çalışmada, PSCAD-EMTDC programını kullanarak, değişken hızlı sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbininin simetrik 3 faz-toprak ve asimetrik 2 faz-toprak arıza durumlarında transient kararlılık analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, şebeke gerilimini sabit tutan ve şebekeye maksimum güç aktarılmasını sağlayan bir kontrol stratejisi geliştirmişlerdir [16].

Yine Muyeen ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada, en ekonomik frekans konverteri topolojisi için maksimum güç aktarımı ve şebeke uç(terminal)

gerilimini sabitlemesi amacıyla reaktif gücün kontrolünü sağlayan bir kontrol sistemi geliştirmişler ve şebeke arızaları için analizler yapmışlardır [17].

Park ve arkadaşları, sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbini için üç faz toprak ve tek faz toprak arıza durumlarında, gerçek kontrolörlü benzetim simülasyonu ile transient gerilim analizi yapmışlardır. Önerdikleri kontrol sisteminin, rüzgar türbininin arıza sonrası sisteme katkı yeteneğini iyileştirdiğini belirtmişlerdir [18].

Koç ve arkadaşı tarafından 2011 yılında, çift beslemeli asenkron generatör ve sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbinlerinde 3 faz kısa devre arızası durumunda sisteme bağlı kalabilme yetenekleri incelenmiş ve mukayese edilmiştir. Sabit mıknatıslı senkron generatörün şebeke arızalarından daha az etkilendiği ve daha çabuk kararlı duruma geldiğini tespit etmişlerdir [19].

Geng ve Xu, sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbini için farklı zaman ölçeklemeleri ile oluşturulan iki farklı model yardımıyla kararlılık analizi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda generatörün türbine doğrudan bağlantılı olması durumunda hızda osilasyonlar ve momentte titreşimler olduğu, bu durumun kararlılığı olumsuz etkilediği görülmüştür. Önerilen moment kompanzasyon stratejisinin transient kararlılığı arttırıcı etkisinin bulunduğu sonucunu ortaya koymuşlardır [20].

Gonzalez-Longatt ve arkadaşları 2011 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbininin generatör tarafı konverteri için basit ve düşük maliyetli yeni bir kontrol stratejisi geliştirmişlerdir [21].

Strachan ve Jovcic tarafından gerçekleştirilen çalışmada, PSCAD/EMTDC programını kullanarak sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar dönüşüm ve depolama sisteminin modellemesini ve simülasyonunu yapmışlardır. Rüzgar hız sensörü kullanılmadan optimum performans katsayısı ve çıkış gücünün iyileştirilmesi esasına göre yapılan çalışmada, rüzgar hızı değişimlerine bağlı generatör tarafı arıza ve düzensizlikleri azaltılıp şebeke tarafındaki kararlılığın iyileştirilmesi sağlanmıştır [22].

Strachan ve Jovcic'in yaptığı diğer bir çalışmada, şebeke bağlantılı sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbini ve depolama sistemi modellenerek kontrol sistemi geliştirilmiş ve analizi gerçekleştirilmiştir. Depolama sisteminin kontrolü iki farklı

yöntemle gerçekleştirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Kontrolörlerden biri hata toleransını iyileştirirken diğerinin kötüleştiği ifade edilmiştir [23].

Kim ve arkadaşları, değişken hızlı sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbini kontrolü ve güç konverterlerinin kontrolü üzerine bir çalışma yapmışlardır. Gerilim kontrol sisteminin iyileştirilmesi için denetimsel reaktif güç kontrol şeması geliştirmişler ve kontrolörün yeterliliğini Kore’de bulunan bir rüzgar çiftliğinin modelini oluşturarak gerçekleştirilen simülasyonlarla test etmişlerdir [24].

Hansen ve Michalke tarafından yapılan çalışmada, gerilim ve güç kontrolü gibi farklı kontrol yöntemleri kullanılarak, tam ölçekli frekans dönüştürücülü sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbininin arıza sonrası sisteme ve şebekeye katkı yetenekleri incelenmiştir [25].

Huang ve arkadaşlarınca, rüzgar türbinlerinde kullanılan konverter topolojisi seçimi, optimal makina tasarımı vb. sistem tasarım değerlendirmelerini incelemişlerdir. Geliştirdikleri sabit mıknatıslı senkron generatörlü deneysel sistemde performans çalışmaları yapmışlardır [26].

Strachan ve Jovcic tarafından yapılan çalışmada, değişken hızlı sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbininin analitik kararlılık çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Sisteme ilave edilen diferansiyel kontrol geri beslemesiyle, şebekenin güç değişimlerinden etkilenmesi önemli ölçüde azaltılmıştır [27].

Yaramasu ve Wu, orta gerilim seviyesinde kullanılan rüzgar türbinleri için maliyeti ve boyutu daha düşük yeni bir converter topolojisi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Geliştirdikleri topoloji sayesinde giriş akımı ve çıkış gerilimindeki dalgalanmalar azaltılarak, daha hızlı dinamik tepki ve daha iyi güç aktarım kapasitesi sağlamışlardır [28].

1.2 Tezin Amacı

Tez çalışmasında, RES ile şebekenin paralel çalışma şartlarında çeşitli durumlar için davranışlarının ortaya konması hedeflenmiştir. Günümüzde giderek yaygınlaşan RES’lerin enerji sistemi üzerindeki etkileri ve sistemin RES’ler üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

İncelemelerde, farklı rüzgar hızları, farklı yüklenme durumları ve güç sisteminde sürekli olarak gerçekleştirilen anahtarlama operasyonlarının kurulan sistem üzerindeki etkilerinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

Tez çalışmasında, ülkemiz güç sisteminde bulunan büyük güçlü bir yük, yükü besleyen yüksek gerilim iletim hattı ve şebeke ele alınmıştır. “TÜBİTAK Güç Kalitesi Milli Projesi” kapsamında elde edilen yük ve şebekeye bağlı gerçek değerler kullanılarak çalışma gerçekleştirilmiştir.

Sistem modellendikten sonra, mevcut yükün yakınlarına kurulabilecek olan RES ile şebekeye paralel besleme yapılması durumu göz önüne alınmıştır.

1.3 Orijinal Katkı

Bu çalışmada, RES ile şebekenin birlikte çalışma koşullarında nonsinüoidal yüklenme koşulu ve anahtarlama yapılması hali ayrı ayrı ve aynı anda orijinal olarak gerçekleştirilmiştir.

Güç sistemlerinde nonlinear yükler sebebiyle oluşan ve etkinlikleri giderek artan harmonik bileşenlerin, yine enerji üretimindeki etkinliği hızla artan ve şebekeye paralel bağlı olarak yükleri besleyen RES’ler ve ele alınan sistem üzerindeki etkileri orijinal olarak analiz edilmiştir.

Yine incelemelerde lineer, nonlinear yüklenme durumları, farklı rüzgar hızları ve anahtarlama durumları yine orijinal olarak ele alınmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda bu tür sistemlerin harmonikli durumdaki davranışları ve harmoniklerin sistem davranışı üzerindeki etkileri bu tez çalışması ile ortaya konmuştur.

Bu tez çalışmasında güç sistemimizde var olan ve 174 km uzunluğundaki yüksek gerilim enerji iletim hava hattı ile şebekeden beslenen büyük güçlü bir yükün gerçek değerleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Senaryo olarak, yükün yakınlarına kurulacak olan RES ve mevcut şebeke tarafından paralel beslenmesi durumu incelenmiştir.

RES, 2 MW gücünde 4 adet sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbininden oluşturulmuştur. Üretilen enerjinin gerilimi, bir güç transformatörü yardımıyla yükseltilerek 5 km uzunluğundaki yeraltı kablosu ile sisteme bağlantısı yapılmıştır.

Analizleri yapılan sistem Matlab / Simulink paket programı kullanılarak modellenmiştir. Modelin doğru olarak çalışması sağlandıktan sonra, değişken rüzgar hızları, farklı yüklenme durumları ve sistemin çeşitli noktalarında meydana gelebilecek olan anahtarlama olaylarının kurulan sistem üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda özellikle farklı yüklenme durumları için ele alınan harmonik bileşenlerinin bu tür sistemler üzerindeki etkileri orijinal olarak ortaya konmuştur.

RÜZGAR SANTRALLERİNİN TANITIMI

Günümüzde, rüzgar santrallerinin sayısı ve önemi giderek artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar enerjisi, temiz ve ekonomik bir enerji olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle tüm dünyada, güç sistemi içerisindeki payının gün geçtikçe artırılması hedeflenmektedir.

Dünyadaki ilk rüzgar türbini üretimi 1980'lerin başında Danimarka'da gerçekleştirilmiştir. 20-30 kW gücündeki ilk rüzgar türbini kullanımı 1918 yılında yine ilk olarak Danimarka'da yapılmıştır. Günümüzde ise 7 MW'ın üzerinde güç üreten rüzgar türbinleri üretilmektedir. Dünyada 2011 itibarıyla kurulu güç değeri 238.351 MW, Avrupa'da ise 96.616 MW'tır. Bu kurulu güç içerisinde rüzgar enerjisinin katkısı ise 1996 yılında 1280 MW olan güç değeri 2011 yılı sonu itibarıyla 41.236 MW'a çıkmıştır.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu'nun (EPDK) Elektrik Piyasası Raporuna göre Ülkemizin 2010 yılındaki 49.524,1 MW olan kurulu güç miktarı, 2011 sonu itibarıyla 52.911,1 MW'a ulaşmıştır. Yine EPDK'nın raporuna göre 2010 yılında rüzgar kurulu gücü 1.320 MW, 2011 yılı sonu itibarıyla 1.728,7 MW seviyesine çıkmıştır [29].

RES'lerin şebekeye bağlantı kriterlerini sağlamaları büyük önem arz etmektedir. Bu konu üzerinde birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya da devam edilmektedir. RES'lerin şebeke bağlantılarında karşılaşılabilecek problemlerin giderilebilmesi, verimli ve sürekli enerjinin sağlanması açısından önemlidir.

Şebeke bağlantılı rüzgar türbinleri, senkron ve asenkron generatörlü değişken hızlı rüzgar türbinleri ve asenkron generatörlü sabit hızlı rüzgar türbinleri olarak üretilmektedir. Bu çalışmada modellenen sistemde sabit mıknatıslı senkron generatörlü değişken hızlı rüzgar türbini kullanılmıştır.

Rüzgâr, güneş enerjisinin dünyanın oldukça değişken olan yüzeyini eşit ısıtmamasından kaynaklanan sıcaklık, yoğunluk ve basınç farklarından dolayı oluşan yatay hava hareketleri olarak tanımlanmaktadır. Buradan hareketle, güneş var oldukça rüzgârın ve bunun neticesinde de rüzgar gücünün var olacağı açıktır.

Rüzgâr, önüne bir engel konulması veya sabit bir engelle karşılaşması halinde, onun üzerine bir basınç uygular. Böyle bir engelin harekete müsait olması durumunda, rüzgâr, o engelin hareket etmesine de sebep olur. İşte bu düşünceden hareketle, bir mil etrafında dönebilecek bir pervanenin (türbin) rüzgâr etkisi ile mil etrafında dönmesi mümkün olabilmektedir. Bu fikir günümüzdeki rüzgâr türbinleri ile eski çağlardaki yel değirmenlerinin ilk çalışma ilkelerini teşkil etmektedir [30].

2.1 Rüzgardan Güç Elde Edilmesi

V hızında hareket eden m kütleli havanın kinetik enerjisi,

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \text{ (Joule)} \quad (2.1)$$

eşitliği ile hesaplanır. v hacmindeki havanın kütlesi

$$m = \rho \cdot v \quad (2.2)$$

denklemini yardımıyla elde edilir [31]. Burada $\rho(\text{kg/m}^3)$ hava yoğunluğunu ifade etmektedir.

A alanına sahip V hızıyla hareket eden havanın t anındaki hacmi,

$$v = A \cdot V \cdot t \quad (2.3)$$

ise eşitlik 2.3 ve eşitlik 2.2 düzenlenip denklem 2.1’de yerine yazılırsa

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot t \quad (2.4)$$

elde edilir.

V hızıyla hareket eden havanın gücü ise birim zamandaki kinetik enerji olacağından,

$$P_w = \frac{dE_k}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot t \right) \quad (2.5)$$

denkleminde verildiği gibi rüzgar gücü, kinetik enerjinin zamana göre türevi alınarak hesaplanır [31].

Kinetik enerjinin zamana göre türevi alındığında V hızındaki rüzgar hızının birim zamandaki gücü bulunur.

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \text{ (Watt)} \quad (2.6)$$

Denklem 2.6'dan da görüldüğü gibi rüzgardan elde edilen güç, rüzgar hızına (V), rüzgar türbini rotor kanatlarının taradığı alana (A) ve hava yoğunluğuna (ρ) bağlı olarak değişmektedir. Hava yoğunluğu deniz seviyesinde, 1 atm basınçta, 15 °C sıcaklıkta $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ olarak tanımlanmaktadır.

Rüzgar türbinin mekanik gücü, rüzgardan elde edilen güç ile C_p performans katsayısının çarpımı ile elde edilir. Bu durumda türbin mekanik gücü,

$$P_m = P_w \cdot C_p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p \cdot V^3 \quad (2.7)$$

eşitliğinden hesaplanır [32].

Rüzgar türbinini mekanik moment, mekanik gücün rotor açısal hızına oranıdır ve (2.8) eşitliği ile hesaplanır [31].

$$T_m = P_m / \omega_m \quad (2.8)$$

2.2 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Günümüzde kullanılan rüzgar türbinleri kanat sayılarına, boyutlarına ve tiplerine bağlı olarak çok çeşitlilik gösterse de genelde türbinler, dönme eksenine göre sınıflandırılırlar. Rüzgâr türbinleri dönme eksenine göre yatay eksenli ve dikey eksenli olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar [33]. Her ne kadar türbinler yatay eksenli ve dikey eksenli türbinler olarak ikiye ayrılırsalar da, her iki tip türbin de aynı aerodinamik prensiplerle çalışırlar. Yararlı aerodinamik kuvvet türü olarak ise, taşıma ya da sürüklenme kuvvetlerini kullanırlar.

2.2.1 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinler

Bu tip türbinlerde dönme eksenini rüzgâr yönüne paraleldir. Kanatları ise rüzgâr yönüyle dik açı yaparlar. Ticari türbinler genellikle yatay eksenlidir. Rotor, rüzgârı en iyi alacak şekilde, döner bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. Yatay eksenli türbinler rüzgârı önden alan ve rüzgârı arkadan alan tipte imal edilmektedirler (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Yatay eksenli rüzgar türbini [34]

Modern yatay eksenli türbinlerin çoğu, rüzgârı önden alacak şekilde tasarlanırlar. Rüzgârı önden alan türbinlerin avantajı, kulenin oluşturduğu rüzgâr gölgelenmesinden etkilenmemesidir. Dezavantajı ise, türbinin sürekli rüzgâra bakması ve türbinin daha fazla güç üretmesini sağlayan sapma mekanizmasının bulunmasıdır.

Rüzgârı arkadan alan türbinlerde eğer rotor ve gövde uygun şekilde tasarlanmışsa, sapma mekanizmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu nedenle daha hafiftirler. Fakat rüzgârın yönüne göre serbestçe döndüğünden generatör bağlantı kablolarında burulmalara ve kopmalara sebep olabilir. Rüzgârı arkadan alan rüzgâr türbinlerinin

günümüzde yaygın bir kullanım yeri yoktur özellikle büyük çaplı rüzgar türbinlerinde tercih edilmemektedir [33].

2.2.2 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri

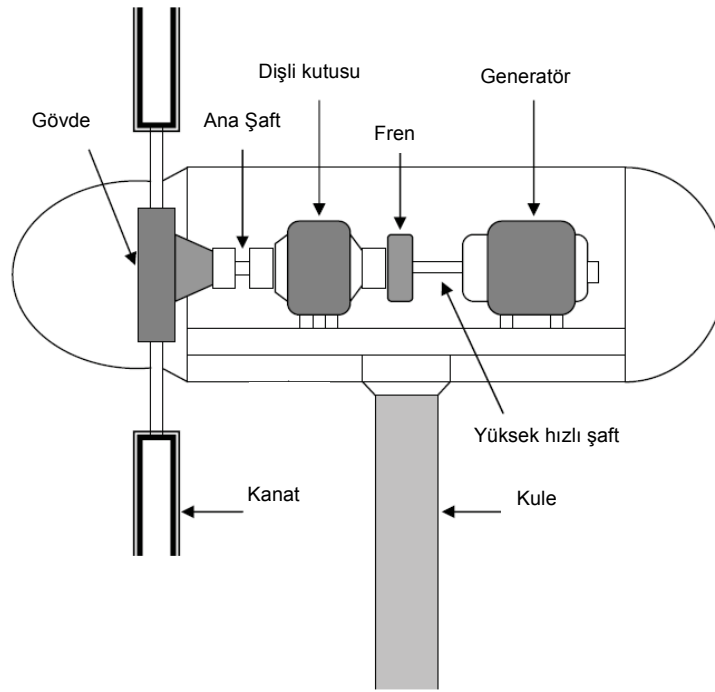
Dikey eksenli rüzgar türbinleri türbin mili düşey ve rüzgârın geliş yönüne diktir (Şekil 2.2). Savonius ve Darrieus olmak üzere iki tipi vardır. En önemli avantajları generatör, dişli kutusu vb. donanımlarının yerde olmasıdır. Türbini rüzgar yönünde çevirmeye gerek duyulmadığından sapma mekanizması (yaw) yoktur. Dezavantajları ise yere yakın olduğundan düşük rüzgar hızlarında çalışmaktadır, verimi düşüktür ve alışmaya başlaması için ilk hareketin verilmesi gerekmektedir bunun için de bir motora ihtiyaç duymaktadır [33].



Şekil 2.2 Dikey eksenli rüzgar türbini [34]

2.3 Rüzgar Türbinlerinin Yapısı

Rüzgar türbinleri en basit haliyle, rüzgar hızının sahip olduğu kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bir rüzgar türbininin genel yapısı kule, rotor (kanat ve gövde), dişli kutusu, fren sistemi, generatör, güç elektroniği dönüştürücüleri ve kontrol elemanlarından oluşur (Şekil 2.3). Kanatlar ve göbek, rotor olarak adlandırılır. Rüzgârın kinetik enerjisi rotor tarafından mekanik enerjiye çevrilir. Bu mekanik enerji dişli kutusu vasıtasıyla generatöre iletilir. Generatöre uygulanan moment generatörü döndürür ve elektrik enerjisi üretilir.



Şekil 2.3 Yatay eksenli rüzgar türbini genel yapısı [34]

2.3.1 Kule

Kule, yatay eksenli rüzgar türbin sistemine ait bütün bileşenleri üzerinde taşıyan kısımdır. Kuleler genellikle çelik yada beton malzemeden yapılırlar. Yapısı boru veya kafes şeklindedir. Rüzgar hızı, yerden yüksekliğe çıktıkça arttığından buna bağlı olarak rüzgar türbininden elde edilen güçte artar. Bu nedenle mümkün olduğunca yüksek kuleler tercih edilmektedir. Kuleler, rüzgârı iyi alacak şekilde, ancak büyük rüzgârlardan da etkilenmeyecek şekilde yapılmalı ve yerleştirilmelidir. Modern büyük kuleler tüp

şeklindedir ve kötü hava şartlarında içerisinde makine kabinine ulaşmayı sağlayabilir [35].

2.3.2 Rotor

Kanatlar ve kanatların birleştiği gövdenin oluşturduğu kısma rotor denir. Rüzgarın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren kısım olduğundan rüzgar türbin sisteminin önemli parçalarından biridir.

Bir rüzgar türbininde üretilen mekanik güç kanatların süpürdüğü alanla yani kanat uzunluğunun karesiyle değişmektedir. Kanatlar 1, 2, 3, 4 veya daha çok parçadan yapılır. Kanatlar, paslanmaya karşı dayanıklı galvanizli sacdan, çelikten, alüminyumdan, plastikte güçlendirilmiş camdan (GRP, Glass Reinforced Plastic), tahtadan, tahta laminetten veya plastikte güçlendirilmiş karbon fiber (CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastic) malzemelerden yapılabilmektedir. Kanatlar sabit açılı veya değişken açılı olarak üretilmektedir [35].

2.3.3 Dişli Kutusu

Rüzgar tarafından elde edilen mekanik enerji, rotoru düşük devirde ve yüksek momentte döndürmektedir. Generatör için gerekli olan düşük moment, yüksek devir sayısı dişli kutuları ile sağlanmaktadır. Dişli kutuları tek bir dişliden veya küçük dişlilerden oluşan dişli gruplarından oluşmaktadır. Dişli kutusu kullanımı, rüzgar türbin sisteminde kullanılacak generatöre bağlıdır. Rüzgar türbinlerinde kullanılan bazı generatörler dişli kutusu kullanmadan da enerji sistemine bağlanabilmektedirler.

2.3.4 Generatör

Generatörler, rüzgar türbin sisteminde, rotor tarafından üretilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren kısımdır, stator olarak adlandırılan sabit bir gövdenin içinde dönen bir rotordan oluşmaktadır. Rüzgar türbinlerinde genel olarak AC ve DC olmak üzere iki tip generatör kullanılmaktadır. Küçük güçlü rüzgar türbinlerinde DC generatörler kullanılırken, şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinde AC generatörler tercih edilmektedir [32]. Şönt (paralel) sargılı DC generatörler, rüzgar türbini uygulamaları için önemli elektrik makinelerindendir. Bu tip generatörler genellikle sabit mıknatıs

kapasitesinin ve mukavemetinin sınırlı olmasından dolayı küçük rüzgar türbinlerinde veya akü şarj eden rüzgar türbin sistemlerinde kullanılır. DC generatörler, yüksek maliyet ve bakım gereksiniminden dolayı günümüzde nadiren kullanılmaktadır [36], [37]. AC generatörler, asenkron ve senkron generatör olarak üretilmektedirler. Rüzgar türbinlerinde kullanılan AC generatör tipleri şöyledir;

A) Asenkron Generatör:

- 1) Sincap Kafesli Asenkron Generatör (SKAG)
- 2) Rotoru Sargılı Asenkron Generatör (RSAG)
 - i. Opti Slip Asenkron Generatör (OSAG)
 - ii. Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG)

B) Senkron Generatör:

- 1) Rotoru Sargılı Senkron Generatör (RSSG)
- 2) Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör (SMSG)

2.3.4.1 Asenkron Generatörler

Rüzgâr türbinlerinde en yaygın kullanılan generatör tiplerindendir. Bunun nedeni ise sağlamlığı, mekanik basitliği ve seri halde üretildiği için düşük maliyetidir. En büyük dezavantajı ise statorun reaktif mıknatıslanma akımına ihtiyaç duymasıdır. Asenkron generatör sürekli mıknatıslar içermediğinden uyarma akımı başka bir kaynaktan sağlanmaktadır. Bu durum fazladan reaktif güç tüketimine sebep olmaktadır ve bu güç, bir elektrik şebekesinden veya bir güç elektroniği sisteminden sağlanır. Rüzgar türbin sistemlerinde yaygın olarak sincap kafesli ve rotoru sargılı asenkron generatörler kullanılmaktadır [38].

2.3.4.1.1 Sincap Kafesli Asenkron Generator (SKAG)

Sincap kafesli asenkron generatörler (SKAG) sabit hızlı ve değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadır. Doğrudan şebekeye bağlı kullanıldığında şebekeden devamlı reaktif güç çektiği için reaktif güç kompanzasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tip generatörler normal çalışma ve direkt AC şebekeye bağlanmaları durumunda çok sağlam ve kararlılardır. SKAG'lerin en önemli avantajları mekanik basitlik, yüksek verim

ve düşük bakım maliyetidir. En temel dezavantajı anahtarlama sırasında geçici olayların ortaya çıkmasıdır. Diğer dezavantajlarından biri de, bir arıza durumunda reaktif güç kompanzasyon sistemine sahip olmayan SKAG'lerin şebekede gerilim kararsızlığına neden olmasıdır [38].

2.3.4.1.2 Rotoru Sargılı Asenkron Generaör (RSAG)

Rotoru sargılı asenkron generatörlerde (RSAG), rotorun elektriksel karakteristikleri dışarıdan kontrol edilebilir ve böylece bir rotor gerilimi uygulanabilir. Rüzgar türbinlerinde en yaygın kullanılan RSAG'ler, Opti Slip asenkron generatör ve çift beslemeli asenkron generatördür.

- Opti Slip Asenkron Generatör (OSAG)

Opti Slip asenkron generatörler rotor sargılarına ayarlanabilir harici bir rotor direncinin eklendiği rotoru sargılı asenkron generatördür. Generatörün statoru doğrudan şebekeye bağlıdır. Bu tip generatörün avantajları basit bir devre yapısı, kayıcı bileziklere (slip rings) ihtiyaç duymaması ve arttırılmış çalışma hız aralığıdır. En önemli dezavantajı aktif ve reaktif güç kontrolünün zayıf olmasıdır.

- Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG)

Çift beslemeli asenkron generatör rotor sargılarına monte edilmiş çift yönlü back to back IGBT gerilim kaynağı dönüştürücülü sabit frekanslı 3 fazlı şebekeye bağlı rotoru sargılı asenkron generatördür. ÇBAG'lerin avantajlarından bazıları, güç konverterleri vasıtasıyla rektif güç kontrol edilebilir, büyük güçlü offshore rüzgar türbinlerinde kullanıma uygundur. Bu tip generatörlerin maliyeti yüksektir ve bilezikleri bakıma ihtiyaç duymaktadır [39], [40].

2.3.4.2 Senkron Generatörler

Senkron generatörler, asenkron generatörlerle kıyaslandığında daha pahalı ve daha karmaşık yapıya sahiptirler. Senkron generatörlerde manyetik alan sabit mıknatıslar yada klasik alan sargısı kullanılarak oluşturulmaktadır. Şebekeye güç elektroniği dönüştürücüleriyle bağlanmaktadır, bu da tam güç kontrolünü sağlamaktadır. Rüzgar türbin sistemlerinde rotoru sargılı senkron generatör ve sabit mıknatıslı senkron generatörler yaygın olarak kullanılmaktadır [38].

2.3.4.2.1 Rotoru Sargılı (Alan Sargılı) Senkron Generatör (RSSG)

Rotoru sargılı (alan sargılı) senkron generatörlerin stator sargıları doğrudan şebekeye bağlıdır. Asenkron generatörler gibi reaktif güç kompanzasyon sistemine ihtiyaç duymazlar. Bu tip generatörler genellikle çok kutuplu olarak imal edildiklerinde dişli kutusuna ihtiyaç duymazlar. Bu durum dişli kutularında meydana gelen güç kayıplarını ortadan kaldırdığından RSSG için bir avantaj sağlamaktadır. Dişli kutusunun kullanılmaması, büyük ve ağır bir generatör kullanımını, sistem gücünün üzerinde tam ölçekli bir güç konverterine ihtiyaç duyulmasına sebep olmaktadır [40].

2.3.4.2.2 Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör (SMSG)

Sabit mıknatıslı senkron generatörler kendinden uyarım özelliğinden dolayı yüksek güç faktöründe çalışma ve yüksek verime sahiptirler. Akım şartlarına uygun olacak şekilde herhangi bir hızda güç üretebilirler. Herhangi bir dişli kutusu kullanılmadan generatör hız ayarı yapılabilir. Sabit mıknatıs maliyetinin yüksek olması ve yüksek sıcaklıkta mıknatısların özelliğinin bozulması dezavantajlarındandır.

2.4 Rüzgar Santrallerinin Güç Kalitesine Etkileri

Günümüzde, rüzgar santralleri, temiz bir enerji elde etmede avantaj sağlarken, enerji kalitesi açısından bazı önlemlerin alınmasını gerektirirler. Rüzgar türbinlerinin artmasına bağlı olarak güç sistemlerinde, gerilim dalgalanmaları, fliker seviyelerinde artış, gerilim ve akım harmonik değerlerinin standartlarda verilen sınır değerlerini aşması, reaktif güç ihtiyacında artış gibi güç kalitesi problemleri yaşanabilmektedir.

2.4.1 Gerilim Dalgalanmaları

Rüzgar türbinlerinde rüzgar hızına bağlı olarak meydana gelen gerilim değişimleri güç kalitesini etkileyen önemli problemlerden biridir. Bu problem rüzgar türbinlerinin güç sistemlerindeki sayısını sınırlandıran bir faktördür. Asenkron generatörlü rüzgar türbinleri reaktif güç tüketmektedir. Reaktif güç tüketimi, güç kayıplarının artmasına ve şebekede gerilim kararsızlığına neden olur. Asenkron generatörlerde reaktif güç tüketimi, yüksüz durumda nominal aktif gücün %35-40'ı, nominal yüklenme durumunda ise aktif gücün %60'ına kadar çıkabilmektedir. Nominal çalışma şartlarında

rüzgar türbini veya rüzgar çiftliğinin gerilim kalitesi parametreleri, sürekli güç üretimindeki kararlı hal gerilimi, çalışma süresince oluşan gerilim flikerleri ve anahtarlama ya bağlı oluşan gerilim flikerleri ile değerlendirilebilir [41].

Bir rüzgar türbini veya rüzgar çiftliğinin şebekeye bağlandığı noktadaki kısa devre gücü, gerilim kalitesini doğrudan etkilemektedir. Gerilim değişimi, şebekenin kısa devre empedansı, rüzgar türbininin aktif çıkış gücüne ve reaktif gücüne bağlıdır. Rüzgar türbinleri tarafından üretilen gücün değişimi, ortak kuplaj noktasında gerilim değişimlerine neden olmaktadır. Güçlü bir şebekede kısa devre empedansı küçük ise gerilim değişimleri küçük, zayıf bir şebekede kısa devre empedansı büyük ise gerilim değişimi büyük olmaktadır [41].

2.4.1.1 Reaktif Güce Bağlı Gerilim Değişimleri

Rüzgar türbinlerinde meydana gelen gerilim değişimleri reaktif güç ile doğrudan ilgilidir. Reaktif güç kontrol birimlerinin olduğu rüzgar türbinlerinde gerilim kontrolü de sağlanabilmektedir. Günümüzde kullanılan modern rüzgar türbinlerinde hem reaktif hem aktif güç kontrolü yapılabilmektedir. Klasik asenkron generatörlü sabit hızlı rüzgar türbinlerinde reaktif güç kontrolü tristör anahtarlama kompanzasyon sistemleri ile sağlanabilir. Ayrıca, reaktif güç kontrolü, ortak kuplaj noktasına bağlanacak dinamik reaktif güç kontrol ünitesi ile de sağlanabilmektedir [41], [42].

Çift beslemeli asenkron generatörlü veya tam kontrollü güç elektroniği dönüştürücülerine sahip rüzgar türbinlerinde reaktif güç kontrolü dönüştürücüler tarafından yapılmaktadır.

Sonuç olarak ortak kuplaj noktasında rüzgar hızı değişimlerinde meydana gelen aktif güç dalgalanmalarının neden olduğu gerilim dalgalanmaları, reaktif güç kontrolü ile azaltılabilir.

Klasik asenkron generatörlü rüzgar türbinlerinde aktif güç üretimi, reaktif güç tüketimini de etkilemektedir. Aktif güç üretiminde meydana gelen dalgalanmalar, reaktif güç tüketiminde de benzer dalgalanmalar meydana getirebilir. Sistemde reaktif güç kompanzasyonu yapılmamışsa meydana gelebilecek gerilim dalgalanmaları büyük önem kazanabilir. Asenkron generatörlü rüzgar türbin sistemlerinin reaktif güç ihtiyacı lokal olarak yapılan kompanzasyon ile karşılanabilir. Güç elektroniği dönüştürücülerinin

olduğu rüzgar türbinlerinde reaktif güç kontrolü yapılarak kayıplar azaltılabilir ve gerilim kararlılığı arttırılabilir. Büyük güçlü rüzgar türbinlerinde reaktif güç regülasyonu SVC veya STATCOM gibi merkezi bir reaktif güç kompanzasyonu sistemi ile sağlanabilir [42].

2.4.1.2 Gerilim Flikerleri

Şebeke geriliminde meydana gelen dalgalanmalar, dalgalanmanın şiddeti ve sıklığına bağlı olarak aydınlatma elemanlarında kırışmalara neden olmaktadır. Bu tip dalgalanmalar gerilim flikeri veya kısaca fliker olarak adlandırılır. Rüzgar türbinlerinde sürekli çalışma durumunda, generatör ve kapasitör anahtarlamalarında oluşan fliker emisyonu olmak üzere iki tip fliker emisyonu vardır. Güç sisteminde genellikle bu flikerlerden biri baskın olarak bulunmaktadır [41].

Generatör anahtarlama veya kondansatör anahtarlama olması durumunda rüzgar türbini çıkış gücünde meydana gelen hızlı değişimler, gerilimde de değişimlere neden olabilir. Bu değişimlerin şiddetine bağlı olarak aydınlatma elemanlarında titreşimler oluşabilir. Gerilim kalitesinin bozulmasına neden olan flikerlerin önlenmesi için üretim birimlerinin aşırı gerilim flikeri üretmesi engellenmelidir [41].

Şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinde fliker seviyelerinin standartlarda belirtilen sınır değerleri aşmaması istenir.

2.4.2 Gerilim Çökmeleri

Gerilim değerinin, ani bir şekilde nominal değerinin %10 - % 90 arasında bir değere düşmesi ve 1 ms ile 1 dakika gibi kısa bir sürede tekrar nominal değerine gelmesi gerilim çökmesi olarak adlandırılır. Rüzgar türbinlerinde olası bir gerilim çökmesi meydana gelmesi durumunda, generatörün stator ve rotor akımlarında, rotor gerilimlerinde bazı transientler oluşturur. Türbin kontrol sistemiyle bu durum nominal çalışma durumundaki haline getirilmeye çalışılır. Gerilimde ve akımda meydana gelen bu transientler aktif ve reaktif güçleri önemli ölçüde etkiler. Rüzgar türbin sistemlerinde gerilim çökmesi olması durumunda, generatör momenti artar, buna bağlı dönme hızı da artar. Bu durumda kontrol sistemi dönme hızını sabit tutmaya çalışır [41], [42].

2.4.3 Harmonikler

Nonlineer elemanlar tarafından üretilen ve sinüs dalga şeklinin bozulmasına neden olan harmonikler, akım artışına, güç kayıplarına, kontrol sisteminde problemlere ve cihazlarda aşırı ısınmalara sebep olmaktadır. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılan güç elektroniği dönüştürücüleri harmonik kaynağıdır. Birkaç bin Hz anahtarlama frekanslı darbe genişlik modülasyon (PWM) anahtarlama yöntemi harmoniklerin yüksek frekanslarda ortaya çıkmasına neden olmaktadır, bu harmonikler filtreler kullanılarak devreden kaldırılabilir. Günümüzde kullanılan rüzgar türbinlerinde harmonikler standartlarda verilen değerleri aşmamaktadır [41], [42].

2.5 Rüzgar Türbinlerinin Şebeke Entegrasyonu

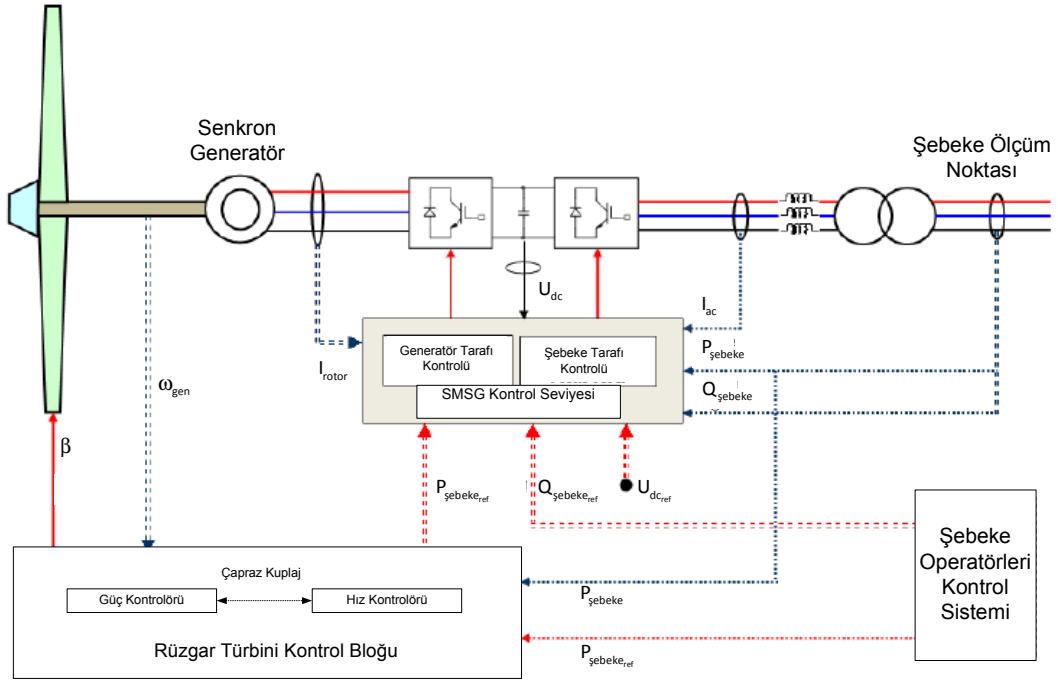
Günümüzde üç tip rüzgar türbini kullanılmaktadır. Bunlar sincap kafesli asenkron generatörlü sabit hızlı rüzgar türbinleri, çift beslemeli asenkron generatörlü değişken hızlı rüzgar türbini ve senkron generatörlü değişken hızlı rüzgar türbinleridir [43].

Tez çalışmasında, senkron generatörlü değişken hızlı rüzgar türbinlerinden, sabit mıknatıslı senkron generatörlü değişken hızlı rüzgar türbini modelini oluşturulduğundan bu tip rüzgar türbininin şebeke entegrasyonu incelenmiştir.

2.5.1 Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörlü Değişken Hızlı Rüzgar Türbini

Gerilim beslemeli dönüştürücü kullanılan sabit mıknatıslı senkron generatörlü (SMSG) rüzgar türbininde generatör mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Generatörün stator sargısı güç elektroniği devreleri yardımı ile şebekeye bağlanmaktadır. Bu tip rüzgar türbinlerinin şebekeyle bağlantısında farklı yöntemler kullanılmaktadır.

Şekil 2.4' de sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbini yapısı ve kontrol algoritması gösterilen sistemde, iki adet akım kontrollü dönüştürücü kullanılmaktadır. Literatürde back-to-back dönüştürücü olarak adlandırılan bu dönüştürücü sisteminde makine tarafı dönüştürücü (PWM doğrultucu) ve şebeke tarafı dönüştürücü (PWM inverter) bulunmaktadır [44].

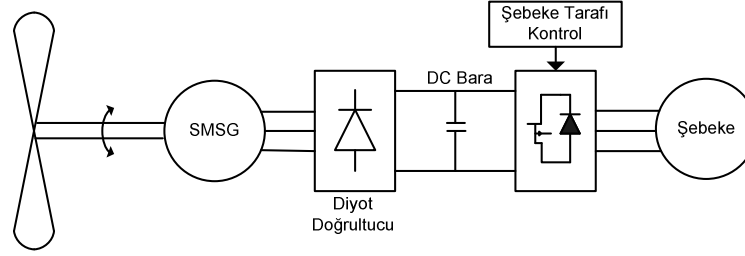


Şekil 2.4 Sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbini yapısı ve kontrol algoritması [44]

SMSG sistem kontrolünde generatör kontrolü, rüzgar türbini kontrolü ve rüzgar gücü kontrolü olarak üç farklı kontrol bulunmaktadır. Makine tarafı dönüştürücü rüzgar gücünden maksimum güç kontrolünü gerçekleştirmektedir. Şebeke tarafı dönüştürücü DC bara gerilimini sabitlemeye çalışır ve reaktif güç ayarını gerçekleştirir. Rüzgar türbini tarafında ise hız kontrolü ve güç sınırlama kontrolü gerçekleştirilir. Düşük hızlarda hız kontrolörü maksimum enerji elde etmek amacıyla PWM doğrultucu için güç ya da moment referansı üretir. Güç sınırlama kontrolü türbinde kanat açısını arttırıp azaltarak yüksek hızlarda nominal güç üzerinde bir güç aktarımını engeller. PWM doğrultucu generatörden maksimum güç noktasında çalışmayı sağlayan değerde sinüsoidal akımlar çekilmesini sağlarken PWM inverter şebekeye aktarılabacak olan güç değerini ayarlayarak DC bara geriliminin sabit kalmasını sağlamaktadır [44.]

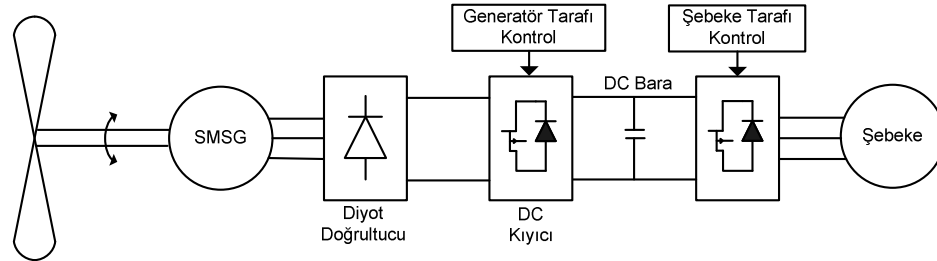
Sabit mıknatıslı senkron generatörlü rüzgar türbininin şebekeye bağlantısında kullanılan diğer bağlantı Şekil 2.5’de gösterildiği gibi, dönüştürücü sistem diyot doğrultucu, DC bara kondansör ve gerilim beslemeli PWM inverter içermektedir. SMSG’den elde edilen alternatif akım doğrultularak DC bara elde edilmektedir. DC barada depo edilen enerji inverter yardımı ile şebekeye aktarılmaktadır. DC bara

gerilimine bağı maksimum güç değişimine bağı olarak inverter tarafından DC bara gerilimi kontrolü yapılmaktadır. Bu yöntem alternatif olarak maksimum güç noktası takibi yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde ananometre rüzgar hızını ölçerek MPPT kontrolörü için güç referansı üretmektedir. Referans güç ile ölçülen DC güç karşılaştırılarak DC bara geriliminin yeni değeri tespit edilir. Üretilen DC bara gerilimine ve referans gerilim değerine bağı olarak inverterin akım kontrolörü PWM sinyalleri üretmektedir [45].



Şekil 2.5 Diyot doğrultuculu SMSG şebeke bağlantısı [45]

Şekil 2.6'da gösterilen Sabit mknastıslı senkron generatörlü rüzgar türbinin şebekeye bağlantısında kullanılan dönüşüm sisteminde, bir önceki sistemden farklı olarak doğrultucu ile DC bara arasında DC/DC dönüştürücü kullanılmaktadır. Bu dönüştürücü DC bara gerilimini sabitler ve inverter daha esnek bir kontrole sahip olur. Inverter güç kontrolü şebeke akımı genliği ve şebeke akımı ile gerilimi arasındaki faz açısı regülasyonu ile gerçekleştirilir. Farklı rüzgar hızlarında optimum DC bara gerilimi ve akımı maksimum türbin gücüne bağı olarak tespit edilmektedir. Güç ve generatör hız kontrolü için inverter gerilim oranı ve güç açısı değişken olarak kullanılmaktadır. Inverter kontrolü, DC bara gerilimini sabit tutmak ve maksimum aktif güç transferi için reaktif güç ayarı yapmak için de kullanılmaktadır [45].



Şekil 2.6 Diyot doğrultucu ve DC/DC dönüştürücülü SMSG şebeke bağlantısı [45]

GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ

Güç sistemine bağlanan nonlinear elemanlar, sistem içerisinde harmonik bileşenlere neden olmaktadır. Yapılan çalışmada, rüzgar santralleri ile şebekenin kaynak olduğu sistemde yük olarak nonlinear elemanlar bulunmaktadır. Bu nedenle harmoniklerin incelenmesi gerekmektedir.

Güç sistemlerinin ideal şartlar altındaki kaynak ve yükler için analizleri yapılırken, sabit genlik ve frekans değerine sahip, dalga şekli sinüs değişiminde olan bir gerilim kaynağından beslenen ve lineer elemanlardan oluşan bir sistem olarak ele alınabilir. Gerilim ve akımda, temel frekansın dışındaki frekanslarda oluşan bileşenler olarak tanımlanan harmoniklerin güç sisteminde bulunması durumunda, gerilim ve akımın dalga şekilleri sinüs değişimini kaybetmekte ve nonsinüoidal olmaktadır. Bu durumda yapılacak analizlerde, güç sisteminde tanımlanan elektriksel büyüklüklerin nonsinüoidal şartlar için yeniden tanımlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Akım ve gerilime ait nonsinüoidal dalga şekillerinin analizi için Fransız matematikçi ve fizikçisi olan Joseph Fourier tarafından tanımlanan fourier serilerinden yararlanılır [46]. Böylece çok sayıda sinüoidal değişim kullanılarak, nonsinüoidal değişime ait analizlerin gerçekleştirilmesi kolaylaştırılmış olur.

3.1 Harmonikler İle İlgili Elektriksel Büyüklükler

Güç sisteminde harmoniklerin olması durumunda, fourier serileri kullanılarak akımın ve gerilimin ani değerleri aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} i_n(t) = I_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega_1 t + \delta_n) \quad (3.1)$$

$$v(t) = \sum_{n=0}^{\infty} v_n(t) = V_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (3.2)$$

Bu denklemlerde,

n : harmonik mertebesi

i_n : n . harmonik akımının ani değeri

v_n : n . harmonik geriliminin ani değeri

I_0 : akımın dc (doğru akım) bileşeni

V_0 : gerilimin dc bileşeni

I_n : n . harmonik akımının efektif değeri

V_n : n . harmonik geriliminin efektif değeri

ω_1 : temel frekansa ait açısal frekans

δ_n : n . harmonik akımının faz açısı

θ_n : n . harmonik geriliminin faz açısı

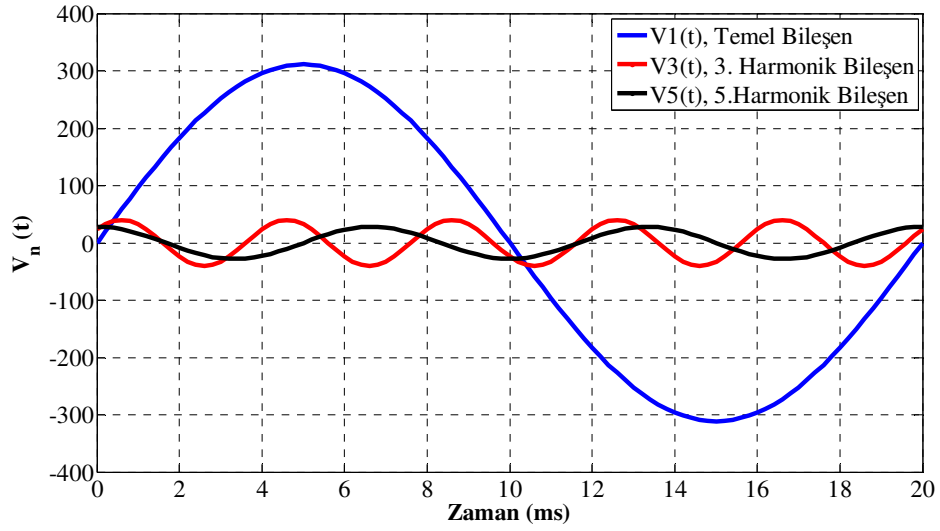
olarak ifade edilmiştir [47].

Harmonikli durumda akımın ve gerilimin efektif değerleri ise sırasıyla eşitlik (3.3) ve eşitlik (3.4)'deki gibi tanımlanmaktadır.

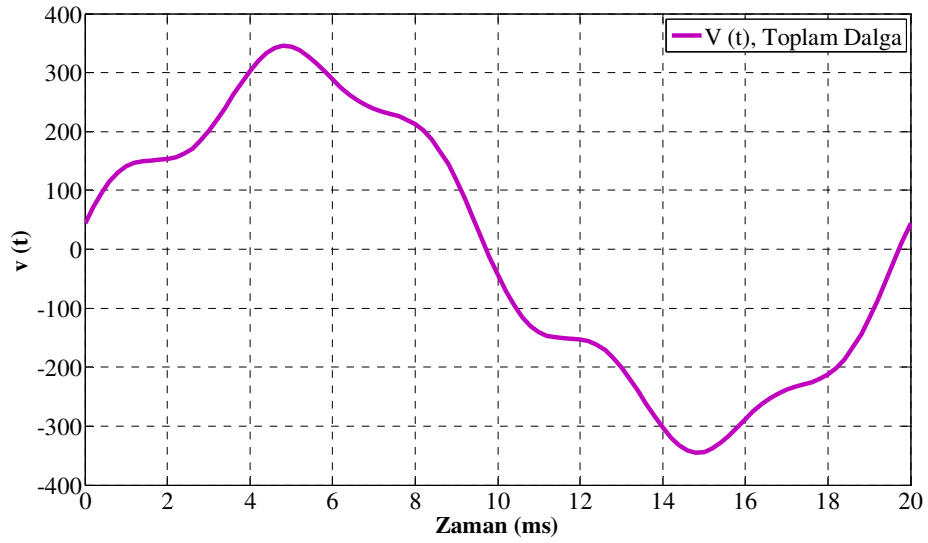
$$I = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2} = (I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots)^{1/2} \quad (3.3)$$

$$V = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} V_n^2} = (V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots)^{1/2} \quad (3.4)$$

Şekil 3.1'de çeşitli harmonik bileşenlerden oluşan bir gerilim dalgasının bileşenleri ve toplamı gösterilmiştir. Şekil 3.1.a'da temel frekans (50 Hz), 3. harmonik bileşen (150 Hz) ve 5. harmonik bileşen (250 Hz) frekanslarına ait gerilim dalga şekilleri, Şekil 3.1.b'de ise bunların toplamı olan nonsinüoidal gerilim dalgası gösterilmiştir.



(a) Temel bileşen, 3. ve 5. harmonik bileşen



(b) Toplam dalga

Şekil 3.1 Nonsinüsoidal gerilime ait dalga şekli

Harmonikli bir güç sisteminde, akım ve gerilimin eşitlik (3.1) ve eşitlik (3.2)'deki gibi tanımlanması durumunda aktif güç [47],

$$P = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n) \quad (3.5)$$

reaktif güç,

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n) \quad (3.6)$$

görünür güç ise,

$$S = VI = \left(\sum_{n=0}^{\infty} V_n^2 \right)^{1/2} \cdot \left(\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2} \quad (3.7)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Harmonikli durumda görünür güç ifadesi,

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (3.8)$$

eşitliği tanımlanmaktadır. Buradaki D, distorsiyon gücünü belirtmektedir.

Sinüsoidal ve nonsinüsoidal şartlar altında güç faktörü,

$$GF = \frac{P}{S} \quad (3.9)$$

eşitliği ile hesaplanır [47].

3.2 Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)

Güç sistemindeki harmonikler bileşenler sebebiyle oluşan sinüsoidal değişimden uzaklaşmayı yani bozulmayı tespit etmek ve harmonikleri sınırlandırmada bir ölçüt belirlemek amacıyla kullanılan tanımlamadır. Akım ve gerilim için tanımlanan THD değerleri sırasıyla [47],

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.10)$$

ve

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (3.11)$$

olarak ifade edilir. Her bir harmonik bileşenin temel bileşene oranı olarak tanımlanan tekil harmonik distorsiyonu ise, akım ve gerilim için,

$$HD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (3.12)$$

$$HD_V = \frac{V_n}{V_1} \quad (3.13)$$

eşitlikleri ile hesaplanır.

Yükün harmonik etkinliğini ortaya koymak için tanımlanan toplam talep distorsiyonu [47],

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (3.14)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada, I_L orta kuplaj noktasından, yük tarafından bir yıl boyunca çekilen maksimum akımların ortalama değeridir.

3.3 Harmonik Kaynakları

Güç sistemlerinde gerilim ve akımın dalga şeklinin (sinüs değişiminin) bozulmasına neden olan harmonik bileşenleri, akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan elemanlar tarafından üretilmektedir. Günümüzde yarı-iletken teknolojisine bağlı gelişimlerde giderek artan yarı-iletken elemanların kullanımı, güç sistemlerinde harmoniklerin etkilerinin artmasına neden olmuştur.

Harmoniklerin oluşmasına neden olan başlıca kaynaklar,

- Generatörler,
- Transformatörler,
- Doğrultucular,
- Ark fırınları,
- Gaz deşarjlı aydınlatma elemanları,
- Statik VAR kompanzatörler,
- Eviriciler,
- Yarı iletken elemanlar,
- Motorlar,
- Senkron makinaların uyarılması için kullanılan diyot ve tristörlü dönüştürücüler,
- Fotovoltaik sistemler,
- Bilgisayarlar, yazıcı, tarayıcı v.b. ofis ekipmanları,

- Elektronik balastlar,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Anahtarlama güç kaynakları,
- Kaynak makineleri,
- Kontrol devreleri,
- Frekans dönüştürücüleri,
- Yüksek gerilim doğru akım (HVDC) sistemleri.

olarak verilebilir [47]. Tez çalışmasında, simülasyonu gerçekleştirilen ve güç sisteminde kullanılan harmonik kaynağı olan elemanlardan bazıları aşağıda açıklanmıştır.

3.3.1 Generatörler

Generatörler doğal harmonik kaynaklarından biridir. Stator sargıları yıldız veya üçgen bağlanması halinde farklı harmonikler üretirler. Stator sargıları yıldız bağlanmışsa, faz gerilimlerinde 3 ve 3'ün katı frekanslı harmonikler bulunur ancak fazlar arası gerilimlerde bu harmonikler bulunmaz. Generatör stator sargıları üçgen bağlıysa, 3 fazlı hatta 3 ve 3'ün katı harmonikler bulunmaz ancak sargılardan büyük kayıplara neden olan 3'ün katı frekanslı sirkülasyon akımları geçer.

3.3.2 Transformatörler

Transformatör gibi demir çekirdek üzerine yerleştirilmiş bobinlerden oluşan tüm elemanlar harmoniklere sebep olmaktadır. Transformatörlerin harmonik üretimi demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, transformatöre uygulanan sinüsoidal uyarma akımı sonucu devrede sinüsoidal akım ve gerilim oluşmamaktadır [48]. Mıknatıslanma akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi transformatörün bağlantı grubu, primerin yıldız bağlı olması halinde, yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmaması ve transformatördeki manyetik devrenin geometrik yapısına bağlı olarak değişmektedir.

3.3.3 Konverterler

Güç sistemlerinde harmoniklerin oluşmasına sebep olan nonlineer elemanlardan biri de konverterlerdir. Konverterler, akımın periyodik olarak kesilmesi esasına dayanan çalışma prensiplerinden dolayı sinüs dalga şeklini bozmaktadır. Üç fazlı konverterler, üç

ve üçün katı harmonikler üretmediğinden dolayı bir fazlı konverterlere göre daha avantajlıdır [47].

3.3.4 Ark Fırınları

Ark fırınları büyük güçlü nonlinear elemanlar olup güç sisteminde bulunan nonlinear yükler arasında büyük önemi vardır. Ürettikleri harmonikler geniş bir spektruma sahiptir. Ark fırınlarındaki ateşleyici elektrotların özellikleri ve elektrik arkının akım-gerilim karakteristiğinin lineer olmaması sebebiyle harmonik oluşmasına sebep olmaktadır [49]. Ark fırınlarının empedans dengesizliği, sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının anlık değişim göstermesine sebep olmaktadır.

3.4 Harmoniklerin Güç Sisteminde Meydana Getirdiği Etkiler

Harmonik bileşenler, akım ve gerilimin sinüsoidal dalga şeklini bozmalarından dolayı güç sisteminde ve güç sistemindeki elemanlar üzerinde çok sayıda olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Şebeke frekansının katlarından oluşan akım harmoniklerinin sebep olabileceği bir rezonans durumunda oluşacak yüksek değerdeki akım ve gerilimler sistemdeki elemanlara zarar verebilir [50], [51]. Harmoniklerin bulunduğu güç sisteminde karşılaşılabilecek başlıca problemler,

- Akımda olabilecek harmonik bileşenlerinden dolayı gerilim düşümünde artma,
- Güç sisteminde ve yüklerde ek kayıplar,
- Generatör ve şebeke geriliminin dalga şeklinin sinüs formunun bozulması,
- Kompanzasyon tesislerindeki kondansatörlerin harmonikler nedeniyle aşırı yüklenmeleri sonucu hasar görmeleri,
- Harmonikler sebebiyle koruma sistemlerinin hatalı çalışması,
- İzolasyon malzemelerinin delinmesi veya zorlanması,
- Asenkron ve senkron motorlarda salınımların oluşması sonucu aşırı ısınmalar,
- Kontrol sisteminde hatalı çalışmalar,
- Aydınlatma lambalarında titreşimlerin oluşması,
- Ölçü cihazlarında yanlış ölçme,
- Harmonik rezonansın meydana gelmesi,

olarak sıralanabilir [47].

3.5 Harmonik Standartları

Güç sistemlerinde harmonik bileşenlerin genlik ve merteye olarak her geçen gün artması nedeniyle bunlardan kaynaklanan olumsuz etkileri de artmaktadır. Teknik ve ekonomik olarak ortaya çıkan olumsuz etkilerin giderilmesi bakımından sınırlamalar getirilmiş olup uluslararası kuruluşlar ve ülkeler tarafından harmonik standartları oluşturulmuştur. Çeşitli ülkelerde, farklı gerilim seviyeleri için kullanılan toplam harmonik distorsiyonu sınırları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Çeşitli ülkelerde kullanılan gerilim harmonik standartları [47]

Ülkeler								
A.B.D.			Almanya		Fransa		İngiltere	
Gerilim Seviyesi (kV)		THD _v (%)	Gerilim Seviyesi (kV)	THD _v (%)	Gerilim Seviyesi (kV)	THD _v (%)	Gerilim Seviyesi (kV)	THD _v (%)
Genel	2.4-69	5	Tüm Gerilim Seviyeleri	10	Tüm Gerilim Seviyeleri	1.6	0.415	5
	115≤	1.5					6.6-11	4
Özel	2.4-69	8					33-66	3
	115≤	1.5					132	1.5

Gerilimin toplam harmonik distorsiyon değerleri için IEEE 519-1992 standardında verilen sınır değerleri yüzde olarak Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 IEEE Standartlarına göre gerilimin THD sınır değerleri [52]

Bara gerilimi (V _n)	Tekil Harmonik (%)	THD _{Vn} (%)
V _n ≤ 69kV	3.0	5.0
69 < V _n ≤ 161kV	1.5	2.5
V _n > 161kV	1.0	1.5

Ülkemizde uygulanan ve Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği’nde verilen 380 kV gerilim seviyesindeki iletim sistemindeki THD sınır değerleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği 380 kV THD sınır değerleri

Tek Harmonikler (3’ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3’ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim(%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)
5	1.25	3	1.0	2	0.75
7	1.0	9	0.4	4	0.6
11	0.7	15	0.2	6	0.4
13	0.7	21	0.2	8	0.4
17	0.4	>21	0.2	10	0.4
19	0.4			12	0.2
23	0.4			>12	0.2
25	0.4				
>25	0.2+0.2 (25/n)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi % 2					

Yürürlükteki akım harmoniklerine ait “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği”ndeki standartlar Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4 Akım harmoniği sınır değerleri

Harmonik Sırası		OG 1<Un≤34,5 kV					YG 34,5<Un≤380 kV					ÇYG Un>380 kV				
Grup	No	I _L /I _{SC}					I _L /I _{SC}					I _L /I _{SC}				
		<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	> 1000
T E K H A R M O N İ K L E R	3	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	5	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	7	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	9	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	11	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	13	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	15	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	17	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	19	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	21	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	23	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	25	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	27	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	29	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	31	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	33	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	h>33	0,3	0,5	0,7	1	1,4	0,15	0,25	0,35	0,5	0,7	0,75	0,12	0,17	0,25	0,35
Çift harmonikler izleyen tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.																
TTD		5	8	12	15	20	2,5	4	6	7,5	10	1,3	2	3	3,75	5

Çizelge 3.4’de sistemin ortak bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımı I_{SC}, ortak bağlantı noktasında ölçülen maksimum yük akımı ise I_L olarak ifade edilmektedir.

BÖLÜM 4

SİSTEM TANITIMI

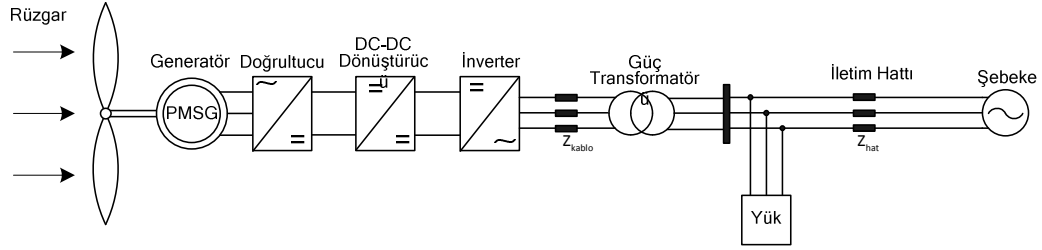
Yapılan çalışmada, rüzgar santrali ile şebekenin yükü birlikte beslemesi irdelenmiştir. Bu bölümde sistemi meydana getiren rüzgar santralinden güç transformatörüne, güç transformatöründen iletim hattına ve şebekeye kadar sistem elemanlarının tanıtımı yapılmış olup güç sistemine bağlı yük ile güç sistem elemanlarının modellenmesi verilmiştir.

380 kV'luk şebekeden beslenen ve harmonik bileşenler içeren bir yükün, aynı zamanda yük yakınlarında kurulu olan bir RES tarafından da beslenmesi durumu incelenmiştir. Sistem kurulurken 2 MW'lık 4 adet rüzgar türbininden oluşan RES, bu santralin yüke bağlantısı için 5 km uzunluğunda yeraltı kablosu kullanılmıştır. Şebeke tarafı için 174 km uzunluğunda hava hattı ve kaynak olarak da sonsuz güçlü şebeke modelinden yararlanılmıştır. Yapılan simülasyonlarda, önce yükteki harmonik bileşenler ihmal edilerek lineer yük modeli daha sonra, harmonikli bileşenleri içeren nonlineer yük modeli gözönüne alınmıştır.

Yukarıda açıklanan sistem kurulduktan sonra farklı anahtarlama durumları (yük, RES ve RES'deki türbinlerden iki tanesi) için sistem davranışı incelenmiştir. Simülasyon çalışmaları Şekil 4.1'deki sistem modeli Matlab/Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

RES modellenirken, sabit mıknatıslı senkron generatör, diyot doğrultucu, yükseltici tip DC/DC dönüştürücü, inverter ve çıkış filtresi bulunan rüzgar türbininden oluşan rüzgar çiftliği MATLAB/Simulink programı kullanılmıştır. Sistemde rüzgarın sahip olduğu kinetik enerji, rotor vasıtasıyla generatöre mekanik güç olarak aktarılmakta ve generatör mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Generatörün ürettiği

enerji diyot doğrultucu yardımı ile DC enerjiye dönüştürülmekte ve doğrultucu çıkışında DC gerilim elde edilmektedir. Bu DC gerilim, yükseltici tip DC / DC dönüştürücü ile yükseltilerek inverter girişinde sabit bir DC bara gerilimi oluşturulmuştur. DC barada elde edilen enerji inverter yardımı ile alternatif enerjiye dönüştürülerek filtre üzerinden transformatöre ve iletim hattı aracılığıyla şebekeye aktarılmıştır. İletim hattına doğrudan bağlı yük, rüzgar çiftliği ve şebeke tarafından beslenmiştir.



Şekil 4.1 Sistem modeli

4.1 Türbin Modeli

Rüzgar hızının sahip olduğu kinetik enerji, rüzgar türbinin kanatları tarafından mekanik enerjiye dönüşür. Türbin rotorunun çıkışındaki mekanik güç ve mekanik moment,

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (4.1)$$

$$T_m = \frac{\lambda}{\omega_m} \cdot P_m = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V^2 / \omega_m \quad (4.2)$$

eşitlikleri ile hesaplanır [53].

Burada,

R: kanat yarıçapı (m),

ρ : hava yoğunluğu (kg/m^3),

V: rüzgar hızı (m/sn),

C_p : rüzgar türbinin güç katsayısı (performans sabiti)

λ : çevresel hız oranı

ω_m : türbin rotor açısal hızı (rad/sn)

β : kanat açısı (°),

olarak tanımlanır.

Çevresel hız oranı (λ), türbin rotor hızı, rüzgar hızı ve türbin kanat yarıçapının bir fonksiyonudur ve

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_m}{v} \quad (4.3)$$

ile hesaplanır.

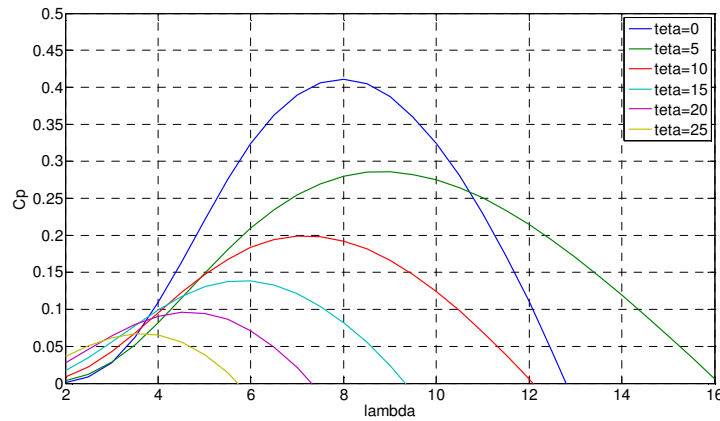
Güç katsayısı C_p , kanat eğim açısı β (°) ve çevresel hız oranı λ 'nın nonlineer bir fonksiyonudur. Bu fonksiyon rüzgar türbini rotor tipine bağlı olduğundan literatürde farklı formüllerle karşılaşılmaktadır [16], [54], [55], [56], [57], [58]. Simülasyon çalışmasında kullanılan güç katsayısı,

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(c_2 \frac{1}{\theta} - c_3 \cdot \beta - c_4 \cdot \beta^x - c_5 \right) e^{-c_6 \frac{1}{\theta}} \quad (4.4)$$

eşitliği ile verilir [55]. Buradaki,

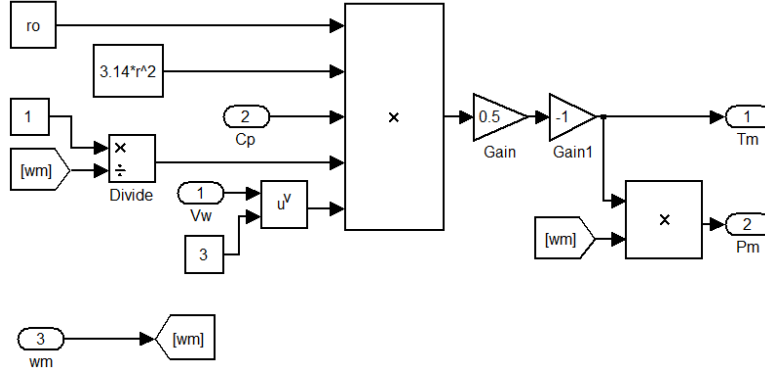
$$\frac{1}{\theta} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{1 + \beta^3} \quad (4.5)$$

eşitliği ile elde edilir. Burada $c_1 = 0.5$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 0$, $c_5 = 5$ v $c_6 = 21$ alınmıştır [55]. Şekil 4.2'de farklı kanat açıları için güç katsayısının çevresel hız oranına bağlı değişimi verilmiştir.



Şekil 4.2 Kanat açısı ve çevresel hız oranına bağlı C_p değişimi

Şekil 4.3’de verilen blok diyagramda görüldüğü gibi sistemde farklı rüzgar hızları için türbinin mekanik gücü ve momenti hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlere göre rotor optimum açısıl hızları tespit edilmiştir.



Şekil 4.3 Rüzgar türbini Matlab/Simulink blok diyagramı

Simülasyon büyük ve karmaşık olduğu için türbin modeli ayrı çalıştırılmış ve elde edilen rotor açısıl hız değeri (ω_m) değeri ana simülasyona girilmiştir.

4.2 Generatör Modeli

Simülasyon çalışmasında rüzgar türbininde, sabit mıknatıslı senkron generatör tercih edilmiştir. Generatör modelinin oluşturulmasında Park dönüşümü kullanılarak generatörün d-q iki eksen modeli elde edilmiştir. Böylece makinanın aktif reaktif güç bileşenleri birbirinden ayrılarak bağımsız kontrolleri sağlanmış ve makine modeli daha basit hale getirilmiştir.

Sabit mıknatıslı senkron generatörün (SMSG) d-q eksenindeki akımın matematiksel ifadesi aşağıda gösterildiği gibi yazılabilir [59].

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{-R_s i_d + v_d + \omega_e L_q i_q}{L_d} \quad (4.6)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{-R_s i_q + v_q - \omega_e \Psi_f - \omega_e i_d L_d}{L_q} \quad (4.7)$$

Burada;

v_d : d eksen stator gerilimi

v_q : q eksen stator gerilimi

i_d : d eksenli stator akımı

i_q : q eksenli stator akımı

R_s : stator direnci

L_d : d eksenli manyetik endüktansı

L_q : q eksenli manyetik endüktansı

ψ_f : sürekli mıknatıs akısı

ω_e : elektriksel açısal hızı

olarak ifade edilmiştir.

Sürekli mıknatıslı senkron generatörün moment ve güç ifadeleri [59], [60],

$$T_e = \frac{3}{2} p \left[(L_d - L_q) i_q i_d + \psi_f i_q \right] \quad (4.8)$$

$$P_e = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (4.9)$$

eşitlikleri ile elde edilir. Burada p, çift kutup sayısını ifade etmektedir.

Rüzgar türbininin rotor açısal hızı ile generatörün elektriksel açısal hızı arasında bağıntı eşitlik (4.10)'da verilmiştir.

$$\omega_e = p \cdot \omega_m \quad (4.10)$$

4.2.1 Park Dönüşümü

Bu dönüşüm vektör kontrolünün en önemli kısmıdır. 3-faz sabit düzlemden 2-faz rotor düzlemine dönüşüm bu metotla gerçekleştirilir. Park dönüşümünün matris formunda genel ifadesi [61];

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

şeklindedir.

4.2.2 Ters Park Dönüşümü

2-faz rotor düzleminde 3-faz stator düzlemine dönüştürmek için Ters Park (Park⁻¹) dönüşümünün uygulanması gerekir.

Ters Park dönüşümünün matris formunda genel ifadesi [61];

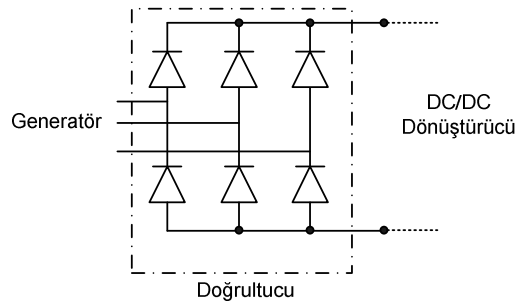
$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) & 1 \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

şeklinde. Tez çalışmasında kullanılan sabit mıknatıslı senkron generatör parametreleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Simülasyon çalışmasında, türbin rotorundan elde edilen optimum açısal hızlar generatör girişine uygulanarak doğrultucu çıkışındaki dc bara gücü ölçülerek farklı rüzgar hızlarındaki optimum güç değişim tablosu elde edilmiştir. Böylece değişken rüzgar hızları için üretilen güçler tespit edilerek inverterin şebekeye aktaracağı güç için üç faz akım referansları üretilmiştir.

4.3 AC / DC Dönüştürücü (Doğrultucu)

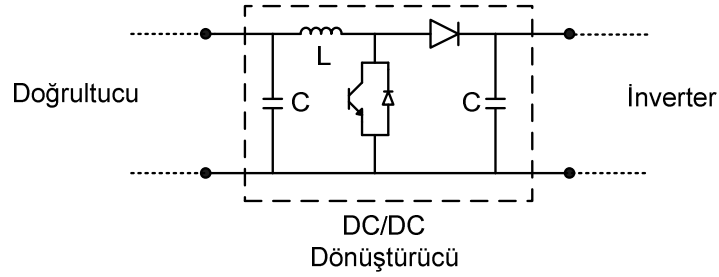
Rüzgar hızına bağlı olarak generatör değişken frekans ve genlikte bir gerilim üretmektedir. 3 fazlı kontrolsüz tam dalga doğrultucu kullanılarak AC gerilim DC gerilime dönüştürülmüş ve değişen frekans etkisi ortadan kaldırılmıştır. Şekil 4.4’de doğrultucunun genel devre şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.4 AC/DC dönüştürücü devre şeması

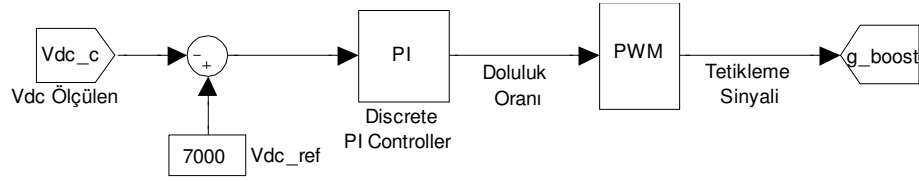
4.4 DC / DC Dönüştürücü (Boost)

Doğrultucu aracılığıyla doğrultulan generatörün çıkış gerilimi rüzgar hızına bağlı olarak değiştiğinden, doğrultucu çıkışında elde edilen DC gerilim yükseltici tip DC/DC dönüştürücü yardımı ile yükseltilerek inverter girişinde sabit bir DC bara gerilimi elde edilmektedir. Şekil 4.5’de yükseltici tip DC / DC dönüştürücünün devre şeması verilmiştir.



Şekil 4.5 DC/DC dönüştürücü devre şeması

DC / DC dönüştürücünün kontrolünü gösteren devre şeması Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



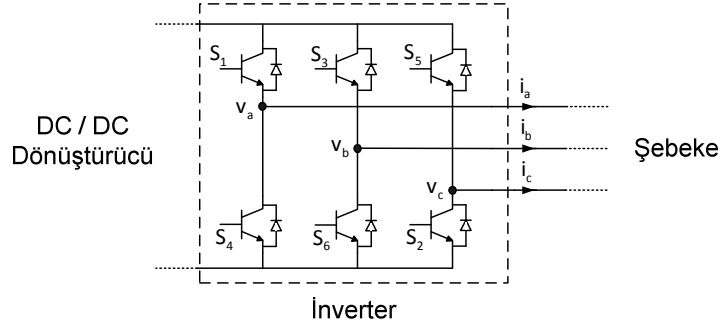
Şekil 4.6 DC / DC dönüştürücü kontrolü

Kontrol devresinde, belirlenen referans DC bara geriliminden, DC / DC dönüştürücü çıkışındaki kondansatör uçlarında ölçülen DC bara gerilimi çıkartılarak gerilim hatası elde edilmektedir. Bu hata PI kontrolöre verilerek, kontrolör çıkışındaki referans sinyal testere dişi sinyal ile karşılaştırılarak (PWM bloğu) yükseltici tip DC/DC (boost) dönüştürücünün tetikleme sinyali üretilmektedir. Bu tetikleme sinyaline bağlı olarak boost dönüştürücü çıkışındaki DC barada sabit bir DC gerilim elde edilmektedir.

4.5 DC / AC Dönüştürücü (İnverter)

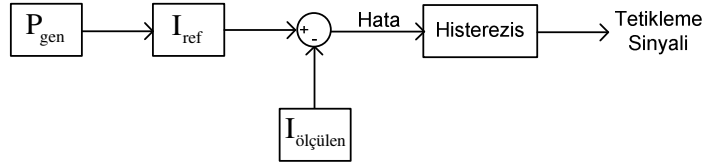
DC / DC dönüştürücü aracılığıyla sabitlenen inverter girişindeki DC gerilim istenilen şartlarda (frekans, genlik) AC gerilime dönüştürülmüştür. Böylelikle değişen rüzgar hızına bağlı güç değişimi şebeke standardına (şebeke gerilimi, frekansı) uygun olarak

şebekeye aktarılmaktadır. İnverterin temel devre şeması Şekil 4.7’de verilmiştir. Simülasyon çalışmasında 3 fazlı 6 anahtarlı bir inverter kullanılmıştır.



Şekil 4.7 DC / AC dönüştürücü devre şeması

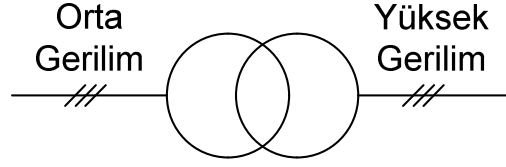
Şekil 4.8’de gösterilen inverter kontrol devresinde, inverterin kontrolü histerezis akım kontrol yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Her bir faz için üretilen şebeke akım referansı ölçülen akımdan çıkartılarak akım hatası elde edilmiştir. Bu akım hatası histerezis kontrol bloğuna uygulanmıştır. Bu blok akımın belirlenen bant genişliği içinde kalmasını sağlamak üzere inverterin kontrol sinyallerini üretmektedir. Bir fazın akım hatası üst bant sınırına ulaştığında inverterin ilgili faz kolunun üst anahtarı iletme sokularak faz akımının artması sağlanmaktadır. Artan faz akımı ile akım hatası azalmakta ve hata alt bant değerine ulaştığında üst anahtar iletimden çıkartılarak alt anahtar iletime sokulur. Böylece akımın belirlenen bant içerisinde hareket etmesi sağlanır.



Şekil 4.8 DC / AC dönüştürücü kontrolü

4.6 Transformatör

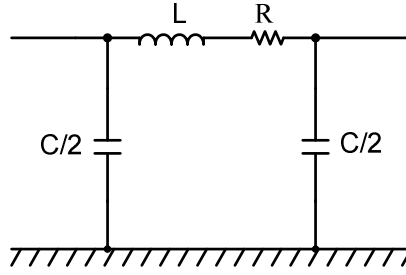
Tez simülasyon çalışmasında, alçak gerilim seviyesindeki inverter çıkış gerilimini 380 kV gerilim seviyesindeki iletim hattı gerilim seviyesine çıkarmak için bir güç transformatörü kullanılmıştır (Şekil 4.9).



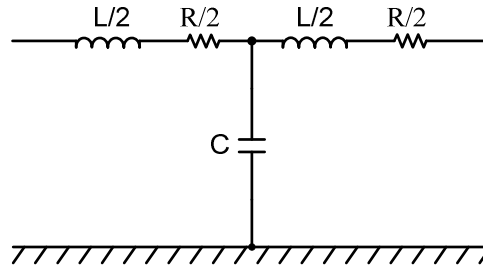
Şekil 4.9 Güç transformatörü

4.7 İletim Hattı

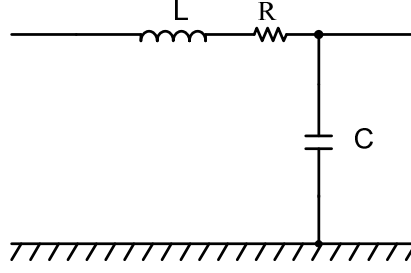
Güç sistemlerinde iletim hatları, 80 km uzunluğa kadar kısa iletim hattı, 80-240 km aralığında orta uzunluktaki iletim hattı ve 240 km'den daha uzun hatlar için uzun iletim hattı olarak modellenmektedir. Tez çalışmasında 174 km uzunluğundaki bir iletim hattı kullanıldığından orta uzunluktaki iletim hattı modeli kullanılmıştır. Orta uzunluktaki iletim hatlarının tek faz eşdeğeri nominal π , nominal T veya nominal L modeli olarak gösterilir. Bu modellerin eşdeğer devreleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



(a) Nominal π modeli



(b) Nominal T modeli



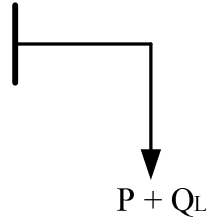
(c) Nominal L modeli

Şekil 4.10 Orta uzunluktaki iletim hattına ait tez faz eşdeğer devreleri

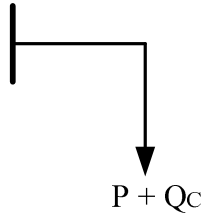
Tez çalışmasında orta uzunluktaki iletim hattının nominal π modeli kullanılmıştır. 174 km uzunluktaki iletim hattına ait parametreler Çizelge 5.5' de verilmiştir.

4.8 Yük Modeli

Güç sistemlerinde yük modellenirken, sabit empedans ve sabit güç modelleri kullanılmaktadır. Tez çalışmasında sabit güç modeli kullanılmıştır. Yükün endüktif ve kapasitif olması durumlarında kullanılan yük modelleri Şekil 4.11'da verilmiştir.



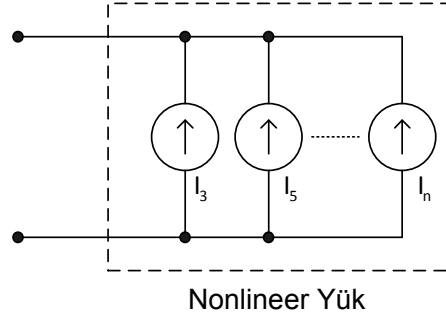
(a) Endüktif yük modeli



(b) Kapasitif yük modeli

Şekil 4.11 Sabit güç yük modelleri

Harmonikli yük modeli oluşturulurken, harmonikler akım enjeksiyon yöntemi ile modellenmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 Nonlinear yük modeli

4.9 Şebeke

Şebeke modeli oluşturulurken 380 kV gerilim seviyesinde, sonsuz güçlü bir bara kullanılmıştır. Sonsuz güçlü şebeke kullanılması ile istenildiği kadar yükün karşılanması mümkün olmakta ve yük değişimleri durumunda gerilimin sabit değerde kalması sağlanmaktadır.

SAYISAL UYGULAMA

5.1 Giriş

Bu bölümde tez konusuna uygun analizler için şebeke ve rüzgar elektrik santralinden (RES) beslenen bir yüke ait simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmalarında, ülkemiz güç sistemine bağlı olan gerçek bir yük ve yükün üzerinden beslendiği gerçek bir hat dikkate alınarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Çalışmada, yükün sisteme bağlandığı noktadan alınan ölçümlerle elde edilen yüke ait elektriksel büyüklükler ve besleme hattına ait gerçek değerler kullanılmıştır.

Sistemin farklı durumlardaki davranışlarını incelemek amacıyla çeşitli senaryolar üretilerek, bu çalışma durumlarının elektriksel büyüklükler üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Öncelikle, ölçülen yüke ait değerler ve hat parametreleri kullanılarak, mevcut sistem modellenmiştir. Modellemeler yükün dengeli olduğu kabulü yapılarak gerçekleştirilmiştir. Sistem kurulduktan sonra, dünyada ve ülkemizde giderek yaygınlaşan rüzgar elektrik santrallerinin etkisinin incelenmesi amacıyla, yük yakınlarına nominal gücü 2MW olan 4 adet rüzgar türbininden oluşan bir rüzgar çiftliği kurulması ve yükün şebeke ile beraber bu santralden beslenmesi durumu kurgulanmıştır.

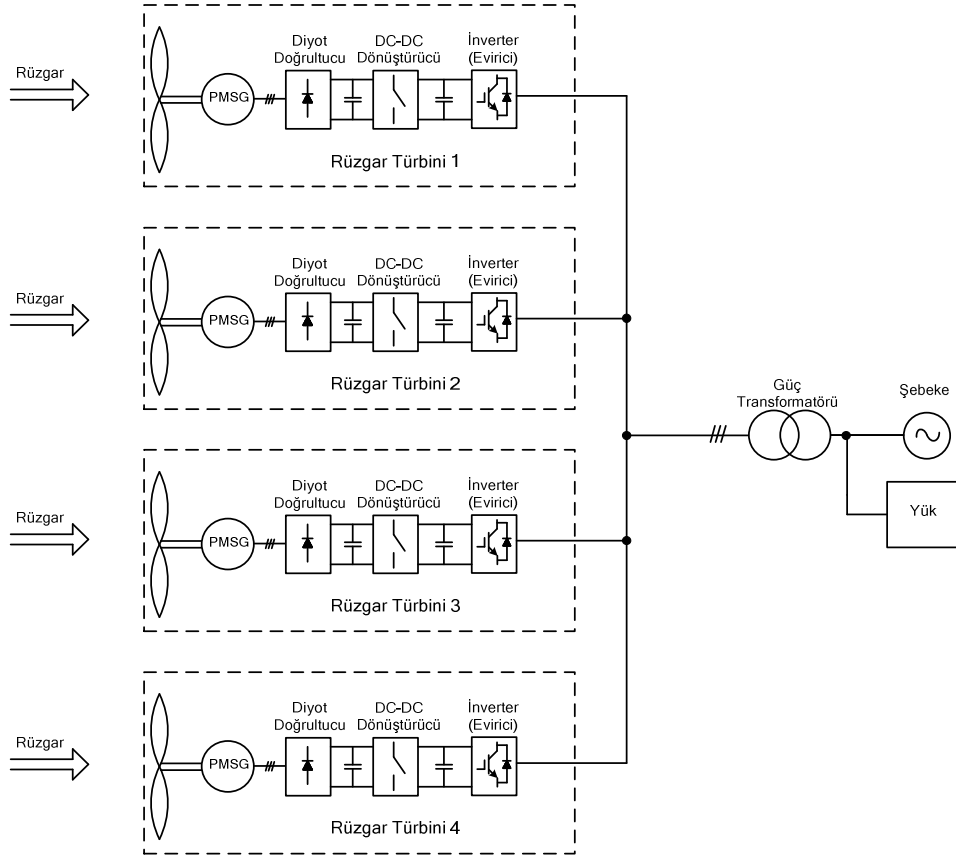
İlerleyen kısımlarda detayları verilen çeşitli senaryolar oluşturularak, rüzgar çiftliği, yük ve şebeke tarafında incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu incelemelerde temel olarak, farklı besleme ve anahtarlama durumları ile değişik yüklenme şartları gözönüne alınmıştır. Kurulan sistemin çeşitli noktalarında meydana gelebilecek anahtarlama

olaylarına karşı, farklı yüklenme koşulları altında modellenen sistemin davranışları incelenmiştir.

Modelleme çalışmalarında “Türkiye Elektrik Sisteminde Güç Kalitesine Etki Eden Değişkenleri ve Güç Kalitesini İzleme, Problemlerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Karşı Önlemlerin Hayata Geçirilmesi” isimli TÜBİTAK projesi kapsamında ölçülmüş olan 380 kV iletim hattına bağlı yüke ait elektriksel parametreler, yükün bağlı olduğu hatta ait TEİAŞ’tan alınan parametreler ile rüzgar türbini ve rüzgar türbinlerinden oluşan rüzgar çiftliği kullanılmıştır.

Sayısal uygulamada, rüzgar türbinlerinden oluşan rüzgar çiftliği, yük, iletim hattı ve şebeke modellenmiş, 380 kV gerilim seviyesindeki 174 km uzunluğundaki hatta bağlı olan yükün sadece şebekeden değil, yükün yakınlarında kurulduğu varsayılan rüzgar türbinlerinden oluşan rüzgar çiftliğinden de beslendiği kabul edilmiştir. Bu sisteme ait toplam 11 farklı çalışma moduna ait simülasyon çalışması MATLAB/Simulink programı kullanılarak yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarında farklı rüzgar hızlarında, yüke ait lineer ve nonlinear modeller kullanılmıştır. Yükün gerçekte olduğu gibi nonlinear yük olarak modellendiği, harmoniklerin iyi bir filtreleme ile yok edilebileceği göz önüne alınarak lineer yük olarak modellendiği ve daha kötü bir durum olarak yükün toplam harmonik distorsiyonunun (THD) iki kat olduğu yük modeli kullanılarak da çalışmalar yapılmıştır.

Ayrıca, sistemde meydana gelebilecek anahtarlama olaylarının etkileri de incelenmiştir. Bu incelemelerde rüzgar çiftliği tarafında ve yük tarafında çeşitli olaylarla meydana gelebilecek anahtarlama operasyonları gözönüne alınarak, bu durumlara karşı sistem cevabı analiz edilmiştir. Tüm analizlere ait açıklayıcı bilgiler Çizelge 5.6’da topluca verilmiştir. Gerçekleştirilen sayısal uygulamada kullanılan sisteme ait tek hat şeması Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 Sayısal uygulamada kullanılan sistemin tek hat şeması

Şekil 5.1’den de görüleceği üzere rüzgar çiftliği 4 adet rüzgar türbininden oluşmaktadır. RES ile şebekenin yükü beraber beslediği durum gözönüne alındığından, RES çıkışındaki gerilim, bir güç transformatörü vasıtasıyla iletim seviyesine yükseltilmiş ve yük bu baradan beslenmiştir.

Rüzgar türbinlerinde, türbin kanat çapı 38 m ve nominal gücü 2 MW olan sabit mıknatıslı senkron generatörler (SMSG) kullanılmıştır. Rüzgar çiftliğinde kullanılan rüzgar türbin ve generatörlerine ait parametreler sırasıyla Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Rüzgar türbini parametreleri

Parametreler	Sembol	Değer
Rotor Çapı	R	38 m
Hava Yoğunluğu	ρ	1,205 kg/m ³
Maksimum C_p	C_{pmax}	0,4412
Ortalama Rüzgar Hızı	v_{ort}	12 m/sn

Çizelge 5.2 Sabit mıknatıslı senkron generatör parametreleri

Parametreler	Sembol	Değer
Nominal Generatör Gücü	P_G	2,0 MW
Nominal Gerilim	V_G	4 kV
Çift Kutup Sayısı	p	22
Sabit Mıknatıs Akısı	Ψ_f	136 Wb
Stator d-Eksenli Endüktansı	L_d	0,3674 H
Stator q-Eksenli Endüktansı	L_q	0,2504 H
Stator Direnci	R_s	0,08 Ω

Sayısal uygulamada, ölçümler sırasında elde edilen yüke ait gerçek akım, gerilim ve güç değerleri kullanılmıştır. Ölçümler, proje kapsamında Fluke 434 güç kalitesi analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçek ölçüm sonucunda elde edilen yükün bir fazına ait elektriksel değerler Çizelge 5.3’de gösterilmiştir. Çizelge 5.4’de akımın harmonik bileşenlerine ait ölçülen değerler verilmiştir. Çizelge 5.4’de verilen akımın faz açısı değerlerinden R fazına ait olanları ölçülen gerçek değerler, S ve T fazına ait değerler yükün dengeli olduğu kabul edilerek hesaplanan değerlerdir.

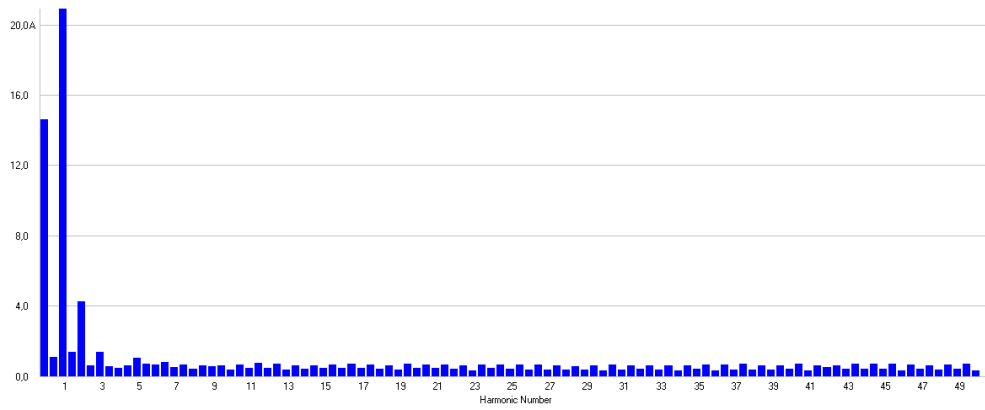
Çizelge 5.3 Yükün bir fazına ait ölçülen elektriksel büyüklükleri

Parametreler	Ölçülen Değerler
P	12.1 MW
V	236 kV
I	39.6 A
$\cos\phi$	0.9135

Çizelge 5.4 Yükün bir fazının akım harmonik bileşenlerine ait ölçülen değerler

Akımın Harmonik Derecesi (n)	Akımın Tepe Değeri (A)	Akımın Faz Açısı (°)			Akımın Harmonik Derecesi (n)	Akımın Tepe Değeri (A)	Akımın Faz Açısı (°)		
		R	S	T			R	S	T
2	8,4	-76	44	164	14	0,8	-104	16	136
3	2,8	-120	-120	-120	15	1	14	14	14
4	1	-12	-132	108	16	1	94	-26	214
5	2	-16	104	-136	17	1	61	181	-59
6	1,4	-109	-109	-109	18	0,8	-114	-114	-114
7	1	-157	-277	323	19	0,8	150	30	270
8	0,8	45	-195	285	20	1	99	-141	-21
9	1,2	-55	-55	-55	21	1	22	22	22
10	0,8	-80	-200	40	22	1	91	-29	-149
11	1	-127	7	-247	23	0,8	-151	-31	-271
12	1	111	111	111	24	1	27	27	27
13	0,8	-68	-188	52	25	0,8	-13	-133	107

Fluke 434 cihazı kullanılarak ölçülen akımın bir fazına ait akım harmoniği spektrumu, tepe değerleri göstermek üzere Şekil 5.2’de verilmiştir. Simülasyonda yüke ait elektriksel parametreler, gerçek ölçüm sisteminde bulunan transformatör dönüştürme oranları dikkate alınarak kullanılmıştır. Dönüştürme oranları dikkate alındığında ölçüm cihazı ile elde edilen akım değerlerinin 2 katı, gerilim değerinin 10 katı ve gücün 20 katı alınarak gerçek değerlere ulaşılmıştır.



Şekil 5.2 Yükün bir fazına ait akım harmoniği spektrumu

İncelenen yükü besleyen 380 kV'luk 174 km uzunluğundaki iletim hattının karakteristik değerleri TEİAŞ verilerinden alınmıştır . Hat parametrelerine ait değerler Çizelge 5.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 Ölçümü yapılan 174 km uzunluğundaki hatta ait parametreler

Parametreler	Değeri
Direnç	0,02294 Ω /km
Endüktans	0,87644 mH/km
Kapasite	12,87 nF/km

Bölümün girişinde bahsedildiği üzere bu çalışmada, ülkemizin güç sisteminde varolan bir yük uçlarından alınan ölçümler kullanılarak farklı senaryolar oluşturulmuştur. Bu senaryolarda, yük yakınlarına bir RES kurulması göz önüne alınıp, yükün şebeke ve RES tarafından beraber beslenmesi durumu incelenmiştir. Yapılan analizlerde, farklı rüzgar hızlarında lineer ve nonlineer yüklenme durumları ile sistemin çeşitli noktalarında meydana gelebilecek anahtarlama olaylarının, sistem davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan bu analizlerle RES ve şebekeye bağlantısı olan bir yükün çeşitli işletim durumlarındaki etkisi ortaya konmuş bulunmaktadır. Özellikle güç sistemlerinde olumsuzlukları giderek artan nonlineer elemanların etkisini incelemek amacıyla yükün daha büyük distorsiyona sahip olma durumu da incelemelere dahil edilmiştir. Analizlerde gerçekleştirilen tüm çalışma durumları Çizelge 5.6'da verilmiştir.

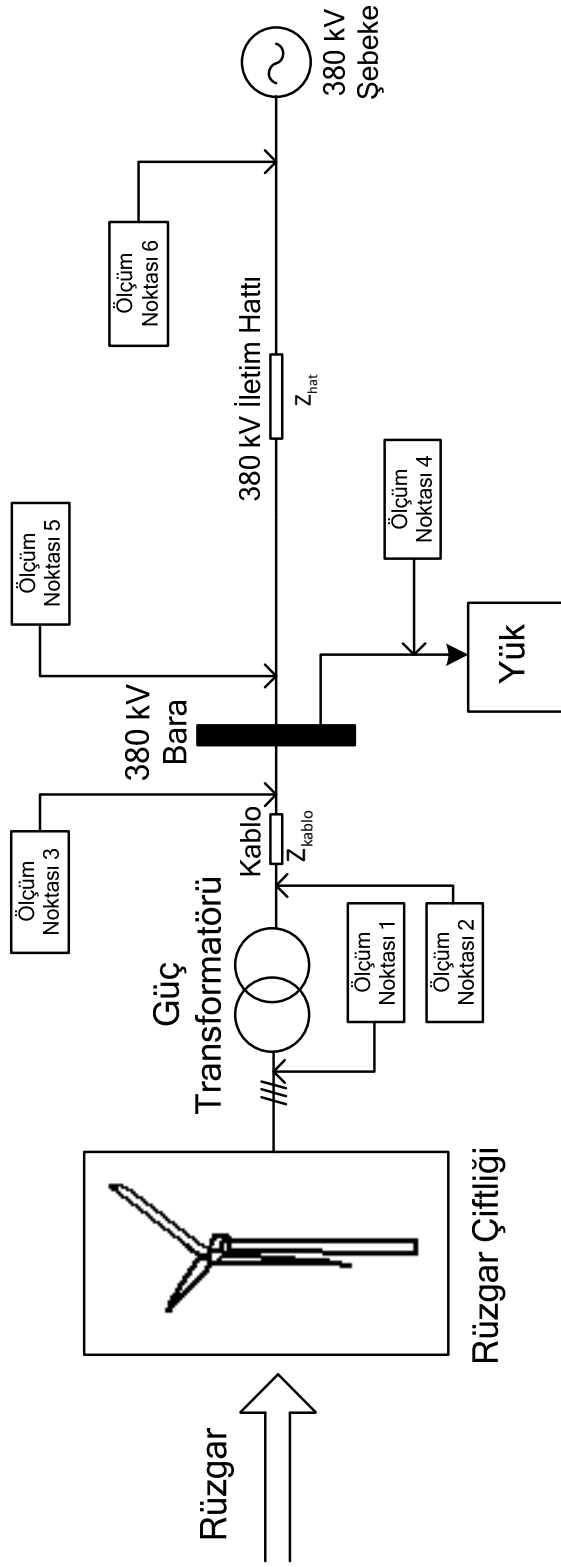
Çizelge 5.6 Sayısal uygulamaya ait analizler

Sayısal Uygulama	Çalışma Modu	Yapılan Analizler
Sayısal uygulama 1	1	Değişken rüzgar hızı ve lineer yük durumu
Sayısal uygulama 2	2.1	Farklı rüzgar hızları ($v=6\text{m/sn}$, $v=8\text{m/sn}$, $v=12\text{m/sn}$) ve lineer yük durumu
	2.2	Farklı rüzgar hızları ($v=6\text{m/sn}$, $v=8\text{m/sn}$, $v=12\text{m/sn}$) ve nonlinear yük durumu
	2.3	Farklı rüzgar hızları ($v=6\text{m/sn}$, $v=8\text{m/sn}$, $v=12\text{m/sn}$) ve nonlinear yüke ait harmonik akım bileşenlerinin iki kat olması durumu
	2.4	Sabit rüzgar hızında (12 m/sn), farklı yüklenme durumları (lineer yük, nonlinear yük ve yükün akım harmoniklerinin 2 kat olduğu)
Sayısal uygulama 3	3.1	Farklı rüzgar hızları için ($v=6\text{m/sn}$, $v=8\text{m/sn}$, $v=12\text{m/sn}$) lineer yüklenmede ve rüzgar çiftliği tarafında anahtarlama olması durumu
	3.2	Farklı rüzgar hızları için ($v=6\text{m/sn}$, $v=8\text{m/sn}$, $v=12\text{m/sn}$) nonlinear yüklenmede ve rüzgar çiftliği tarafında anahtarlama olması durumu
	3.3	Sabit rüzgar hızında (12 m/sn) lineer ve nonlinear yüklenmede rüzgar çiftliği tarafında anahtarlama olması durumu
Sayısal uygulama 4	4.1	Farklı rüzgar hızları için ($v=6\text{m/sn}$, $v=8\text{m/sn}$, $v=12\text{m/sn}$) lineer yüklenmede ve rüzgar çiftliğindeki 2 türbinde anahtarlama olması durumu
	4.2	Farklı rüzgar hızları için ($v=6\text{m/sn}$, $v=8\text{m/sn}$, $v=12\text{m/sn}$) nonlinear yüklenmede ve rüzgar çiftliğindeki 2 türbinde anahtarlama olması durumu
	4.3	Sabit rüzgar hızında (12 m/sn) lineer ve nonlinear yüklenmede rüzgar çiftliği tarafında 2 türbinde anahtarlama olması durumu

5.2 Sayısal uygulama 1 (Çalışma Modu 1)

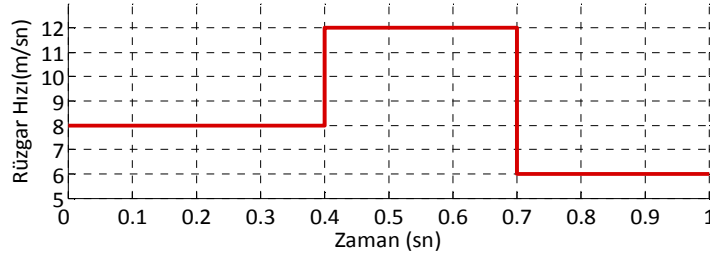
Bu bölümde, yüke ait akım harmonik bileşenleri ihmal edilmiş olup lineer olarak kabul edilen yükü rüzgar çiftliğinin ve şebekenin beraber beslediği varsayılmıştır. MATLAB/Simulink programı ile gerçekleştirilen bu uygulamada farklı rüzgar hızlarının olması durumu için sistemin analizi gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda modellenen örnek güç sistemi ve ölçüm alınan noktaları Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

Yükün hem şebekeden hem de rüzgar çiftliğinden beslendiği düşünülerek gerçekleştirilen simülasyonlarda şebekeye bağlantıyı sağlayan iletim hattının hatbaşından (ölçüm noktası 6) ve hatsonundan (ölçüm noktası 5), yük uçlarından (ölçüm noktası 4), rüzgar çiftliği tarafındaki transformatör giriş (ölçüm noktası 1) ve çıkışından (ölçüm noktası 2), yükün bağlı olduğu baranın rüzgar çiftliği tarafından (ölçüm noktası 3) ölçümler alınmıştır.



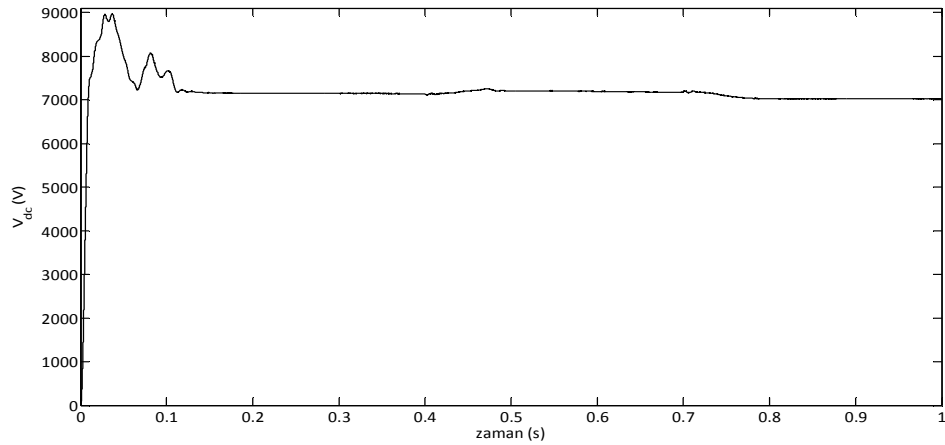
Şekil 5.3 Modellenen örnek güç sistemi

Bu çalışma modunda farklı rüzgar hızlarının etkilerini araştırmak amacıyla nominal hızı 12 m/sn olan türbin üzerinde rüzgar hızları 8 m/sn, 12 m/sn ve 6 m/sn olacak şekilde değiştirilmiştir. (Nominal hızın üzerinde çalışma durumunda, çeşitli kontrol teknikleri ile nominal hıza karşılık gelen güç değerinde çalışma hedeflendiğinden bu çalışmada nominal hızın altındaki değerler kullanılmıştır.) Buna ait değişim Şekil 5.4'te verilmiştir. Şekil 5.4'te verilen rüzgar hızının zamana bağlı değişiminden de görüldüğü gibi simülasyon 1 sn çalıştırılmıştır. Simülasyon, rüzgar hızı 8 m/sn hızla başlatılmış, 0,4. saniyede 12 m/sn rüzgar hızına çıkarılmış ve 0,7. saniyede 6m/sn hıza düşürülmüştür. Bu süre boyunca farklı ölçüm noktalarındaki akım ve gerilim değişimleri incelenmiştir. Simülasyonda yük modeli oluşturulurken PQ yük modelinden faydalanılmıştır.



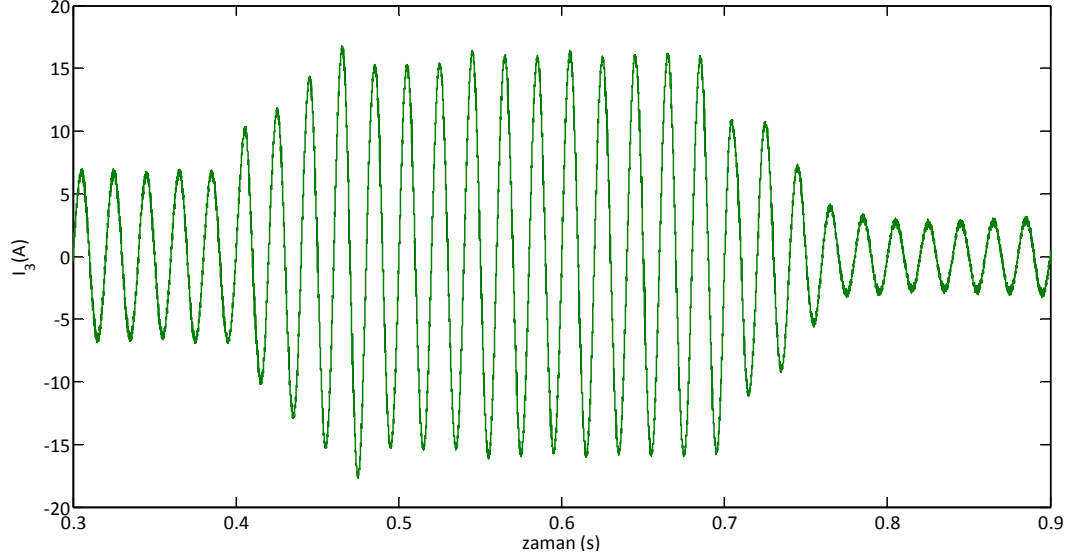
Şekil 5.4 Rüzgar hızı zamana bağlı değişimi

Gerçekleştirilen çalışmada DC bara gerilimi, DC-DC boost dönüştürücü ile 7000 V gerilim seviyesine sabitlenmiştir. Simülasyon süresi boyunca boost dönüştürücü çıkışındaki DC bara gerilimine ait değişim Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi rüzgar hızının değiştiği zamanlarda DC bara geriliminde değişimler meydana gelmiş, fakat çok kısa sürede ayarlanan gerilim değeri elde edilmiştir.



Şekil 5.5 DC bara gerilim değişimi

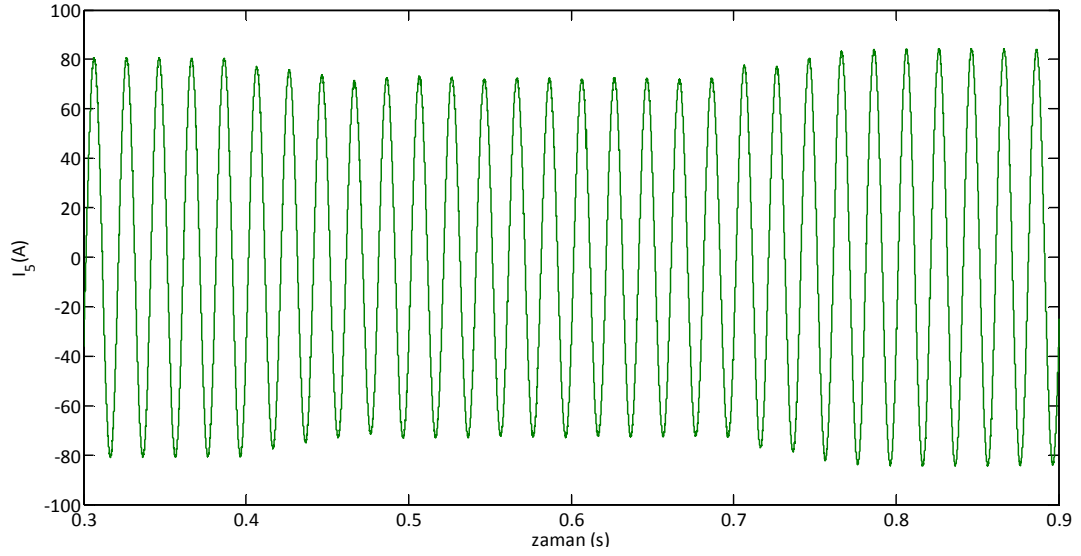
Simülasyon süresince farklı noktalardan alınan ölçüm sonuçlarına göre, yükün bağlı olduğu 380 kV'luk baranın rüzgar çiftliği tarafındaki 3 nolu ölçüm noktasından çekilen akımın zamana bağlı değişimi Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6 Rüzgar çiftliği tarafından (Ölçüm Noktası 3) çekilen akımın bir fazına ait değişim

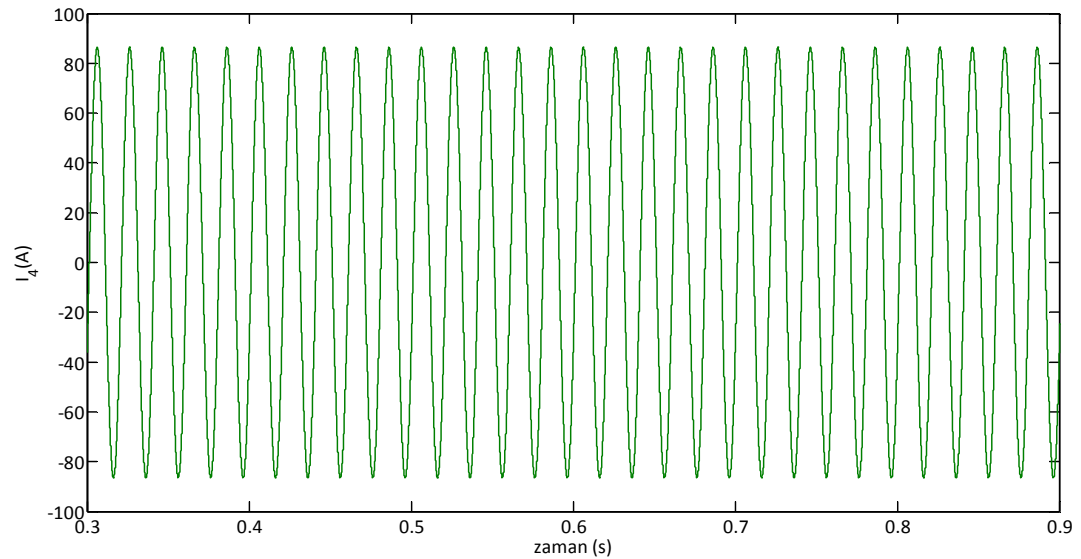
Şekil 5.6'dan görüldüğü gibi, başlangıçta 8 m/sn olan rüzgar hızı arttırılarak 12 m/sn'ye çıkarıldığında rüzgar türbininden elde edilen güç birkaç periyot içerisinde artarak yükü daha fazla akım ile beslemektedir. Rüzgar hızı düştüğünde (6 m/sn) ise üretilen gücün azalarak yüke verilen akımın azaldığı verilmektedir.

Rüzgar çiftliğinin davranışının tam tersine, Şekil 5.7'de de görüldüğü gibi, yükün şebeke tarafından çektiği akım, rüzgar hızı arttığında azalmakta ve rüzgar hızı azaldığında ise artmaktadır. Bu durumda ölçüm noktası 5'ten alınan akım değişimi Şekil 5.7'de görülmektedir.



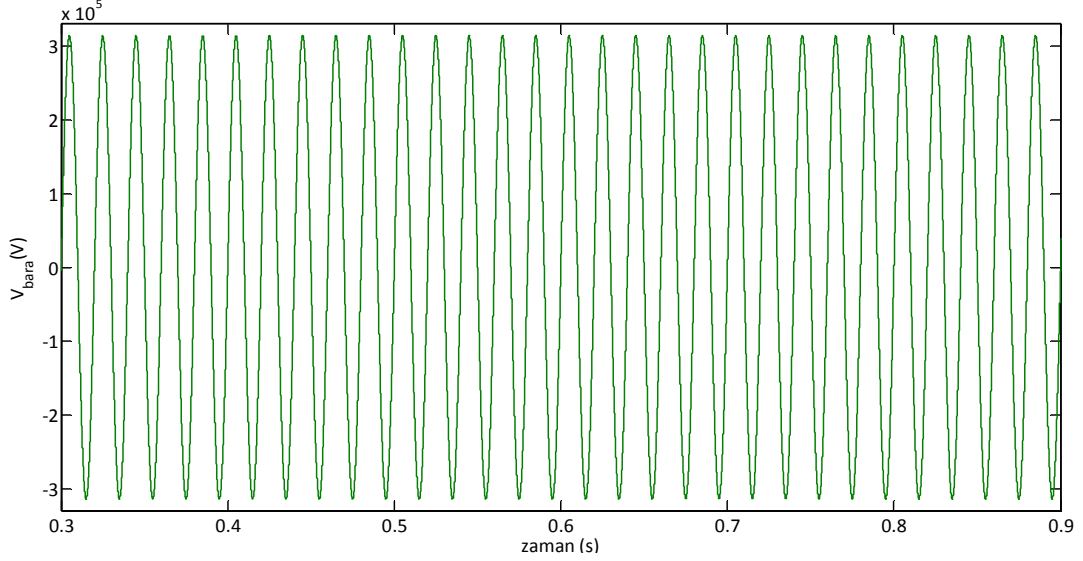
Şekil 5.7 Şebekenin 380 kV tarafından (Ölçüm Noktası 5) çekilen akımın bir fazına ait değişim

Lineer olarak modellenen yükün çektiği akımın değişimi Şekil 5.8’de verilmiştir. Şebeke ve RES tarafından ortak olarak beslenen yükün ihtiyaç duyduğu akımı rüzgar hızından bağımsız olarak her zaman çektiği açıkça görülmektedir. Bu da bize yükün güvenilir bir şekilde beslenmesi için RES ile şebekenin paralel çalışmasının önemini göstermektedir. RES’te meydana gelebilecek herhangi bir arıza veya rüzgar hızındaki değişimlere karşı büyük güçlü yüklerin, güçlü bir şebekeye bağlanmalarının gerekliliği açıkça görülmektedir.



Şekil 5.8 Yükün çektiği akımın bir fazına ait değişim

Yükün bağlı olduğu 380 kV gerilim seviyesindeki bara geriliminin değişimi Şekil 5.9’da gösterilmiştir. Bara geriliminin, rüzgar hızının değişmesine bağlı olarak rüzgar çiftliğinde üretilen güç değişiminden etkilenmediği açıkça görülmektedir.



Şekil 5.9 Yükün bağlı olduğu 380 kV gerilim seviyesindeki bara geriliminin değişimi

Bu çalışma modunda, sistem davranışında modellemenin doğru ve güvenilir olarak yapıldığı açıkça görülmektedir. Gerçekleştirilen modelin uygun sonuçlar verdiği temel alınarak, bundan sonra verilen sayısal uygulama kısımları gerçekleştirilmiştir. Örnek sistem, diğer modlarda farklı yüklenme ve anahtarlama durumları, değişken rüzgar hızları için incelenmiştir.

Bu kısımda gerçekleştirilen çalışma ile rüzgar hızındaki değişimlerin sisteme etkisi ortaya konmuştur. Rüzgar hızı yükseldikçe işletme yakınına kurulması öngörölmüş olan RES'in yükü daha fazla beslediği ve şebekeden çekilmesine ihtiyaç duyulan akımın azaldığı net olarak görölmüştür. Böylece uzak mesafelerdeki santral veya transformatör merkezlerinden beslenen büyük güçlü yüklerin meydana getirdiği güç kayıpları ve gerilim düşümlerinin, yük yakınlarına kurulabilecek rüzgar santralleri ile azaltılabileceği açıkça görölmüştür.

Enerji iletiminde görölen kayıp, gerilim düşümü, uzak mesafelerden enerji taşıma sırasında meydana gelebilecek arızalar ve kullanılacak transformatör merkezlerinin maliyetleri dikkate alınarak, büyük güçlü yüklerin yakınlarına kurulabilecek bu tip

santraller ile gücün bir kısmının karşılanması mümkün olduğu gözönüne alınması gereken bir gerçektir.

Yapılabilecek ekonomik analizler ile uygun yerlerde bu uygulamaya gidilmesi hem ekonomik hem de güvenilirlik açısından önemlidir. Ayrıca uygun şartlara sahip işletmelerin yakınlarına kurulabilecek olan RES'ler ile büyük oranda dışa bağımlı olduğumuz elektrik enerjisi üretiminde ülke ekonomisine ve enerji güvenliğimize de büyük katkı sağlanabilecektir.

Yukarıda bahsedilenlere ilave olarak, azalan rüzgar hızlarında şebekeden daha çok güç çekme ihtiyacı doğduğu yapılan çalışmada açıkça görülmektedir. Bu açıdan RES ile şebekeden beslenen büyük güçlü yüklerin enerji sürekliliğinin sağlanması için rüzgar hızı değişimlerinde ihtiyaç duyulabilecek gücü verebilecek şebekelere bağlanması da büyük önem arz etmektedir.

5.3 Sayısal uygulama 2

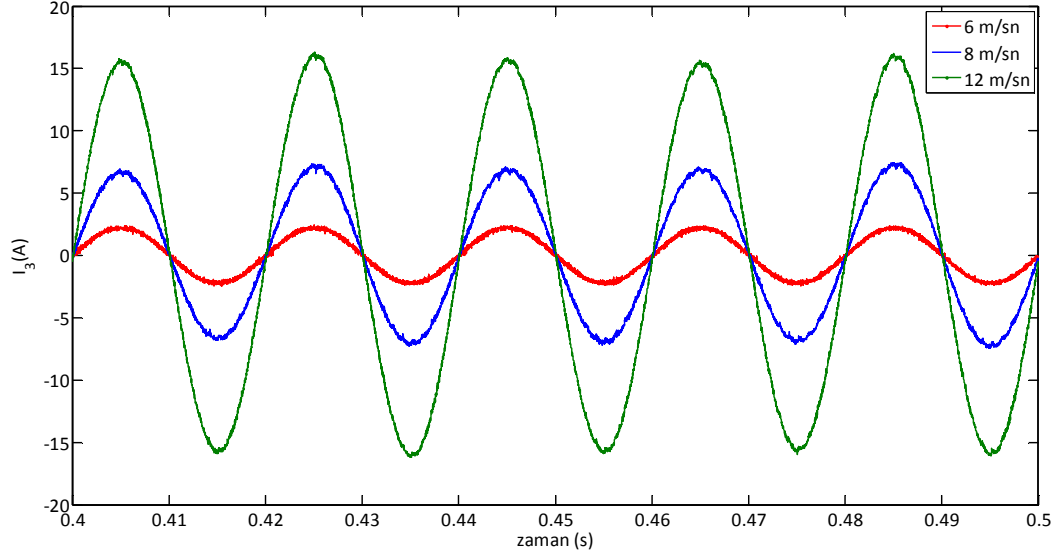
Bu uygulamada 4 farklı çalışma modu gerçekleştirilmiştir. Öncelikle üç farklı çalışma modunda farklı rüzgar hızlarında lineer yüklenme, nonlinear yüklenme ve nonlinear yükün harmonik bileşenlerinin iki kat olması durumları için sistem davranışı incelenmiştir. Son olarak da 12 m/sn'lik sabit rüzgar hızında farklı yüklenme durumlarının sisteme ait elektriksel büyüklükler üzerindeki etkisi karşılaştırılmalı olarak ortaya konmuştur.

Rüzgar hızının 6 m/sn, 8 m/sn ve 12 m/sn olması durumunda iletim hattına bağlı olan yükün, gerçekte ölçülen harmonikli yük değerleri ($THD_I = \%11,60$) ile harmonik bileşenlerinin ihmal edildiği değerleri ve yükteki harmonik bozulunun daha fazla olduğu (akım harmonik bileşenlerinin iki kat olması) durumundaki değerleri ($THD_I = \%23,20$) kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

5.3.1 Lineer Yüklenme (Çalışma Modu 2.1)

Yükün lineer kabul edilerek rüzgar çiftliği ve şebekeden beslendiği durumda farklı rüzgar hızları için ölçüm noktalarındaki akım ve gerilimlerin değişimleri incelenmiştir.

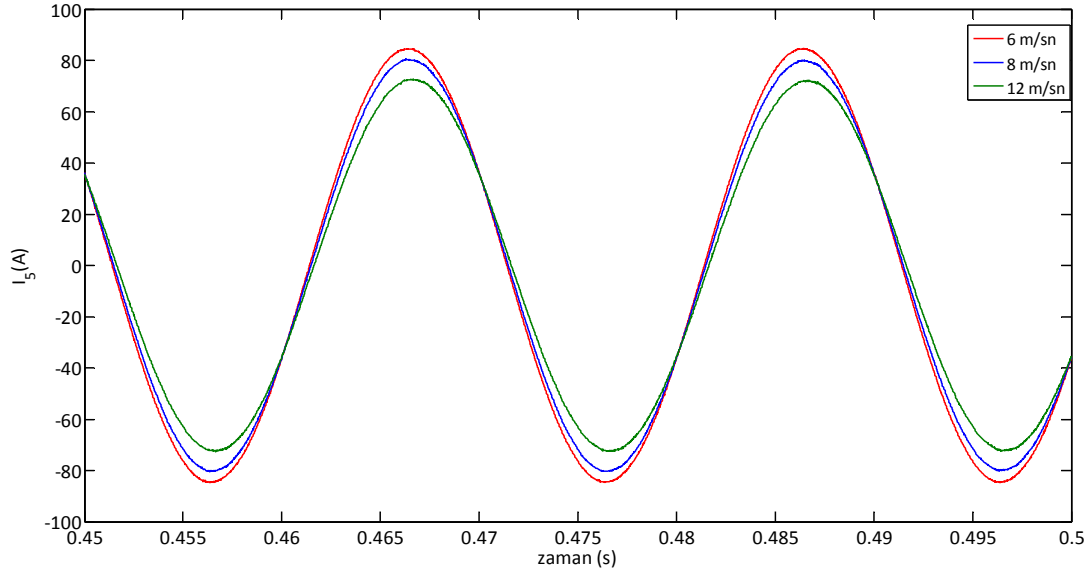
Rüzgar çiftliği tarafında (üretilen enerjinin yüke iletilmesi için kullanılan kablo çıkışından) ölçüm noktası 3'ten yükün çektiği akım değeri farklı rüzgar hızları için ölçülerek Şekil 5.10'da verilmiştir. Rüzgar hızlarının 6 m/sn, 8 m/sn ve 12 m/sn olması için alınan sonuçlar aynı şekil üzerine çizdirilerek kıyaslanmıştır. Rüzgar hızındaki artışla beraber yüke RES tarafından verilen akım değerindeki artış açık bir biçimde gösterilmiştir.



Şekil 5.10 Farklı rüzgar hızlarında rüzgar çiftliğinden çekilen akımın bir fazına ait değişim

Rüzgar hızının 6 m/sn, 8 m/sn ve 12 m/sn olması durumları için modellenen sistemde şebekeden yüke enerji taşımak için kullanılan iletim hattının yük tarafındaki 5 nolu ölçüm noktasından çekilen akımın bir fazına ait değişimi Şekil 5.11'de gösterilmiştir.

Akım değerlerinden açıkça görülmektedir ki, rüzgar hızındaki artış ile beraber 174 km uzunluğunda hattan çekilen akım değeri azalmaktadır. Böylece, şebeke ve iletim hattı daha az yüklenecek, bu durumda hatta meydana gelen güç kaybında ve gerilim düşümünde azalma meydana gelecektir. Şebekenin daha az yüklenmesi ile beraber günümüzde önemi ve uygulaması giderek artan akıllı şebeke sistemlerinin, kullanımı ile güç sistemimizin optimum kullanımına yönelik çalışmalar yapılarak daha ekonomik ve güvenilir sistem işletimi imkanı elde edilebilecektir.



Şekil 5.11 Çalışma modu 2.1 için şebekeden çekilen akımın bir faz değişimi

5.3.2 Nonlineer Yüklenme (Çalışma Modu 2.2)

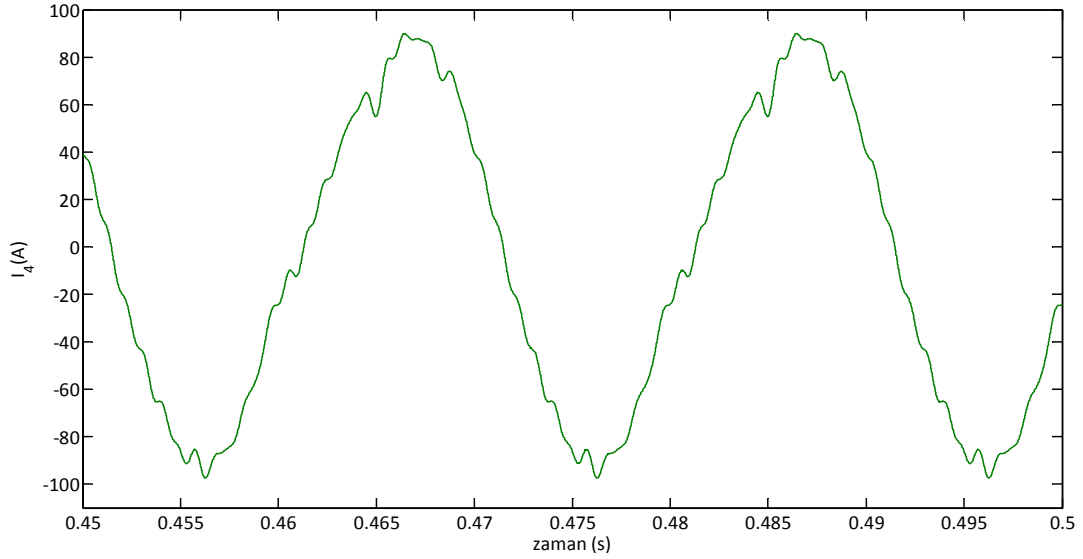
Proje kapsamında yapılan ölçümler sonucunda yükün gerçekte nonlineer olduğu ve harmonikli akım çektiği tespit edilmiştir. Bu çalışma modunda, ölçüm sonucunda elde edilen nonlineer yüke ait elektriksel parametreler kullanılarak, yükün sadece şebekeden değil şebekeye bağlı rüzgar çiftliğinden de beslendiği düşünülerek simülasyon gerçekleştirilmiştir.

Farklı rüzgar hızları için sistem modelindeki çeşitli ölçüm noktalarından alınan gerilim ve akımlara ait değişimler incelenmiştir. Harmonikli akımlar modellenirken, akım enjekte etme yöntemi kullanılmıştır.

Gerçek ölçümler sonucunda elde edilen yük parametrelerine göre yükün çektiği akımın bir fazına ait değişimi Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Yükün harmonikli olmasına bağlı olarak yük akımının dalga şeklinin bozulduğu açıkça görülmektedir. Yük akımının toplam harmonik distorsiyonu % 11,60 olarak bulunmuştur. Yük akımındaki bu bozulma, ilave iletim kayıplarına ve gerilim düşümüne yol açmaktadır. Akımın nonsinüsoidal olması yük, şebeke ve rüzgar çiftliği sisteminin ortak bağlantı noktasındaki bara gerilimde de bozulmaya sebep olacaktır. Bilindiği gibi, nonlineer yükler sebebiyle oluşan harmonikli akım ve gerilimler hassas elektronik cihazlara, kontrol ve kumanda devrelerine zarar vermekte ve hatalı çalışmalara yol açmaktadır.

Ayrıca, nonlinear yükün çektiği harmonikli akımlar sebebiyle bara geriliminin bozulması bu baraya bağlanan nonlinear olmayan yüklerin de harmonik bileşenlere maruz kalmasına neden olacaktır.

Şekil 5.12'den yükün rüzgar hızından bağımsız olarak her zaman ihtiyaç duyduğu akımı çektiği görülmektedir. Yük uçlarındaki 6, 8 ve 12 m/sn rüzgar hızlarındaki akım değişimleri üst üste çakışmaktadır.



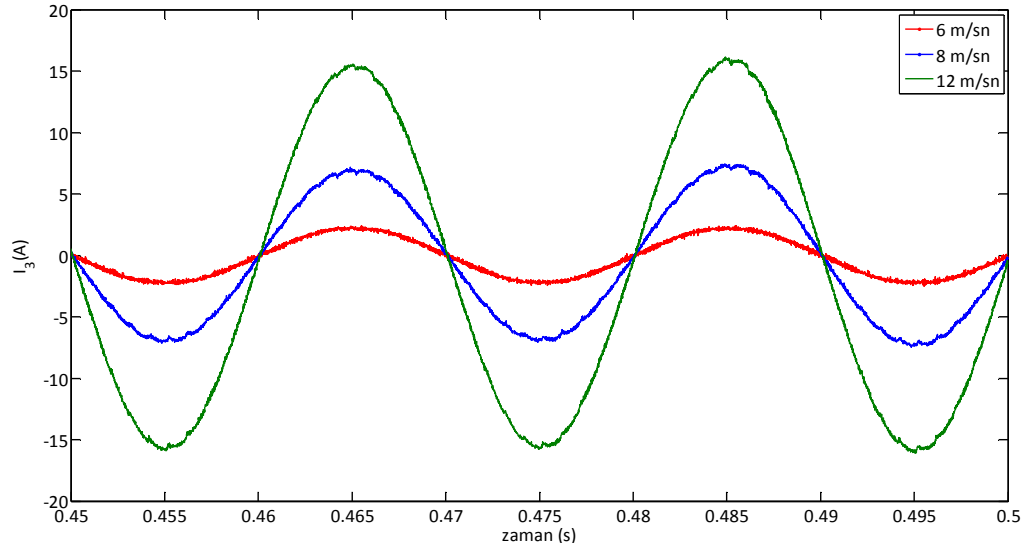
Şekil 5.12 Çalışma modu 2.2 için bir faza ait yük akımı değişimi

Bu yük modeli için farklı rüzgar hızlarında RES ve şebeke tarafından çekilen akımların bir fazına ait akım değişimleri 3 ve 5 nolu ölçüm noktalarından elde edilmiş ve Şekil 5.13 ile Şekil 5.14'te verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi akım değişimleri lineer yüklenme durumundan farklıdır. Verilen akımlara ait farklı rüzgar hızlarındaki toplam harmonik distorsiyonu değerleri Çizelge 5.7'de verilmiştir. Bu değerler Matlab & Simulink programının FFT analizi kullanılarak hesaplanmıştır.

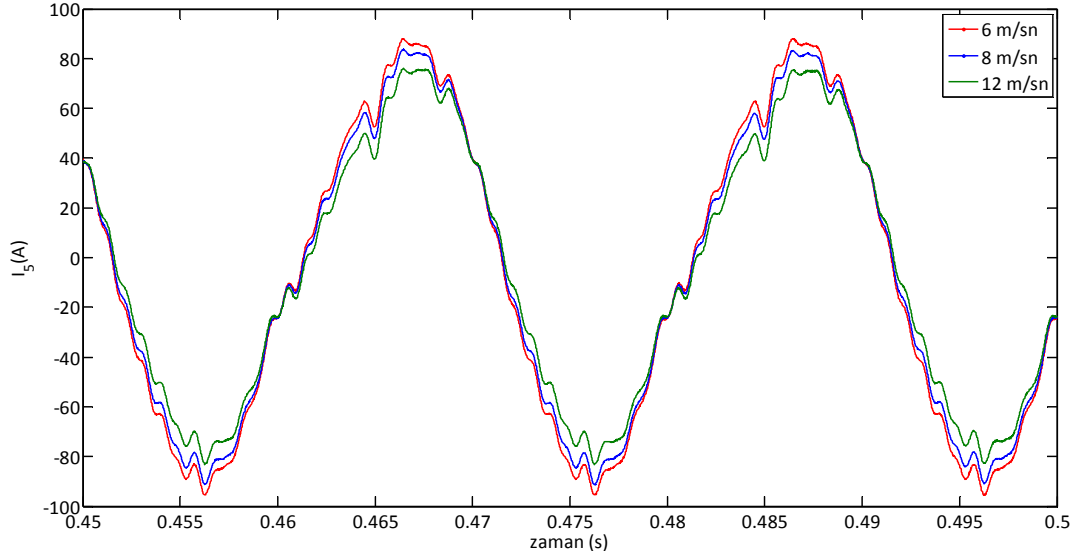
Çizelge 5.7 Nonlinear yüklenme durumunda farklı rüzgar hızları için 3 ve 5 nolu ölçüm noktalarındaki akıma ait toplam harmonik distorsiyonları

Ölçüm Noktası	THD _i Değerleri (%)		
	6 m/sn	8 m/sn	12 m/sn
3	2,41	1,66	0,81
5	11,87	12,46	13,84

Çizelge 5.7’de verilen değerler incelendiğinde, rüzgar hızı arttıkça rüzgar çiftliği tarafından (ölçüm noktası 3) çekilen akımın harmonik bozulumunun azaldığı ve şebeke tarafından (ölçüm noktası 5) çekilen akımın harmonik bozulumunun arttığı görülmektedir. Rüzgar hızı arttıkça RES daha büyük güç üretmekte ve yükün beslenmesindeki katkı oranını arttırmaktadır. Temel bileşen akımındaki artış ile beraber ölçüm noktası 3’deki THD değeri azalma göstermektedir. Rüzgar hızının artışı şebekenin daha az yüklenmesine ve şebekeden daha az akım çekilmesine yol açmaktadır. Şebeke akımının azalması temel bileşen akımı için daha büyük bir azalmaya neden olduğundan THD değeri büyümektedir.



Şekil 5.13 Çalışma modu 2.2 için farklı rüzgar hızlarında rüzgar çiftliğinden (Ölçüm Noktası 3) çekilen akımın bir faz için değişimi



Şekil 5.14 Çalışma modu 2.2 için farklı rüzgar hızlarında şebekeden (Ölçüm Noktası 5) çekilen akımın bir faz değişimi

5.3.3 Nonlinear Yükün Artması (Çalışma Modu 2.3)

Yapılan gerçek ölçümler sonucunda yük akımına ait harmonik seviyeleri ve büyüklükleri elde edilmiştir. Bu çalışma modunda sistemdeki harmonik bozulmanın daha fazla olduğu durum gözönüne alınmıştır. Yükün çektiği akımın harmonik bileşenlerinin iki kat olması hali için yük modellenmiş ve sistem davranışı incelenmiştir.

Bu çalışma modu, mevcut sisteme ait ölçüm anında devrede olmayan nonlinear yüklerin devreye girmesi halini veya sisteme ilerideki tarihlerde ilave edilebilecek yeni nonlinear yüklerin etkisini araştırmak için gerçekleştirilmiştir.

Simulasyon sonucunda rüzgar çiftliği, şebeke ve yük tarafındaki ölçüm noktalarından alınan akım ve gerilime ait değişimler elde edilmiştir. Şekil 5.3'te gösterilen analiz yapılan örnek sistemdeki 3 ve 5 nolu ölçüm noktalarından alınan akım değişimleri sırasıyla Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere bu durumda akım dalga şekillerindeki bozulma daha da artmaktadır. Çizelge 5.8'de bu çalışma modu için farklı rüzgar hızlarında ölçüm yapılan noktalardaki THD_i değerleri verilmiştir. Çizelge 5.9'da yükün çektiği akımın harmonik bileşenlerinin iki kat olması durumunda nonlinear yüklenme durumuna göre ölçüm noktası 3 ve 5'deki THD_i değerlerindeki artış oranları verilmiştir.

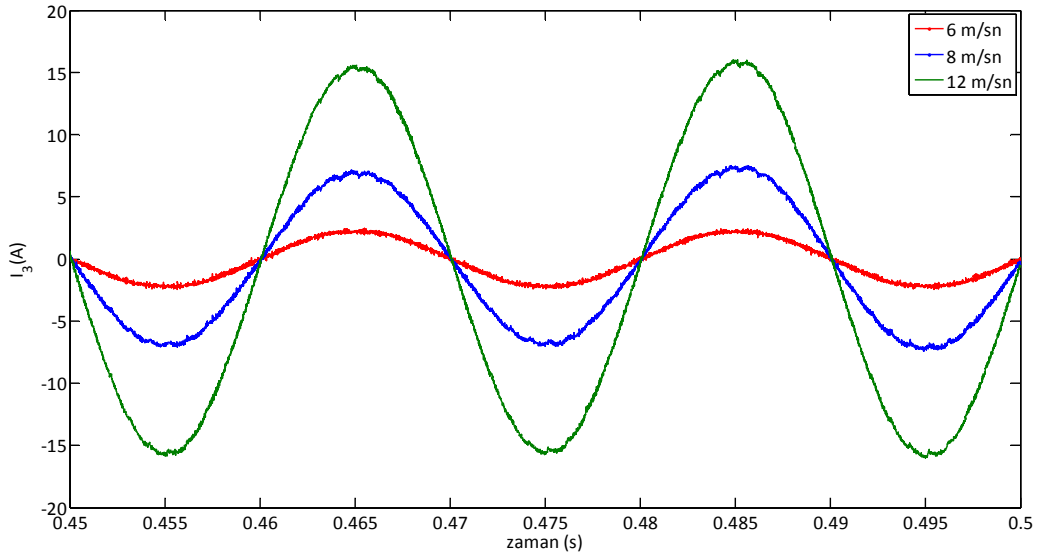
Çizelge 5.8 Nonlinear yüke ait harmonik bileşenlerin 2 kat olması durumunda farklı rüzgar hızları için ölçüm noktaları 3 ve 5'teki THD_i değişimleri

Ölçüm Noktası	THD _i Değerleri (%)		
	6 m/sn	8 m/sn	12 m/sn
3	2,44	1,70	0,89
5	23,75	24,89	27,70

Çizelge 5.9 Nonlinear yüke ait harmonik bileşenlerin 2 kat olması durumunda farklı rüzgar hızları için ölçüm noktaları 3 ve 5'teki THD_i artış oranları

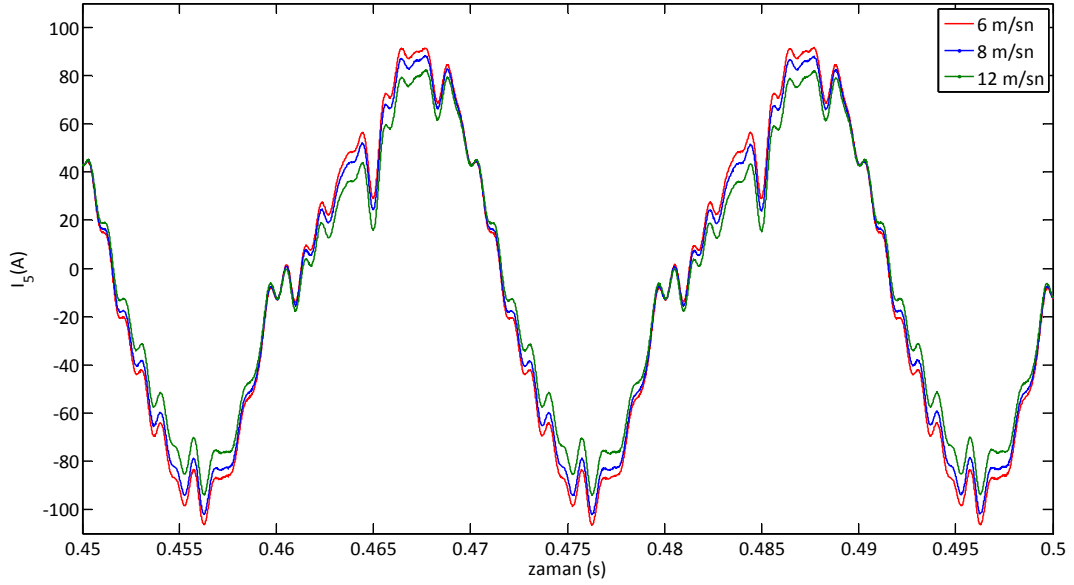
Ölçüm Noktası	THD _i Artış Oranı		
	6 m/sn	8 m/sn	12 m/sn
3	1,0124	1,0241	1,0987
5	2,0008	1,9976	2,0014

Çizelge 5.8'den de görüleceği üzere çekilen akımlardaki bozulma artmaktadır. Bu durum daha önce belirttiğimiz, sistemde yaşanabilecek problemleri daha da arttıracaktır. Daha önceki çalışma modunda da belirtildiği gibi, rüzgar hızı arttıkça RES tarafından çekilen akımdaki THD_i değeri azalmakta ve şebeke tarafından çekilen akımın THD_i değeri daha da artmaktadır.



Şekil 5.15 Nonlinear yüke ait harmonik bileşenlerinin 2 kat olması durumunda rüzgar çiftliğinden (Ölçüm noktası 3) çekilen akımın değişimi

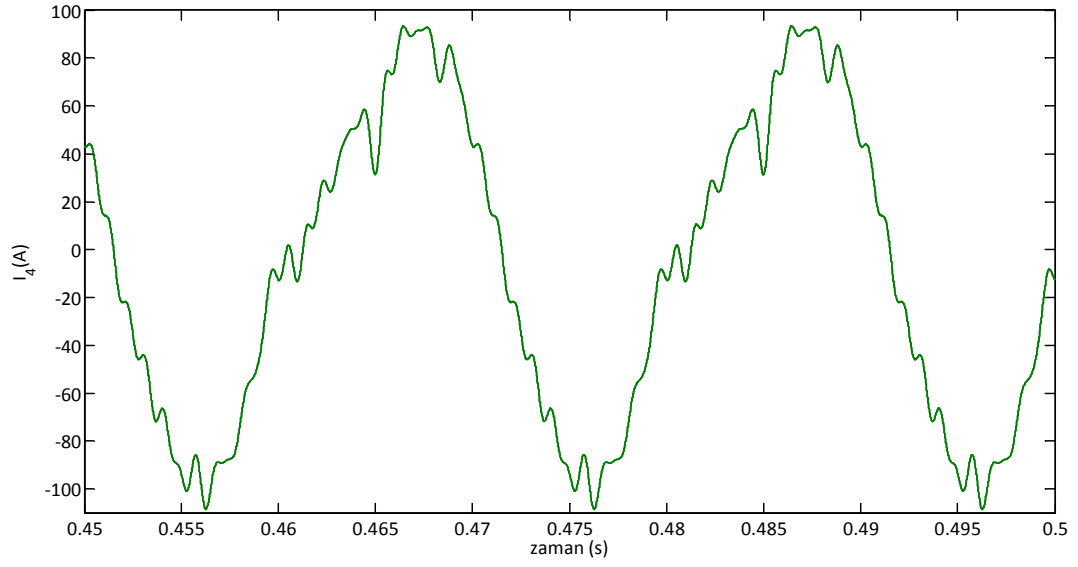
Bu çalışma modunda, diğer moda (Çalışma modu 2.2) göre ölçüm noktası 3'deki distorsiyon artış oranı Ölçüm Noktası 5'deki artış oranından daha azdır. Ölçüm Noktası 5'deki artış oranı yaklaşık 2 olurken Ölçüm Noktası 3'deki artış oranı daha az (1,01) olmaktadır. Bu durum nonlinear yüklenmedeki artışın (yüke yakın kurulan) RES'ler üzerinde daha az etkili olduğunu ve nonlinear yüklenme için RES'lerin bulunduğu bir sistemin olumlu davrandığını ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 5.16 Nonlinear yüke ait akım harmonik bileşenlerinin 2 kat olması durumunda şebekeden (Ölçüm Noktası 5) çekilen akım değişimi

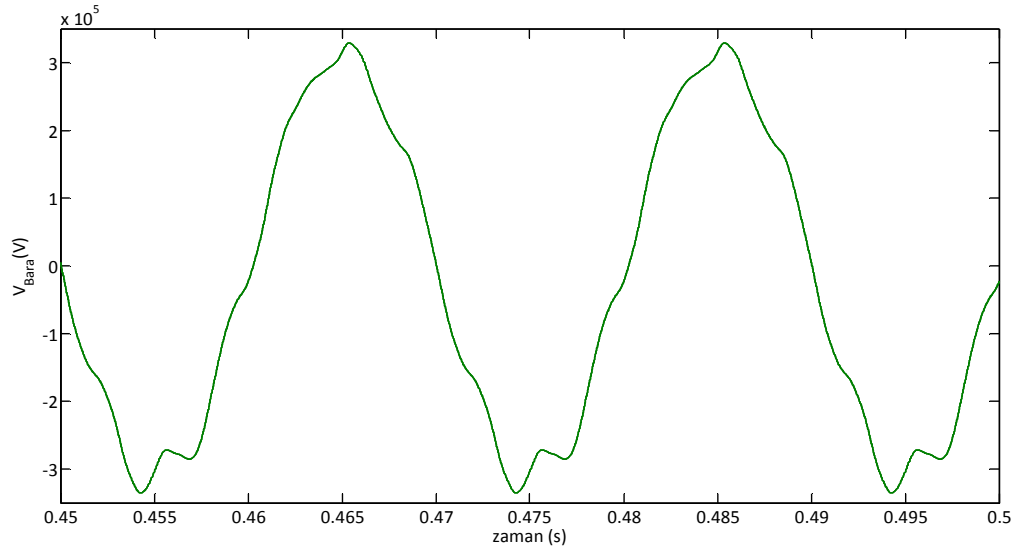
Yükün harmonik akımlarının iki kat olması durumunda yük tarafından (Ölçüm Noktası 4'den) çekilen akımın değişimi Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Bu durumda yük akımının THD'sı % 23,19 olmaktadır.

Dalga şekli bozulumlarındaki artış, hassas olan cihazlardaki arıza olasılıklarını daha da yükseltecektir. Ayrıca, bu şartlarda güç faktörü değeri düşecek ve uygun filtreli kompanzasyon sistemleri kullanılmaz ise sınır değerlerin sağlanmasında problemler yaşanabilecektir. Şebeke, RES ve besleme hatları gereksiz yere reaktif güç ile yüklenecek, kayıplar ve gerilim düşümü artacaktır. Böyle bir durumda meydana gelebilecek olumsuz olaylar sebebiyle işletmeler ciddi ekonomik zarara uğrayabilecektir.



Şekil 5.17 Nonlinear yüke ait akım harmonik bileşenlerinin 2 kat olması durumunda yük akımı değişimi (Ölçüm Noktası 4)

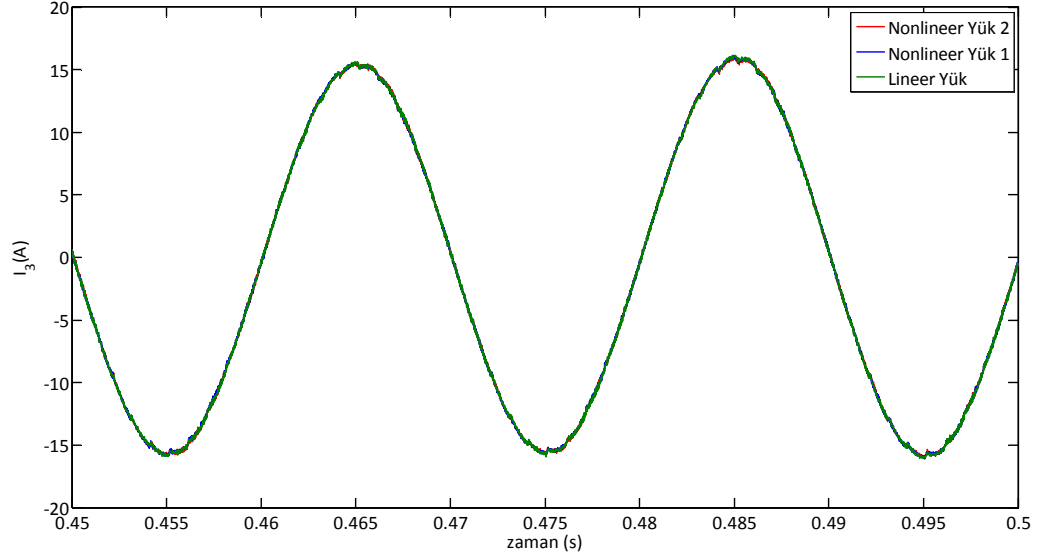
Şekil 5.18’de yükün iki kat harmonikli nonlinear yük olması durumunda, yükün bağlı olduğu baradaki gerilim değişimi verilmiştir. Bu durumda, nonlinear yüklenme hali için % 3,95 olan gerilimdeki THD_V değeri % 7,90’a çıkmaktadır.



Şekil 5.18 Nonlinear yüke ait akım harmonik bileşenlerinin 2 kat olması durumunda yükün bağlı olduğu bara gerilimi değişimi

5.3.4 Sabit Rüzgar Hızında (12 m/sn) Farklı Yüklenme (Çalışma Modu 2.4)

Bu çalışma modunda 12 m/sn'lik sabit rüzgar hızı için lineer, nonlinear (Nonlinear yük 1) ve 2 kat harmonik bileşenin olduğu (Nonlinear yük 2) nonlinear yüklenme durumları için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.3'te verilen örnek güç sistemindeki ölçüm noktası 3'den farklı yüklenme durumlarında çekilen akımın zamana bağlı değişimi Şekil 5.19'da verilmiştir.



Şekil 5.19 Farklı yük durumlarında, 12 m/ sn rüzgar hızında ölçüm noktası 3'teki akım değişimi

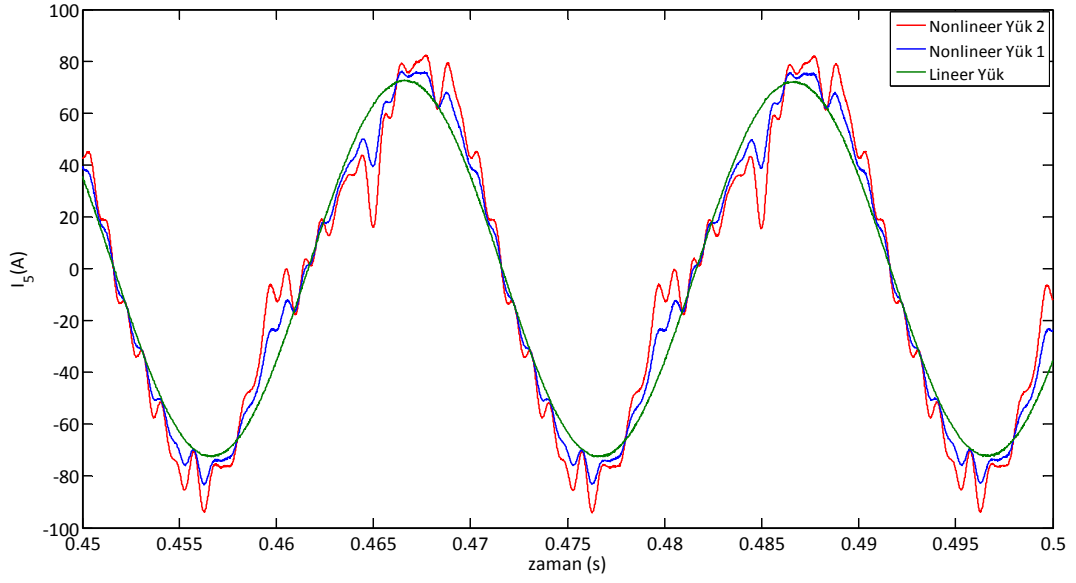
Yükün THD_i değeri arttıkça, ölçüm noktası 3'den çekilen akımın THD_i değerinin de arttığı Çizelge 5.10'da verilen değerlerden görülmektedir.

Çizelge 5.10 Farklı yük durumları için 12 m/sn rüzgar hızındaki ölçüm noktası 3'teki THD değerleri

Rüzgar hızı	Yük	Ölçüm Noktası 4 Yüke ait THD _i (%)	Ölçüm Noktası 3 Hatta ait THD _i (%)
12 m/sn	Lineer	0	0,72
	Nonlinear 1	11,60	0,81
	Nonlinear 2 (2 kat harmonikli)	23,19	0,89

Ölçüm noktası 5'den alınan akımın değişimi 12 m/sn'lik rüzgar hızında 3 farklı yüklenme durumu için Şekil 5.20'de verilmiştir. Lineer durumda oluşan THD_i değeri RES tarafından kullanılan dönüştürücüler sebebiyle meydana gelmektedir. Yükteki akım

harmoniği bozulumu arttıkça sisteme ait diğer noktaların da bozulumdan etkilendiği Çizelge 5.14’de verilen değerlerden açıkça görülmektedir.



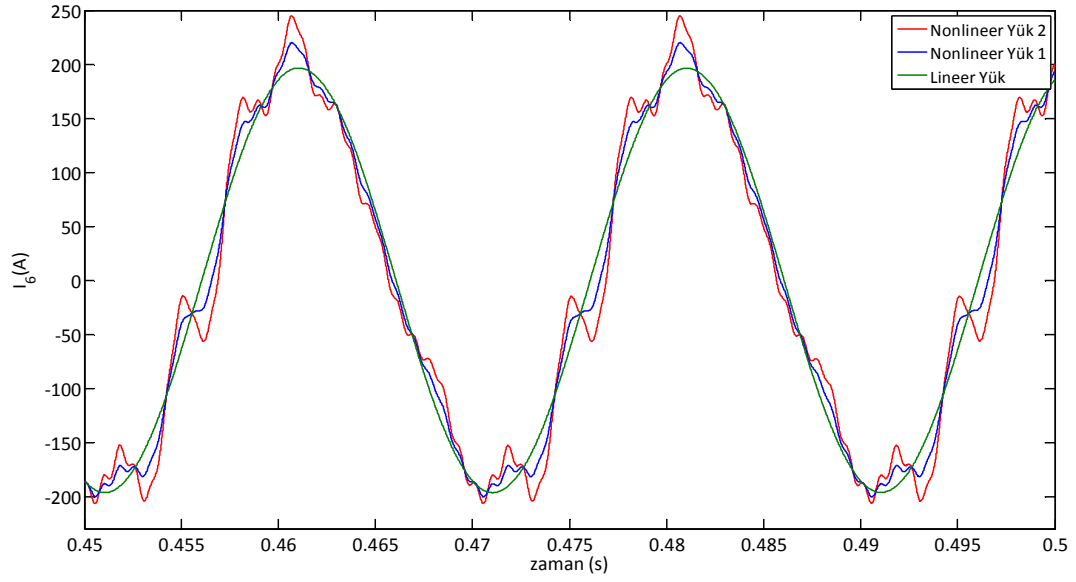
Şekil 5.20 Farklı yük durumlarında, 12 m/ sn rüzgar hızında ölçüm noktası 5’teki akım değişimi

Çizelge 5.11’de bu noktadan elde edilen THD_1 değerleri, yükün THD_1 değerleri ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Her bir yüklenme durumu için 5 nolu ölçüm noktasındaki harmonik bozulumunun, yük uçlarındaki (ölçüm noktası 4) harmonik bozulumdan daha büyük değerde olduğu net olarak görülmektedir.

Çizelge 5.11 Farklı yük durumları için 12 m/sn rüzgar hızındaki ölçüm noktası 5’teki THD değerleri

Rüzgar hızı	Yük	Ölçüm Noktası 4 Yüke ait $THD_1(\%)$	Ölçüm Noktası 5 Hatta ait $THD_1(\%)$
12 m/sn	Lineer	0	0,17
	Nonlinear 1	11,60	13,84
	Nonlinear 2 (2 kat harmonikli)	23,19	27,70

Şekil 5.21’de enerji iletim hattının başlangıç noktasındaki (Ölçüm Noktası 6) akımın farklı yüklenme durumları için değişimi verilmiştir. Yükteki harmonik bozulumu arttıkça akım dalga şeklinin daha da bozulduğu ve tepe değerinin yükseldiği şekilden net olarak görülmektedir.



Şekil 5.21 Farklı yük durumlarında, 12 m/ sn rüzgar hızında Ölçüm Noktası 6'daki akım değişimi

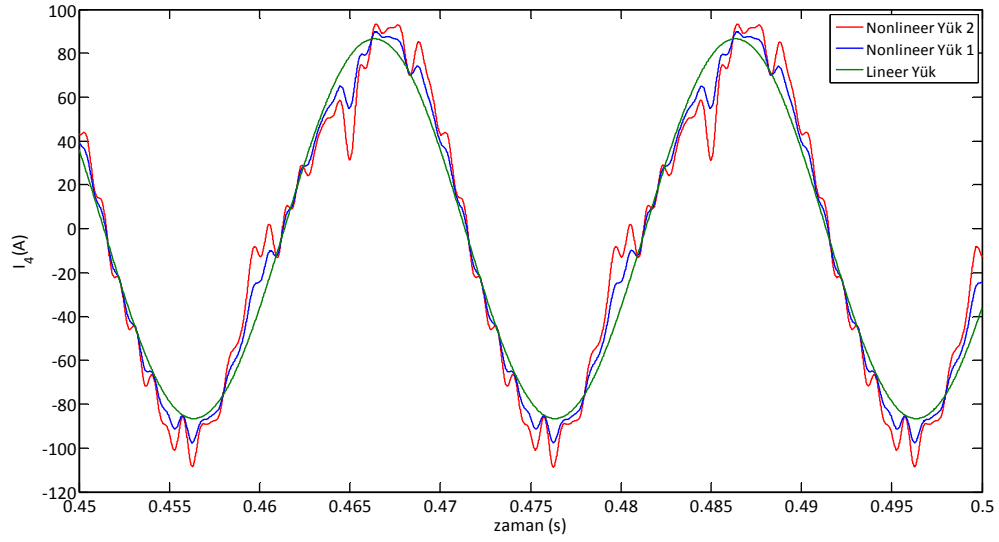
Çizelge 5.12'de ise üç farklı yüklenme durumu için 6 nolu ölçüm noktasından alınan akım THD'si değerleri, yük akımının 4 nolu ölçüm noktasından alınan THD_i değerleri ile karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. 6 nolu ölçüm noktasındaki bozulmanın yük ucundan alınan değerlerden düşük olduğu görülmüştür.

Bu değerler 5 nolu noktadan alınan değerlerden de düşüktür. Nonlineer yükten uzaklaştıkça harmonik bozulum azalmaktadır.

Çizelge 5.12 Farklı yük durumları için 12 m/sn rüzgar hızındaki ölçüm noktası 6'daki THD değerleri

Rüzgar hızı	Yük	Ölçüm Noktası 4 Yüke ait THD _i (%)	Ölçüm Noktası 6 Hatta ait THD _i (%)
12 m/sn	Lineer	0	0,03
	Nonlinear 1	11,60	9,74
	Nonlinear 2 (2 kat harmonikli)	23,19	19,48

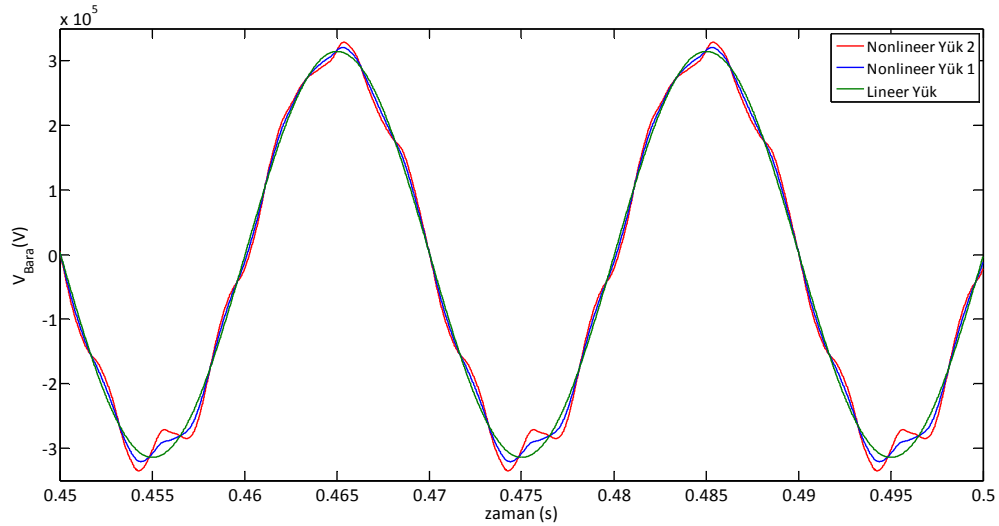
Rüzgar hızının 12 m/sn kabul edilerek, yükün gerçekte nonlineer yük 1, lineer yük ve nonlineer yük 2 durumlarında çektiği akım değişimleri Şekil 5.22'de verilmiştir.



Şekil 5.22 Farklı yük durumlarında, 12 m/sn rüzgar hızında yükün (Ölçüm Noktası 4) akımının değişimi

Yükün çektiği akımın farklı yükleme durumları için değişimi ve THD_i değerleri 4 nolu ölçüm noktasından okunmuştur. Nonlinear yüklenme arttıkça akım dalga şeklindeki bozulumun arttığı açıkça görülmektedir. Bu bozulum sistemdeki tüm ölçüm noktalarını da etkilemektedir.

Yükteki bozulma uygun bir filtrelemeyle düzeltilebilecek olup, sistemin diğer noktalarına etkisi de azaltılabilecektir. Böylece kayıplar, gerilim düşümü ve güç sistemindeki diğer elemanlar üzerindeki olumsuz etkiler de azaltılmış olacaktır.



Şekil 5.23 Farklı yük durumlarında, 12 m/ sn rüzgar hızında yükün bağlı olduğu bara geriliminin değişimi

Yük akımındaki bozulmanın gerilim üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla, 3 farklı yükleme durumu için yükün bağlı olduğu bara geriliminin değişimi Şekil 5.23’de verilmiştir. Yük akımındaki bozulmanın, bara geriliminin dalga şeklini de bozduğu açıkça görülmektedir. Bu noktaya benzer şekilde sistemin diğer noktalarında ölçülen gerilimlerde de bozulma meydana gelmektedir.

Bara gerilimine ait THD_V değerleri yük akımının THD_I değerleri ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.13’de gösterilmiştir. Yük akımındaki bozulma arttıkça gerilimde meydana getirdiği bozulmada artmaktadır.

Çizelge 5.13 Yükün akım bozulmasına bağlı olarak bara geriliminin THD_V değerleri

Rüzgar hızı	Yük	Ölçüm Noktası 4 Yüke ait $THD_I(\%)$	Ölçüm Noktası 5 Hatta ait $THD_V(\%)$
12 m/sn	Lineer	0	0,01
	Nonlinear 1	11,60	3,95
	Nonlinear 2 (2 kat harmonikli)	23,19	7,89

Ölçümü yapılan mevcut yük radyal bir hatla beslenmektedir. Bu hattın ele alınan yük dışında bir yük beslenmemektedir. Ancak, ilerideki tarihlerde aynı baraya bağlı yeni işletmeler kurulması veya tesisin gelişerek nonlinear yüklenmenin artması halinde, oluşan gerilim bozulmasından bağlanacak yeni yüklerin etkilenmesi kaçınılmaz bir sonuç olacaktır.

5.3.5 Farklı Rüzgar Hızları ve Yükleme Durumları için Ölçüm Noktalarındaki Gerilim ve Akımdaki THD Değişimleri

Yapılan bu çalışmada farklı yük durumları birbiri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.3’te verilen sistemde, ülkemiz güç sisteminde mevcut bulunan ve 174 km uzunluğundaki iletim hattından beslenen yükün, yakınlarına kurulabilecek bir RES ile beraber beslenmesi durumu göz önüne alınmıştır.

Yük uçlarından alınan ölçümlerde yükün harmonik bileşenlere sahip olduğu görülmüş ve bu değerler daha önceki konularda verilmiştir. Bu bölümde ise, ölçümleri alınan gerçek yükün (nonlinear yük 1), bu yükteki akım harmoniği bileşenleri ihmal edilerek oluşturulan lineer yükün ve yükün akım harmoniği bileşenlerinin 2 kat fazla değeri

alınarak oluşturulan yükün (nonlineer yük 2) farklı rüzgar hızlarında sistemin elektriksel büyüklükleri üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.14’de, kurulan sistemin 6 farklı noktasından alınan ölçümlerin sonucunda elde edilen akım ve gerilimin THD değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.14 Farklı rüzgar hızlarında lineer yük, nonlineer yük 1 ve nonlineer yük 2 durumlarındaki akım ve gerilimin THD oranları

Rüzgar Hızı (m/sn)	Ölçüm Noktası	Lineer Yük		Nonlineer Yük 1		Nonlineer Yük 2	
		THD _i (%)	THD _v (%)	THD _i (%)	THD _v (%)	THD _i (%)	THD _v (%)
6	1	2,33	0,84	2,36	1,58	2,39	2,81
6	2	2,37	0,02	2,41	3,95	2,44	7,90
6	3	2,37	0,01	2,41	3,95	2,44	7,90
6	4	0,00	0,01	11,60	3,95	23,20	7,90
6	5	0,06	0,01	11,87	3,95	23,75	7,90
6	6	0,03	0,00	9,57	0,22	19,16	0,44
8	1	1,61	1,12	1,64	1,69	1,69	2,89
8	2	1,62	0,02	1,66	3,95	1,70	7,90
8	3	1,62	0,01	1,66	3,95	1,70	7,90
8	4	0,00	0,01	11,60	3,95	23,19	7,90
8	5	0,13	0,01	12,46	3,95	24,89	7,90
8	6	0,04	0,00	9,62	0,22	19,25	0,44
12	1	0,76	1,64	0,81	2,13	0,89	3,14
12	2	0,76	0,03	0,81	3,95	0,89	7,89
12	3	0,72	0,01	0,81	3,95	0,89	7,89
12	4	0,00	0,01	11,60	3,95	23,19	7,89
12	5	0,17	0,01	13,84	3,95	27,70	7,89
12	6	0,03	0,00	9,74	0,22	19,48	0,44

Verilen bu çizelgedeki sonuçlar, bize hem farklı yüklenme durumlarındaki THD değerlerini hem de farklı rüzgar hızlarındaki THD değerlerini inceleme imkanı vermektedir.

Öncelikle tek bir yüklenme durumu için sadece rüzgar hızındaki değişimin akım ve gerilimdeki THD’ ye etkisini inceleyelim.

Yükün lineer olarak kabul edildiği durumda normal şartlarda sistemde harmonik bulunmaması gerekir. Fakat çizelgede lineer yüklenme durumu için verilen değerleri

incelersek, harmonik bozulunun olduğunu görürüz. Bunun sebebi yükü beslemek için kurulan rüzgar çiftliği tarafıdır. Burada kullanılan dönüştürücüler sebebiyle sistemde az da olsa harmonik bozulum meydana gelmektedir.

Çizelgeyi incelediğimizde RES'e yaklaştıkça akım ve gerilimdeki bozulunun arttığı, uzaklaştıkça azaldığı görülmektedir. Bozulum etkisinin akım üzerinde daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durum bize RES için dönüştürücülerin filtre edilmesinin ne kadar gerekli olduğunu göstermektedir.

Yine lineer yüklenme durumunda rüzgar hızındaki değişimin etkisi de çizelgede 6 m/sn, 8 m/sn ve 12 m/sn rüzgar hızlarındaki değerler verilerek incelenmiştir. Rüzgar hızı arttıkça analizi gerçekleştirilen sistemdeki (ölçüm noktalarındaki) THD'nin azaldığı görülmüştür. Bu durum bize RES'lerin yüklendikçe distorsiyon değerlerinin azalacağı ve bu nedenle yüklenmelerinin bozulum açısından olumlu katkılar sağlayacağı sonucunu vermektedir.

Nonlinear yüklenme durumları incelendiğinde, yükteki harmonik bozulunun yani harmonik bileşen değerlerindeki artışın, sistemin tüm noktalarına ait akım ve gerilimdeki bozulumu arttırdığı belirlenmiştir.

Nonlinear yüklenme durumları için rüzgar hızındaki değişimin etkisi incelendiğinde rüzgar hızı arttıkça 380 kV'luk baranın Rüzgar çiftliği tarafındaki hatlarda THD₁ değerlerinin azaldığı, şebeke tarafında ise arttığı görülmektedir. RES'ler yüklendikçe şebeke tarafından çekilen temel bileşen akımının azalmasına bu nedenle şebekedeki THD₁ değerinin artmasına yol açmaktadır. Aynı şekilde RES'lerin yüklenmesi (beslediği güç artışı) ile verdiği temel bileşen akımı artmakta ve RES tarafındaki THD₁ değerinin azalmasına neden olmaktadır. Bu önemli bir sonuç olup RES'lerin bulunduğu şebekede filtrelemenin önemini ortaya koymaktadır.

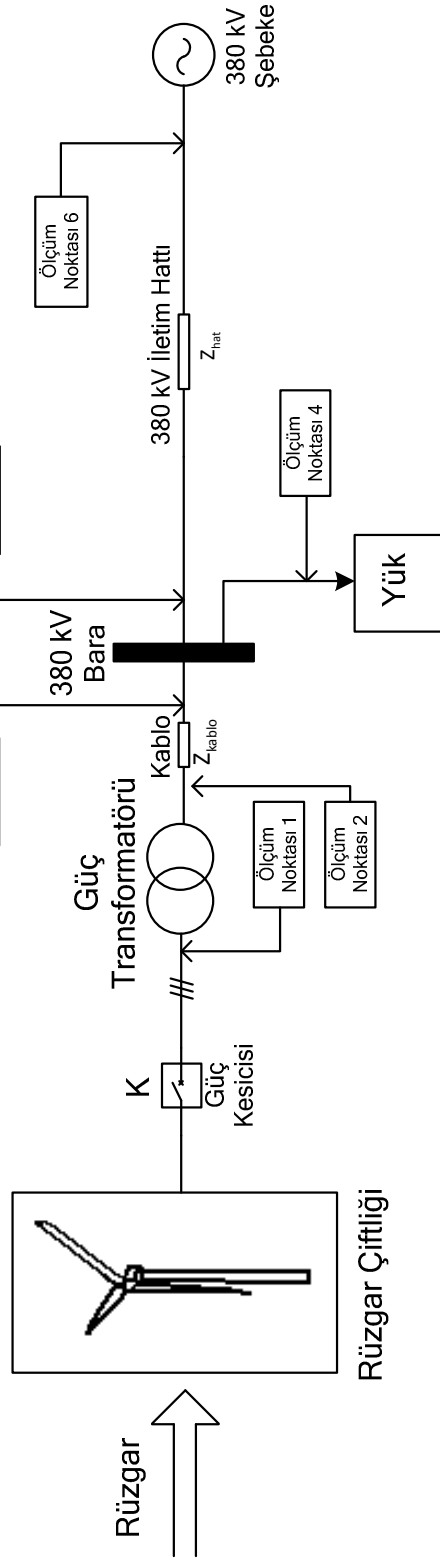
5.4 Sayısal Uygulama 3

Farklı rüzgar hızlarında yükün lineer kabul edildiği ve ölçülen gerçek yük değerlerine göre nonlinear olduğu durumlar gözönüne alınarak rüzgar çiftliği tarafında anahtarlama olması hali için simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda toplam çalışma süresi 1 sn'dir. 0,45-0,5. sn'ler arasında rüzgar çiftliği tarafında anahtarlama

yaptırılmış ve bu süreler arasında rüzgar çiftliği devre dışı bırakılmıştır. Anahtarlamanın (K, güç kesicisinin) olduğu yer ve ölçüm noktaları Şekil 5.24’de gösterilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, güç sistemlerinde gerçek işletme durumlarında da karşılaşılabilecek olan, RES’de meydana gelebilecek bir arıza sebebiyle veya rüzgar hızındaki düşme sebebiyle sistemin devre dışına çıkması ve yükün sadece şebekeden beslenmesi esnasında meydana gelebilecek transiyentlerin (geçici durumların) akım ve gerilim üzerindeki etkisini incelemektir.

Anahtarlama analizlerinde, K güç kesicisinin açma nedeni olarak karşımıza çıkacak tüm olaylar ve etkileri göz ardı edilmiştir. Çalışmada, sadece anahtarlamanın etkilerinin ortaya konulması hedeflenmiş olup anahtarlamaya neden olabilecek aşırı akım, aşırı gerilim ve kısa devre gibi olayların sistemdeki etkileri dikkate alınmamıştır.

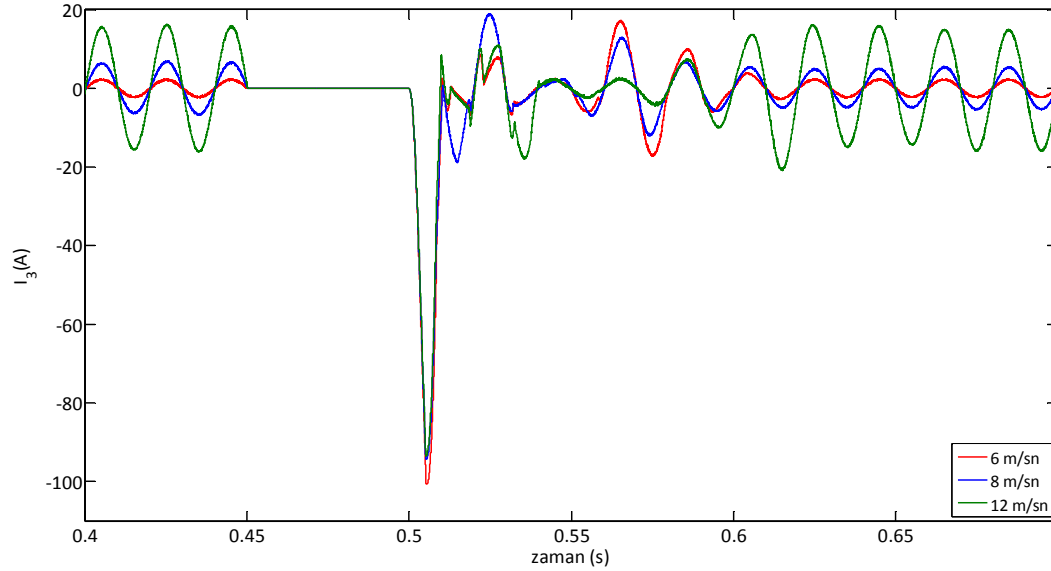


Şekil 5.24 Rüzgar çiftliği anahtarlama durumu

Şekil 5.24'den de görüldüğü gibi K noktasında bulunan güç kesicisi ile anahtarlama gerçekleştirilmiştir. Anahtarlama işlemi rüzgar çiftliğinin olası bir arıza ile aniden devre dışına çıkmasına karşılık olan bir durumu ortaya koymak için yapılmıştır. Böylece rüzgar çiftliğinin devreden çıkması ve tekrar devreye girmesi halinde sistemin davranışı analiz edilmiştir.

5.4.1 Lineer Yükleme Durumunda Farklı Rüzgar Hızları İçin Rüzgar Çiftliği Tarafında Anahtarlama Yapılması Durumu (Çalışma Modu 3.1)

Farklı rüzgar hızlarında lineer yükleme hali için simülasyon yapılmıştır. 1 sn'lik simülasyon çalışma süresinin 0,45. saniyede rüzgar çiftliği devre dışı bırakılmış ve 0,50. sn'de tekrar devreye alınmıştır. Bu süreçte sistem davranışı incelenmiştir. Anahtarlamanın olduğu süre zarfında 3 nolu ölçüm noktasındaki bir faz akımının değişimi Şekil 5.25'te gösterilmiştir.



Şekil 5.25 Farklı rüzgar hızları için lineer yükleme durumunda ölçüm noktası 3'den çekilen akımın değişimi

Anahtarın tekrar kapandığı süreçte her bir rüzgar hızı için ilk anda aşırı bir akım çekilmekte fakat bir süre sonra normal değerlere düşmektedir. Rüzgar çiftliğinden normalde 12 m/sn rüzgar hızında daha fazla akım çekilmesine rağmen anahtar kapatıldığı anda akımdaki ani yükselme nominal akımın 5,8899 katına, 8 m/sn rüzgar hızında yaklaşık olarak 14,2633 katına, 6 m/sn rüzgar hızında yaklaşık olarak 44,9754 katına ulaşır.

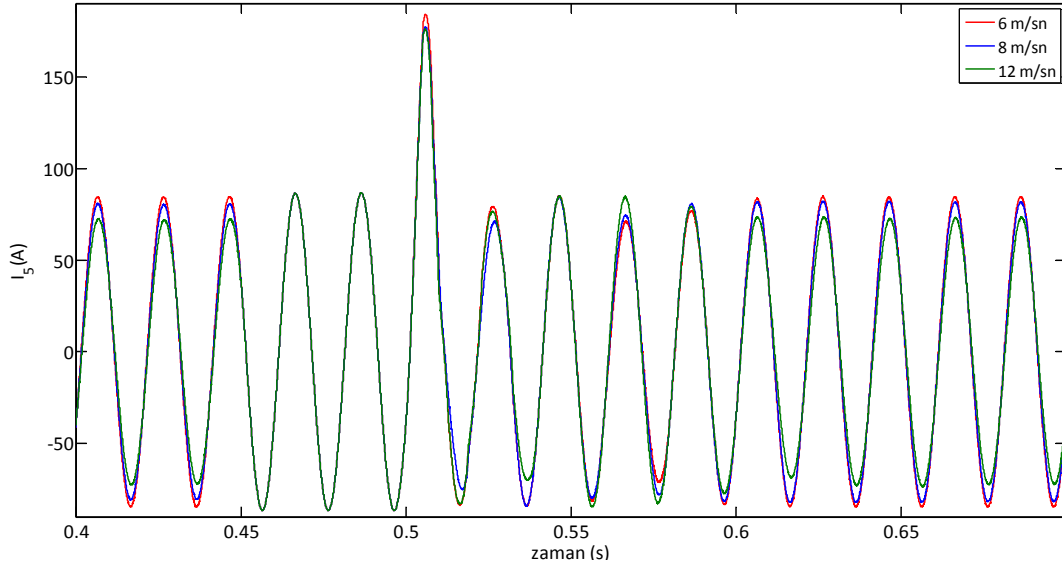
katına çıkmaktadır. Bu sonuçlardan da görüldüğü gibi rüzgar hızı azaldıkça transient durumda akımın yükselmesi artmaktadır. Simulasyon gerçekleştirilen sistemde her bir rüzgar hızı için anahtar 0,5. sn’ de kapatılmıştır.

Çizelge 5.15 Rüzgar Çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda lineer yüklenme hali için ölçüm noktası 3’ten çekilen akımın genliğindeki maksimum artış

Lineer Yüklenmedeki Anahtarlama	Rüzgar Hızı (m/sn)		
	6	8	12
Akımın Genliğindeki Artış Oranı	44,9754	14,2633	5,8899

Faz akımında oluşan bu transient yükselme sebebiyle sistemde bulunan cihazlarda arızalar, koruma sistemlerinin devreye girmesi gibi olumsuz etkiler meydana gelebilecektir.

Gerçekleştirilen simülasyon sonucunda yükün ölçüm noktası 5’ten çektiği akımın değişimi Şekil 5.26’da gösterilmiştir.



Şekil 5.26 Farklı rüzgar hızları için lineer yüklenme durumunda ölçüm noktası 5’den çekilen akımın değişimi

Rüzgar çiftliği tarafında bulunan anahtar açılmadan önceki her bir rüzgar hızındaki akım değerleri ile anahtarın kapandığı andaki akım değerleri kıyaslandığında, 12 m/sn rüzgar hızında akım değeri 2,4289 katına, 8 m/sn rüzgar hızında 2,2014 katına, 6 m/sn rüzgar hızında 2,1772 katına çıkmaktadır.

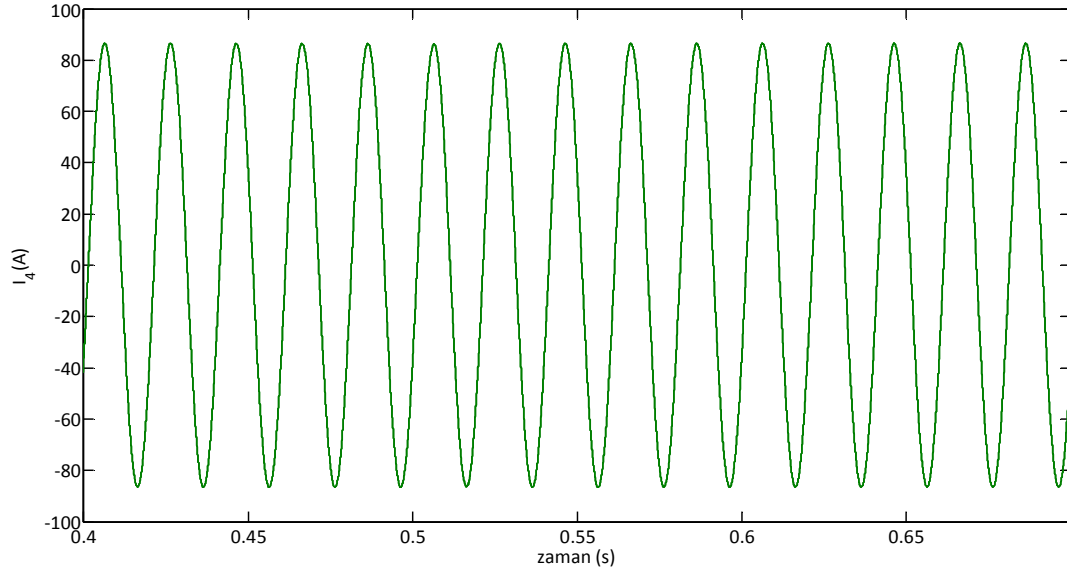
Çizelge 5.16 Rüzgar Çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda lineer yüklenme hali için ölçüm noktası 5’den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış

Lineer Yüklenmedeki Anahtarlama	Rüzgar Hızı (m/sn)		
	6	8	12
Akımın Genliğindeki Artış Oranı	2,1772	2,2014	2,4289

Ölçüm noktası 3 ve ölçüm noktası 5’ten alınan veriler kıyaslandığında anahtarın kapandığı andaki ani yükselme değeri, ölçüm noktası 3’de şebeke tarafına göre çok daha fazla olmaktadır. Bu akım yükselmeleri koruma sisteminin devreye girmesine ve sistemi enerjisiz bırakmasına sebep olabilecektir.

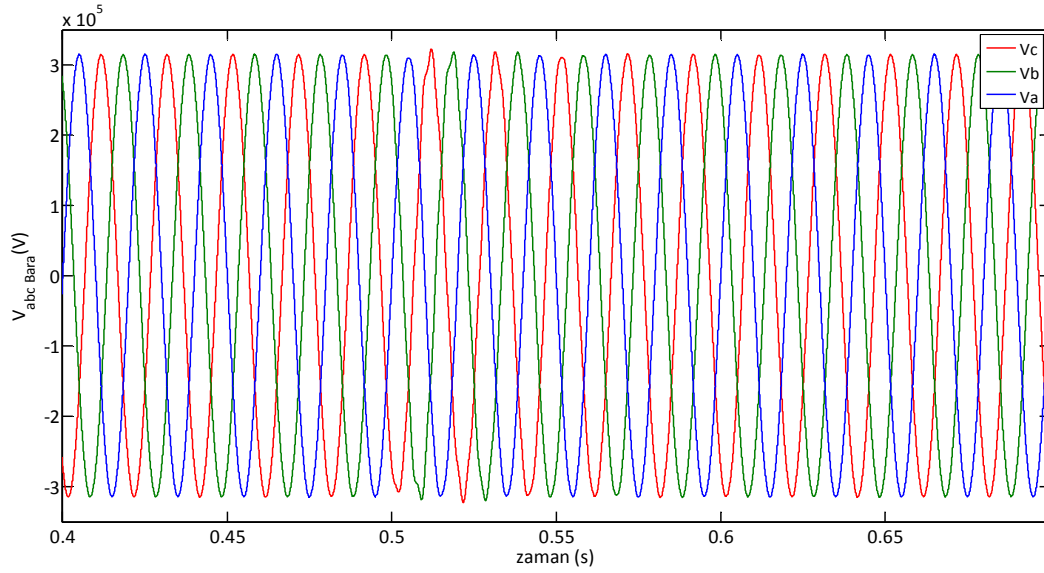
Rüzgar çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda yükün çektiği akım değişimi Şekil 5.27’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi rüzgar çiftliği tarafındaki anahtarlama operasyonunun yükün çektiği akım üzerinde bir etkisi olmamaktadır. Yük ihtiyaç duyduğu gücü şebeke tarafından çekmeye devam etmektedir. Böyle bir durumdaki problem, şebekeye uzun bir iletim hattı üzerinden bağlanması sebebiyle oluşacak gerilim düşümleri ve güç kayıplarının artmasıdır.

Ayrıca, büyük güçlü RES’ler göz önüne alınırsa şebekenin yeterince güçlü olmaması durumunda gerilimde meydana gelebilecek aşırı düşüşler nedeniyle gerilim çökmesi meydana gelebilir. Böyle bir durumda komşu sistemlerde de problem yaşanarak, bölgesel elektrik enerjisi kesintileriyle karşılaşılabilir.

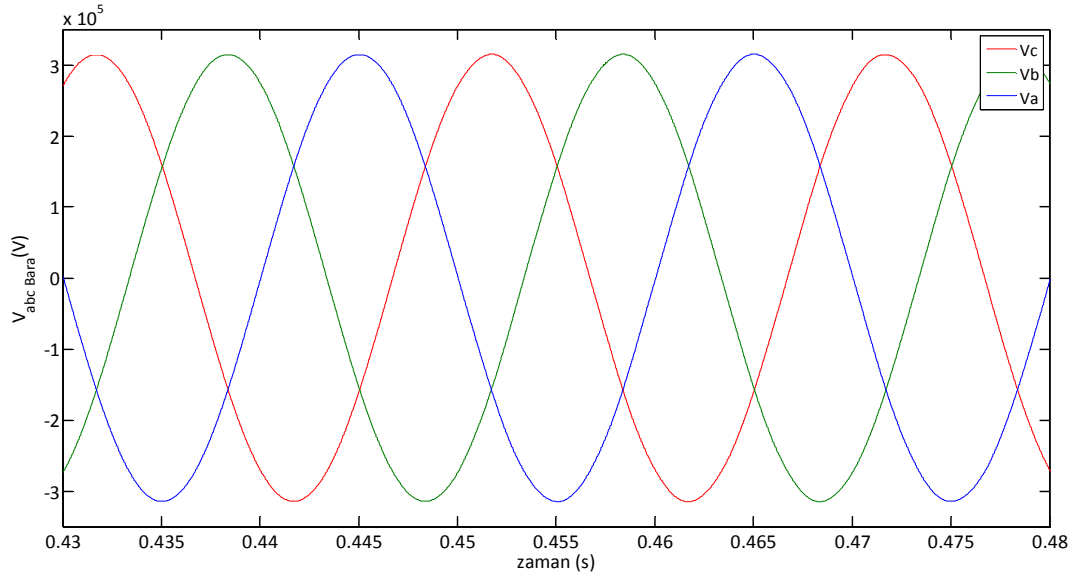


Şekil 5.27 Farklı rüzgar hızları için lineer yüklenme olması durumunda yük akımının değişimi

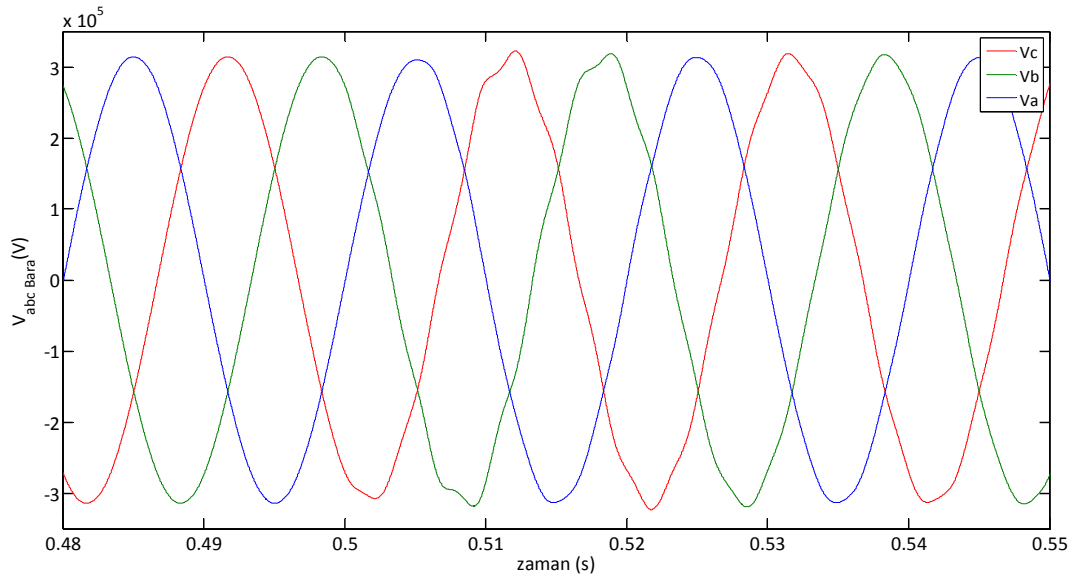
Farklı rüzgar hızlarında gerçekleştirilen simülasyon çalışmasında rüzgar çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda yükün bağlı olduğu baradaki 3 faz gerilim değişimleri Şekil 5.28’de gösterilmiştir.



(a) 3 faz bara gerilimi değişimi



(b) K anahtarının açıldığı andaki değişim



(c) K anahtarının kapandığı andaki değişim

Şekil 5.28 Rüzgar çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda lineer yüklenme için 380 kV'luk baradaki 3 faz gerilim değişimi

Yükün bağlı olduğu 380 kV gerilim seviyesindeki her bir faza ait gerilim rüzgar çiftliği tarafında olan anahtarlama gerilimin faz açısı ve o andaki değerine bağlı olarak farklı etkilenmektedir. Şekil 5.28'den de görüldüğü gibi B ve C fazına ait gerilimin dalga şekli rüzgar çiftliği tarafında meydana gelen anahtarlama daha fazla etkilenmiştir. Bu etkilenme rüzgar çiftliğinin devreden çıktığı anda değil rüzgar çiftliğinin tekrar

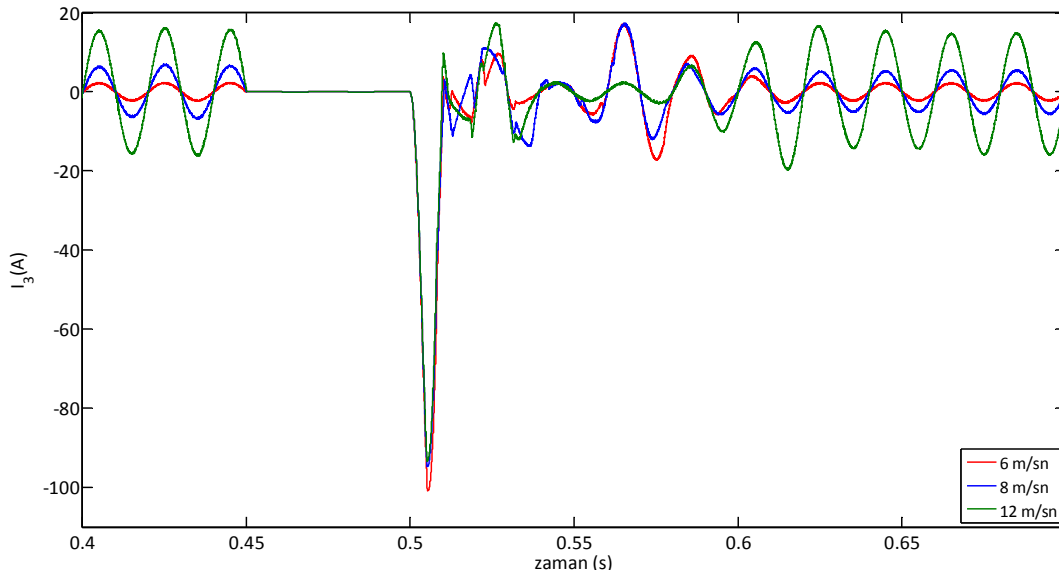
devreye girdiği anda meydana gelmiştir. Ölçüm yapılan baradaki A fazının gerilimi 0,9847 katına düşmüş, B fazının gerilimi 1,0254 katına ve C fazının gerilimi 1,0124 katına çıkmıştır.

Çizelge 5.17 Rüzgar Çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda lineer yüklenme hali için bara geriliminin genliğindeki maksimum artış

Lineer Yüklenmedeki Anahtarlama	Faz		
	A	B	C
Gerilimin Genliğindeki Artış Oranı	0,9847	1,0254	1,0124

5.4.2 Nonlineer Yüklenme Durumunda Farklı Rüzgar Hızları İçin Rüzgar Çiftliği Tarafında Anahtarlama Yapılması Durumu (Çalışma Modu 3.2)

Farklı rüzgar hızları için nonlineer yüklenme yapılmış ve elektriksel parametre olarak proje kapsamında gerçekleştirilen ölçümden elde edilen değerler kullanılmıştır. 1 sn'lik simülasyon çalışma süresinin 0,45. saniyede rüzgar çiftliği devre dışı bırakılmış ve 0,50. sn'de tekrar devreye alınmıştır. Bu süre boyunca sistem davranışı incelenmiştir. Anahtarlamanın olduğu süre zarfındaki 3, 5 ve 4 numaralı ölçüm noktalarındaki bir faz akımına ait değişimler sırasıyla Şekil 5.29, Şekil 5.30 ve Şekil 5.31'de gösterilmiştir.

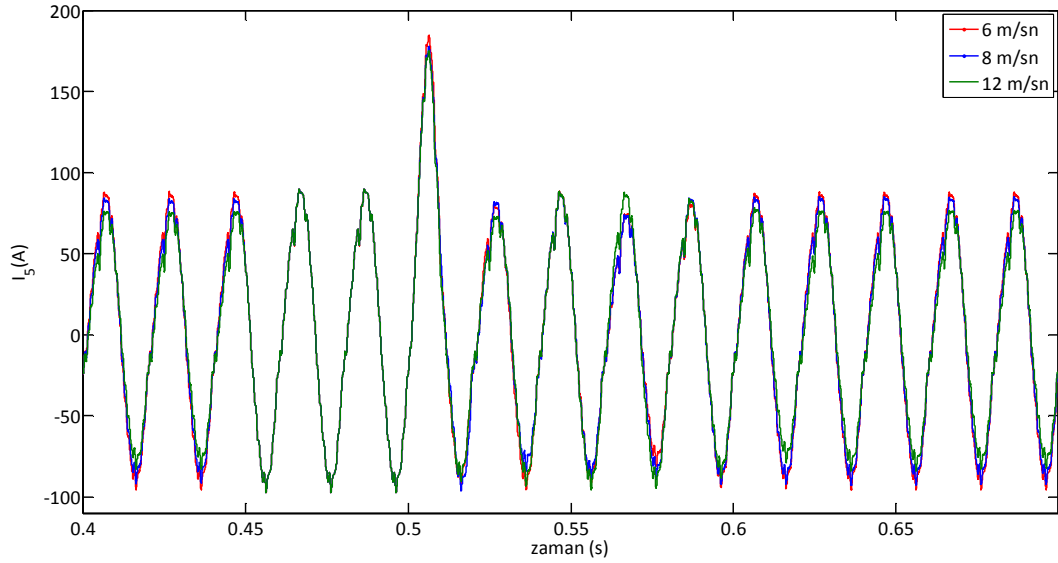


Şekil 5.29 Farklı rüzgar hızları için nonlineer yüklenme durumunda ölçüm noktası 3'den çekilen akımın değişimi

Yükün harmonikli akım bileşenleri içermesi ve rüzgar çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda, ölçüm noktası 3'deki akım değişimi incelendiğinde çiftliğin tekrar devreye girdiği anda çekilen akımda ani yükselmeler meydana gelmektedir. Rüzgar hızı 12 m/sn iken anahtarlama olması durumunda akım 5,9321 katına, 8 m/sn rüzgar hızında 14,2954 katına, 6 m/sn rüzgar hızında ise 45,7182 katına çıkmaktadır. Yükün harmonikli olması durumunda anahtarın kapatıldığı andaki akımdaki artış oranı 6 m/sn rüzgar hızında en yüksek olmaktadır.

Çizelge 5.18 Rüzgar Çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda nonlinear yüklenme hali için ölçüm noktası 3'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış

Nonlinear Yüklenmedeki Anahtarlama	Rüzgar Hızı (m/sn)		
	6	8	12
Akımın Genliğindeki Artış Oranı	45,7182	14,2954	5,9321



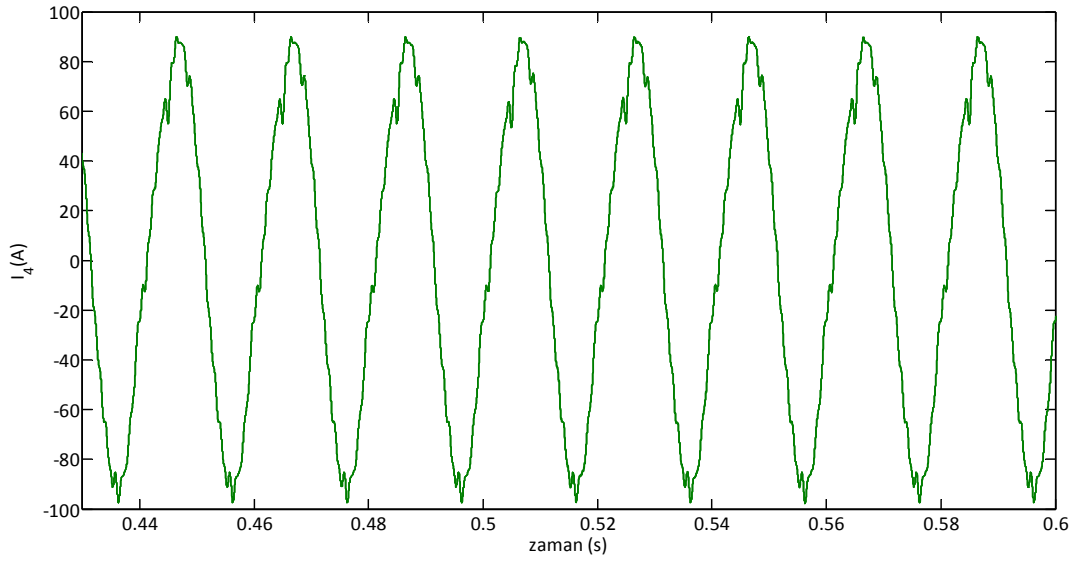
Şekil 5.30 Farklı rüzgar hızları için nonlinear yüklenme durumunda ölçüm noktası 5'den çekilen akımın değişimi

Harmonikli yükün bağlı olduğu sistemde rüzgar çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda şekilden de görüldüğü gibi şebeke tarafındaki ölçüm noktası 5'ten çekilen akım etkilenmekte ve ani akım yükselmesine sebep olmaktadır. Bu ani yükselmeler anahtarın kapandığı anda meydana gelmekte ve 12 m/sn rüzgar hızında nominal değerinin 2,314 katına, 8 m/sn rüzgar hızında 2,1138 katına, 6 m/sn rüzgar hızında ise

2,0988 katına kadar çıkmaktadır. Bu yükselmelerin yaşanması koruma sisteminde aşırı akım rölelerinde arıza algılanarak kesici açmalarına neden olabilir.

Çizelge 5.19 Rüzgar Çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda nonlinear yüklenme hali için ölçüm noktası 5’den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış

Nonlinear Yüklenmedeki Anahtarlama	Rüzgar Hızı (m/sn)		
	6	8	12
Akımın Genliğindeki Artış Oranı	2,0988	2,1138	2,3143



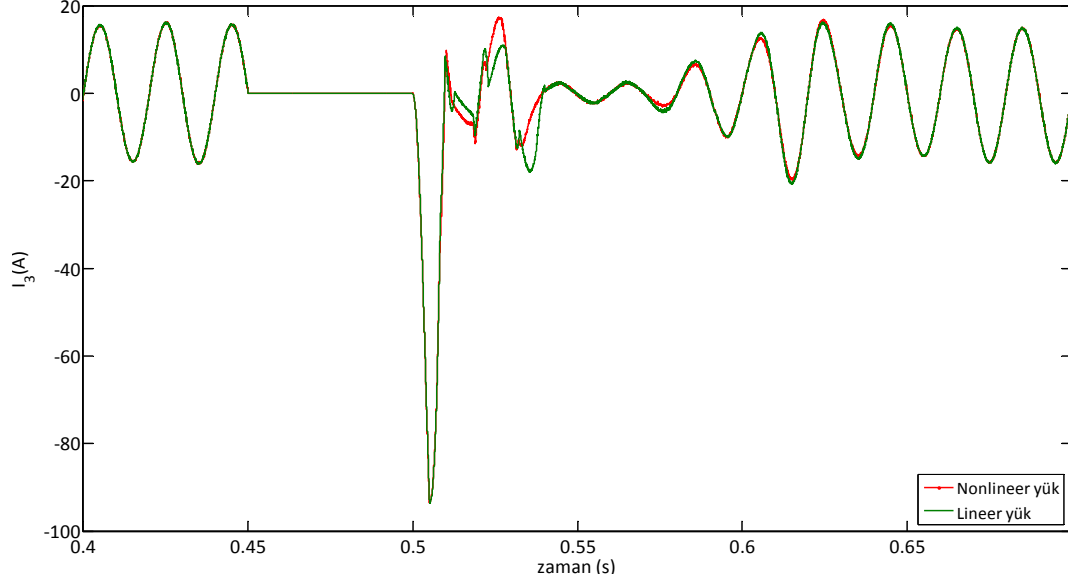
Şekil 5.31 Farklı rüzgar hızları için nonlinear yüklenme durumunda ölçüm noktası 4’den çekilen yük akımının değişimi

Şekil 5.31’den de görüldüğü gibi Ölçüm Noktası 4’ten alınan nonlinear yüke ait akımın zamana bağlı değişiminden, rüzgar çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda yükün nonlinear olması durumunda da yük tarafından çekilen akım bu anahtarlama olayından etkilenmemektedir.

5.4.3 Sabit Rüzgar Hızında Rüzgar Çiftliği Tarafında Anahtarlama Olması Halinde Lineer Ve Nonlinear Yüklenme Durumlarının Karşılaştırılması (Çalışma Modu 3.3)

Rüzgar hızının 12 m/sn olduğu kabul edilerek rüzgar çiftliğinin 0.45-0.50 sn aralığında devre dışı kalıp tekrar devreye girmesi durumunun simülasyonu gerçekleştirilmiş ve

lineer yük ve nonlinear yüklenme durumları karşılaştırılmıştır. 12 m/sn'lik sabit rüzgar hızında gerçekleştirilen simülasyonda Ölçüm Noktası 3'deki akımın bir fazına ait değişim Şekil 5.32'de verilmiştir.



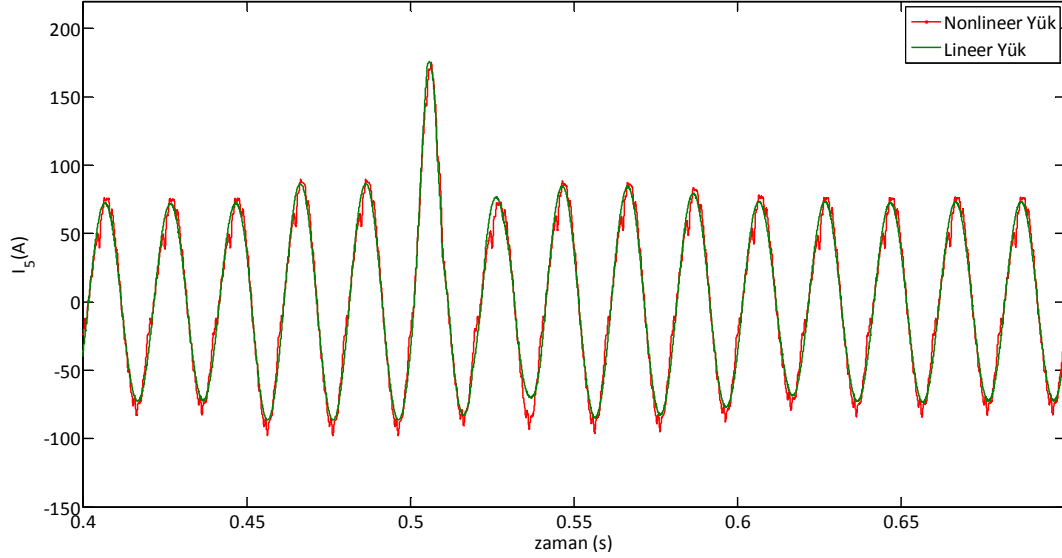
Şekil 5.32 Sabit rüzgar hızında (12 m/sn) lineer ve nonlinear yüklenme durumları için ölçüm noktası 3'den çekilen akımın değişimi

Rüzgar çiftliği tarafında herhangi bir anda anahtarlama olması durumunda yük nonlinear ise çiftlik tekrar devreye girdikten sonra lineer yük durumunda çekilen akıma göre ani olarak daha yüksek değere çıkmaktadır. Şekil 5.32'den de görüldüğü gibi anahtarın kapatıldığı anda yükün lineer ve nonlinear yüklenme durumunda 12 m/sn rüzgar hızında akım değeri arıza olmadan önce yük tarafından çekilen akımın yaklaşık olarak 6 katına kadar çıkmaktadır. Bu durum koruma sistemi tarafından aşırı akım olarak algılanıp sistemin devre dışı kalmasına sebep olabilir.

Çizelge 5.20 Rüzgar Çiftliği tarafında 12 m/sn rüzgar hızında anahtarlama olması durumunda lineer ve nonlinear yüklenme için ölçüm noktası 3'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış

Anahtarlama Yapılması	Yük durumu	
	Lineer	Nonlineer
Akımın Genliğindeki Artış Oranı	5,8899	5,9321

Anahtarlama olması durumunda Şekil 5.33’de verilen 5 nolu ölçüm noktasından çekilen akımın değişimi incelendiğinde akımların dalga şekli formları çok bozulmamasına rağmen ani yükselmeler yükün her iki durumunda da meydana gelmektedir. Yükün nonlinear veya lineer yüklenme durumlarında akım değeri anahtarlama olmadan önceki değerinin yaklaşık olarak 2,5 katına çıkmaktadır ki bu ani akım yükselmeleri enerji sisteminin sürekliliği açısından istenmeyen durumlardır.



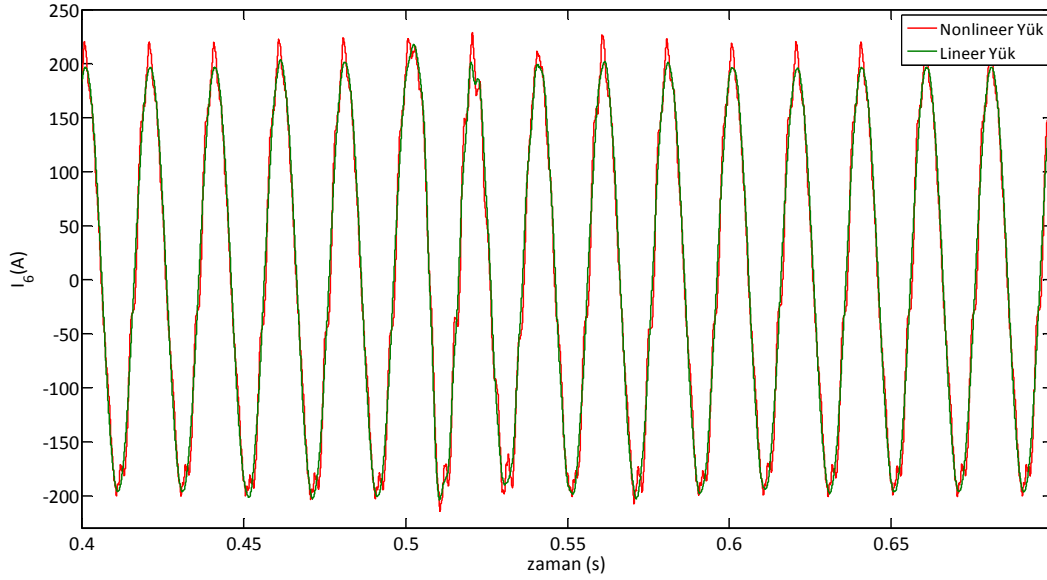
Şekil 5.33 Sabit rüzgar hızında (12 m/sn) lineer ve nonlinear yüklenme durumları için ölçüm noktası 5’den çekilen akımın değişimi

Çizelge 5.21 Rüzgar Çiftliği tarafında 12 m/sn rüzgar hızında anahtarlama olması durumunda lineer ve nonlinear yüklenme için ölçüm noktası 5’den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış

Anahtarlama Yapılması	Yük durumu	
	Lineer	Nonlinear
Akımın Genliğindeki Artış Oranı	2,4289	2,3143

Sabit rüzgar hızında, şebeke tarafındaki 6 nolu ölçüm noktasındaki akım değişimi incelendiğinde Şekil 5.34’de görüldüğü gibi çekilen akımda rüzgar çiftliği devreye girdiğinde yaklaşık olarak 0.1 sn süreli bozulma meydana gelmiş fakat akımdaki ani yükselme şebeke tarafındaki ölçüm noktası 5’te meydana gelen yaklaşık 2,5 kat

yükselme kadar olmamıştır. Lineer yüklenme durumunda akım artışı 1,0704 kat, nonlinear durumda ise 1,0283 kat kadar olmuştur.

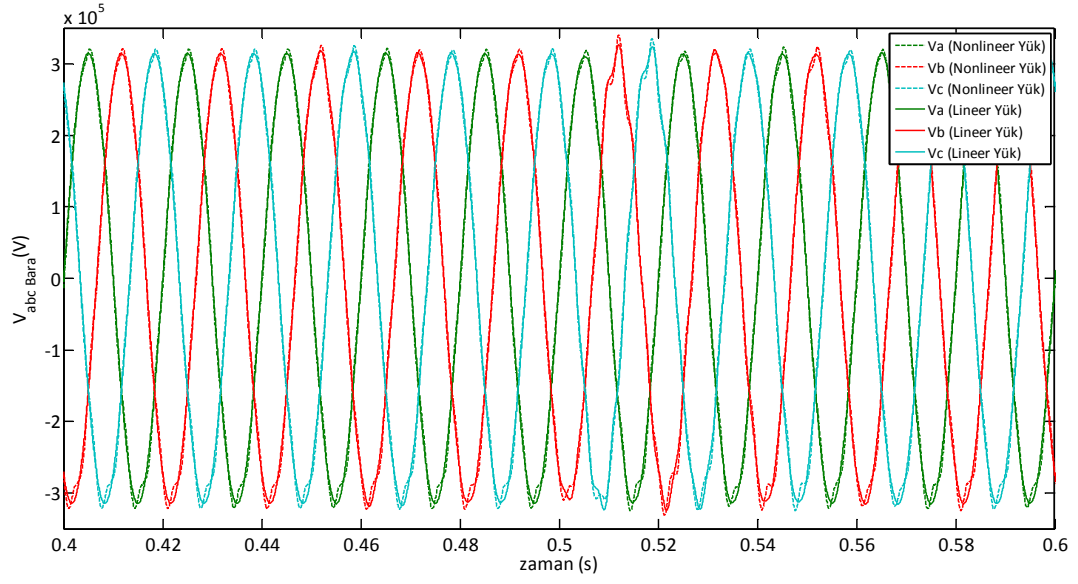


Şekil 5.34 Sabit rüzgar hızında (12 m/sn) lineer ve nonlinear yüklenme durumları için ölçüm noktası 6'dan çekilen akımın değişimi

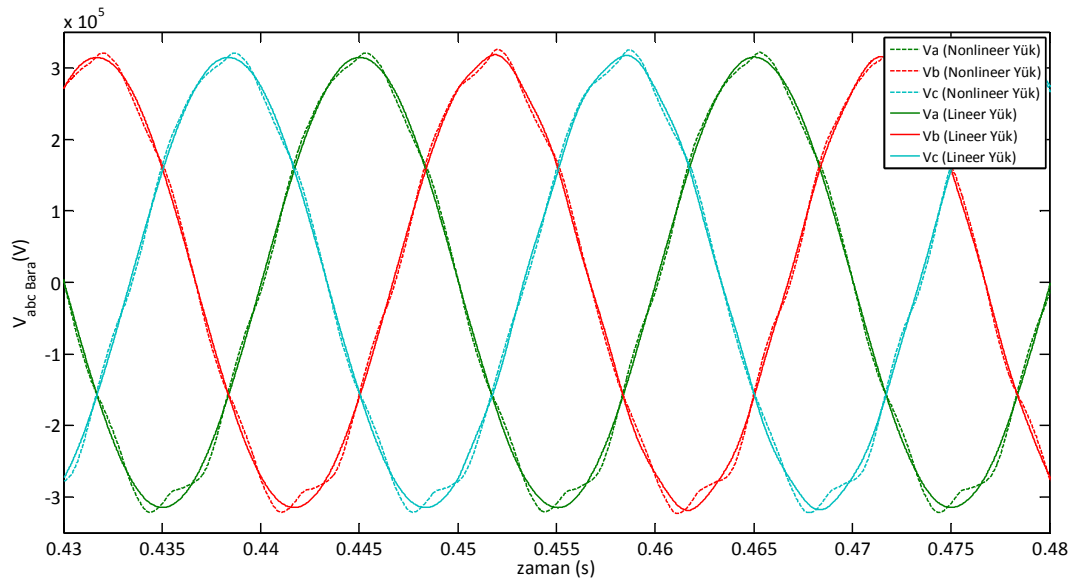
Çizelge 5.22 Rüzgar Çiftliği tarafında 12 m/sn rüzgar hızında anahtarlama olması durumunda lineer ve nonlinear yüklenme için ölçüm noktası 6'dan çekilen akımın genliğindeki maksimum artış

Anahtarlama Yapılması	Yük durumu	
	Lineer	Nonlinear
Akımın Genliğindeki Artış Oranı	1,0704	1,0283

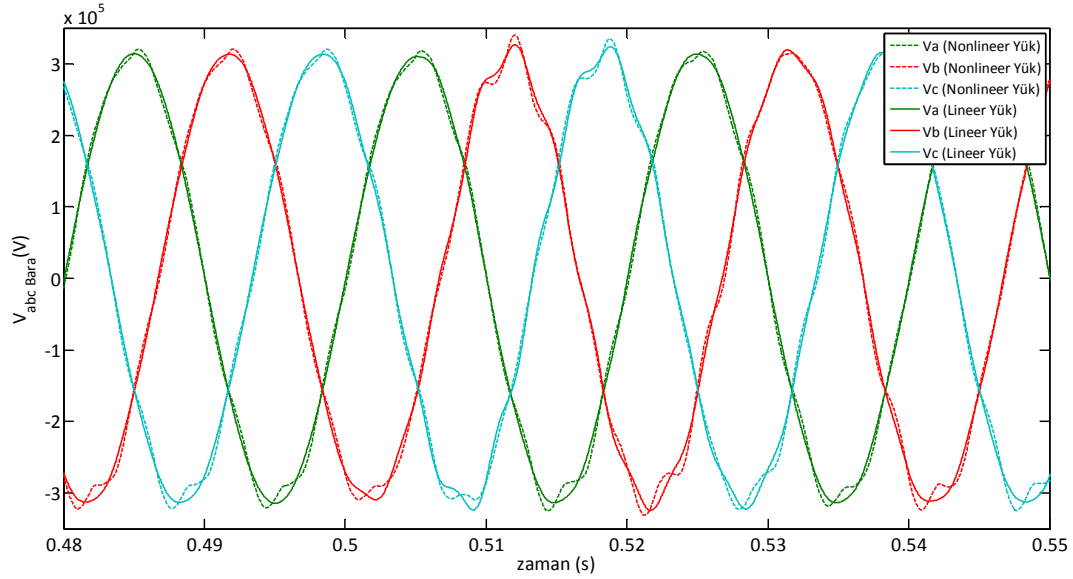
Yükün hem lineer hem de nonlinear olması durumlarında 12 m/sn rüzgar hızındaki rüzgar çiftliğindeki bir anahtarlama durumundaki 380 kV bara geriliminin 3 faz değişimi Şekil 5.35'de gösterilmiştir. Her bir faza ait gerilimlerdeki etkiler aynı olmamış, en belirgin bozulma anahtarın kapandığı andaki faz gerilim ve açısına bağlı olarak B ve C fazlarına ait gerilimlerde meydana gelmiştir. Yükün bağlı olduğu 380 kV gerilim seviyesindeki barada lineer yüklenme durumunda A fazının gerilimi 0,9847 katına düşmüş, B fazının gerilimi 1,0254 katına ve C fazının gerilimi 1,0124 katına çıkmış, nonlinear yüklenme durumunda ise A fazının gerilimi 0,9910 katına düşmüş, B fazının gerilimi 1,0598 katına ve C fazının gerilimi 1,0433 katına çıkmıştır.



(a) 3 faz bara gerilim değişimi



(b) K anahtarının açıldığı andaki değişim



(c) K anahtarının kapandığı andaki değişim

Şekil 5.35 Yükün bağlı olduğu 380 kV'luk bara geriliminin değişimi

Çizelge 5.23 Rüzgar çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda lineer ve nonlineer yüklenme hali için bara geriliminin genliğindeki maksimum artış

Anahtarlama Yapılması	Lineer Yüklenme			Nonlineer Yüklenme		
	A	B	C	A	B	C
Gerilimin Genliğindeki Artış Oranı	0,9847	1,0254	1,0124	0,9910	1,0598	1,0433

5.5 Sayısal Uygulama 4

Sayısal Uygulama 3'te RES'in tamamının geçici bir süre için devre dışı kalıp, sonra tekrar devreye girmesi durumu incelenmişti.

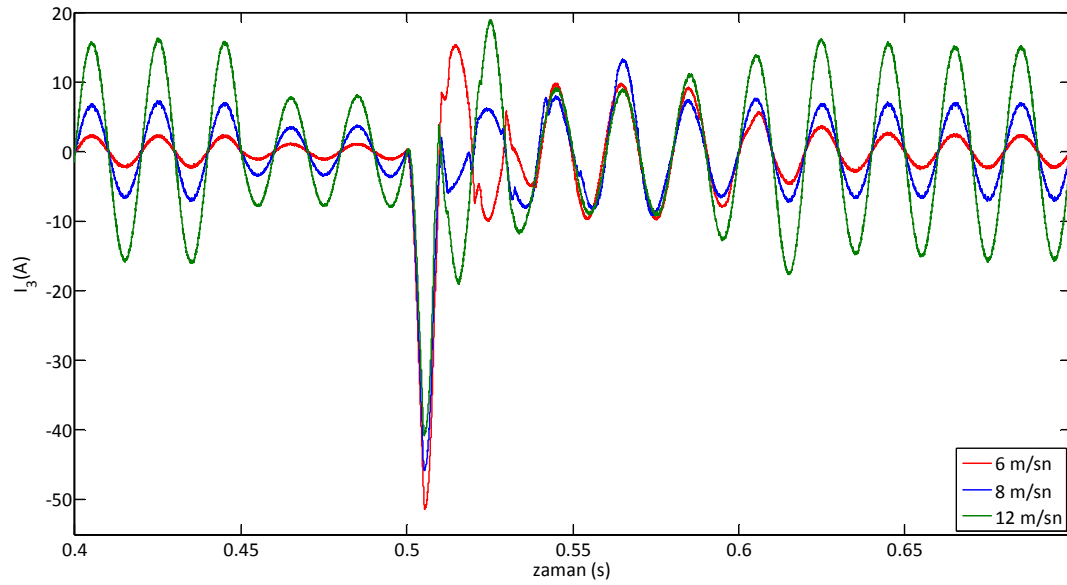
Bu durumdan farklı olarak, mevcut bulunan bir rüzgar çiftliğindeki rüzgar türbinlerinden bir veya birkaç tanesinin herhangi bir arıza sebebiyle devre dışı kalması durumu ile de karşılaşılabılır.

Tez çalışması için gerçekleştirilen modelde bu durumun sistem üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla, RES modelinde bulunan 4 adet rüzgar türbininden 2 tanesi geçici bir süre ile devre dışı bırakılıp tekrar devreye alınmıştır. Anahtarlamanın etkilerinin analiz edilebilmesi için açma-kapama operasyonunun elektriksel büyüklükler üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Rüzgar türbinlerinden iki tanesinin devre dışı kalması olayı, lineer yük ve nonlinear yük için gerçekleştirilmiştir. Daha sonra da bu iki durumun karşılaştırılması verilmiştir. Simülasyonlarda devre dışı bırakma işlemi 0,45. sn'de, devreye alma işlemi 0,5. sn'de yapılmıştır.

5.5.1 Lineer Yüklenme Durumunda Farklı Rüzgar Hızları İçin Rüzgar Çiftliğindeki 2 Türbinde Anahtarlama Olması Durumu (Çalışma Modu 4.1)

Yükün lineer olduğu kabul edilerek 6 m/sn, 8 m/sn ve 12 m/sn'lik rüzgar hızlarında rüzgar çiftliğindeki türbinlerden iki tanesinin devre dışı kalması ve sonra tekrar devreye girmesi olayının sistem davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu durum için simülasyondaki 3 ve 5 nolu ölçüm noktalarındaki akım değişimleri Şekil 5.36 ve Şekil 5.37'de gösterilmiştir.



Şekil 5.36 Farklı rüzgar hızları için lineer yüklenme durumunda ölçüm noktası 3'den çekilen akımın değişimi

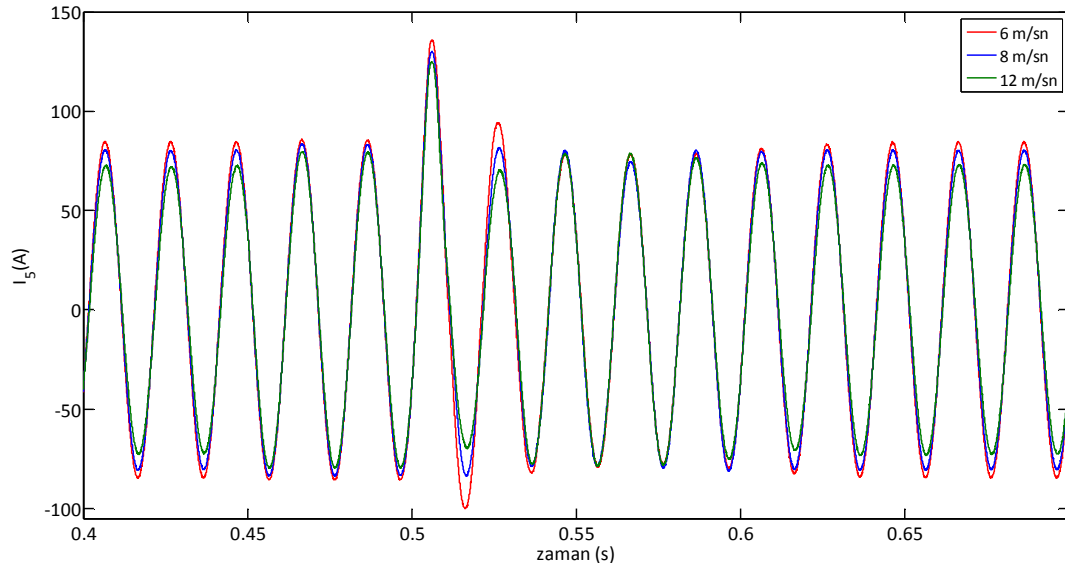
Şekil 5.36 incelendiğinde, rüzgar çiftliğinde bulunan türbinlerden 2 tanesinin devre dışı kalması durumunda her bir rüzgar hızında akım değerleri yaklaşık olarak yarıya inmiş, 2 türbinin tekrar devreye girdiği anda akım değerlerinde ani yükselme meydana gelmiştir. Rüzgar çiftliğinde herhangi bir arızanın olmadığı durumda farklı rüzgar hızlarında çekilen akımlar ile rüzgar çiftliğindeki 2 türbinin devreden çıkıp tekrar devreye girdiği andaki akım değerleri incelendiğinde yaklaşık olarak 12 m/sn rüzgar

hızında 2,5855 katına, 8 m/sn rüzgar hızında 6,5790 katına, 6 m/sn rüzgar hızında ise 22,7410 katına çıkmaktadır.

Rüzgar türbinlerinden 2 tanesinin devrede olmadığı anda farklı rüzgar hızları için çekilen akım değerleri ile türbinlerin tekrar devreye alınması durumunda çekilen akım değişimleri incelendiğinde 12 m/sn rüzgar hızında 5,0347 katına, 8 m/sn rüzgar hızında 12,4578 katına, 6 m/sn rüzgar hızında 46,4941 katına çıkmaktadır. Rüzgar çiftliğinde bulunan 2 türbinin devre dışı kalıp tekrar devreye girmesi durumunda rüzgar çiftliği tarafından çekilen akımların nominal değerlere gelmesi yaklaşık olarak 0,15 sn sürmüştür.

Çizelge 5.24 Rüzgar çiftliği tarafında 2 türbinde anahtarlama olması durumunda lineer yüklenme hali için ölçüm noktası 3’den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış

Anahtarlama Yapılması	Rüzgar Hızı (m/sn)		
	6	8	12
Sistemde Arızanın Olmadığı Durumda Akımın Genliğindeki Artış Oranı	22,7410	6,5790	2,5855
2 Türbinin Devre Dışı Olduğu Durumda Akımın Genliğindeki Artış Oranı	46,4941	12,4578	5,0347



Şekil 5.37 Farklı rüzgar hızları için lineer yüklenme durumunda ölçüm noktası 5’den çekilen akımın değişimi

İki türbinin 0,05 sn süreli devre dışı kalıp tekrar devre girdiği durumda yükün şebeke tarafından çektiği akım değişimi ölçüm noktası 5’den incelendiğinde, herhangi bir

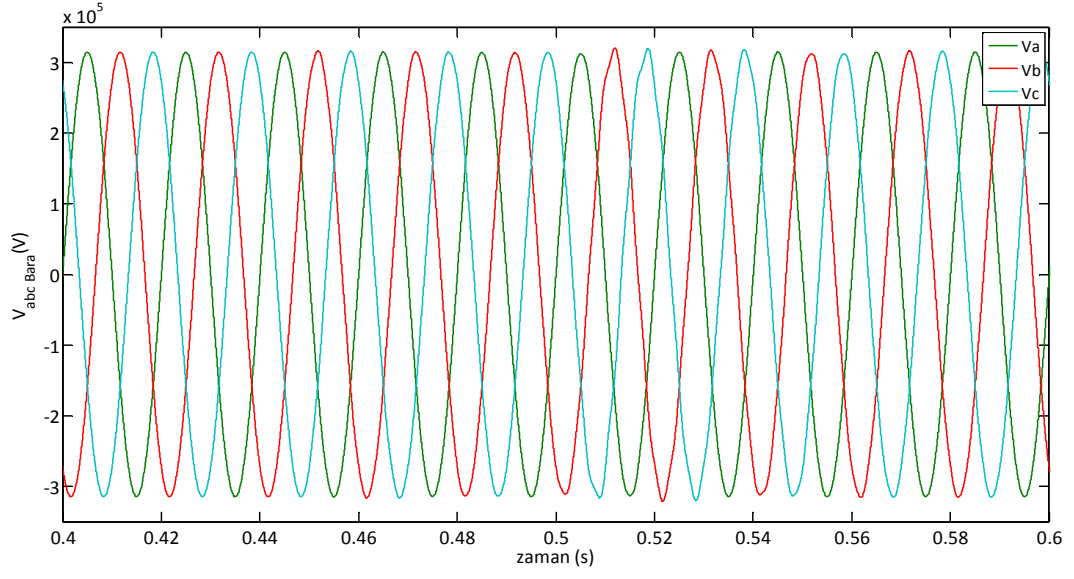
arızanın olmadığı durumda farklı rüzgar hızlarında çekilen akımlar ile rüzgar çiftliğindeki 2 türbinin devreden çıkıp tekrar devreye girdiği andaki akım değerleri incelendiğinde 12 m/sn rüzgar hızında 1,7250 katına, 8 m/sn rüzgar hızında 1,6199 katına, 6 m/sn rüzgar hızında 1,6075 katına çıktığı görülmüştür.

Rüzgar türbinlerinden 2 tanesinin devrede olmadığı anda farklı rüzgar hızları için şebeke tarafındaki ölçüm noktası 5'ten çekilen akım değerleri ile türbinlerin tekrar devreye alınması durumunda şebeke tarafındaki ölçüm noktası 5'ten çekilen akım değişimleri incelendiğinde 12 m/sn rüzgar hızında 1,5747 katına, 8 m/sn rüzgar hızında, 1,5614 katına, 6 m/sn rüzgar hızında ise 1,5883 katına çıktığı grafiklerden hesaplanmıştır.

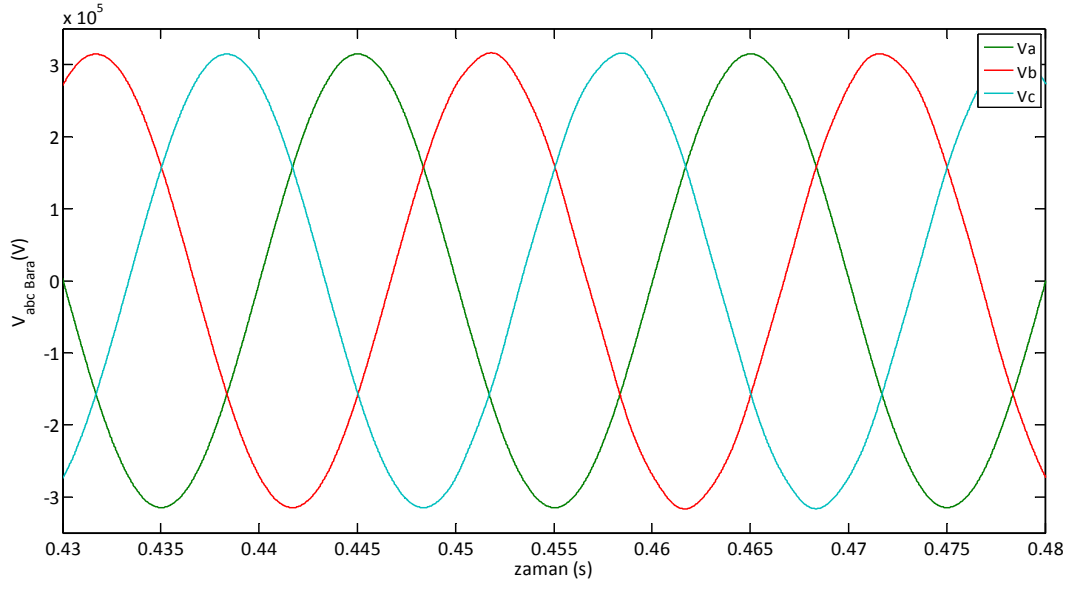
Çizelge 5.25 Rüzgar çiftliği tarafında 2 türbinde anahtarlama olması durumunda lineer yüklenme hali için ölçüm noktası 5'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış

Anahtarlama Yapılması	Rüzgar Hızı (m/sn)		
	6	8	12
Sistemde Arızanın Olmadığı Durumda Akımın Genliğindeki Artış Oranı	1,6075	1,6199	1,7250
2 Türbinin Devre Dışı Olduğu Durumda Akımın Genliğindeki Artış Oranı	1,5883	1,5614	1,5747

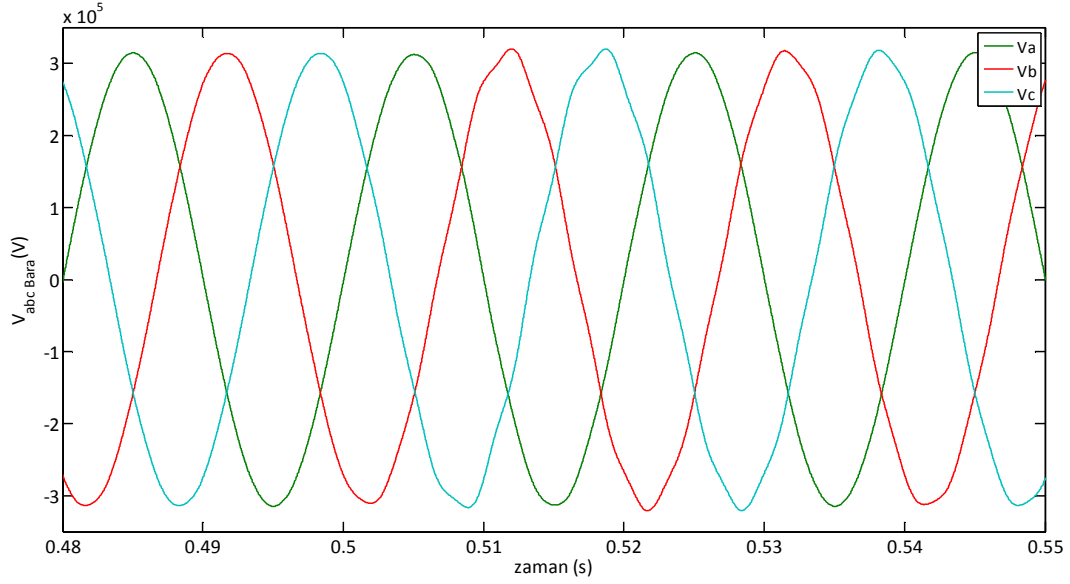
Rüzgar çiftliğindeki iki rüzgar türbininin aynı anda ve aynı sürelerde devreden çıkıp tekrar devreye girdiği durumda yükün bağlı olduğu 380 kV gerilim seviyesindeki bara geriliminin değişimi Şekil 5.38'de verilmiştir.



(a) 3 faz bara gerilim değişimi



(b) Anahtarın açıldığı andaki değişim



(c) Anahtarın kapandığı andaki değişim

Şekil 5.38 Rüzgar çiftliğinde 2 türbinde anahtarlama olması durumunda lineer yüklenme için 380 kV'luk baradaki 3 faz gerilim değişimi

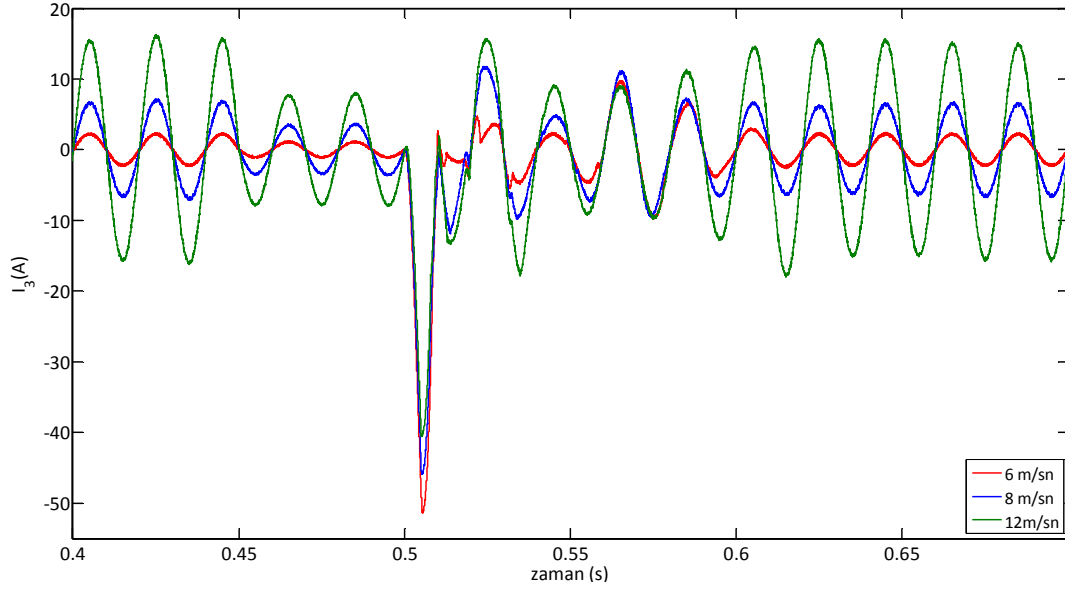
Rüzgar çiftliğinde 2 türbinin devre dışı kaldığı durumda hiçbir faza ait gerilim bu durumdan etkilenmemiş fakat türbinlerin tekrar devreye girdiği anda B ve C fazlara ait gerilimde bozulma meydana geldiği Şekil 5.38'den açıkça görülmektedir. Her bir faza ait gerilimlerdeki etkiler aynı olmamış, en belirgin bozulma anahtarın kapandığı andaki faz gerilim ve açısına bağlı olarak B ve C fazlarına ait gerilimlerde meydana gelmiştir. Bara geriliminin A fazında gerilim 0,9917 katına düşmüş, B ve C fazlarında ise sırasıyla 1,0181 ve 1,0172 katına yükselmiştir.

Çizelge 5.26 Rüzgar çiftliğinde 2 türbinde anahtarlama olması durumunda lineer yüklenme hali için bara geriliminin genliğindeki maksimum artış

Anahtarlama Yapılması	Fazlar		
	A	B	C
Gerilimin Genliğindeki Artış Oranı	0,9917	1,0181	1,0172

5.5.2 Nonlinear Yükleme Durumunda Farklı Rüzgar Hızları İçin Rüzgar Çiftliğindeki Türbinlerden 2 Tanesinin Devre Dışı Kalması Durumu (Çalışma Modu 4.2)

Yük, ölçülen gerçek sistemdeki ölçülen yük değerleri kullanılarak nonlinear yük modeli olarak modellenmiştir. Farklı rüzgar hızlarındaki rüzgar çiftliğindeki türbinlerden iki tanesinin aynı anda devre dışı kalması ve sonra tekrar devreye girmesi durumunda 3 ve 5 nolu ölçüm noktalarındaki akım değişimleri Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'da verilmiştir.



Şekil 5.39 Farklı rüzgar hızları için nonlinear yüklenme durumunda ölçüm noktası 3'den çekilen akımın değişimi

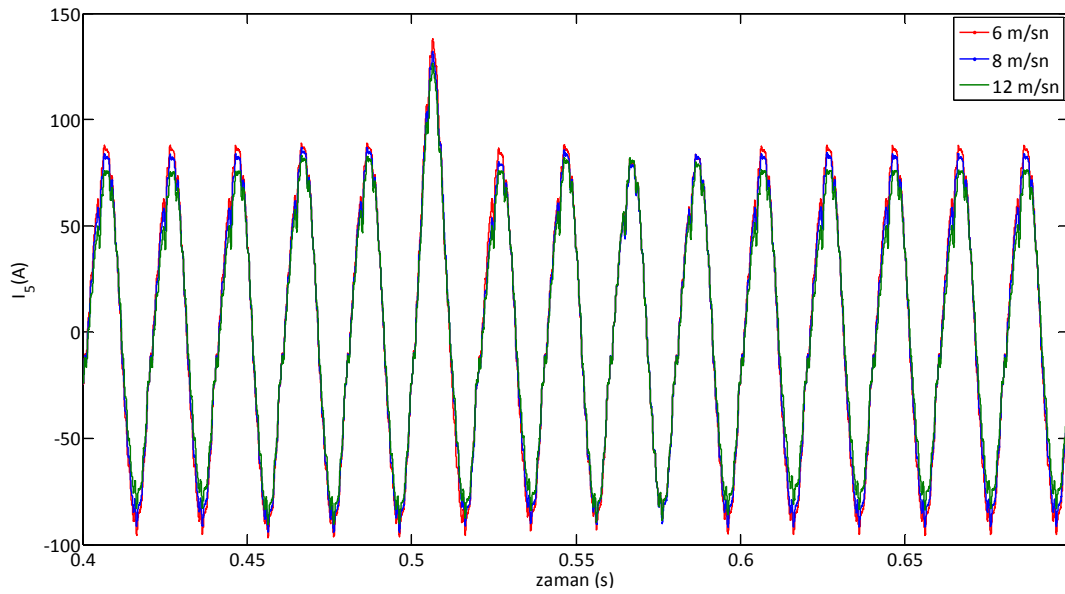
Yükün nonlinear olması durumunda Şekil 5.39 incelendiğinde, rüzgar çiftliğinde bulunan türbinlerden 2 tanesinin devre dışı kalması durumunda her bir rüzgar hızında akım değerleri yaklaşık olarak yarıya inmiş, 2 türbinin tekrar devreye girdiği anda akım değerlerinde yükselme meydana gelmiştir. Rüzgar çiftliğinde herhangi bir arızanın olmadığı durumda farklı rüzgar hızlarında çekilen akımlar ile rüzgar çiftliğindeki 2 türbinin devreden çıkıp tekrar devreye girdiği andaki akım değerleri incelendiğinde 12 m/sn rüzgar hızında 2,5847 katına, 8 m/sn rüzgar hızında 6,6866 katına, 6 m/sn rüzgar hızında ise 22,6223 katına çıkmaktadır.

Rüzgar türbinlerinden 2 tanesinin devrede olmadığı anda farklı rüzgar hızları için çekilen akım değerleri ile türbinlerin tekrar devreye alınması durumunda çekilen akım

değişimleri incelendiğinde 12 m/sn rüzgar hızında 5,0636 katına, 8 m/sn rüzgar hızında 12,3680 katına, 6 m/sn rüzgar hızında 46,7061 katına çıkmaktadır.

Çizelge 5.27 Rüzgar çiftliği tarafında 2 türbinde anahtarlama olması durumunda nonlinear yüklenme hali için ölçüm noktası 3'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış

Anahtarlama Yapılması	Rüzgar Hızı (m/sn)		
	6	8	12
Sistemde Arızanın Olmadığı Durumda Akımın Genliğindeki Artış Oranı	22,6223	6,6866	2,5847
2 Türbinin Devre Dışı Olduğu Durumda Akımın Genliğindeki Artış Oranı	46,7061	12,3680	5,0636



Şekil 5.40 Farklı rüzgar hızları için linear yüklenme durumunda ölçüm noktası 5'den çekilen akımın değişimi

Nonlinear yüklenmenin olduğu RES'lerden oluşan sistem incelendiğinde, şebeke tarafındaki Ölçüm Noktası 5'deki akım değişim grafiğinden, herhangi bir arızanın olmadığı durumda farklı rüzgar hızlarında çekilen akımlar ile rüzgar çiftliğindeki 2 türbinin devreden çıkıp tekrar devreye girdiği andaki akım değerleri incelendiğinde 12 m/sn rüzgar hızında 1,6684 kat, 8 m/sn rüzgar hızında 1,5796 m/sn rüzgar hızında 1,5673 kat ani olarak artış göstermektedir.

Rüzgar türbinlerinden 2 tanesinin devrede olmadığı anda farklı rüzgar hızları için şebeke tarafındaki ölçüm noktası 5'ten çekilen akım değerleri ile türbinlerin tekrar devreye alınması durumunda şebeke tarafındaki ölçüm noktası 5'ten çekilen akım değişimleri incelendiğinde 12, 8 ve 6 m/sn rüzgar hızları için sırasıyla 1,5256, 1,5236 ve 1,55 kat ani artışların olduğu görülmektedir.

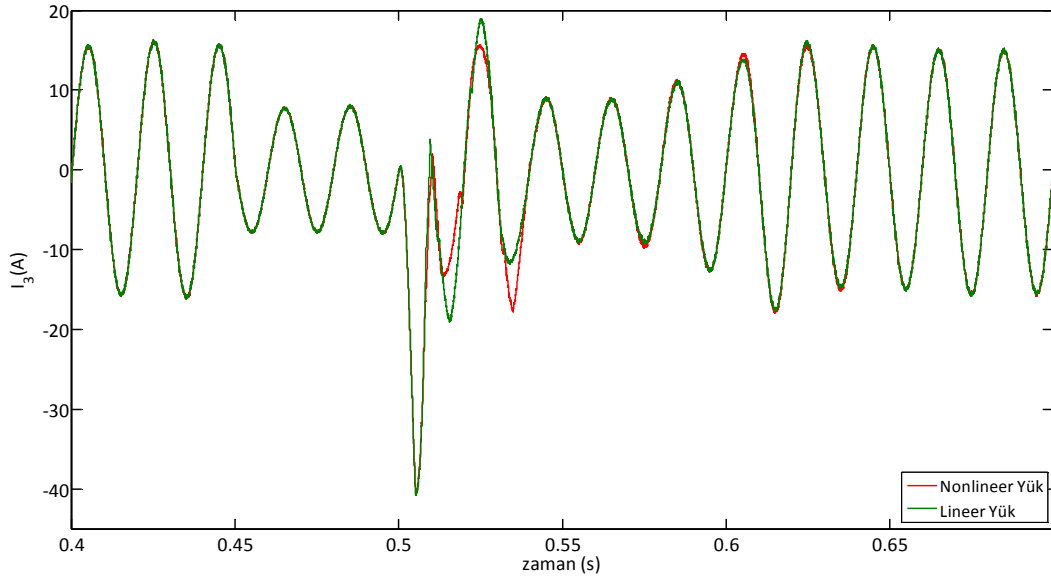
Çizelge 5.28 Rüzgar çiftliği tarafında 2 türbinde anahtarlama olması durumunda nonlinear yüklenme hali için ölçüm noktası 5'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış

Anahtarlama Yapılması	Rüzgar Hızı (m/sn)		
	6	8	12
Sistemde Arızanın Olmadığı Durumda Akımın Genliğindeki Artış Oranı	1,5673	1,5796	1,6684
2 Türbinin Devre Dışı Olduğu Durumda Akımın Genliğindeki Artış Oranı	1,5500	1,5236	1,5256

Hiçbir enerji sisteminde meydana gelmesi istenmeyen bu ani akım artışları enerji sisteminde bulunan elemanlar ve koruma sisteminde arızalara veya yanlış çalışmalara neden olabilir ve enerji sisteminden beslenen diğer yükleri etkileyebilir.

5.5.3 Sabit Rüzgar Hızında Rüzgar Çiftliğindeki Türbinlerden 2 Tanesinde Anahtarlama Olması Halinde Yükün Nonlinear ve Lineer Yük Durumlarının Karşılaştırılması (Çalışma Modu 4.3)

Rüzgar hızının 12 m/sn olduğu kabul edilerek simülasyon gerçekleştirilmiştir. Yükün lineer yük ve nonlinear yük olması durumları için rüzgar çiftliğindeki 2 türbinin belirli bir süre aralığında devre dışı kalıp tekrar devreye alınması halindeki sistem davranışı incelenmiştir. Sabit rüzgar hızında gerçekleştirilen simülasyonda 3 ve 5 nolu ölçüm noktalarındaki akımın bir fazına ait değişimler Şekil 5.41 ve Şekil 5.42'de gösterilmiştir.



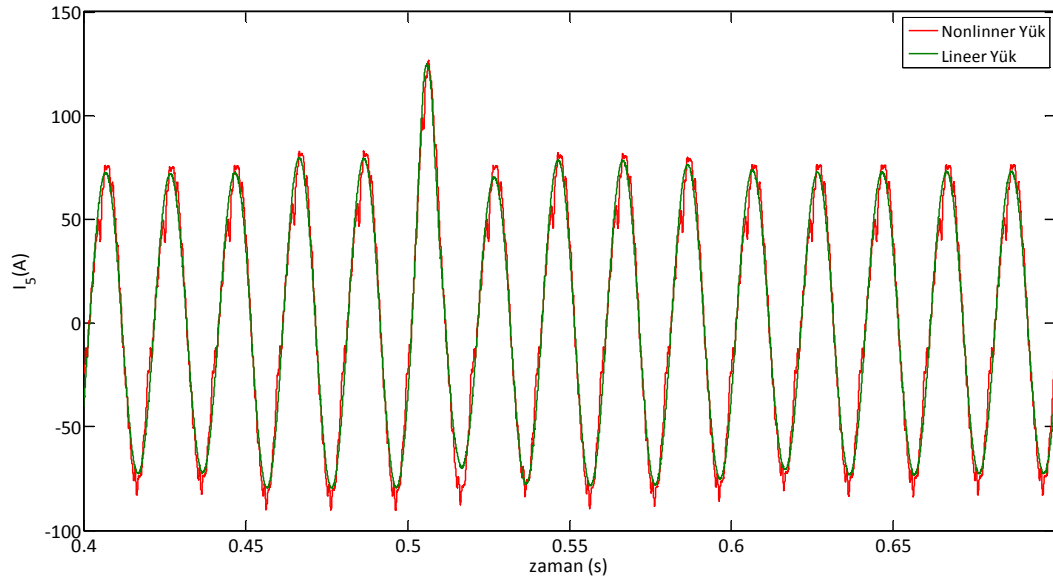
Şekil 5.41 Sabit rüzgar hızında (12 m/sn) lineer ve nonlinear yüklenme durumları için ölçüm noktası 3'den çekilen akımın değişimi

12 m/sn'lik rüzgar hızı için lineer ve nonlinear yüklenme durumlarında RES tarafındaki Ölçüm Noktası 3'deki akım değişimleri incelendiğinde lineer yüklenme durumunda nonlinear yüklenme durumuna göre anahtarın kapandığı andaki yükselme daha fazla olmaktadır.

Rüzgar çiftliğindeki türbinlerden 2 tanesinin devre dışı kalmadan önce 12 m/sn rüzgar hızında RES tarafındaki 3 nolu ölçüm noktasından yük tarafından çekilen akım değeri ile türbinlerin tekrar devreye girdiği andaki değerler incelendiğinde lineer yüklenme durumunda akım 2,5855 katına, nonlinear yüklenme durumunda ise 2,5847 katına çıkmaktadır. Türbinlerin devre dışı olduğu süre zarfında çekilen akım ile türbinlerin tekrar devreye girdiği andaki değerler incelendiğinde ise lineer yüklenme durumunda akım 5,0347 katına, nonlinear yüklenme durumunda ise 5,0636 katına çıktığı ölçülmüştür.

Çizelge 5.29 Rüzgar Çiftliği tarafında 2 türbinde 12 m/sn rüzgar hızında anahtarlama olması durumunda lineer ve nonlinear yüklenme için ölçüm noktası 3’den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış

Anahtarlama Yapılması	Yük durumu	
	Lineer	Nonlinear
Sistemde Arızanın Olmadığı Durumda Akımın Genliğindeki Artış Oranı	2,5855	2,5847
2 Türbinin Devre Dışı Olduğu Durumda Akımın Genliğindeki Artış Oranı	5,0347	5,0636



Şekil 5.42 Sabit rüzgar hızında (12 m/sn) lineer ve nonlinear yüklenme durumları için ölçüm noktası 5’den çekilen akımın değişimi

Lineer yüklenme ve nonlinear yüklenme durumu için 12 m/sn rüzgar hızında rüzgar çiftliğindeki türbinlerden 2 tanesinin 0,45.sn’ de devre dışı kalması ve 0,5. sn’de tekrar devreye girmesi sonucunda şebeke tarafındaki Ölçüm Noktası 5’den alınan ve Şekil 5.42’de verilen bir faza ait akım değişimi incelendiğinde, anahtar açılmadan önceki akım değerleri ile anahtarın tekrar kapatıldığı andaki akım değerleri karşılaştırıldığında lineer yüklenmede 1,7250 katına, nonlinear yüklenmede ise 1,6684 katına çıktığı ölçülmüştür. Rüzgar türbinlerinden 2 tanesinin aynı anda devre dışı olduğu zamanda 5 nolu ölçüm noktasından alınan akım değerleri ile türbinlerin tekrar devreye girdiği andaki akım değerleri arasındaki artış ise lineer yüklenme için 1,5747 katına, nonlinear yüklenme için ise 1,5256 kat olarak hesaplanmıştır.

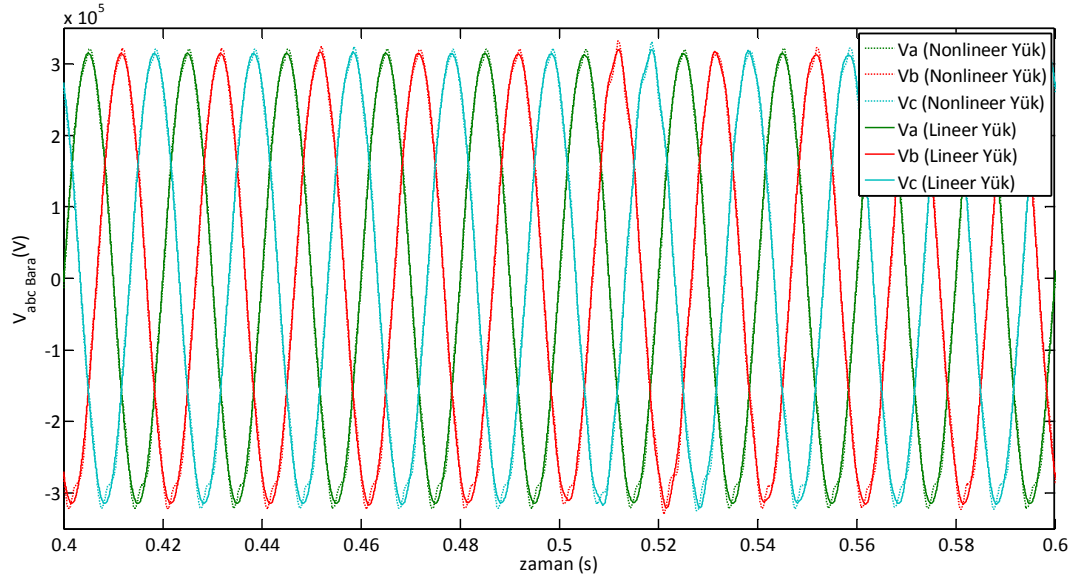
Çizelge 5.30 Rüzgar Çiftliği tarafında 2 türbinde 12 m/sn rüzgar hızında anahtarlama olması durumunda lineer ve nonlinear yüklenme için ölçüm noktası 5’den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış

Anahtarlama Yapılması	Yük durumu	
	Lineer	Nonlinear
Sistemde Arızanın Olmadığı Durumda Akımın Genliğindeki Artış Oranı	1,7250	1,6684
2 Türbinin Devre Dışı Olduğu Durumda Akımın Genliğindeki Artış Oranı	1,5747	1,5256

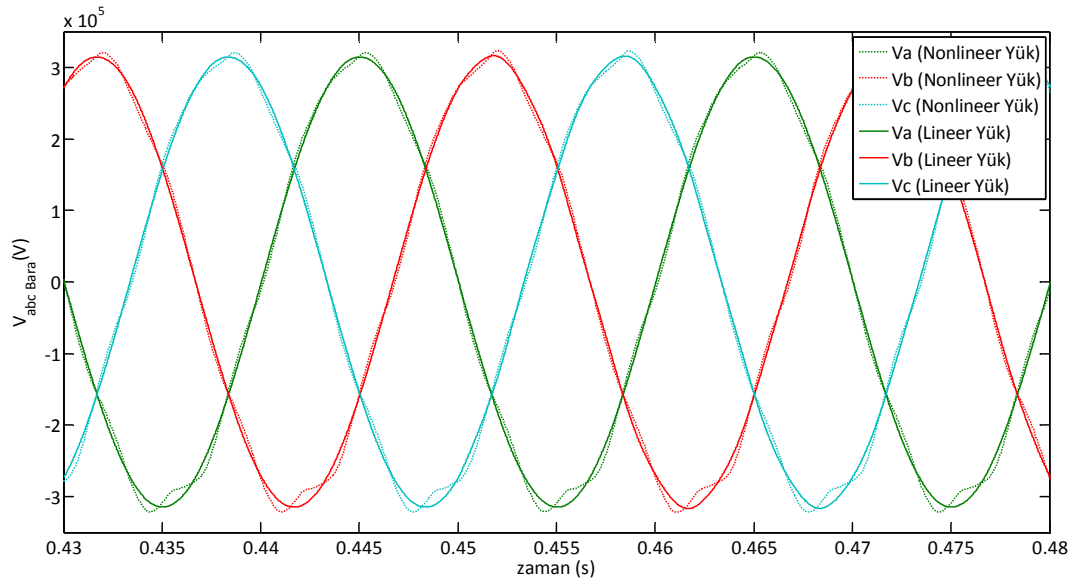
Rüzgar çiftliğinde iki türbinde aynı anda anahtarlama olması durumunda bara geriliminin 3 faz değişimi Şekil 5.43’de verilmiştir. Bara geriliminin her bir fazı rüzgar çiftliği tarafında olan anahtarlama gerilimin faz sırası ve o andaki değerine bağlı olarak farklı etkilenmektedir. Anahtarın kapandığı andaki gerilim ile sistemde arızanın olmadığı andaki her bir faza ait gerilimler incelendiğinde lineer yüklenme durumu için A fazına ait gerilim 0,9917 katına düşmüş, B ve C fazındaki gerilimler ise 1,0181 ve 1,0172 katına yükselmiştir. Nonlinear yüklenme durumunda ise A fazına ait gerilim 0,9969 katına düşmüş, B fazına ait gerilim 1,0311 katına ve C fazına ait gerilim 1,0262 katına yükselmiştir.

Çizelge 5.31 Rüzgar çiftliğinde 2 türbinde anahtarlama olması durumunda lineer ve nonlinear yüklenme hali için bara geriliminin genliğindeki maksimum artış

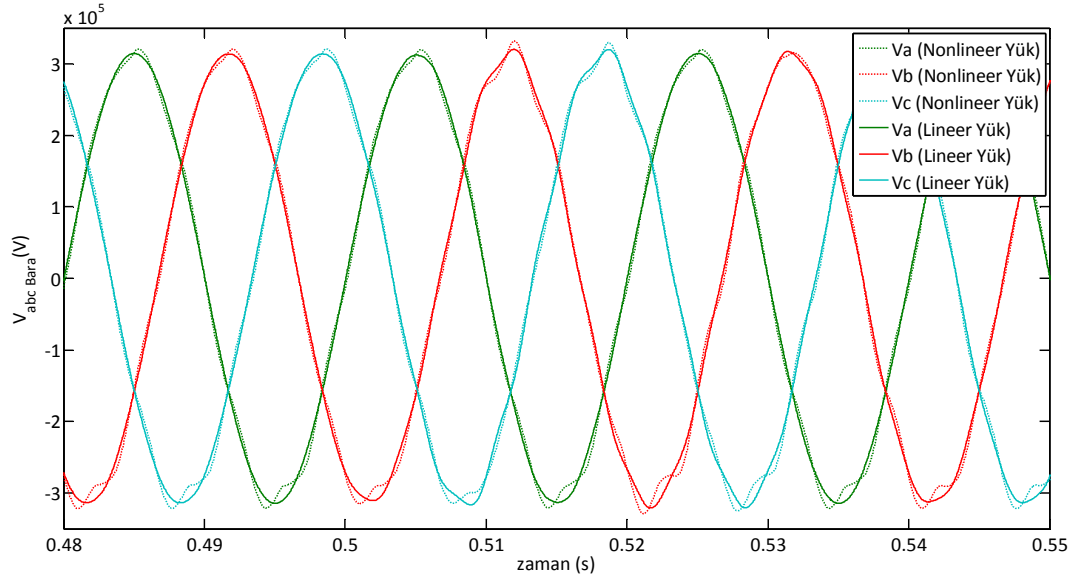
Anahtarlama Yapılması	Fazlar		
	A	B	C
Lineer Yüklenme Durumunda Gerilimin Genliğindeki Artış Oranı	0,9917	1,0181	1,0172
Nonlinear Yüklenme Durumunda Gerilimin Genliğindeki Artış Oranı	0,9969	1,0311	1,0262



(a) 3 faz bara gerilim değişimi



(b) Anahtarın açıldığı andaki değişim



(c) Anahtarın kapandığı andaki değişim

Şekil 5.43 Yükün bağlı olduğu 380 kV'luk bara geriliminin değişimi

5.5.4 Farklı Rüzgar Hızları için Rüzgar Çiftliğinde ve Rüzgar Çiftliğindeki Türbinlerden 2 Tanesinde Anahtarlama Olması Halinde Nonlinear ve Lineer Yük Durumlarının Karşılaştırılması

Yapılan simülasyon çalışmaları ve 6 farklı ölçüm noktasından alınan değerler incelendiğinde rüzgar hızına, yüklenme durumuna ve anahtarlamanın nerede olduğuna bağlı olarak ölçüm noktalarından alınan grafik ve değerlerde değişimler olduğu açıkça görülmüştür.

Ölçüm noktası 3'deki farklı rüzgar hızlarındaki lineer ve nonlinear yüklenme durumlarında rüzgar çiftliğinde veya rüzgar çiftliğindeki 2 türbinde anahtarlama olması durumundaki değişimler Çizelge 5.32'de verilmiştir.

Çizelge 5.32 Farklı rüzgar hızlarında lineer ve nonlinear yüklenme için farklı anahtarlama durumlarında ölçüm noktası 3'den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış

Anahtarlama Yapılması	Rüzgar Hızı (m/sn) (Lineer Yüklenme)			Rüzgar Hızı (m/sn) (Nonlinear Yüklenme)		
	6	8	12	6	8	12
Rüzgar Çiftliğinde Anahtarlama Durumunda Akımın Genliğindeki Artış Oranı	44,9754	14,2633	5,8899	45,7182	14,7182	5,9321
Rüzgar Çiftliğindeki 2 Türbinde Anahtarlama Durumunda Akımın Genliğindeki Artış Oranı	22,7410	6,5790	2,5855	22,6223	6,6866	2,5847

Ölçüm noktası 3'deki değişimler incelendiğinde rüzgar hızı arttıkça akımın genliğindeki artış oranı rüzgar hızıyla ters orantılı olarak düşmektedir. Rüzgar türbinlerinin nominal hızda çalışmalarının rüzgar çiftliğinde meydana gelebilecek transient durumdan daha az etkilenmesine sebep olmaktadır.

Nonlinear yüklenme durumunda rüzgar çiftliğinde meydana gelen bir transient sonucunda normal çalışma durumuna geçildiği andaki akımdaki artış oranı lineer duruma göre daha fazla olmaktadır.

Rüzgar çiftliğindeki türbinlerden 2 tanesinin devre dışı kalması durumunda çiftliğin tamamının devre dışı kalmasına göre akımın genliğindeki artış oranı daha az olmaktadır.

Transient durumda ölçüm noktası 5'den alınan değerler incelendiğinde akımın genliğindeki artış oranları Çizelge 5.33'de verilmiştir.

Çizelge 5.33 Farklı rüzgar hızlarında lineer ve nonlinear yüklenme için farklı anahtarlama durumlarında ölçüm noktası 5’den çekilen akımın genliğindeki maksimum artış

Anahtarlama Yapılması	Rüzgar Hızı (m/sn) (Lineer Yüklenme)			Rüzgar Hızı (m/sn) (Nonlinear Yüklenme)		
	6	8	12	6	8	12
Rüzgar Çiftliğinde Anahtarlama Durumunda Akımın Genliğindeki Artış Oranı	2,1772	2,2014	2,4289	2,0988	2,1138	2,3143
Rüzgar Çiftliğindeki 2 Türbinde Anahtarlama Durumunda Akımın Genliğindeki Artış Oranı	1,6075	1,6199	1,7250	1,5673	1,5796	1,6684

Transient durumda ölçüm noktası 5’den alınan akım değerleri incelendiğinde rüzgar hızı arttıkça akımdaki artış oranı da artmaktadır. Nonlinear yüklenme durumunda ise akımdaki bu artış oranı düşmektedir. Rüzgar çiftliğindeki türbinlerden 2 tanesinin devre dışı kalması durumunda çiftliğin tamamının devre dışı kalmasına göre akımın genliğindeki artış oranı daha az olmaktadır.

Lineer ve nonlinear yüklenme için farklı anahtarlama durumlarında yükün bağlı olduğu 380 kV gerilim seviyesindeki baradaki her bir faza ait gerilimin genliğindeki artış oranları Çizelge 5.34’de verilmiştir.

Çizelge 5.34 Farklı rüzgar hızlarında lineer ve nonlinear yüklenme için farklı anahtarlama durumlarında V_{Bara} geriliminin genliğindeki maksimum artış

Anahtarlama Yapılması	Fazlar (Lineer Yüklenme)			Fazlar (Nonlinear Yüklenme)		
	V_a	V_b	V_c	V_a	V_b	V_c
Rüzgar Çiftliğinde Anahtarlama Durumunda Gerilimin Genliğindeki Artış Oranı	0,9847	1,0254	1,0124	0,9910	1,0598	1,0433
Rüzgar Çiftliğindeki 2 Türbinde Anahtarlama Durumunda Gerilimin Genliğindeki Artış Oranı	0,9917	1,0181	1,0172	0,9969	1,0311	1,0262

Rüzgar çiftliği tarafında olan farklı anahtarlama durumlarında 380 kV gerilim seviyesindeki baranın her bir fazında farklı değişimler meydana gelmiştir.

Rüzgar çiftliğinin tamamının devre dışı kalıp tekrar devreye girdiği anda A fazına ait gerilimin genliğindeki değişim oranı çiftlikteki türbinlerden 2 tanesinin devre dışı kalıp tekrar devreye girdiği andaki değişime göre daha fazla düşme meydana gelmiştir. Nonlinear yüklenmede lineer yüklenme durumuna göre A fazının gerilimindeki düşme oranı daha az olmaktadır.

380 kV gerilim seviyesindeki bara geriliminin B fazına baktığımızda, rüzgar çiftliğinin tamamının devre dışı kalması durumundaki gerilimin genliğindeki değişim oranı çiftlikteki türbinlerden 2 tanesinin devre dışı kalıp tekrar devreye girdiği andaki değişime göre daha fazla yükselme meydana gelmiştir. Nonlinear yüklenmede lineer yüklenme durumuna göre gerilimin genliğindeki artış oranı daha fazla olmaktadır.

Baranın C fazına ait gerilim incelendiğinde, rüzgar çiftliğinin tamamının devre dışı kalması durumundaki gerilimin genliğindeki değişim oranı çiftlikteki türbinlerden 2 tanesinin devre dışı kalıp tekrar devreye girdiği andaki değişime göre daha fazla yükselme meydana gelmiştir. Nonlinear yüklenmede lineer yüklenme durumuna göre gerilimin genliğindeki artış oranı daha fazla olmaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde, elektrik enerjisine olan talebin artması, fosil yakıtların tükenmeye başlaması ve temiz enerji elde etme isteği yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretiminin önemini arttırmıştır. Bu kaynaklardan en çok rağbet gören ve en çok kullanılan rüzgar enerjisidir. Rüzgar enerjisi ile ilgili araştırmalar her geçen gün artmakta, bu santrallere ait gelişmeler elde edilmektedir. Rüzgar enerjisinden elektrik elde etmek için kullanılan rüzgar türbinleri de gün geçtikçe gelişmekte ve şebekeye bağlantısı esnasında karşılaşılan problemler de giderilmeye çalışılmaktadır.

RES'lerin güç kalitesini bozucu etkilerinin ve güç kalitesindeki bozuklukların RES'ler üzerindeki etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Böylece bu etkileri en aza indirgeyebilecek biçimde tasarlanmış sistemlerin kullanılması mümkün olabilecektir.

Güç sisteminde nonlinear elemanların kullanımının artmasına bağlı olarak akım ve gerilimin sinüsoidal dalga şeklinde bozulmalar meydana gelmektedir. Rüzgar türbinlerinin şebekeyle bağlantısında kullanılan, nonlinear elemanlardan oluşan güç elektroniği dönüştürücüleri, güç sisteminde harmoniklerin oluşmasına sebep olmaktadır. Harmonik bozulmalar, türbin çıkışında filtreler kullanılarak azaltılmaya çalışılmaktadır. Yine rüzgar hızına bağlı olarak, rüzgar türbin çıkışında meydana gelen ve şebekeyi de etkileyen gerilim dalgalanmaları, SVC, STATCOM gibi merkezi reaktif güç kompanzasyonu sistemleri kullanılarak giderilmeye ve sistem gerilim kararlılığı sağlanmaya çalışılmaktadır.

Gerçekleştirilen çalışmada, şebekeye paralel bağlı olarak yükü besleyen RES'lerin çeşitli yüklenme ve çeşitli anahtarlama olayları halinde davranışı araştırılmış ve sistem üzerindeki etkileri farklı senaryolar için incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında, 380 kV gerilim seviyesindeki şebekeden 174 km uzunluğundaki bir yüksek gerilim havai hattı ile beslenen büyük güçlü bir yük ele alınmıştır. Senaryo olarak, yükün sadece şebekeden değil, işletme yakınında bulunan 2 MW gücünde 4 adet türbinden oluşan bir rüzgar çiftliğinden de şebekeye paralel olarak beslenmesi durumu incelenmiştir. Sistem Matlab & Simulink paket programı kullanılarak modellenmiştir. Rüzgar elektrik santrali, güç transformatörü üzerinden 5 km uzunluğundaki yer altı kablosuyla yüke bağlanmıştır. Modellenen sistemde farklı rüzgar hızlarında, lineer ve nonlineer yüklenme durumlarında, Şekil 5.3’de verilen ölçüm noktalarındaki akım ve gerilim değişimleri incelenmiştir. Ayrıca rüzgar çiftliğinin ve rüzgar çiftliğindeki rüzgar türbinlerinin iki tanesinin devre dışı kalması ve tekrar devreye girmesi durumları için sistem cevabı araştırılmıştır.

Tez çalışması kapsamında, şebeke ve rüzgar çiftliğinden paralel olarak beslenen yükün simülasyonu gerçekleştirilirken, temel olarak 4 farklı sayısal uygulama ile analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

Sayısal uygulama 1’de lineer yükün rüzgar çiftliği ve şebekeden beslenmesi durumundaki analiz gerçekleştirilmiştir. Ele alınan sistemde, rüzgar hızının değişimine bağlı olarak rüzgar çiftliğinden ve şebekeden çekilen akım değişimleri ve sistem cevabı incelenmiştir. Rüzgar hızının başlangıçta 8 m/sn olduğu kabul edilerek simülasyon başlatılmış 0,4. sn’de rüzgar hızı 12 m/sn’ye çıkarılmış, 0,7. sn’ de hız 6 m’sn’ye düşürülmüş ve 1. sn’de simülasyon sonlandırılmıştır. Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda;

- Rüzgar hızı arttığında rüzgar çiftliğinde üretilen gücün arttığı, böylece yük tarafından rüzgar çiftliğinden çekilen akımın arttığı ve şebekeden çekilen akımın azaldığı görülmüştür. Rüzgar hızı azaldığında ise rüzgar çiftliği tarafından çekilen akımın azaldığı ve şebekeden çekilen akımın arttığı görülmektedir. Bu durum bize modellenen sistemin doğru ve güvenilir bir şekilde çalıştığını göstermiştir.
- Lineer olarak modellenen yükün çektiği akım simülasyon süresince değişmemiş, yük ihtiyacı olan akımı kesintisiz biçimde sürekli olarak çekmiştir. Yükün, RES ve şebekeden beslendiği durumda, rüzgar hızına bağlı olarak rüzgar santralinde

Üretilen gücün değişmesine rağmen yükün beslenmesinde problem yaşanmamıştır. Bu ise bize yükün kesintisiz ve güvenilir bir şekilde beslenebilmesi için RES'lerin ve şebekeye paralel olarak çalışmasının önemini göstermektedir.

Ülkemizde yakın geçmişte yaşanan bölgesel elektrik kesintileri hatırlanırsa, bazı santrallerin devre dışı kaldığı durumlarda sistemde sıkıntı yaşanmaması için, rüzgar hızına bağlı olarak ürettiği g miktarı hızla değişen RES'lerin büyük güçlü şebekelere bağlanması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Böylece, RES'in gücünün azalması veya devre dışı kalması halinde g sisteminde problem yaşanmadan işletmelerin çalışması devam edebilecektir.

RES'lerin şebekeye bağlantı noktalarının belirlenmesinde bu durum mutlaka g önüne alınmalıdır. Kurulacak RES'lerin yeri ve şebekeye bağlantı noktası belirlenmeden önce mutlaka gerekli hesaplama ve simülasyonlar gerçekleştirilmeli, elde edilen sonuçlar ışığında uygulamaya geçilmelidir.

- Enerji iletim sistemlerinde uzak mesafelere g taşınması sırasında meydana gelen g kayıplarının ve gerilim düşümlerinin, yükün yakınlarında kurulabilecek RES ile yüklerin ihtiyaı olan glerin bir kısmının karşılanması ile azaltılabileceği grlmştr. RES ve şebekeden beslenen büyük gteki yüklerin olduğu sistemde, rüzgar hızı değişimlerinde yükün ihtiyaç gücünün sağlanabilmesi için şebeke gücünün yüksek olması gerekmektedir. Böylece, yükün yakınlarında kurulacak RES sayesinde uzak mesafelere enerji taşınması sırasında oluşacak gerilim düşümü, güç kayıpları ve arızaların önüne geçilmiş olacak ve enerji taşınması için kurulacak transformatör merkezleri maliyetleri de düşünüldüğünde ülke ekonomisine büyük katkı sağlayacaktır.

Sayısal uygulama 2'de farklı rüzgar hızlarında, farklı yüklenme durumları (lineer, nonlinear ve nonlinear yüklere ait harmonik akım bileşenlerinin 2 kat olması hali) için sistem analizi yapılmış ve şekil 5.3'de gösterilen 6 farklı ölçüm noktasından değerler alınmıştır. Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda,

- Lineer yüklenme durumu için, rüzgar hızındaki artışa bağlı olarak rüzgar iftliğinden çekilen akım artmakta ve 174 km uzunluğundaki şebekeye bağlı

hattan çekilen akım değeri düşmektedir. Böylelikle şebeke ve iletim hattı daha az yüklenmekte, hat üzerindeki gerilim düşümü ve hat kayıpları azalmaktadır.

- Nonlineer yüklenme durumunda, rüzgar hızı arttıkça rüzgar çiftliği tarafından çekilen akımın temel bileşen değeri büyümektedir. Buna bağlı olarak RES tarafında akım harmonik bozulumunun azaldığı ve şebeke tarafından çekilen akımın temel bileşen değeri düştüğünden akım harmonik bozulumunun arttığı görülmüştür. Bu durum bize RES'lerle paralel çalışan şebekelerde harmonik bozulumun dikkate alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır.
- Rüzgar çiftliğinin hemen çıkışındaki ölçüm noktası 1'de gerilimdeki harmonik bozulma ise akımdakinin tersine değişim göstermiştir. Rüzgar hızı arttıkça gerilimin THD değerinin yükseldiği, rüzgar hızı azaldıkça ise düştüğü görülmüştür. Bu durum RES'nin rüzgar hızı arttıkça verdiği güç ve akım değerindeki artıştan kaynaklanmaktadır. Elde edilen sonuçlardan, büyük hızlarda güç transformatorünün distorsiyondan etkilenmesinin artacağı ve buna dikkat edilmesi gerekliliği anlaşılmaktadır.
- Nonlineer yükün harmonik akım bileşenlerinin 2 kat olması durumunda, sisteme ait bütün noktalar bu harmonik bozulmadan etkilenmekte ve ölçüm alınan noktalardaki akıma ve gerilime ait THD değerlerinde artış meydana gelmektedir. Yükteki akım harmonik bileşenlerindeki artış 2 kat olmasına rağmen, rüzgar çiftliğinden çekilen akımın THD değeri 1,01 katına, şebeke tarafından çekilen akımın THD değeri ise 2 katına çıkmaktadır. Bu nonlineer yüklenmenin artması durumunda yüke yakın yerlerde kurulan RES'lerin harmonik bozulmadan şebekeye göre daha az etkilendiğini göstermektedir.
- Bu sayısal uygulamada gerçekleştirilen 3 farklı yüklenme durumu karşılaştırıldığında, yükün lineer olması durumunda yük uçlarındaki ölçüm noktası 4 dışındaki tüm ölçüm noktalarında akımda harmonik bozulumun olduğu görülmektedir. Bunun sebebi rüzgar türbinlerinde kullanılan dönüştürücülerdir. Rüzgar hızı arttıkça rüzgar çiftliği tarafından çekilen akımın THD₁ değerinin düştüğü, şebeke tarafından çekilen akımın THD₁ değerinin ise arttığı görülmektedir. Nonlineer yüklenme durumunda ise ölçüm yapılan tüm

noktalardaki akım ve gerilimde bozumun arttığı görülmüştür. Rüzgar hızı arttıkça rüzgar çiftliği tarafındaki akımın THD değerinin düştüğü, şebeke tarafındakinin ise arttığı görülmektedir. Bu sonuç bize, RES'lerin nonlinear yüklenme halinde harmonik bozulma bakımından olumlu davrandığını vermektedir.

Sayısal uygulama 3'de farklı rüzgar hızlarında lineer ve nonlinear yüklenme durumları için rüzgar çiftliği çıkışında anahtarlama olması ve RES'lerin belli bir süre devre dışı kalıp tekrar devreye girmesi durumunda sistem davranışı araştırılmıştır. Bu sayısal uygulamadan şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Rüzgar çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda, çiftliğin tekrar devreye girdiği anda rüzgar çiftliği ve şebeke tarafından çekilen akımlarda ani akım yükselmesi meydana gelmektedir. Rüzgar hızı arttıkça, rüzgar çiftliği tarafından çekilen akımdaki artış oranı belirgin bir şekilde azalmakta, 6 m/sn rüzgar hızında 44,9754 katına çıkan akım değeri 12 m/sn rüzgar hızında 5,8899 katına çıkmaktadır. Şebekeden çekilen akımdaki artış oranı ise 6 m/sn rüzgar hızında 2,1772 kat iken 12 m/sn rüzgar hızında 2,4289 kat olmakta, rüzgar hızı arttıkça akım artış oranı az da olsa artmaktadır. Yükün çektiği akımda herhangi bir değişim meydana gelmemektedir. Akımdaki bu yükselmeler, koruma sisteminin devreye girmesine ve güç sisteminin enerjisiz kalmasına sebep olabileceği gibi kısa süreli gerilim düşümüne ve kayıplardaki artışa neden olabilecektir. Gerilim değişimlerine bakıldığında ise, yükün bağlı olduğu 380 kV'luk bara geriliminde ise A fazında 0,9847, B fazında 1,0254 ve C fazında 1,0124 katı kadarlık bir değişim gözlemlenmektedir. Bu durum bize RES'lerin çalışma esnasında devreden çıkıp tekrar devreye girmesinin, şebekede etkin akım artışına neden olduğunu ve bu artışın rüzgar hızının artması ile azaldığını ortaya koymaktadır.
- Nonlinear yüklenme durumunda rüzgar çiftliğinde bir anahtarlama olması halinde, rüzgar çiftliğinin devreye girdiği anda hem rüzgar çiftliği tarafında hem şebeke tarafından çekilen akımlarda yine ani artış meydana gelmektedir ve bu artış oranı rüzgar hızına bağlı olarak değişmektedir. Rüzgar çiftliği tarafından çekilen akımdaki artış miktarı, 6 m/sn rüzgar hızında 45,7182 kat, 12 m/sn hızda

5,9321 kat olmaktadır. Şebeke tarafından çekilen akımdaki artış miktarı ise 6 m/sn ve 12 m/sn rüzgar hızları için sırasıyla 2,0988 ve 2,3143 kat olmaktadır. 380 kV gerim seviyesinde yükün bağlı olduğu baradaki gerilim değişimleri A, B ve C fazları için sırasıyla 0.9910, 1.0598 ve 1.0433 kat olmuştur. Nonlinear yükün çektiği akım bu anahtarlama durumundan etkilenmemektedir.

- Nonlinear yüklenme durumundaki artış miktarı lineer durumdakine göre kıyaslandığında, nonlinear yüklenmede rüzgar çiftliğinden çekilen akımdaki artış miktarı lineer yüklenme durumuna göre daha fazla, şebekeden çekilen akımdaki artış miktarı ise daha az olmaktadır. Yükün bağlı olduğu 380 kV bara geriliminde ise her bir fazda farklı değişimler meydana gelmiştir. Nonlinear yüklenme durumunda A, B ve C fazlarındaki gerilim genliğindeki değişim oranları lineer yüklenme durumuna göre daha fazla olmuştur. Rüzgar çiftliği tarafında anahtarlama olması durumunda meydana gelen ani akım artışı enerji sisteminin sürekliliği açısından istenmeyen durumdur. Bu durum, nonlinear yüklenmenin sistemi lineer yüklenmeden daha çok etkilediği, özellikle RES üzerinde akım artış oranını yükselttiğini ortaya koymuştur.

Sayısal uygulama 4'de farklı rüzgar hızlarında lineer ve nonlinear yüklenme durumlarında rüzgar çiftliğindeki türbinlerden iki tanesinin 0.05 sn gibi kısa bir süre için devre dışı kalıp tekrar devreye girmesi durumu incelenmiştir. Gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen sonuçlar:

- Lineer yüklenmede, rüzgar çiftliğindeki türbinlerden 2 tanesinde anahtarlama olması durumunda, türbinler tekrar devreye girdiği anda hem rüzgar çiftliği hem de şebeke tarafından çekilen akımlarda ani artış meydana gelmiştir. İki türbin devre dışı kalmadan önceki akım değeriyle, tekrar devreye girdiği andaki akım değerleri kıyaslandığında 6 m/sn, 8 m/sn ve 12 m/sn rüzgar hızlarındaki akım genliğindeki maksimum artış sırasıyla 22.7410, 6.5790 ve 2.5855 kat olmaktadır. Rüzgar türbinlerinden iki tanesinin devrede olmadığı anda rüzgar çiftliğinde çekilen akımlar ile türbinlerin tekrar devreye girdiği andaki akım değerleri kıyaslandığında 6 m/sn, 8 m/sn ve 12 m/sn rüzgar hızlarındaki akım genliğindeki maksimum artış sırasıyla 46.4941, 12.4578 ve 5.0347 kat olmaktadır.

Değerlerden de görüldüğü gibi, rüzgar hızı arttıkça, rüzgar çiftliğinden çekilen akımdaki artış miktarı düşmektedir. Şebeke tarafında çekilen akımlar incelendiğinde, iki türbin devre dışı kalmadan önceki akım değeriyle, tekrar devreye girdiği andaki akım değerleri kıyaslandığında 6 m/sn, 8 m/sn ve 12 m/sn rüzgar hızlarındaki akım genliğindeki maksimum artış sırasıyla 1.6075, 1.6199 ve 1.7250 kat olmaktadır. Rüzgar çiftliğindeki türbinlerden iki tanesinin devrede olmadığı anda rüzgar çiftliğinde çekilen akımlar ile türbinlerin tekrar devreye girdiği andaki akım değerleri kıyaslandığında 6 m/sn, 8 m/sn ve 12 m/sn rüzgar hızlarındaki akım genliğindeki maksimum artış sırasıyla 1.5883, 1.5614 ve 1.5747 kat olmaktadır. Şebekeden çekilen akımdaki artış miktarı, rüzgar hızı arttıkça yükselmektedir. Bara gerilimde meydana gelen gerilimdeki artış miktarları ise A fazında 0,9917 kat, B fazında 1,0181 kat ve C fazında 1,0172 kat olmaktadır. Bu durum, RES'lerin lineer yüklenmesi durumunda devreden çıkması ve tekrar devreye girmesinin özellikle RES tarafındaki akım değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. İstenmeyen bir çalışma şartı olmakla birlikte böyle bir durumda akım artışının rüzgar hızı ile etkin bir biçimde değiştiği ortaya konmuştur, bu nedenle bu akımın düşürülmesi için RES'lerle yüksek hızda çalışılmasının gerekliliği elde edilmiştir.

- Nonlineer yüklenme durumu incelendiğinde, iki türbin devre dışı kalmadan önceki akım değeriyle, tekrar devreye girdiği andaki akım değerleri kıyaslandığında 6 m/sn, 8 m/sn ve 12 m/sn rüzgar hızlarındaki akım genliğindeki maksimum artış sırasıyla 22.6223, 6.6866 ve 2.5847 kat olmaktadır. Rüzgar türbinlerinden iki tanesinin devrede olmadığı anda rüzgar çiftliğinde çekilen akımlar ile türbinlerin tekrar devreye girdiği andaki akım değerleri kıyaslandığında 6 m/sn, 8 m/sn ve 12 m/sn rüzgar hızlarındaki akım genliğindeki maksimum artış sırasıyla 46.7061, 12.3680 ve 5.0636 kat olmaktadır. Ani artış miktarlarında görüldüğü gibi, rüzgar hızı arttıkça, rüzgar çiftliğinden çekilen akımdaki artış miktarı yine düşmektedir. Şebeke tarafında çekilen akımlar incelendiğinde, iki türbin devre dışı kalmadan önceki akım değeriyle, tekrar devreye girdiği andaki akım değerleri kıyaslandığında 6 m/sn, 8 m/sn ve 12 m/sn rüzgar hızlarındaki akım genliğindeki maksimum artış sırasıyla 1.5673,

1.5796 ve 1.6684 kat olmaktadır. Rüzgar çiftliğindeki türbinlerden iki tanesinin devrede olmadığı anda rüzgar çiftliğinde çekilen akımlar ile türbinlerin tekrar devreye girdiği andaki akım değerleri kıyaslandığında 6 m/sn, 8 m/sn ve 12 m/sn rüzgar hızlarındaki akım genliğindeki maksimum artış sırasıyla 1.55, 1.5236 ve 1.5256 kat olmaktadır. Şebekeden çekilen akımdaki artış miktarı, rüzgar hızı arttıkça yükselmektedir.

- Nonlineer yüklenmede, türbinin devreden çıkıp tekrar devreye girmesi esnasındaki akım artış oranının rüzgar hızına bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Akımdaki artış oranının yüksek rüzgar hızlarında RES tarafında azaldığı, şebeke tarafında ise bu oranın yüksek rüzgar hızlarında arttığı belirlenmiştir.
- Rüzgar çiftliğindeki türbinlerden iki tanesinin devre dışı kalması durumunda akımdaki artış miktarı, rüzgar çiftliğinin tamamının devre dışı kalması durumuna göre hem rüzgar çiftliği tarafından çekilen akımdaki hem de şebekeden çekilen akımdaki artış miktarı daha az olmaktadır. Bu durum, RES'lerdeki rüzgar türbinlerinin enerji sürekliliğinin sağlanmasının önemli olduğunu ve zorunlu hallerde devreden çıkarılacak türbin sayısına bağlı olarak akımda artış oranının artacağını ortaya koymaktadır.

Şebekeye paralel bağlı RES'ler tarafından beslenen lineer ve nonlineer yüklerin çeşitli çalışma şartlarındaki analizi gerçekleştirilecek sistem davranışı incelenmiş ve buna ait sonuçlarla sistem işletimine ait önemli sonuçlar elde edilmiştir.

Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilenler göstermektedir ki, herhangi bir yükün şebekeye paralel olarak bağlanmış olan RES tarafından şebekeyle birlikte beslenmesi durumlarında, rüzgar hızının, yük profilinin ve açma-kapama olaylarının sistem davranışı üzerinde önemli etkileri olmaktadır.

Bu yüzden, RES'ler kurulurken planlama ve projelendirme safhalarında mutlaka gerekli hesaplamaların, simülasyon çalışmalarının ve analizlerinin yapılması gerekmektedir. Böylece elde edilen veriler ışığında en ekonomik, verimli ve güvenilir enerji sistemlerinin kurulması sağlanabilecektir.

Bu tez çalışması sonucunda görülmüştür ki, güç sistemlerinde gün geçtikçe etkisini arttıran harmonik bileşenlerin, RES uygulamaları üzerindeki etkileri de göz ardı edilemeyecek öneme sahiptir. Genellikle sürekli sinüsoidal hal için yapılan hesaplama ve analizler kullanılarak tasarlanan sistemlerde yaşanabilecek sorunların önüne geçilebilmesi için, harmoniklerin sistem üzerindeki etkilerinin de mutlaka göz önüne alınması gerekmektedir.

Güç sistemlerinin tasarımı ve işletilmesi esnasında mutlaka göz önüne alınması gereken anahtarlama olayları ve bunların etkisini arttıran harmonik etkinlikler de bu tez çalışmasında ortaya konulmaktadır. Elde edilen veriler ışığında RES'lerin ve şebekeye bağlantı noktalarının tasarımı ve planlanmasında anahtarlama operasyonlarının ve bunların etkisini arttıran harmoniklerin mutlaka göz önüne alınması gerektiği sonucu elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen analizlerin çeşitli şartlar için geliştirilmesi uygun olacaktır. Bu doğrultuda yapılacak çalışmalar kapsamında, dengesiz lineer yüklenme ve dengesiz nonlineer yüklenme şartlarının incelenmesi, güç sistemi üzerinde meydana gelecek farklı arıza durumlarına göre sistemin irdelenmesi, rüzgar türbini kontrolünde farklı yöntemlerin kullanılmasının etkisinin analiz edilmesi, ayrıca bu durumlardaki transient olaylarının araştırılması, önerilen konulardır.

KAYNAKLAR

- [1] Estanqueiro, A.I., Tande, J.O., ve Peças Lopes, J.A., (2007). "Assessment of Power Quality Characteristics of Wind Farms", Power Engineering Society General Meeting IEEE (PES 2007), 24-28 June 2007, Florida, USA.
- [2] Papathanassiou, S. ve Papadopoulos, M., (2005). "A Study Case on Harmonic Distortion Created by Wind Turbine", 18th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2005), 6-9 June 2005, Belgium.
- [3] Papathanassiou, S.A. ve Papadopoulos, M.P., (2006). "Harmonic Analysis in a Power System with Wind Generation", IEEE Transactions on Power Delivery, 21:200-2016.
- [4] Tentzerakis, S., Paraskevopoulou, N., Papathanassiou, S. ve Papadopoulos, P., (2008). "Measurement of Wind Farm Harmonic Emissions", IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC 2008), 15-19 June 2008, Greece.
- [5] Mutlu, Ö.S., Akpınar, E. ve Balıkçı, A., (2009). "Power Quality Analysis of Wind Farm Connected to Alaçatı Substation in Turkey", Renewable Energy Elsevier, 34:1312-1318.
- [6] Jorgensen, P., Tande, J.O., Vikkelso A., Norgard, P., Christensen, J.S., Sorensen, P., Kledal, J.D. ve Sondergard, L., (1997). "Power Quality and Grid Connection of Wind Turbines", 14th International Conference and Exhibition On Electricity Distribution (CIRED-97), 2-5 June 1997, Belgium.
- [7] Martins, M., Carnielutti, F. ve Pinheiro, H., (2009). "Power Quality and Power Performance Measurement System for Wind Turbine Certification", 10th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP 2009), Sept. 27 2009-Oct. 1 2009, Brazilian.
- [8] Kocatepe, C., İnan, A., Arıkan, O., Yumurtacı, R., Kekezoğlu, B., Baysal, M., Bozkurt, A. ve Akkaya, Y., (2009). "Power Quality Assessment of Grid-Connected Wind Farms Considering Regulations in Turkey", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13:2553-2561.
- [9] Linh, N.T., (2009). "Power Quality Investigation of Grid Connected Wind Turbines", 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2009), 25-27 May 2009, China.
- [10] Hansen, A.D., Sorensen, P., Janosi, L. ve Bech, J., (2001). "Wind Farm Modelling

for Power Quality”, The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON '01), 29 Nov.-2 Dec. 2001, Colorado, USA.

- [11] Dettmann, K.D., Schostan, S. ve Schulz, D., (2007). “Wind Turbine Harmonics caused by Unbalanced Grid Currents”, Compatibility in Power Electronics (CPE '07), May 29 2007-June 1 2007, Poland.
- [12] Hou, H., Lin L., Wu T. ve Miao, Y., (2010). “Comparison of Transient Stability between Wind Farm based on DFIG and Traditional Power Plant in an Actual Grid”, Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2010), 28-31 March 2010, China.
- [13] Zhang Y., Lin L. ve Yang, Y., (2007). “Study on Transient Characteristics of Grid-Connected Wind Power Generators”, International Power Engineering Conference (IPEC 2007), 3-6 Dec. 2007, Singapore.
- [14] Grigorescu, S.D., Popescu, M., Ghita, O. ve Lazaroiu, G.C., (2010). “System Monitoring of Energy Quality for Wind Power Generators”, IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2010), 26-29 Sept. 2010, Italy.
- [15] Melicio, R., Mendes, V.M.F. ve Catalao, J.P.S., (2011). “Transient Analysis of Variable-Speed Wind Turbines at Wind Speed Disturbances and a Pitch Control Malfuction”, Applied Energy, 88:1322-1330.
- [16] Mueen, S.M., Takahashi, R., Murata, T., Tamura, J. ve Ali, M.H., (2007). “Transient Stability Analysis of Permanent Magnet Variable Speed Synchronous Wind Generator”, International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2007), 8-11 Oct. 2007, Korea.
- [17] Mueen, S.M., Takahashi, R., Murata, T., Tamura, J. ve Ali, M.H., (2008). “Transient Stability Enhancement of Variable Speed Wind Turbine Driven PMSG with Rectifier-Boost Converter-Inverter”, Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines (ICEM 2007), 6-9 Sept. 2008, China.
- [18] Park, M., Hwang, C., Kim, G.H., Song, B.M. ve Lee, K.Y., (2011). “Voltage Transient Analysis of a PMSG Wind Power System Using Controller-Hardware-in-the Loops”, Innovative Smart Grid Technologies (ISGT 2011), 17-19 Jan. 2011, United Kingdom.
- [19] Koç, E. ve Güven, A. N., (2011). “Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Modellenmesi ve Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yeteneklerinin İncelenmesi”, EMO Bilimsel Dergi, 1:51-55.
- [20] Geng, H. ve Xu, D.D., (2011). “Stability Analysis and Improvements for Variable-Speed Multipole Permanent Magnet Synchronous Generator-Based Wind Energy Conversion System”, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2:459-467.
- [21] Gonzalez-Longatt, F.M., Wall, P. ve Terzija, V., (2011). “A Simplified Model for Dynamic Behavior of Permanent Magnet Synchronous Generator for Direct Drive Wind Turbines”, 2011 IEEE Trondheim PowerTech, 19-23 June 2011, Norway.
- [22] Strachan, N.P.W. ve Jovcic, D., (2007). “Dynamic Modelling, Simulation and Analysis of an Offshore Variable-Speed Directly-Driven Permanent-Magnet Wind

- Energy Conversion and Storage System (WECSS)", Oceans 2007, 29 Sept-Oct. 4 2007, Canada.
- [23] Strachan, N.P.W. ve Jovcic, D., (2008). "Improving Wind Power Quality Using an Integrated Wind Energy Conversion and Storage System (WECSS)", Power & Energy Society (PES 2008), 20-24 July 2008, USA.
- [24] Kim, H.W., Kim, S.S. ve Ko, H.S., (2010). "Modeling and Control of PMSG-Based Variable-Speed Wind Turbine", Electric Power Systems Research, 80:46-52.
- [25] Hansen, A.D. ve Michalke, G., (2009). "Multi-Pole Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbines' Grid Support Capability in Uninterrupted Operation During Grid Faults", IET Renewable Power Generation, 3:333-348.
- [26] Huang, K., Zhang, Y., Huang, S., Lu, J., Gao, J. ve Cai, L., (2009). "Some Practical Consideration of a 2MW Direct-Drive Permanent-Magnet Wind-Power Generation System", International Conference on Environmental Engineering and Technology (ICEET 2009), 16-18 Oct. 2009, Australia.
- [27] Strachan, N.P.W. ve Jovcic, D., (2010). "Stability of a Variable-Speed Permanent Magnet Wind Generator With Weak AC Grids", IEEE Transactions on Power Delivery, 25: 2779-2788.
- [28] Yaramasu, V. ve Wu, B., (2011). "Three-Level Boost Converter Based Medium Voltage Megawatt PMSG Wind Energy Conversion Systems", IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE 2011), 17-22 Sept. 2011, Arizona.
- [29] Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu, Elektrik Piyasası Raporu, www.epdk.gov.tr, 20 Haziran 2012.
- [30] Varınca, K.B. ve Gönüllü, M.T., (2006). "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımının Çevresel Olumlu Etkileri", VI. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu (UTES 2006), Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 25-27 Mayıs 2006.
- [31] Mukund, R.P., (1999). Wind and Solar Power Systems, CRC Press, New York.
- [32] Gilbert, M.M., (2004). Renewable and Efficient Electric Power Systems, John Wiley & Sons, United States of America.
- [33] Şen, Ç., (2003). Gökçeada'nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi ile Karşılanması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [34] Mathew, S., (2006). Wind Energy, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Netherlands.
- [35] Özgür, M.A. (2002), Kütahya'da Seçilen Bir Konumda Rüzgar Verileriyle Elektrik Enerjisi Üretim Potansiyelinin Bulunması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- [36] Manwell, J.F., McGowan, J.G. ve Rogers, A.L., (2009). Wind Energy Explained Theory, Design And Application, Second Edition, John Wiley & Sons, United Kingdom.
- [37] Patel, M.R., (1999). Wind and Solar Power Systems, CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington.

- [38] Ackermann, T., (2005). Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons, England.
- [39] Dursun, E. ve Binark, A.K., (2008). "Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler", VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu (UTES'2008), 17-19 Aralık 2008, İstanbul.
- [40] Taşcıkaraoğlu, A., (2008), Rüzgar Türbinlerinin Güç Kalitesi Üzerine Etkilerinin Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [41] Chen, Z. ve Blaabjerg, F., (2009). "Wind Farm—A Power Source in Future Power Systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13:1288-1300.
- [42] Chen, Z., (2005). "Issues of Connecting Wind Farms into Power Systems", Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific (IEEE/PES 2005), 15-17 Aug. 2005, Dalian, China.
- [43] Alegría, I.M., Andreu, J., Martín, J.L., Ibañez P., Villate, J.L. ve Camblong, H., (2007). "Connection Requirements for Wind Farms: A Survey on Technical Requirements and Regulation" Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11:1858-1872.
- [44] Li, S., Haskew, T.A., Swatloski, R.P. ve Gathings, W., (2011). "Optimal and Direct-Current Vector Control of Direct-Driven PMSG Wind Turbines", IEEE Transactions on Power Electronics, 27: 2325 – 2337.
- [45] Baroudi, J.A., Dinavahi, V. ve Knight, A.M., (2007). "A Review of Power Converter Topologies for Wind Generators", Renewable Energy, 32: 2369–2385.
- [46] Arıkan, O., (2009). Elektrik Güç Sistemlerindeki Anahtarlama Olaylarının Dinamik Analizi ve Harmonik Bileşenlerin Bu Olaylar zerindeki Etkileri, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [47] Kocatepe, C., Yumurtacı, R., Uzunoğlu, M., Karakaş, A. ve Arıkan, O., (2003). Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [48] Kocatepe, C. ve Demir, A., (1998). "Güç Sistemlerinde Harmonik Üreten Elemanlar Genel Bakış", Kaynak Elektrik Dergisi, 113:99-106.
- [49] Arrillaga, J., Bradley, D.A. ve Bodger, P.S., (1985). Power System Harmonics, John Wiley & Sons, Norwich.
- [50] Kocatepe, C., (1995). Sinüsoidal Olmayan Yükler İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- [51] IEEE Working Group on Power System Harmonics, (1983). "Power Systems Harmonics: An Overview", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, 102(8): 2455-2460.
- [52] IEEE Standard 519-1992, (1993). Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [53] Rolan, A., Luna, A., Vazquez, G., Aguilar, D. ve Azevedo, G., (2009). "Modeling of the Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator", International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009), 5-8 July 2009,

Seoul, Korea.

- [54] Yin, M., Li, G., Zhou, M. ve Zhao, C., (2007). "Modeling of The Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator for Integration", IEEE Power Engineering Society General Meeting (PES 2007), 24-28 June 2007, Tampa, Florida.
- [55] Howlader, A.M., Urasaki, N., Senjyu, T., Uehara, A., Yona, A. ve Saber, A.Y., (2010). "Output Power Smoothing of Wind Turbine Generation System for The 2-MW Permanent Magnet Synchronous Generators", International Conference Electrical Machines and Systems (ICEMS 2010), 10-13 Oct. 2010, Incheon, Korea.
- [56] Vergauwe, J., Martinez, A. ve Ribas, A., (2006). "Optimization of a Wind Turbine using Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'06), 5-7 April 2006, İspanya.
- [57] Molina, M.G., Sanchez, A.G. ve Lede, A.M.R., (2010). "Dynamic Modeling of Wind Farms with Variable-Speed Direct-Driven PMSG Wind Turbines", 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 8 – 10 November 2010, Sao Paulo, Brazil.
- [58] Abedini, A. ve Nasiri, A., (2007). "PMSG Wind Turbine Performance Analysis During Short Circuit Faults", Electrical Power Conference (EPC 2007), 25-26 Oct. 2007, Canada.
- [59] Daoud, A.A., Dessouky, S.S. and Salem A.A., (2011). "Control Scheme of PMSG Based Wind Turbine for Utility Network Connection", 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 8-11 May 2011, Rome.
- [60] Uehara A. and Funabashi T., (2010). "Output Power Smoothing of PMSG-Based Wind Energy Conversion System", 8th International Power & Energy Conference, 27-29 Oct. 2010, Singapore.
- [61] Öner, Y., (2009). Sürekli Mıknatıslı DC Motor ile Tahrik Edilen Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörün Çıkış Geriliminin Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Altuğ BOZKURT
Doğum Tarihi ve Yeri : 03.12.1979 İSTANBUL
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : abozkurt@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2005
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2002

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2002-...	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Ulusal ve Uluslararası Bildiriler

1. **Bozkurt, A.**, Kocatepe, C., Kekezoğlu, B., Arıkan, O., İşen, E., (2012). “The Effect of Blade Size on Wind Turbine Performance”, International Conference on Renewable Energy Utilization (ICREU 2012), 4-6 Jan. 2012 Coimbatore, INDIA, 435-439.
2. **Bozkurt, A.**, Kocatepe, C., Arıkan, O., Kekezoğlu, B., İşen, E., (2012). “Influence of Harmonics on a Grid Connected Wind Farm System Under Variable Wind Speed Conditions”, International Conference on Nuclear & Renewable Energy Resources (NURER 2012), 20-23 May 2012, İstanbul, TURKEY.
3. İşen, E., **Bozkurt, A.**, Kocatepe, C., Arıkan, O., Kekezoğlu, B., (2012). “Modeling and Control of a Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator”, International Conference on Nuclear & Renewable Energy Resources (NURER 2012), 20-23 May 2012, İstanbul, TURKEY.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 105G129 nolu “Türkiye Elektrik Sisteminde Güç Kalitesine Etki Eden Değişkenleri ve Güç Kalitesini İzleme, Problemlerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Karşı Önlemlerin Hayata Geçirilmesi” konulu proje tarafından desteklenmiştir.