

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ŞEBEKEYE ENTEGRASYONU VE
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet DABAKOĞLU

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ŞEBEKEYE ENTEGRASYONU VE
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ahmet DABAKOĞLU
504141033**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ramazan ÇAĞLAR

HAZİRAN 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504141033 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ahmet DABAKOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ŞEBEKEYE ENTEGRASYONU VE PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Ramazan ÇAĞLAR**
İstanbul Teknik Üniversitesi


Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Emine AYAZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi


Prof. Dr. Mehmet BAYRAK
Sakarya Üniversitesi

Teslim Tarihi : 05 Mayıs 2017
Savunma Tarihi : 09 Haziran 2017





Sevgili aileme,



ÖNSÖZ

İnsanlar her dönemde gelişim eğiliminde olup, daima daha az uğraş ile daha iyi şartlar altında yaşamak istemişlerdir. Mühendislik biliminin ortaya çıkmasının temelinde yatan olgu belki de bu olmuştur. Çok kaynaktan, az üretimle başlayan bu süreç, teknolojinin hızla ilerlemesiyle beraber, daha az kaynaktan daha çok üretmeye dayalı olan hızlı tüketim anlayışını beraberinde getirmiş, mühendislik biliminin alanının genişleyerek, gelişmesine yol açmıştır. Bu yüksek lisans tezinde rüzgar türbinlerinin çalışması, elektrik kalite problemlerinin incelenmesi ve verimliliği arttırmayı amaçlamak için geliştirilmekte olan farklı generatör tipleri hakkında inceleme, araştırma ve uygulama yapılmıştır. Yüksek lisans tezimde bu önemli konuyu teşvikleri ve yardımları sayesinde tamamlamamı sağlayan başta saygıdeğer hocam Doç. Dr. Ramazan ÇAĞLAR' a, benden desteklerini bir an olsun esirgemeyen sevgili aileme, uygulama ve tasarım aşamasını eğlenceli hale getiren tüm okul ve iş arkadaşlarıma sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2017

Ahmet Dabakoğlu



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ – BAŞLIKLAR	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Dünyada Rüzgar Gücü	2
1.3 Türkiye’de Rüzgar Gücü	4
1.4 Rüzgar Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları	6
1.5 Literatür Araştırması	7
2. RÜZGAR TÜRBİNLERİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ	9
2.1 Rüzgar Enerjisi	9
2.1.1 Cut-in hızı	10
2.1.2 Anma gücü ve anma rüzgar hızı	10
2.1.3 Cut-out hızı	10
2.1.4 Güç regülasyonu	10
2.2 Rüzgar Türbinleri	11
2.2.1 Yatay eksenli rüzgar türbinleri (YERT)	11
2.2.2 Düşey eksenli rüzgar türbinleri (DERT)	12
2.3 Rüzgar Türbini Elemanları	12
2.3.1 Kule	13
2.3.2 Rotor	14
2.3.3 Dişli kutusu	14
2.3.4 Fren mekanizması	14
2.3.5 Ana mil (Düşük hız mili)	15
2.3.6 Yüksek hız mili	15
2.3.7 Generatör	15
2.3.7.1 Asenkron generatör	15
2.3.7.2 Senkron generatör	17
2.3.7.1 Doğru akım generatörü	18
2.3.8 Dümen sistemi ve sensörler	18
2.4 Türbin Tasarımları	18
2.4.1 A tipi türbin	18
2.4.2 B tipi türbin	19
2.4.3 C tipi türbin	19
2.4.4 D tipi türbin	20

2.5 STATCOM.....	20
3. ŞEBEKEYE BAĞLI RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE GÖRÜLEN GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİ.....	27
3.1 Rüzgar Çiftliklerinin Güç Kalitesine Etkilerini Gösteren Faktörler:	28
3.1.1 Rüzgar türbini teknolojisi.....	28
3.1.2 Şebeke koşulları	28
3.1.3 RES tasarımı ve kontrolü	29
3.1.4 Rüzgar akışının yerel özellikleri	29
3.2 Rüzgar Enerjisi Santrallerinde Karşılaşılan Güç Kalitesi Problemleri.....	30
3.2.1 Gerilim düşümü.....	30
3.2.2 Kısa süreli kesintiler.....	31
3.2.3 Uzun süreli kesintiler	31
3.2.4 Ani gerilim artışı	31
3.2.5 Gerilim yükselmesi	31
3.2.6 Gerilim dalgalanmaları (Fliker)	32
3.2.6.1 Sürekli Çalışma	35
3.2.6.2 Anahtarlama işlemi	40
3.2.7 Aktif ve reaktif güç	42
3.2.7.1 Aktif güç.....	43
3.2.7.2 Reaktif güç	43
3.2.8 Frekans	45
3.2.9 Harmonikler	45
4. RÜZGAR TÜRBİNİ İÇİN MODEL GELİŞTİRME PROSEDÜRÜ.....	49
4.1 Rotor Denklemleri	50
4.2 Generatör Denklemleri	51
4.3 Modelleme Aşaması	53
4.3.1 Simulinkte sincap kafesli asenkron generatör modeli.....	54
4.3.1.1 Rüzgar hızı belli basamaklarda halinde artarken SKAG bağlı rüzgar çiftliğinin normal çalışma durumu	57
4.3.1.2 SKAG modelinde rüzgar hızının birden sıfıra düştüğü durum	63
4.3.2 Simulinkte çift beslemeli asenkron generatör modeli	65
4.3.2.1 Şebeke bağlantı kriteri analizi (%5 - %10 - %20).....	67
4.3.2.2 Rüzgar hızı belli basamaklarda halinde artarken ÇBAG bağlı rüzgar çiftliğinin normal çalışma durumu	72
4.3.2.3 ÇBAG modelinde rüzgar hızının birden sıfıra düştüğü durum	80
4.3.3 İki rüzgar çiftliği modelinde arıza durumlarının incelenmesi	83
4.3.3.1 SKAG ve ÇBAG bağlı türbinlerde tek- faz toprak kısa devre arızası olması durumunda türbinlerin tepkisi	83
4.3.3.2 SKAG ve ÇBAG bağlı türbinlerde üç faz-toprak kısa devre arızası olması durumunda türbinlerin tepkisi	87
4.3.3.3 SKAG ve ÇBAG bağlı türbinlerde faz-faz kısa devre arızası olması durumunda türbinlerin tepkisi	90
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	95
KAYNAKLAR.....	99

KISALTMALAR

AC	: Alternative Current
AVR	: Automatic Voltage Regulator
ÇBAG	: Çift Beslemeli Asenkron Generatör
DC	: Direct Current
DERT	: Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri
EN	: European Norm
EPSY	: Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği
GTO	: Gate Turn-off Thyristor
GW	: Gigawatt
IEC	: International Electrotechnical Commission
MW	: Megawatt
PCC	: Point of Common Coupling
PI	: Proportional Integral
RSAG	: Rotoru Sargılı Asenkron Generatör
RSSG	: Rotoru Sargılı Senkron Generatör
SMSG	: Point of Common Coupling
SCR	: Silicon Controlled Rectifier
SKAG	: Sincap Kafesli Asenkron Generatör
SMSG	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör
STATCOM	: Static Compensator
SVC	: Static Var Compensator
TEIAS	: Alternative Current
THB	: Toplam Harmonik Bozulma
YERT	: Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri



SEMBOLLER

A	: Alan (m^2)
$c(\psi_k)$	: Sürekli çalışma için fliker katsayısı
f	: Frekans (Hz)
H_m	: Generatör rotorunun eşdeğer eylemsizlik sabiti [s]
$i_m(t)$	: Rüzgar türbinin bağlı bulunduğu iletim hattı akiminin ani değeri
$k_{f,i}(\psi_k)$	: Fliker adım faktörü
L_m	: Ortak endüktans
L_r	: Rotor kaçak endüktansı
L_s	: Stator kaçak endüktansı
$N_{10,i}$	: 10 dakika içerisinde anahtarlama işleminin maksimum sayısı
$N_{120,i}$	: 120 dakika içerisinde anahtarlama işleminin maksimum sayısı
N_{bin}	: Rüzgar hızı aralıklarının toplam sayısı
N_m	: Fliker katsayı değerlerinin toplam sayısı
$N_{m,i}$	: i 'ninci rüzgâr aralığı hızı aralığında ölçülen fliker katsayı değerlerinin sayısı
$N_{m,i,c < x}$	: i 'ninci rüzgâr hızı aralığında x değerinden küçük veya x değerine eşit olan fliker katsayı değerlerinin sayısı
N_{WT}	: Ortak bağlantı noktasına bağlı rüzgâr türbini çeviricilerinin sayısı
P	: Rüzgar türbininde üretilen aktif güç (W)
P_{st}	: Kısa dönem fliker şiddeti
P_{lt}	: Uzun dönem fliker şiddeti
$P_{st, fic}$	: Kısa dönem sanal fliker şiddeti
Q	: Rüzgar türbininin nominal reaktif gücü (VAr)
R	: Şebeke direnci (Ω)
X	: Şebeke reaktansı (Ω)
$S_{n,i}$	: Tek rüzgâr türbininin görünür gücü
T_m	: P.U cinsinden mekanik tork
U	: Merkez yüksekliğinde yıllık ortalama rüzgar hızı
u	: Rüzgar hızı(m/s)
$u_{fic}(t)$	: Sanal gerilim değeri
$u_m(t)$	: Faz-nötr gerilimi
u_i	: i 'ninci rüzgâr hızı aralığının orta noktası
$u_0(t)$	: Sanal şebeke faz-nötr gerilim kaynağı

$\alpha_m(t)$	: Ölçülen gerilimin temel değerinin elektriksel açısı (derece)
β	: Pitch açısı
ω_s	: Stator elektriksel frekansı [rad/s]
ρ	: Hava yoğunluğu (kg/m ³)
ψ_k	: Şebeke empedans açısı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Fliker planlama sınır değerleri.	34
Çizelge 3.2 : Kabul edilebilir akım harmonik limitleri.....	47
Çizelge 4.1 : SKAG simülasyon konfigürasyonunda kullanılan parametreler.....	56
Çizelge 4.2 : ÇBAG simülasyon konfigürasyonunda kullanılan parametreler.....	68





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : 2015 yılında rüzgar kurulu gücünü arttıran ilk 10 ülke (%).....	2
Şekil 1.2 : 2015 yılında rüzgar kurulu gücünü arttıran ilk 10 ülke (MW).....	3
Şekil 1.3 : Dünya Teknik Rüzgar Potansiyeli (TWh).....	3
Şekil 1.4 : Dünya Teknik Rüzgar Potansiyeli (%).....	4
Şekil 1.5 : Türkiyedeki rüzgar enerji santralleri için kümülatif kurulum.....	4
Şekil 2.1 : Rüzgar türbini elemanları	13
Şekil 2.2 : A tipi sabit hızlı rüzgar türbinleri.....	18
Şekil 2.3 : B tipi değişken rotor direncine sahip değişken hızlı rüzgar türbinleri ...	19
Şekil 2.4 : C tipi kısmi ölçek frekans çeviricili değişken hızlı rüzgar türbinleri.....	19
Şekil 2.5 : D tipi tam ölçek frekans çeviricili değişken hızlı rüzgar türbinleri.....	20
Şekil 2.6 : STATCOM devre konfigürasyonu.....	21
Şekil 2.7 : Reaktif güç üretimi ve tüketimi.....	22
Şekil 2.8 : STATCOM eşdeğer devresi.....	22
Şekil 2.9 : STATCOM kontrol şeması.....	24
Şekil 3.1 : Türbülans gerilim kararlılığı ilişkisi.....	29
Şekil 3.2 : Şebekeye entegre edilmiş rüzgâr türbini şematik diyagramı	32
Şekil 3.3 : Rüzgar türbininin sürekli çalışması sırasında fliker için ölçüm ve değerlendirme işlemleri	35
Şekil 3.4 : Rüzgar türbini fliker değerlendirmesinde kullanılan sanal şebeke	36
Şekil 3.5 : Simülante sanal şebeke modeli.....	37
Şekil 3.6 : Rüzgar türbininin anahtarlama çalışması sırasında fliker için ölçüm ve değerlendirme işlemleri	40
Şekil 3.7 : Rüzgar santral reaktif güç kapasite eğrisi.....	43
Şekil 3.8 : Rüzgara santrallerinden sisteme verilecek reaktif güç desteği eğrisi.....	44
Şekil 3.9 : Bağlı gerilim yüzdesine bağlı olarak tekil harmonik gerilimlerinin durumu.....	46
Şekil 4.1 : Pitch açısı parametrelerinin fonksiyonu.....	51
Şekil 4.2 : SKAG bağlı rüzgar çiftliği simülasyon modeli.....	55
Şekil 4.3 : SKAG modelinde rüzgar hızına göre türbin hızının türbin mekanik gücü fonksiyonu olarak gösterimi.....	56
Şekil 4.4 : SKAG modelinde 3-6 m/s rüzgar hızı değişimi	58
Şekil 4.5 : SKAG modelinde 3-6 m/s hız değişiminde B25 barasında okunan değerler.....	59
Şekil 4.6 : SKAG modelinde 6-9 m/s rüzgar hızı değişimi.....	60
Şekil 4.7 : SKAG modelinde 6-9 m/s hız değişiminde B25 barasında okunan değerler.....	61
Şekil 4.8 : SKAG modelinde 9-14 m/s rüzgar hızı değişimi.....	62

Şekil 4.9 : SKAG modelinde 9-14 m/s hız değişiminde B25 barasında okunan değerler.	63
Şekil 4.10 : Rüzgar aniden kesildiğinde SKAG bağlı rüzgar çiftliğinin tepkisi.....	64
Şekil 4.11 : Rüzgar aniden kesildiğinde SKAG bağlı rüzgar çiftliğinin barasının tepkisi.	65
Şekil 4.12 : ÇBAG bağlı rüzgar çiftliği simülasyon modeli	66
Şekil 4.13 : ÇBAG modelinde rüzgar hızına göre türbin hızının türbin mekanik gücü fonksiyonu olarak gösterimi	67
Şekil 4.14 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %5'i iken rüzgar santralinin tepkisi.	70
Şekil 4.15 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %10'u iken rüzgar santralinin tepkisi.	71
Şekil 4.16 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %10'u iken şebekenin tepkisi.	72
Şekil 4.17 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %20'si iken rüzgar santralinin tepkisi.	73
Şekil 4.18 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %20'si iken şebekenin tepkisi.	74
Şekil 4.19 : ÇBAG modelinde 3-6 m/s rüzgar hızı değişimi	75
Şekil 4.20 : ÇBAG modelinde 3-6 m/s hız değişiminde B25 barasında okunan değerler.	76
Şekil 4.21 : ÇBAG modelinde 6-9 m/s rüzgar hızı değişimi ...	77
Şekil 4.22 : ÇBAG modelinde 6-9 m/s hız değişiminde B25 barasında okunan değerler.	78
Şekil 4.23 : ÇBAG modelinde 9-14 m/s rüzgar hızı değişimi.	79
Şekil 4.24 : ÇBAG modelinde 9-14 m/s hız değişiminde B25 barasında okunan değerler.	80
Şekil 4.25 : Rüzgar aniden kesildiğinde ÇBAG bağlı rüzgar çiftliğinin tepkisi.....	81
Şekil 4.26 : Rüzgar aniden kesildiğinde ÇBAG bağlı rüzgar çiftliğinin barasının tepkisi.	82
Şekil 4.27 : ÇBAG modelinde AVR modunda 9-14 m/s hız değişiminde faz-toprak arıza durumu.	84
Şekil 4.28 : ÇBAG modelinde VAR modunda 9-14 m/s hız değişiminde faz-toprak arıza durumu.	85
Şekil 4.29 : SKAG modelinde 9-14 m/s hız değişiminde faz-toprak arıza durumunda okunan değerler.....	87
Şekil 4.30 : ÇBAG modelinde AVR modunda 9-14 m/s hız değişiminde üç faz-toprak arıza durumu.	88
Şekil 4.31 : SKAG modelinde 9-14 m/s hız değişiminde üç faz-toprak arıza durumu... ..	90
Şekil 4.32 : ÇBAG modelinde 9-14 m/s hız değişiminde faz-faz arıza durumunda okunan değerler.....	91
Şekil 4.33 : ÇBAG modelinde 9-14 m/s hız değişiminde faz-faz arıza durumunda barada okunan değerler.	92
Şekil 4.34 : SKAG modelinde 9-14 m/s hız değişiminde faz-faz arıza durumunda okunan değerler.....	93
Şekil 4.35 : SKAG modelinde 9-14 m/s hız değişiminde faz-faz arıza durumunda barada okunan değerler.	94

RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ŞEBEKEYE ENTEGRASYONU VE PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretiminde kullanılması, fosil yakıt tüketimlerinin artması ve dünya nüfusunun hızla çoğalması nedeniyle günümüzde oldukça yaygınlaşmıştır. Rüzgar gücüne dayalı elektrik sistemleri bu ihtiyacı karşılama yolunda hızla gelişmiş ve büyük önem kazanmaya başlamıştır. Öncelikle rüzgar enerjisinden elektrik üretmenin avantaj ve dezavantajları, rüzgar enerjisinin Türkiye ve Dünyadaki genel durumu hakkında irdelenecek, ardından rüzgar türbinleri ile elektrik üretimi başlığı altında rüzgar enerjisi, rüzgar türbini tasarımları ve parçaları, kullanılan generatör tipleri ve özellikleri, gerilim kararlılığı sağlanması ve rüzgar enerjisinden elektrik üretme tekniği hakkında bilgi verilecektir. Rüzgârdan çok değişken biçimde elektrik enerjisi üretilmesi nedeniyle, büyük güçlerdeki rüzgar çiftliklerinin şebekeye entegrasyonu beraberinde çeşitli elektrik kalite problemleri de getirebilmektedir. Şebekeye bağlı rüzgâr türbinlerinin sayısının artması elektrik sisteminde gerilim kararsızlığı, reaktif güç ve frekans kontrolündeki zorluklar elektrik kalitesi problemlerini beraberinde getirmektedir. Şebekeye bağlı rüzgar sistemlerinin bölgesel ve sistem üzerinde olan bozucu etkileri, büyük rüzgar santrallerinin planlanmasında yaşanabilecek sorunlar hakkında bilgiler üçüncü bölümde verilmiştir. Bahsedilen elektrik kalite problemleri ve bunların ölçümleri incelenmiş, elektrik piyasası şebeke yönetmeliğine göre, şebekeye bağlı rüzgar türbinlerinin için reaktif güç, aktif güç, frekans değişimlerine bağlı toleransları, ayrıca gerilim düşümü, fliker ve harmonik sınırlamaları değerlendirilmiştir.

Son bölümde rüzgar türbini sistemlerinde en çok kullanılan SKAG ve ÇBAG bağlı rüzgar türbini sistemleri incelenmiştir. SKAG ve ÇBAG bağlı rüzgâr türbinleri modelleri MATLAB- Simulink programıyla geliştirilerek farklı rüzgâr hızları için simule edilerek rüzgâr çiftliği kurulurken hangi rüzgâr türbin topolojisinin değişken rüzgâr hızlı sisteme daha uygun olduğu incelenmiştir. Geliştirilen benzetim sistemlerinde iki rüzgar türbini modelinin farklı seviyelerdeki rüzgar değişikliklerine verdikleri tepkiler, harcadıkları reaktif güç miktarı, ortak bağlantı noktasındaki gerilim kararlılığına etkilerini gösteren simülasyon yapılmıştır. Bunun yanında iki benzetim sistemi için tek-faz toprak, üç faz ve faz-faz kısa devre arızası durumlarında türbinlerin verdiği tepkiler ölçülerek, hangi generatörün bağlı bulunduğu benzetim sisteminin elektrik kalitesi üzerinde daha olumlu sonuçlar doğurduğu incelenmiştir. Yapılan benzetim çalışmalarının ardından varılan analizler ve sonuçlar, şekiller halinde sunulmuştur.



INVESTIGATION OF INTEGRATION AND PERFORMANCE OF WIND TURBINES INTO GRID

SUMMARY

The use of renewable energy sources in the production of electric power has become widespread due to the increase of fossil fuel consumption and the rapidly increasing of the world population. Electrical power systems based on wind power are rapidly developing and gaining great importance in meeting this need. First of all, the advantages and disadvantages of electricity generation from the wind energy will be explored about the general situation of the wind energy in Turkey and the world, followed by the wind turbines and the power generation under the power production, the wind turbine designs and components, the generator types and features used, the voltage stability and electricity generation from wind energy information about the technique will be given. Due to the very different forms of electrical energy generated from wind, the integration of large wind farms into the grid can also bring various electrical quality problems. Today, most international network regulations require power quality requirements. The wind at the connection point for a given type of wind turbine can cause the farm to be limited in capacity. In addition, it is permissible to build lines with higher capacities with converters having better power quality characteristics. Information about the regional and systematic disruptive effects of the grid-connected systems, and the problems in planning the grid plants are given in the third section. The electrical quality problem and its implications are examined, the reactive power, the tolerances related to the frequency changes, voltage drop, the flicker and the harmonic limitations are evaluated according to the electricity market grid code.

In the last section, the systems of wind turbines and SFIG and DFIG connected wind turbine systems have been investigated. SFIG and DFIG connected wind turbines models are simulated for different wind speeds that can be developed with MATLAB- Simulink program, for finding which wind turbine topology is more suitable for variable wind speed system when the wind farm is established. In the developed simulations, the two wind turbine models were simulated to show the responses of different levels of wind change, the amount of reactive power, the voltage stability at the point of common coupling.

Electrical quality problems caused by wind power plants were investigated in this study for variable wind speeds single phase-earth, three-phase-earth and phase-phase short circuit faults made by SFIG and DFIG generator types commonly used in the market were investigated by comparison with simulation studies. A network connection criterion analysis was made in the DFIG connected wind farm; The behavior of the wind farm and the high voltage line to which the wind farm is connected has been examined while the short circuit power of the bus to be connected is 5%, 10%, 20%.

SFIG and DFIG connected wind turbines models were developed with MATLAB-Simulink program and simulated for different wind speeds so that which wind turbine topology is more suitable for variable wind speed system when the wind farm is established.

In the developed model, the two wind turbine models were simulated to show the responses to different wind speed changes, the amount of reactive power consumed, the voltage stability at the common connection point, and therefore the power quality effects, the amount of active power delivered to the network in wind conditions. The simulations followed by the calculations are analyzed and the results are folded.

For variable wind speed models in modern wind turbines, it has been found that the DFIG-connected wind turbine systems offer several advantages over the SFIG-connected wind turbine systems. At three levels of wind speed changes, such as cut-in, nominal wind speed and cut-off speed, it was observed that the DFIG-connected wind turbine was superior to the SFIG-connected wind turbine at the point of active power and voltage stability. At the same time, the amount of reactive power consumed was less in the turbines connected to the DFIG. All these factors should be taken into consideration when deciding which wind farm model should be set up.

According to these simulation results, the wind turbine systems with SFIG reach the nominal active power value faster than the wind turbine systems containing the DFIG. Even if the wind speed is constant, the rotor speed increases with time in the wind turbines containing the DFIG.

If the pitch angle values are compared within the two topologies in graphs at speeds of 9-14 m / s, wind turbine systems with DFIG provide simple and cost-effective power control with simple pitch angle control systems. At high wind speeds, the pitch controller maintains the wind turbine by limiting the maximum output power, while the pitch angle remains constant at low wind speeds. This flexibility provided by DFIG at variable wind speeds reduces the mechanical stress due to the wind speed on the wings of the wind turbine, thus reducing the vibration in the generated torque and thus reducing my electric quality problems like flicker.

In a SFIG full-scale power converter connected to a stator, the variable wind speed can be used in fast systems so that the total output power will remain around 1 pu, but this will lead to increased transmission and switching losses at the same time. In addition, due to the reactive power generating and consuming feature provided by the power electronic converters of DFIG technology, there is no need to connect the STATCOM to the capacitor groups as in the SFIG model, thus the system cost is reduced.

Compared with the simulation results, it can be said that with the appropriate converters and control systems, the DFIG connected turbines are more reliable and stable than the SFIG connected turbines.

Wind power plants, turbine, generator and control systems are developing day by day, and new wind turbine models can be developed as a result of future developments.

On the other hand, studies on the network effects can be made as a result of different types of power generation plants working together. As a result, the parallel operation of the wind power plant should not impair the quality of the electricity supplied to other consumers.

In Turkey, as the number of power plants that produce wind power increases, their connection with the grid will become increasingly important and the work to be done in this regard will increase even more.



1. GİRİŞ

Rüzgar enerjisinin gücünden yararlanma isteği insanlık tarihinin çok eskilerine dayanır. Başlangıçta yelkenli gemiler ve botlarda kullanılan bu enerji daha sonra buğday öğütülmesinden su pompalanmasına kadar çok çeşitli yelpazelerde kullanılmıştır. Bugünün karmaşık cihazlarına gelmeden, rüzgar enerjisi çok çeşitli gelişim evrelerinden geçmiştir. Rüzgarın mekanik gücünün ilk olarak kullanıldığı dönem hakkında çeşitli yorumlar vardır. Bazı bilim insanları Babil İmparatoru Hammurabi'nin rüzgar enerjisini kullandığını, bazıları ise ilk rüzgar dişlilerinin Hindistan'da ortaya çıktığını öne sürmüşlerdir [1]. Buna rağmen bu iddiayı kanıtlayacak bir donanım günümüze kalmadığından, bu bilginin kesinliği yoktur. Rüzgar gücünü mekanik enerjiye çevrildiğine dair ilk yazılı belge, MÖ 2001'li yıllara dayanır. Pers uygarlığı buğday öğütmek amacıyla yel değirmenleri kullanarak, rüzgar gücünü yararlı enerjiye çeviren ilk kayıtlı medeniyet olmuştur. Dikey eksenli makineler, tahta kanatlar yerleştirilmiş, öğüte taşı ise dikey safta bağlanmıştır. Yel değirmenlerinin Avrupa'ya geçmesi ise ortaçağın sonlarına uzanır, bu tarihlerde rüzgarın yalnızca mekanik enerjisi kullanılmış, rüzgarın mekanik enerjisinden elektrik üretme fikri ancak 1887 yılında James Blyth ten çıkmış ve ilk rüzgar türbini İskoçya topraklarında inşa edilmiştir [2]. 1891 yılında ise Danimarkalı bir bilim insanı olan Poul la Cour, günümüzdeki rüzgar türbinlerinin prototipi konumunda bulunan bir rüzgar türbini inşa ederek bir koyun aydınlatma ihtiyacını karşılamıştır. 20. Yüzyılda 1973 te patlak veren fosil yakıt krizine kadar, rüzgar enerjisi kullanımındaki gelişmeler devam etmiş, krizden sonra devletlerin yönünü yenilenebilir enerjiye çevirmesiyle birlikte artarak günümüze kadar ulaşmıştır.

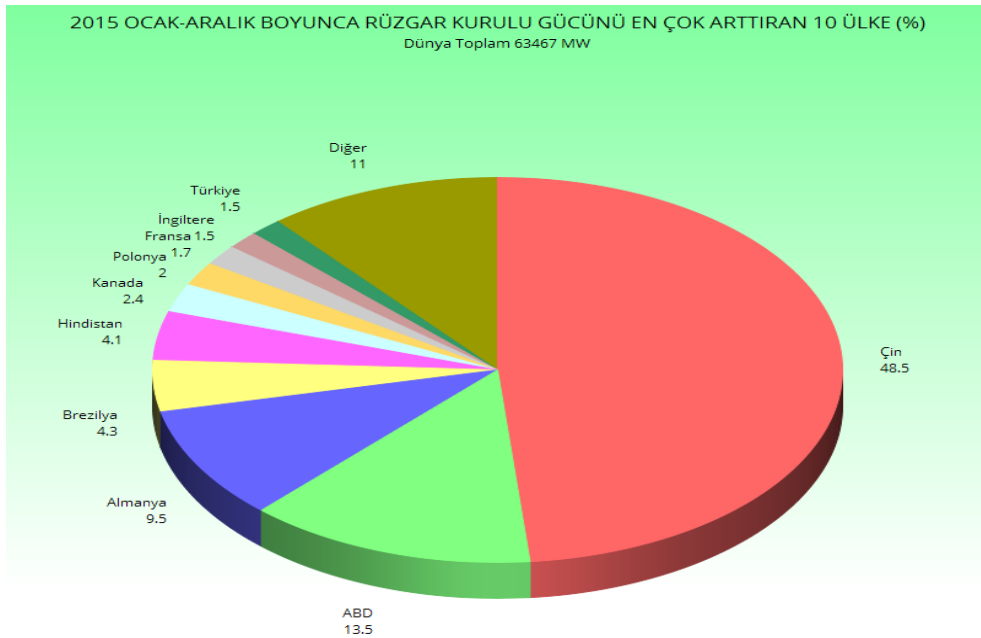
1.1 Tezin Amacı

Yapılan çalışmada şebekeye bağlı rüzgâr türbinlerinin sayısının artmasıyla ortaya çıkan elektrik sisteminde gerilim kararsızlığı, reaktif güç ve frekans kontrolündeki zorluklar olan elektrik kalitesi problemleri incelenmiştir. Rüzgar türbinlerine bağlı olan generatörün, rüzgar çiftliği performansına etkisi çok büyüktür.

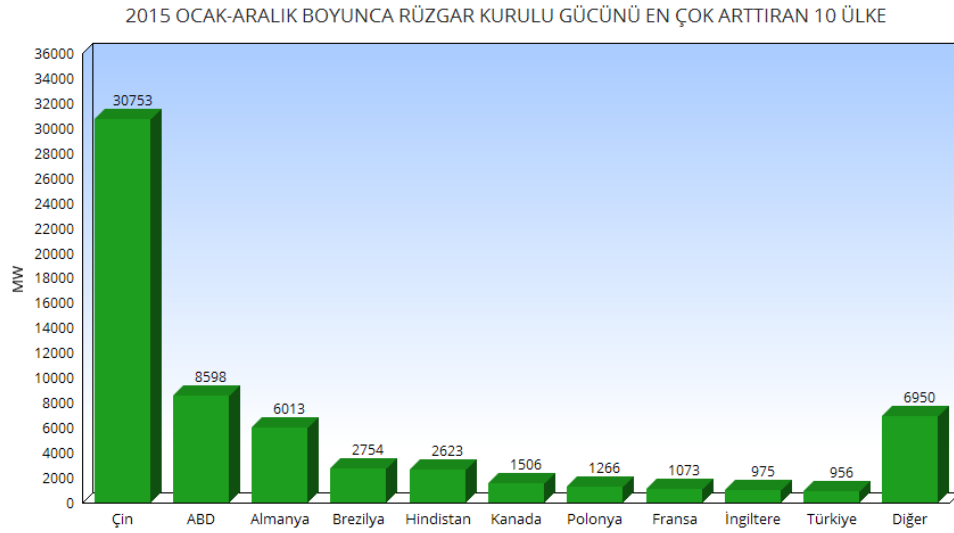
SKAG ve ÇBAG generatör tipleri bağlı modeller ile yapılan değişken rüzgâr hızları ve tek-faz toprak, üç faz ve faz-faz kısa devre arızası durumlarında türbinlerin verdiği tepkiler ölçülerek ve benzetim çalışmalarıyla karşılaştırılarak incelenmiştir.

1.2 Dünyada Rüzgar Gücü

Rüzgar endüstrisi son yıllarda dünya üzerinde inanılmaz bir gelişme göstermektedir. 2015 yılında dünya genelinde yaklaşık 63 GW yeni rüzgar türbine kurulumu yapılmış, 60 GW kurulum bandı tarihte ilk defa asılmıştır. Bundan önceki yıllarda rekor 51.7 GW yeni kurulum ile 2014 yılında kırılmıştı. Son yıllardaki Avrupa ekonomisindeki durgunluk, ABD de yaşanan politik belirsizlik nedeniyle, bu rekorun kırılması uzmanlar tarafından tahmin edilmemekteydi ancak enerjinin hızla yükselen gücü Çin'deki rüzgar endüstrisinin hareketliliği, uzmanların tahminlerinde yanılmasını sağladı. 2015 yılındaki global ölçekte kurulu rüzgar gücü yaklaşık %17 büyürken, Çin deki yeni kurulu güç %22 artışla 30,753 MW oldu. Geçtiğimiz yılın sonunda rüzgar kurulu gücünde 10 GW barajını geçebilen yalnızca sekiz ülke olmuştur. Bunlar sırasıyla Çin, ABD, Almanya, Hindistan, İspanya, İngiltere, Kanada ve Fransa'dır [3].

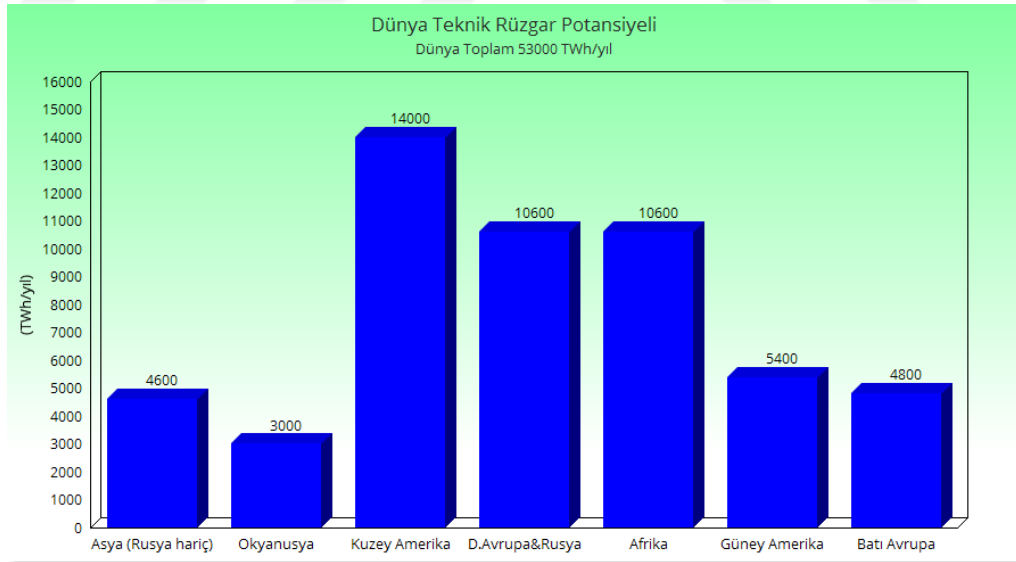


Şekil 1.1: 2015 yılında rüzgar kurulu gücünü arttıran ilk 10 ülke (%).

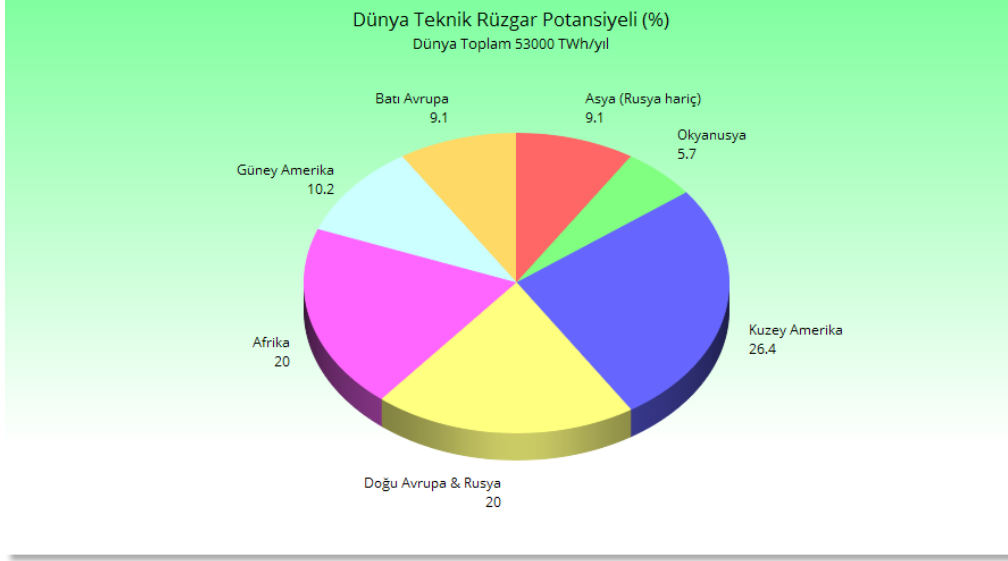


Şekil 1.2: 2015 yılında rüzgar kurulu gücünü arttıran ilk 10 ülke (MW) [4].

World Energy tarafından yayınlanmış çalışmaya göre; 5.1 m/s üzeri rüzgar hızlarına sahip bölgelerin uygulamaya dönük ve toplumsal kısıtlar nedeni ile %4 'nün kullanılacağı kabul edilerek, dünya rüzgar enerjisi teknik potansiyeli 53.000 TWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu değer in dünyadaki dağılımı, Şekil 1.1 ve 1.2'de verilmektedir.



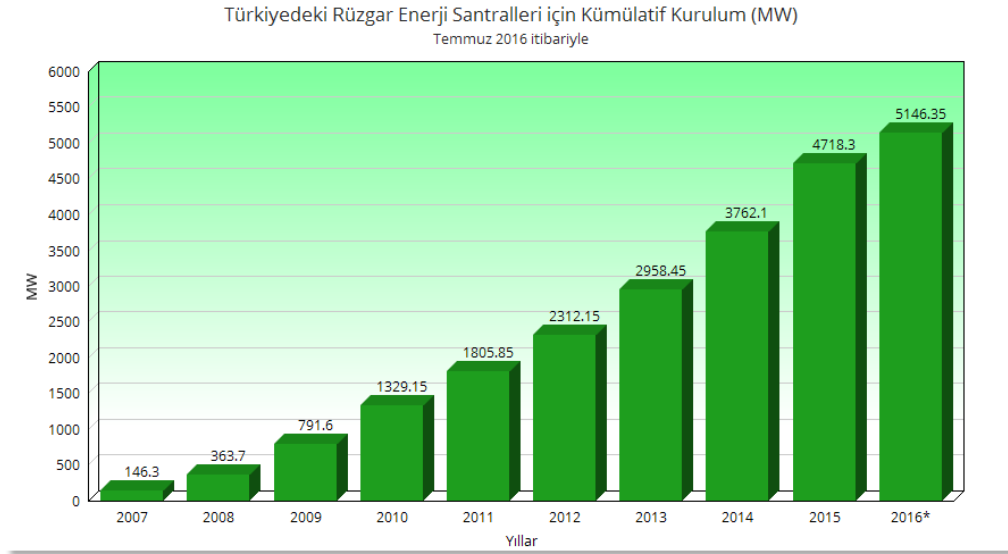
Şekil 1.3: Dünya Teknik Rüzgar Potansiyeli (TWh).



Şekil 1.4: Dünya Teknik Rüzgar Potansiyeli (%).

1.3 Türkiye’de Rüzgar Gücü

Türkiye Rüzgar Enerjisi birliği (TUREB) in 2016 yılında hazırladığı rapora göre, 2015 yılındaki 956 MW’lık yeni kurulumlarla beraber, Türkiye’nin rüzgârdaki kurulu gücü 4178 MW seviyelerine ulaşmıştır. Rapora göre Ege ve Marmara bölgeleri toplam kurulu gücün %74 ünü içerisinde barındırmaktadır.



Şekil 1.5: Türkiye’deki rüzgar enerji santralleri için kümülatif kurulum [5].

Türkiye’nin enerji politikasındaki başlıca amacı çevresel ve ekonomik yönleri de hesaba katarak sosyal ve ekonomik büyümenin sağlanmasıdır. Türkiye’nin son

yıllarda başardığı bu büyümenin önümüzdeki yıllarda da süreceleceği düşünülmektedir [6]. Türkiye'nin fosil enerji yakıtlarına sahip olmaması, bunu yanında linyit kömürü hariç, petrol ve doğalgaz gibi diğer termik kaynakların çok az olması, Türkiye'nin yönünü herhangi bir kaynak gerektirmeyen yenilenebilir enerjiye çevirmesini sağlamıştır. Türkiye'nin yenilenebilir enerjiyi de içeren ana enerji politikası :

- Enerji talebini iç kaynaklarla karşılamak, bunu gerekirse devlet, özel sektör yada yabancı sermaye yoluyla gerçekleştirmek.
- Var olan kaynakların yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları ile geliştirilmesi-
- Enerji kaynaklarını çeşitlendirerek bir ülkeye ya da kaynağa bağlı kalmadan yurdun enerji ihtiyacının karşılanması
- Özel sektör yatırımlarının teşvik edilmesi ve enerji sektörünün devlet tekelinden çıkarılması.
- Elektrik iletim hatlarının ve dağıtım şebekesinin geliştirilmesi böylece, elektrik güvenilirliğinin sağlanması.
- Türkiye'nin jeopolitik konumunun uluslararası petrol ve doğalgaz geçişlerine ev sahipliği yaparak avantajlı hale getirilmesi, Avrupa ve Asya arasında enerji koridoru oluşturulması [7]

şeklinde özetlenebilir. Buradan anlaşılabileceği üzere, rüzgar enerjisinin önemi yaşanan petrol ve gaz krizlerinin ortaya çıkardığı etkilere karşı Türkiye'nin elini güçlendirmektedir. Enerji çeşitliliğinin artması bunun yanında termik kaynakların çevreye, insana ve doğaya verdiği zararların minimize edilmesi sebebiyle, Türkiye enerjide yönünü yenilenebilir enerjiye ve en efektif şekilde kullanabileceği rüzgar enerjisine dönmüştür. Türkiye rüzgar potansiyeli bakımından oldukça zengin bir ülkedir. Yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve rüzgar hızı 7,5 m/s üstünde olan bölgelerde, kilometrekare başına 5 MW gücündeki rüzgar türbini santrali kurulabileceği kabul edilmektedir. Bu bilgiler ışığında, Türkiye'nin yüzölçümüne göre hesaplama yapıldığında, toplam kapasitenin 48 GW civarlarında olduğu görülmüştür, bu oran Türkiye yüzölçümünün yaklaşık %1,3 una denk gelmektedir [8]. Bölgelere göre dağılıma bakıldığında ise, Marmara bölgesinin başı çekmekte olduğunu görülmüştür.

1.4 Rüzgar Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları

Rüzgar enerjisinin başlıca avantajı herhangi bir doğal işleyişi bozmadan ya da çevreye zarar vermeden kullanılmasıdır. Bu açıdan diğer çoğu enerji kaynağından ayrılır. Geniş ölçekte enerji üretebilmek amacıyla rüzgar türbinleri geniş alanlara ve fazla sayıda kurulur, bu alanlara rüzgar çiftliği adı verilir. Başlıca avantajı teorik olarak sonu olmayan sınırsız bir kaynaktır. Enerji çevre kirliliği yaratmadan üretilir. Bunların yanında türbin teknolojileri zamanla beraber hızla geliştiğinden, türbinlerden alınan verimde hızla artmaktadır, türbin kanatları daha geniş, materyaller daha kompleks ve kompozit maddelerden seçilmekte, rüzgar kulelerinin uzunlukları artmaktadır [9]. Bunun dışında rüzgar türbinleri genellikle dağlık alanlarda ve tepelerde kurulmaktadır, rüzgar çiftlikleri insanların kullanabileceği toprakların çok azını kullanmakta dolayısıyla minimum yer işgal etmektedirler, bu yüzden bu topraklar rüzgar çiftliğinin yanı sıra tarım için kullanılmaya da elverişlidir [10]. Rüzgar türbinlerine bağlı generatörler yeryüzüne zararlı gaz yaymamakta, dolayısıyla asit yağmuru yada sera etkisi gibi doğaya zararlı durumların oluşmasına neden olmamaktadırlar. Bunun yanında rüzgar enerjisinin bazı dezavantajları da mevcuttur. Bunlardan biri rüzgar şiddetindeki dalgalanmanın, rüzgar türbini tarafından üretilen gücün miktarında çok ciddi bir etki göstermesidir. Rüzgar sürekli olmayan bir kaynak olduğu için, güç yalnızca rüzgar estiğinde üretilir. Bu açıdan bakıldığında nükleer ya da termik kaynaklar gibi güvenilir bir enerji kaynağı değildir. Bunu yanında rüzgar türbinleri çok sesli biçimde çalışmaktadır. Ses emisyonu bir türbin için oldukça düşüktür, ancak çok miktarda rüzgar türbininin olduğu bir rüzgar çiftliğinde gürültü katlanarak artar. Bu yüzden rüzgar çiftlikleri yerleşim alanlarına oldukça uzak bölgelere konumlandırılmalıdırlar. Böylece devasa fanların oluşturduğu gürültü kirliliği insanları rahatsız etmeyecek konuma getirilir. Aynı zamanda kilometrelerce uzaktan görünen türbinlerin, bölge için estetik olmayan görüntü oluşturması da, rüzgar enerjisinin dezavantajlarından sayılabilir. Hareket halindeki türbin kanatları kuşların yaralanıp ölmesine neden olabilir, bu yüzden türbinlerin göçmen kuşların göç yolları üzerinde kurulmamasına ayrıca dikkat edilmelidir. Çevresel ve gürültü sorunları yüzünden elektrik talebinin olmadığı yerlere konumlandırıldıkları için elektriğin iletimi için kurulacak hatların maliyetinin artması da, elektrik üretim maliyetinin artmasına neden olur. Genel itibarı ile rüzgar potansiyeli yüksek alanlarda kurulan rüzgar çiftliklerinin elektrik üretim maliyetleri,

konvansiyonel yollarla üretilen elektrik üretim maliyetleri ile yarışabilirken, yüksek rüzgar potansiyeli olmayan yerlerde üretim maliyetleri halen fosil yakıttan üretilen elektriğin maliyetinden yüksektir. Bunun nedeni rüzgar enerjisinin yüksek kurulum maliyeti ve ileri teknoloji gerektirmesidir.

1.5 Literatür Araştırması

Rüzgar türbini teknolojisinin geçtiğimiz 40 yılda hızla gelişmeye başlamasıyla, rüzgar türbinlerinin kapasiteleri artmış ve günümüzde oldukça yaygın hale gelmişlerdir. Ancak yüksek güç kapasitelerine ulaşan rüzgar çiftliklerinin şebekeye bağlantıları sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sorunlar genellikle gerilim düşümü, fliker, harmonik gibi elektrik kalitesi problemleridir(Knudsen ve Akhmatov, 2001; Tande, 2002; Bollen vd., 2005). Resmi gazetede yayınlanmış olan elektrik piyasası şebeke yönetmeliğine göre rüzgar enerjisiyle çalışan elektrik üretim tesisleri şebekenin gerilim ve frekans kontrolüne yardımcı olmalı, gerekli bulunduğu hallerde iletim sistemine aktif ve reaktif gücü sağlamalıdır (Tande, 2003; De Alegria vd., 2006; Ummels vd., 2006). Bu çalışmanın 2. bölümünde rüzgar enerjisi ve türbinlerinden bahsedilmiş, 3. bölümde ise türbinlerden kaynaklanan elektrik kalitesi problemleri ele alınmıştır (IEC 61400-21:2008; Linh, Nguyen Tung 2009, De Almeida 2003, De Alegria, I.M., Andreu, J., Martin, J.L., Ibanez, P., Villate, J.L. ve Camblong, H., 2007, Emanuel, Hanna 2009). Son bölümde SKAG ve ÇBAG bağlı rüzgâr türbinleri modelleri MATLAB- Simulink programıyla geliştirilerek farklı rüzgâr hızları için simule edilmiş, böylece rüzgâr çiftliği kurulurken hangi rüzgâr türbin topolojisinin değişken rüzgâr hızlı sisteme daha uygun olduğu incelenmiştir.



2. RÜZGAR TÜRBİNLERİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

2.1 Rüzgar Enerjisi

Rüzgar Enerjisi hareket etmekte olan havanın kinetik enerjisine denir. Havanın belirli bir ağırlığı ve akan havanın hızı vardır. Hayali bir alanından, rotorun kapladığı alan, (m/s) hızı ile akan hava kütlesinin gücü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\text{Rüzgarın gücü (W)} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.1)$$

Görüldüğü gibi rüzgârdan elde edilecek güç ρ hava yoğunluğu (kg/m^3), A rotorun kapladığı alan ve rüzgâr hızının üçüncü kuvveti ile doğru orantısal olarak değişmektedir. Hava yoğunluğunu hava basıncı ve hava sıcaklığının bir fonksiyonudur ve her ikisinin de deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı olduğunu düşündüğümüzde, hava yoğunluğu;

$$\rho(z) = \frac{P_0}{RT} e^{\left(\frac{-gz}{RT}\right)} \quad (2.2)$$

Burada ρ hava yoğunluğu yüksekliğin bir fonksiyonu olarak (kg/m^3) biriminde P_0 deniz seviyesindeki atmosfer yoğunluğu belirten bir sabit ($1,225 \text{ kg/m}^3$), R havanın gaz sabiti ($287,05 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$), g yerçekimi ivmesi ($9,81 \text{ ms}^{-2}$), T hava sıcaklığı (K) ve z deniz seviyesinden yükseklik (m) tir.

Teorik açıdan bakıldığında formülde yer alan alanından hızı ile akan rüzgârdan elde edilebilecek rüzgar enerjisi ancak rüzgar türbini kanatlarının ilerleyen rüzgarın enerjisini tamamen ele geçirerek, rüzgar hızını sıfıra ulaştırılmasıyla elde edilebilir. Ancak bu mümkün değildir, kanatlara ulaşan rüzgarın kanatlardan belli bir hız ile ayrılması gereklidir. Böylece giren rüzgar hızı ve çıkan rüzgar hızı arasında bir ilişki kurulur. Teoride rüzgârdan elde edilebilecek gücün, tüm oluşabilecek kayıplar göz ardı edildiğinde bile, optimum seviyesi Betz tarafından 1926 yılında hesaplanmıştır. Bu katsayıya Betz katsayısı denir ve oranı %59 dur. Buna göre tüm kayıplar ihmal edildiğinde rüzgârdan elde edilebilecek maksimum enerji aşağıdaki formülle bulunur [11].

$$P_{Betz} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_{P_{Betz}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 * 0,59 \quad (2.2)$$

Formülden anlaşıldığı üzere rüzgârdan elde edilebilecek güç rotor alanı ve hava yoğunluğu ile orantısal olarak artmakla beraber, rüzgar hızının küpüyle orantılı olarak artmaktadır. Burada türbinin devrede kalabileceği en düşük rüzgar hızı (cut-in) ve en yüksek rüzgar hızlarına (cut-out) değinmekte fayda vardır.

2.1.1 Cut-in hızı

Çok düşük rüzgar hızlarında rüzgar türbini, rotor kanatlarını döndürebilecek torku yakalayamaz, ancak rüzgar hızı arttıkça kanatlar dönmeye başlar ve türbin elektrik enerjisi üretir. Türbin kanatlarının elektrik enerjisi üretmeye başladığı bu noktaya devreye girme hızı (cut-in speed) denir. Türbinin yapısına bağlı olmakla beraber, tipik bir rüzgar türbininde 3-4 m/s arasındadır [12].

2.1.2 Anma gücü ve anma rüzgar hızı

Rüzgar hızı cut-in hızını aştığında, rüzgar türbini şekilde gösterildiği gibi hızla elektrik üretmeye başlar. Ancak belli bir noktadan sonra hızın artmasıyla elektrik üretiminde artış olmaz, bu sınır değerine rüzgar türbininin anma gücü, ve bu noktada ulaşılan rüzgar hızına, anma rüzgar hızı denir. Anma rüzgar hızının üzerine çıkıldığında türbin artık elektrik enerjisi üretmez, generatör üretim kapasitesine ulaşmıştır, bu noktadan sonra genellikle büyük kapasiteli rüzgar türbinlerinde kanat açıları değiştirilerek, üretilen enerjinin sabit kalması sağlanır.

2.1.3 Cut-out hızı

Rüzgar hızının artmasıyla anma rüzgar hızının geçilmesiyle beraber, türbin kanatlarının üzerinde oluşan kuvvet, rotora zarar verebilir, bu durumda frenleme sistemleri devreye girer ve rotorun zarar görmesini önlemek amacıyla türbinin kanatlarını durdurur.

2.1.4 Güç regülasyonu

Türbin tarafından üretilen güç anma hız değeri ve kesme hız değeri arasında düzenlenmelidir. Eğer ayarlanmazsa anma hızından yüksek hızlara ulaşıldığında, türbin anma güç değerinden çok güç üretmeye başlar. Türbinin anma değerinden yüksek değerde güç üretebilmesi için, türbinin bu gücü üretecek şekilde daha büyük

kapasitede generatör ve iletim hattı ile tasarlanmış olması gerekir. Öte yandan bu şekilde uzun süre ile anma hız değerinden yüksek hızlara ulaşmak olasılığı çoğu rüzgar rejiminde oldukça düşüktür, ve kısa süreli ekstra güç üretmek için ise daha büyük kapasitede sistem kurulması maliyeti artıracığından mantıklı değildir [12].

2.2 Rüzgar Türbinleri

Modern rüzgar türbinleri aerodinamik olarak özel olarak tasarlanmış rotor ve enerji üretimi, iletimi ve düzenlenmesini sağlayan bileşenlerden oluşur. Türbinlerin gücü bir kaç Watt tan MW'lar seviyelerine kadar yükselebilir. Rüzgar endüstrisindeki modern eğilim MW'lar kapasitesinin üstüne çıkarken, sistem daha az maliyetli rüzgar enerjisi üretmek üzere ölçeklenmektedir. Günümüzün bir çok türbini üç kanatlı rotorlu yatay eksenli rüzgar türbinlerinden oluşmaktadır. Geçtiğimiz yüzyılın sonlarından itibaren dikey eksenli rüzgar türbinlerine yönelik olan çalışmalar yoğunlaşmış olsa da, dikey eksenli rüzgar türbinleri, yatay eksenli rüzgar türbinleri kadar güvenli bir alternatif olamayacaktır. Türbinler çeşitli grupları içerisinde barındırır kendi transformatörleriyle, iletim hatları ve salt sahası ile elektrik enerjisi üretirler. Rüzgar süreklilik garantisi olmayan bir enerji kaynağı olduğundan, güneş paneli ya da dizel generatörle desteklenen hibrit sistemler, sahalarda oldukça yaygındır. Rüzgar enerjisi teknolojileri geliştirilmeye başlandığı andan itibaren dünyanın farklı yerlerinde, farklı şekilde tasarlanmış ve üretilmişlerdir. Ancak ticari olarak kullanılmalarıyla beraber, bazı tasarımlar kabul görmemişlerdir. Buna rağmen rüzgar türbinlerini dönüş eksenine göre sınıflandırarak, düşey eksenli rüzgar türbinleri ve yatay eksenli rüzgar türbinleri olmak üzere iki ana kategoride incelemek mümkündür.

2.2.1 Yatay eksenli rüzgar türbinleri (YERT)

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde dönüş eksenli rüzgar yönüne paraleldir. Kanatlar ise rüzgar yönüne dik olarak dönerler. Ticari uygulamaların çoğunda YERT kullanılmaktadır [13]. En önemli avantajlarından biri düşük cut-in hızında çalışabilmesidir, bu yüzden genel itibarıyla güç katsayıları yüksektir. Fakat generatör ve dişli kutusunun kulenin üst kısmında yer alması, tasarımın karmaşık ve pahalı olmasına neden olmaktadır. YERT tek, iki yada üç kanatlı olabilir, fakat kanat ağırlığı en dengede ve aerodinamik olarak en uygun olan tasarım üç kanatlı

türbinlerdir, bu yüzden ticari uygulamaların çoğunda üç kanat tercih edilir. Rüzgârı önden alan (up-wind) ya da rüzgârı arkadan alan (down-wind) şekilde tasarlanılabilir. Up-wind türbinin en önemli avantajı kule tarafından oluşturulan rüzgar gölgelenmesinden etkilenmemesidir ancak türbinin yönünün sürekli rüzgara bakması için dümen sisteminin kurulması dezavantajdır. Down-wind tipindeki türbinlerde ise dümen sistemi kurulmasına ihtiyaç yoktur ve daha esnek bir kullanım alanı sağlarlar, buna rağmen rotorun rüzgârdan korunmalı tarafta kalmasından ve kulenin rüzgârı gölgelemesinden kanatlar arasında dengesiz yüklenme oluşabilir.

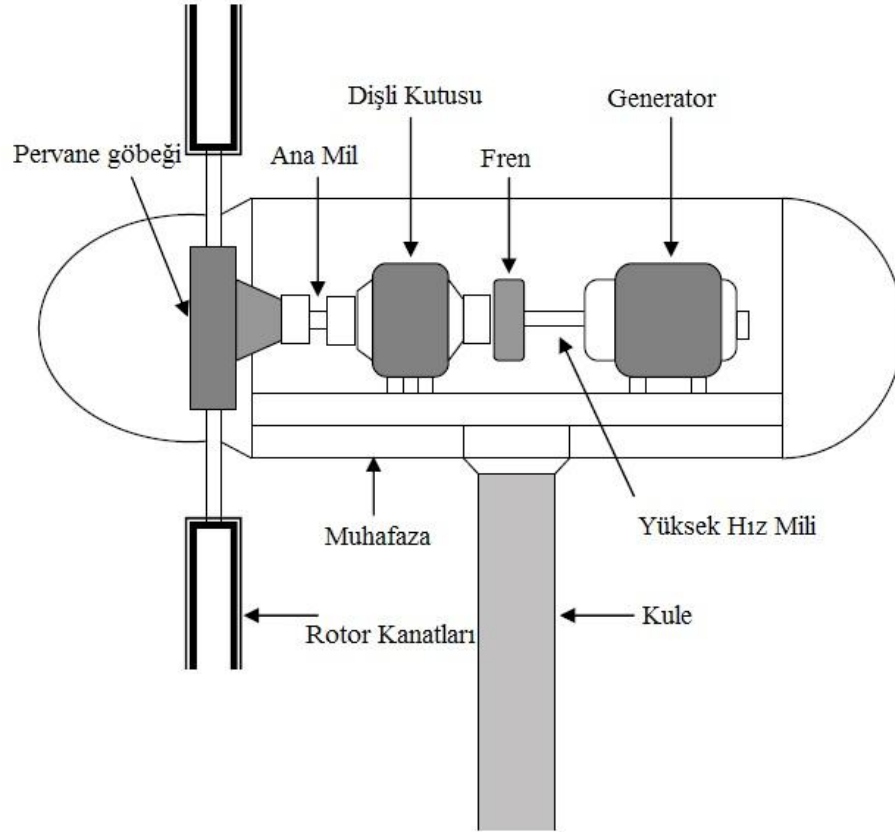
2.2.2 Düşey eksenli rüzgar türbinleri (DERT)

Düşey eksenli rüzgar türbinlerinde türbin mili düşey yönde ve rüzgarın geliş yönüne hemen hemen diktir. DERT her yönden gelen rüzgârı alabilirler, böylece dümen sistemine gerek kalmaz, generatör ve dişli kutusu ise yer seviyesindedir, böylece kule tasarımı kolay ve daha az maliyetli olur. Fakat bu tip türbinlerin en önemli dezavantajı türbinler durduktan sonra kendi kendine başlamamalarıdır. Rotor dönüşünü tamamlandığında kanatlar aerodinamik olarak durgun bölgeye geçerler, tekrar başlamaları için mekanizma kurmak gerekebilir. Ayrıca türbinler tehlikeli bir şekilde hızlanıp sistemde hata meydana gelmesine neden olabilirler, bu yüzden DERT ticari kullanım olarak yaygın değildir, daha çok deneysel amaçla kullanılmaktadırlar [13].

2.3 Rüzgar Türbini Elemanları

Rüzgar türbinler yapıları itibarıyla basit bir prensiple çalışırlar. Rüzgarın enerjisi kanatlar yardımıyla rotoru döndürür, havadaki kinetik enerji mekanik enerjiye dönüştürülür. Rotor devri dişli kutusunda artırılarak kazanılan mekanik enerji generatöre aktarılır ve elektrik enerjisi üretilir. Bunun yanında verimi arttırmak amacıyla dümen sistemi ve sistemi yüksek rüzgar hızından korumak amacıyla da fren sistemi kurulur. Kanatların daha fazla rüzgar alması ve türbülansdan daha az etkilenmesi amacıyla da kanatlar yerden en az 30 m yükseğe monte edilirler. Rüzgar türbinlerinin verimli ve güvenilir performans vermesi amacıyla, tüm bileşenler dikkatlice tasarlanmalı, üretilmeli ve sisteme entegre edilmelidir. Standart bir rüzgar türbini aşağıda belirtilen ana kısımlardan meydana gelir; Kule, rotor, yüksek ve

düşük hız şaftları, dişli kutusu, generatör, sensörler ve dümen sistemi, güç düzenleyici ve kontrol birimleri, güvenlik sistemleri.



Şekil 2.1 : Rüzgar türbini elemanları [12].

2.3.1 Kule

Kule rotoru destekler ve motor yerinin istenilen yükseklikte durmasına olanak sağlar. Kafes tipi, çelik borulu tip ve gergili içi boş tübüler tip kuleler başlıca rüzgar kulesi tiplerindendir. Kafes tipi kuleler, çelik çubukların kafes şeklinde birbirleri ile tutturulmasıyla oluşur. Elektrik iletim hatları ile benzerlik göstermektedirler. Kafes tipi kulelerde benzer boyuttaki çelik borulu tipteki kulelerin yaklaşık olarak yarısı kadar malzeme kullanılır, böylece kuleler hafif ve ucuza mal edilmiş olunur [14]. Ancak kafes tipindeki kulelerinde bazı dezavantajları vardır. Başlıca dezavantaj estetik olmayan görüntüsüdür. Ayrıca yatay çelik bağlantı çubukları uçan hayvanlar konması için yer oluşturmaktadır. Bu gibi sebeplerden ötürü, yakın zamanda yapılan çoğu rüzgar kulesinde çelik boru tipindeki kuleler kullanılmaktadır. Boru tipindeki kuleler 10 ila 20 m arasındaki parçaların birleşmesiyle oluşur, sahada montajının yapılması 2-3 gün arası sürebilmektedir. Kuşların konması için daha elverişsiz bir yapısı bulunmasıyla beraber, estetik bir görünüm de sağlamaktadırlar. Gergili içi boş

tübüler kuleler ise sadece küçük kapasiteli rüzgar türbinlerinde kullanılır. Bu tip kuleler hidrolik bir mekanizma ile indirilir yükseltilebilir [15].

2.3.2 Rotor

Rotor rüzgar türbininin en önemli parçasıdır. Rotor rüzgarın kinetik enerjisini alarak, mekanik mil gücüne dönüşmesini sağlar. Kanatlar, merkez, dişliler, yataklar ve diğer iç bileşenler rotorun parçalarıdır. Tek kanatlı bir rotor tasarımı mümkün gözükse de, rotorun dengelenmesi ciddi problemlere sebep olabilir. Tek kanatlı rotor hızlı olmasına rağmen vibrasyon ve gürültüsü fazladır. Görüntü olarak uygun değildirler. Bu yüzden hemen hemen tüm ticari tasarımlar üç bıçaklı rotolara sahiptirler. Batarya şarj etmekte kullanılan bazı rüzgar türbinleri daha fazla kanat sayısına sahip olabilirler [12].

2.3.3 Dişli kutusu

Dişli kutusu, rüzgar türbinin güç çevrimi için önemli bir parçayı oluşturmaktadır. Optimum generatör hızı dakikada 1000 ila 1500 devir arasındadır. Dişliler ise generatörün gereken hızlara ulaşmasını sağlarlar. İdeal dişli sistemi, motor ömrü boyunca olumsuz hava koşulları ve yüklerde bile, düzgün ve sessizce çalışmak üzere dizayn edilmelidir. Motor yerinin getirebileceği kısıtlamalara karşı, dişli kutusunun büyüklüğü de bir başka kritik faktördür. İleri sayısal benzetim yöntemleri kullanılarak, rüzgar türbininin dişlilerinin ve diğer güç düzenleyicilerinin dinamik karakteristik özellikleri belirlenir [16].

2.3.4 Fren mekanizması

Aşırı rüzgar hızlarında, rüzgar türbini güvenlik açısından tamamıyla durur. İletim hattında veya generatörde oluşabilecek bağlantı problemleri yada arıza durumlarında ise, rüzgar türbini hızla ivmelenebilir. Bu durum türbinin kontrolden çıkma durumuna gelmesini sağlayabilir. Rotorun hızla ivmelendiği durumlarda, kontrolden çıkmasını önlemek amacıyla, emniyet frenleri devreye girer. Rüzgar türbinlerinde genel olarak kullanılan iki tip emniyet freni vardır: aerodinamik ve mekanik frenler. Güvenliği sağlamak için türbinde iki adet fren bulunur. İlki öncelikli fren olup, diğeri, ilk frende bir arıza olması durumunda yedek fren olarak devreye girer. Daha yüksek hızlı rüzgar türbinleri için elektrodinamik frenlerin uygulanma konusu da ihtimal dâhilindedir, bu frenler döner asenkron makinelerin terminallerine kapasite

ve direnç bağlanarak oluşturulur ve kendi kendine uyarım prensibiyle çalışırlar. Gerekli olan fren torku, asenkron motorunun sarımlarında indüklenen akım ve gerilimden elde edilir. Fren torku döner hızın bir fonksiyonu olarak ifade edilir ve türbinin kontrolden çıkma durumuna karşın efektif bir koruma sağlar [17].

2.3.5 Ana mil (Düşük hız mili)

Ana mil rotor gövdesini dişli kutusuna bağlar. Ortalama bir rüzgar türbininde dakikadaki devir hızı 12 ila 24 (rpm) arasındadır. Düşük hız mili ayrıca aerodinamik frenlerin etkinleşmesini sağlayan hidrolik sistemler için gerekli boruları da içerir [18].

2.3.6 Yüksek hız mili

Yüksek hız şaftı generatöre bağlıdır ve yaklaşık olarak 1500 rpm hızında döner. Yapısında mekanik disk frenlerini de bulundurur. Mekanik frenler aerodinamik frenlerde hata olması durumunda ya da türbinlere bakım yapılması durumunda kullanılır.

2.3.7 Generatör

Rüzgar enerjisi çevrim sisteminin en önemli bileşeni generatördür. Konvansiyonel sistemlerde kullanılan generatörlerin aksine, rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörler değişken rüzgar hızlarıyla uyum içinde değişken güç seviyeleri aralığında çalışmalıdır. Değişik tipte generatörler rüzgar sistemlerinde kullanılmaktadır. Bir rüzgar türbinine genel olarak asenkron, senkron ve doğru akım generatörlerinden herhangi biri bağlanabilir [19].

2.3.7.1 Asenkron generatör

Rüzgar Türbin sistemlerinde en çok kullanılan generatörler asenkron generatörlerdir. Düşük maliyetlerde üretilebilirler, istenilen ebatlarda üretilebilirler, sağlamdırlar ve basit bir yapıları vardır. Şebekeye bağlandıklarında salınım oluşturmazlar ve kolayca bağlanabilirler. Ancak en büyük dezavantajı, stator sargılarında elektrik üretimi için gerekli manyetik alanı oluşturması için, mıknatıslanma ihtiyacı bulunmasıdır. Bu yüzden asenkron generatörler şebekeden reaktif güç çekerler, bu ihtiyacı karşılamak amacıyla, kompanzasyon sistemi kurulma ihtiyacı doğabilir. Asenkron generatörler

tıpkı motorlar gibi rotoru sincap kafesli asenkron generatör ve rotoru sargılı asenkron generatör olmak üzere ikiye ayrılırlar [20].

Sincap kafesli asenkron generatör (SKAG)

SKAG mekanik basitliği, yüksek verim oranı ve bakım ihtiyacının azlığı nedeniyle rüzgar türbinlerinde en çok kullanılan generatör tiplerindendir. SKAG direk olarak şebekeye bağlanır. Rüzgar türbininin rotoru ve generatör dişli kutusuyla birbirine bağlıdır, bu yüzden rotor ve generatör hızları aynı değildir. Moment-hız karakteristikleri doğrusaldır, rüzgar gücündeki dalgalanmalar doğrudan şebekeye aktarılır. Bu geçişler özellikle şebeke bağlantısı sırasında oldukça kritiktir, başlangıç akımı anma akımının 7-8 katına kadar çıkabilir, zayıf güçlü şebekelerde bu durum ciddi gerilim bozulmalarına sebep olur. Ayrıca bu tip generatörlerde aktif güç, reaktif güç, terminal gerilimi ve rotor hızı arasında doğrusal bir ilişki vardır. Yüksek rüzgar hızlarında daha fazla aktif güç üretmek için şebekeden daha fazla reaktif güç çekilmelidir, ayrıca çekilecek reaktif güç rüzgar hızı sürekli değiştiği için kontrol edilemez. SKAG sabit hızlı ve değişken hızlardaki rüzgar türbinlerine bağlanılabilir.

Rotoru sargılı asenkron generatör (RSAG)

Rotoru sargılı asenkron generatörlerin elektriksel karakteristiği dışarıdan kontrol edilebilir, böylece rotor gerilimi etkilenebilir. Rotorun sargıları, rotorla hareket eden bileziklere bağlıdır, Bilezikler ve fırçalar yardımıyla, rotor sargıları yol verici bir dirence bağlanabilir yada güç elektroniği elemanlarıyla, rotor yada stator devresi manyetize edilerek güç ayarlanabilir. En önemli dezavantajları maliyetlerinin yüksek olması ve SKAG kadar sağlam olmamalarıdır. Uygulamada en çok kullanılan tipleri OptiSlip Asenkron Generatör ve Çift Beslemeli Asenkron Generatör tipleridir.

Çift Beslemeli Asenkron Generatörlerde stator sargıları şebekeye direk olarak bağlanmıştır, Rotor sargıları iki adet iki yönlü back-to-back IGBT gerilim kaynağı konverteri ile sabit frekanslı olarak şebekeye bağlanmıştır. Konverterlerden biri elektromanyetik torku düzenleyip, generatörün ihtiyacı olan reaktif gücü sağlarken, diğeri DA bağlantısını düzenler. ÇBAG dekaple aktif ve reaktif güçler rotor uyarım akımı ile kontrol edilebilir, şebeke tarafından manyetize edilme ihtiyacı yoktur, rotor devresi tarafından manyetize edilebilir, ancak bakım maliyetleri diğer tiplerden daha fazladır.

OptiSlip Asenkron Generatör Danimarkalı bir türbin üreticisi olan VESTAS tarafından ani rüzgar akımlarına karşı türbini korumak amacıyla geliştirilmiştir. Bu

çeşit durumlarda rüzgar türbini üzerindeki yük güç elektroniği elemanları ile hızla azaltılır. Bilezik kullanılmamıştır, generatörün kayması rotor şaftına bağlanan bir konvertör yardımıyla, rotor direncinin ayarlanmasıyla düzenlenir. Dezavantajları, hız limitlerinin türbin büyüklüğüne ve yüke göre %0 ila %10 arasında değişebilmesi, zayıf aktif ve reaktif güç kontrolüdür.

2.3.7.2 Senkron generatör

Senkron generatörler, asenkron generatörlere göre daha pahalı ve karmaşık yapıdadırlar, ancak reaktif manyetizma akımına ihtiyaç duymadıklarından tercih edilebilirler. Rotorun oluşturduğu manyetik alan, sabit mıknatıslardan ya da rotor sargılarından akan doğru akımdan üretilir. Senkron generatörler sabit hızlı sistemlerde kullanılmaya daha elverişlidirler. Genel itibariyle rotoru sargılı ve sürekli mıknatıslı olarak ikiye ayrılırlar [13].

Rotoru sargılı senkron generatör (RSSG)

Stator sargıları doğrudan şebekeye bağlıdır, bu yüzden döner hız şebeke frekansı ile sıkı sıkıya bağlıdır. Genliği sabit manyetik alan kutup sargılarının bulunduğu rotorda üretilir. Asenkron generatörlerden farklı olarak reaktif güç kompanzasyonuna ihtiyaç yoktur. Bu manyetik alan rotorun dönmesiyle beraber stator sargıları üzerinden değişik açılarda geçer ve gerilimi indükler. Stator sargılarındaki gerilim alternatif gerilim oluşur, zamana bağlı olarak değişir [12]. Elektromanyetik tork oluşmasında, stator akımının tamamı kullanıldığı için, RSSG verimi yüksektir, ayrıca makinanın güç faktörüne müdahale edilebilir. Rotorda sargı devresi bulunması ile sürekli mıknatıslı senkron generatör ile kıyaslandığında dezavantajdır [20].

Sürekli mıknatıslı senkron generatör (SMSG)

Kendi kendine uyarımlı olması sebebiyle, yüksek güç faktörü ve yüksek verimle çalışırlar. Ama sürekli mıknatısın maliyetinin yüksek olması ve üretildiği malzemenin hassas olması dezavantajdır. Ayrıca sürekli mıknatısla uyarımla üretilen gerilim ve frekansın iletilen gerilim ve frekansa göre ayarlanması için tam ölçekli güç çeviricileri gerekmektedir. Buna rağmen herhangi bir rüzgar hızında çalışmaları SMSG leri cazip kılmaktadır [12]. Generatör hızı dişli kutusuna gerek kalmadan kontrol edilebilir, statoru sargılıdır ve rotoruna sürekli mıknatıslar yerleştirilmiştir. Dezavantajlarından biri sürekli mıknatısların yüksek sıcaklıklarda manyetik özelliklerini kaybedilmesidir, bu yüzden soğutucu sistemlerle beraber kullanılması gerekir.

2.3.7.3 Doğru akım generatörü

Doğru akım generatörleri düşük güvenilirlik ve bakım ihtiyaçları olmasına rağmen hız kontrollerinin diğer generatörlere kıyasla daha kolay olması sebebiyle rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadır. Daha küçük kapasitede üretim yapılan yerlerde ve şebekeden bağımsız çalışan yerlerde kullanılırlar. Üretilen alternatif akım yarı iletken doğrultucular vasıtasıyla doğru akıma dönüştürülür [21].

2.3.8 Dümen sistemi ve sensörler

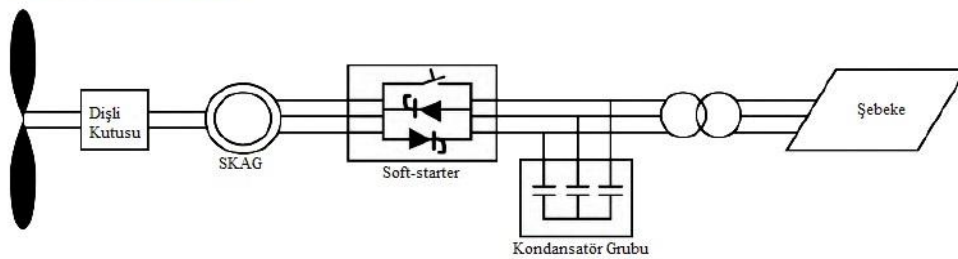
Dümen sistemi elektrik motorları kullanarak, rüzgar türbini muhafazasını rüzgara karşı döndürmeye yarar. Dümen mekanizması, rüzgar gülünden rüzgarın yön bilgisini alan elektronik kontrol sensörleri ile çalışır.

2.4 Türbin Tasarımları

Şebeke bağlantılı rüzgar türbinleri yaklaşık 40 yıllık bir süre içerisinde sabit hızlı türbinlerden, aktif güç kontrolü sağlayan tam değişken hızdaki türbinlere kadar evrilmiştir. Eski sistemlerde rotor hızı, şebeke frekansına eşit olarak çalışmak zorunda kalmakta bu da verimlilikte ciddi bir düşüşe sebep olmaktaydı. Ancak gelişen güç elektroniği teknolojisiyle, kısmi ve tam ölçekteki frekans çeviricileri ile bu sorun ortadan kaldırılmış oldu. A tipi, B tipi, C tipi ve D tipi olmak üzere dört çeşit türbin tasarımından bahsedilebilir.

2.4.1 A tipi türbin

A Tipi Sabit Hızlı Rüzgar Türbinleri

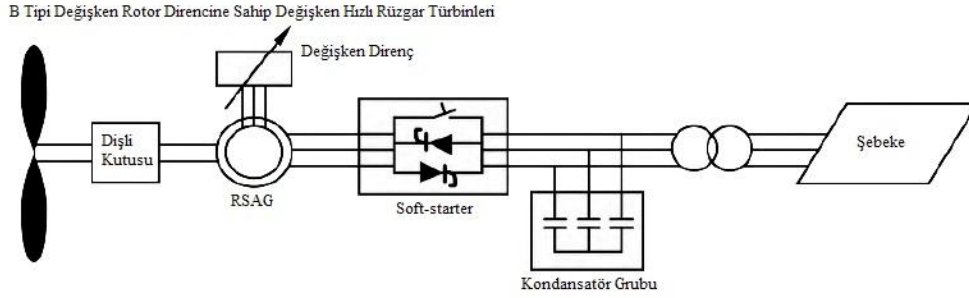


Şekil 2.2: A tipi sabit hızlı rüzgar türbinleri.

Daha çok 1980'li yıllarda kullanılmaya başlandı, sincap kafesli asenkron generatörün rotorunun türbine, statorun doğrudan şebekeye bağlanmasından oluşur. Dönüş hızı %1 ila %2 arası değişiklik gösterebilir. Bu tip türbinde tek sabit hızlı ya da iki sabit

hızlı varyasyonlar kullanılabilir. SKAG çalışması için şebekeden çekeceği reaktif gücü sınırlamak için kapasitor grubu kullanılmaktadır, ayrıca soft-starter sayesinde oluşabilecek ani akımlar sınırlandırılmaktadır. Bir hız kontrolörünün olmaması başlıca dezavantajıdır. Piyasada kullanılma payı %15 civarındadır [22].

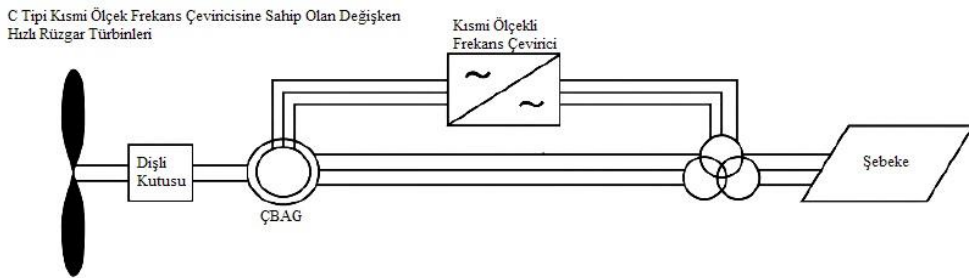
2.4.2 B tipi türbin



Şekil 2.3: B tipi değişken rotor direncine sahip değişken hızlı rüzgar türbinleri.

B tipi türbinler 1980 ve 1990'lı yıllarda kullanıldılar, türbin rotoru sargılı asenkron generatöre bağlıdır. Rotorun elektriksel direncini kontrol etmek amacıyla güç elektroniği elemanları kullanılır, böylece generatör aşağı ve yukarı yönde %10 oranında rüzgar hızındaki değişimlerden etkilenmeden çalışabilir. A tipi türbinlerde olduğu gibi kondansatör grubu ve soft-starter ile beraber çalıştırılır, güç kalitesine olumsuz etkisi A tipinden daha azdır. Avrupa piyasasında kullanılma oranı %5 civarındadır.

2.4.3 C tipi türbin



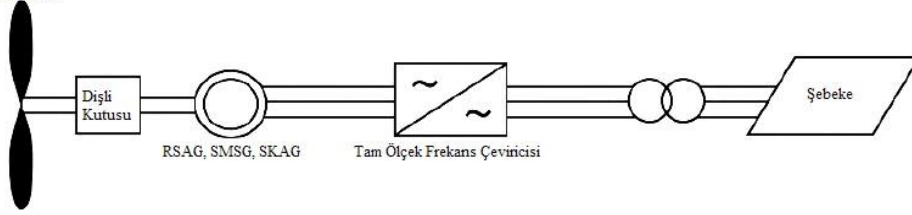
Şekil 2.4: C tipi kısmi ölçek frekans çeviricilik değişken hızlı rüzgar türbinleri.

C tipi türbinler önceki tipteki türbinlerin güç elektroniği elemanlarını ve daha ileri tipteki kontrolleri içermektedir. Çift beslemeli asenkron generatör içeren sistem olarak ta bilinir. Generatörün rotor devresi kısmi ölçekteki frekans çevirici üzerinden

şebekeye bağlıdır, ancak stator devresi doğrudan şebekeye bağlanır. Frekans çeviricinin güç değeri senkron hızdan $\pm 40\%$ civarındadır. Küçük güçlü bir frekans çeviricisi kullanıldığından B tipi türbinlerin değişken rotor direncinde harcanılan enerji kaybedilmez, rotor hızının kontrol aralığı daha geniştir. Frekans çeviricisi sayesinde generatörün reaktif güç ihtiyacı karşılanır ve ani akımlar sınırlandırılarak, güç kalitesi açısından olumsuzluklar minimize edilir.

2.4.4 D tipi türbin

D Tipi Tam Ölçek Frekans Çeviricisine Sahip Olan Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri



Şekil 2.5: D tipi tam ölçek frekans çeviricilik değişken hızlı rüzgar türbinleri.

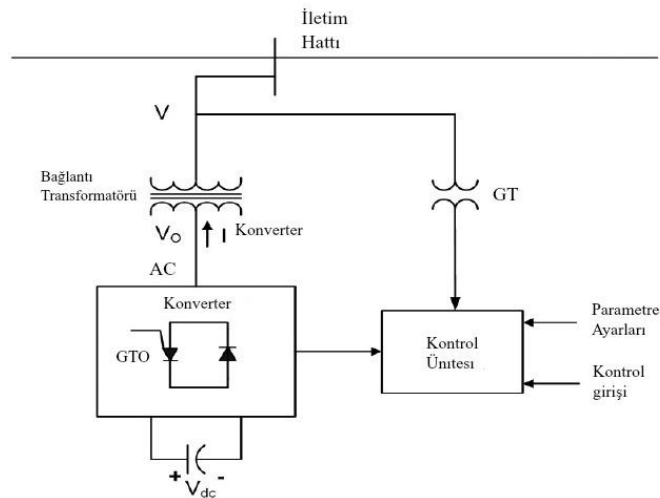
D tipi türbinler tam ölçekli bir frekans çeviriciyle şebekeye bağlanan generatöre sahiptirler ve generatör hızı geniş bir aralıkta kontrol edilebilir. Rotoru sargılı senkron generatör, sürekli mıknatıslı senkron generatör veya sincap kafesli asenkron generatör gibi çeşitli tiplerde generatörler kullanılabilir. Dişli kutulu veya dişli kutusuz tipleri olabilir, tam ölçekli frekans çeviricili reaktif güç kompanzasyonunu sağlar ve ani akımları minimize eder. Avrupa piyasasında kullanılma oranı $\%25$ civarındadır.

2.5 STATCOM

Gerilim kararlılığı bir sistemin gerilim bozucu etkilere maruz kalmasından sonra, sahip olduğu tüm baralarda sürekli ve stabil gerilimler sağlayabilmesi durumuna denir. İletim sisteminde reaktif güç kontrolü sağlanmasında kompanzasyonun önemi büyüktür. Kompanzasyon ile ileri ve geri yönde reaktif güç akışları hattın iletim kapasitesini harcamaz, daha çok aktif gücün hatlardan iletilmesine olanak sağlar. İletim sisteminin gerilimini kararlı seviyede tutabilmek için sağlanan reaktif güç statik ve dinamik VAR kaynaklarından sağlanır [23]. Hatlara bağlanan mekanik anahtarlamalı sabit reaktör ve kapasitor grupları sayesinde, hat gerilimi dengede tutulmaya çalışılır ancak mekanik anahtarlamalardaki yavaş cevap zamanlarından

dolayı, reaktör ve kapasiteler beklenen kompanzasyonu sağlayamaz ve dengesizlik durumunda gerilim kararsızlığı probleminin oluşmasına sebep olabilirler [24].

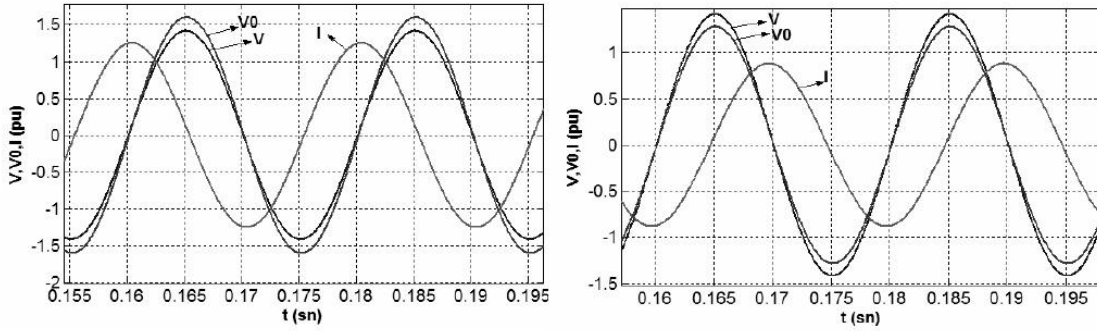
Bu yüzden reaktif güç kontrolü, sistem kararlılığını tehdit eden her duruma cevap verirken yeterli ve hızlı olmalıdır. Bu karakteristikler Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) denetleyicileri kullanılarak elde edilebilir. Bu grubun bir üyesi olarak ta Statik Senkron Kompanzatorler (STATCOM) gerilim kaynaklı konvertör olarak en çok kullanılan teknolojilerden birisidir. STATCOM sistemden reaktif güç çekerek veya sisteme reaktif güç vererek, hat geriliminin kararlılığının sağlanmasında önemli bir rol oynar. STATCOM gerilim kaynağını DC kapasitor ile sağladığından, aktif güç kapasitesi oldukça düşüktür, ancak DC kapasitore uygun bir enerji saklayıcısı bağlanırsa, aktif güç kapasitesi yükseltilebilir. STATCOM un sağlayabileceği reaktif güç miktarı, gerilim kaynağının genliğine bağlıdır. Örneğin gerilim kaynağı konverterinin terminal gerilimi, bağlantı noktasındaki alternatif gerilimden büyükse ($V_o > V$), STATCOM reaktif akım üretir, tam tersi şekilde terminal gerilimi bağlantı noktasındaki alternatif gerilimden küçükse ($V_o < V$), STATCOM sistemden reaktif güç çeker. Konverterin akımı iletim hattı gerilimine göre 90 derece geride olduğundan. STATCOM endüktif modda çalışır. Şekil 2 (b)'de bu durum gösterilmektedir. Eğer konvertör çıkış gerilimi ve iletim hattı gerilimlerinin genlikleri aynıysa ($V_o = V$) Alternatif akım sistemi ile STATCOM arasında herhangi bir reaktif güç alışverişi gerçekleşmez [25]. Şekilde STATCOM devre konfigürasyonu gösterilmektedir, basit olarak devre yapısı bağlantı transformatorü, konvertör ve bir DC kapasiteden oluşur.



Şekil 2.6: STATCOM Devre Konfigürasyonu [26].

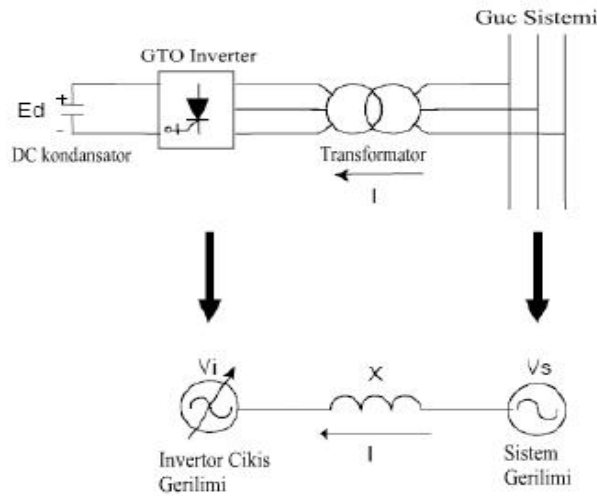
STATCOM çıkışında ise, sistem frekansına sahip, genliği ve faz acısı kontrol edilebilen, üç faz gerilimler elde edilir. Alternatif akım sistemi ile STATCOM arasında genellikle reaktif güç alışverişi bulunur. Gerçekleştirilen bu reaktif güç alışverişi, konvertör çıkışındaki gerilimin düzenlenmesiyle sağlanır.

STATCOM un iletim hattıyla reaktif güç alışverişi aşağıdaki gibidir:



Şekil 2.7: Reaktif güç üretimi ve tüketimi.

STATCOM iletim hattına şönt olarak bağlanır. Çoğu durumda gerilim kaynaklı konvertör için DC gerilim desteği, görece daha küçük enerji taşıma kapasiteli DC kapasitöründen sağlanır, bu yüzden steady-state durumunda, STATCOM un bağlı olduğu hatta aktif güç değişimi sıfır olmalıdır. Aktif güç sınırlaması uygulandığında, STATCOM'un kontrolü, hat ile değiş tokuş edilen reaktif güç miktarını kontrol etmek için kullanılan bir serbestlik derecesine düşürülür. Buna göre, bir STATCOM statik bir VAR kompensatörünün işlevsel eşdeğeri olarak işletilir; Bir SVC'den daha hızlı kontrol ve geliştirilmiş kontrol aralığı [27] sağlar.



Şekil 2.8: STATCOM eşdeğer devresi [28].

Şekil 2.8, STATCOM sisteminin eşdeğer devresini gösterir. Bir DC gerilim kaynağı ve güç sistemi ile GTO dönüştürücü bu şekilde değişken ac voltajları olarak gösterilmiştir. Bu iki voltaj, transformatör kaçak endüktansı temsil eden bir reaktans ile bağlıdır.

Bir hattaki aktif ve reaktif güç akışını V_i ve V_s , transformatör empedansı (ideal kabul edilebilir) ve her iki doğru arasındaki açı farkını tanımlayan klasik denklemleri kullanarak P ve Q tanımlayabiliriz.

Sistemdeki V_s ve V_i arasındaki açı d'dir. STATCOM $d = 0$ ile çalıştığında, reaktif güç esas olarak voltaj modülüne bağlı olacak iken, sistem cihazındaki aktif gücün nasıl sıfır olabileceğini görebiliriz. Bu çalışma koşulu, transformatörden geçen akımın V_s 'e göre $\pm 90^\circ$ bir faz farkına sahip olması gerektiği anlamına gelir.

Dolayısıyla, durağan bir durumda Q sadece V_s ve V_i voltajları arasındaki modül farkına bağlı olduğunu söyleyebiliriz. Reaktif güç miktarı, V_s ve V_i arasındaki voltaj farkına orantılıdır.

STATCOM ve EPS arasında biraz aktif bir güç değişimi olabilir. İnvertör ile AC sistemi arasındaki değişim, inverterin çıkış voltaj açısını AC sisteminin voltaj açısına göre ayarlanarak kontrol edilebilir. Bu, inverterin çıkış gerilimi AC sisteminin geriliminden önce giderse, inverterin DC birikmiş enerjisinden AC sistemine aktif güç sağlayamadığı anlamına gelir. Öte yandan, inverter AC sistem gerilimine göre gerilimi geciktirilirse AC sistemi aktif gücünü emebilir.

STATCOM modeli:

Şönt reaktif akım sayesinde iletim hattına reaktif güç sağlayarak hat geriliminin kontrolünü sağlayabilir. STATCOM ise gerilimin kontrolü için şönt akımını reaktif ve aktif akım bileşenlerine ayırır. Aktif akım bileşeni STATCOM bara 1 gerilimi (V_1) ile aynı fazda, reaktif akım ise dik fazdadır [29].

Böylece üç faz bileşenleri aşağıdaki T_1 dönüşüm matrisi ile ds-qs koordinatlarına çevrilir.

$$T_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{pmatrix} 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_0 \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_0 \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Ds-qs nicelikleri ise T_2 dönüşüm matrisi ile d-q koordinatlarına dönüştürülür.

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = T_2 \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = T_2 \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Böylece STATCOM konvertör akımı d-q koordinatlarında aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\frac{di_{dsh}}{dt} = -\frac{R_{sh}\omega_b i_{dsh}}{X_{sh}} + \omega i_{qsh} + \frac{\omega_b}{X_{sh}}(V_{dsh} - V_{1d}) \quad (2.5)$$

$$\frac{di_{qsh}}{dt} = -\frac{R_{sh}\omega_b i_{qsh}}{X_{sh}} - \omega i_{dsh} + \frac{\omega_b}{X_{sh}}(V_{qsh} - V_{1q}) \quad (2.6)$$

STATCOM akımı d-q bileşenleri aşağıdaki gibi aktif ve reaktif bileşenlerine dönüştürülebilir.

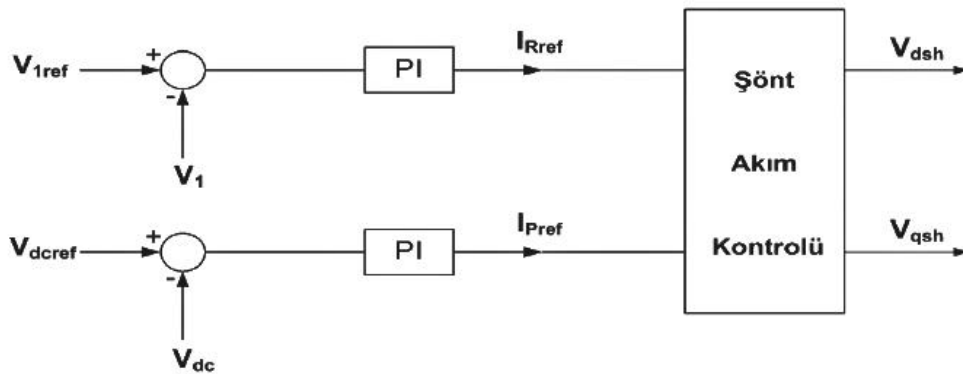
$$i_{rsh} = i_{dsh} \cos \theta - i_{qsh} \sin \theta \quad (2.7)$$

$$i_{psh} = i_{dsh} \sin \theta - i_{qsh} \cos \theta \quad (2.8)$$

Burada θ açısı; $\theta = \tan^{-1} \frac{V_{1d}}{V_{1q}}$ şeklinde ifade edilir. Hat gerilimi değeri V_1 rms değeri

olup aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$V_1 = \sqrt{V_{1d}^2 + V_{1q}^2} \quad (2.9)$$



Şekil 2.9 : STATCOM kontrol şeması.

Yukarıdaki semada aktif ve reaktif akım bileşenleri, aşağıda gösterildiği gibi d-q bileşenlerine çevrilebilir.

$$i_{dsh} = i_{rsh} \cos \theta - i_{psh} \sin \theta \quad (2.10)$$

$$i_{qsh} = -i_{rsh} \sin \theta + i_{psh} \cos \theta \quad (2.11)$$

STATCOM un kontrol şemasında görüleceği gibi, bara gerilimi ile STATCOM DC kapasitor gerilimini kontrol etmede kullanılan bir şemadır. Kullanılan PI kontrolcüler STATCOM aktif ve reaktif akım bileşenlerini ayarlamaktadır. Bu akım bileşenleri d-q bileşenlerine dönüştürülerek şönt akım kontrol bloğunda yukarıdaki denklemlerden hesaplanabilmektedirler [26].



3. ŞEBEKEYE BAĞLI RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE GÖRÜLEN GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİ

Günümüzde çoğu uluslararası şebeke yönetmeliği için güç kalitesi gereksinimleri zorunludur. Belli tipteki bir rüzgâr türbini için belirlenen bağlantı noktasındaki rüzgar çiftlik kapasitesinin sınırlandırılmasına neden olabilir Bunun yanında daha iyi güç kalitesi özelliklerine sahip dönüştürücüler ile daha yüksek kapasiteye sahip hatların kurulmasına izin verilebilir. Örneğin yüklerin iyi olarak eşleştirildiği, güç rezervi yüksek olan ve güçlü bir enterkonnekte bağlantıya sahip olan sistemlerde rüzgâr gücünden elde edilebilecek enerji miktarı, sistemin kurulu gücünün %30 ila %40 i arasında olabilir. Ancak bu durumlar sağlanmazsa, zayıf şebekelerde rüzgâr gücünün payının artması, beraberinde güç kalitesine olumsuz etkilerde getirir. Rüzgar türbinlerinin elektriksel karakteristikleri, sistem üzerinde türbin etkilerini görmek için yeterlidir. Güç kalitesi gereksinimlerini sağlamak için ilk tutarlı dokümantasyon talebi IEC-standardı 61400-21 ile 2001 yılında ilk kez sağlanmıştır. Bu standart, güç karakterizasyonu için nicelikleri belirtir Şebekeye bağlı rüzgâr enerjisi çeviricilerinin güç kalitesi ve ölçümlerin değerlendirilmesi durumlarını tanımlar. Sonraki yıllarda IEC'nin ikinci baskısı 61400-21 ayrıntılı olarak hazırlanmış ve 2008 yılında yayımlanmıştır. Buna göre IEC 61400-21 standardı aşağıdaki parametreleri tanımlar [30]:

Standartta göre bir rüzgar elektrik konverterinde aşağıdaki parametreler ölçülmeli ve bildirilmelidir:

- Aktif ve reaktif güç karakteristikleri
- Sürekli çalışmada ve anahtarlama nedeniyle oluşan fliker
- Akım harmonikleri, akım ara harmonikleri ve yüksek frekans akım bileşenleri
- Aktif güç denetimleri
- Reaktif güç kontrolleri
- Gerilim düşüşüne tepki
- Şebeke koruma ve tekrar bağlantı süresi

Ölçümlerin sınıflandırılması için IEC 61400-21, diğer IEC standartlara da atıfta bulunur örneğin fliker ölçümleri için IEC 61000-4-15, harmonik ölçümler ise IEC 61000-4-7'ye dayanmaktadır [31].

3.1 Rüzgar Çiftliklerinin Güç Kalitesine Etkilerini Gösteren Faktörler:

3.1.1 Rüzgar türbini teknolojisi

Rüzgar türbinlerinin tipik davranışı sincap kafesli asenkron generatörlerine dayanır ancak günümüzde çoğunlukla çift beslemeli asenkron generatör kullanılmaktadır. Şebekeye değişken bir güç sağlarlar. Bu güç akışı (reaktif güç akışı ile birlikte ulusal / bölgesel mevzuata ve yönetmeliklere bağlı olarak) rüzgar enerjisi santrallerinin fliker emisyonuna katkıda bulunarak ortalama gerilim profilini etkilemesi söz konusu olabilir. Tabi ki bu durumun önüne rüzgâr çiftliğinin merkezine kompanzasyon sistemi kurulmasıyla geçilebilir. Çift beslemeli indüksiyon jeneratörlerinin veya tam ölçekli nominal frekans dönüştürücüleri olan jeneratörlerin çıkışında genellikle daha küçük aktif güç dalgalanmaları ve dahili reaktif kompanzasyon kabiliyeti sunar. Güç elektroniği çeviricileri kullanımı ile ilgili bir dezavantaj, daha yüksek bir harmonik bozulma olabilir [32].

3.1.2 Şebeke koşulları

Rüzgar generatörleri bağlantısı nedeniyle şebekede gerilim kalitesinin düşürülmesi elektrik şebekesinin belli bir bölümünde büyük rüzgar santrallerinin bağlantısına sınırlar getirebilir Bu tür bağlantıların fizibilitesini değerlendirmek için kullanılan yaklaşım IEC Elektromanyetik Uyumluluk standartları, IEC 61000-3-6 ve 3-7'na göre üç adımdan oluşur

1. Güç kalitesi için gerilim anlamında tolere edilebilir planlanlama düzeylerinin tanımlanması (Harmonikler ve Fliker);
2. Yakın şebekelerin etkisinin göz önüne alınması bozulma sınırlarının üretim tesislerine tahsisi;
3. Her rüzgâr tesisi için harmonik akım ve fliker için kabul edilebilir sınırların değerlendirilmesi

Ortaya çıkabilecek sınırlamalar şebekeden alınacak destek yada aktif filtre kullanımı gibi yerel düzeltici prosedürler kullanılması yoluyla çözülebilir. Şebeke özelliklerinin gerilim kalitesine etkisiyle en ilgili faktör, eşdeğer hat empedansı dolayısıyla

şebekede kısa devre gücü ve faz açısı vasıtasıyla ara bağlantı transformatörü veya trafonun (S_k ve ϕ_k), ayrıca IEC standartlarında ortak kuplaj noktası olarak bahsedilen (PCC) nin şebeke entegrasyonudur.

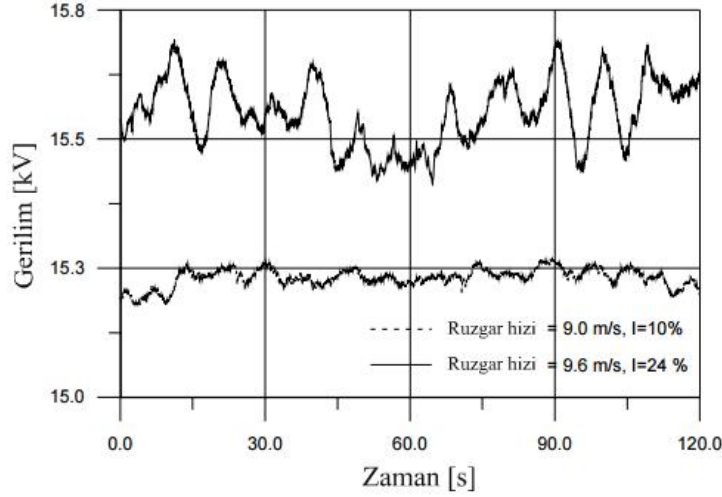
Daha fazla rüzgâr sisteminin şebekeye bağlanmasını sağlamak amacıyla PCC noktasında kısa devre gücünü arttırmak için şebeke takviyesi kullanılabilir, ancak bu her zaman ekonomik bir çözüm olmayabilir, gerilim kalitesi problemleri, rüzgâr sistemlerinin şebekeye bağlanmasında gerçek kısıtlama problemleri getirebilir ancak bunlar rüzgâr türbin teknolojilerine bağlıdır.

3.1.3 RES tasarımı ve kontrolü

Rüzgar sistemlerinin yerleştiği alanlarında güç kalitesiyle ilişkileri vardır. Şebeke bağlantılı rüzgâr türbinlerinin sayısı artarsa, güç kalitesi bundan kötü yönde etkilenir. RES topolojisi ağırlıklı olarak rüzgar türbinlerinin birbirlerinin rüzgâr akışının altında çalışmasından sakınmak için farklı gruplar halinde koşullandırılır. RES topolojisi herhangi bir standartla ele alınmıyor olsa da, rüzgar çiftliği dinamik davranışını etkilemektedir. Bu yüzden rüzgâr enerji santrallerinin yeri önemsiz değildir ve dikkate alınmalıdır.

3.1.4 Rüzgar akışının yerel özellikleri

Rüzgar türbinlerinin çalışmasını sağlayan birincil enerji kaynağı karakteristiği rüzgâr akış karakterleridir ve çoğunlukla sabit ve stokastik değildirler. Türbülans olarak adlandırılan rüzgâr akışı çoğunlukla büyük rüzgâr türbinlerinin güç kalitesi parametreleri içinde sayılmaz. Rüzgar akış hızının standart sapmasının ortalama rüzgârın akis hızına oranı türbülans yoğunluğunu vermektedir. Şekil 3.1’de farklı türbülans yoğunluğuna sahip, iki farklı gerilim serisinde, türbülansın gerilim kararlılığına etkisini açık bir şekilde görebiliriz [33].



Şekil 3.1: Türbülans gerilim kararlılığı ilişkisi.

Dengesiz iklim koşullarının yer aldığı şekildeki gerilim-zaman serisindeki durumun pek çok yerde görülme ihtimali zayıftır. Her ne kadar çok yararlı olsalar da, rüzgâr akışının fiziksel karakteristiklerinin gösterilmesinde, rüzgâr santralinin gerilim ve güç kalitesinin etkileyebilirler. Elbette bu durum rüzgâr türbini teknolojisini de sıkı sıkıya bağlıdır, uygun reaktif kontrol ünitelerine sahip türbinler, çok şiddetli iklim koşulları altında dahi, gerilimi efektif bir biçimde sabit tutabilmektedirler.

3.2 Rüzgar Enerjisi Santrallerinde Karşılaşılan Güç Kalitesi Problemleri

3.2.1 Gerilim düşümü

Gerilim düşümü yada gerilim çökmesi, kısa süreli, gerilimin efektif değerinde yaşanan azalma (%10 ila %90 arasında) olarak tanımlanabilir. Çoğunlukla kısa devre arızası, aşırı yüklenme, elektrik motorlarının çalışmaya başlaması esnasında çektikleri yüksek akımdan kaynaklanabilir. Bilgi teknoloji cihazlarının çalışmasında düzensizlik, mikroişlemci tabanlı kontrol sistemlerinin çalışmalarına olumsuz etkileri olur, ayrıca elektromanyetik rölelerinin atmasına ve döner elektrik makinelerinin verimlerinin azalmasına neden olur. Elektriksel sistemlerde hattın başladığı ve bittiği noktalar arasındaki faz farkı aktif güç ile belirlenirken, gerilimin büyüklüğü ise reaktif güç sayesinde kontrol edilir. Bir arıza meydana geldiğinde trafo merkezine mesafe ile akımla doğru orantılı olarak hatta bir gerilim düşümü oluşur. Rüzgar türbinlerinin dezavantajı ise genel itibarıyla trafo merkezine mesafelerinin uzun olması, bu yüzden empedansın yüksek olması ve gerilim düşümünün de buna bağlı

yükselmesidir. RES ler gerilim kontrolüne özelliğine de sahip olmalıdır, çünkü trafo merkezinde yer alan regülatörler her zaman kendi gerilim limitine ulaşmadan, şebeke bağlantı noktasındaki gerilimi yükseltmeyebilir [33].

Gerilim düşümü, rüzgar türbinlerinin şebekeye bağlanmasında karşılaşılan en büyük sorunlardan biridir. Karşılaşılan geçici arızaların etkisi, büyük alanlara yayılabilir bu şartlar altında RES'lerin şebeke ile irtibatının kesilmesi durumunda şebeke ve kaynakların güvenliği açısından büyük tehlike oluşabilir. Gerilim çökmesinden sakınmanın bir yolu olarak ta genellikle, reaktif akımı gerilim düşümü büyüklüğünün bir fonksiyonu olarak ele alınması gösterilir. ÇBAG generatörlerin yapısına eklenen SCR yada 3 fazlı doğrultucu ve ayarlanabilir yük direnci ile de gerilim çökmesinden, nominal gerilimin %15'ine kadar sakınılabılır [34].

Günümüzde şebeke yönetmeliklerinin birçoğunda rüzgâr elektrik santrallerinin arıza üstü durumlarda da çalışabilme kabiliyetine ulaşması zorunlu kılınmıştır. Bunun yanında sisteme bağlı rüzgâr enerjisinin çoğu küçük güçlü asenkron generatörlerden üretiliyorsa, bu generatörleri şebekeden ayırmak daha uygun olabilir, asenkron generatörlerin şebekeden çektiği reaktif güç azalınca, şebeke gerilimi buna bağlı olarak yükselebilir [35].

3.2.2 Kısa süreli kesintiler

Elektrik akımının birkaç milisaniye ile bir veya iki saniye arasında sürekli olarak kesilmesidir. Nedeni temel olarak hatalı bir bölümün devre dışı bırakılması için koruma cihazlarının açılması ve otomatik olarak tekrar kapanması nedeniyle yalıtım hatası, yıldırım ve atlamadır. Koruma cihazlarının devreye girmesi, bilgi kaybı ve veri işleme ekipmanının arızalanması neden olabileceği problemlerdir [36].

3.2.3 Uzun süreli kesintiler

Elektrik akımının bir veya iki saniyeden fazla süreli olarak kesilmesidir. Güç sistemi şebekesinde yaşanan arızalar esnasında, fırtınalarda ekipman hatası, yangın, insan hatası, kötü koordinasyon veya koruma cihazlarının arızalanması sırasında yaşanabilir.

3.2.4 Ani gerilim artışı

Gerilimin kısa süreli olarak aniden artmasıdır, oluşmasında ağır yüklerin sistemden çıkması yıldırım gibi birçok faktör neden olabilir. Bileşenlerin (özellikle elektronik

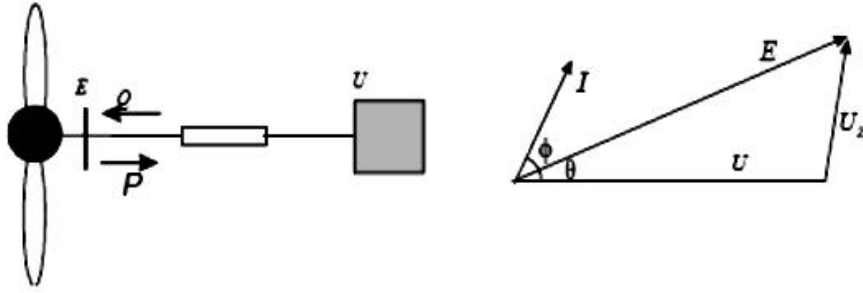
bileşenler) ve yalıtım malzemelerinin tahrip edilmesi, veri işleme hataları veya veri kaybı, elektromanyetik girişim gibi sonuçları olur. Elektrik şebeke yönetmeliğine göre anahtarlama işleminden ötürü sistemde oluşan ani gerilim değişimleri, nominal sistem geriliminin $\pm\%3$ ünü geçemez.

3.2.5 Gerilim yükselmesi

Gerilim çökmesi veya düşümünün tersi olarak bilinir, gerilimin efektif değerindeki %110 ila %180 arasında gerçekleşen 1 dakikaya kadar süren olaydır. Ağır yüklerin devreye girmesi veya devreden çıkması, transformatör kaynaklı arızalar nedeniyle oluşabilir. Eğer gerilim seviyesi çok yükselirse, hassas elektronik cihazlara zarar verilebilir.

3.2.6 Gerilim dalgalanmaları (Fliker)

Rüzgar türbini generatörleri, rüzgâr gücünün değişken karakteristiği sebebiyle, rüzgâr ile benzer özelliklere sahiptirler. Ayrıca rüzgâr türbinlerinin genellikle şebekenin uzak terminallerine bağlandıklarından, merkezi yük ve konvansiyonel elektrik üretim tesislerine uzak olduklarından ürettikleri gerilimler kararsız olarak sisteme verildiğinden beraberinde birçok elektrik kalitesi problemini de yanında getirmektedir. Rüzgar türbini generatörün ürettiği aktif güç miktarına bağlı olarak, tükettiği reaktif güç miktarı da değişir. Elektrik şebekesindeki gerilim dalgalanması yaratan yükler kaynak makinaları, ark fırınları ve elektrikli kazanlar gibi yüksek güç kullanan yüklerdir. Aynı zamanda elektrik enerjisi üretimi açısından bakılacak olunursa, rüzgâr türbinleri şebeke gerilim sinyalinin ideal formunu etkileyebilir. Rüzgar türbinlerinin şebeke gerilimi üzerindeki bozucu etkilerine bakıldığında, gerilim dalgalanmaları en çok dikkat çekendir. Rüzgar hızındaki hızlı değişimler, üretilen güçte dalgalanmalara neden olur, bu da ortak bağlantı noktası (PCC) de gerilim dalgalanmaları üretilmesine neden olmaktadır. Hayali ve zayıf bir şebekeye bağlanan rüzgâr türbininin şekilde gösterilen basitleştirilmiş modelinde güç kaynağı ve şebeke empedansı paylaşılmıştır [37]. Fazör diyagramından generatör terminalindeki gerilimi, üretilen güç ve şebeke empedansı fonksiyonu olarak ifade etmektir.



Şekil 3.2: Şebekeye entegre edilmiş rüzgâr türbini şematik diyagramı [37].

Fazör diyagramından

$$U_z^2 = U^2 + E^2 - 2EU \cos \theta = I^2(R^2 + X^2) \quad (3.1)$$

$I^2 E^2 = P^2 + Q^2$ olduğundan;

$$\frac{P^2 + Q^2}{E^2} (R^2 + X^2) = U^2 + E^2 - 2EU \cos \theta \quad (3.2)$$

Fazör diyagramından

$$E = U \cos \theta + RI \cos \phi - XI \sin \phi \quad (3.3)$$

Denklemlerden çıkarımda bulunursak;

$$E^4 - [2(PR - QX) + U^2]E^2 + (P^2 + Q^2)(R^2 + X^2) = 0 \quad (3.4)$$

Yukarıdaki denklemin çözümünden E gerilimi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$E = \sqrt{c_1 + \sqrt{c_1^2 - c_2}} \quad (3.5)$$

Burada, c_1 ve c_2 aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$c_1 = \frac{U^2}{2} + (PR - QX) \quad (3.6)$$

$$c_2 = (P^2 + Q^2)(R^2 + X^2)$$

Günümüzde şebeke yönetmeliklerinin birçoğunda rüzgâr elektrik santrallerinin arıza üstü durumlarda da çalışabilme kabiliyetine ulaşması zorunlu kılınmıştır. Bunun yanında sisteme bağlı rüzgâr enerjisinin çoğu küçük güçlü asenkron generatörlerden üretiliyorsa, bu generatörleri şebekeden ayırmak daha uygun olabilir, asenkron

generatörlerin şebekeden çektiği reaktif güç azalınca, şebeke gerilimi buna bağlı olarak yükselebilir [35].

Gerilim kaynağından kaynaklanan ve aydınlatma elemanlarının çalışırken aydınlık şiddetinin değişmesiyle yüzünden insan görmesi üzerinde problem oluşturabilen, üretilen güç değerindeki hızlı değişimlere fliker denir. Flikerin insan sağlığı üzerindeki etkileri kişiden kişiye değiştiğinden kesin ölçümünün yapılması da oldukça zordur. IEC 61000-4-21 standardı flikerin yapısı ve özellikleri hakkında detaylı bilgiler sunar ayrıca bir bölgeye kurulmak istenen rüzgar çiftliklerinin ürettikleri elektriğin güç kalitesini tahmin etmeye yarayacak metodları gösterir [30]. Gerilim dalgalanmaları flikermetre adlı bir cihaz ile ölçülür, bu ölçüm cihazı insanların rahatsızlık seviyesi ve gerilim dalgalanması arasındaki ilişkiyi gösterir. Kısa dönemli rahatsızlık P_{st} , uzun dönemli rahatsızlık göstergesi ile P_{lt} gösterilir. Fliker seviyesi anlık olarak hesaplanamadığı için istatistiksel olarak hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Kısa dönemli fliker rahatsızlığı indeksi 0 ile 1 arasında değişmektedir. Kısa dönemli rahatsızlık şiddeti çeşitli parametrelere göre değişirken Genellikle P_{st} değeri 0.7 değerinden fazla olursa, bazı insanların gözlerinde rahatsızlık oluşmaya başlarken, 1 değerine ulaşıldığında herkesi fliker rahatsızlığı herkesi etkileyecek duruma gelir. EN 50160 standardına göre 10 dakikalık periyotlarla ölçülen fliker şiddeti rahatsızlığı yada iki saatlik zaman aralığı boyunca alınan 12 ardışık ölçümden elde edilen P_{st} değeri kullanılarak, bulunan P_{lt} değerine uzun dönem fliker şiddeti endeksi denir [38]. Uzun dönem fliker şiddeti bir haftanın %95 i boyunca 1 veya 1 in altında değer göstermelidir. Uzun süre hızlı gerilim değişimi yaşayan aydınlatma cihazı etkisinde kalan insan bünyesinde yorgunluk, baş ağrısı ve migren gibi belirtileri gösterebilir. Tüketicinin beslendiği noktada $P_{lt}=1$ değerini sağlayabilmek için, her fliker üreticisinin, belli limitler dahilinde fliker üretmesine izin verilir [39].

IEC 61000-4-15 standardı rüzgâr türbininin bağlı olduğu şebekenin karakteristikleri ve koşullarından bağımsız olarak ölçümlerin yapılması için test geliştirmiştir. Bundan başka sürekli çalışma ve anahtarlama durumları için fliker karakterizasyonu geliştirilmiştir.

Ülkemizde yürürlükte bulunan ulusal şebeke yönetmeliğimize göre azami fliker şiddeti seviyesi olarak, kısa dönem Fliker şiddeti 0.85 birimi, uzun dönem fliker şiddeti 0.63 birimi geçmemelidir. Bunun dışındaki değerler için tablo dikkate alınır.

Çizelge 3.1 : Fliker planlama sınır değerleri [38].

Gerilim Seviyesi (V)	Fliker Şiddeti	
	P _{st} (Kısa Dönem)	P _{lt} (Uzun Dönem)
V > 154 kV	0,85	0,63
35 kV < V ≤ 154 kV	0,97	0,72
1 kV < V ≤ 35 kV	1,0	0,8

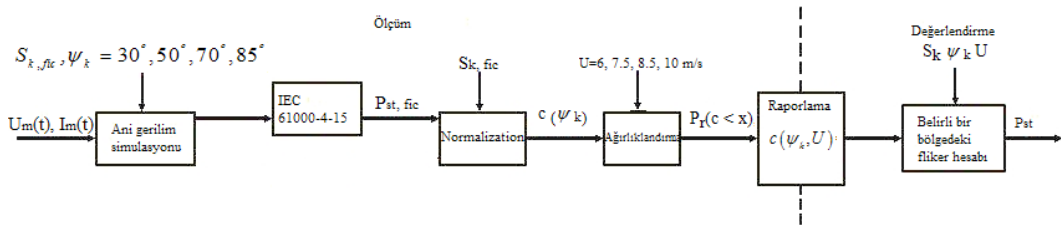
Bir rüzgar türbininin fliker emisyonu ile ilgili ortak bağlantı noktası (PCC) için kısa ve uzun dönem fliker emisyon sınırlarını geçmeyecek şekilde sınırlandırılmalıdır. Ayrıca rüzgar türbini tesislerinden kaynaklanan bağıl gerilim değişimi, anahtarlama kaynaklı gerilim değişiminin, maksimum izin verilen gerilim değişiminden küçük olacak şekilde sınırlandırılmalıdır.

$$d \leq \frac{\Delta U_{dyn}}{U_n} \quad (3.7)$$

Rüzgar türbinlerinin neden olduğu fliker emisyonları ve bağıl gerilim değişimleri, sürekli ve anahtarlama çalışmaları için iki farklı şekilde değerlendirilmelidir.

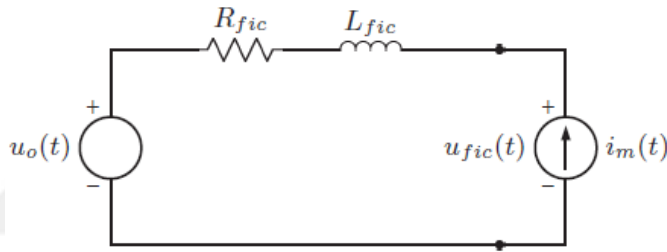
3.2.6.1 Sürekli çalışma

Rüzgar türbininin devreye alınması ve devreden çıkarılması hariç olmak üzere normal çalışma koşullarında çalışmasına sürekli çalışma denir. IEC 61000-4-15 standardı fliker sabitlerine ulaşabilmek için işleme ve istatistiksel değerlendirme şeması oluşturur. Bu katsayılar sürekli çalışma sırasında ölçülen akım ve gerilim-zaman serilerinden yola çıkılarak belirlenmelidir. Sürekli çalışma esnasındaki fliker için ölçüm ve değerlendirme işlemleri Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Rüzgar türbininin sürekli çalışması sırasında fliker için ölçüm ve değerlendirme işlemleri (IEC 61400-21, 2001).

Faz-nötr gerilimi ve hat akımı, $u_m(t)$ ve $i_m(t)$, en az 10 dakikalık ortalama bir değerle 15 m/s'ye kadar olan her 1 m/s'lik rüzgâr hızı için ölçülür. Bütün bu aralıklarda ölçüm yapılmasının sebebi, değerlendirilen rüzgar türbininin tüm işletme aralığında karakteristik güç kalitesi parametrelerini bulmaktır. Her bir zaman serisi ve şebeke empedansı için, faz açıları 30, 50, 70 ve 85 dereceleri için sanal gerilim değeri $u_{fic}(t)$ hesaplanır, bu model rüzgâr türbinlerinden kaynaklanan gerilim dalgalanmasının değerlendirilmesi için kullanılır. Fakat yapılan ölçümlerde anahtarlama işlemleri kondansatörlerin anahtarlaması gibi durumlar hesabın dışında tutulur. Gerilim (faz-nötr) ve akım değerleri üç faz için ani değerler olarak ölçülmelidir ve kesim frekansı ise en az 400 Hz olmalıdır. Sonuç olarak IEC 61000-4-15 e uygun olarak $u_{fic}(t)$ 'nin flikermetrenin giriş fonksiyonu olarak kullanılmasıyla, fliker dağılım değeri $P_{st, fic}$ 'e ulaşılır [40].



Şekil 3.4: Rüzgar türbini fliker değerlendirmesinde kullanılan sanal şebeke (30).

Sanal şebeke faz-nötr gerilim kaynağı $u_o(t)$ ve seri bağlı enduktans ve direnç empedansları ile gösterilir. Rüzgar türbinin bağlı bulunduğu iletim hattı akımının ölçülen ani değeri de ($i_m(t)$) ile gösterilmektedir. Bu model şebekeye bağlı diğer yüklerin oluşturdukları dalgalanmaları ortadan kaldırmak için kullanılır, devrenin çözümüyle sanal gerilime ulaşabiliriz.

$$u_{fic}(t) = u_o(t) + R_{fic} \cdot i_m(t) + L_{fic} \cdot \frac{di_m(t)}{dt} \quad (3.8)$$

İdeal gerilimi oluşturmanın birçok yolu vardır fakat ideal gerilimin üzerindeki fliker sıfır olmalıdır. Yani hesapladığımız sanal gerilim ile kaynağın aynı elektriksel açıya ($\alpha_m(t)$) sahip olmaları gerekmektedir. Bu özellikleri sağlayan $U_0(t)$,

$$u_0(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_n \cdot \sin(\alpha_m(t)) \quad (3.9)$$

şeklinde tanımlanır. Buradaki U_n şebekenin rms gerilim değeridir. Ölçülen gerilimin temel değerinin elektriksel açısı ise;

$$\alpha_m(t) = 2\pi \cdot \int_0^t f(t)dt + \alpha_0 \quad (3.10)$$

olarak tanımlanır.

$f(t)$: Frekans,

t : Zaman dizilerinin başlamasından sonraki zaman

α_0 : $t=0$ ' da ki elektriksel açıdır.

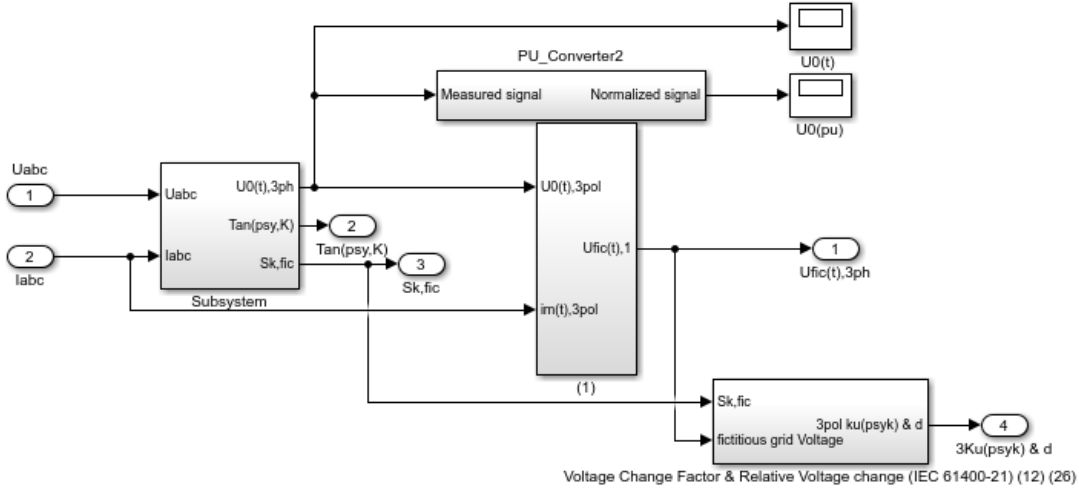
R_{fic} ve L_{fic} , şebeke empedans faz açısını ψ_k verebilecek şekilde seçilmelidir:

$$\tan(\psi_k) = \frac{2\pi \cdot f \cdot L_{fic}}{R_{fic}} = \frac{X_{fic}}{R_{fic}} \quad (3.11)$$

Sanal şebekenin üç faz kısa devre görünür gücü ise,

$$S_{k, fic} = \frac{U_n^2}{\sqrt{R_{fic}^2 + X_{fic}^2}} \quad (3.12)$$

ile elde edilir. Sanal şebekenin MATLAB modeli, aşağıdaki şekilde görülebileceği üzere d-q dönüşümünden oluşmaktadır. Rüzgar türbinlerinin PCC noktasından ölçülen üç fazlı akım ve gerilim değerleri giriş değeri olarak kullanılmış ve modelin çıktısı olarak sanal şebeke gerilimi elde edilmiştir. Model içerisinde bulunan R_{fic} ve L_{fic} değerleri sanal şebeke empedans faz açısı ve kısa devre gücüne göre hesaplanarak yerine yazılmaktadır. Standarda göre 4 farklı şebeke empedans faz açısı için hesaplama yapılacağından, oluşturulan model her seferinde R_{fic} ve L_{fic} değerlerini tekrardan hesaplamaktadır.



Şekil 3.5: Simulinkte sanal şebeke modeli.

Her $P_{st, fic}$ değeri ($S_{k, fic}$) kısa devre görünür gücünden bağımsız olarak Fliker katsayısına $c(\psi_k)$ normalizasyonu yapılır. Rüzgar türbinleri için sanal şebekede oluşturulan sanal fliker $P_{st, fic}$ değeri şebekenin kısa devre gücüne ve şebeke empedans açısı ψ_k ya bağlı olmalıdır. $P_{st, fic}$ ile ψ_k arasında yer alan ilişki türbinin çeşidine göre değişirken, $P_{st, fic}$ $S_{k, fic}$ ile ters orantılıdır, fliker katsayısı, hesaplanan fliker emisyon değerlerinin her biri için aşağıdaki denklemi uygulayarak belirlenmelidir [33]. Her bir şebeke empedansı faz açısı ψ_k için, fliker katsayısının ağırlıklı kümülatif $P_r(c < x)$, 4 farklı Rayleigh dağılımına uyan rüzgâr hızımız olduğunu varsayarsak, $U=6, 7.5, 8.5$ ve 10 m/s fliker katsayılarının kümülatif ağırlıklı dağılım fonksiyonları hesaplanır. Bu fonksiyonlar hesaplanmış fliker katsayılarının dağılımını gösterir. Anahtarlama işleminde olduğu gibi, sürekli çalışma durumunda da ortak bağlantı noktasındaki 4 faz empedans açısı ölçülür ve hesaplanır. Rüzgar enerji çeviricisinin belirli bir alandaki sürekli çalışma fliker emisyonu aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [30];

$$P_{st} = P_{lt} = c(\psi_k, U) \cdot \frac{S_n}{S_k} \quad (3.13)$$

Eğer ortak bağlantı noktası PCC'ye bağlanan çeviricilerin sayısı birden fazla ise fliker emisyonu (40);

$$P_{st\Sigma} = P_{lt\Sigma} = \frac{1}{S_k} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{WT}} (c(\psi_k, U) \cdot S_{n,i})^2} \quad (3.14)$$

Eğer bağlanan tüm çeviriciler aynı tipteyse, fliker emisyonunu hesaplayacağımız formül daha da basitleştirilebilir:

$$P_{st\Sigma} = P_{lt\Sigma} = \frac{S_{n,i}}{S_k} \cdot c(\psi_k, U) \sqrt{N_{WT}} \quad (3.15)$$

eşitliği kullanılarak tahmin edilebilir. Bu denklemde;

$c(\psi_k, U)$ = Tek rüzgâr türbini için fliker katsayısı

$S_{n,i}$ = Tek rüzgâr türbininin görünür gücü

N_{WT} = Ortak bağlantı noktasına bağlı rüzgâr türbini çeviricilerinin sayısıdır.

Değişik yerlerdeki rüzgâr dağılımlarının bilinmediği için, Rayleigh dağılımı genel olarak rüzgâr hızının farklı bölgelerdeki dağılımına uyan bir olasılık dağılımıdır.

Rayleigh dağılımı;

$$f(u) = \frac{\pi u}{2(U)^2} e^{\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{u}{U} \right)^2 \right]} \quad (3.16)$$

şeklinde verilebilir. şekilde tanımlanabilir. Burada,

$f(u)$: Rüzgar hızı için Rayleigh kümülatif olasılık dağılım fonksiyonu,

U : Merkez yüksekliğinde yıllık ortalama rüzgar hızı,

u : Rüzgar hızıdır.

Ağırlıklıdır faktörünün bulunması için öncelikle i'ninci rüzgar hızı aralığı içindeki ölçülen fliker katsayılarının meydana gelme frekansları

$$f_{m,i} = \frac{N_{m,i}}{N_m} \quad (3.17)$$

Denkleminde göre hesaplanır.

$N_{m,i}$ = i'ninci rüzgâr aralığı hızı aralığında ölçülen Fliker katsayı değerlerinin sayısı,

N_m = Fliker katsayı değerlerinin toplam sayısıdır.

i'ninci rüzgâr hızı aralığı içindeki rüzgâr hızlarının oluşma frekansları Rayleigh dağılımına göre,

$$f_{y,i} = e^{\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{u_{i-0,5}}{U} \right)^2 \right]} - e^{\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{u_{i+0,5}}{U} \right)^2 \right]} \quad (3.18)$$

eklinde hesaplanır. Bu denklemde,

u_i = i'ninci rüzgâr hızı aralığının orta noktası

U = Varsayılan yıllık ortalama rüzgâr hızıdır.

V_{cut-in} ile 15 m/s arasındaki her 1 m/s'lik rüzgâr hızı için $f_{y,i}$ ve $f_{m,i}$ 'nin hesaplanan değerleri kullanılarak ağırlık faktörleri,

$$w_i = \frac{f_{y,i}}{f_{m,i}} \quad (3.19)$$

ile belirlenir. Son olarak ise ölçtüğümüz fliker katsayısı $c(\psi_k, U)$ değerlerinin toplam ağırlıklı dağılımları hesaplanır ve bu dağılımın 99.yuzdeligi olarak fliker katsayısı belirlenir. fliker katsayısı değerlerinin toplam ağırlıklı dağılımı,

$$\Pr(c < x) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{bin}} w_i \cdot N_{m,i,c < x}}{\sum_{i=1}^{N_{bin}} w_i \cdot N_{m,i}} \quad (3.20)$$

olarak bulunur. Burada

$N_{m,i,c < x}$ = i'ninci rüzgâr hızı aralığında x değerinden küçük veya x değerine eşit olan fliker katsayı değerlerinin sayısı:

N_{bin} = Rüzgar hızı aralıklarının toplam sayısıdır.

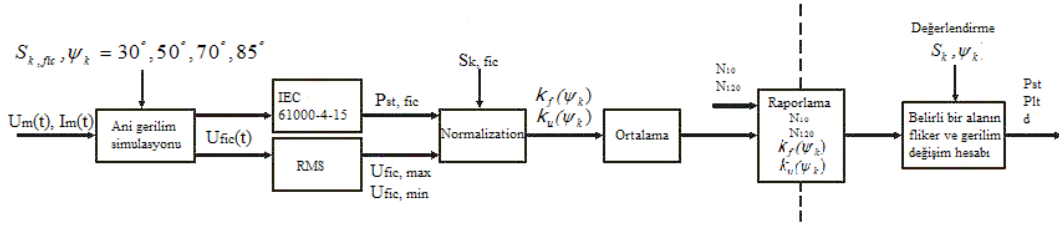
Her kümülatif dağılım için 99 luk yüzdelerle, fliker katsayısı rapor edilir.

Rüzgar türbininin sürekli çalışması sırasında üretilen fliker emisyonunu belirlemek için ölçümler gereklidir. IEC 61400-21 fliker emisyonunun gerilim ölçümlerinden tayin edilemeyeceğini çünkü bu yöntem şebekedeki diğer kaynaklardan oluşan flikerden etkilenebileceğini belirtir. Bunu aşmak için önerilen yöntem ise akım ve gerilim ölçümlerine dayanmaktadır. Rüzgar türbininin kısa süreli fliker emisyonu bir referans şebekeye dayalı ölçülen aktif ve reaktif gücü tek yük olarak kabul ederek hesaplanmalıdır.

3.2.6.2 Anahtarlama işlemi:

Anahtarlama işlemi de fliker üretir. Rüzgar türbinindeki tipik açma kapama olayları anahtarlama işlemi olarak geçer. Açma, kapama olayları, generatörler arasında veya generatör sargıları arasındaki anahtarlama üretilen gücün değişikliğe uğramasına yol

açar, bu da ortak bağlantı noktası PCC de gerilim değişikliğine neden olur. Bu gerilim değişiklikleri fliker olarak karşımıza çıkar.



Şekil 3.6: Rüzgâr türbininin anahtarlama çalışması sırasında fliker için ölçüm ve değerlendirme işlemleri.

Bir rüzgâr türbini için, anahtarlama işlemi sonrası oluşacak fliker emisyonu şu şekilde hesaplanabilir [40]:

$$P_{st} = 18 \cdot N_{10}^{0.31} \cdot k_f(\psi_k) \frac{S_n}{S_k} \quad (3.21)$$

$$P_{lt} = 8 \cdot N_{120}^{0.31} \cdot k_f(\psi_k) \frac{S_n}{S_k} \quad (3.22)$$

PCC noktasındaki ψ_k için $k_f(\psi_k)$ fliker adım faktörüdür.

Sahadaki gerçek k için rüzgâr türbini fliker adım faktörü rüzgâr üreticisinin, üretim bilgilerini verdiği tabloya doğrusal enterpolasyon yapılarak bulunabilir.

Bir grup rüzgâr türbininin ortak bağlantı noktasındaki fliker emisyonu ise aşağıdaki bağıntı ile bulunabilir:

$$P_{st\Sigma} = P_{lt\Sigma} = \frac{1}{S_k} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{WT}} (c(\psi_k, U) \cdot S_{n,i})^2} \quad (3.23)$$

Burada $k_{f,i}(\psi_k)$ bir rüzgâr türbinin fliker adım faktörüdür; $N_{10,i}$ ve $N_{120,i}$ ise sırasıyla 10 dakika ve 2 saatlik periyotlarda rüzgâr türbininde yapılan anahtarlama işlemidir. S_n bir rüzgâr türbini için anma görünen gücüdür. Eğer fliker emisyon sınırları verilmişse, izin verilen maksimum açma-kapama sayısı. İzin verilen maksimum fliker emisyon faktörü veya ortak bağlantı noktasındaki (PCC) gerekli kısa devre kapasitesi hesaplanabilir.

Fliker adım faktörü:

Anahtarlama işlemi ile aynı fliker şiddetine sahip eşdeğer bir gerilim adımını hesaplamak için kullanılır. Fliker adım faktörü,

$$k_f(\psi_k) = \frac{S_{k, fic}}{100.S_n} \left(\frac{T_p}{2,3} \right)^{1/3,2} . P_{st, fic} \quad (3.24)$$

şeklinde tanımlanabilir. T_p gözlem süresi olarak yer almaktadır, simülasyonun gerilim zaman dizilerinin saniye cinsinden uzunluğudur. Seçilen bu zaman dilimi, hava boşluğunun sebep olduğu güç dalgalanmalarını göz önüne almayacak kadar kısa, fakat anahtarlama işleminin etkisinin azalacağı kadar da uzun bir zaman dilimi olmalıdır.

Gerilim değişim faktörü:

Anahtarlama işleminin sebep olduğu bağıl gerilim değişimi (Δu), şebekenin kısa devre gücü ve şebeke empedans açısına siki sıkıya bağlıdır. Δu ve ψ_k arasında yer alan ilişki rüzgar türbini teknolojisine bağlı olmakla beraber, Δu , $S_{k, fic}$ ile ters orantılıdır. Bağıl gerilim değişimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir,

$$\Delta u = k_u(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_{k, fic}} \quad (3.25)$$

Bağıl gerilim değişimi:

Bir rüzgar türbininin anahtarlama durumlarından dolayı bağıl gerilim değişimi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir;

$$d = 100.k_u(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_k} \quad (3.26)$$

Denklemden d: Bağıl gerilim değişimi (%)

$k_u(\psi_k)$: Ortak bağlantı noktasında verilen ψ_k için rüzgar türbininin gerilim değişim faktörüdür.

3.2.7 Aktif ve reaktif güç

Rüzgar türbininin aktif ve reaktif güç kapasitelerini değerlendirmek için değişik tipteki testler yapılmalı, testlerin bazıları rüzgâr hızına dayanan, bazıları da hem rüzgâr hızı hem de rüzgâr türbini kontrol sistemiyle yapılmalıdır.

3.2.7.1 Aktif güç:

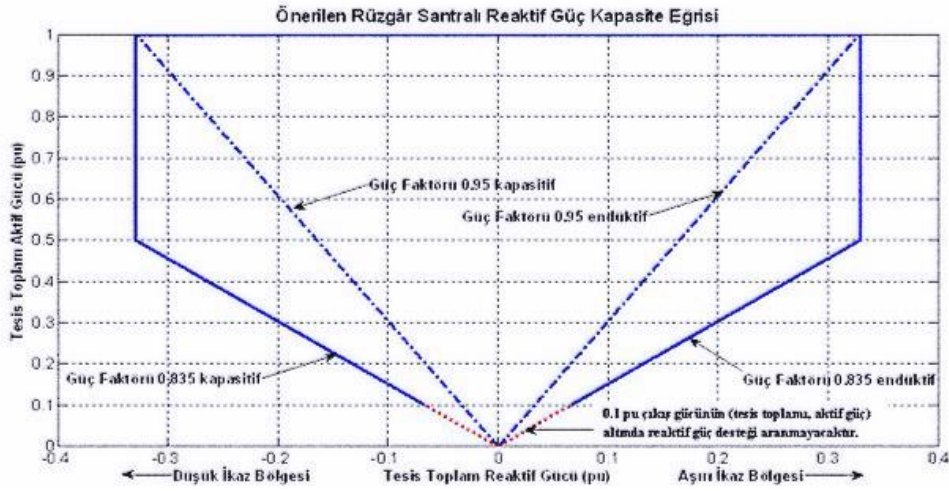
Elektrik Piyasası şebeke yönetmeliğine göre rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisinin aktif güç çıkışı, ihtiyaç duyulması halinde, TEİAŞ tarafından gönderilebilecek sinyallerle, santralin o andaki durumda ulaşabileceği emre amade gücünün %20 si ile %100'u arasında otomatik olarak kontrol edilebilmelidir [38]. Bu bağlamda;

- a) 100 MW ve altında kurulu güce sahip olan rüzgâr elektrik santralleri için, dakikada yük alma hızı, kurulu gücünün %5 ini geçmemeli, dakikada yük atma hızı ise kurulu gücünün %5 inden aşağıda olmamalıdır.
- b) 100 MW ve üstünde kurulu güce sahip rüzgâr santrallerinde, dakikada yük alma hızı kurulu gücün %4 unu geçmemeli, yük atma hızı ise %4 ünden aşağıda olmamalıdır.

İletim hattı yöneticisi TEİAŞ, geliştirilen SCADA yazılımı ile, şebeke kısıtlaması ve elektrik kalitesi gibi nedenlerden rüzgâr elektrik santrallerinin üretimlerini kısıtlamak isterse, rüzgâr elektrik santralının bağlı olduğu Yük Tevzi Merkezince belirli surelerde gönderilecek set-point değerleri ile ayarlama yapabilir.

3.2.7.2 Reaktif güç

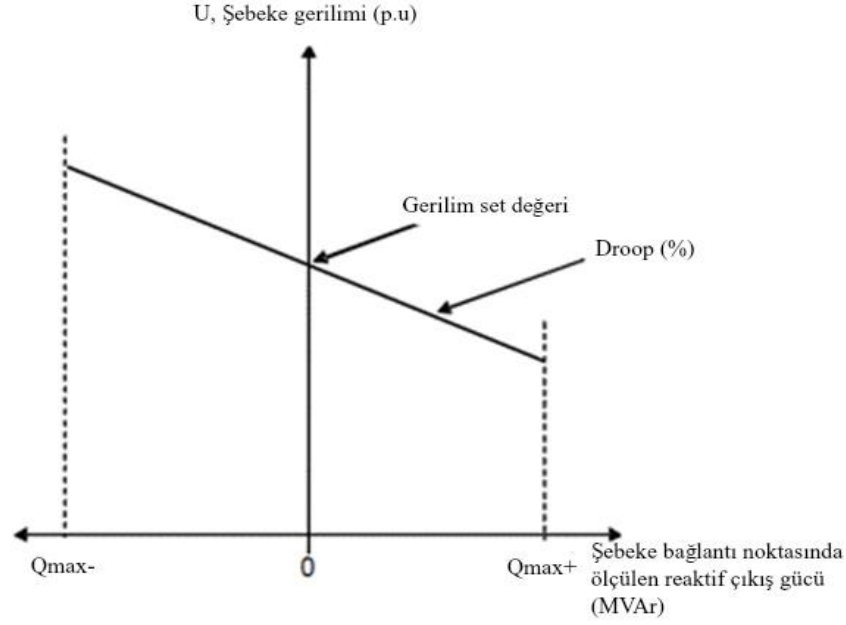
İletim hattının iki ucunun arasındaki gerilim farkı, reaktif gücün hattaki akış yönünü belirler. Belirli bir aktif güç için konvansiyonel generatörlerin AVR sistemleri, iletim hattının istenen gerilimini sağlamak amacıyla, sisteme reaktif güç vererek yada sistemden reaktif güç çekerek generatörün terminal geriliminin genliğini belirlemede kullanılırlar. Şebekede yer alan kapasitif ve endüktif bileşenler arasındaki ilişkiye göre reaktif güç dengesi değişebilmektedir. Kondansatörler ve iletim hatları, reaktif güç üretimine destek olurken, motor ve trafolar ise reaktif güç tüketmektedirler. Generatörler TEİAŞ tarafından şebeke için talep edilen reaktif gücü sağlarken, ürettikleri aktif güç düşük ise, güç faktörü düşebilir. Ancak normal şartlar altında sistemin güç faktörü 1 den uzaklaşırsa, aşırı akımlar oluşabilir, bu yüzden sistemi tehlikeye atmamak için, güç faktörü limitlerini gösteren grafik, Elektrik Şebeke Piyasası Yönetmeliği Ek-18 de yayınlanmıştır [38].



Şekil 3.7: Rüzgar santrali reaktif güç kapasite eğrisi [38].

Ayrıca rüzgar elektrik santrali, iletim yada dağıtım sisteminin bağlantı noktasında, köyü çizgiyle belirtilmiş sınırlar içindeki reaktif güç değerleri için her noktada çalışabilmek zorundadır. Böylece şebekenin gerilim kararlılığının oluşmasında, üretim santrali de ürettiği yada absorbe ettiği reaktif güç sayesinde yardım eder.

Rüzgar santralleri, ortak bağlantı noktasındaki gerilimlerinin 0,9 pu ve 1,1pu değerleri arasında tanımlanan normal işletme durumunda, ortak bağlantı noktasındaki gerilimin durumunun değişimlerine, aşağıdaki şekilde belirlenmiş karakteristikler ile her zaman cevap vermelidir. Reaktif akım bileşeni, aktif akım bileşenine ve ortak bağlantı noktasındaki gerilime 90 dik olduğu için, reaktif enerji iletimi sırasında oluşabilecek kayıplar ısı kayıplardır. Rüzgar türbinlerinde genel olarak asenkron generatörler kullanılmaktadır, klasik asenkron generatörler, senkron generatörlere zıt olarak reaktif güç tüketmektedirler. Yüksüz durumda %40 seviyelerine ulaşan reaktif enerji tüketimi, tam yükte çalışılan durumda ise %60 seviyelerine kadar çıkabilmektedir, bu yüzden bu tip santrallerin yapısında genel olarak kompanzasyon ünitesi de bulunur [41].



Şekil 3.8: Rüzgara dayalı üretim tesisleri tarafından sisteme verilecek reaktif güç desteği eğrisi [38].

Q_{max-} = Üretim tesisinin kurulu gücüne bağlı olarak, düşük ikazda 0.95 güç faktörüne karşılık gelen reaktif güç değeri

Q_{max+} = Üretim tesisinin kurulu gücüne bağlı olarak, aşırı ikazda 0.95 güç faktörüne karşılık gelen reaktif güç değeri

Droop= Üretim tesisinin reaktif çıkış gücünü 0 dan aşırı ikazlı maksimum reaktif güç değerine veya 0 dan düşük ikazlı reaktif güç değerine çıkması için şebeke nominal geriliminde, verilen set değerine göre oluşacak değişimin yüzde değeridir.

Şekilde gösterilen droop değerleri %2 ila %7 arasında olup sistem yöneticisi (TEİAŞ) tarafından belirlenir. Çeviricilere sahip rüzgar türbinlerinde ortak bağlantı noktasındaki reaktif güç, inverter tarafından kontrol edilebilir. Bu türbinlerde güç faktörü 1 yapılabilir. Asenkron generatörler ise hattın reaktif güç çekerler ve generatörün güç faktörü genellikle düşüktür. Rüzgar türbinlerinin ihtiyacı olan reaktif gücün fazla artmasıyla sistem kararsız bir hale gelebilir. Bu yüzden bazı sistemlerde rüzgar türbinine bağlı kondansatör gruplarından da reaktif güç ihtiyacı karşılanabilmektedir. Rüzgar türbinlerinin şebekeden çektikleri reaktif gücün azalması, gerilimde artış meydana gelmesine neden olur, böylece rüzgar türbininin elektrik kalitesine etkileri azalmış olur.

3.2.8 Frekans

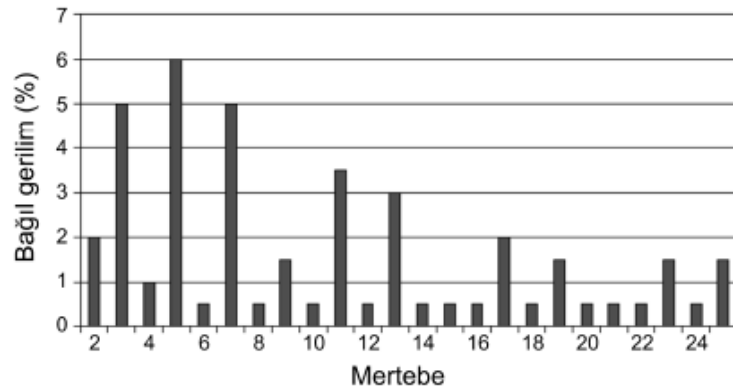
Bir generatörün çıkış gücünün aktif bileşeni, miline uygulanan mekanik güce bağlı olarak belirlenir. Üretim ve tüketim arasındaki fark, sistem frekansında değişimlere yol acar. Sağlanan gücün tüketimden fazla olması durumunda frekansta artış, tersi durumda ise frekansta azalma meydana gelir. Frekansı en uygun biçimde kontrol edebilmek için, üretim ve iletimin talep ve hizmet kesintilerinde yaşanan değişiklikleri aynı anda idare edebilme kabiliyetine sahip olmaları gerekir. Frekans kontrolü, şebekelerde yük arttığında devreye girerek uygun durumdaki generatörlerin momentini artırır. Herhangi bir generatör için frekansın kontrolü primer gücün kontrolünü gerektirir. Rüzgâr kontrol edilemez olmasına rağmen, çoğu modern rüzgâr türbinlerinin güç çıkışı kontrol edilebilir. Şebekedeki üretimde yaşanan bir aksaklık yada beklenilmeyen talep artışı olduğu zamanlarda şebeke frekansının sabit tutulabilmesi için generatörün güç çıkışını artırma yeteneği şebeke işletimi için önemlidir. Kanat açısı kontrollü rüzgâr türbinleri bu tür sistem desteklerini daha önce kendi nominal çıkış güçlerinin altında güç verecek şekilde düzenlenmişse ve rüzgârın da mevcut olduğu durumlarda kolaylıkla yapabilir. Bu özellik bu türbinlerin primer ve sekonder frekans kontrolü yapmalarını sağlar. Ancak yürürlükteki elektrik piyasası şebeke yönetmeliğine göre, rüzgâr enerjisi üretim santralleri frekans kontrolüne günümüz için katılmaları zorunlu değildir. Buna rağmen şebeke frekansının 50.2 Hz'in üzerinde olduğu durumlarda daha fazla rüzgâr türbini devreye girmemelidir. Rüzgâr türbini şebeke frekansı 47.5-50.3 Hz aralığında olduğu sürece emre amade gücünün tamamını üretebilmeli, şebeke frekansının 50.3'ün üzerine çıkması halinde her 100 mHz frekans artışı için emre amade gücünün % 5'i oranında yük atabilmelidir [38].

3.2.9 Harmonikler

Harmonik bozukluklar, lineer olmayan elektrikli cihazların ürettiği temel sinüs dalgasındaki distorsiyonla alakalıdır. Artan akım, güç kayıpları ve cihazlarda yaşanması muhtemel aşırı ısınma harmonik problemlerini arttırabilir. Standartlar Toplam Harmonik Bozulma (THB) ve tekil harmonikler için limit getirmiştir. Toplam Harmonik Bozulma aşağıdaki formül uyarınca hesaplanabilir [38]:

$$THB_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}}{U_1} \times 100 \quad (3.27)$$

EN 50160 standardı, her bir tekil harmonik distorsiyon değerinin haftanın %95'i boyunca 10 dakikalık ortalama değerinin şekilde gösterilen limit değerleri içerisinde kalması gerektiğini söyler. Bunun yanında gerilimin toplam harmonik distorsiyonu da %8 den aşağıda olmalıdır. Harmonik gerilimlerini belli bir seviyede tutabilmek için, her bir harmonik akım kaynağının da belli limitler içerisinde katkı yapmasına izin verilmelidir. Bu sınırlar harmonik empedansı ve gerilim seviyesi gibi şebeke karakteristikleriyle ilişkilidir ve IEC 61000-3-6 standardından bulunabilir.



Şekil 3.9: Bağıl gerilim yüzdesine bağlı olarak tekil harmonik gerilimlerinin durumu [42].

Listelenen harmonik gerilimleri sınırları 40.harmoniğe kadar tanımlanmıştır. 40. harmonikten sonrası değerler çok küçük olduğundan herhangi bir sınır tanımlanmamıştır. Aynı şekilde ara harmonikler içinde limitleme koyulmamıştır. EPŞY'de harmonikler için çeşitli sınırlamalar getirilmiştir, bütün iletim sistemi kullanıcıları aşağıdaki tabloda verilen sınır değerlerine uymak zorundadır. Tabloda yer alan değerler ortak bağlantı noktasındaki akım harmoniğinin rms değerinin maksimum yük akımının ana bileşeninin etkin değerine oranını gösterir [38]. Açma-kapama işlemi yapan güç elektroniği çeviricileri, değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılır [43]. Tristör kullanılan çeviriciler, standartta limitleri verilen harmonik gerilimlerini etkileyebilecek olan harmonik akımlarını oluştururlar. Ancak günümüzde rüzgar türbinlerinin bir çoğunda transistör bazlı çeviriciler kullanılır ve 3kHz in üzerindeki anahtarlama frekanslarında çalışırlar. Böylece harmonikler daha

küçük filtreler yardımıyla kolayca kaldırılabilir. Genellikle, harmonik standartların gereksinimleri modern rüzgar türbinleri tarafından karşılanabilir.

Çizelge 3.2: Kabul edilebilir akım harmonik limitleri

Harmonik Sırası		1 kV<V≤34.5 kV					34.5 kV <V≤154 kV					V>154 kV				
Grup	No	Ik/IL					Ik/IL					Ik/IL				
		<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000
TEK HARMONİKLER	h<11	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	11≤h<17	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≤h<23	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≤h<35	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≥35	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 kendinden önceki tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.																
TTB		5	8	12	15	20	2,5	4	6	7,5	10	1,3	2	3	3,75	5
Bu değerler 3 saniye çözünürlükle ölçülen 10'ar dakikalık ortalamalardır. Ik: Ortak bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımı IL: Ortak bağlantı noktasındaki maksimum yük akımının ana bileşeni																

4. RÜZGAR TÜRBİNİ İÇİN MODEL GELİŞTİRME PROSEDÜRÜ

Bu bölümde rüzgar türbini modellemelerinde gerçekleşen gelişmelere genel bir bakış sunulacaktır. Rüzgar türbinlerinin geliştirilmesi bir kaç yüz kW ila MW'lar seviyelerinde ele alınmaktadır. Kurulan ilk rüzgar türbinleri şebekeye doğrudan bağlı senkron generatörlerdir ve pitch kontrolü ile rüzgar hızından dolayı oluşabilecek, rotor kanatlarındaki mekanik gücü sınırlandırılır. Bu yüzden oluşturulan ilk modellemeler de bu tip rüzgar türbinlerine yöneliktir [12]. Sincap kafesli asenkron generatör ve çift beslemeli asenkron generatörlerin bağlı olduğu iki farklı rüzgar santrali topolojileri sunulacaktır. Sincap kafesli asenkron generatörün (SKAG) bağlı olduğu rüzgar santrali çeşitli yönleriyle çift beslemeli asenkron generatörün bağlandığı (ÇBAG) rüzgar santraliyle karşılaştırılmıştır. Rüzgar çiftlikleri için geçici modellerinin geliştirilmesi, topolojilerinin bozunumlara ve arıza koşullarına karşı performansı hakkında ilginç bir bakış açısı kazandırmaktadır.

Doğrudan şebekeye bağlı senkron generatörü, doğrudan şebeke bağlantılı sincap kafesli asenkron generatör takip etmiştir. Bu tip generatörlerin senkron generatörlerden daha iyi tork-hız karakteristikleri vardır, bu yüzden hem daha ucuz hem de mekanik yükleri azdır. Günümüzde halen bazı üreticiler bu konsepti uygulamaktadırlar. Pitch kontrol ile stall kontrol yüksek rüzgar hızında oluşabilecek mekanik gücü sınırlandırmak için kullanılırlar. Pitch kontrol ve stall kontrolün kullanıldığı şebekeye direk bağlı sincap kafesli asenkron generatörü modellemelere literatürde sıkça rastlanır [44].

Günümüzde çoğu üreticinin, ürün yelpazesinde pitch kontrollü şebekeye direk bağlı SKAG'ler bulunmamaktadır. Pitch kontrol ile rotor kanatlarının kontrolü ve mekanik gücün nominal seviyesine inmesi oldukça zordur, bu yüzden pitch kontrollü şebekeye doğrudan bağlı SKAG'ler akademik literatürde yer almasına karşın, uygulamaları oldukça sınırlıdır [45].

Günümüzde şebekeye doğrudan bağlı SKAG'lerin yerini, çift beslemeli asenkron generatörler almıştır. Aynı zamanda güç elektroniği dönüştürücüleri ile şebekeye doğrudan bağlı senkron generatörlerde üreticiler tarafından üretilmeye başlanmıştır. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinin yapısı karmaşık olduğundan, yapılan çoğu

modellemede ve araştırmada, elektromekanik dönüştürücüler, sürücü sistemleri, generatör akım kontrolü, rotor hız kontrolcüsü veya DC link gerilimi olarak çeşitli alt sistemlere ayrılarak incelenmektedir [46].

Gücün rüzgar hızının küpüyle doğru orantılı olarak artması, rüzgar çiftliğini kurulacağı bölgedeki yıllık rüzgar hızının ve kullanılacak rüzgar kaynağının faktörü, rüzgar çiftliğinin kurulacağı lokasyonunun önemini gösterir [47]. Genelde rüzgar hızının yüksek olduğu alanlar, sosyal yaşama alanlarından dolayısıyla güçlü şebeke bağlantısından oldukça uzak olduğundan, zayıf elektrik şebekelerine rüzgar türbinlerinin bağlanmasında son derece dikkatli olunmalıdır.

Modelleme aşamasında rüzgar türbinlerinin yük değişimlerine ve arıza durumlarında verdiği tepkiler grafikler aracılığıyla açıklanacaktır. Her durum için generatör çıkış barasında gerilim, aktif ve reaktif güç değişimleri bulunmaktadır. Gerilim değeri faz-nötr geriliminin tepe değeri ölçülmüştür.

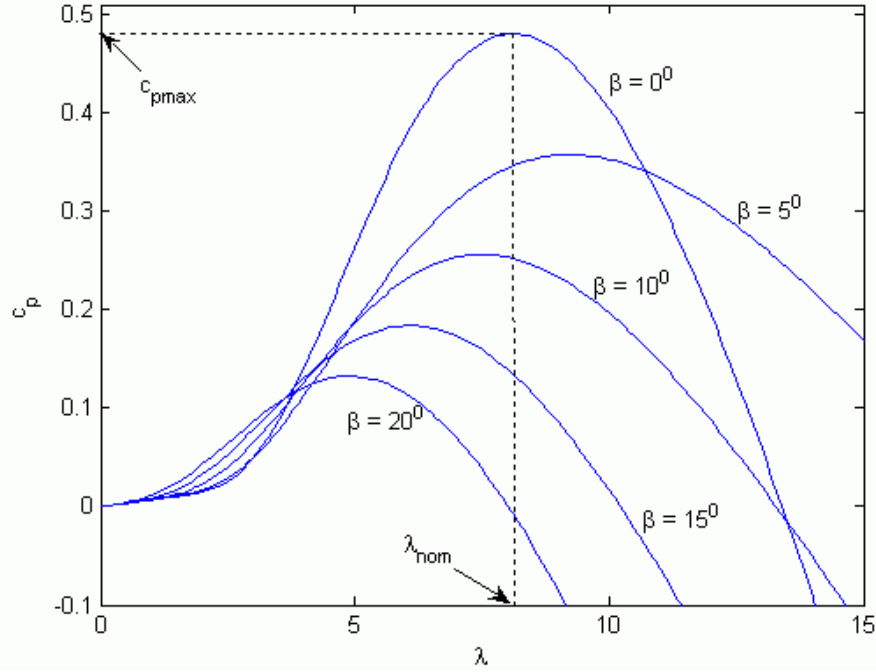
4.1 Rotor Denklemleri

Rüzgar akışından kaynaklanan kinetik enerjinin rotor kanatlarında dönüştürüldüğü güce ilişkin formül bölüm 2 deki denklemde verilmişti. Rotor kanatlarında oluşan güç, rüzgâr hızının karesiyle orantılı olarak arttığından, rüzgâr türbinleri güçlü fırtınalara dayanıklı olacak biçimde tasarlanmalıdır. Birçok modern yatay eksenli üç kanatlı rotorda betz katsayısı C_{PBetz} tepe noktası iyi değerlere ulaşır, ayrıca estetik olarak ta bozuk olmayan tasarımlar ortaya çıkar [47]. C_{PBetz} katsayısı ne kadar enerjinin türbin tarafından çekildiğini ölçmekte kullanılır. Bu katsayı, rotor tasarımı ve uç hız oranı ve rüzgâr hızına göre değişir, maksimum uygulama değeri yaklaşık olarak 0.4'tür [5]. C_{PBetz} , uç hız oranı λ ve pitch açısı β nin fonksiyonu olarak belirlenir. Performans sabitinin hesaplanması, kanat elemanları teorisinin kullanılmasını gerektirir [48]. Aerodinamik hesaplamaların numerik metotlara nazaran oldukça karmaşık olmasından, numerik yaklaşım metotları geliştirilmiştir. Aşağıda yer alan iki fonksiyon kullanılacaktır [49].

$$C_{PBetz}(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (4.1)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4.2)$$

Aşağıdaki şekil $C_{PBetz}(\lambda, \beta)$ fonksiyonunun çeşitli β değerlerine karşılık gelen λ değerlerini göstermektedir. Gerçek rüzgâr ve rotor hızları kullanılarak hesaplanan λ ve pitch açısı ile rüzgârdan çekilen mekanik güç yukarıdaki formüller kullanılarak hesaplanır. C_{PBetz} değerinin maksimum değerine ulaşması için $\beta = 0^\circ$ ve $\lambda = 8.1$ olmalıdır ($C_{PBetz \max} = 0.48$). Bu λ değerine λ_{nom} denir.



Şekil 4.1 : Pitch açısı parametrelerinin fonksiyonu [50].

4.2 Generatör Denklemleri

Generatör mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirdiği için tüm sistem içinde en önemli elemanlar arasında yer almaktadır. Generatör konvansiyonu, generatörün bağlı bulunduğu devreye güç aktarmasına denir. ÇBAG tasarlanırken generatör konvansiyonu kullanılır, bunun anlamı akımlar giriş yerine çıkış olarak alınır ve aktif ve reaktif güç, şebeke beslenirken pozitif işaretlidir. Generatör konvansiyonu kullanılarak aşağıdaki denklemler elde edilir [51]:

$$\begin{aligned}
v_{ds} &= -R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\
v_{qs} &= -R_s i_{qs} - \omega_s \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \\
v_{dr} &= -R_r i_{dr} - s\omega_s \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \\
v_{qr} &= -R_r i_{qr} - s\omega_s \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt}
\end{aligned} \tag{4.3}$$

burada,

v = Gerilim [V], i = akım [A], R = direnç [Ω], ω_s = stator elektriksel frekansı [rad/s],
 ψ = flux linkage [Vs], s = rotor kaymasıdır.

d ve q alt simgeleri, doğrudan ve kuadratik eksen bileşenlerini verir, s ve r simgeleri, stator ve rotor büyüklüklerini temsil eder. Yukarıdaki denklemlerdeki tüm büyüklükler zamanın fonksiyonudur. d - q referans eksen, senkron hızda dönerken, q eksen d ekseninden 90 derece ileridedir. d eksen maksimum stator akısıyla kesişir, bunun anlamı v_{ds} terminal gerilimi e_t 'ye eşit, v_{ds} sıfıra eşittir. Flux linkage aşağıdaki denklemler kullanılarak p.u cinsinden hesaplanabilir [52] ;

$$\begin{aligned}
\psi_{ds} &= -(L_s + L_m) i_{ds} - L_m i_{dr} \\
\psi_{qs} &= -(L_s + L_m) i_{qs} - L_m i_{qr} \\
\psi_{dr} &= -(L_r + L_m) i_{dr} - L_m i_{ds} \\
\psi_{qr} &= -(L_r + L_m) i_{qr} - L_m i_{qs}
\end{aligned} \tag{4.4}$$

L_m ortak endüktans, L_s ve L_r ise stator ve rotor kaçak endüktanslarıdır. Yukarıdaki denklemlerde generatör konvansiyonu kullanılmıştır. Rotor kayması ise aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$s = \frac{\omega_s - \frac{P}{2} \omega_m}{\omega_s} \tag{4.5}$$

P kutup sayısı ω_m [rad/s] ise generatörün mekanik frekansıdır. 5.4 ve 5.5 teki denklem gruplarından, ÇBAG akım gerilim ilişkisi türetilebilir. Denklem 5.4 teki rotor ve stator değişkenleri ihmal edilip, denklem 5.5 teki değerler, 5.4 tekilerin yerine koyulursa aşağıdaki denklem elde edilir [52];

$$\begin{aligned}
v_{ds} &= -R_s i_{ds} + \omega_s ((L_s + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr}) \\
v_{qs} &= -R_s i_{qs} + \omega_s ((L_s + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr}) \\
v_{dr} &= -R_r i_{dr} + s \omega_s ((L_r + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs}) \\
v_{qr} &= -R_r i_{qr} + s \omega_s ((L_r + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds})
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Generatörün ürettiği P aktif gücü ve Q reaktif gücü aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\begin{aligned}
P &= v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} + v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \\
Q &= v_{ds} i_{qs} - v_{qs} i_{ds} + v_{dr} i_{qr} - v_{qr} i_{dr}
\end{aligned} \tag{4.7}$$

Bu denklemden üretilen Q reaktif gücünün şebekeye verilen reaktif güce eşit olması gerekmediği sonucuna varılabilir. 5.7 ve 5.8 denklemleri generatörün elektriksel kısımlarını tanımlar. Ancak dinamik model tasarlanırken, mekanik kısımda göz önüne alınmalıdır. Aşağıdaki denklemde generatör tarafından üretilen elektromekanik tork verilmiştir:

$$T_e = \psi_{dr} i_{qr} - \psi_{qr} i_{dr} \tag{4.8}$$

Elektriksel ve mekanik tork arasındaki farkın sonucunda meydana gelen generatör hızındaki değişim, generatör hareket denkleminde kullanılarak hesaplanabilir:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{2H_m} (T_m - T_e) \tag{4.9}$$

H_m generatör rotorunun eşdeğer eylemsizlik sabiti [s], ve T_m p.u cinsinden mekanik torktur.

4.3 Modelleme Aşaması:

Bu bölümde iki farklı rüzgâr çiftliği topolojisi için SKAG ve ÇBAG bağlı türbinlerin farklı rüzgâr profillerindeki davranışlarını incelemek üzere simülasyon yapılacaktır. Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin bağlı olduğu SKAG ve değişken hızlı türbinlerin bağlı olduğu ÇBAG türbin topolojileri farklı yönlerden ele alınıp incelenecektir. Rüzgâr çiftliklerinin geçici modellerindeki gelişmeler, rüzgâr türbinlerinin şebekede neden olduğu bozunumlar ve hata durumlarındaki davranışları incelemede yararlı bir bakış açısı sunmaktadır.

Rüzgâr santrallerinin şebekeye entegrasyonu sırasında,

- Rüzgâr hızı belli basamaklar halinde artarken normal çalışma durumu,

- Şebeke bağlantı kıstası analizi (%5 - %10 - %20),
- Rüzgarın hızı aniden sıfıra düştüğünde santralin çalışması,
- Rüzgar hızı belli seviyeye çıkarken, 1-faz toprak, 3-faz toprak ve faz-faz arızalarında santralin ve şebekenin davranışları incelenecektir.

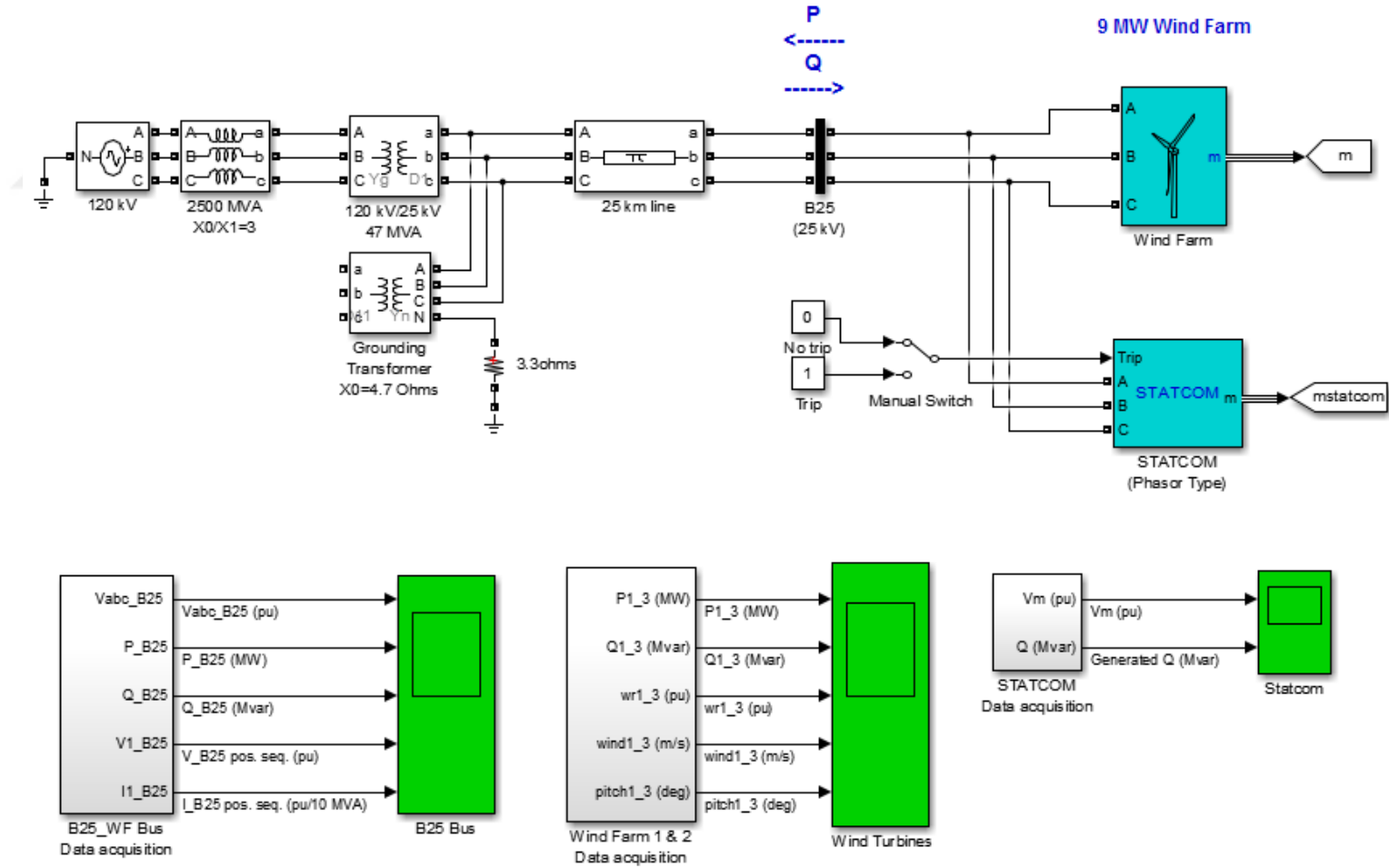
Simülasyonun yapılması için MATLAB/Simulink programı, Simscape Power Systems paketi kullanılmıştır. Simule edilen rüzgâr çiftlikleri 3 farklı rüzgâr profili için analiz edilecek, rüzgar hızı bu basamaklar halinde artarken normal çalışma durumunda, rüzgâr türbininden şebekeye aktarılan aktif güç ve şebekeden çekilen reaktif güç miktarları farklı rüzgâr profilleri için incelenecektir. Öncelikle rüzgâr türbininin aktif güç üretmeye başladığı cut-in rüzgâr hızıyla başlanıp, devamında rüzgâr türbininin maksimum çıkışını verebileceği anma rüzgâr hızı, ve son olarak ta rüzgâr türbininin devreden çıktığı aşırı rüzgâr hızı olan cut-off hızı olmak üzere üç farklı rüzgâr profili simule edilecektir. Pitch açısını kontrol edip, kanatların pitch açısını ayarlamak üzere PI kontrolcülerini kullanılacaktır. Yüksek rüzgâr hızlarında generatör sistemden ayrılıp, kendisini izole edecektir.

Model 3 farklı rüzgâr hızı için simule edilecektir. Bu rüzgâr hızları sırayla 3-6 m/s, 6-9 m/s ve 9-14 m/s olacaktır. Rüzgar hızı bu aralıktaki değerlere ulaşırken minimum değerinden maksimum değerine ulaşması 3 saniye sürecektir. İki farklı rüzgâr çiftliği için cut-in, anma ve cut-off rüzgâr hızları civarında çalışma anındaki performanslar incelenecektir.

Simülasyon süresi 50 saniye olarak ayarlanmıştır. Rüzgar hızındaki basamak değişimi, rüzgâr türbininin rüzgâr hızındaki değişime vereceği cevabı inceleyebilmek üzere oluşturulmuştur.

4.3.1 Simulinkte sincap kafesli asenkron generatör modeli

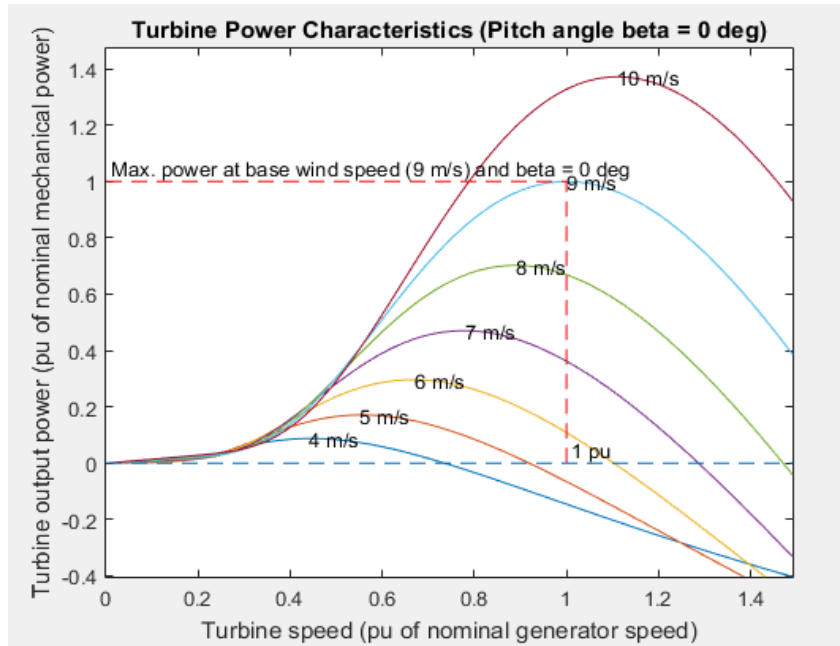
SKAG modelinde rüzgâr çiftliği şebekeye doğrudan bağlıdır. Model her biri 1.5 MW gücünde altı adet, toplamda 9 MW lık rüzgâr çiftliğinden oluşmaktadır. Rüzgar türbinleri 25 kV luk dağıtım hattı üzerinden, 120 kV luk şebekeye 25 km uzunluğundaki hattan taşınarak ulaşmaktadır. Sistemin davranışı rüzgâr hızındaki değişimlere bağlı olarak tahmin edilmektedir. Nominal rüzgâr hızı olarak 9 m/s seçilmiştir. Sistemin değişik rüzgâr hızlarında nasıl çalıştığını gözlemleyebilmek ve ÇBAG bağlı türbinlerle karşılaştırmasını yapabilmek üzere üç farklı rüzgâr seviyesinde simülasyon yapılacaktır.



Şekil 4.2 : SKAG bağlı rüzgar çiftliği simülasyon modeli.

Çizelge 4.1 : SKAG simülasyon konfigürasyonunda kullanılan parametreler.

Generatör parametreleri	
	SKAG
Nominal Güç (VA)	6x1,5 MW/0,9 MVA
Faz-faz gerilimi V_{rms}	575 V
Frekans (Hz)	50
R_s Stator direnci (pu)	0,004843
L_s Stator kaçak reaktansı (pu)	0,1248
Rotor R_r direnci (pu)	0,004377
Rotor L_r enduktansı (pu)	0,1791
L_m Mıknatıslanma enduktansı (pu)	6,77
Eylemsizlik sabiti(H)	5,04 MW/MVA
Sürtünme sabiti(pu)	0,01
Kutup sayısı	3
Türbin Parametreleri	
Nominal türbin mekanik çıkış gücü (MW)	2x1,5 MW
Nominal rüzgâr hızı (m/s)	9
Nominal rüzgâr hızında maksimum çıkış gücü (pu)	1
Nominal dönüş hızı (pu)	1
Pitch açısı kontrolcüsü kazancı (K_p , K_i)	5, 25
Maksimum pitch açısı (derece)	45
Maksimum pitch açısı değişim oranı (der/s)	2



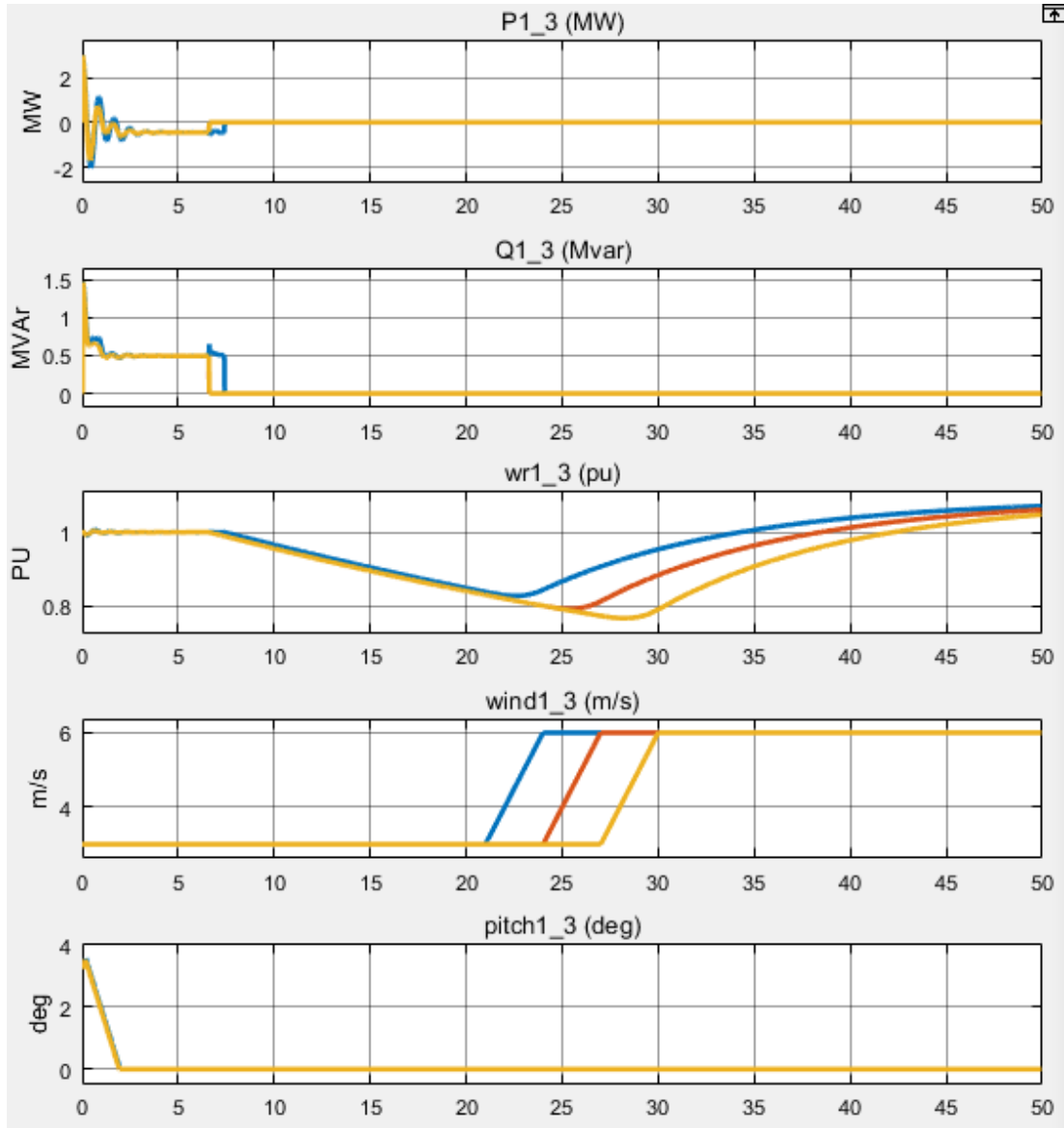
Şekil 4.3: SKAG modelinde rüzgâr hızına göre türbin hızının türbin mekanik gücü fonksiyonu olarak gösterimi.

4.3.1.1 Rüzgar hızı belli basamaklarda halinde artarken SKAG bağlı rüzgar çiftliğinin normal çalışma durumu

Başlangıçta rüzgâr hızı 3 m/s'ye sabitlenmiş, ardından $t=21$ saniye geçip ilk rüzgar türbin çiftine simule edilen rüzgar hızı basamak değişikliği ile hız 3 saniye içinde 6 m/s'ye çıkartılmıştır. Diğer rüzgâr türbinleri içinde aynı şekilde 3 er saniye arayla rüzgar hızı 3 m/s'den 6 m/s'ye çıkarılmıştır. Kullanılan fazör model geçici kararlı çalışmalar için uzun süreli simülasyon gerçekleştirilmesine uygundur, yapılan çalışmada simülasyon süresi olarak 50 saniye seçilmiştir.

Rüzgar hızındaki 3-6 m/s basamak değişimi, aktif ve reaktif güçte değişime neden olmuştur. Rüzgar hızı 6 m/s'ye çıktığında ÇBAG bağlı türbin, SKAG'den farklı olarak şebekeden reaktif güç çekmeye devam etmektedir. Çünkü ÇBAG türbinler düşük rüzgâr hızlarında da çalışabilmektedirler. SKAG bağlı türbinde ise, düşük rüzgâr hızında aktif güç üretimi olmadığından, reaktif güç tüketimi de olmamaktadır. SKAG bağlı türbinde olduğu gibi ÇBAG türbinlerinde de üretilen aktif güç ve buna bağlı olarak çekilen reaktif güç miktarı çok düşük olduğundan, B25 barasındaki gerilimde ciddi bir değişiklik gerçekleşmemektedir.

Aktif ve reaktif gücün simule edilmesinin ardından, rotor hızı, rüzgâr hızı ve her türbine ait pitch açısı scope üzerinden izlenebilmektedir. Ayrıca B25 barasının değerlerini gösteren scope bloğu üzerinden de 25 kV'luk bara üzerinden STATCOM tarafından üretilen reaktif güç değerleri de izlenebilmektedir. Aşağıdaki grafikte SKAG bağlı rüzgâr çiftliğinin simülasyon sonucunda ortaya çıkan değerleri verilmiştir:

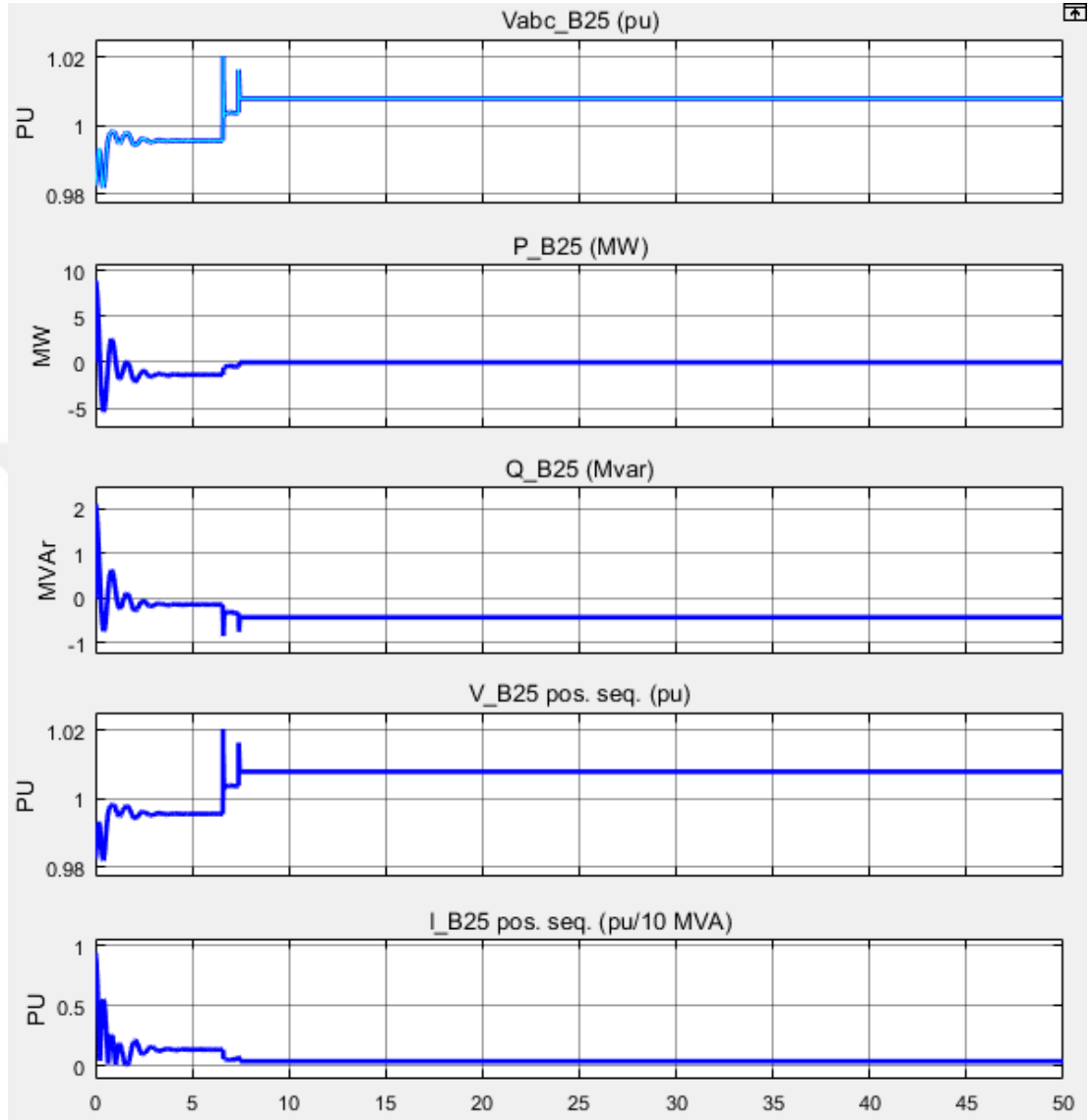


Şekil 4.4: SKAG modelinde 3-6 m/s rüzgar hızı değişimi.

SKAG tarafından çekilen reaktif gücün bir kısmı, her bir türbine bağlı düşük gerilim baralarına bağlı bulunan 400 kVAr'lık kapasitor gruplarından sağlanmaktadır. Geriye kalan reaktif güç, 25 kV'luk gerilime sahip B25 barasından sağlanır. 3 MVar gücündeki STATCOM gerilimin per-unit değerinin 1 civarında kalmasını sağlar. SKAG konfigürasyonunda rüzgâr hızında yaşanan değişimin reaktif güç ve aktif güçte neden olduğu değişiklikler yukarıdaki şekilde görülmektedir. Nominal rüzgâr hızı 9 m/s'ye olarak ayarlandığından bu hızın altındaki değerlerde SKAG aktif güç üretmemektedir yada üretilen güç çok düşük seviyede kalmaktadır. Rüzgar hızının 3 m/s den 6 m/s'ye çıkmasıyla SKAG aktif güç üretmez, dolayısıyla reaktif güçte harcamamaktadır. 25 kV'luk barada gerilim seviyesi sabit kalmaktadır, çünkü

generatörün çektiği reaktif güç çok düşük olduğundan bara geriliminin değişimi sınırlı değerlerde kalır.

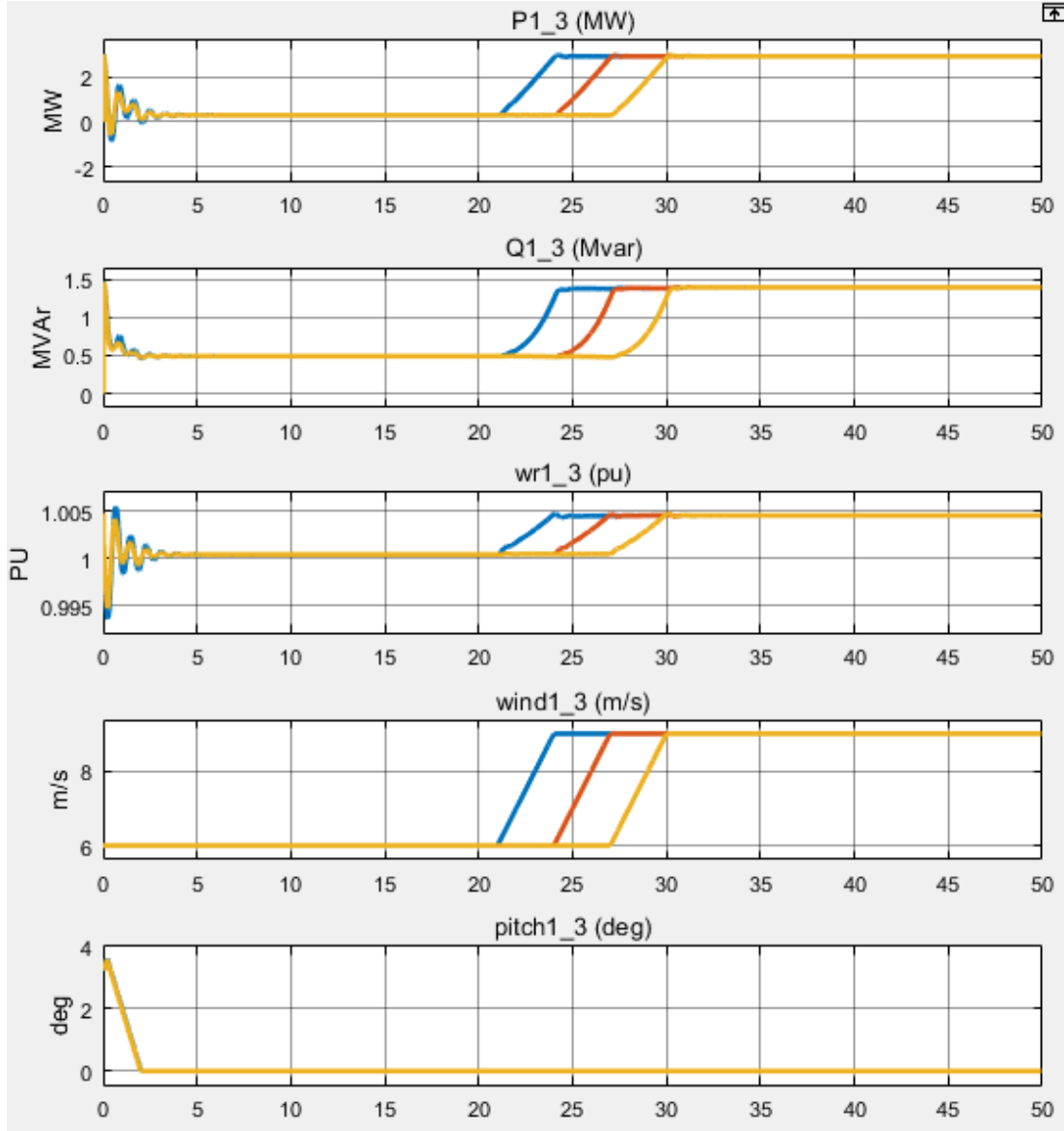
B25 barası üzerinde okunan değerler aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.5: SKAG modelinde 3-6 m/s hız değişiminde B25 barasında okunan değerler.

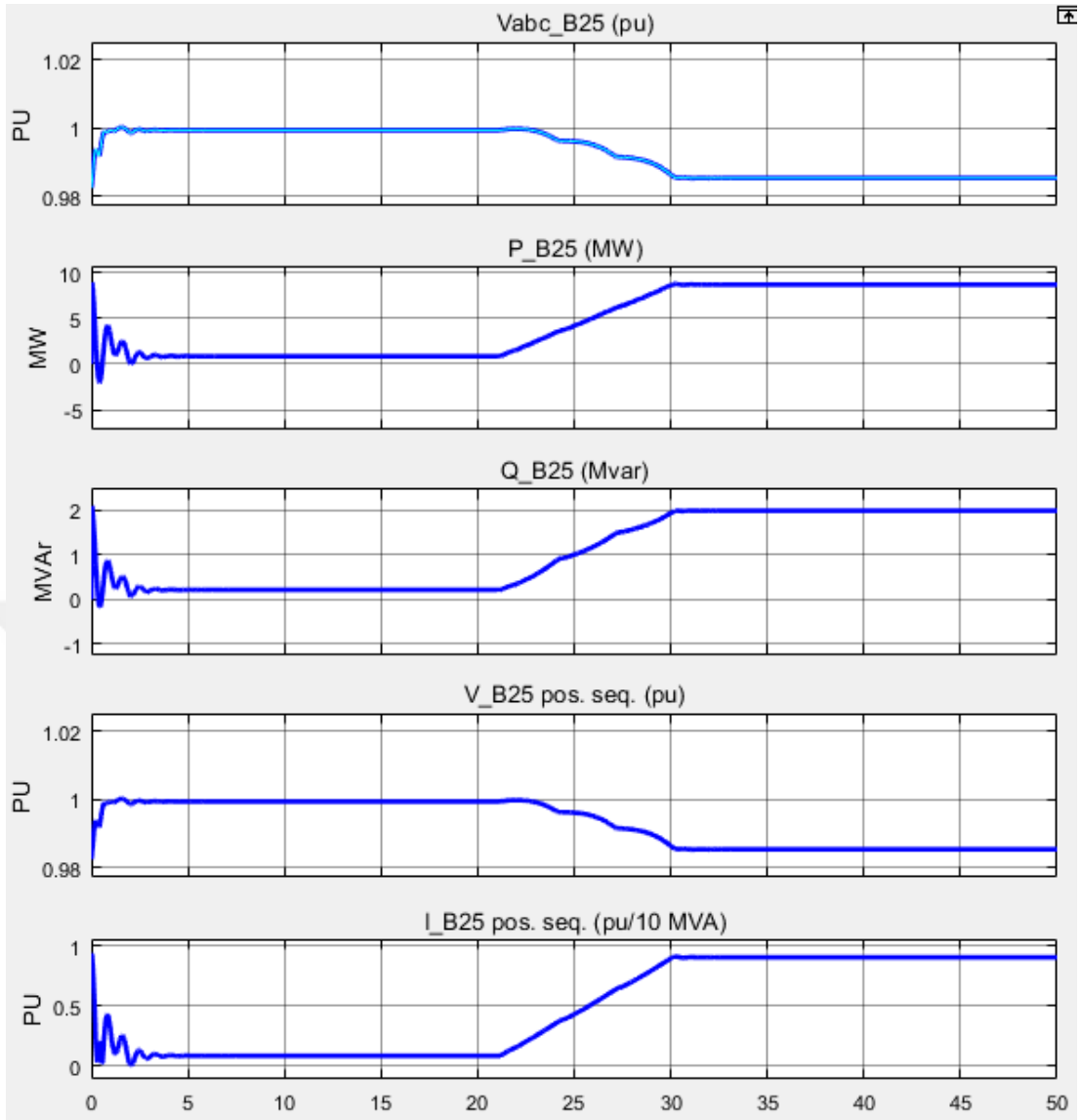
SKAG bağlı rüzgâr türbini 6-9 m/s hız aralığında çalışması simule edildiğinde, ortaya çıkan aktif ve reaktif güçteki değişimler aşağıdaki şekilde görülmektedir. Rüzgar çiftlikleri için nominal rüzgâr hızı iki rüzgâr türbine içinde 9 m/s seçilmiştir. Reaktif güç tüketimi rüzgâr hızının artmasıyla beraber artar, her üç türbinde 3'er MW'lık nominal güç değerine ulaştığında, türbin başına reaktif güç değeri 1.5 MVar değerine ulaşır ve sabitlenir çünkü türbin aktif güç kapasitesinin tamamına ulaşmıştır. Rüzgar hızı 9 m/s'ye ulaştığında her üç türbinde nominal aktif güç değeri olan 3 MW'a ulaşır, aktif güç sabitlenir, ve pitch açısı 0'da kalmaya devam eder. Wr

generatörün rotor dönüş hızı rüzgâr hızındaki değişime paralel olarak davranmaktadır. Rüzgar hızındaki basamak artışı sonrası, küçük sapmalarla beraber rotor hızı yaklaşık olarak 1 p.u değerinde sabit kalmaktadır.



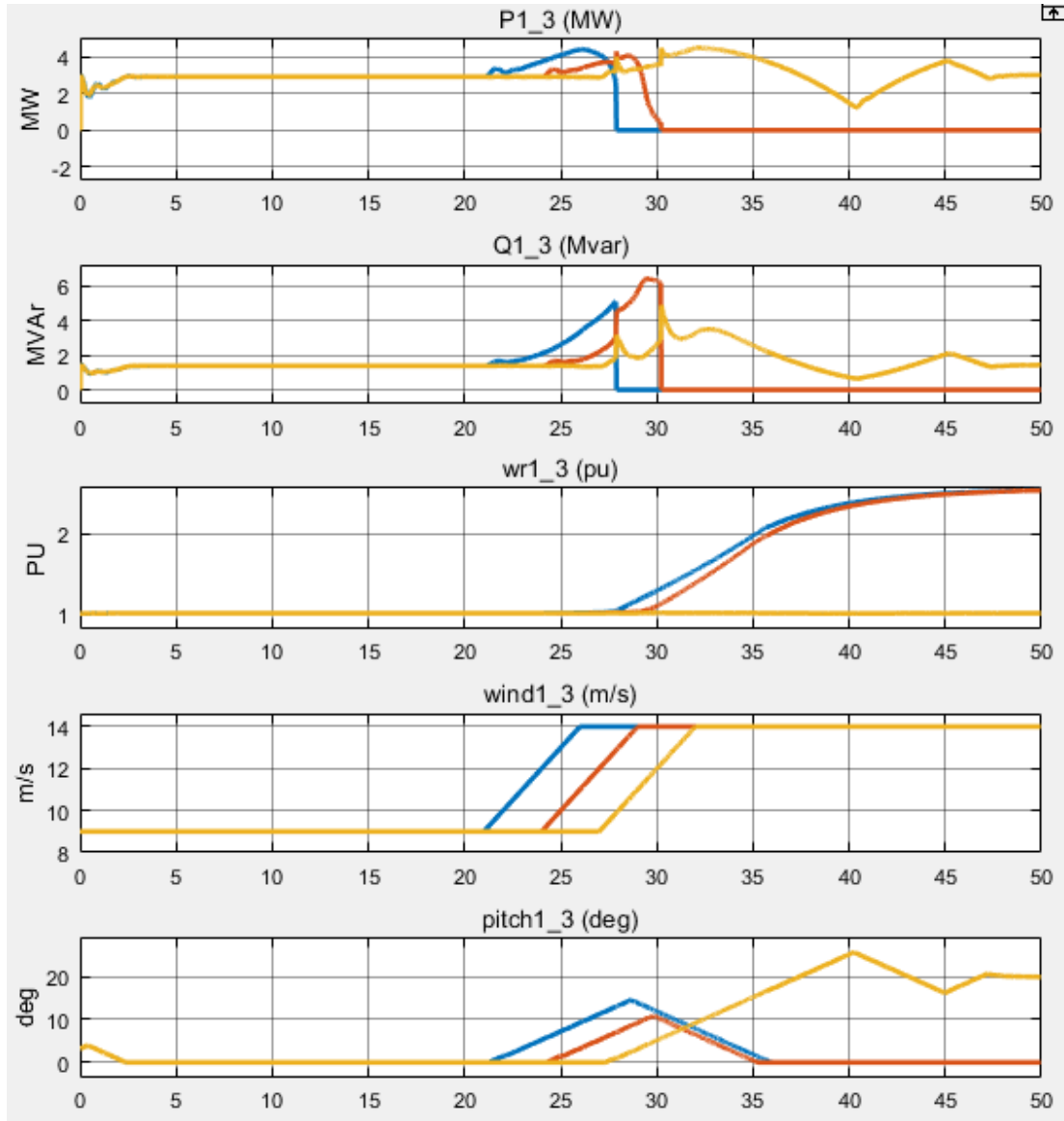
Şekil 4.6: SKAG modelinde 6-9 m/s rüzgar hızı değişimi.

B25 barasına baktığımızda gerilim değerinin hızla düştüğünü görürüz. Bunun sebebi SKAG bağlı türbinlerin, rüzgâr hızı değişimine verdikleri hızlı cevabın sonucu olarak, tükettikleri reaktif gücün artmasıdır.



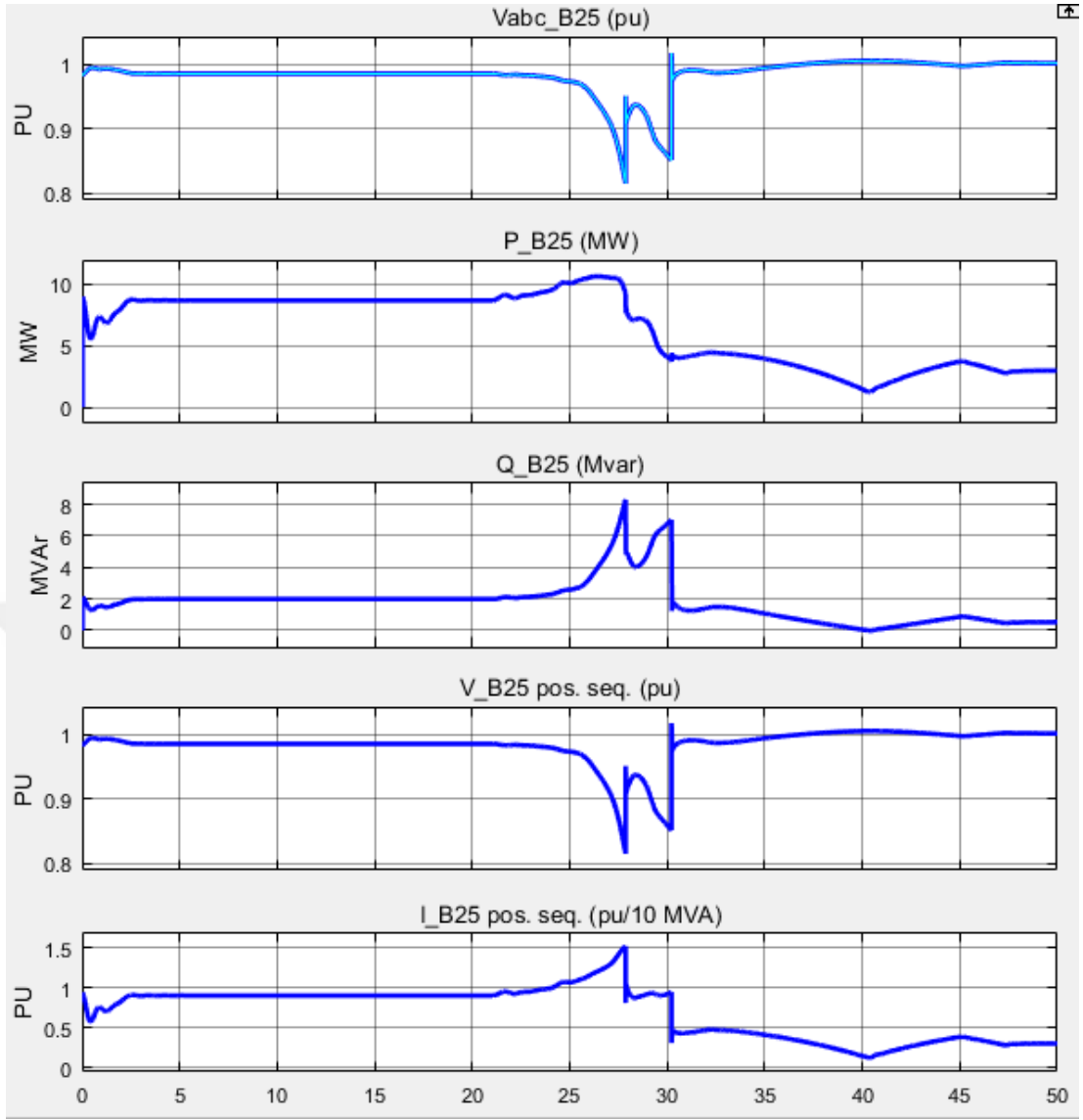
Şekil 4.7: SKAG modelinde 6-9 m/s hız değişiminde B25 barasında okunan değerler.

9-14 m/s aralığındaki rüzgâr hızı değişiminde rüzgâr türbinleri cut-off hızına yakın rüzgâr hızlarında çalışmaktadır. SKAG bağlı türbinlerde 3. türbinin W_r rotor hızı sabit değerde kalırken, 1. ve 2. türbinlerde rotor hızının asri artmasından dolayı, cut-off limitine ulaşılmış, ve türbinlerden devreden çıkmışlardır. Türbinin ürettiği aktif güç değeri 3 MW değerini aştığında, aktif güç değerini nominal seviyeye indirebilmek için pitch açısı değiştirilir. Reaktif güç değeri de, rüzgâr hızındaki değişimi takip etmektedir, ilk iki türbin yüksek hızlı çalışmadan ötürü devreden çıktığında, 3.türbin reaktif güç üretmeye 1.8 MVar değeri civarında devam etmektedir.



Şekil 4.8: SKAG modelinde 9-14 m/s rüzgar hızı değişimi.

B25 barasında başlangıçta rüzgâr hızı 9 m/s olduğu için reaktif güç sabit devam etmekte ancak sonradan rüzgâr hızının 14 m/s'ye çıkmasıyla hızlı bir şekilde reaktif güç çekilmekte devamında rüzgâr 1. ve 2. rüzgâr türbinlerinin yüksek hızdan ötürü devreden çıkmasıyla, çekilen reaktif güç değeri hızla azalmaktadır. B25 barasının gerilimi değeri, hızla çekilen reaktif güç yüzünden hızla azalmıştır.



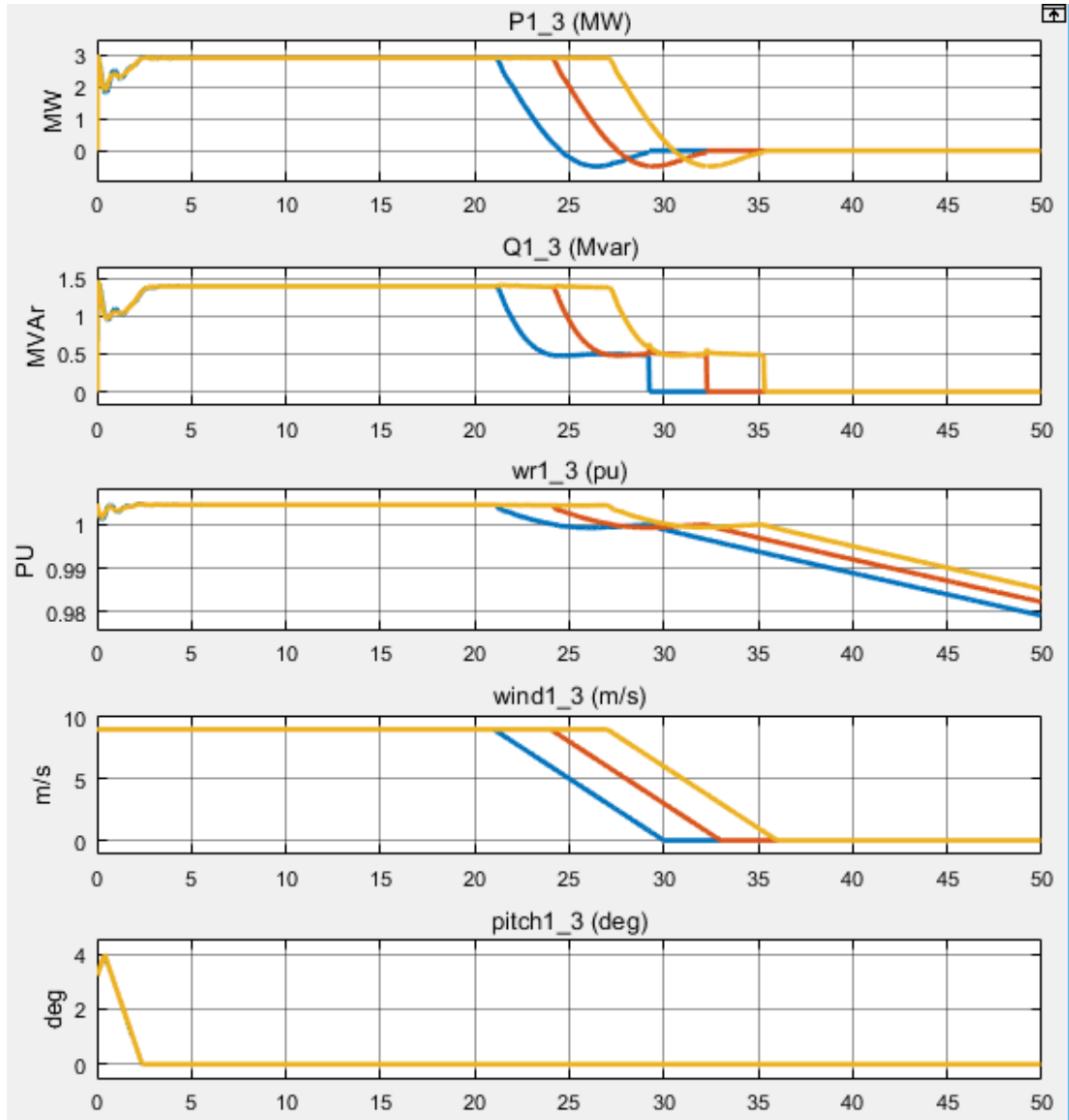
Şekil 4.9: SKAG modelinde 9-14 m/s hız değişiminde B25 barasında okunan değerler.

4.3.1.2 SKAG modelinde rüzgar hızının birden sıfıra düştüğü durum

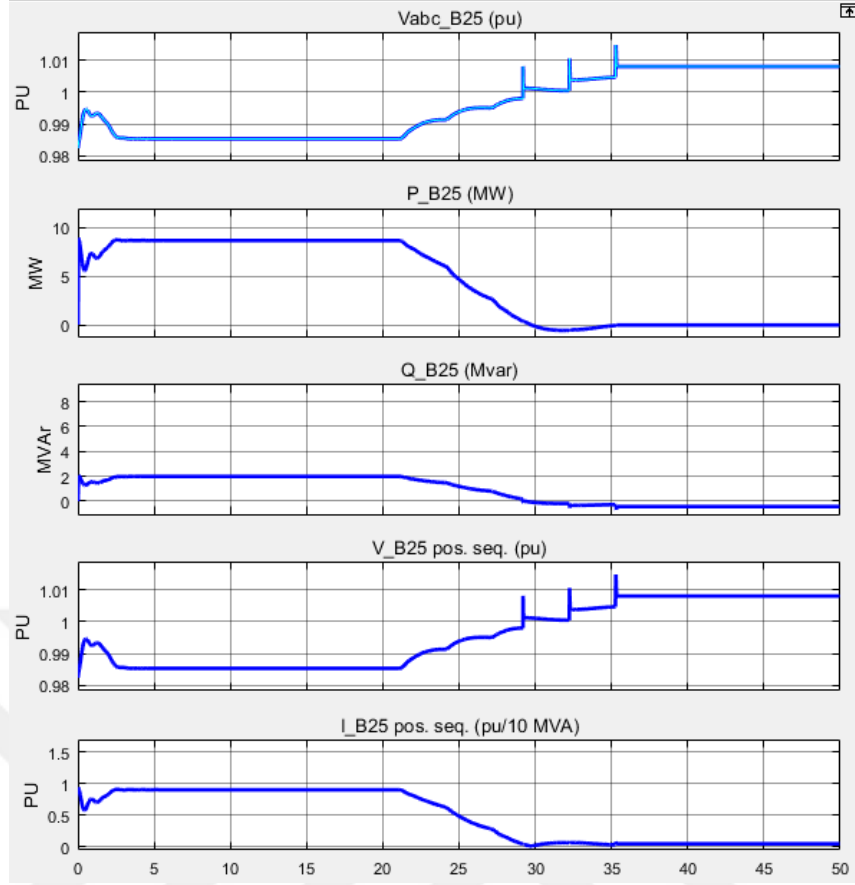
SKAG bağlı rüzgar çiftliği modelinde rüzgar hızının $t=21s$ 'den başlayarak aniden 9m/s mertebelerinden, 0 m/s'ye inmesi sonucu türbin ve orta gerilim hattında ölçülen değerler incelenmiştir.

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi W_r türbin motor hızı 1 pu seviyelerinde seyretmektedir. Santralin ürettiği aktif güç $t=35s$ de 0MW a, reaktif güç 0 MVar a düşmektedir.

Şebeke tarafında ise Şekil 4.11'de görüleceği üzere B25 barasındaki gerilim 0,0015pu artmıştır.



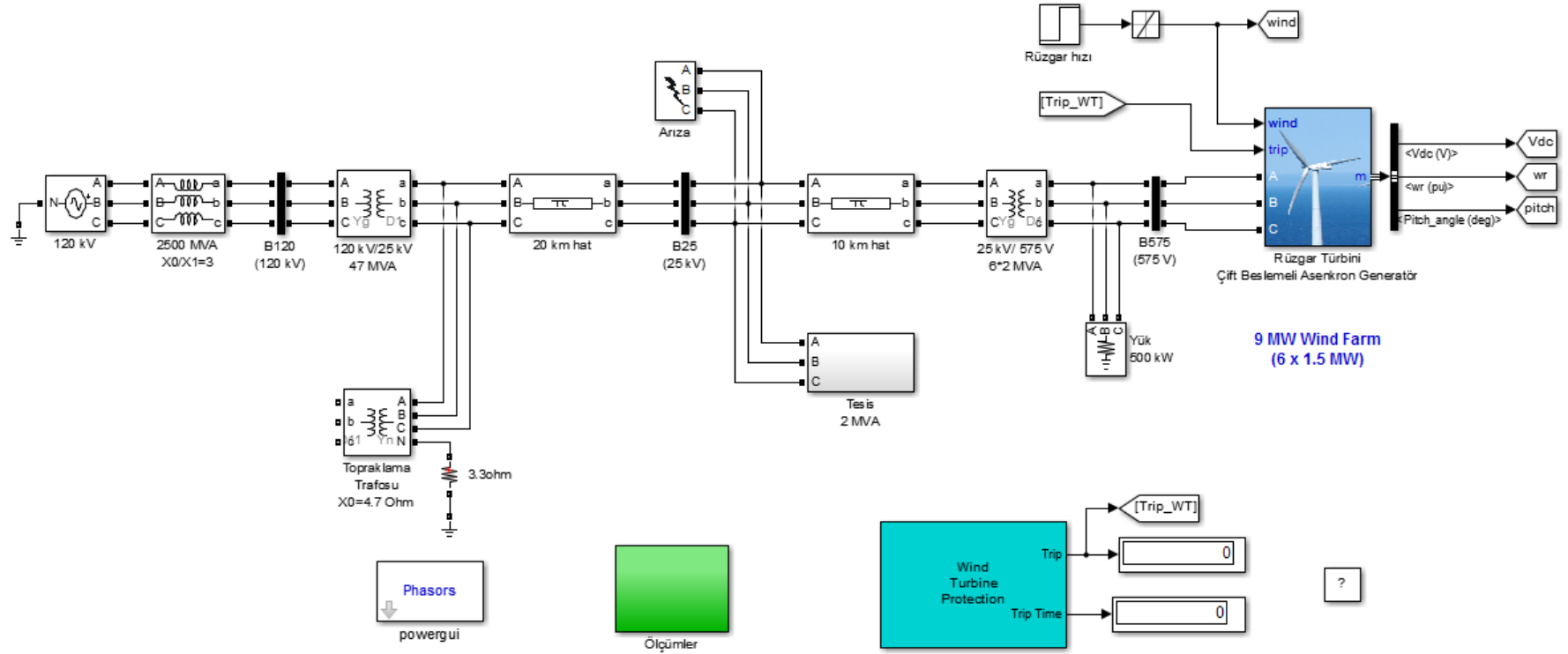
Şekil 4.10: Rüzgar aniden kesildiğinde SKAG bağlı rüzgar çiftliğinin tepkisi.



Şekil 4.11: Rüzgar aniden kesildiğinde SKAG bağlı rüzgar çiftliğinin barasının tepkisi.

4.3.2 Simulinkte çift beslemeli asenkron generatör modeli

Çift Beslemeli Asenkron Generatörü değişken hızlı asenkron makinelerden biridir. Günümüzde çoğu modern rüzgâr türbinin de sıklıkla ÇBAG kullanılmaktadır. Simülasyonda, generatör çıkış gerilimi 575 V, orta gerilimli iletim hattı 25 kV ve yüksek gerilimli iletim hattı için 120kV kabul edilmiştir. Orta gerilim barasına 575 V/25 kV 12 MVA gücünde bir transformatör bağlanmıştır generatörün çıkışında ise 500 kW gücünde yük vardır. 10km’lik orta gerilim iletim hattıyla trafonun çıkışı şebekeye bağlanmaktadır. 25 kV barasına 2 MVA, 1.68 MW, 2300 V gerilime ve 0,93 güç faktörüne sahip indüksiyon motoru ve 200kW lık omik yük içeren bir tesis bağlanmıştır. Orta gerilim şebekesinde bir nötr noktası oluşturması bakımından topraklama trafosu vardır. Orta gerilim barası, 25 kV/120 kV çevirme oranı ve 47MVA gücünde bir transformatör ile yüksek gerilim hattına bağlanmış ve 120 kV luk şebeke ’nin kısa devre gücü 2500 MVA olarak alınmıştır.

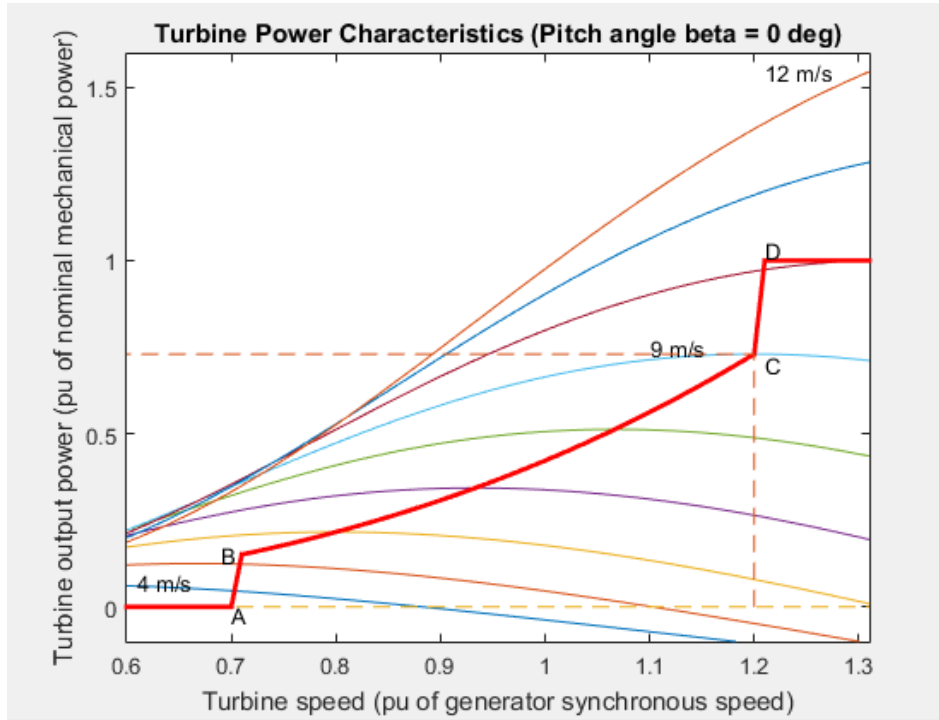


Rüzgar Çiftliği (ÇBAG Fazör Model)

Şekil 4.12: ÇBAG bağlı rüzgar çiftliği simülasyon modeli.

Çizelge 4.2 : ÇBAG simülasyon konfigürasyonunda kullanılan parametreler

Generatör Parametreleri	
Nominal Güç (VA)	6x1,5 MW/0,9 MVA
Faz-faz gerilimi Vrms	575 V
Frekans (Hz)	50
Rs Stator direnci (pu)	0,00706
Ls Stator kaçak reaktansı (pu)	0,171
Rotor Rr direnci (pu)	0,005
Rotor Lr enduktansı (pu)	0,156
Lm Mıknatıslanma enduktansı (pu)	2,9
Eylemsizlik sabiti(H)	5,04 MW/MVA
Sürtünme sabiti(pu)	0,01
Kutup sayısı	3
Türbin Parametreleri	
Nominal türbin mekanik çıkış gücü (MW)	2x1,5 MW
İzleme karakteristik hızı (A,B,C,D hızları (pu))	0,7- 0,71-1,2-1,21
C noktasındaki mekanik güç (pu)	0,73
C noktasındaki rüzgâr hızı (m/s)	12
Pitch açısı kontrolcüsü kazancı (Kp)	500
Maksimum pitch açısı (derece)	45
Maksimum pitch açısı değişim oranı (der/s)	2
Santralin bağlandığı 25kV luk barada şebekenin kısa devre gücü	115,15 MVA



Şekil 4.13: ÇBAG modelinde rüzgar hızına göre türbin hızının türbin mekanik gücü fonksiyonu olarak gösterimi.

Yukarıdaki şekilde, türbin hız-güç eğrisi aerodinamik ve üretilen güç değerlerini gösterir. Düşük hız değerlerinde, çıkış gücü işletilmek için çok düşüktür. Rüzgar hızı 3-4 m/s'yi aştığında türbin çalışmaya başlar. Ayrıca 5 m/s hızı aşıldığında, çıkış gücü, nominal değerine ulaşana kadar rüzgâr hızının küpüyle orantılı olarak artış gösterir.

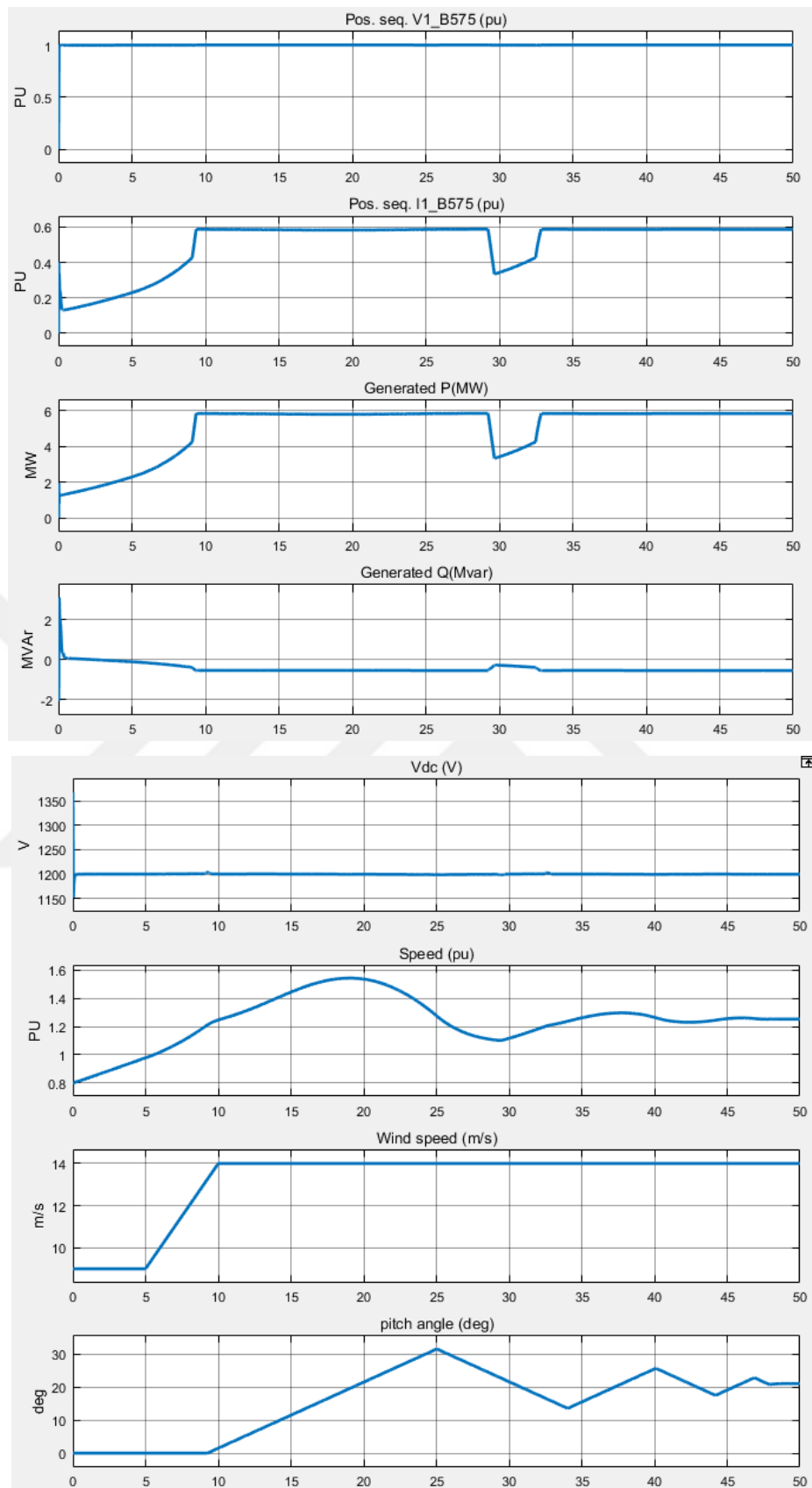
Rüzgar hızı 12 m/s ila 25 m/s arasındayken ise üretilen güç stall veya pitch kontrolcülerini ile sınırlandırılır. 20-25 m/s üzerindeki hızlarda, yüksek mekanik yüklerden korunmak amacıyla türbin durdurulur. Bölüm 2 de bahsedildiği üzere bu hız cut-out hız değeridir.

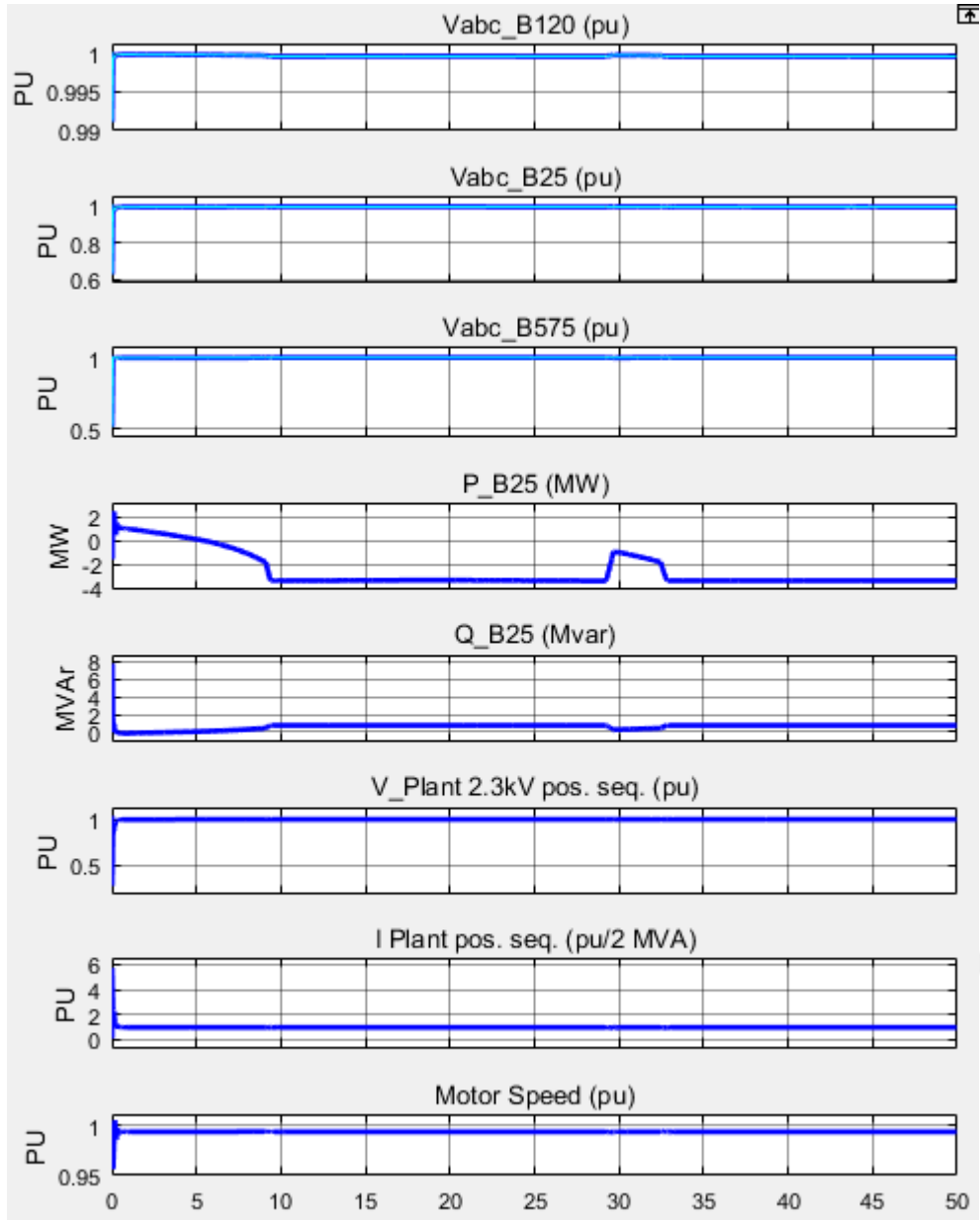
4.3.2.1 Şebeke bağlantı kriteri analizi (%5 - %10 - %20)

Şebekeye enterkonnekte bir biçimde bağlı olan rüzgar çiftliğinin gücü sırasıyla 6MW, 12MW ve 24MW olarak arttırılıp, şebeke ve rüzgar çiftliğinin verdiği tepkiler incelenecektir. Bu güç değerleri santralin şebekeye bağlandığı 25 kV luk barada şebekenin kısa devre gücü olan 115,15 MVA nın yaklaşık olarak %5, %10 ve %20 lik değerlerine karşılık gelmektedir. Simülasyon rüzgar hızının 9-14 m/s basamak değişikliği olması durumu için yapılacaktır.

Şebeke bağlantı kriteri analizi – %5

Şekil 4.14'e bakılırsa rüzgar hızı basamak değerinin 9m/s den 14 m/s ye t=5 s de çıktığı durum için, t=33 s sonunda, rüzgar çiftliği 6 MW güç üretmektedir. W_r türbin hızı 0,8pu değerinden 1,2pu değerine çıkmıştır. Pitch açısı 0 dereceden mekanik gücü kısıtlamak için 0,79 dereceye çıkmıştır. Rüzgar çiftliği kendisine bağlı yükleri besleyerek normal çalışmasına devam etmektedir.



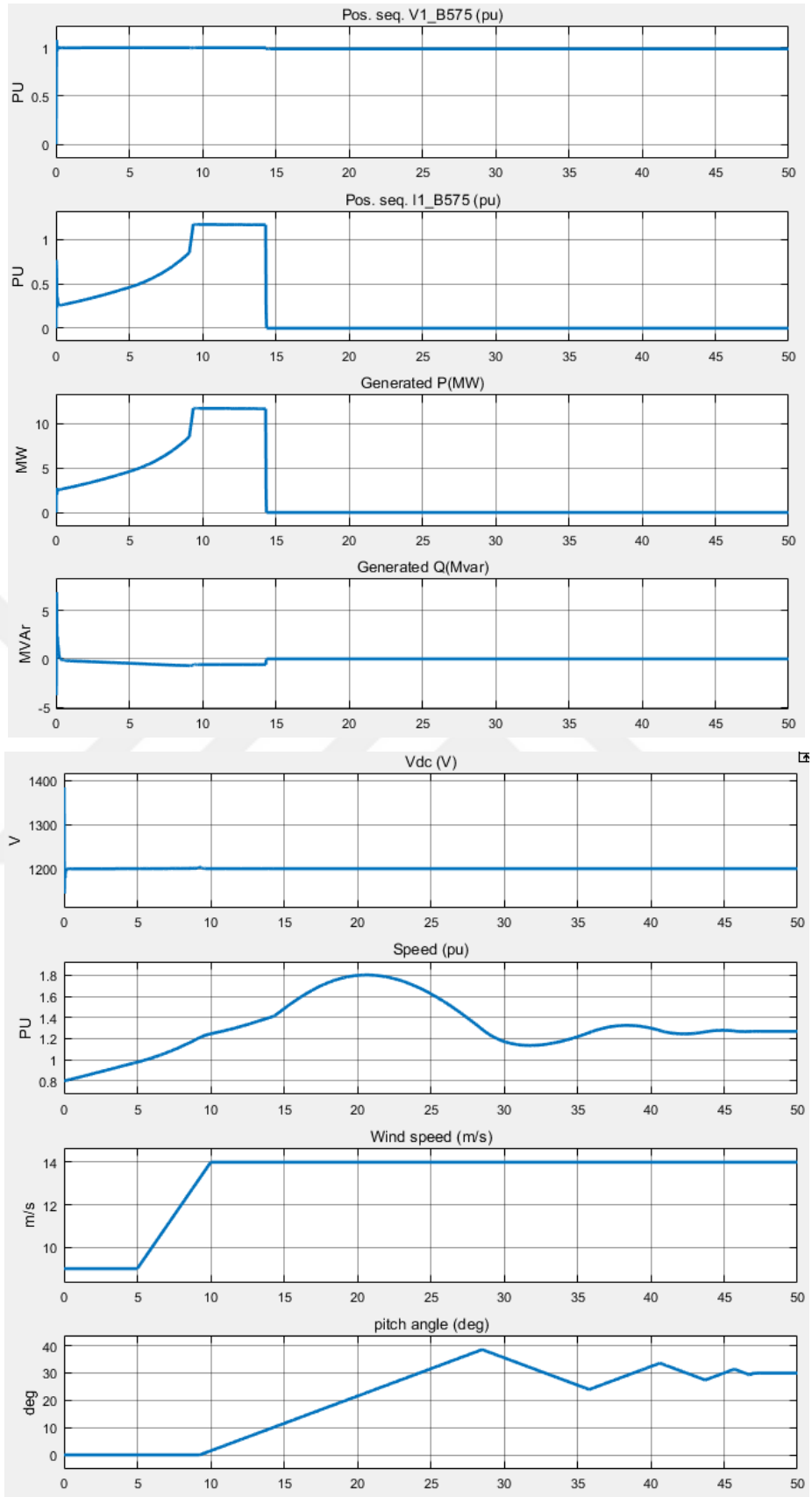


Şekil 4.14: Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %5'i iken rüzgar santralinin tepkisi.

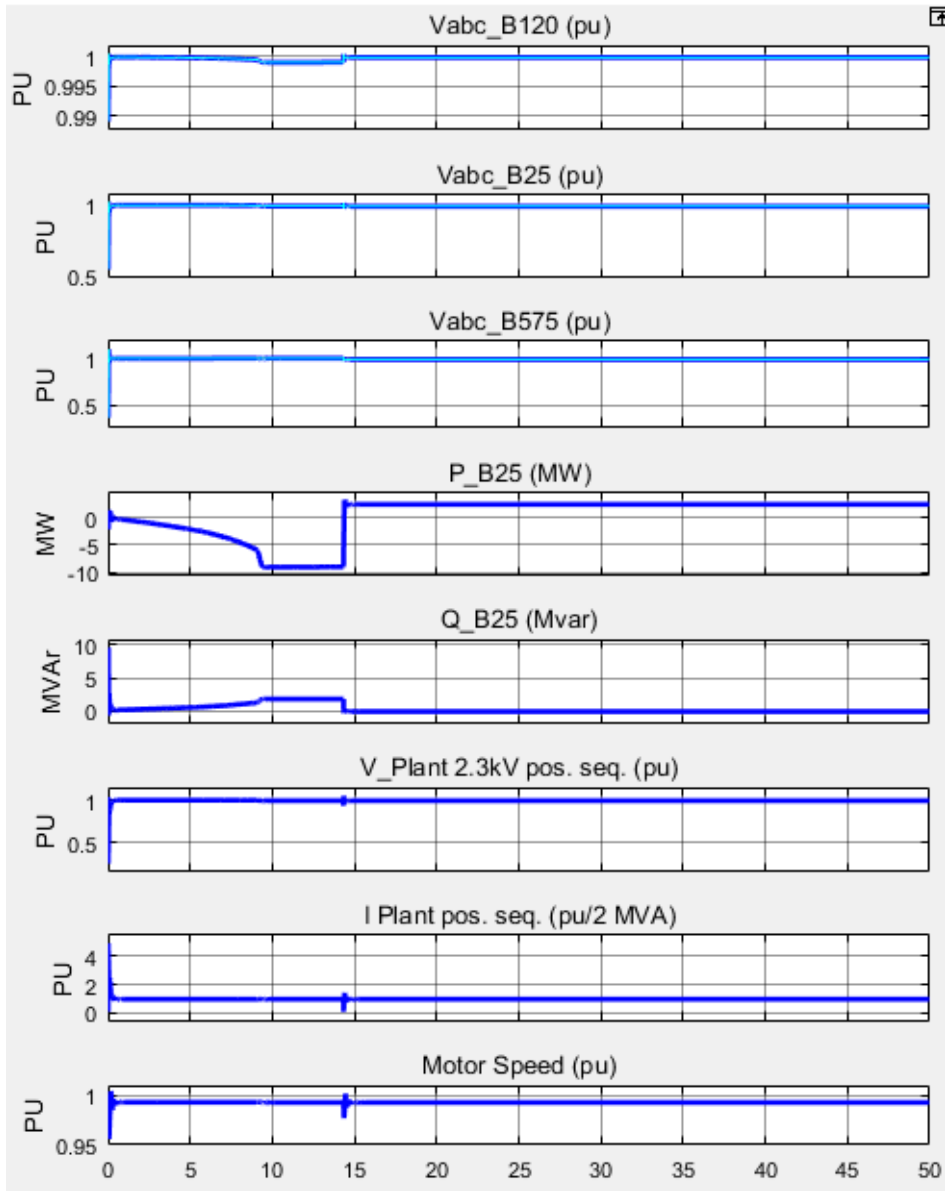
Şebeke bağlantı kriteri analizi – %10

Şekil 4.15'e bakılırsa rüzgar hızı basamak değerinin 9m/s den 14 m/s ye t=5s de çıktığı durum için, t=9 s sonunda, rüzgar çiftliği 12 MW güç üretmektedir. Wr türbin hızı 0,8 pu değerinden 1,2 pu değerine çıkmıştır. Pitch açısı 0 dereceden mekanik gücü kısıtlamak için 0,79 dereceye çıkmıştır. Şekil 4.16'ya bakılırsa, t=14.33s de türbin aşırı akım hatası vererek açma yapıp ve devreden çıkmıştır.

B25 barasındaysa aniden devreden çıkan türbinler sebebiyle ani bir gerilim artışı olmuştur.



Şekil 4.15: Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %10'u iken rüzgar santralının tepkisi.

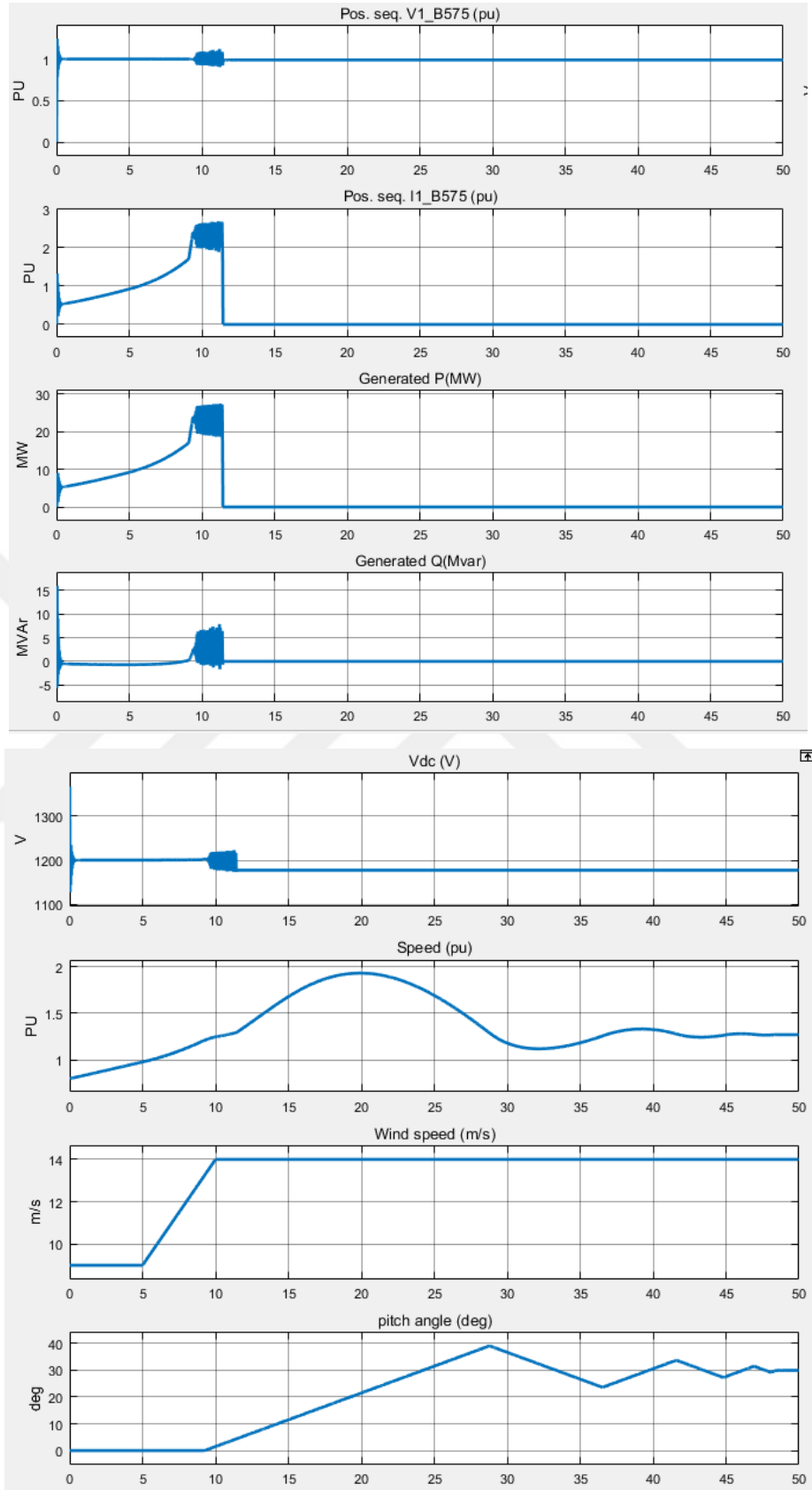


Şekil 4.16: Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %10'u iken şebekenin tepkisi.

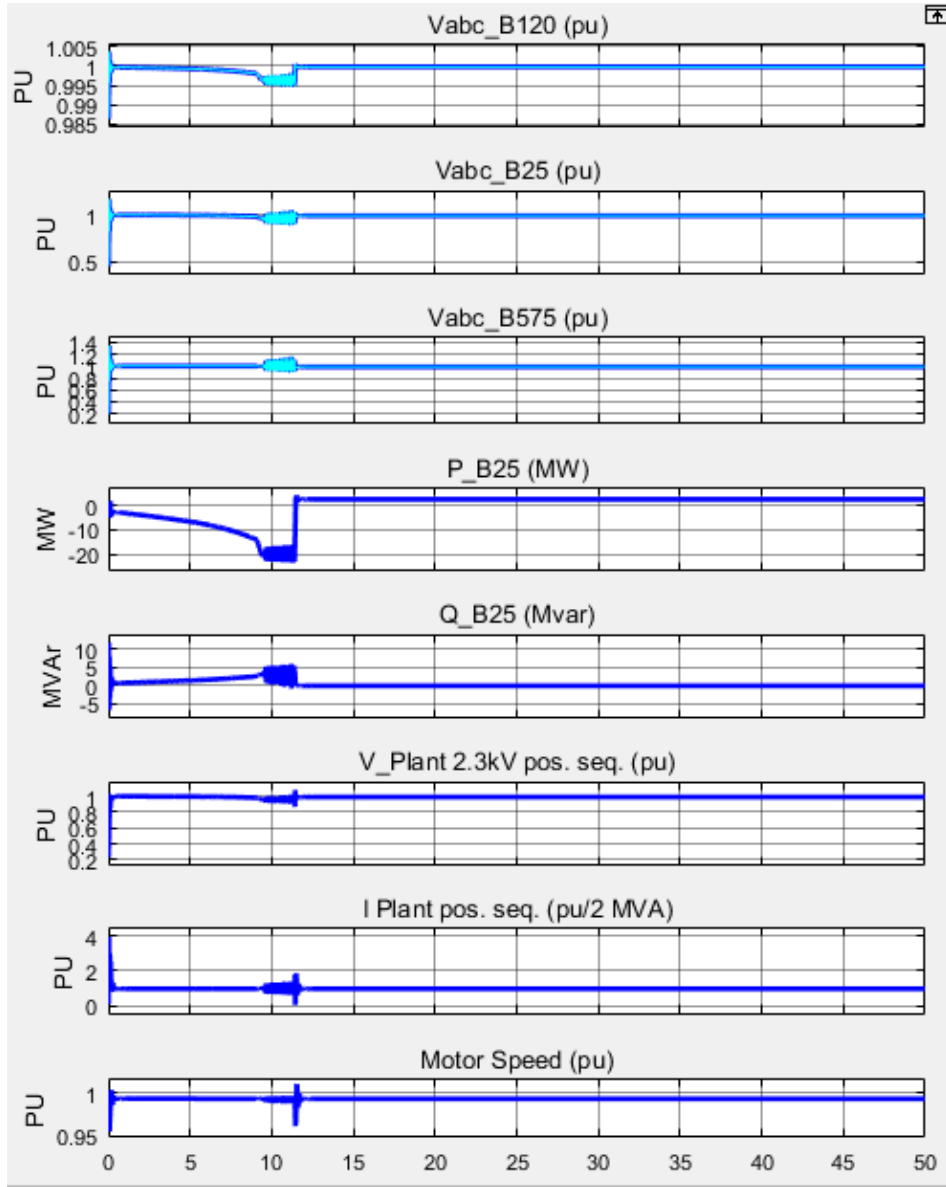
Şebeke bağlantı kriteri analizi – %20

Şekil 4.17 'e bakılırsa rüzgar hızı basamak değerinin 9m/s den 14 m/s ye t=5 s de çıktığı durum için, t=8s sonunda, rüzgar çiftliği 16 MW güç üretmektedir. Wr türbin hızı 0,8 pu değerinden 1,2 pu değerine çıkmıştır. Pitch açısı 0 dereceden mekanik gücü kısıtlamak için 32 dereceye çıkmıştır. Şekil 4.18'e bakılırsa, t=11.43s de türbin aşırı akım hatası vererek açma yapıp ve devreden çıkmıştır.

B25 barasındaysa aniden devreden çıkan türbinler sebebiyle ani bir gerilim artışı olmuştur. Bu sebeple baraya bağlı olan tesis ve yüklerde devreden çıkmışlardır.



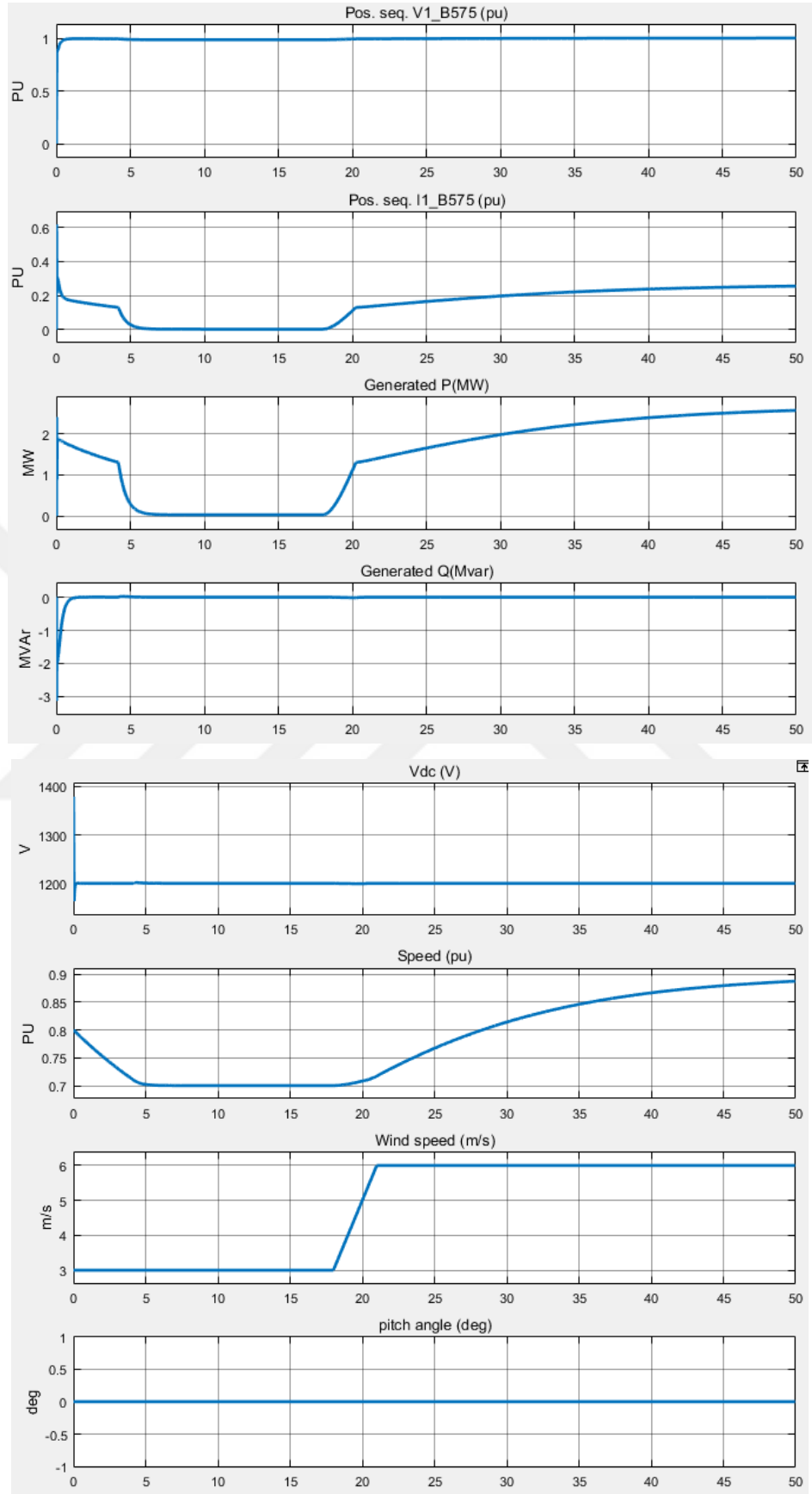
Şekil 4.17: Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %20'si iken rüzgar santralinin tepkisi.



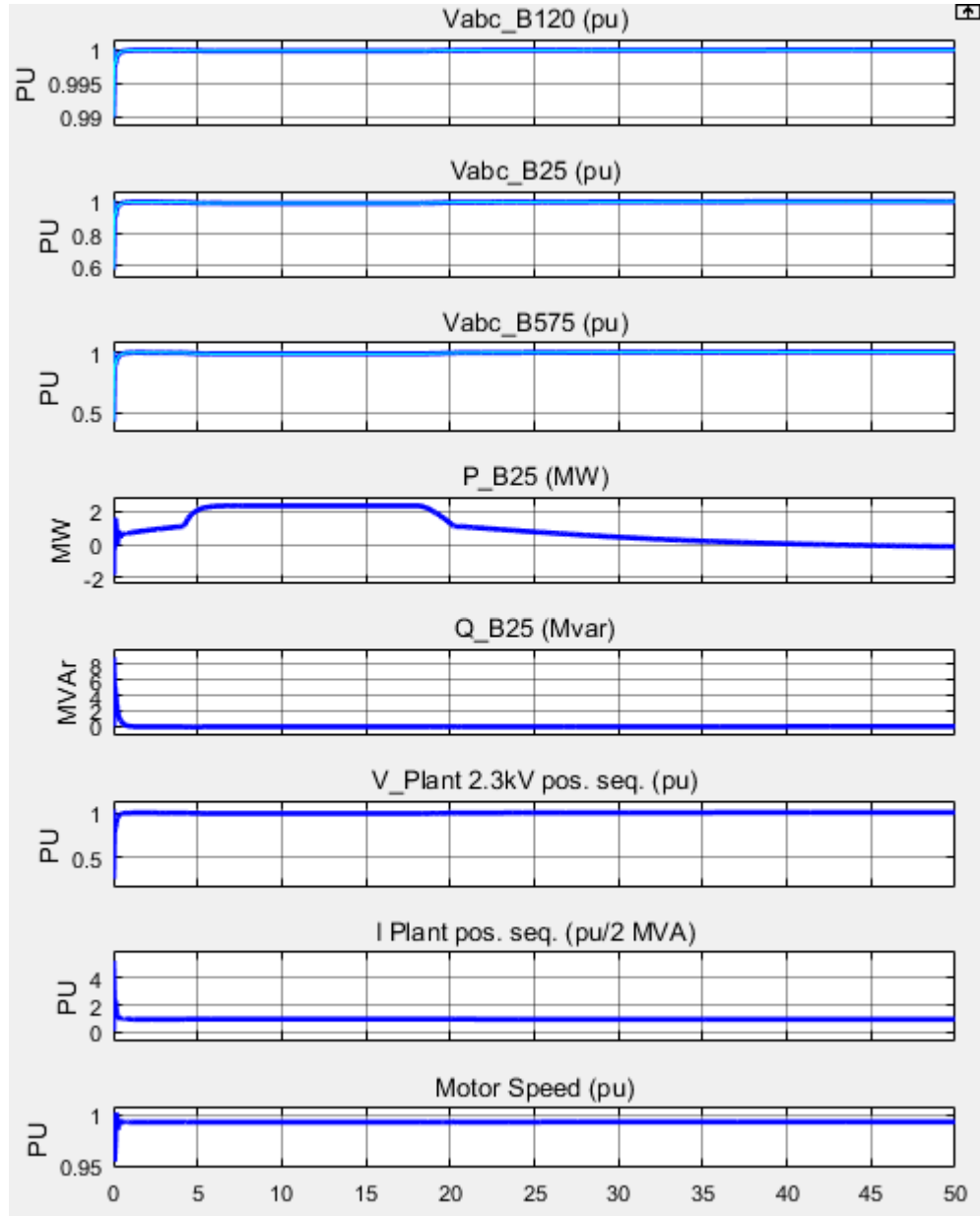
Şekil 4.18: Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %20'si iken şebekenin tepkisi.

4.3.2.2 Rüzgar hızı belli basamaklarda halinde artarken ÇBAG bağlı rüzgar çiftliğinin normal çalışma durumu

Rüzgar hızı 3-6 m/s arasındayken SKAG'den farklı olarak ÇBAG düşük hızlarda da aktif güç üretebildiği için, hız basamak değişimi tamamlandığında üretilen aktif güç miktarı arttığından, tüketilen reaktif güç miktarı da artmıştır. Ancak 3 m/s cut-in hızının altında kaldığından rüzgâr çiftliğinde aktif güç üretilmemekte, dolayısıyla reaktif güç tüketimi de olmamaktadır. 25. saniyeden itibaren, üretilen aktif güç, buna bağlı çekilen reaktif güç, ve B25 barasının geriliminde ki değişim izlenebilmektedir.

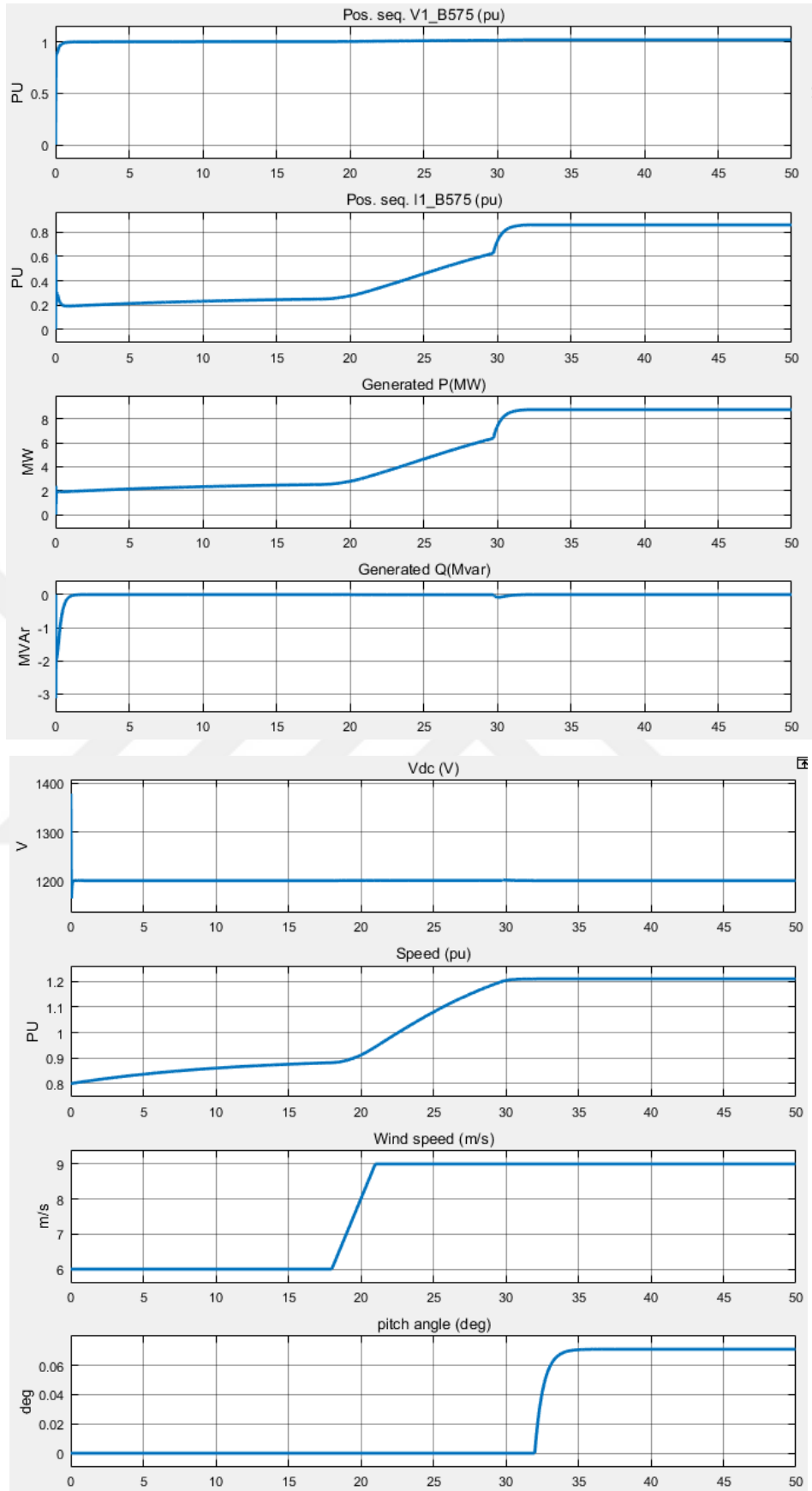


Şekil 4.19: ÇBAG modelinde 3-6 m/s rüzgar hızı değişimi.

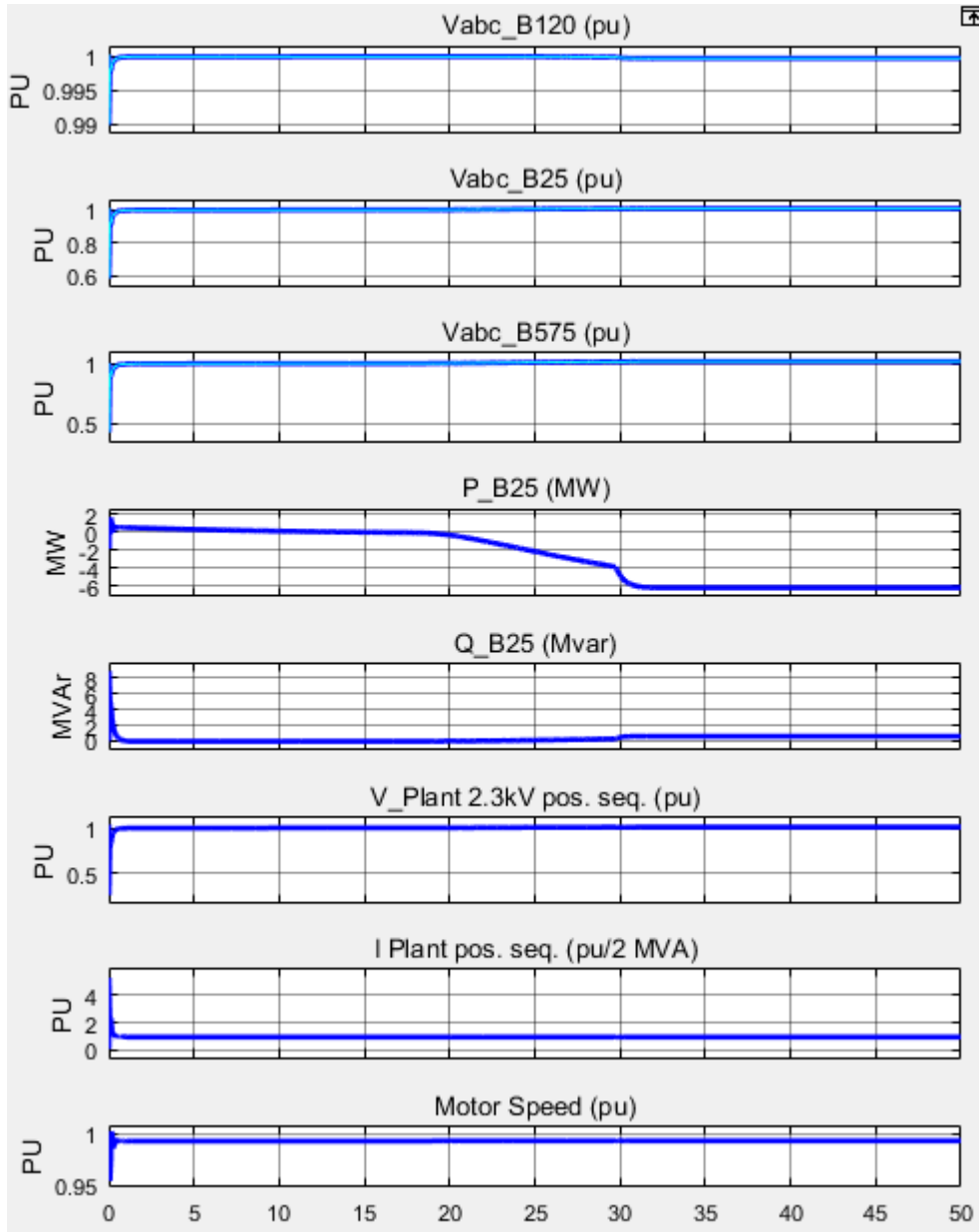


Şekil 4.20: ÇBAG modelinde 3-6 m/s hız değişiminde B25 barasında okunan değerler.

Aşağıdaki şekilde 6-9 m/s rüzgâr hızı basamak değişikliğinde türbinin verdiği tepki gösterilmektedir. W_r türbin hızı, rüzgâr hızında yaşanan değişikliği takip etmemektedir ancak giderek artmaktadır. Üretilen aktif güç ise rotor hızındaki değişikliği takip ederek, buna paralel olarak artış göstermekte ve nominal değerine ulaştığındaysa sabitlenmektedir.

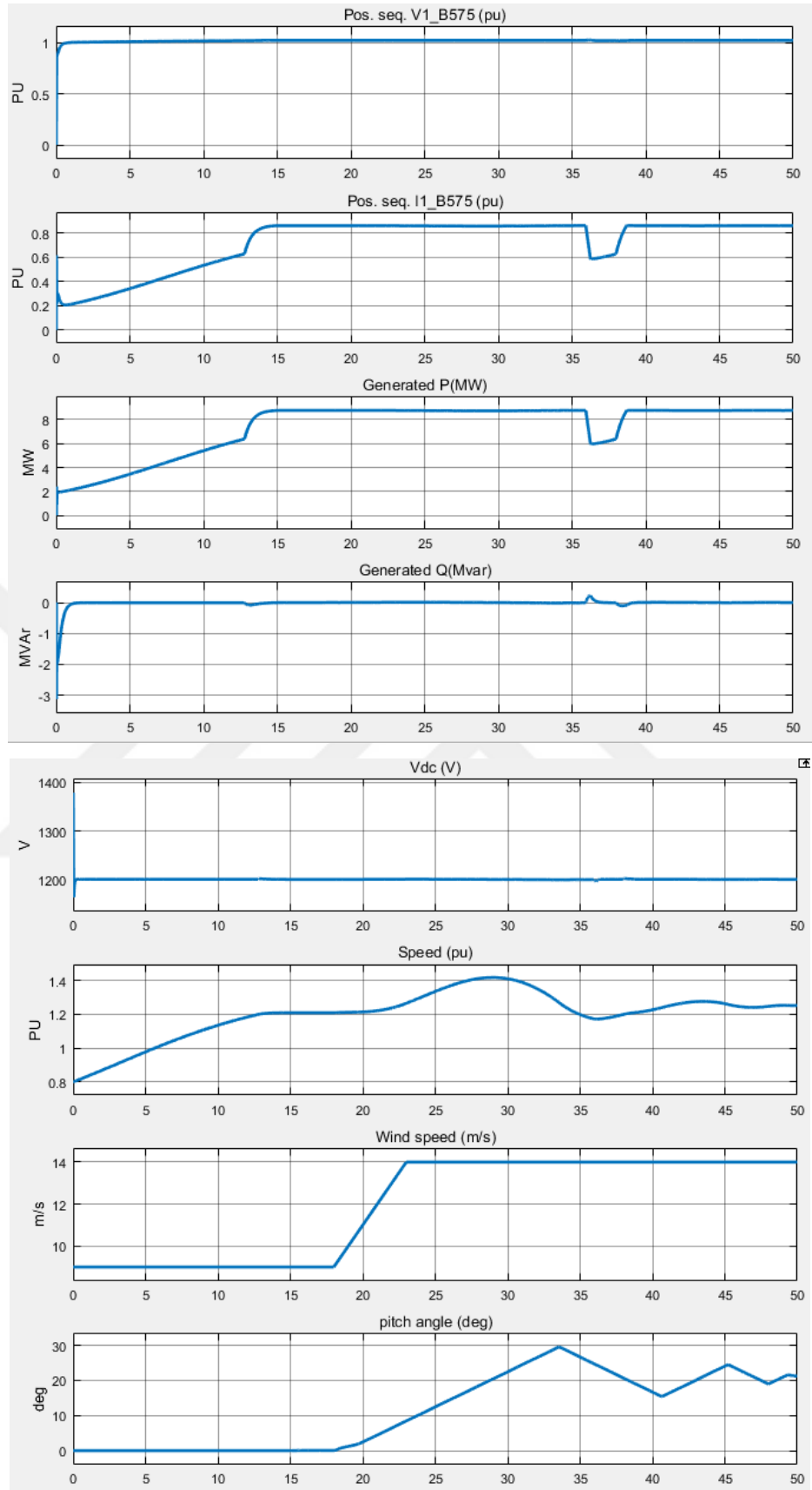


Şekil 4.21: ÇBAG modelinde 6-9 m/s rüzgar hızı değişimi.

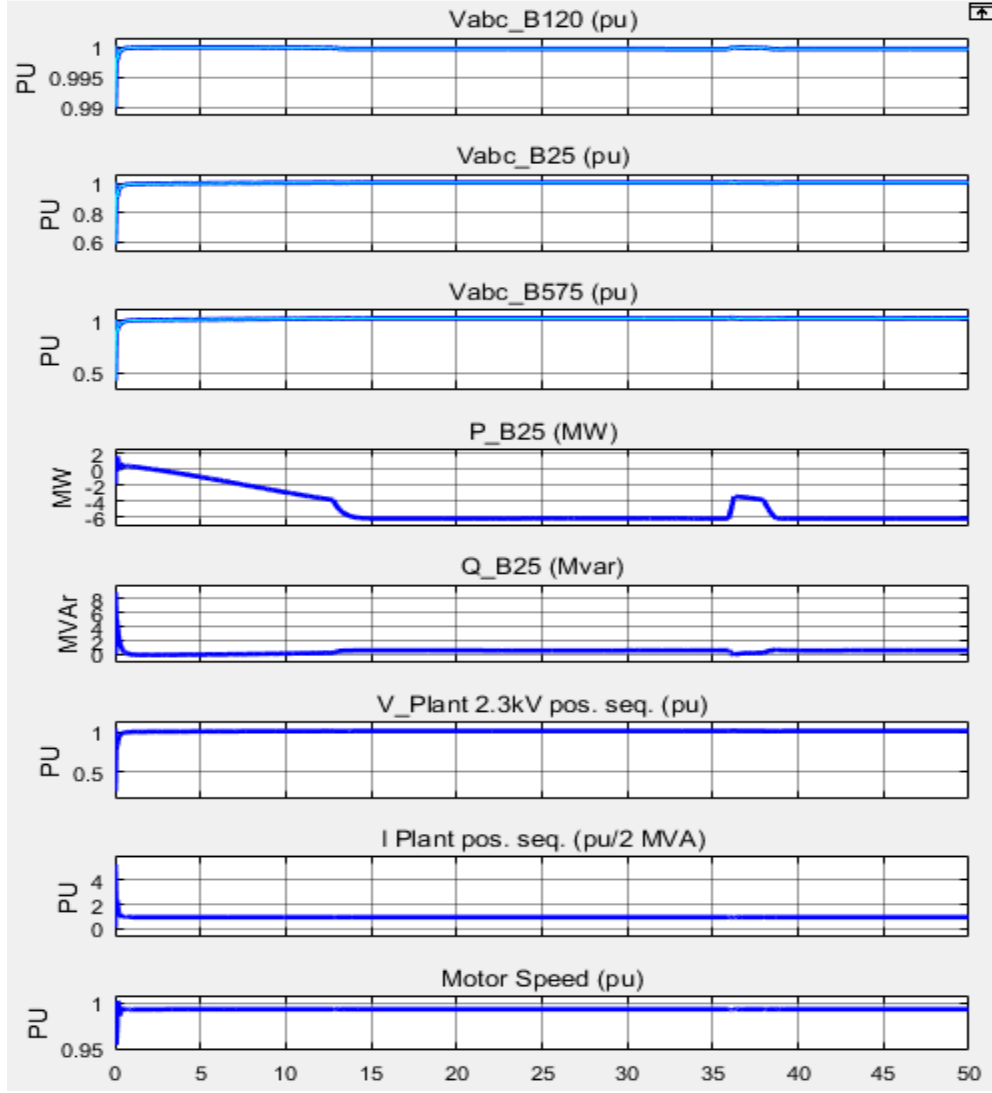


Şekil 4.22: ÇBAG modelinde 6-9 m/s hız değişiminde B25 barasında okunan değerler.

Aşağıdaki grafikte ÇBAG bağlı rüzgâr çiftliğinde 9-14 m/s rüzgâr hızı basamak değişikliğinde rotor hızı W_r nin rüzgâr hızındaki değişikliği takip etmediğini görüyoruz. W_r hızı 0.8 p.u değerinden 1.3 p.u değerine çekmiştir. Aktif güç artışı, rüzgâr hızındaki değişikliğe göre değişmektedir, ancak türbin grupları nominal değerleri olan 9 MW' a ulaştıklarında pitch kontrolcülerini devreye girerek gücü sınırlandırmakta, ve güç sabitlenmektedir. Reaktif güç ise neredeyse sabit kalmaktadır.



Şekil 4.23: ÇBAG modelinde 9-14 m/s rüzgar hızı değişimi.



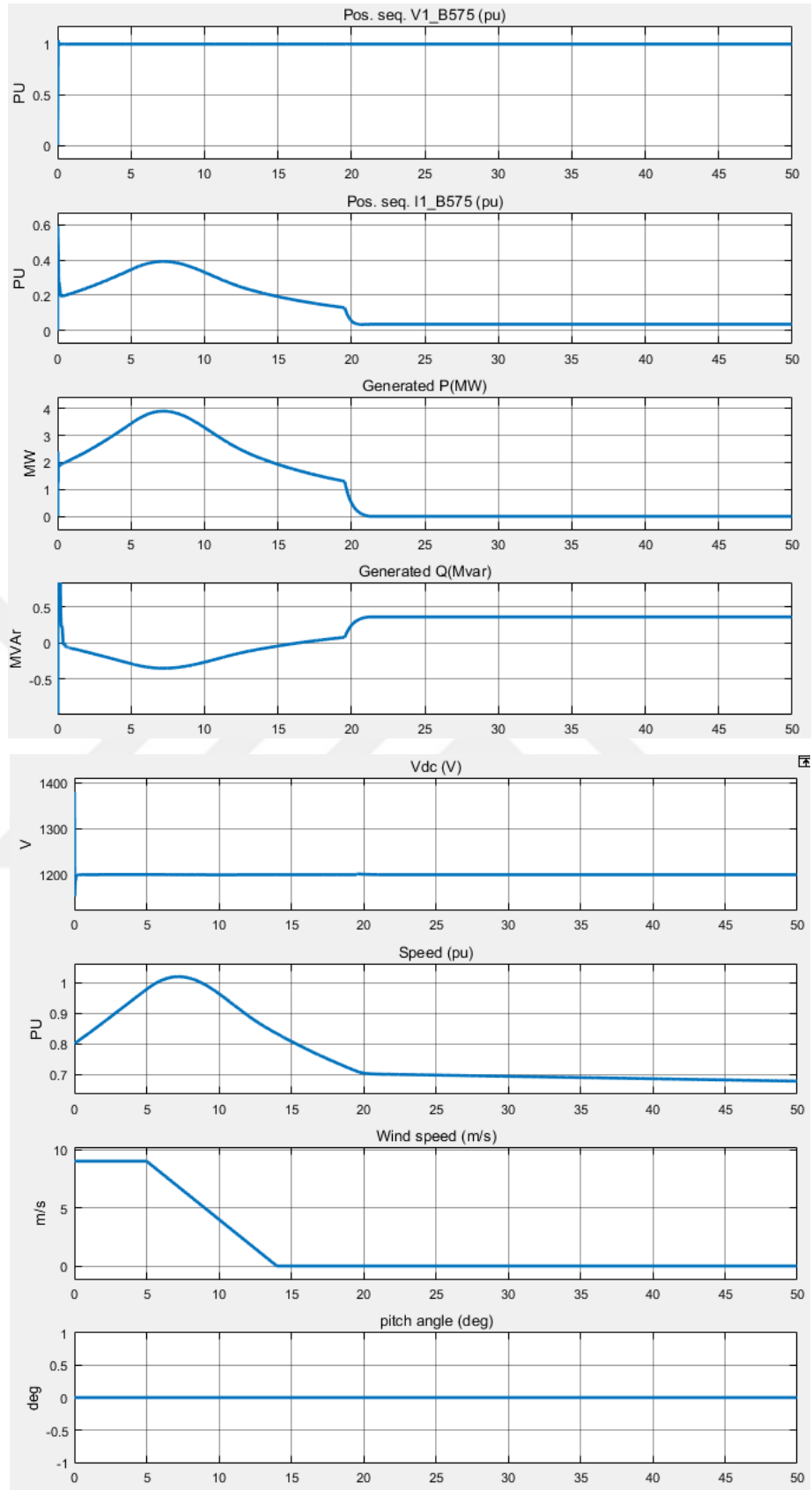
Şekil 4.24: ÇBAG modelinde 9-14 m/s hız değişiminde B25 barasında okunan değerler.

4.3.2.3 ÇBAG modelinde rüzgar hızının birden sıfıra düştüğü durum

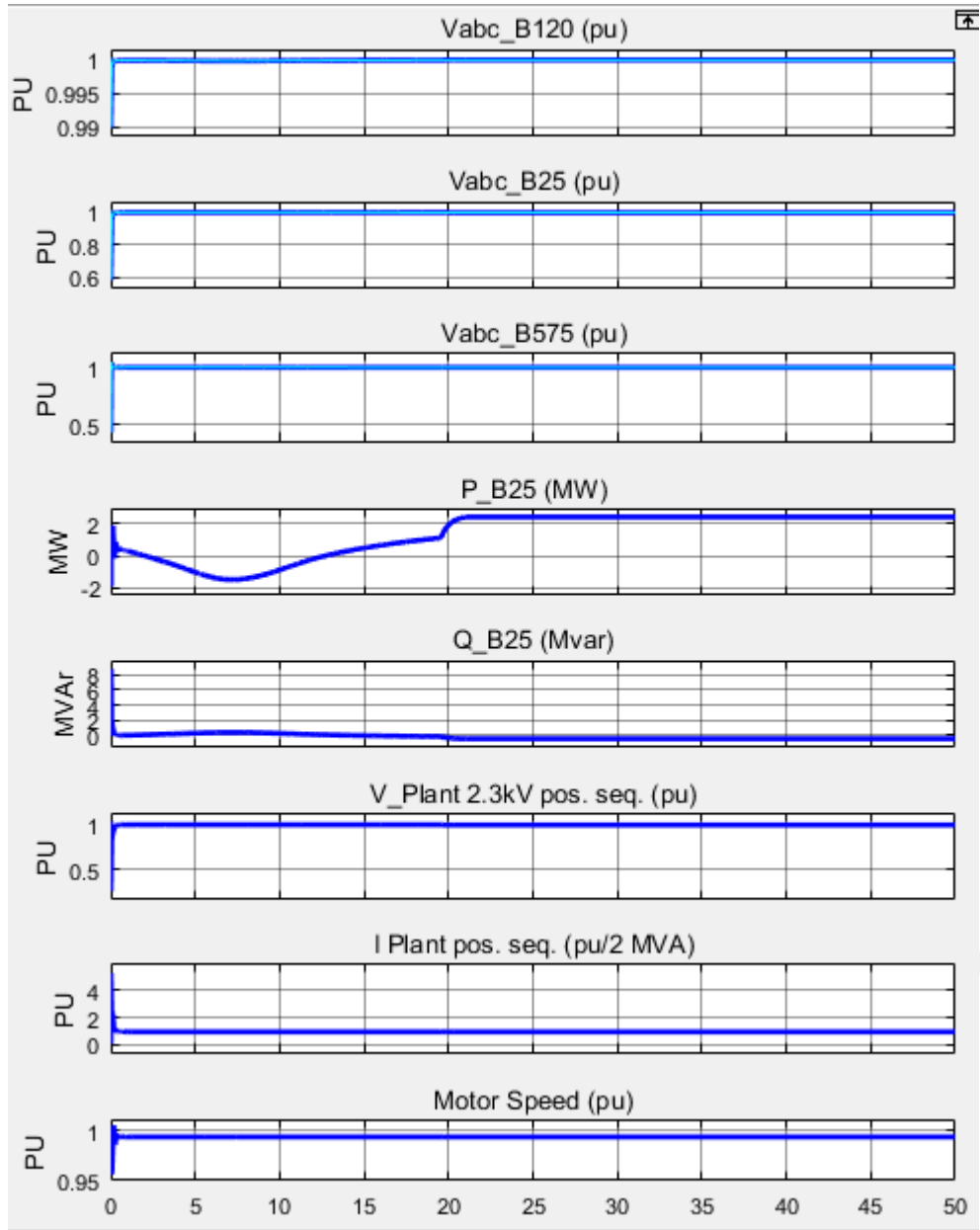
ÇBAG bağlı rüzgar çiftliği modelinde rüzgar hızının $t=5s$ 'de aniden 9m/s mertebelerinden, 0 m/s'ye inmesi sonucu türbin ve orta gerilim hattında ölçülen değerler incelenmiştir.

Şekil 4.25'te görüldüğü gibi W_r türbin motor hızı 0 pu seviyelerine doğru seyretmektedir. Santralin ürettiği aktif güç $t=21s$ de 0MW a düşmekte ve 0,35 MVar değerinde reaktif güç çekilmektedir.

Şebeke tarafında ise Şekil 4.26'da görüleceği üzere B25 barasındaki gerilim 0,0015pu artmıştır. Rüzgar hızı sıfır ancak, rüzgar çiftliği halen devrededir.



Şekil 4.25: Rüzgar aniden kesildiğinde ÇBAG bağlı rüzgar çiftliğinin tepkisi.



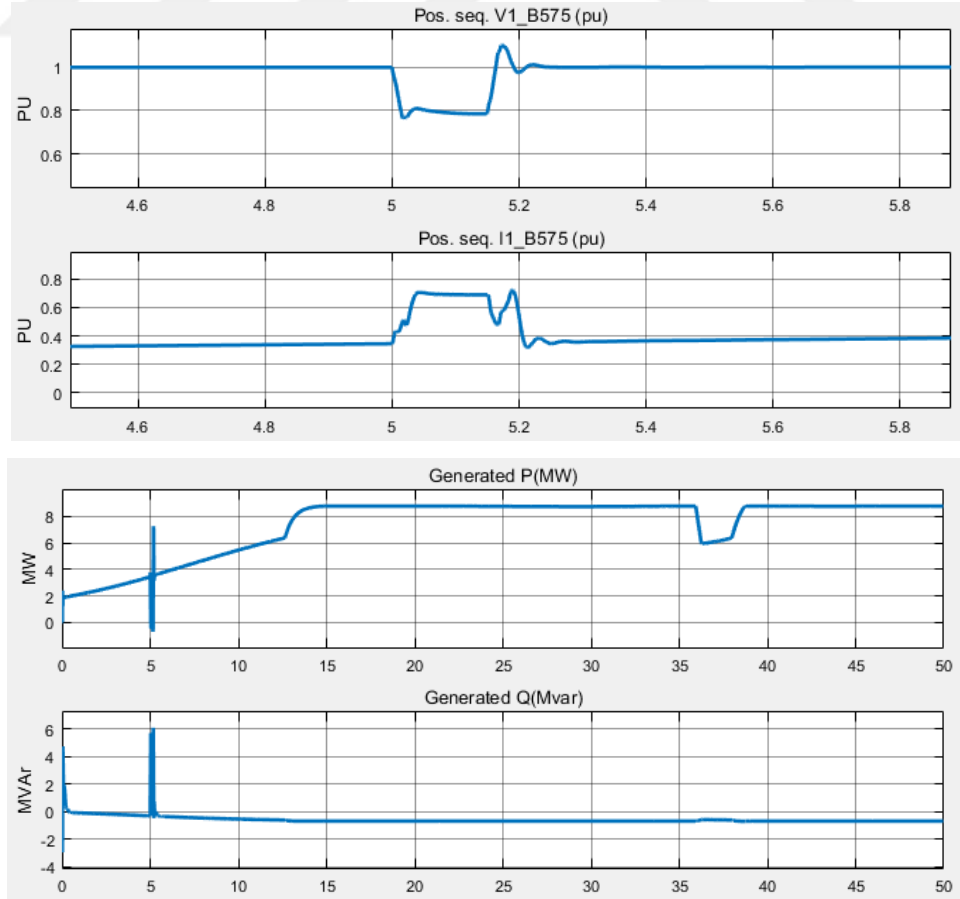
Şekil 4.26: Rüzgar aniden kesildiğinde ÇBAG bağlı rüzgar çiftliğinin barasının tepkisi.

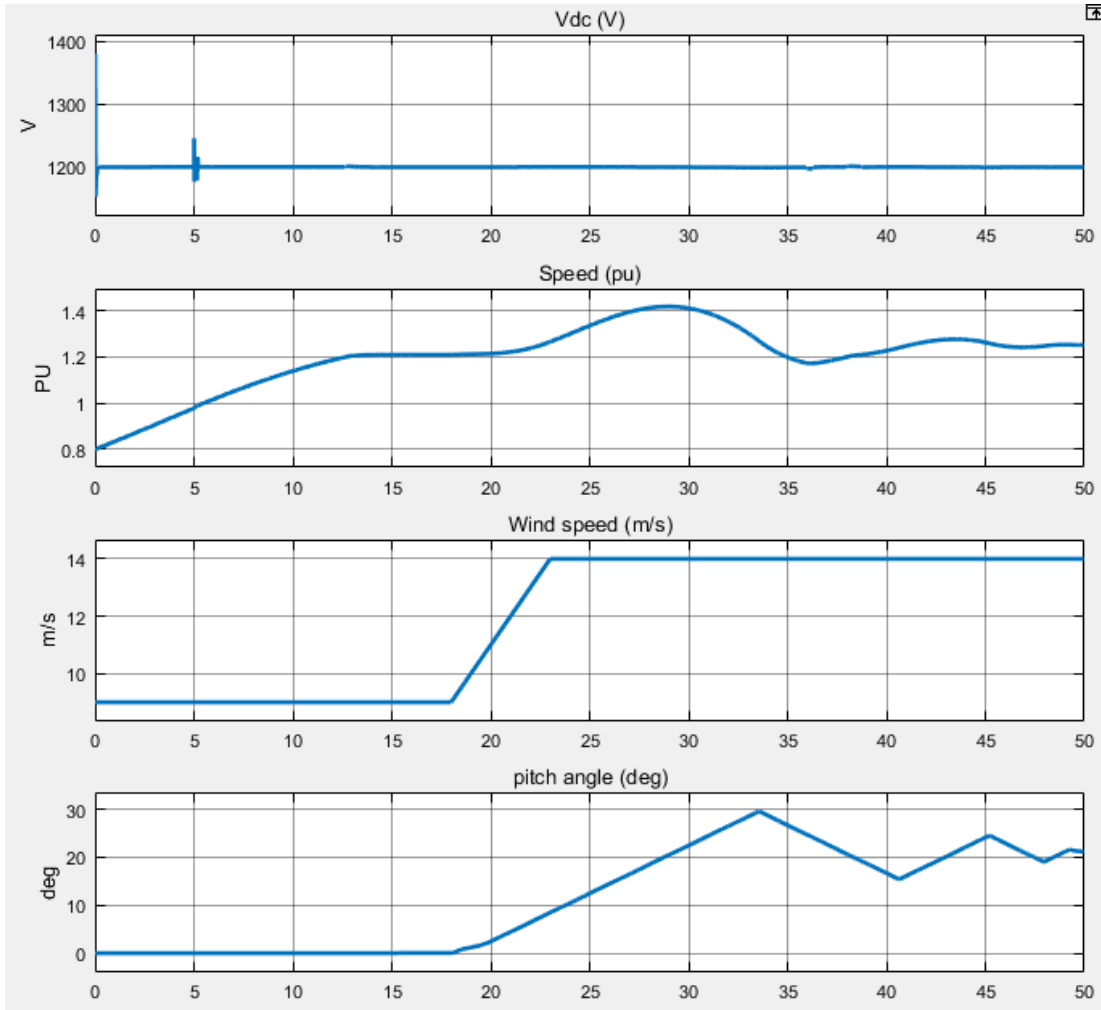
4.3.3 İki rüzgar çiftliği modelinde arıza durumlarının incelenmesi

Rüzgar hızı artarken, ÇBAG ve SKAG bağlı rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu 25 kV orta gerilim barasında 1 faz-toprak, 3 faz-toprak ve faz-faz arızalarında santralin ve şebekenin davranışları incelenmiştir.

4.3.3.1 SKAG ve ÇBAG bağlı türbinlerde tek faz-toprak kısa devre arızası olması durumunda türbinlerin tepkisi

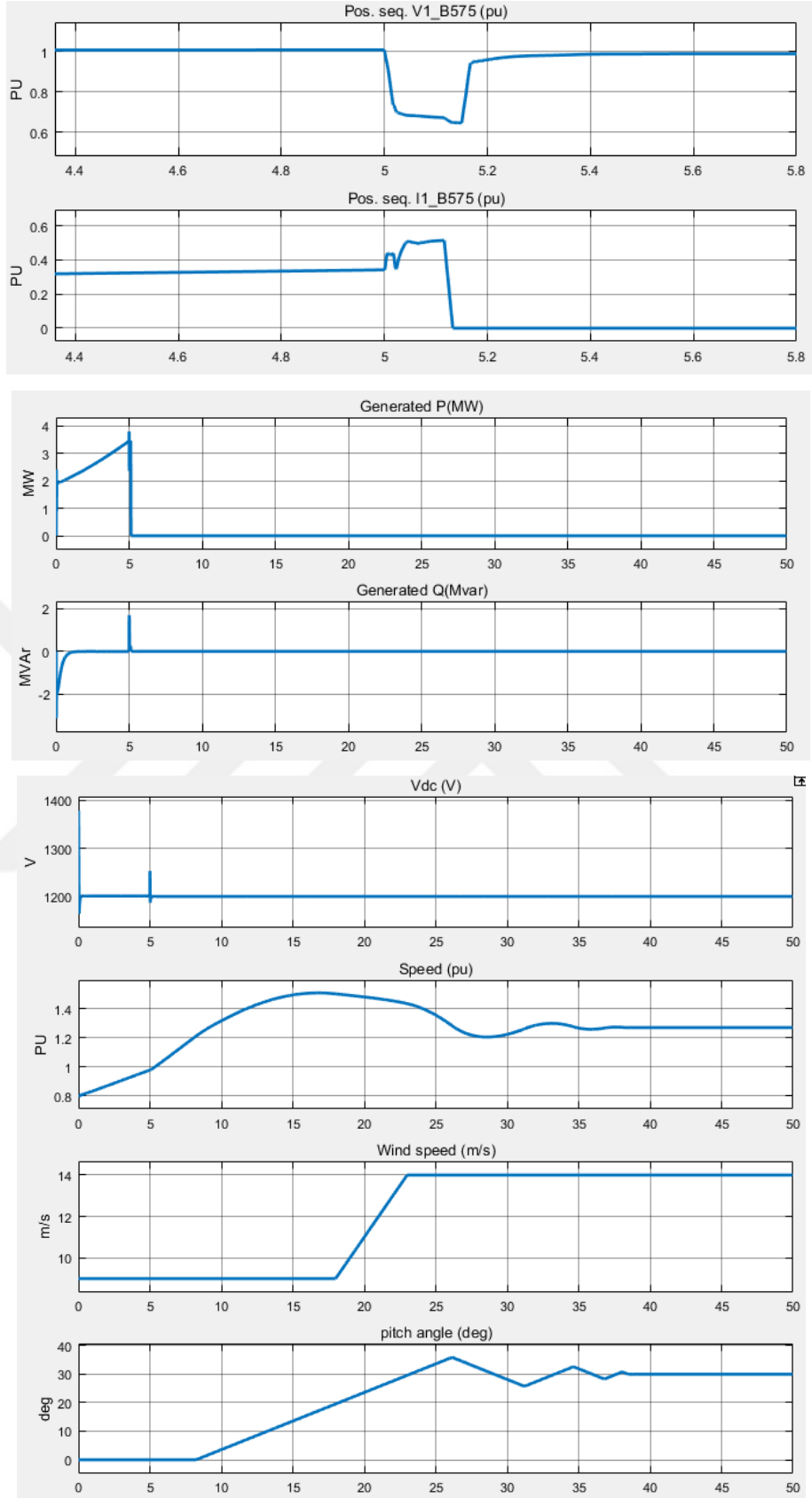
Simulinkte çift beslemeli asenkron generatör bağlı rüzgâr türbinini modelinin faz ve toprak kısa devre arızalarına karşı koruma sistemleri vardır. 9 MW lık rüzgâr çiftliği sistemi 3 faz hatla 25 kV luk transformatör, kısa devre koruma sistemi ve pi iletim hattı üzerinden 120 kV'luk baraya bağlıdır. Simule edilecek tek faz-toprak kısa devre arızası durumu için simülasyon süresi 50 sn. olarak seçilmiştir. B25 barasına bağlı 25 kV'luk iletim hattında meydana gelen tek faz-toprak arızası sonucu sistemin verdiği tepki aşağıdaki gibidir. Sistem Voltage Regulation modunda çalışmaktadır. Gerilimin rüzgâr türbini terminallerindeki pozitif seri değeri (V1_B575) 0.8 pu değerine düştüğünde rüzgâr türbini trip etmez. Bunun sebebi gerilim alt değer eşiğinin $t > 0.1$ iken 0.75 pu olması, 0.8 pu değerinin ise eşik değerinden yüksek olmasıdır.





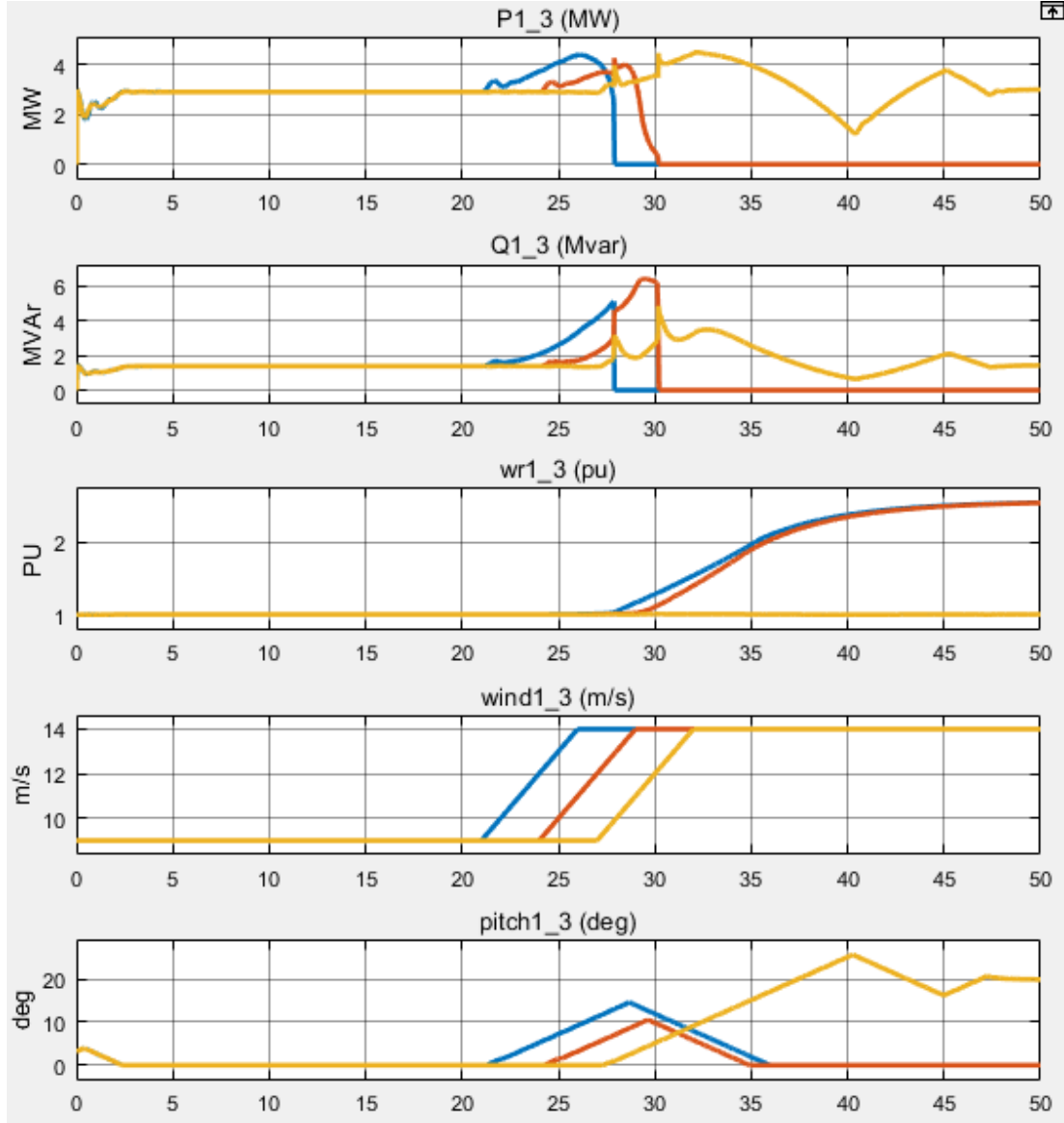
Şekil 4.27: ÇBAG modelinde AVR modunda 9-14 m/s hız değişiminde faz-toprak arıza durumu.

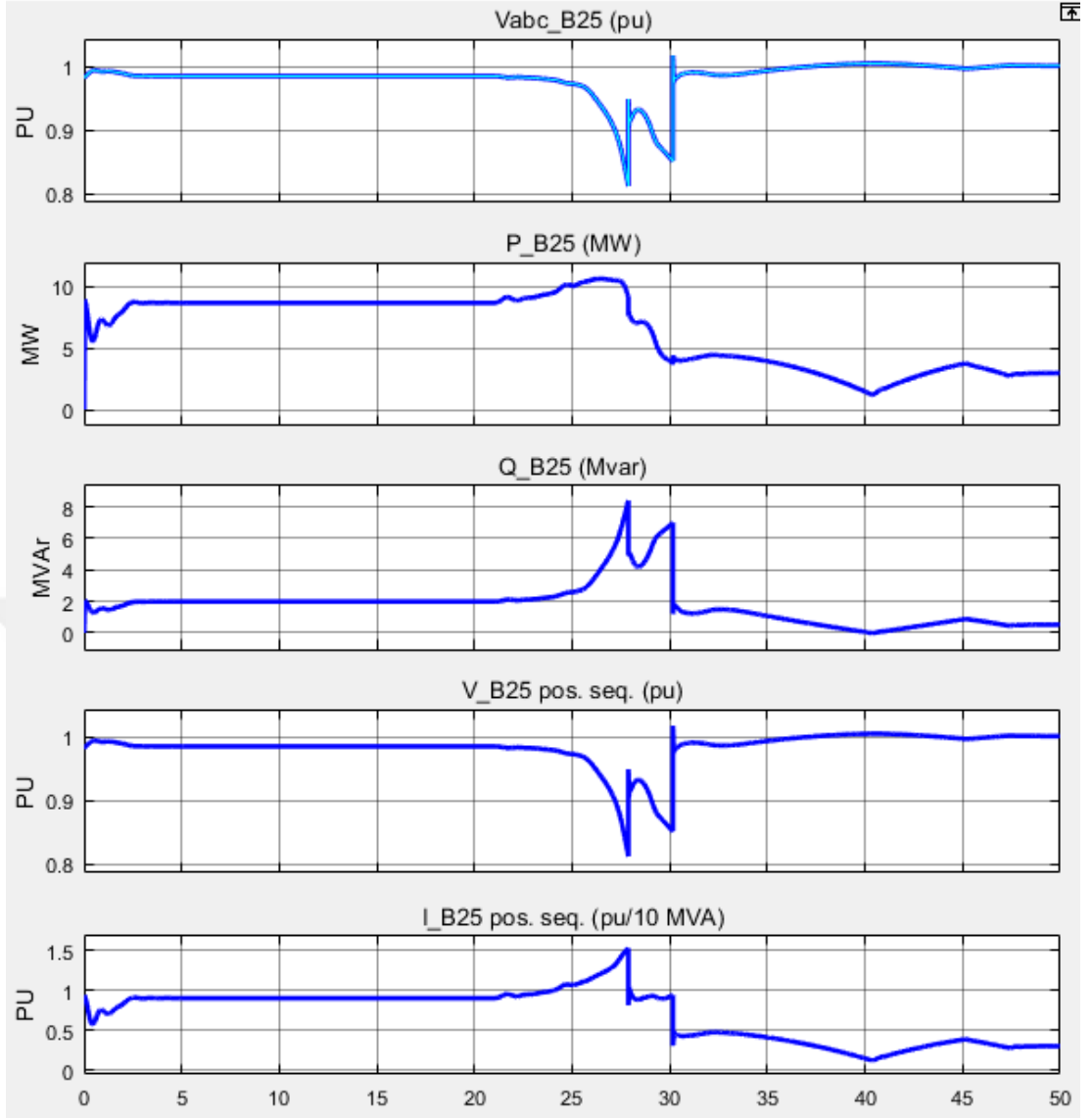
Ancak rüzgâr hızının 9 m/s'den 14 m/s'ye çıkması sonucunda generatör rotor hızı 1.2 pu değerini aşmış, pitch kontrolcülerini devreye girerek hızın 1.2 pu değerinde sabitlenmesi sağlamışlardır. Voltage regulation modunda kalınması sonucu, generatör B25 barasındaki kısa devre arızası sonucunda meydana gelen gerilim değişikliğini ürettiği reaktif güç ile dengelemiş, dolayısıyla rüzgâr türbini devreden çıkmadan aktif güç üretimine devam edebilmiştir. Ancak VAR regulation modunda kalınsaydı sistem gerilim yerine reaktif gücü $Q=0$ MVar değerinde sabit tutacak, B25 barasındaki gerilim değeri 0.75 pu değerinin altına düştüğünde ise düşük gerilim koruma sistemi devreye girip, rüzgâr türbinini trip ettirecekti.



Şekil 4.28: ÇBAG modelinde VAR regulation modunda 9-14 m/s hız değişiminde faz-toprak arıza durumu.

SKAG bağılı rüzgâr çiftliği sisteminde aynı koşullarda tek faz-toprak arızası olması durumunda ise $t=27.88$ sn'de ilk türbin, $t=30.17$ sn'de ise ikinci türbin çifti trip etmektedir. 3.türbin ise 1.5 MW civarında aktif güç üretimine devam etmektedir. 1. ve 2.türbin çiftlerinin devreden çıkmalarının sebebi, ÇBAG sisteminde olduğu gibi faz-toprak arızası sonucu B25 barasındaki gerilimin alt gerilim eşiğine gelmesiyle, türbin düşük gerilim koruma sistemlerinin devreye girerek, türbin gerilim değerini 1 pu değerine çıkarmasıdır.

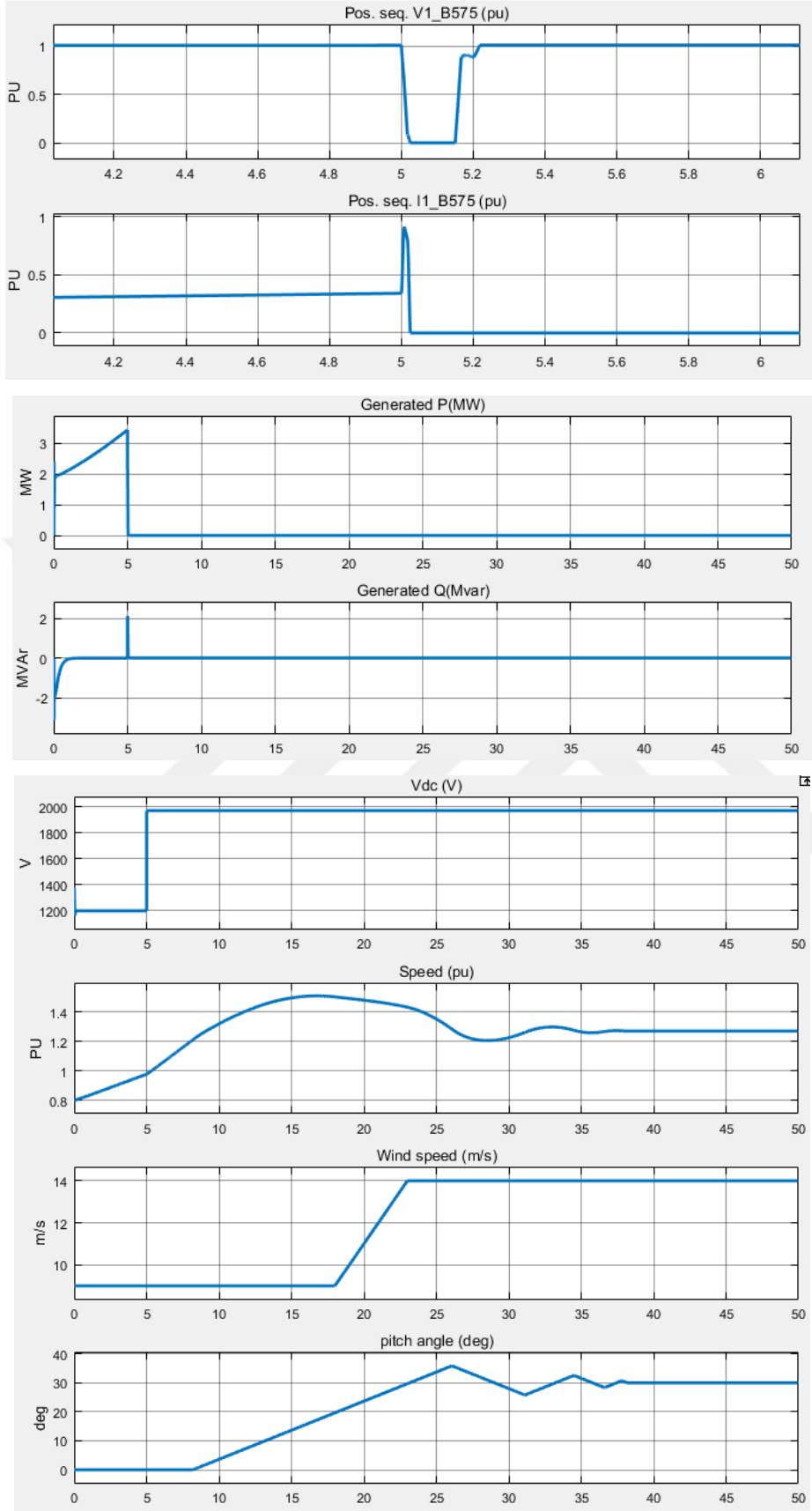




Şekil 4.29 : SKAG modelinde 9-14 m/s hız değişiminde faz-toprak arıza durumunda okunan değerler.

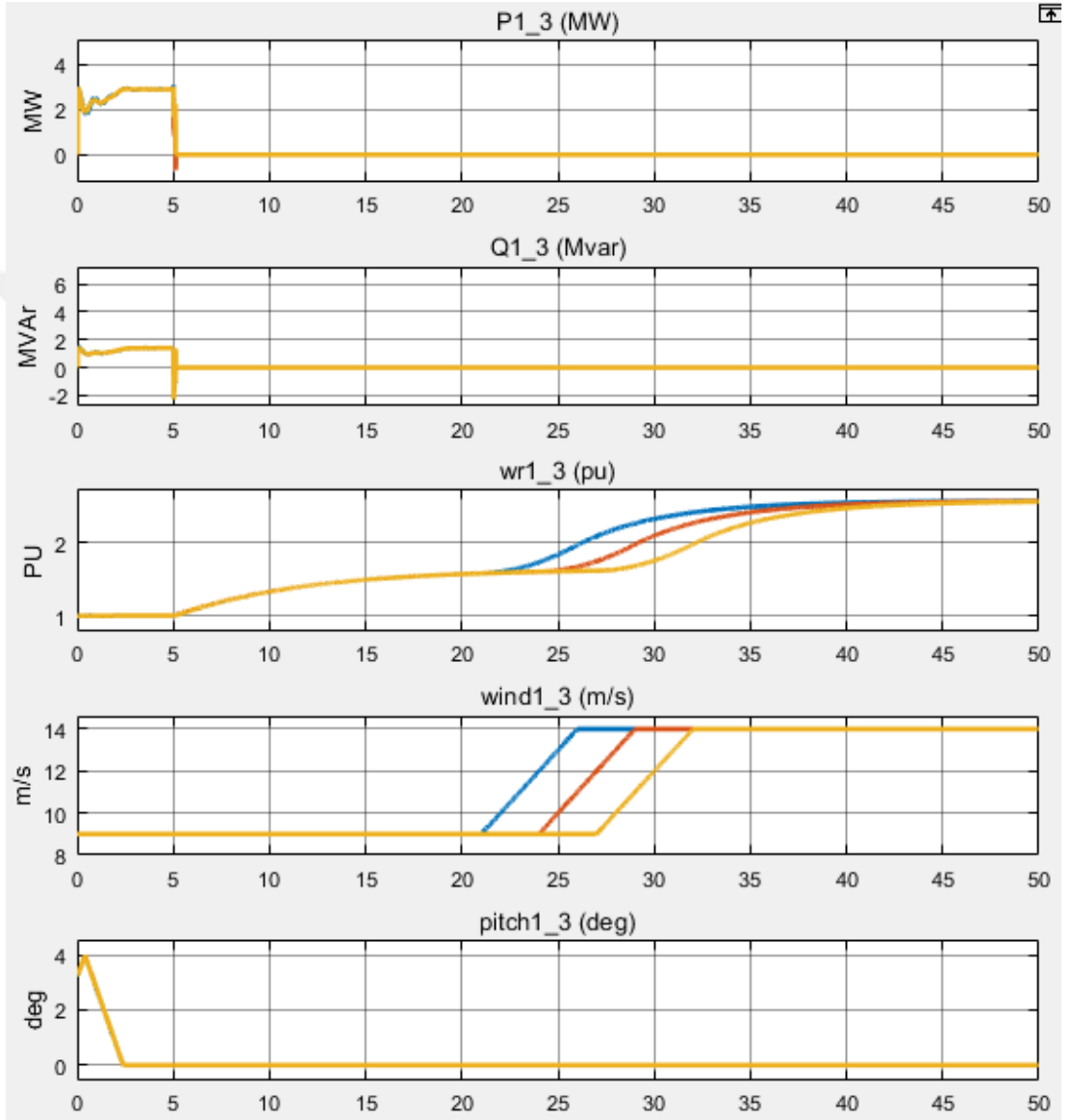
4.3.3.2 SKAG ve ÇBAG bağlı türbinlerde üç faz-toprak kısa devre arızası olması durumunda türbinlerin tepkisi

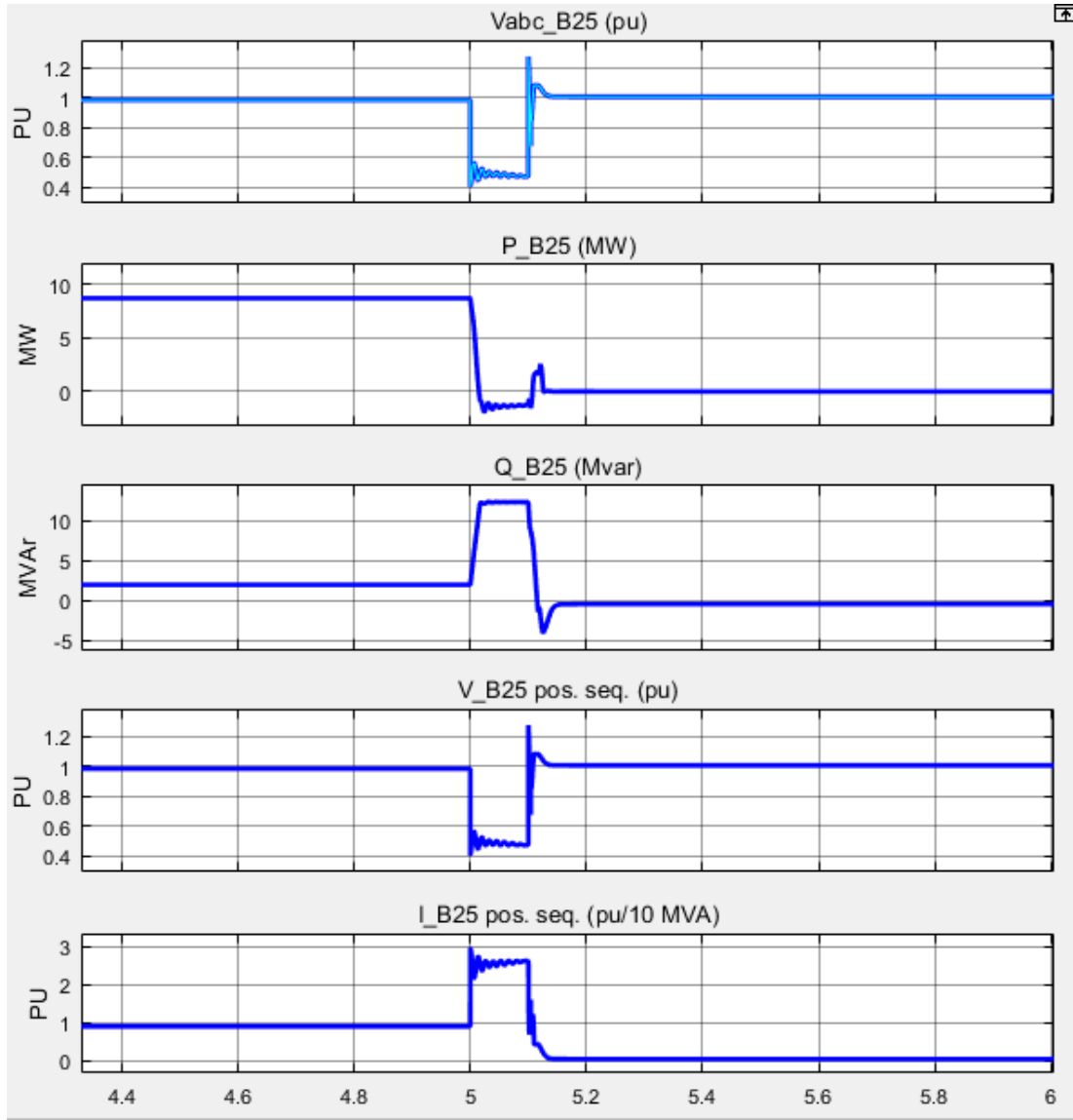
Şekil 4.30’da görüleceği gibi $t=5.013s$ de türbin koruma sistemi devreye girerek DC aşırı gerilimden dolayı açma gerçekleştirmiş ve santrali şebekeden çıkarmıştır. ÇBAG’ün konventorundeki 1900V DC olan aşırı gerilim üst seviyesinin limit değerinin üzerine çıkmasıyla santral ile trafo arasındaki koruma röleleri, türbini bağlı bulunduğu şebeke hattından ayırarak, santrali trip ettirmiştir.



Şekil 4.30 : ÇBAG modelinde AVR modunda 9-14 m/s hız değişiminde üç faz-toprak arıza durumu

Şekil 4.31e bakılırsa $t=5.104s$ de türbin koruma sistemi devreye girerek B25 barasındaki düşük gerilimden dolayı açma gerçekleştirmiş ve santrali şebekeden çıkarmıştır. SKAG'un B25 barasındaki 0.5 pu gerilim seviyesinin, gerilim alt seviyesi olan 0.75 pu değerinin altına inmesiyle santral ile trafo arasındaki koruma röleleri, türbini bağlı bulunduğu şebeke hattından ayırarak, santrali trip ettirmiştir.

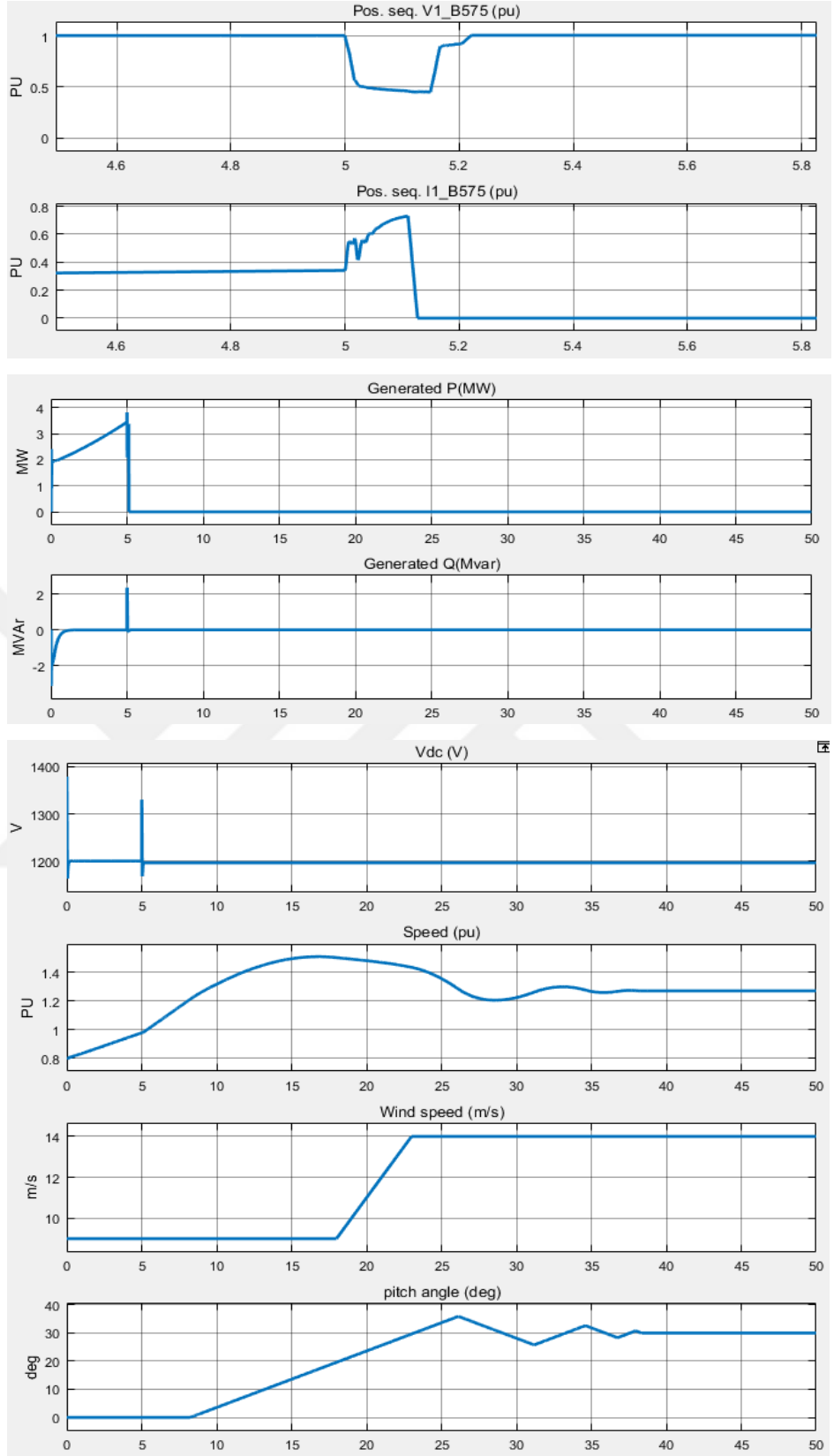




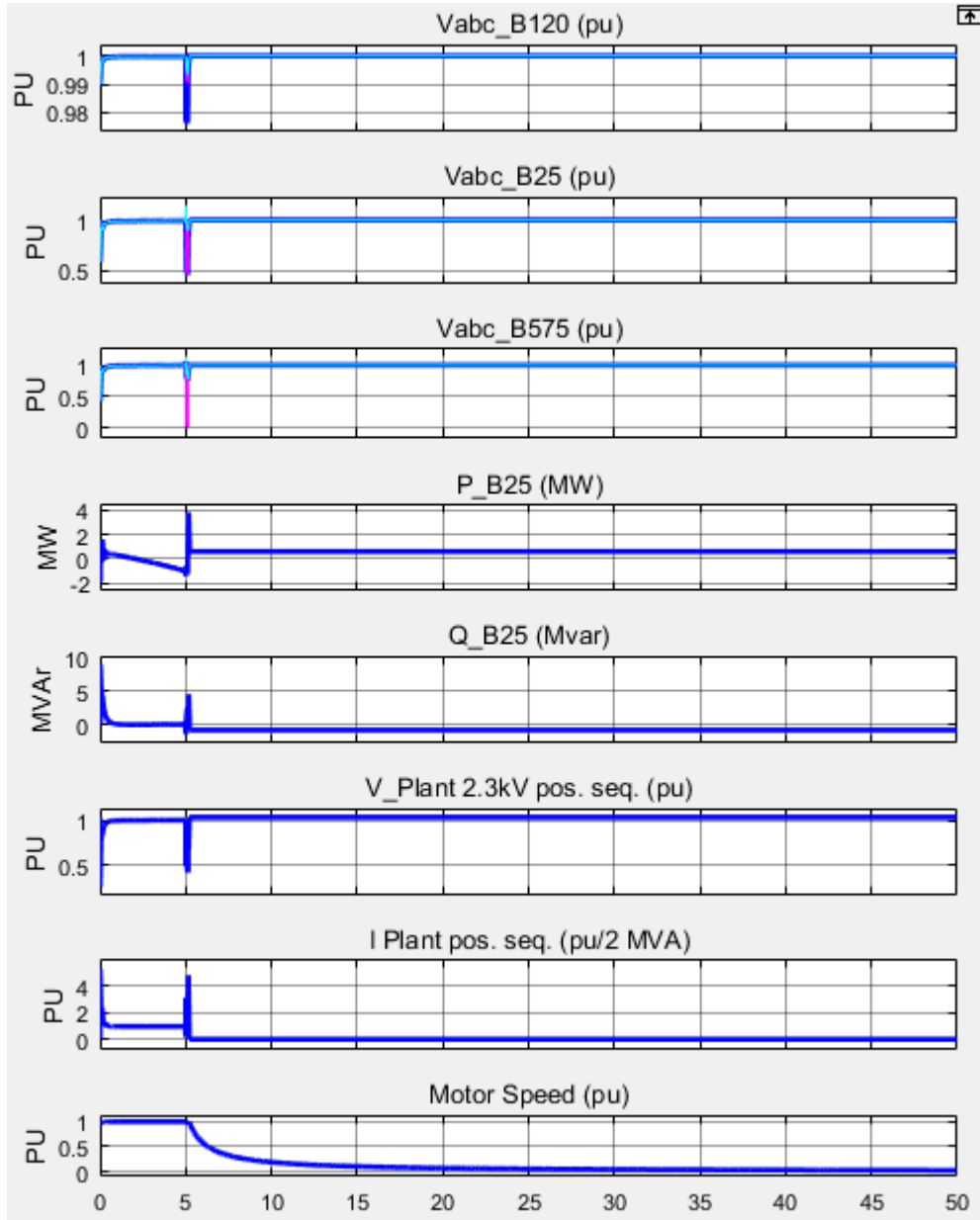
Şekil 4.31: SKAG modelinde 9-14 m/s hız değişiminde üç faz-toprak arıza durumu.

4.3.3.3 SKAG ve ÇBAG bağlı türbinlerde faz-faz kısa devre arızası olması durumunda türbinlerin tepkisi

Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te görüleceği üzere, rüzgar hızı 9 m/s den 14 m/s'ye yükseldiğinde türbin tarafındaki B575 barasında faz-faz arızası meydana gelmektedir. B575 barasındaki gerilimin değeri 0,5 pu'ya düşer ve bu değer gerilim alt seviyesi olan 0.75 pu değerinin altına inmesiyle santral ile trafo arasındaki koruma röleleri, türbini bağlı bulunduğu şebeke hattından ayırarak, santrali trip ettirmiştir.

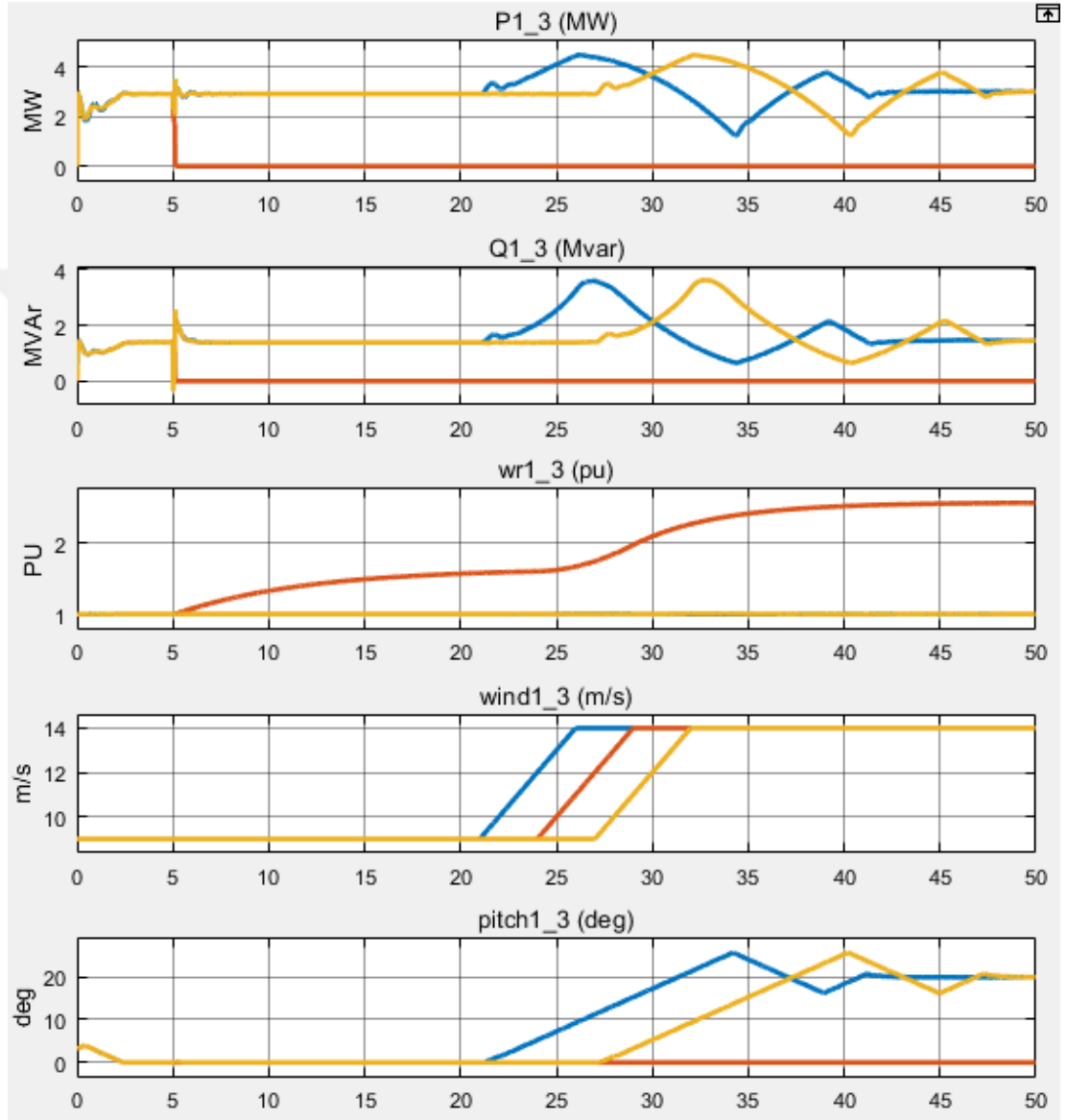


Şekil 4.32: ÇBAG modelinde 9-14 m/s hız değişiminde faz-faz arıza durumunda okunan değerler.

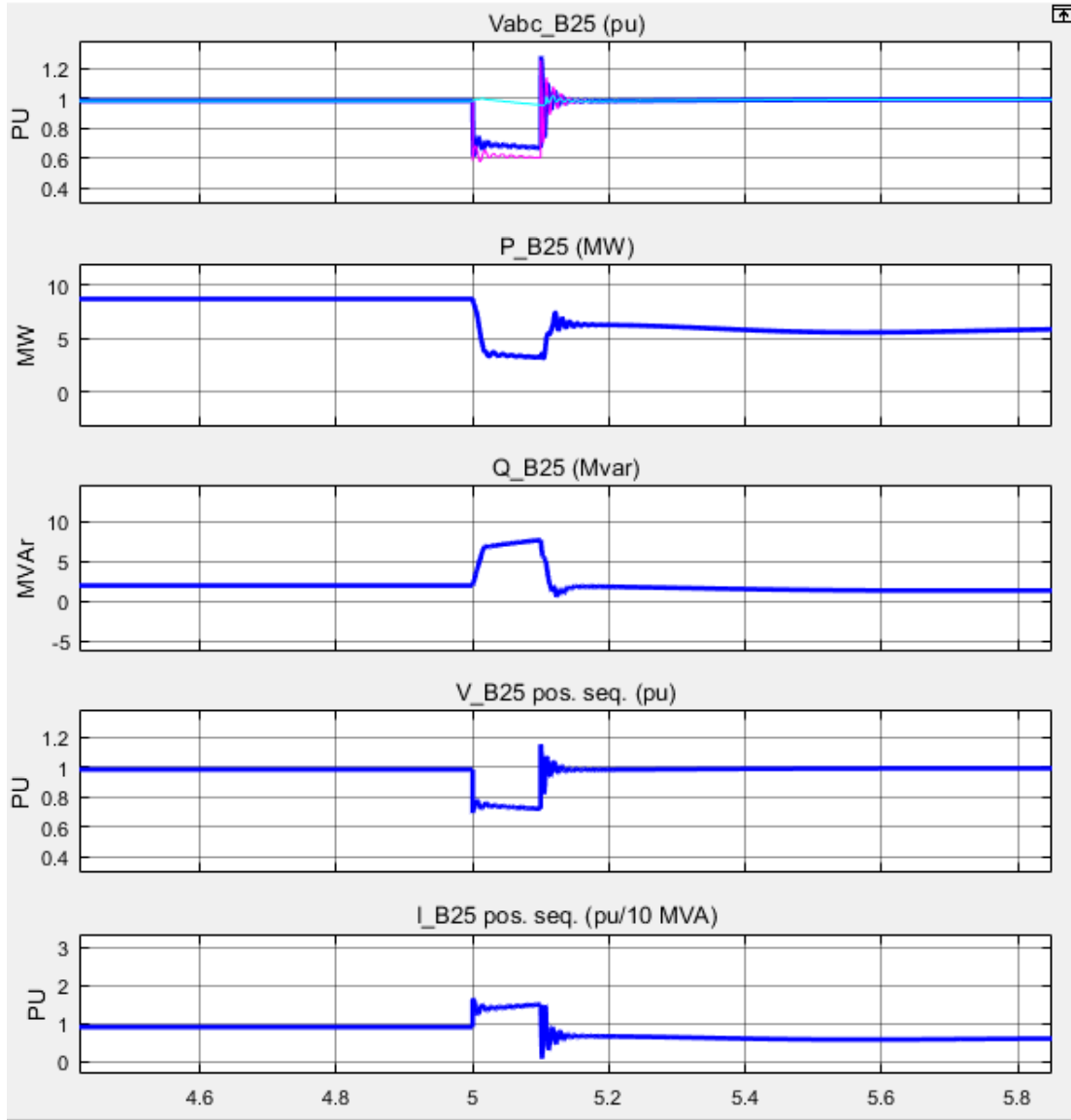


Şekil 4.33: ÇBAG modelinde 9-14 m/s hız değişiminde faz-faz arıza durumunda barada okunan değerler.

Şekil 4.34'te görüleceği üzere, rüzgar hızının 9m/s den 14 m/s'ye ye t=5s de arttığı durumda, santral tarafında, t=5s'de faz-faz arızası meydana gelmektedir. B25 barasında 0,5pu lik bir gerilim düşümü gerçekleşir ve koruma rölesinde düşük gerilim 0,75 pu'e ayarlandığı için röle, bir çift türbini devreden çıkarmaktadır ancak diğer iki çift türbin gerilim değerleri STATCOM tarafından dengelendiği için santrali 6 MW güçte ayakta tutmaktadırlar.



Şekil 4.34: SKAG modelinde 9-14 m/s hız değişiminde faz-faz arıza durumunda okunan değerler.



Şekil 4.35: SKAG modelinde 9-14 m/s hız değişiminde faz-faz arıza durumunda barada okunan değerler.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER:

Şebekeye bağlı rüzgâr türbinlerinin sayısının artması elektrik sisteminde gerilim kararsızlığı, reaktif güç ve frekans kontrolündeki zorluklar elektrik kalitesi problemlerini beraberinde getirmektedir. Gerilim dalgalanmaları, fliker ve harmonikler gibi elektrik kalitesi problemlerine yol açar, bu problemlerde kısa devre gerilim ve akımları, şebeke üzerinde ısı sınırlamaların aşılması gibi olumsuzluklar olarak karşımıza çıkar. Kurulacak rüzgar santrallerinin gücü tespit edilirken; rüzgar generatörü modeli, şebekenin bağlantı noktasının kısa devre gücü temel parametrelerdir. Rüzgar çiftliğinin şebekeye en uygun biçimde bağlanabilmesi için aşağıda yazılan kriterleri sağlamalıdır:

- Üretilen aktif ve reaktif güç değişimlerinden ötürü şebekede oluşan gerilim dalgalanmalarının engellenmesi,
- Şebeke bileşenlerinin kısa devre akım sınırlarının aşılmaması,
- Üretilen fliker ve harmonik seviyelerinin standartlarda belirtilen sınırlar içinde olması,
- Anahtarlama olaylarından ve anlık devreye girme olayları gibi geçici durumlar için şebekenin kararsızlık oluşmaması lazımdır [53].

Yapılan çalışmada rüzgâr santrallerinin neden olduğu elektrik kalitesi problemleri incelenmiş, piyasada yaygın olarak kullanılan SKAG ve ÇBAG generatör tipleri yapılan değişken rüzgâr hızları ve tek faz-toprak, 3 faz ve faz-faz kısa devre arızaları benzetim çalışmalarıyla karşılaştırılarak incelenmiştir. ÇBAG bağlı rüzgar çiftliğinde şebeke bağlantı kriteri analizi yapılmış; rüzgar çiftliğinin gücü bağlantı yapılacak baranın kısa devre gücünün %5, %10, %20'si iken rüzgar çiftliğinin ve bağlı olduğu orta gerilim hattının davranışları incelenmiştir. SKAG ve ÇBAG bağlı rüzgâr türbinleri modelleri MATLAB- Simulink programıyla geliştirilerek farklı rüzgâr hızları için simule edildi, böylece rüzgâr çiftliği kurulurken hangi rüzgâr türbin topolojisinin değişken rüzgâr hızlı sisteme daha uygun olduğu incelendi. Oluşturulan modelde, iki rüzgâr türbini modelinin farklı rüzgâr hızı değişikliklerine verdikleri tepkiler, tükettikleri reaktif güç miktarı, ortak bağlantı noktasında gerilim

kararlılığına dolayısıyla güç kalitesine etkileri, rüzgâr koşullarında şebekeye iletilen aktif güç miktarını göstermek üzere simülasyon yapıldı. Rüzgar çiftliğinin gücü bağlanacağı baranın kısa devre gücünün %5 i seviyesindeyken normal çalışma koşullarını korumaktadır. Güç %10 mertebesine yükseldiğinde $t=14.33s$ de türbin aşırı akım hatası vererek açma yapıp ve devreden çıkmıştır. B25 barasındaysa aniden devreden çıkan türbinler sebebiyle ani bir gerilim artışı olmuştur. Güç %20 mertebesine yükseldiğindeyse $t=11.43s$ de türbin aşırı akım hatası vererek açma yapıp ve devreden çıkmıştır. Bu zamandan sonra rüzgar çiftliği çıkışına bağlı olan baranın açmasıyla rüzgar türbinine bağlı tesis ve yükte devreden çıkmıştır.

Modern rüzgâr türbinlerinde değişken rüzgâr hızlı modeller için, ÇBAG bağlı rüzgâr türbin sistemleri, SKAG bağlı rüzgâr türbin sistemlerine göre çeşitli avantajlar sunduğu görülmüştür. Cut-in, nominal rüzgâr hızı ve cut-off hızı olmak üzere yapılan üç seviyedeki rüzgâr hızı değişikliklerinde ÇBAG bağlı rüzgâr türbininin iletilen aktif güç ve gerilim kararlılığı noktasında SKAG bağlı rüzgâr türbininkinden daha üstün olduğu görüldü. Aynı zamanda tüketilen reaktif güç miktarı ÇBAG bağlı türbinlerde daha az gerçekleşti. Tüm bu faktörler hangi rüzgâr çiftliği modelinin kurulmasına karar verileceğinde dikkate alınmalıdır.

Bu simülasyon sonuçlarına göre SKAG içeren rüzgâr türbin sistemleri, nominal aktif güç değerine ÇBAG içeren rüzgâr türbin sistemlerinden daha hızlı ulaşmaktadır. Rüzgar hızı sabit kalsa da ÇBAG içeren rüzgâr türbinlerinde rotor hızı zamanla artmaktadır.

9-14 m/s hızlarındaki grafiklerde pitch açısı değerleri iki topoloji içinde karşılaştırılırsa, ÇBAG içeren rüzgâr sistemleri basit pitch açısı kontrol sistemleri ile güç kontrolünü daha az maliyetli ve daha verimli biçimde sağlamaktadır. Yüksek rüzgâr hızlarında pitch kontrolcüsü maksimum çıkış gücünü sınırlayarak rüzgâr türbinini korumakta, düşük rüzgâr hızlarında ise pitch açısı sabit kalmaktadır. ÇBAG un değişken rüzgâr hızlarında sağladığı bu esneklik, rüzgâr türbininin kanatlarında rüzgâr hızından ötürü oluşan mekanik baskıyı azaltmakta, böylece üretilen torktaki titreşimde azalmakta dolayısıyla Fliker gibi elektrik kalitesi problemlerinde azalmaktadır.

Statoruna tam ölçekli güç konverteri bağlı SKAG'de değişken rüzgâr hızlı sistemlerde kullanılabilir, böylece toplam çıkış gücü 1 p.u civarında kalacaktır ancak bu durum daha fazla iletim ve anahtarlama kayıplarına aynı zamanda maliyetin artmasına yol açacaktır. Ayrıca ÇBAG teknolojisinin güç elektroniği konverterlerinin

sağladığı, reaktif güç üretme ve tüketme özelliği sayesinde, SKAG modelinde olduğu gibi kapasitor grupları yada STATCOM bağlanmasına gerek kalmamış, dolayısıyla sistem maliyeti düşmüştür.

SKAG ve ÇBAG bağlı rüzgâr sistemlerinde yapılan tek faz-toprak, üç faz ve faz-faz kısa devre arızasında türbinlerin verdikleri tepkiler ölçüldü. Tek faz-toprak kısa devre arızası durumunda ÇBAG bağlı türbinlerin trip etmeden ayakta kaldığı, ve şebeke gerilimine önemli bir biçimde destek verdikleri görüldü. Benzer koşullarda SKAG bağlı türbinde ise iki rüzgâr türbini çiftinin şebeke gerilimini desteklemeyerek düşük gerilim eşik değerinin altında kalarak trip ettiği görüldü. Santralin şebekeye bağlı olduğu durumda oluşacak bir 3-faz toprak arızası sonucunda ÇBAG'ün konvertöründeki 1900V DC olan aşırı gerilim üst seviyesinin limit değerinin üzerine çıkmasıyla ve SKAG'un B25 barasındaki 0.5 pu gerilim seviyesinin, gerilim alt seviyesi olan 0.75 pu değerinin altına inmesiyle santral ile trafo arasındaki koruma röleleri, türbini bağlı bulunduğu şebeke hattından ayırarak, santrali trip ettirmiştir. Faz-faz kısa devre arızası gerçekleştğinde ÇBAG modelinde alçak gerilim barasında bir gerilim düşümü gerçekleşmekte, B575 barasındaki gerilimin değeri 0,5pu'ya düşmesi ve bu değer gerilim alt seviyesi olan 0.75 pu değerinin altına inmesiyle santral devreden çıkar. SKAG modelindeyse B25 barasında 0,5pu lik bir gerilim düşümü gerçekleşir ve koruma rölesinde düşük gerilim 0,75 pu'e ayarlandığı için röle, bir çift türbini devreden çıkmaktadır ancak diğer iki çift türbin gerilim değerleri STATCOM tarafından dengelendiği için santrali 6 MW güçte ayakta tutmaktadırlar. Bunlara benzer şekilde daha farklı senaryolar da oluşturulabilir.

Simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında uygun konvertör ve kontrol sistemleriyle, ÇBAG bağlı türbinlerin, SKAG bağlı türbinlere göre daha güvenilir ve kararlı sistemler oldukları söylenebilir.

Rüzgar santrali türbin, generatör ve kontrol sistemleri gün geçtikçe gelişmektedir, gelecekte yaşanacak olan ilerlemeler neticesinde yeni rüzgâr türbin modelleri geliştirilebilir. Bunun yanında farklı tipte elektrik üretim santrallerinin bir arada çalışmaları neticesinde şebekeye etkileri üzerinde incelemeler yapılabilir. Sonuç olarak, rüzgar santralinin şebekeye paralel çalışması, diğer tüketicilere sağlanan elektriğin kalitesini bozmamalıdır. Ülkemizde, rüzgar gücü ile üretim yapan elektrik santrallerin sayısı arttıkça, bunların şebeke ile bağlantısı giderek daha önem kazanacak ve bu konuda yapılacak çalışmalar daha da artacaktır.



6. KAYNAKLAR

- [1] **Golding E** (1976) The generation of electricity by wind power. Halsted Press, New York
- [2] **Price, Trevor J** (3 May 2005). "James Blyth - Britain's First Modern Wind Power Engineer". Wind Engineering. 29 (3): 191–200
- [3] **Url-3** Global Wind Report 2015, <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf>Erişim Tarihi:12.10.2016
- [4] **Url-4** Top 10 new installed capacity Jan-Dec 2015, <<http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Top-10-new-installed-capacity-Jan-Dec-2015.jpg>> Erişim Tarihi:12.10.2016
- [5] **Url-5** Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu <http://www.tureb.com.tr/files/tureb_sayfa/duyurular/temmuz_2016_istatistik.pdf Erişim Tarihi:12.10.2016>
- [6] **EÜAŞ Sector Report**, “Electrical Energy Production Sector Report,” Turkey, 2008
- [7] **D. Kaya**, “Renewable energy policies in Turkey,” Renewable & Sustainable Energy Reviews, vol. 10, pp. 152–163, 2006.)
- [8] **Url-8** Rüzgar enerjisi hakkında, http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_en_hak.html Erişim Tarihi:12.10.2016
- [9] **Wind power**. (2006). Power, 150(9), 68-74.
- [10] **Url-10** Energy Resources: Wind power. Retrieved from Energy Resources: <http://www.darvill.clara.net/altenerg/wind.htm> Erişim Tarihi: 12.10.2016
- [11] **Gasch, R., Twele, J.** (2002) Wind Power Plants, James & James, London.
- [12] **Ackermann, T., 2005.** Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.

- [13] **Patel, M.R.**, (2006), Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation (Second Edition), CRC Press, Boca Raton.
- [14] **Url-14** Gipe P (2003) Wind turbine tower trends. <http://www.Wind-Works.org>
Erişim Tarihi:12.12.2016
- [15] **Url-15** Brughuis FJ Advanced tower solutions for large wind turbines and extreme tower heights. <http://www.mecal.nl> Erişim Tarihi:12.12.2016
- [16] **Niederstucke B, Anders A, Dalhoff P, Grzybowski R.** Load data analysis for wind turbine gearboxes.
- [17] **Garrad Hassan and Partners** (1999) Electrodynamic braking of large wind turbines. ETSU W/45/00519/REP
- [18] **Url-18** How Wind Turbines Work, <http://www.pfr.co.uk/pfr/3/RenewableEnergy/15/Wind-Power/57/How-Wind-Turbines-Work/>
Erişim Tarihi:08.12.2016
- [19] **Dursun E., Binark A.K.**, “Generator Types in Wind Turbines ”, 7.National Clean Energy Symposium Istanbul 17-21 December 2008.
- [20] **Hansen, L.H., Madsen, P.H., Blaabjerg, F., Christensen, H.C., Lindhard, U., Eskildsen,K.**, (2001). “Generators and Power Electronics Technology for Wind Turbines”, Industrial Electronics Society, IECON '01. The 27th Annual Conference of the IEEE 29 Nov.-2 Dec. 2001, Vol. 3, pp.2000 – 2005.
- [21] **Mergen, A.F.,Zorlu, S.**,(2005). “ Elektrik Makineleri III Senkron Makineler”, BirsenYayınevi.
- [22]**Url-22** EWEA Annual Report Grid Report 2010, http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/reports/ Grids_Report_2010.pdf , Erişim Tarihi:18.12.2016
- [23] **Fangxing (Fran) Li, D. Tom Rizy, Brendan Kirby, John Kueck,Ndeye K. Fall**, Reactive Power from Distributed Energy ,The Electricity Journal, Volume 19, Issue 10, s 27-38.December (2006)
- [24] **M. M. Oliveira**, Power Electronics for Mitigation of Voltage Sags and Improved Control of AC Power Systems, Stockholm 2000 Doctoral DissertationRoyal Institute of Technology Phd thesis, (2000).
- [25] **E. Uzunovic, C. A. Canizares Reeve J.**Fundamental Frequency Model of Static Synchronous Compensator, North American Power Symposium (NAPS),Laramie, Wyoming, 49-54, (1997).

- [26] **M.M. Ertay ve Z. Aydoğmuş**, “Statcom ile bir enerji iletim sisteminde gerilim kontrolü”, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, syf. 91-105, sayı 21, Nisan 2010.
- [27] **U. Eminoglu, S. Herdem, T.Yalçınöz**, invertör temelli facts cihazları kullanarak Reaktif güç kompanzasyonu ile gerilim kontrolü, Elektrik - elektronik -bilgisayar mühendisligi 10. Ulusal kongresi, 152- 155, (2002).
- [28] **Url-28 STATCOM** (Static Synchronous Compensator) <http://www.donsion.org/calidad/cc8/c8-11.pdf>, Erişim Tarihi:09.03.2017
- [29] **K. R. , Padiyar, A.M.** Kulkarni, Control Design and Simulation of Unified Power Flow Controller, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, 1348-1354, (1998).
- [30] **IEC 61400-21:2008**. Wind turbines - Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines. Edition 2.0
- [31] **Emanuel, Hanna, et al.** "Power quality measurements of wind energy converters with full-scale converter according to IEC 61400-21." Electrical Power Quality and Utilisation, 2009. EPQU 2009. 10th International Conference on. IEEE, 2009.
- [32] **Estanqueiro, A. I., Tande, J. O., & Lopes, J. P.** Assessment of Power Quality Characteristics of Wind Farms.
- [33] **De Alegria, I.M., Andreu, J., Martin, J.L., Ibanez, P., Villate, J.L. ve Camblong, H.**, (2007),“Connection Requirements for Wind Farms: A Survey on Technical Requierements and Regulation”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11:1858-1872.).
- [34] **Yan, Xiangwu, et al.** "Voltage-sag tolerance of DFIG wind turbine with a series grid side passive-impedance network." IEEE Transactions on Energy Conversion 25.4 (2010): 1048-1056.
- [35] **Akhmatov, V. ve Eriksen, P.B.**, (2007), “A Large Power System in Almost Island Operation-A Danish Case Study”, IEEE Trans. Power Systems, 22:937-943.

- [36] **De Almeida, A., L. Moreira, and J. Delgado.** "Power quality problems and new solutions." International conference on renewable energies and power quality. Vol. 3. 2003.
- [37] **Linh, Nguyen Tung.** "Power quality investigation of grid connected wind turbines." Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009. 4th IEEE Conference on. IEEE, 2009.
- [38] **Url-28** Elektrik Şebeke Yönetmeliği <http://www.epdk.org.tr/TR/DokumanDetay/Elektrik/Mevzuat/Yonetmelikler/Şebeke> Erişim Tarihi:14.03.2017
- [39] **Wilczyński, G.** "Analysis of flickermeter's signal chain for input signal with two sub/interharmonics." *Przegląd Elektrotechniczny* 86 (2010): 328-335.
- [40] **Gutierrez, J. J., Lazkano, A., Azcarate, I., Ruiz, J., Leturiondo, L. A., & Saiz, P.** (2011). Power quality in grid-connected wind turbines. INTECH Open Access Publisher.
- [41] **Deutsches Wind Energie Institut,** Tech-wise A/S, DM Energy, 2001. Wind turbine grid connection and interaction, technical report, Germany.
- [42] **Tande, John Olav Giæver.** "Applying power quality characteristics of wind turbines for assessing impact on voltage quality." *Wind energy* 5.1 (2002): 37-52.
- [43] **Chen, Z.; Spooner, E.** ;“Voltage Source Inverters for High-Power, Variable-Voltage DC Power Sources”, *IEE Proc. –Generation, Transmission and Distributions*, Vol. 148, No. 5, September 2001, pp. 439-447.
- [44] **S.A. Papathanassiou and M.P. Papadopoulos.** Mechanical stresses in fixed-speed wind turbines due to network disturbances. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 16(4):362–367, Dec. 2001
- [45] **J. Tamura, M. Ueno, Y. Matsumura, and S. Kimoto.** Transient stability simulation of power sistem including wind generatör by pscad/emtdc. In *Proceedings of 2001 IEEE Porto Power Tech Conference*, volume 4, Sept. 2001.
- [46] **F.D. Kanellos, S.A. Papathanassiou, and N.D. Hatziargyriou.** Dynamic analysis of a variable speed wind turbine equipped with a voltage

source ac/dc/ac converter interface and a reactive current control loop. In Proceedings of Electrotechnical Conference, volume 3, pages 986 – 989, May 2000.

- [47] **N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, and G. Strbac.** Embedded Generation. The Institution of Electrical Engineers, UK, 2000
- [48] **S. Heier.** Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. John Wiley & Sons, Ltd,Chicester, UK, 1998
- [49] **J.G. Slootweg.** Wind Power: Modelling and Impact on Power System Dynamics. PhD thesis, Technische Universiteit Delft, Delft, Netherlands, December 2003.
- [50] **Beltran, Brice, Tarek Ahmed-Ali, and Mohamed El Hachemi Benbouzid.** "Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion systems." IEEE Transactions on Energy Conversion 23.2 (2008): 551-558.
- [51] **Yubing, Duan,** et al. "Modelling and simulation of the microsources within a microgrid." Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on. IEEE, 2008.
- [52] **J.G. Slootweg, S.W.H. de Haan, H. Polinder, and W.L. Kling.** Modeling wind turbines in power sistem dynamics simulations. In Power Engineering Society Summer Meeting, 2001.IEEE, volume 1, pages 22 – 26, Vancouver,Canada, 15-19July 2001
- [53] **Akdeniz E., Kaypmaz A., Yağmur E.,** 2006 : Yenilenebilir Kaynaklardan Enerji Üretiminin Şebekenin Enerji Kalitesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi, Eleco'2006 Elektrik - Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı, Bursa.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ahmet Dabakoğlu
Doğum Tarihi ve Yeri : 29.07.1991 Mardin
E-posta : dabakoglua@itu.edu.tr



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek lisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Anabilimdalı, Elektrik Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM

- Kesir Mühendislik - Test Mühendisi (06/02/2015-18/02/2016)
- İstanbul Kültür Üniversitesi – Araştırma Görevlisi (21/02/2016-09/08/2016)