İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR SANTRALLERİNİN ŞEBEKEYE ENTEGRASYONU VE ŞEBEKE ÜZERİNE ETKİLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Akif AK

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

NİSAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR SANTRALLERİNİN ŞEBEKEYE ENTEGRASYONU VE ŞEBEKE ÜZERİNE ETKİLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mehmet Akif AK
(504001146)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 21 Nisan 2011
Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Nisan 2011

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ömer USTA
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ayşen DEMİRÖREN
Prof. Dr. Canbolat UÇAK

NİSAN 2011

Sevgili Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimi hazırlama döneminde, beni yönlendiren ve her konuda yardımını esirgemeyen, değerli hocam Prof.Dr.Ömer USTA'ya, yaşamım boyunca sevgilerini ve emeklerini bir an olsun üzerimden eksik etmeyen sevgili aileme, yüksek lisans çalışmam sırasında değerli desteklerini esirgemeyen Entes Elektronik'teki değerli yöneticilerime ve çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Nisan 2011

Mehmet Akif AK

(Elektrik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
2. RÜZGAR TÜRBİNLERİ **5**
2.1 Sabit ve Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri 5
2.1.1 Rüzgar türbini kanatlarına etki eden kuvvetler 7
2.1.2 Elde edilebilir rüzgar gücü 9
2.2 Rüzgar Türbinlerinde Kulanılan Generatörler **10**
2.2.1 Doğru akım generatörleri 11
2.2.2 Senkron generatörler 11
2.2.3 Asenkron generatörler 13
3. RÜZGAR SANTRALLERİNİN ENTEGRASYONU VE ETKİLERİ **19**
3.1 Rüzgar Gücünün Reaktif Güç Üretimi Üzerindeki Etkisi 20
3.2 Rüzgar Gücünün Gerilim Kontrolü Üzerindeki Etkisi 20
3.2.1 Iletim sistemlerindeki etkisi 20
3.2.2 Dağıtım sistemlerindeki etkisi 22
3.2.3 Rüzgar türbini gerilim kontrolü özelliklerinin önemi 24
3.2.3.1 Gerilim kontrolünü etkileyen faktörler 27
3.3 Frekans Kontrolü 28
3.4 Rüzgar Santrallerinin Performans Karşılaştırması 29
3.5 Rüzgar Santrallerinin Bölgesel ve Şebeke Genelindeki Bozucu Etkileri 29
4. BİLGİSAYAR BENZETİMİ **33**
4.1 Sistemin Özellikleri 33
4.2 Senaryolar 37
4.2.1 Şebeke bağlantı kriteri analizi (%5 - %10 - %20) 37
4.2.1.1 Şebeke bağlantı kriteri analizi - %5 37
4.2.1.2 Şebeke bağlantı kriteri analizi - %10 41
4.2.1.3 Şebeke bağlantı kriteri analizi - %20 46
4.2.2 Rüzgar hızı artarken ve azalırken, normal çalışma durumu 51
4.2.2.1 Normal çalışma durumu – rüzgar hızı artıyor 51
4.2.2.2 Normal çalışma durumu – rüzgar hızı azalıyor 55
4.2.3 Rüzgar hızının birden sıfırlandığı durum 59
4.2.4 Santralin bağlı olduğu orta gerilim hattında arıza durumu 63
4.2.4.1 1-faz toprak arızası durumunda çalışma 63

4.2.4.2 3-faz toprak arızası durumunda çalışma..... 68
4.2.4.3 Faz-faz toprak arızası durumunda çalışma..... 73
5. SONUÇ..... 79
KAYNAKLAR..... 83
ÖZGEÇMİŞ..... 85

KISALTMALAR

AA	**:** Alternatif Akım
ASSG	**:** Asenkron Sargılı Senkron Generatör
CHP	**:** Birleşik Isı ve Güç Santrali
DFIG	**:** Çift Beslemeli Asenkron Generatör
DGM/PWM	**:** Darbe Genlik Modülesyonu
DMSG	**:** Daimi Mıknatıslı Senkron Generatör
EPDK	**:** Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
GE	**:** General Electric
MW	**:** Mega-Watt
MVA	**:** Mega Volt-Amper
MVAr	**:** Mega Volt-Amper Reaktif
MATLAB	**:** Bilgisayar Benzetim Programı
m/s	**:** metre/saniye
pu	**:** per-unit
P	**:** Aktif Güç
PV	**:** Foto-voltaik
Q	**:** Reaktif Güç
RES	**:** Rüzgar Enerji Santrali
s	**:** saniye
SVC	**:** Statik Var Kompensatörü
SKAG	**:** Sincap Kafesli Asenkron Generatör
TEİAŞ	**:** Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
UCTE	**:** Avrupa İletim Sistemleri Operatörleri Ağı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Rüzgar Generatörlerinin Performans Tablosu..... 32

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Rüzgar türbini bileşenleri. 6
Şekil 2.2 : Türbin kanatlarına etki eden kaldırma ve sürtünme kuvvetleri..... 7
Şekil 2.3 : Kanat profili üzerine etki eden kuvvetler. 7
Şekil 2.4 : Rüzgar türbinine doğru esen bir dairesel hava akımı. 9
Şekil 2.5 : Değişken hızlı alan sargılı senkron generatör. 11
Şekil 2.6 : Yükseltici DA-DA kıyıcısı ile beslenen daimi mıknatıslı senkron generatör. 12
Şekil 2.7 : DGM konverterden beslenen daimi mıknatıslı senkron generatör..... 13
Şekil 2.8 : Çift beslemeli rotoru sargılı asenkron generatör. 14
Şekil 2.9 : Rüzgar türbiniyle sürülen, şebekeye bağlı çalışan DFIG. 15
Şekil 2.10 : Değişken hızlı sincap kafesli asenkron generatör. 15
Şekil 3.1 : Terminal gerilimi (U1) bir parametre olarak kullanılarak sincap kafesli bir indüksiyon generatörünün (a) aktif ve (b) reaktif gücünün rotor hızına bağımlılığı. 24
Şekil 3.2 : Çift beslemeli bir indüksiyon generatörünün çalışma aralığı..... 26
Şekil 3.3 : Parametre olarak terminal gerilimiyle doğrudan sürüşlü bir generatöre sahip bir rüzgar türbininin çalışma aralığı..... 26
Şekil 3.4 : İspanya'da 24 saat içinde sistemde meydana gelen kısa devre arızaları nedeniyle bölgesel olarak şebeke geriliminin %10-20 düşmesi üzerine devre dışı olan rüzgar santralleri. 31
Şekil 4.1 : Rüzgar Çiftliği (DFIG Fazör Modeli). 37
Şekil 4.2 : B25 barasındaki kısa devre gücü hesabı..... 38
Şekil 4.3 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %5'i iken rüzgar santralinin davranışı - 1..... 40
Şekil 4.4 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %5'i iken rüzgar santralinin davranışı - 2..... 41
Şekil 4.5 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %5'i iken şebekenin davranışı. 42
Şekil 4.6 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %10'u iken rüzgar santralinin davranışı - 1..... 44
Şekil 4.7 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %10'u iken rüzgar santralinin davranışı - 2..... 45
Şekil 4.8 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %10'u iken şebekenin davranışı 46
Şekil 4.9 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %10'u iken rüzgar santralinini koruması..... 47
Şekil 4.10 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %20'si iken rüzgar Santralinin davranışı - 1. 49
Şekil 4.11 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %20'si iken rüzgar Santralinin davranışı - 2 50

Şekil 4.12 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %20'si iken şebekenin davranışı. 51
Şekil 4.13 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %20'si iken türbin koruması 52
Şekil 4.14 :Rüzgar hızı artarken, normal çalışma durumunda rüzgar santralinin davranışı – 1. 54
Şekil 4.15 :Rüzgar hızı artarken, normal çalışma durumunda rüzgar santralinin davranışı – 2. 55
Şekil 4.16 :Rüzgar hızı artarken, normal çalışma durumunda şebekenin davranışı. 56
Şekil 4.17 :Rüzgar hızı azalırken, normal çalışma durumunda rüzgar santralinin davranışı - 1 58
Şekil 4.18 :Rüzgar hızı azalırken, normal çalışma durumunda rüzgar santralinin davranışı - 2 59
Şekil 4.19 :Rüzgar hızı azalırken, normal çalışma durumunda şebekenin davranışı. 60
Şekil 4.20 :Rüzgar hızı birden durduğunda, rüzgar santralinin davranışı - 1. 62
Şekil 4.21 :Rüzgar hızı birden durduğunda, rüzgar santralinin davranışı - 2. 63
Şekil 4.22 :Rüzgar hızı birden durduğunda, şebekenin davranışı. 64
Şekil 4.23 :Rüzgar Santrali şebekeye bağlı değilken 1-faz arıza durumunda şebekenin davranışı. 66
Şekil 4.24 :Rüzgar santrali bağlı iken, santral tarafında 1-faz arıza durumunda rüzgar santralinin davranışı - 1. 67
Şekil 4.25 :Rüzgar hızı artarken, santral tarafında 1-faz arıza durumunda rüzgar santralinin davranışı - 2. 68
Şekil 4.26 :Rüzgar hızı artarken, santral tarafında 1-faz arıza durumunda şebekenin davranışı. 69
Şekil 4.27 :Rüzgar Santralı, şebekeye bağlı fakat rüzgar hızı sıfırken, 3-faz arıza durumunda şebekenin davranışı. 71
Şekil 4.28 :Rüzgar Santralı, şebekeye bağlı iken 3-faz arıza durumunda rüzgar santralinin davranışı - 1. 72
Şekil 4.29 :Rüzgar Santralı, şebekeye bağlı iken 3-faz arıza durumunda rüzgar santralinin davranışı - 2. 73
Şekil 4.30 :Rüzgar Santralı, şebekeye bağlı iken 3-faz arıza durumunda şebekenin davranışı. 74
Şekil 4.31 :Rüzgar Santralı, şebekeye bağlı değil iken, santral tarafında faz-faz arıza durumunda şebekenin davranışı. 76
Şekil 4.32 :Rüzgar Santralı, şebekeye bağlı iken, santral tarafında faz-faz arıza durumunda santralin davranışı - 1. 77
Şekil 4.33 :Rüzgar Santralı, şebekeye bağlı iken, santral tarafında faz-faz arıza durumunda santralin davranışı – 2. 78
Şekil 4.34 :Rüzgar Santralı, şebekeye bağlı iken, santral tarafında faz-faz arıza durumunda şebekenin davranışı. 79

SEMBOL LİSTESİ

R : Yarıçap (m)
β : Kanat açısı
F_L : Havanın kaldırma kuvveti
F_D : Havanın sürtünme kuvveti
L : Kanadın gövde uzunluğu
b : Kanadın genişliği
c : Kanadın akış hızı
ρ : Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
ώ : Kanadın açısal hızı
v : Rüzgar hızı (m/s)
α : Rüzgar taaruz açısı
m : Rüzgarın kütlesi
u : Rüzgarın akış hızı (m/s)
U : Rüzgar paketinin kinetik enerjisi (m/s^2)
x : Rüzgar paketinin kalınlığı
A : Rüzgar türbininin süpürme alanı (m^2)
P_w : Elde edilebilir toplam rüzgar gücü
R : Direnç (Ω)
X : Reaktans (Ω)
d,q : Rotasyonel sistem (boyuna, enine)
$V_{d,q}s$: Stator, d-q koordinat sistemi gerilimi
$V_{d,q}r$: Rotor, d-q koordinat sistemi gerilimi
$i_{d,q}s$: Stator, d-q koordinat sistemi akımı
$i_{d,q}r$: Rotor, d-q koordinat sistemi akımı
$\psi_{d,q}s$: Stator, d-q koordinat sistemi manyetik akısı
$\psi_{d,q}r$: Rotor, d-q koordinat sistemi manyetik akısı
r_s : Stator yarıçapı
r_r : Rotor yarıçapı
Ω_d : Dişli kutusunun açısal hızı
Ω : Rotorun açısal hızı
T_m : Giriş Torku (Mekaniksel)
T_e : Elektromanyetik Tork
N : Sarım sayısı
F : Sürtünme Kuvveti
ω_s : Stator sargılarından geçen akımların açısal hızı
P_{dccu} : DC hat kayıpları

RÜZGAR SANTRALLERİNİN ŞEBEKEYE ENTEGRASYONU VE ŞEBEKE ÜZERİNE ETKİLERİ

ÖZET

Bu çalışmada, günümüzde kulanılmakta olan rüzgar generatörü tipleri incelendi ve bu generatörlerin şebekeye bağlantısı esnasında şebeke tarafında uyulması gereken temel prensiplerden bahsedildi.Yapılan bilgisayar benzetiminde ise, şebekeye entegre edilmiş çift çıkışlı bir indüksiyon generatörünün şebeke bağlantı kriterleri analizi yapılarak, rüzgar hızının değişimine bağlı olarak santral davranışları ve şebekeye olan etkileri incelendi. Ayrıca 1 faz-toprak, 3-faz toprak ve faz-faz arızaları rüzgar hızı artarken, azalırken ve sıfırken bunların santral ve şebeke üzerine etkileri de simüle edildi.

Rüzgar hızının artış ve azalışı üretilen aktif güç ve gerilimi etkilemektedir. Dolayısıyla, bu parametrelerin rüzgar hızındaki değişimle bağlantılı olduğu görülmektedir.

INTEGRATION AND EFFECTS OF WIND TURBINES TO THE GRID

SUMMARY

In this study, popular wind turbines are examined and issues which have to be monitored during integration are discussed. In the computer simulation, a doubly-fed induction generator is connected to the grid as wind turbine and its behaviours during the wind changes and effects to the grid during those changes are studied.Also, single phase-earth. 3-phase earth and phase-phase faults are simulated and turbine and grid effects are simulated.

It is observed that, a change in the wind power is directly effecting the active power and the voltage values. So, those parameters are directly related to the change in the wind power.

1. GİRİŞ

Enerji arz güvenilirliği ve iklim değişikliği konularının daha sık tartışılmaya ve dikkate alınmaya başlamasıyla beraber rüzgar enerjisi sektörü her geçen yıl rekor büyüme hızları yakalayarak gelişmesine devam etmektedir. Dünyada son 15 yılda ortalama yüzde 25 büyüme hızı göstermiştir. Son iki yıllık büyüme hızları ise sırasıyla yüzde 41 ve yüzde 32 seviyelerine ulaşmıştır. Sadece 2006 yılında 13 milyar Avro'yu aşan yatırım gerçekleştirilmiştir. Rüzgar sanayisinin olduğu ülkelerde 200 binden fazla insan bu sektörde istihdam edilmektedir [1]

Ülkemizde 2000'li yıllarda 17 MW olan toplam RES kurulu gücümüz, günümüzde 912 MW'a ulaşmıştır. EPDK tarafından verilen lisansların yatırıma dönüşmesi ile 2010 yılı sonuna kadar, RES kurulu gücümüzün 1350MW'a ulaşması kuvvetle muhtemeldir.

TEİAŞ'ın rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisleri için kapasite ilan ettiği 148 trafo merkezindeki toplam 8.488MW'lık kapasite için Mayıs 2010 itibariyle, 722 adet lisans başvurusu yapılmıştır ve bunlardan 189 adedi 34,5kV trafo merkezi, 541 adedi ise 154kV trafo merkezi için olmuştur [2].

Avrupa, rüzgar enerjisi kurulu gücünde en yüksek kapasiteye sahip olmakla beraber (yüzde 65), Kuzey Amerika ve Asya ülkeleri de kurulu güçlerini hızla arttırmaktadırlar. Bir çok ülkede rüzgar gücüne dayalı olarak üretilen elektriğin oranı şimdiden geleneksel yakıtlarla üretilmekte olan elektrik oranlarıyla başa baş gelmeye başlamıştır. Danimarka'da ülke elektriğinin şu anda yüzde 20'si rüzgar enerjisinden temin edilmektedir. İspanya'da rüzgar enerjisinin katkısı yüzde 8 mertebesine ulaşmıştır [1].

Küresel rüzgar enerjisi piyasasının büyümesi ile birlikte rüzgar kaynaklı elektrik üretiminin maliyeti aşırı bir şekilde düşmüştür. Modern bir rüzgar türbini, yıllık olarak 20 yıl önceki eşdeğerinden 180 kat daha fazla elektriği yarı maliyete üretebilmektedir. İyi bir uygulama sahasında rüzgar, kömür ve gaz ile üretilen enerji ile fiyat olarak rekabet edebilir noktaya ulaşmıştır.

Rüzgar enerjisinin maliyeti artan ortalama rüzgar hızına bağlı olarak düşer. Wind Power Monthly adlı rüzgar enerjisi sanayisi dergisinde Ocak 2006'da yayımlanan bir makalede yıllık ortalama 7 m/s rüzgar hızına sahip bir sahada kilovatsaat başına yatırım maliyeti yaklaşık 1000 Avro civarındadır [3]. Bu haliyle bile rüzgar enerjisi gaz, kömür ve nükleer enerjiden daha ucuz olmaktadır.

Rüzgar enerjisi genellikle kesikli bir enerji kaynağı olarak tanımlanır ve bu yüzden güvenilir olmadığı ifade edilir. Rüzgar; gerçekte, sistem seviyesinde, düzensiz aralıklarla durmaz ve esmez. Bu yüzden rüzgar enerjisi için kullanılan kesikli terimi yanıltıcıdır. Toplam rüzgar gücü kapasitesi çıktısı değişkendir, güç sisteminin kendisinin de değişken olduğu gibi.

Güç sistemleri; nasıl ki büyük güç santrallarından kaynaklanan ani değişikliklerin üstesinden her zaman gelmek zorundaysa, rüzgar enerjisi ile ilgili prosedürleri de uygulamaya koymalıdır. Sorun bu yüzden sadece değişkenliğin kendisi değil; nasıl tahmin edileceği, yönetileceği ve iyileştirileceği ve verimliliği artırmak için ne gibi yöntemlerin kullanılabileceği olmalıdır.

Rüzgar enerjisinin önemli oranlarda (<20-30, düşük ve orta) enerji sistemine entegrasyonu yalnızca mümkün olmakla kalmamakta aynı zamanda mevcut güç sisteminde köklü değişiklikler yapmanın da gerekli olmadığı Dünya çapındaki bir çok uygulamadan anlaşılmaktadır. (Almanya, Danımarka, İspanya, İsveç, Avusturya gibi) Bununla birlikte, çok yüksek penetrasyon seviyelerinin olduğu Danimarka, İspanya ve Almanya'nın çok geniş ulusal veya uluslararası güç sistemleri ile bağlantılı oldukları dikkatle belirtilmelidir.

Güç sistemi dizaynı ve işletilmesinde rüzgardan kaynaklanan en büyük problem rüzgarın değişken özelliği olmaktadır. Rüzgar enerjisinin şebeke entegrasyonundan kaynaklanan bu temel problemin iki yönü öne çıkmaktadır; Güç sistemindeki tüm tüketiciler için kabul edilebilir bir voltaj seviyesi ve sistem güç dengesi nasıl muhafaza edilebileceği. Genel anlamda, güç sistemi mühendisleri her zaman bu gibi sorunlarla çalışmaktadırlar. İlk nükleer enerji üretimi güç sistemi ile tanıştığı zaman, güç sistemi mühendislerinin karşı karşıya kaldığı sorun talebin sürekli değişmesine rağmen nükleer üretimin sabit kalmasıydı. Bu yüzden birçok ülke diğer enerji kaynaklarının (örneğin hidrolik ve nükleer gücü beraber kullanarak) esnekliğini kullanma zorunda kalmışlardır. Örneğin İsveç, baz yük temini için kullanılan ve

esnek olmayan üretim gerçekleştiren nükleer santralları, yük takibi için esnek üretimli hidrolik santrallarla beraber çalıştırmaktadır. Diğer ülkeler de bu sorunu çözmek için farklı çözümler geliştirmişlerdir. Örneğin Japonlar bu amaçla pompaj depolamalı hidroelektrik sistemini kullanmaktadır.

Bu örneklerden görüldüğü gibi rüzgar enerjisi ile ilgili sorunlar büyük ölçüde güç sistemine bağlıdır. Bununla beraber, güç sistemi mühendislerince uygulanmakta olan genel yöntemler rüzgar enerjisinin şebekeye entegrasyonunda da kullanılabilir. Rüzgar enerjisi üreticilerinin ihtiyaçlarını karşılayabilmek için güç sisteminin işletilmesi noktasında bazı yöntemlerin değiştirilmesi sorunun çözümünde yardımcı olabilir [1].

2. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Rüzgar oluşumu güneş enerjisinin bir dönüşümü olarak düşünülebilir. Güneş tarafından atmosferde meydana gelen sıcaklık yükselmeleri, yerküre üzerindeki yükseltiler ve yerkürenin dönme hareketi rüzgar oluşumuna neden olan başlıca etkenlerdir.

Rüzgar türbinleri kinetik enerjiyi mekanik enerjiye çevirmektedir. Elde edilen mekanik enerji değişik amaçlar için kullanılabilir. Rüzgar enerjisinden faydalanma insanlık tarihi kadar eski olmasına rağmen ciddi manada rüzgar türbinleri 19.yüzyıl ortalarında su pompalama işleminde kullanılmasıyla başlamıştır. 1970 yıllarında ise rüzgar türbinlerinden elektrik elde edilerek yeni bir çığır açılmıştır.

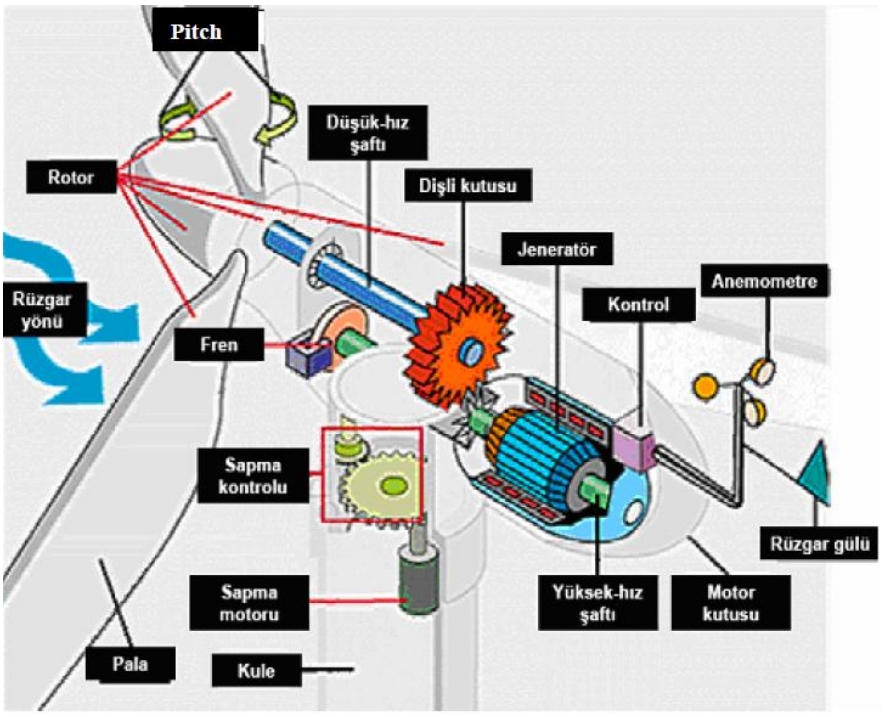
Rüzgar türbinleri temel olarak yatay ve dikey eksenli olarak iki tipte düşünülebilir. Tipik yatay eksenli rüzgar türbinleri iki ya da üç kanatlıdır. Yatay eksenli türbinlerin gruplandırması ise ürettiği güç göz önüne alınarak yapılmaktadır.

100 kilowatt türbinlerden başlayarak birkaç megawatt güç üreten büyük türbinlere kadar geniş bir güç aralığı ve türbin boyutları mevcuttur. Büyük boyuttaki yatay eksenli türbine örnek olarak GE Wind Energy'nin prototip olarak ürettiği 3,6 megawatt gücündeki türbin gösterilebilir [4]. Büyük güç gereksinimlerini karşılamak için birkaç türbinden meydana gelen rüzgar tarlaları kurulmaktadır. 100 kilowatt gücün altıdaki küçük türbinler su pompalama, telekomünikasyon ve şebekeye bağlantısı mümkün olmayan evler için kullanılabilmektedir. Bazen de küçük boyutlu türbin, dizel generatör, güneş enerjisi, bataryalar ile birlikte hibrid sistem olarak adlandırılan uygulamalarda kullanılmaktadır.

2.1 Sabit ve Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri

Günümüzde dünya piyasasında kullanılan iki çeşit rüzgar türbini sisteminden bahsedebiliriz. İlki sabit hızlı rüzgar türbinleridir. Bu türbinlerde elektrik generatörü direkt olarak şebekeye bağlıdır. Bu nedenle rotor hızında küçük bir değişikliğe müsaade edilebilmektedir. Bu sistemin performansı sistemi oluşturan elemanların

mekanik performansına bağlıdır. Oluşan türbülans ve kule gölgeleri yük ve enerji dalgalanmalarına neden olur. Bu değişkenlikler sabit hızlı rüzgar türbinlerinde elde edilen enerji kalitesini düşürdüğü ve mekanik gerilmelere neden olarak türbin ömrünü olumsuz etkilediği için istenmez. Diğer taraftan sabit hızlı türbinlerinde optimum tepe hız oranının elde edildiği bir rüzgar hızı vardır ve genellikle türbinler bu rüzgar hızında çalıştırılırlar. Bu noktada ise rüzgardan maksimum enerji elde edilemez. İkinci tip olarak değişken rüzgar hızlarında çalıştırılabilen rüzgar türbinlerinden söz edebiliriz. Bu türbinlerde generatör elektrik şebekesine direkt bağlı değildir. Generatör ve şebeke arasında elektronik konvertörler olduğundan rotorun herhangi bir hızda dönmesine olanak sağlanır. Değişken hız konfigürasyonları rotor hız kontrolü sağlar. Bu da yaklaşık sabit bir tepe hız oranında türbin sisteminin çalıştırılmasına olanak sağlar. Şebekedeki elektrik enerjisine uyum sağlandığı için mekanik gerilmeler önlenmiş olur. Enerji türbin ataletiyle emilerek rotor torkunda dalgalanmalar giderilir. Yüksek hızda rüzgar türbin kanatlarına ulaştığında rotor hızı artarkenşebekeye sabit güç verilmeye devam edilir. Güç dalgalanmaları azaltılarak elde edilen gücün kalitesi artırılabilir. Böylelikle son kullanım noktalarında voltaj değişikliği önlenmiş olur. Değişken hızda zaman sabiti daha uzun olabilir böylelikle kanat açısı (pitch) kontrol karmaşıklığı azaltılabilir. Yerleşim yerlerine yakınlığı düşünüldüğünde ise değişken hızlı rüzgar türbinleri sabit hızlı türbinlere göre daha sessiz çalışmaktadırlar. Değişken hız konfigürasyonlarında ek maliyetler ve karmaşık güç dönüştürücüleri gerekliliği dezavantaj olmasına rağmen yukarıda sıralanan avantajlar nedeniyle gün geçtikçe değişken hızlı rüzgar türbinleri kullanımı artmaktadır [4,5]. Şekil 2.1'de değişken hızlı rüzgar türbinine ait bileşenler verilmiştir.



Şekil 2.1: Rüzgar türbini bileşenleri [1].

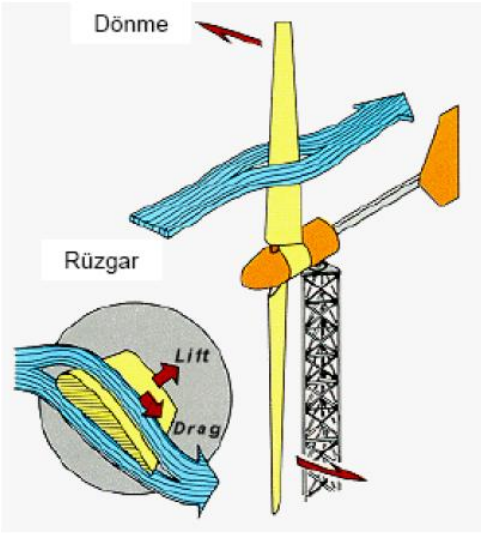
2.1.1 Rüzgar türbini kanatlarına etki eden kuvvetler

Rüzgar türbinleri aerodinamik olarak dizayn edilen kanatlardan oluşmaktadır. Bu kanatların kesiti aerodinamik bir profil olup hava akışını karşılayan kanat profili, aerodinamik kaldırma ve sürtünmeyi oluşturur. Kanat kesitinin ve kesit üzerine etkiyen kuvvetlerin daha kolay anlaşılabilir olması için Şekil 2.2'de kanat kesiti ve rüzgarın uyguladığı kuvvetler basit olarak gösterilmiştir. Alınan kesit üzerine etkiyen kuvvetler Şekil 2.3'de vektörel olarak gösterilmektedir. Şekil 2.3'de görüldüğü gibi R yarıçapında ve β pitch açısında türbin t_{ω} hızında döner.

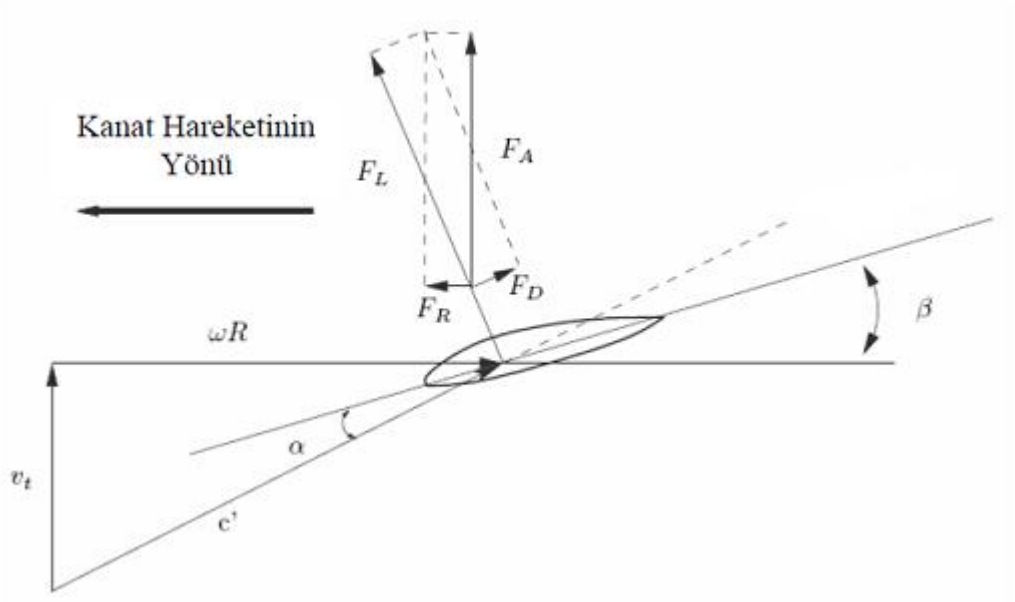
Kaldırma kuvveti F_L havanın akış yönüne dik yöndeki bir kuvvettir. Sürtünme kuvveti F_D ise hava akışına paralel yönde bir kuvvettir. Kaldırma ve sürtünme kuvvetleri havanın akış hızına, kanadın boyutuna, hava yoğunluğuna ve akışın hız vektörü ile kiriş hattı arasındaki açıya göre değişir. Bu açı taarruz açısı olarak isimlendirilir. Gövde uzunluğu L genişliği b olan bir kanadın akış hızı c ve yoğunluğu ρ olan hava akımı içindeki kaldırma ve sürtünme kuvvetleri aşağıdaki şekilde verilir.

$$F_L = c_L(\alpha)\frac{\rho}{2}c^2Lb \quad \textbf{(2.1)}$$

$$F_D = c_D(\alpha)\frac{\rho}{2}c^2Lb \quad \textbf{(2.2)}$$



Şekil 2.2 : Türbin kanatlarına etki eden kaldırma ve sürtünme kuvvetleri [3].



Şekil 2.3 : Kanat profili üzerine etki eden kuvvetler [4].

Verilen bir profil için, kaldırma $c_L(\alpha)$ ve $c_D(\alpha)$ sürtünme katsayıları rüzgar tüneli testlerine veya analitik formülasyonlara dayanarak ya da hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde bilgisayarda taarruz açısının bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir.$c_L(\alpha)$ ve $c_D(\alpha)$ eğrileri kanat boyutuna ve akış hızı ile ilişkili Reynold sayısına bağlıdır.

$$Re=68460.c.L \tag{2.3}$$

İdeal bir rüzgar türbininde, kaldırma ve sürtünme vektörleri aksiyal F_A ve radyal F_R kuvvetleri türbin şaftı boyunca olan eksene ve türbin yarıçapı boyunca olan eksene taşınır. Rüzgar türbinlerini kontrol etmek için iki yol vardır. Bunlar (1) taarruz açısı α yi değiştirmek, (2) pitch açısı β yi değiştirmek veya türbin dönme hızını kontrol etmektir [6].

2.1.2 Elde edilebilir rüzgar gücü

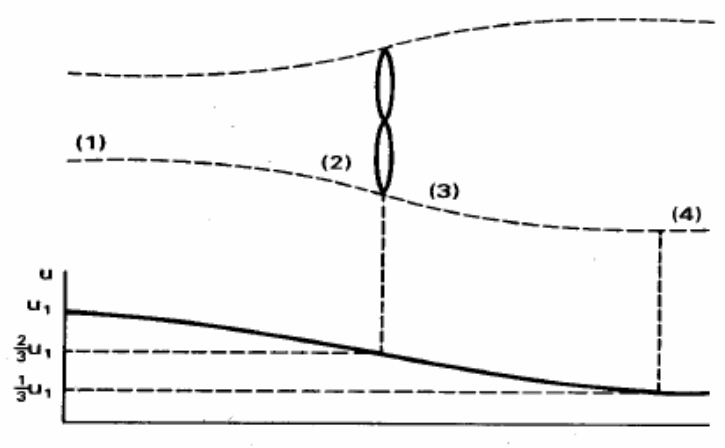
En ideal durumda kütlesi m , akış hızı u olan bir rüzgar paketinin kinetik enerjisi :

$$U=\frac{1}{2}mu^2=\frac{1}{2}(\rho Ax)u^2 \tag{2.4}$$

olarak verilmektedir. Burada A rüzgar türbininin süpürme kesit alanı, ρ hava yoğunluğu, x rüzgar paketinin kalınlığıdır. Elde edilebilir toplam güç P_w için kinetik enerji denkleminin zamana göre türevi alınırsa :

$$P_w=\frac{dU}{dt}=\frac{1}{2}\rho Au^2\frac{dx}{dt}=\frac{1}{2}\rho Au^3 \tag{2.5}$$

bulunur. İdeal şartlarda rüzgar türbinine yaklaşan havanın profili Şekil 2.4 deki gibidir:



Şekil 2.4 : Rüzgar türbinine doğru esen bir dairesel hava akımı [6].

Rüzgar paketinin kesit alanı ve rüzgar hızı arasındaki ilişki aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir :

$$u_2=u_3=\frac{2}{3}u_1 \tag{2.6a}$$

$$u_4 = \frac{1}{3}u_1 \quad \textbf{(2.6b)}$$

$$A_2 = A_3 = \frac{3}{2}A_1 \quad \textbf{(2.6c)}$$

$$A_1 = \frac{1}{3}A_4 \quad \textbf{(2.6d)}$$

Rüzgar türbin üzerinden geçerken, türbin tarafından alınan güç kadar güç kaybedecektir. Denklemsel olarak;

$$P_{m,ideal} = P_1 - P_4 = \frac{1}{2}\rho(A_1 u_1^3 - A_4 u_4^3) = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{8}{9}A_1 u_1^3\right) \quad \textbf{(2.7)}$$

Bu denklem verilen bir hava akış alanı A_1 için, ideal bir türbinin rüzgardan elde edilebilir gücün 8/9'unu aldığını gösterir. Hava akışının kesit alanı fiziksel olarak ölçülemediğinden, elde edilen güç için kabul edilen uygun kesit alanı rüzgar türbininin kesit alanının aksine *A* alanı olarak belirtilen rüzgar türbini süpürme alanı A_2 olarak ifade edilecektir. Bu durumda :

$$P_{m,ideal} = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{8}{9}\left(\frac{2}{3}A_2\right)u_1^3\right) = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{16}{27}A_2 u_1^3\right) = \frac{16}{27}\left(\frac{1}{2}\rho A_2 u_1^3\right) = 0.59P_w \quad \textbf{(2.8)}$$

elde edilebilir gücün denklemi çıkarılmış olur. Bunun anlamı türbinin rüzgar türbini süpürme alanına eşdeğer yayılı olmayan hava tüpündeki toplam gücün %59 dan fazlasını çıkartamadığıdır. Bu durum Betz teoremi olarak bilinir ve bütün rüzgar türbinleri için verimliliğin %59 dan fazla olamayacağı bir sınırdır. [6]

2.2 Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler

Rüzgar türbininin ürettiği mekanik enerjiyi minimum kayıpla elektrik enerjisine dönüştürmek için, farklı hız ve çıkış kombinasyonları kullanılmaktadır. Rüzgar türbinlerinde üç çeşit generatör kullanılmaktadır.

1) Doğru akım generatörü,
2) Senkron generatör,
3) Asenkron generatör.

Küçük güçlü sistemlerde eskiden çok kullanılan doğru akım generatörü, günümüzde yerini genellikle senkron veya asenkron generatörlere bırakmıştır. Bu generatörler, konverterler yardımıyla kolayca doğru akımı alternatif akıma dönüştürebilen güç elektroniği elemanları ile birlikte çalışmaktadırlar. Senkron ve asenkron generatörler daha çok orta ve büyük güçlü sistemlerde yaygın olarak kullanılırlar. Bu bölümde

değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörler ve konverterlerin ana özellikleri incelenecektir.

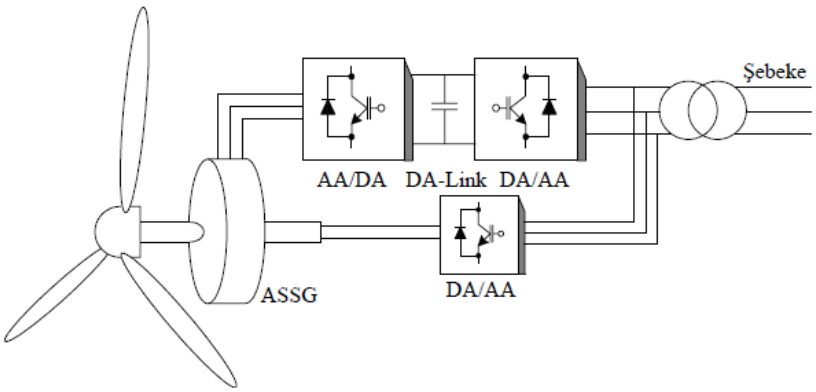
2.2.1 Doğru akım generatörleri

Doğru akım makinaları, düşük güvenilirlik ve bakım gerektirmesi gibi dezavantajlarına rağmen, hız kontrollerinin kolay olması nedeniyle endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Doğru akım generatörleri küçük kapasiteli rüzgar türbinlerinde, özellikle elektriğin şebekeden bağımsız olarak kullanıldığı yerlerde tercih edilmektedirler. Son yıllarda mekaniksel komütatörlü doğru akım makinaları, komütatörü elimine etmek için daimi mıknatıslı olarak tasarlanmaya başlanmıştır. Bu tertibatta üretilen alternatif akım yarı iletken doğrultucular yardımıyla doğru akıma dönüştürülür. Fırçasız doğru akım makinaları olarak da isimlendirilen bu makinalar, daimi mıknatısların kapasitelerinin ve güçlerinin sınırlı olması nedeniyle, küçük güçlü rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadırlar [7].

2.2.2 Senkron generatörler

Senkron generatör, harici bir yükü besleyen üç fazlı sargıların oluşturduğu bir stator ve manyetik alanı oluşturan bir rotordan meydana gelir. Rotorun oluşturduğu manyetik alan ya daimi mıknatıslardan ya da sargılardan akan doğru akımdan üretilir. Senkron generatörler sabit hızlı sistemler için daha uygundur. Bu nedenle sabit hıza bağlı olarak sabit frekansta çalışırlar. Rüzgar türbinlerinde, genellikle alan sargılı ve daimi mıknatıslı olmak üzere iki tip senkron generatör kullanılmaktadır [6,7].

a) Alan Sargılı Senkron Generatör



Şekil 2.5 : Değişken hızlı alan sargılı senkron generatör [7]

Alan sargılı senkron generatörlerde (ASSG); stator sargısı, dalga genişlik modülasyonu (DGM/PWM) tekniğine göre anahtarlama yapabilen, çift yönlü akım akışının olabildiği (back-to-back) gerilim kaynaklı iki inverterden meydana gelmiş, dört bölgeli bir güç konverteri üzerinden şebekeye bağlanmıştır (Şekil 2.5). Stator tarafındaki konverter elektromanyetik torku, şebeke tarafındaki konverter ise bu sistemin oluşturduğu aktif ve reaktif gücü regüle eder [6,7].

ASSG 'nin sağladığı avantajlar şunlardır:

• Elektromanyetik tork üretiminde stator akımının tamamı kullanıldığı için bu makinanın verimi genellikle yüksektir.

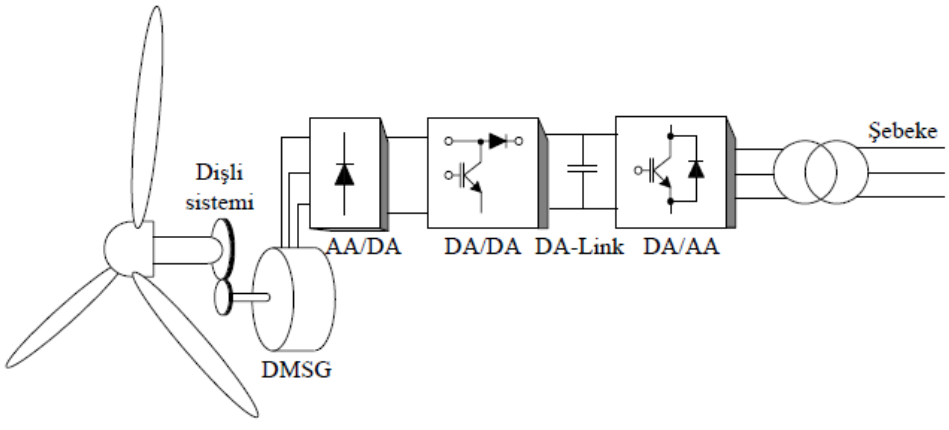
• Çıkık kutuplu alan sargılı senkron generatörün kullanılmasının en büyük faydası, makinanın güç faktörünün doğrudan kontrolüne müsaade edilmesidir. Bunun sonucu olarak, stator akımı bir çok işletim durumunda minimize edilebilir.

• Bu generatörlerin kutup eğimi indüksiyon makinalarına göre daha küçük olabilir. Bu durum dişli kutusu elimine edilerek, düşük hızlı çok kutuplu makinalar elde edilmesinde önemli bir özellik olabilmektedir.

Rotorda sargı devresinin bulunması daimi mıknatıslı senkron generatör (DMSG) ile kıyaslandığında bir dezavantajdır.

Ayrıca üretilen aktif ve reaktif gücü regüle etmek için, nominal rüzgar gücünün 1.2 katı büyüklüğünde konverterler kullanılması gerekmektedir.

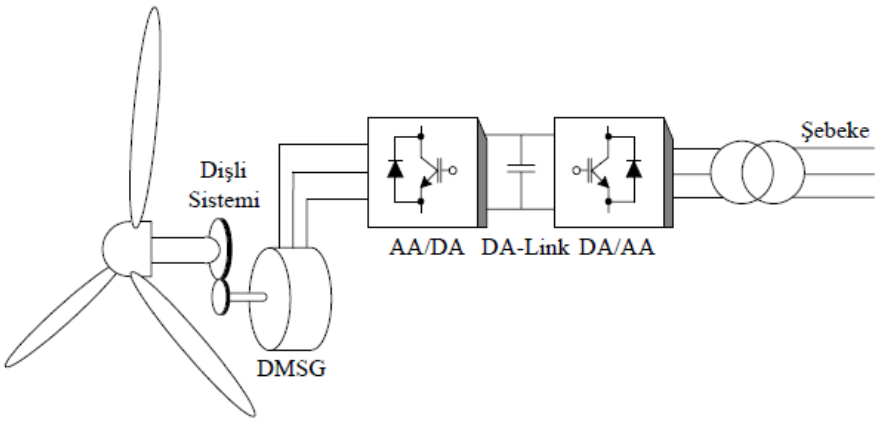
b) Daimi Mıknatıslı Senkron Generatör



Şekil 2.6 : Yükseltici DA-DA kıyıcısı ile beslenen daimi mıknatıslı senkron generatör [7].

Şekil 2.6 'de üç fazlı doğrultucuyu takip eden, yükseltici DA-DA kıyıcısı ile bağlantısı sağlanmış, daimi mıknatıslı senkron generatöre (DMSG) ait rüzgar güç

sistemi görülmektedir. Burada yükseltici DA-DA kıyıcısı elektromanyetik torku kontrol etmektedir. Şebeke tarafındaki konverter ise, girişin güç faktörünü kontrol ettiği gibi, aynı zamanda DA link gerilimini de regüle etmektedir. Genellikle bu konfigürasyon küçük güçlü (50 kW 'dan küçük) rüzgar güç sistemleri için tercih edilmektedir [6,8].



Şekil 2.7 : DGM konverterden beslenen daimi mıknatıslı senkron generatör [7].

Şekil 2.7 'de farklı bir DMSG rüzgar güç sistemi görülmektedir. Bu sistemde generatör ve DA linki arasına DGM tekniğini kullanan doğrultucu yerleştirilmiştir ve DGM inverter üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Bu sistemin Şekil 2.6 'daki sisteme göre avantajı; generatör ve güç elektroniği devresindeki kayıpları azaltmak için, optimal çalışma noktasına yakın bir çalışmaya müsaade edilen alan yönlendirmeli kontrolün kullanılmasıdır. Fakat, sıcaklık ve frekansla değişebilen generatör parametrelerinin performansı etkileyebileceği dikkate alınmalıdır [6,7,8].

DMSG 'nin dezavantajları şunlardır:

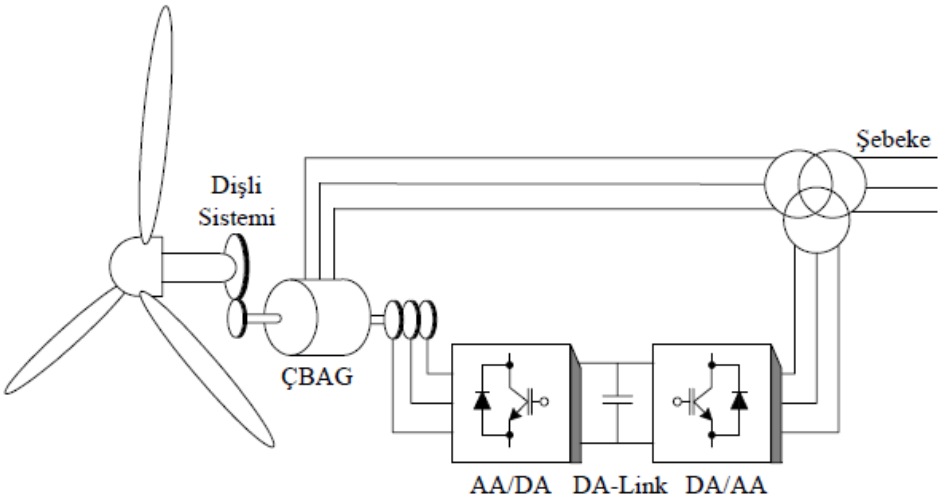
• Makinanın fiyatını arttıran daimi mıknatısların maliyeti yüksektir.
• Akımın genliğini arttıran diyotlu doğrultucular kullanılmaktadır.
• Mıknatıs malzemesinin manyetikliği bozulabilmektedir.
• Makinanın güç faktörünün kontrol edilmesi mümkün değildir.

2.2.3 Asenkron generatörler

Rüzgar türbinlerinde, alternatif akım üretmek için üç fazlı asenkron generatör veya indüksiyon generatörü olarak isimlendirilen generatörler kullanılmaktadır. Bu tip generatörler rüzgar türbin endüstrisi ve küçük hidroelektrik santrallerin dışında

yaygın bir şekilde kullanılmamaktadırlar. Bu generatörlerin tercih edilmelerinin sebebi, emniyetli olmaları ve maliyetlerinin düşük olmasıdır. Rüzgar türbinlerinde, genellikle rotoru sargılı ve sincap kafesli olmak üzere iki tip asenkron generatör kullanılmaktadır [7].

a) Çift Beslemeli Asenkron Generatör (DFIG)



Şekil 2.8 : Çift beslemeli rotoru sargılı asenkron generatör [7].

Şekil 2.8 'te çift beslemeli asenkron generatörün (DFIG) kullanıldığı bir rüzgar güç sistemi görülmektedir. Bu sistemde, stator sargısı şebekeye doğrudan bağlanmıştır. Rotor sargısı ise iki adet back-to-back gerilim kaynaklı DGM tekniğini kullanan inverterden oluşan, dört bölgeli güç konverteri üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Genellikle, rotor tarafındaki konverter kontrol sistemi, elektromanyetik torku regüle eder ve makinanın manyetizasyonunu sürdürebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki konverter kontrol sistemi ise, DA linkini regüle eder [6,8,9]. Senkron generatörlerle karşılaştırıldığında, DFIG 'ün aşağıda belirtilen bazı avantajları vardır.

• Sadece rotorun kayma gücünü kontrol etmeye yarayan konverter sistemine sahip olduğu için, toplam sistem gücünün yaklaşık %25 'i oranında bir inverter kullanılmaktadır. Bu da inverter maliyetini azaltır.

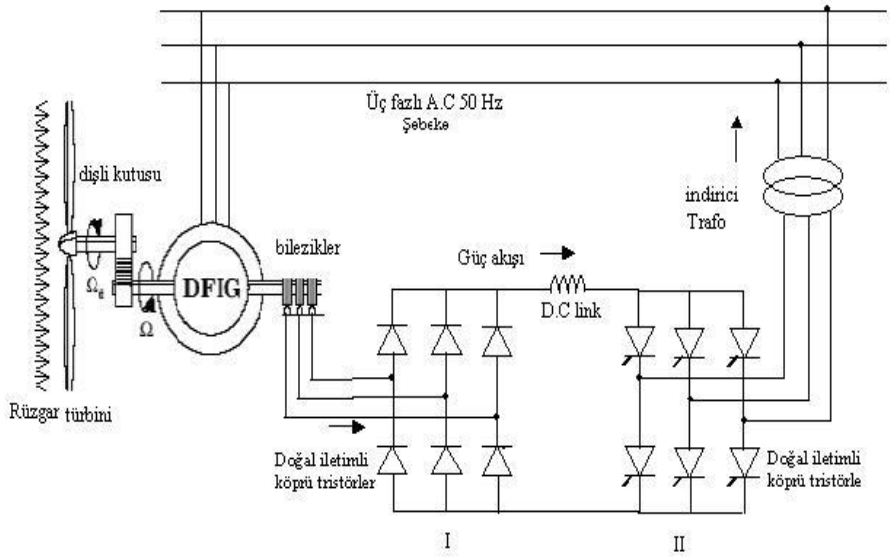
• Sistemde kullanılan filtreler toplam sistem gücünün 0.25 p.u.'lik kısmına hitap ettiği için, inverter filtrelerinin maliyeti azalmaktadır. Aynı zamanda inverter harmonikleri, toplam sistem harmoniklerinin daha küçük bir bölümünü temsil etmektedir.

• Ayrıca bu makina harici bozucu etkilere karşı dayanıklılık ve kararlılık göstermektedir.

DFIG için en büyük dezavantaj bünyesinde periyodik bakıma ihtiyaç duyan bilezik tertibatının bulunmasıdır [10].

DFIG nin matematiksel modeli

Şebekeye bağlı çalışan DFIG'ün statoru doğrudan rotoru ise, Şekil-2'de gösterildiği gibi güç elektroniği dönüştürücüleri ile şebekeye bağlanır. Bu bağlantı şekliyle rüzgar türbini ile sürülen DFIG'ü sadece senkron üstü hızlarda (-1 < s < 0) stator ve rotordan enerji elde edilebilir. Bu durumda güç akışının sağlanabilmesi için rotor tarafındaki dönüştürücü üç fazlı doğrultucu, diğeri ise üç fazlı evirici olarak çalışır. Sistemin giriş değişkeni rüzgar hızı, kontrol değişkeni üç fazlı eviricinin ateşleme açısı (90º-180º) ve çıkış değişkenini ise toplam aktif gücüdür [15].



Şekil 2.9. Rüzgar türbiniyle sürülen, şebekeye bağlı çalışan DFIG [15].

Park koordinat sisteminde ω_s senkron hızında ortak bir referans koordinat sisteminde DFIG'ün uç denklemleri aşağıda verilmiştir [16].

$$V_{qs} = r_s.i_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} + \omega_s.\psi_{ds} \quad \textbf{(2.9)}$$

$$V_{ds} = r_s.i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s - \psi_{qs} \quad \textbf{(2.10)}$$

$$V_{qr} = r_r.i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - p.\omega_m.)\psi_{dr} \quad \textbf{(2.11)}$$

$$V_{dr} = r_r.i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - p\omega_m.)\psi_{qr} \quad \textbf{(2.12)}$$

V_{ds} , V_{qs} , V_{dr} ,V_{qr} gerilimin ani değerleri i_{qs} , i_{qr} , i_{dr} , i_{ds} akımın ani değeridir. Alt indis s stator, r indis rotor büyüklüklerine karşılık gelmektedir. Kaçak akı matrisi akımlar ve endüktans matrisiyle ilişkisi aşağıdaki bağıntı ile verilmiştir :

$$\begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.13)}$$

DFIG'ün üretmiş olduğu elektromanyetik tork Te aşağıdaki bağıntıyla verilmiştir :

$$T_e = \frac{3}{2}.p.(\psi_{ds}.i_{qs} - \psi_{qs}.i_{ds}) \quad \textbf{(2.14)}$$

Kaçak akıların türev ifadesi aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.

$$\frac{d\psi_{ds}}{dt} = v_{ds} - r_s.i_{ds} + \omega_s.\psi_{qs} \quad \textbf{(2.15)}$$

$$\frac{d\psi_{qs}}{dt} = v_{qs} - r_s.i_{qs} + \omega_s.\psi_{ds} \quad \textbf{(2.16)}$$

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = v_{dr} - r_r.i_{dr} + (\omega_s - p.\omega_m).\psi_{qr} \quad \textbf{(2.17)}$$

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} = v_{qr} - r_r.i_{qr} + (\omega_s - p.\omega_m).\psi_{qs} \quad \textbf{(2.18)}$$

Yukarıdaki denklemlere bağlı olarak DFIG'ün dinamik davranışını belirleyen hareket denklemi ise aşağıdaki gibidir. Buna bağlı olarak sistem türbinden gelen Tm giriş torku, elektromanyetik torkun farkı ve sürtünme kayıplarının ardından dönüş hareketini oluşturur :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2.H}(T_e - F\omega_s - T_m) \quad \textbf{(2.19)}$$

Devrede mevcut anahtarları ideal kabul ederek rotor ve şebeke arasında mevcut sırası ile doğrultucu, evirici devrelerinin gerilimleri aşağıdaki bağıntılarla ifade edilir :

$$V_l = 3.\frac{\sqrt{6}}{\pi}.V_{rP} \quad \textbf{(2.20)}$$

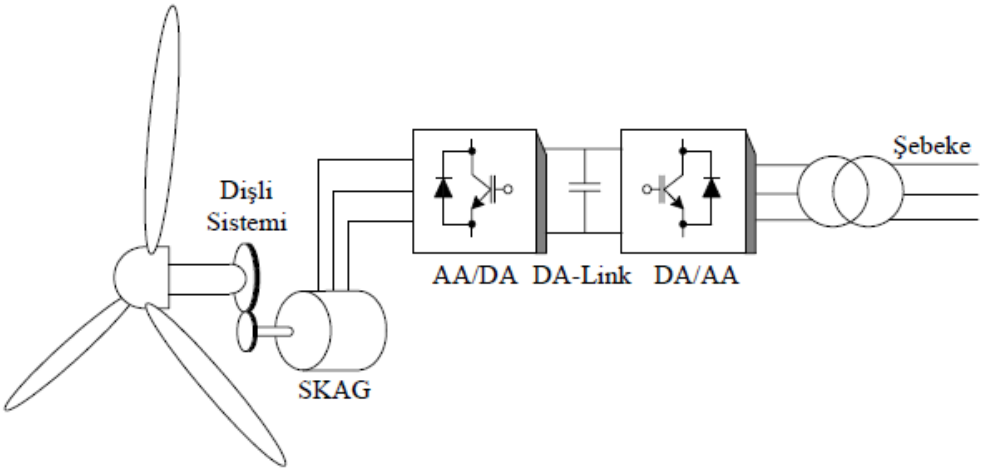
$$V_{II} = 3.\frac{\sqrt{2}}{\pi}.V_{rL}.\cos\alpha \qquad \textbf{(2.21)}$$

Buna göre DC hat üzerindeki kayıpları P_{dccu} ihmal ederek V_I=V_{II} eşitliği yazılarak aşağıdaki eşitlikle ifade edilir :

$$3.\frac{\sqrt{6}}{\pi}s.V_s.\frac{N_r}{N_s} = 3.\frac{\sqrt{6}}{\pi}.V_s.\ddot{u}_t\cos\alpha \qquad \textbf{(2.22)}$$

b) Sincap Kafesli Asenkron Generatör

Rüzgar güç sistemlerinde kullanılan bir başka generatör ise, sincap kafesli asenkron generatör (SKAG) 'dür (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 : Değişken hızlı sincap kafesli asenkron generatör [10].

Bu sistemde stator sargısı, DA linkinin iki tarafına back-to-back bağlı gerilim kaynaklı iki DGM inverterden meydana gelen, dört bölgeli güç konverteri üzerinden şebekeye bağlanır. Stator tarafındaki konverterin kontrol sistemi, elektromanyetik torku regüle eder ve makinanın manyetik alan üretebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki konverter, sistemden şebekeye aktarılan aktif ve reaktif gücü ve aynı zamanda DA linkini regüle eder [9,11]. Rüzgar güç sistemlerinde kullanılan SKAG 'nin sağladığı avantajlar aşağıda verilmiştir:

• Sincap kafesli asenkron makinalar, fırçasız, güvenilir, ekonomik ve sağlam bir yapıya sahip olmaları nedeniyle uygulamada sıkça kullanılmaktadırlar.

• Doğrultucu, generatör için programlanabilir bir uyartım oluşturabilmektedir.

• İnverter, harmonik kompanzatör olarak çalıştırılabilmektedir. Generatör parametrelerinin sıcaklık ve frekansla değişerek sistemin kontrolünü karmaşıklaştırması ve stator tarafındaki konverterin, makinanın ihtiyaç duyduğu

manyetik alanı sağlamak için nominal güce göre %30-%50 oranında daha büyük ölçülerde yapılması, bu sistemin dezavantajları arasında yer alır [10]. Ayrıca yukarıda anlatılan generatörlerin dışında; fırçasız çift beslemeli generatörler, değişken relüktanslı generatörler ve çift hızlı asenkron generatörler de bazen, rüzgar güç sistemlerinde özel uygulamalar için kullanılmaktadırlar.

Rüzgar türbinlerinde, türbin rotoru üzerindeki mekaniksel baskıları azaltmak için bazı stratejiler gerekmektedir. Bunun için, orta ve büyük güçlü rüzgar türbinlerinde, pasif hız yavaşlatıcı regülasyon ve kanat eğim regülasyonu tercih edilirken, küçük güçlü rüzgar türbinlerinde ise daha çok furling regülasyon kullanılmaktadır.

Türbin çıkış gücü, şaft gücü ayarlanarak maksimum yapılır. Bunun için maksimum güç noktası izleyicili sistemler kullanılmaktadır. Çünkü, vektör kontrolör tasarımı için güç ölçümü gereklidir ve gücün ölçülmesi rüzgar hızının ölçümünden daha basit ve daha kolaydır.

Bir rüzgar santralinin performansı, santralin kurulacağı bölgenin rüzgar rejimine ve türbin tipine en uygun generatörün kullanılmasına bağlıdır. Küçük ve orta güçlü rüzgar güç sistemlerinde hem SKAG, hem de DMSG kullanılır. Büyük güçlü rüzgar güç sistemleri için ise hem DFIG, hem de senkron generatör tercih edilir. DGM, sistemin giriş ve çıkışındaki akım harmoniklerini azaltacağı için, DGM tekniğine göre anahtarlama yapabilen, back-to-back gerilim kaynaklı dört bölgeli güç konverteri tercih edilir. Böylece, generatör üzerindeki tork titreşimleri azalır ve çıkış gücünün kalitesi artar. Ayrıca güç elektroniği teknolojisinde kaydedilecek yeni gelişmeler ile beraber, rüzgar güç sistemlerinin performansını optimize etmek mümkün olacaktır [10]

3.RÜZGAR SANTRALLERİNİN ENTEGRASYONU VE ETKİLERİ

Herhangi bir rüzgar türbininin şebekeye bağlantısı yapılmadan önce mutlaka sistem üzerinde yapacağı etkilerin teknik ve ekonomik değerlendirmesi yapılmalıdır. Rüzgar santrallerinin etkileri faydalı olabileceği gibi bazı durumlarda ise sistem kararlılığı ve enerji kalitesi ile ilgili olumsuz sonuçlara da neden olabilmektedirler. Rüzgar santrallerinin kullanım oranı ve çıkış gücü dağıtım sisteminde gerilim seviyesi değişim oranının artmasına sebep olmaktadır.Genellikle, normal işletme koşullarında tüketicilere yakın noktalarda şebekeye bağlantı yapan küçük güçlü santraller iletimden kaynaklan kayıpları düşürmekte ve dolayısıyla besleme hatlarının ucunda oluşan gerilim düşümlerini de azaltmaktadırlar. Üretilen enerji santrale yakın tüketiciler tarafından kullanıldığı durumlarda şebeke genelinde üzerinde en düşük olumsuz etkiler oluşmaktadır. Fakat özellikle santralin tüketicilerden uzak olduğu, üst gerilim seviyelerine doğru enerji transferinin gerektiği durumlarda iletim hatlarının aşırı yüklenmesine ve kayıpların artmasına sebep oldukları bilinmektedir. Rüzgar santralinin kurulum kapasiteleri, bağlı oldukları dağıtım sistemi içerisinde kararlılığı bozmamak için genellikle ticari kaygılardan kaynaklanan sebeplerden dolayı sabitlenmiştir. Ülkemizde EPDK ve TEİAŞ tarafından uygulanmakta olan yenilenebilir enerji santrallerinin bağlantı ölçütleri uyarınca (özellikle rüzgâr santralleri için) bağlantı yapılacak trafo kısa devre gücünün %5 değerini geçmeme kısıtlaması getirilmiştir. Bu değer aslında pratikte uygulamalar için genel-geçer bir değer olup aslında her yenilenebilir enerji santralinin kurulum gücü, bağlantı yapacağı şebekenin her hangi bir noktası uyarınca değişmektedir.

Alman Rüzgar Enerjisi Enstitüsü tarafından 2001 yılında yayınlanan rapor uyarınca da tanımlanan güçlü şebeke tanımı gereği, şebekenin toplam gücünün bağlanacak yenilenebilir enerji kaynağının 20-25 katı (%5) olması durumunda şebeke üzerinde yenilenebilir enerji sistemleri kaynaklı problemlerin en düşük seviyede görüleceği beklenmektedir.

Bu bağlamda, şebekenin güçlü olduğu noktalarda yapılacak bağlantıların şebeke üzerinde etkilerinin çok fazla hissedilmeyeceği, aksine bağlantı noktası gücünün zayıf olduğu noktalarda ise etkilerin daha ciddi düzeyde olması beklenmektedir. [12]

3.1 Rüzgâr Gücünün Reaktif Güç Üretimi Üzerindeki Etkisi

Sincap kafesli indüksiyon generatörleri için rotor hızı, aktif güç, reaktif güç ve gerilim arasında sabit ilişki bulunur. Bu sebeple bu tip türbinler gerilim kontrolunu reaktif güç çıkışıyla yapma imkanına sahip değildir. Gerilim çıkışının kontrolu için kontrol edilebilir reaktif üretebilecek ilave teçhizatın tesisi gerekmektedir. Değişken karakteristikli (aniden dalgalanan) rüzgar ile üretim yapan sabit hızlı türbinler şebekede flikere (türbinin ürettiği dalgalı güç çıkışına bağlı olarak şebeke geriliminde oluşan gerilim dalgalanmaları) neden olmaktadır.

Değişken hızlı türbinler, reaktif güç çıkışlarını ayarlayarak gerilim kontrolu yapabilmektedir. Ancak söz konusu gerilim kontrolu yeteneği çevirici ve kontrol sistemlerinin kapasiteleriyle sınırlıdır.

Genel olarak rüzgar türbinlerinin özellikle şebekenin zayıf olduğu uç noktalarında (kısa devre durumunda reaktif güç kayıplarını artırarak) gerilim sorununa neden olacağı dikkate alınmalıdır.

3.2 Rüzgâr Gücünün Gerilim Kontrolü Üzerindeki Etkisi

3.2.1 İletim sistemlerindeki etkisi

Rüzgâr gücünün gerilim kontrolü üzerindeki etkisi açıklanırken, iletim şebekelerinde rüzgâr gücünün gerilim kontrolü üzerindeki etkisi ve dağıtım şebekelerinde gerilim kontrolü üzerindeki etkisi arasındaki farkın ayırtına varılmalıdır. İletim şebekelerinde, kapasitör grupları ya da bazı özel cihazlar da kullanılmış olmasına rağmen, gerilim kontrolü görevi geleneksel olarak senkron Generatörleri kullanan büyük-ölçekli geleneksel güç tesislerine tahsis edilir. Bir taraftan bu geleneksel, düşey olarak entegre edilmiş birimler, güç üretim birimlerini ve diğer taraftan güç iletim ve dağıtım sistemlerini çalıştırmıştır. Ayrıca hem kısa-vadede (birimlerin günden-güne dağıtımı) hem de uzun-vadede (sistem planlanması) gerilim kontrol hususunu kontrol etmişlerdir.

Yakın zamandaki gelişmelerden dolayı, bu durum değişmektedir. İlk olarak, birçok ülkede halen uygulanmakta olan elektrik sektörünün liberalizasyonu ve yeniden yapılanması, güç üretiminin ve şebeke çalışmasının çözülmesine neden olmuştur. Bu aktiviteler, artık, eskiden oldukları gibi düşey olarak entegre edilmiş birimlerde birleştirilmemektedir. Sonuç olarak, gerilim kontrolü, güç tesislerinin

planlanmasının ve dağıtımının 'doğal bir parçası' değildir. Günümüzde, bağımsız üretim firmaları, planlamayı ve dağıtımı gerçekleştirmektedir ve uzun vadede, kâr yapmadığı düşünülen geleneksel güç istasyonları, şebekde gerilim kontrolü için önemleri dikkate alınmaksızın kapatılmaktadır. İlâve olarak, günümüzde şebeke firmalarının genellikle reaktif güç üretimi için üretim firmalarına ödeme yapması gerekmektedir. Ayrıca şebeke firmalarının, kendileri ya da üretim firması tarafından desteklenen üretim firmaları tarafından alınan kararlardan kaynaklanan her türlü gerilim kontrol problemini çözmesi gereklidir. Kısa vadede, bu, üretim firmalarının yeniden dağıtımı ile gerçekleştirilebilir. Uzun vadede, gerilimin kontrol edilmesi için ilâve cihazlar kurulabilir. Yakın zamandaki başka bir gelişme, üretimin, iletim şebekesinden dağıtım şebekesine kaymasıdır.

Bu iki gelişmenin (çözülme ve yerinden yönetim) bir sonucu olarak, geleneksel güç tesislerinin gerilim kontrolüne katkısı ortadan kalkmaktadır. Tüm iletim şebekesindeki gerilimin yalnızca geleneksel güç istasyonlarından kontrol edilmesi daha zor hale gelmektedir. Şebeke firmaları, özel (dedicated) gerilim kontrol cihazları kurarak ve üretim cihazlarının, uygulanan teknolojiden bağımsız reaktif güç kapasitesine sahip olmasını gerektirerek cevap verir. Bu, rüzgâr gücü ya da diğer yenilenebilirler için hiçbir istisna durumun olmadığı anlamına gelmektedir, şimdiye kadar durum böyle olmuştur.

Rüzgâr gücüne özgü üçüncü bir gelişme mevcuttur. Boyutlarından ve doğal durum üzerindeki etkilerinden dolayı, iletim sistemine bağlanmaya yetecek kadar büyük rüzgâr çiftlikleri uzak bölgelerde ya da kıyıdan az uzakta (offshore) kurulmaktadır. Düğüm gerilimi lokal bir büyüklük olarak, şebekede başka herhangi bir yerde geleneksel güç istasyonlarının kullanımıyla bu uzak mesafelerde gerilimin kontrol edilmesi zor olabilir. Bu nedenle, rüzgâr türbinlerinin gerilim kontrol özelliklerinin olması gereklidir. Çeşitli rüzgâr türbinlerinin gerilim kontrol özelliklerinin, şebeke bağlantısı ve türbinlerin piyasa potansiyeline ilişkin önemli bir husus haline gelmesi beklenmektedir.

Rüzgâr gücünün gerilim kontrolü üzerindeki ifade edilmek istenen son bir etkisi, rüzgâr türbinlerinin gerilim kontrol özelliklerinden bağımsız olarak büyük ölçekli rüzgâr çiftliklerinin iletim şebekesinde gerilim kontrol cihazları kurmasının gerekli hale gelmesidir. Başka bir deyişle, rüzgâr türbinleri, çıkışlarını değiştirdikleri geleneksel senkron generatörlerle aynı gerilim kontrol özelliklerine sahip olsalar

bile, bu generatörlerin gerilim kontrol görevini yerine getirebileceklerine dair hiçbir garanti olmayacaktır. Bu nedenle, şebeke gerilimini kontrol etmek için ilâve önlemlerin alınması kaçınılmaz olabilir.

Şebeke geriliminin lokal yapısı bunun nedenidir. Birçok durumda, rüzgâr türbinleri, çıkışının yerini aldıkları geleneksel güç tesisinin konumunda ya da yakınında kurulmayacaktır. Bir şehir ya da büyük bir endüstriyel bölge gibi bir yük merkezindeki ya da yakınındaki geleneksel bir güç tesisinin güç üretiminin uzaktaki (kıyıdan az uzaktaki) bir rüzgâr çiftliği ile değiştirilmesi muhtemeldir. Ancak, gerilim lokal bir büyüklük olduğu için, bu rüzgâr çiftliği, değiştirilen güç tesisinin yakınındaki şebeke gerilimini kontrol edemeyecektir. Bu nedenle, şebeke gerilimini kontrol etmek için, bu güç tesisinin konumunun yakınına ilâve cihazlar yerleştirilmelidir. Bu nedenle, gerilim kontrolü için ilâve gerekli önlemlere ilişkin neden, geleneksel güç üretiminin yerine rüzgâr gücü üretiminin geçmesi değil ancak üretimin, yükün yakınından daha uzak bir konuma hareket etmesidir.

Ancak ayrıca piyasa liberalizasyonunun sonucu olarak ülkeler arasındaki güç iletimi gibi üretimin coğrafi olarak yer değiştirmesine neden olan başka gelişmeler de mevcuttur. Bunlar da gerilim kontrol problemlerine neden olabilir ve iletim şebekelerinde gerilim kontrolü için ilâve cihazların kurulması gerekli olabilir. Bu nedenle, problem, geleneksel üretimin rüzgâr gücüyle değiştirilmesine özgü değildir. Söz konusu problem, generatör konumlarında önemli değişikliklere neden olan herhangi bir gelişme tarafından tetiklenebilir.

3.2.2 Dağıtım sistemlerindeki etkisi

Geleneksel olarak, dağıtım şebekelerinde gerilim kontrolüne ilişkin iki en önemli yaklaşım kademe-değiştirici transformatörlerin (başka bir deyişle, tur oranlarının değiştirilebildiği transformatörler) ve reaktif güç üretebilen ya da harcayabilen cihazların (başka bir deyişle, şönt kapasitörleri ya da reaktörleri) kullanılmasıdır. Kademe-değiştiren transformatörlerin kullanımı, düğüm gerilimlerinin kontrol edilmesinin zor bir yoludur. Bir düğümdeki ve yakınındaki gerilimin etkilenmesinden çok, transformatör tur oranının azalmasına ya da artmasına bağlı olarak dağıtım şebekesinin tüm gerilim profili yukarı ya da aşağı kaydırılır. Bu anlamda, kapasitörler ve reaktörler daha iyi performans gösterir çünkü temelde bağlandıkları düğümün gerilimini etkilerler. Ancak, düğüm geriliminin reaktif

güçteki değişikliklere karşı olan duyarlılığı sınırlıdır ve bu nedenle, nispeten büyük kapasitörler ve reaktörler gereklidir. Bu dezavantaj, iletim şebekesindekilerle karşılaştırıldığında, dağıtım şebekesindeki dalların R/X oranının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

İletim şebekelerine ilişkin durumda olduğu gibi, yakın zamandaki gelişmeler, dağıtım şebekeleri ile düğüm gerilimlerinin sağlanması görevini karmaşıklaştırmaktadır. Rüzgâr türbinleri, solar fotovoltaik (PV) sistemleri ve küçük birleşik ısı ve güç (CHP) üretimi gibi daha ve daha fazla dağıtılmış üretim-dağıtım şebekelerine bağlanmaktadır. Bu generatörler, dağıtım şebekelerindeki güç akışlarını etkilemektedir. Özellikle, rüzgâr ve güneş ışığı gibi, kontrol edilemeyen kaynakları kullanan generatörlerde olduğu gibi çıkış güçleri yükle ilişkili değilse, dallardan geçen akımdaki ve bu nedenle düğüm gerilimlerindeki varyasyonlar artar. Belirli bir daldaki akımın maksimum ve minimum değeri, yalnızca yüke bağlıdır ancak dağıtılmış üretimin bağlantısıyla, akım sınır değerleri, yüke ve dağıtılmış generatörün çıkışına bağlı hale gelmiştir. Sınırlar, yalnızca minimum ve maksimum yük arasındaki fark tarafından değil (genel durum buydu) bir taraftan minimum üretim ve maksimum yük durumu tarafından ve diğer taraftan, maksimum üretim ve minimum yük tarafından belirlenmektedir.

Dağıtım şebekesine bağlanan artan sayıdaki generatörle birlikte, gerilim kontrol olasılıkları da artabilir. Ancak birçok durumda, gerilim kontrolü için bu küçük-ölçekli generatörlerin kullanılması, iletim sistemlerine bağlanan büyük-ölçekli güç tesislerindeki generatörlerin kullanılmasından daha zordur çünkü:

- Reaktif güç üretimini değiştirmeleri her zaman mümkün değildir (varsa, güç elektronik konverterinin beyan değerine ve uygulanan generatör tipine ve beyan değerine bağlıdır);
- Gerilim kontrol özellikleriyle donatılmaları (çok) maliyetli olabilir;
- Gerilim kontrol özellikleriyle donatılmaları, 'adalama' riskini artırabilir [başka bir deyişle, sistemin geri kalanıyla bağlantısı kesildikten sonra bir dağıtım şebekesinin (bir kısmının) enerjili kaldığı durum];
- Bunlardan çok fazla vardır, örneğin, şebeke topolojisindeki bir değişiklikten sonra gerekli olabilen gerilim ayar noktası ya da zaman sabitleri gibi kontrolör parametrelerinin değiştirilmesini zorlaştırır.

Artmış çevresel bilinçlilik ya da yatırım riskini azaltma isteği gibi dağıtılmış üretimin miktarının artırılmasına ilişkin çok fazla neden mevcuttur. Ancak, dağıtım şebekelerindeki düğüm gerilimleri ve güç akışlarındaki dağıtılmış üretimin artmış miktarının etkisi, dağıtım şebekelerinde düğüm gerilimlerinin sağlanmasıyla ilgili problemlere neden olabilir. Bu durumda, gerekli önlemler alınmalıdır. Bir yaklaşım, örneğin, ilâve kademe değiştiricilerin (bazen dağıtım şebekesine ilişkin 1 değerinde anma tur oranı mevcuttur; o zaman cihaz gerilim regülâtörü olarak adlandırılır), reaktörlerin ve/veya kapasitörlerin kurulmasıdır.

3.2.3 Rüzgâr türbini gerilim kontrol özelliklerinin önemi

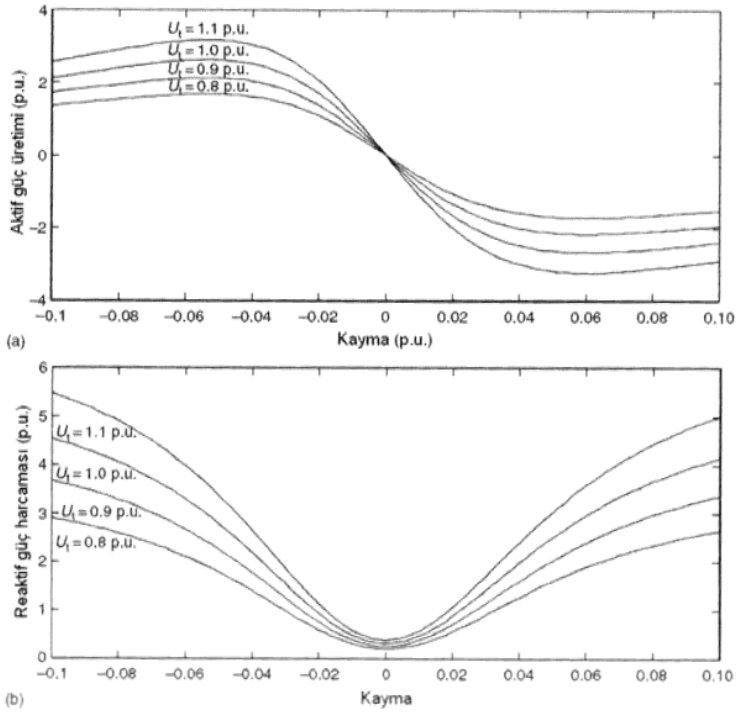
Büyük ölçekli rüzgâr çiftliklerinde kurulmuş ve iletim şebekesine bağlanmış rüzgâr türbinlerinin gerilim kontrol özellikleri artan şekilde önemli hale gelmektedir. Çözülme ve dağılmadan dolayı, geleneksel senkron generatörlerin gerilim kontrolüne katkısı azalmaktadır. İlâve olarak, rüzgâr çiftlikleri, geleneksel güç tesislerinden çıkan gerilimin kontrol edilmesinin zor olduğu uzak konumlarda bağlanır. Ayrıca, rüzgâr türbinleri gibi, dağıtılmış üretimin etkisinin bir sonucu olarak, dağıtım şebekelerindeki akımların değiştiği aralık daha büyük hale gelmektedir. Dal akımları ve düğüm gerilimleri ciddi bir ilişkiye sahip oldukları için, bu ayrıca düğüm gerilimlerindeki varyasyon aralığına da uygulanmaktadır. Gerilim kontrol özelliklerine sahip rüzgâr türbinleri bu etkiyi yok edebilir.
İletim sistemine ve dağıtım sistemine bağlanan rüzgâr türbinlerinin, gerilim kontrolüne katılabilmeleri artan bir şekilde önemli hale gelmektedir.

Bağlantı noktası gerilimleri, hat karakteristiklerine ve hat akımlarına bağlıdır. İletim şebekelerinde ve dağıtım şebekelerinde, bağlantı noktası gerilimi ve reaktif güç ilişkilidir ve bu nedenle, bağlantı noktası gerilimleri, generatörlerin reaktif güç harcaması ya da üretimi değiştirilerek kontrol edilebilir.

Sabit-hızlı rüzgâr türbinleri her zaman reaktif güç harcayan sincap kafesli indüksiyon generatörlerine sahiptir. Reaktif güç harcamasının miktarı, terminal gerilimine, aktif güç üretimine ve rotor hızına bağlıdır. Şekil 3.1'de, terminal gerilimi, rotor hızı, aktif güç üretimi ve reaktif güç harcaması arasındaki ilişki gösterilmektedir. Bu şekilde, sincap kafesli bir indüksiyon generatörünün gerilim kontrolü için kullanılamadığı gösterilmektedir çünkü bu indüksiyon generatörü, reaktif gücü yalnızca harcayabilir, üretemez ve çünkü şebekeyle reaktif güç alışverişi

kontrol edilemez ancak rotor hızı, aktif güç üretimi ve terminal gerilimi tarafından belirlenir.

Özellikle büyük rüzgâr türbinleri ya da rüzgâr çiftlikleri ve/veya zayıf şebekeler söz konusu olduğunda sincap kafesli bir indüksiyon generatörünün reaktif güç harcaması bir dezavantaj olabilir. Bu gibi durumlarda, reaktif güç harcaması ciddi düğüm gerilim düşüşlerine neden olabilir. Sincap kafesli indüksiyon generatöründe, generatörün reaktif güç harcaması birçok durumda kapasitörler tarafından kompanse edilir. Bu şekilde, bir taraftan generatör ve kapasitörün kombinasyonu ve diğer taraftan şebeke arasındaki reaktif güç alışverişi, bir bütün olarak sistemin güç faktörü iyileştirilerek azaltılabilir.



Şekil 3.1 : Terminal gerilimi (U_1) bir parametre olarak kullanılarak sincap kafesli bir indüksiyon generatörünün (a) aktif ve (b) reaktif gücünün rotor hızına bağımlılığı [13].

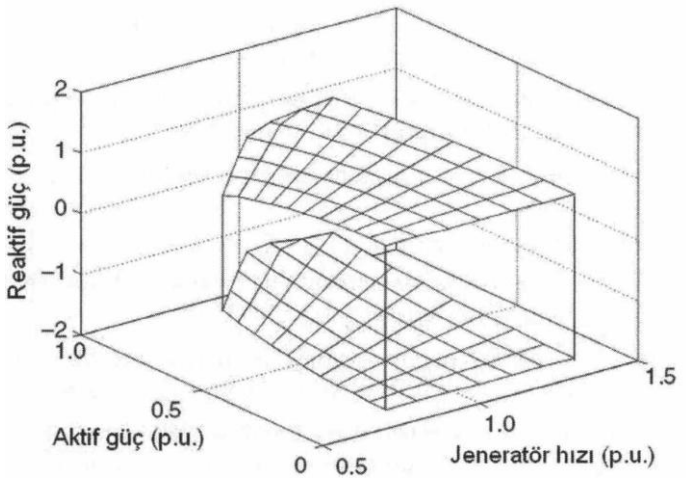
Geleneksel bir kapasitör, kontrol edilemeyen bir reaktif güç kaynağıdır. Kompanse edici kapasitörler eklenerek, rüzgâr türbininin düğüm gerilimleri üzerindeki etkisi azaltılır. Ancak bu, yalnızca nitel bir gelişmedir. Gerilim kontrol özellikleri iyileşmez çünkü rotor hızı, terminal gerilimi, aktif ve reaktif güç üretimi arasında hâlâ benzersiz bir ilişki mevcuttur. Sabit-hızlı bir rüzgâr türbininin gerilim kontrol özelliği, yalnızca geleneksel kapasitörler yerine daha gelişmiş çözümler kullanılarak iyileştirilebilir. Bu gibi gelişmiş çözümler, anahtarlamalı kapasitörler

ya da kapasitör grupları, statik kondenser ya da statik VAR kompensatörü (SVC) gibi kontrol edilebilir reaktif güç kaynaklarını içermektedir.

Çift beslemeli bir indüksiyon generatörünün reaktif güç üretimi, rotor akımı tarafından kontrol edilebilir. Bu durumda, reaktif güçle diğer büyüklükler arasında rotor hızı ve aktif güç üretimi gibi tek bir ilişki yoktur. Bunun yerine, belirli bir rotor hızında ve karşılık gelen aktif güç üretiminde, geniş çaplı olarak değişen reaktif güç miktarı üretilebilir ya da harcanabilir.

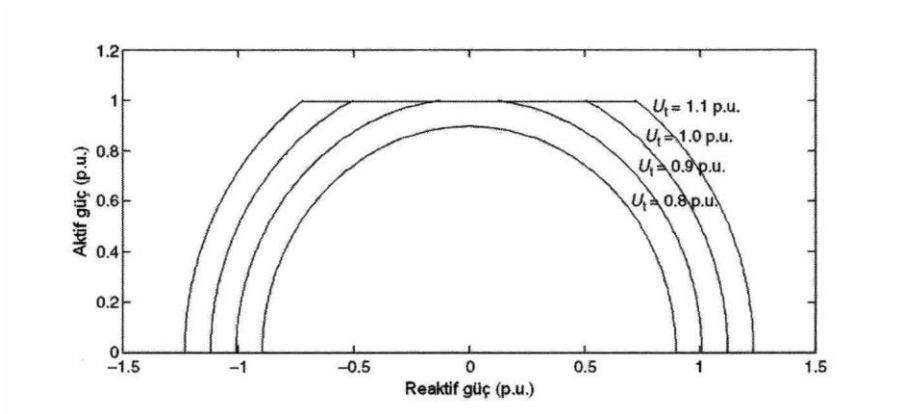
Şekil 3.2'de, anma terminal geriliminde çift beslemeli bir indüksiyon generatörünün çalışma aralığı gösterilmektedir. Doğrudan bu büyüklüklere bağlı olmasa bile, sincap kafesli bir indüksiyon generatörü söz konusu olduğunda, reaktif güç miktarının, belirli bir dereceye kadar, rotor hızından ve aktif güç üretiminden etkilendiği gösterilmektedir. Bunun nedeni, hem generatör torkunun hem de reaktif güç üretiminin, güç elektroniği konverterinin rotora beslediği akıma doğrudan bağlı olmasıdır.

Doğrudan-sürüşlü değişken-hızlı bir rüzgâr türbini söz konusu olduğunda, şebekeyle reaktif güç alışverişi, generatörün özellikleri tarafından değil güç elektroniği konverterinin şebeke tarafındaki karakteristikler tarafından belirlenir. Generatör, şebekeden tamamen ayrılmıştır. Bu nedenle, generatörle konverterin generatör tarafı ve konverterin şebeke tarafı ile şebeke arasındaki reaktif güç alışverişi ayrılmıştır. Bu, generatörün güç faktörü ile konverterin şebeke tarafının güç faktörünün bağımsız olarak kontrol edilebildiği anlamına gelmektedir.



Şekil 3.2 : Çift beslemeli bir indüksiyon generatörünün çalışma aralığı [13].

Şekil 3.3'te terminal gerilimi parametre olarak doğrudan-sürüşlü senkron bir generatöre sahip değişken-hızlı bir rüzgâr türbininin çalışma aralığı gösterilmektedir. Rotor hızı hesaba katılmamaktadır. Generatör ve şebeke ayrılmış oldukları için, rotor hızı şebeke etkileşimini pek etkilememektedir. Anma gerilimde ve güçte, rüzgâr türbini 0.9 ileri ve 0.9 gerideki bir güç faktörüyle çalışabilir. Şekil 3.3'te, doğrudan-sürüşlü senkron bir generatöre sahip değişken-hızlı bir rüzgâr türbininin, reaktif güç ya da terminal gerilimi kontrolüne izin verdiği gösterilmektedir çünkü reaktif gücün birçok değeri, tek bir aktif güç değerine karşılık gelmektedir. Şekil 3.5'te eğriler, çalışma bölgesinin sınırını göstermekteyken, Şekil 3.3'te tek bir ilişki gösterilmektedir.



Şekil 3.3 : Parametre olarak terminal gerilimiyle doğrudan sürüşlü bir generatöre sahip bir rüzgar türbininin çalışma aralığı; eğriler parametre olarak terminal gerilimi ile çalışma aralığının sınırını gösterir [13].

3.2.3.1 Gerilim kontrolünü etkileyen faktörler

Üretilen ya da harcanan reaktif gücün miktarı değiştirilerek, gerilim kontrol özelliğine sahip bir rüzgâr türbini düğüm gerilimlerini kontrol edebilir. Kontrol işlemlerini yönetmek için, belirli bir düğümdeki gerilim ölçülür ve gerilim kontrolöre beslenir. Kontrolörün transfer fonksiyonuna göre, kontrolör, üretilecek ya da harcanacak reaktif güç miktarını belirler. Şebeke geriliminin lokal yapısından dolayı düğümün türbinin yakınında olmasının gerekli olmasına rağmen, rüzgâr türbininin kendi terminal gerilimini kontrol etmesine izin vermek en kolayıdır ancak bazen şebekede başka bir yerdeki gerilim kontrol edilir. Ölçülen gerilim çok düşük olduğunda, reaktif güç üretimi artar; çok yüksek olduğunda, reaktif güç üretimi azalır.

Aşağıdaki faktörler, üretilen ya da harcanan reaktif güç miktarı ile reaktif güç üretimini kontrol eden konverter akımı arasındaki ilişkiyi etkilemektedir:

- Generatör parametreleri (yalnızca çift beslemeli indüksiyon generatörünün olduğu bir rüzgâr türbininde);
- Gerilim kontrolörün ayar noktası;
- Rüzgâr türbini şebeke bağlantısının direnç (R) ve reaktans (X) değerleri;
- Şebeke bağlantısında akan aktif gücün miktarı.

Bu çalışmada, yalnızca son faktörün etkisi incelenecektir (başka bir deyişle, şebeke bağlantısında akan aktif gücün miktarı). Diğer faktörlere göre, aşağıdakiler söylenebilir:

• Makine parametreleri makine büyüklüğüyle ciddi bir ilişkiye sahiptir; bu nedenle, belirli bir anma güce sahip tüm çift beslemeli indüksiyon generatörü tabanlı rüzgâr türbinleri, benzer generatör parametrelerine sahiptir. Bu nedenle, generatör parametreleri bu bağlamda pek fark oluşturmayacaktır.

• Uygulamada, terminal geriliminin ayar noktası hemen hemen her zaman gerilimin anma değerine eşit olacaktır. Bu nedenle, terminal gerilim kontrolörü ayar noktası önemli bir rol oynamayacaktır.[13]

3.3 Frekans Kontrolü

Değişken karakteristikli rüzgar enerjisi ile üretim yapan rüzgar santrallerinin primer frekans kontroluna katkıda bulunması mümkün görülmemektedir. Ancak, frekanstan bağımsız (frequency independent mode) işletme prensibiyle çalıştırılmadıkları sürece frekans kontroluna katkıda bulunamazlar. Teknik olarak bazı rüzgar türbinleri nominal çıkış gücünün altında işletilmesi durumunda frekans kontroluna katkı yapabilmektedir.

Rüzgar türbinlerinin sebep olduğu güç dalgalanmaları ancak konvansiyonel santrallerle dengelenebilmektedir. Şebeke arızası veya aşırı rüzgar hızı nedeniyle santralın durması gibi nedenlerle rüzgar santralı üretimindeki beklenmeyen ani kayıplar için yeterli yedek kapasite ayrılması gerekmektedir. Artan rüzgar santralı kurulu gücünün sebep olacağı frekans dalgalanmalarının ilgili yönetmeliklerdeki sınırlar içinde tutulabilmesi için yedekte tutulan konvansiyonel santrallerin artan sistem gereksinimlerine cevap vermesi gerecektir. UCTE Uzman Çalışma Grubu

Raporu'nda da bildirildiği gibi; yeni bağlantı şartları koşullarından biri de frekans yükselmesi durumunda rüzgar santrallerinin güç çıkışının azaltılması/sınırlandırılmasıdır.

3.4 Rüzgar Generatörlerinin Performans Karşılaştırması

Çizelge 3.1 : Rüzgar Generatörlerinin Performans Tablosu [14].

	Sabit Hızlı Rüzgar Generatörleri	**Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri**	
		Çift Beslemeli Asenkron Generatörleri	**Doğrudan Sürüşlü Senkron Generatörler**
Çıkış gücü kontrolü ve frekans kontrolü / kısa dönem dengeleme	Rüzgar türbinleri anahtarlama / blade kontrolü	Rüzgar türbinleri anahtarlama / kanat açısı kontrolü ve elektronik güç çeviricisi	Rüzgar türbinleri anahtarlama / kanat açısı kontrolü ve elektronik güç çeviricisi
Çıkış gücü emreamadeliği ve uzun dönem dengeleme	Değişken karakteristikli rüzgarın primer kaynak olması nedeniyle sorunlu	Değişken karakteristikli rüzgarın primer kaynak olması nedeniyle sorunlu	Değişken karakteristikli rüzgarın primer kaynak olması nedeniyle sorunlu
Gerilim Kontrolü	İlave teçhizat olmadan mümkün görünmemektedir	Elektronik güç çeviricisinin kapasitesine bağlı olarak bazı durumlarda kontrol mümkün	Elektronik güç çeviricisinin aşırı akımlara hassasiyeti nedeniyle mümkün görülmemektedir.
Arıza Akımını besleme	Doğasına uygun olarak arıza akımına katkıda bulunur	Elektronik güç çeviricisinin aşırı akımlara hassasiyeti nedeniyle bazı durumlarda sınırlıdır.	Elektronik güç çeviricisinin aşırı akımlara hassasiyeti nedeniyle bazı durumlarda sınırlıdır.
Rüzgar santrallerinin arıza ve arıza sonrası sağlaması gereken tepkileri	Rüzgar hızı, arızanın süresi ve şebeke yapısına bağlı gerilim kararsızlığı riski	Elektronik güç çeviricisinin aşırı kontrol edilmesindeki eksiklikler nedeniyle sorunlu	Teorik olarak mümkün ancak uygun özellikte elektronik güç çeviricisi kullanılması durumunda

3.5 Rüzgar Santrallerinin Bölgesel ve Şebeke Genelindeki Bozucu Etkileri

Değişken üretim yapma karakteristikleri nedeniyle rüzgar santralleri konvansiyonel santrallerden çok farklıdır. Rüzgar santralleri toplam kurulu gücü arttıkça sistem üzerindeki bozucu etkileri ve bunların sebep olacağı tehlike de artmaktadır.

Rüzgar santrallerinin bölgesel etkileri ve şebeke etkileri ayrı ayrı değerlendirilmektedir.

Bölgesel etkiler, her bir santralın bağlı olduğu trafo merkezinde diğer rüzgar santrallerinden bağımsız olarak görülmektedir.

Rüzgar santrallerinin şebekeye olan toplu bozucu etkileri sonucunda ise bütün sistem rahatsız olmaktadır.

Bölgesel bozucu etkiler:

• İletim hatlarında ve trafolarda akışlarda, trafo merkezlerinde gerilimlerde değişiklikler

• Koruma sistemleri, kısa devre arıza akımları ve şalt tesislerinde değişiklikler

• Arz kalitesinde değişiklikler (Harmonik, fliker…)

olarak özetlenmektedir.

İlk iki konu yeni bir rüzgar santralı bağlantı başvurusu yapılması durumunda

incelenmektedir. Bu çalışmalar, sadece rüzgar santrallerine mahsus olmayıp genel olarak tüm santral bağlantı başvurularında standart olarak yapılmaktadır. Ancak rüzgar santrallerinin arz güvenliği ve kalitesine yerel etkileri türbin tipine göre (sabit hızlı veya değişken hızlı) farklılık göstermektedir.

Arıza akımlarına rüzgar türbinlerinin katkısı üç rüzgar türbin tipi için de farklılık göstermektedir.

Arz kalitesiyle ilgili olan üçüncü konu da kendi içinde ikiye ayrılmaktadır:

Harmonikler, değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılan elektronik güç çeviricilerinden kaynaklanmaktadır.

Fliker, sabit hızlı rüzgar türbinlerinin, mekanik dalgalanmaları elektriksel çıktıya aynen yansıtmalarının sonucunda oluşmaktadır.

Şebekeye olan bozucu etkileri arasında:

• Sistem dinamiği ve stabilite

• Reaktif güç kontrolu ve gerilim

• Frekans kontrolu ve konvansiyonel santrallerda sık sık yük alma/yük atma sorunları bulunduğu bildirilmektedir.

Rüzgar santrallerinin sistem dinamiği ve kararlılığı (stabilitesi) üzerindeki bozucu etkileri, bu santrallerin türbinlerindeki generatör sistemlerinin konvansiyonel santrallerdeki senkron generatörlerden farklı olmalarından kaynaklanmaktadır. Bu

generatörlerin bağlantı noktasındaki gerilim ve frekansa bağlı tepkileri, diğer senkron generatörlerden farklılık göstermektedir. Değişken hızlı türbinlerin elektronik güç çeviricileri, gerilim düşümüne bağlı aşırı akımlara çok duyarlı olduğundan, küçük bir gerilim düşümünde bile bir bölgedeki rüzgar santralleri topluca trip edebilmekte, bu durumda şebekede çok önemli sorunlara yol açabilecek sistem kararlılığının korunması konusunda (stabilite) problemler meydana gelmektedir [14].



Şekil 3.4 : İspanya'da 24 saat içinde sistemde meydana gelen kısa devre arızaları nedeniyle bölgesel olarak şebeke geriliminin %10-20 düşmesi üzerine devre dışı olan rüzgar santralleri [14].

4. BİLGİSAYAR BENZETİMİ

Bu bölümde, DFIG'lü rüzgar türbininin ana şebeke ile paralel çalışması esnasındaki etkileşimi MATLAB programı ve "Simulink SimPowerSystems" yardımı ile modellenmiştir.Modellemede Rüzgar çiftliklerinin fazör benzetimli örneğinden yararlanılmıştır.

Çalışmanın amacı, şebekenin ve türbinin çeşitli durumlardaki davranışlarının analizi olduğu için, programdaki parametreler mümkün olduğunca korunmuştur.

4.1 Sistemin Özellikleri

Benzetimde, Rüzgar Santralinin modellenmesi için ilk bölümde sırasıyla, 6 / 8 / 16 adet 1.5MW gücünde DFIG kullanılmıştır.

Generatörlerin çıkış gerilimi 575V, orta gerilim için 25kV ve yüksek gerilim için 120kV alınmıştır. Rüzgar hızı artan ve azalan olarak 8-14 m/s arasında düşünülmüştür.

Generatörlerin çıkış barasına 500kW gücünde bir yük bağlanmıştır. Orta gerilim sebekesine bağlanması için 575V/25kV 12MVA gücünde bir transformatör seçilmistir. Bu transformatörün çıkısı 10km'lik orta gerilim iletim hattıyla ana sebekeye bağlanmaktadır. Orta gerilim hattının pozitif bileşen direnci 0.1153Ohm/km, pozitif bileşen endüktansı 0.00105H/km'dir. Bu değerler orta gerilim hattının 1.5MVar değerinde bir reaktif güç çekmesini sağlıyor. Orta gerilim barasına, 2MVA, 1.68MW, 0,93 güç faktörü ve 2300V luk bir asenkron motoru ve 200kW lık resistif yük içeren bir fabrika bağlanmıştır.

Rüzgar türbinine bağlanan 500kW'lık yük ile birlikte 2,23MW'lık yük oluşturulmuştur. Bu yükün tamamını DFIG'ler karşılamaktadır.

Orta gerilim sebekesine bir nötr noktası olusturması için topraklama transformatörü bağlanmıstır. Orta gerilim, 25kV/120kV 47MVA gücünde bir transformatör ile yüksek gerilime bağlanmıs ve ana şebeke'nin kısa devre gücü 2500MVA seçilmistir.

Rüzgar santralinin kontrolü sebeke ve santral bağlantı noktasından alınan gerilim ve akım bilgileri , rüzgarın hızı ve dişli açısı kontrol edilerek yapılıyor. Şebekeden

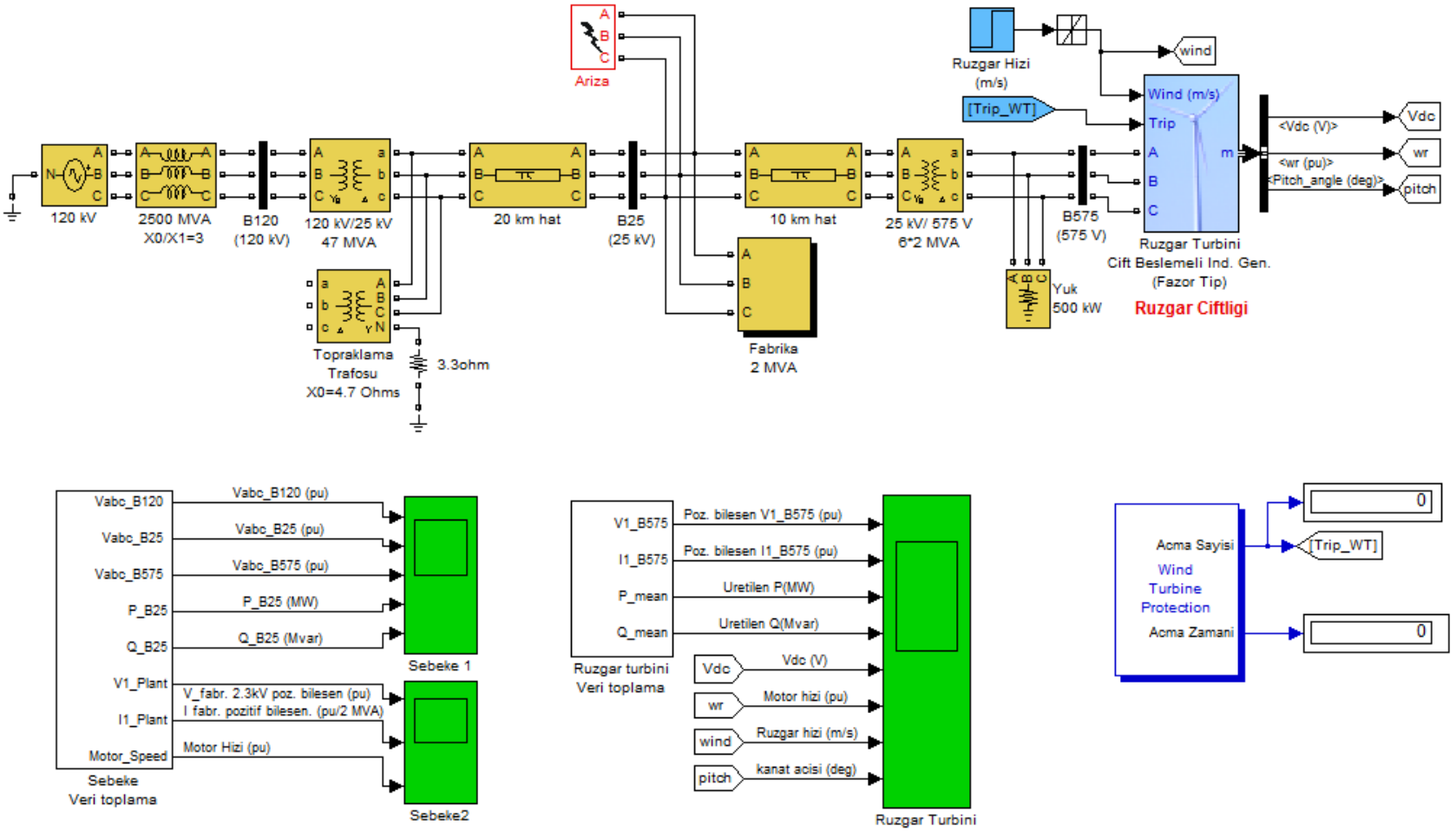
alınan gerilim ve akım bilgileri ile aktif ve reaktif güç hesaplanıyor. Hesaplanan aktif ve reaktif güç ile rotorun ve kanatların dönme hızı ayarlanıyor.

Rotor'dan gelen akım alternatif olduğu için köprü diyot ile doğru akıma çevriliyor. Doğru akım DGM kontrollü inverter ile alternatif akıma dönüstürülüyor. Üretilen doğru akım ve alternatif akım DFIG kontrol ünitesince kararlastırılıyor. Üretilen alternatif akımın ortalaması, sebeke tarafınfa hesaplanan aktif ve reaktif güçler ve referans alınan bilgiler ile DFIG kontrol ünitesi rüzgar santralini kontrol ediyor.

Çift çıkışlı indüksiyon generatörünü içeren rüzgar santrali, şebekeye 25kV luk barada bağlanmıştır.Dolayısıyla, 10km lik iletim hattı va 25kV/575V luk orta gerilim trafo yatırımı, rüzgar santrali kurucusu tarafından yapılmıştır.Bu 2 tesis de rüzgar santraline dahil kabul edilmiştir.

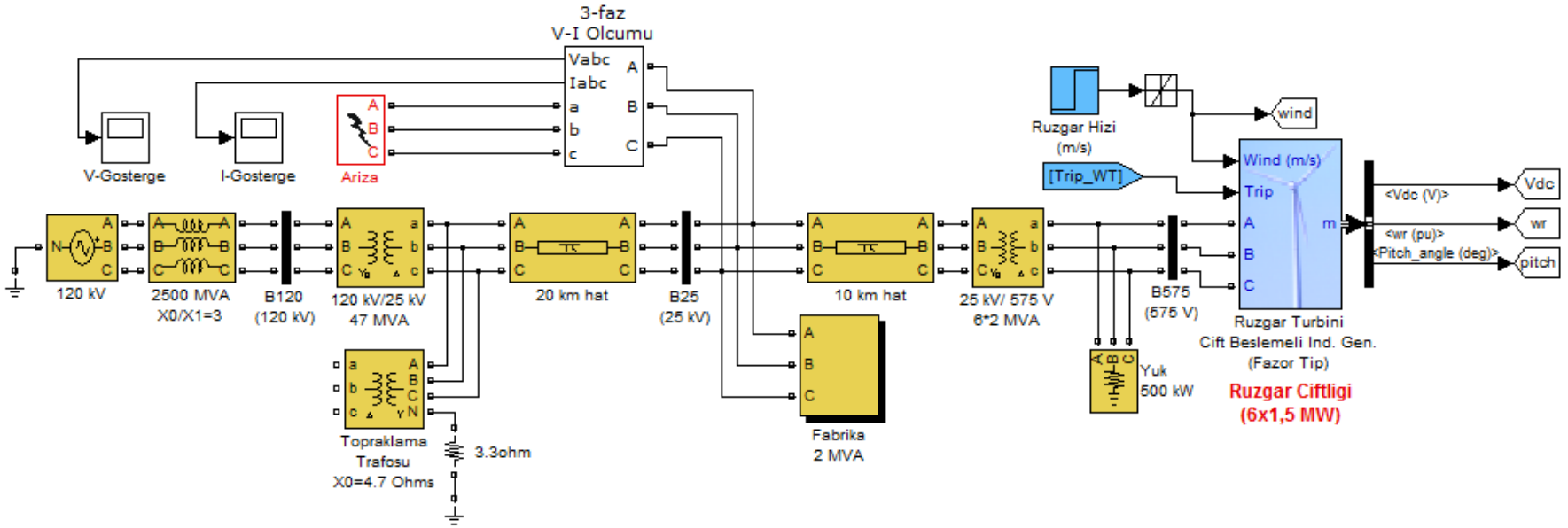
25kV luk barada yer alan 2MVA lık yüke ait analizler, bu çalışmada yer almamıştır.

Santral ve şebekenin normal çalışma ve santral tarafında arıza olması durumundaki davranışları incelenmiştir.



Şekil 4.1 : Rüzgar Çiftliği (DFIG Fazör Modeli)

Santralin bağlandığı 25kV luk barada şebekenin kısa devre gücü Simulink yardımıyla 115,15 MVA olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 : B25 barasındaki kısa devre gücü hesabı

4.2 Senaryolar

Rüzgar türbinin yük değişimlerine ve arıza durumlarında verdiği tepkiler grafikler yardımıyla açıklanacaktır. Her senaryoda generatör çıkıs barasında gerilim, aktif ve reaktif güç alısverisi bulunmaktadır. Gerilim olarak faz nötr geriliminin tepe değeri ölçülmüstür.

Rüzgar santrallerinin şebekeye entegrasyonu esnasında:

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

ve

-Rüzgar hızı artarken ve azalırken normal çalışma durumu,

-Rüzgar hızının birden sıfırlandığı durum,

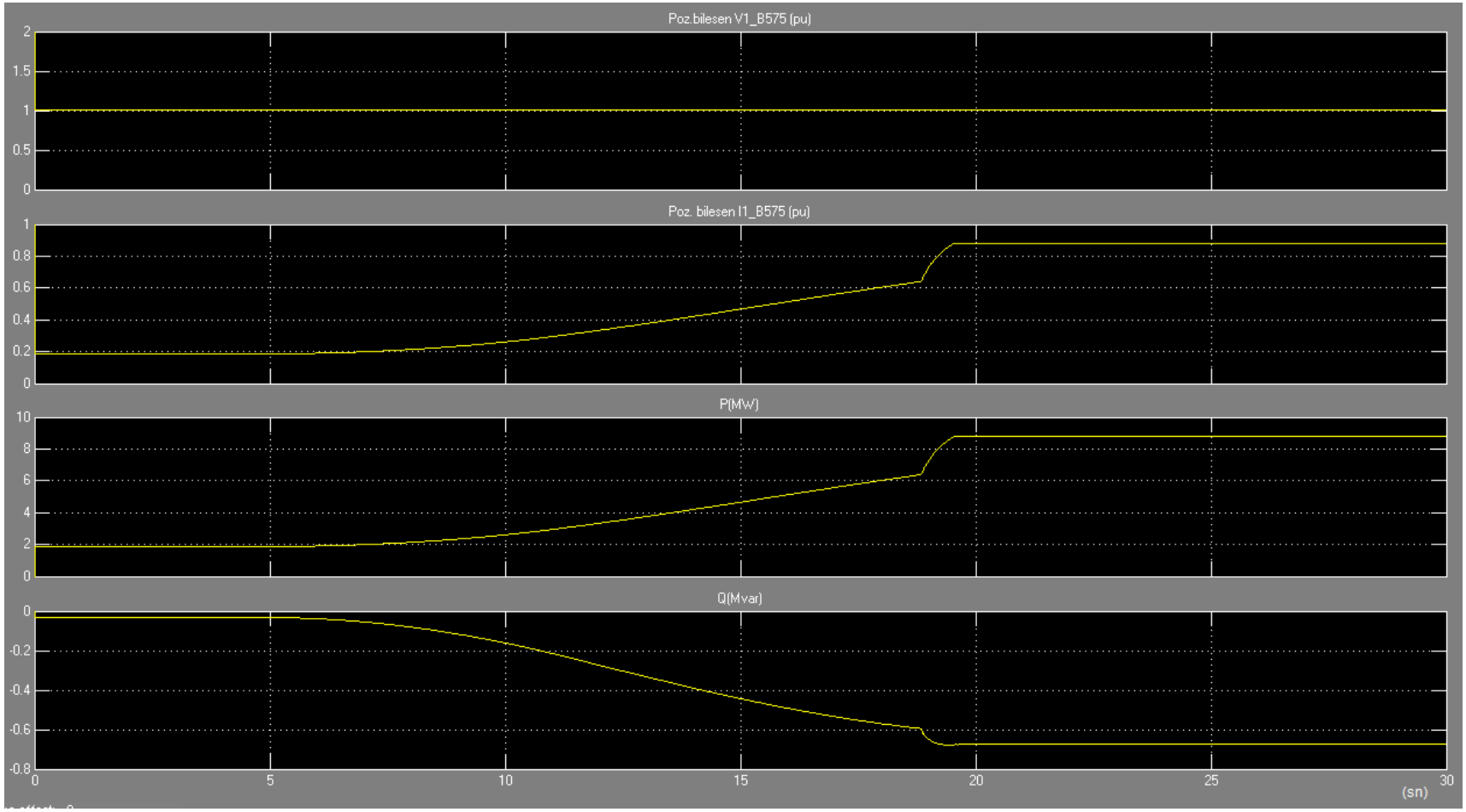
-Rüzgar hızı sıfırken ve rüzgar hızı artarken, santralin bağlı olduğu orta gerilim hattında 1 faz-toprak, 3 faz-toprak ve faz-faz arızalarında santralin ve şebekenin davranışları incelenecektir.

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

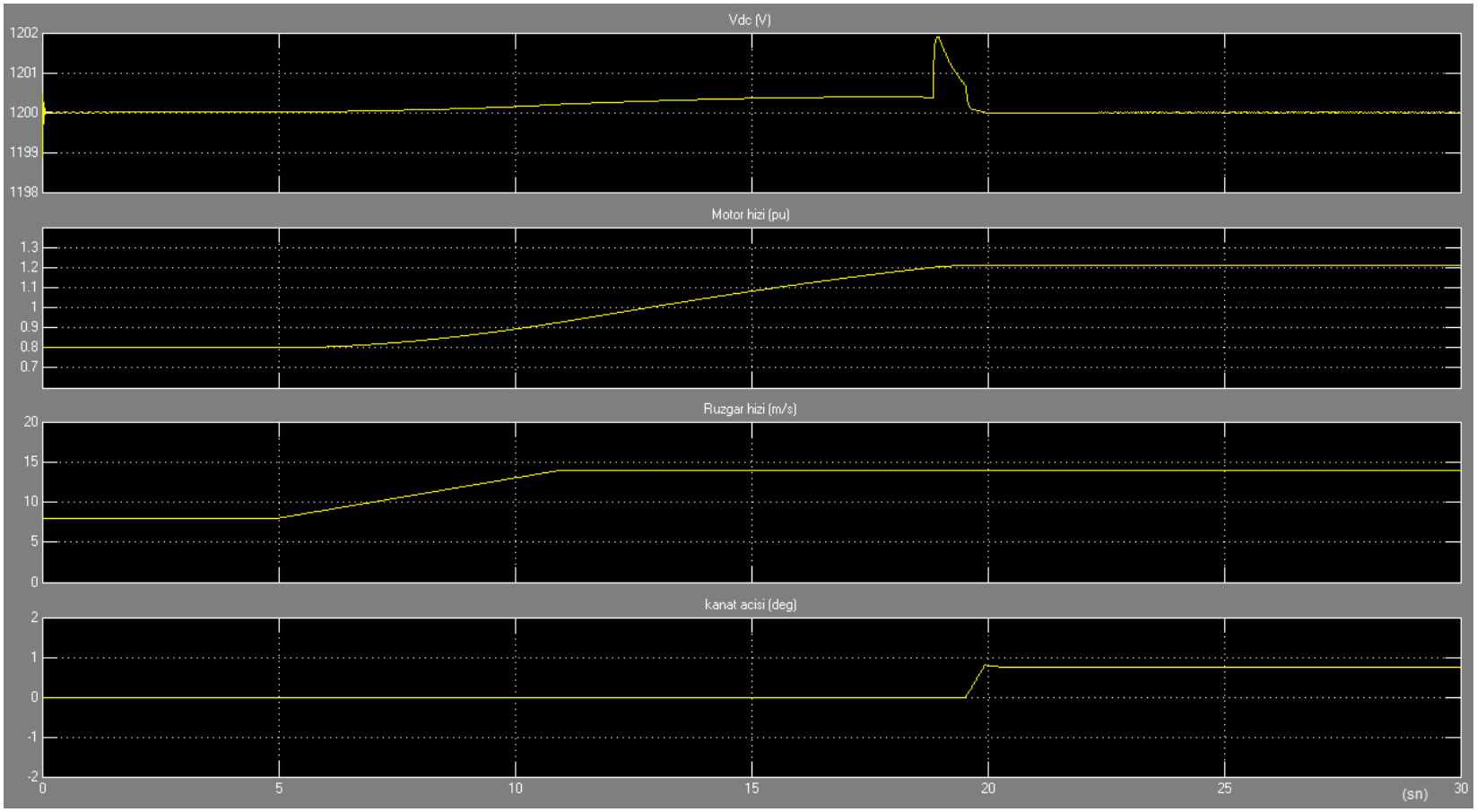
Anasebekeye paralel bağlanan DFIG'lü rüzgar türbinlerinin güçleri sırasıyla 6MW, 12MW ve 24MW olarak arttırılıp, şebeke ve santralin verdiği tepkiler incelenecektir. Bu güç değerleri şebekeye bağlantı noktasına ait kısa devre gücünün %5, %10 ve %20 değerlerine karşılık gelmektedir.Bu esnada rüzgar hızı, 8-14 m/s aralığında artış göstermektedir.

4.2.1.1 Şebeke bağlantı kriteri analizi – %5

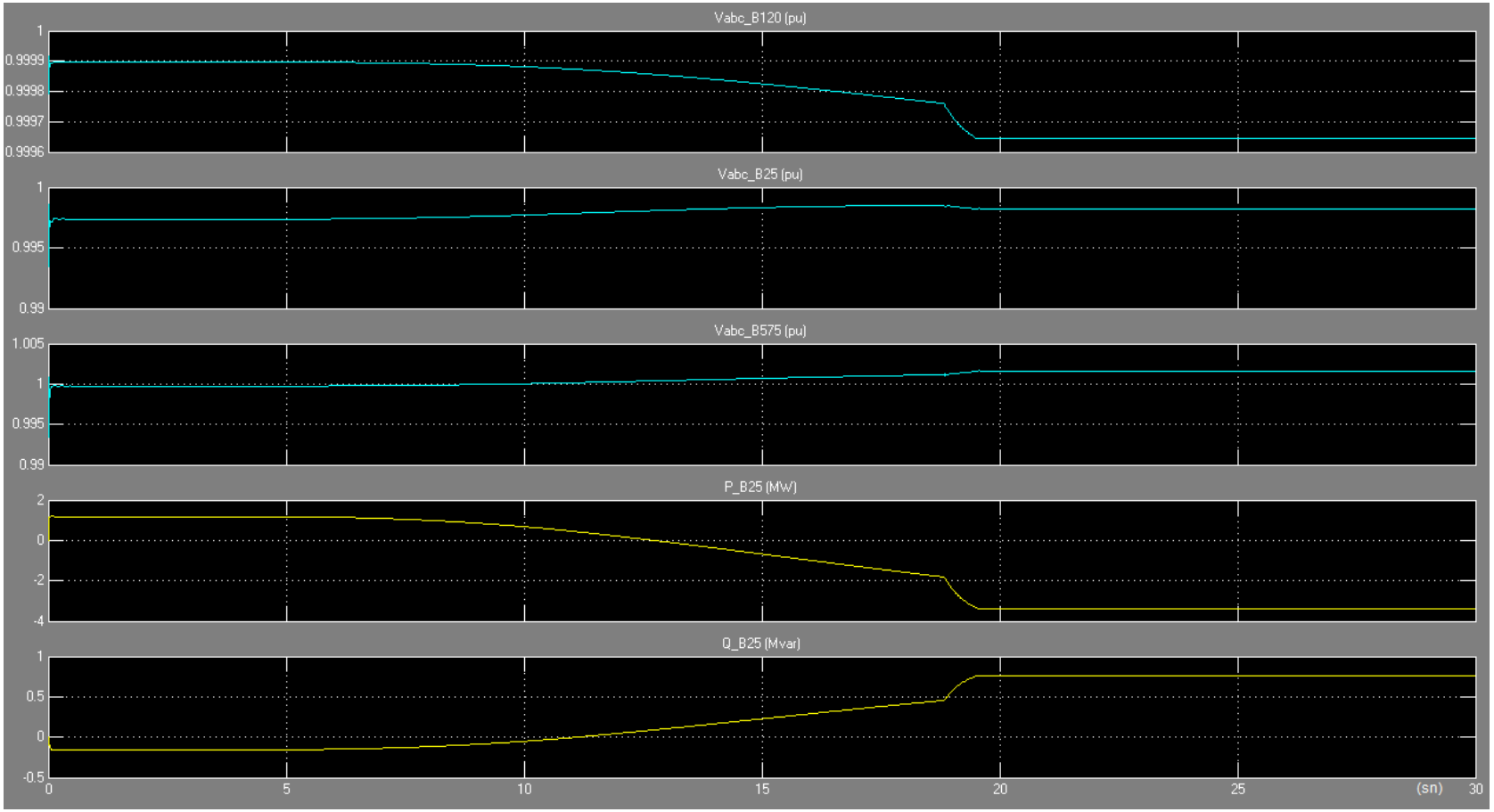
Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de görüleceği üzere rüzgar hızının 8m/s den 14 m/s ye t=5s de arttığı durumda, t=15s sonunda, rüzgar santralinin ürettiği güç 6 MW a çıkıyor. Bu süre zarfında türbin hızı 0,8pu'den 1,2pu'e çıkıyor.İlk aşamada (pitch angle) kanat açısı 0^o (sıfır) ve rüzgar hızı artışından sonra, $0,79^o$'ye, mekanik gücü sınırlamak üzere çıkıyor.Santral, bu durumda normal çalışmasını sürdürerek, kendisinden beklenen gücü üretip, kendine bağlı yükleri beslemektedir.



Şekil 4.3 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %5'i iken Rüzgar Santralinin davranışı - 1



Şekil 4.4 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %5'i iken Rüzgar Santralinin davranışı - 2

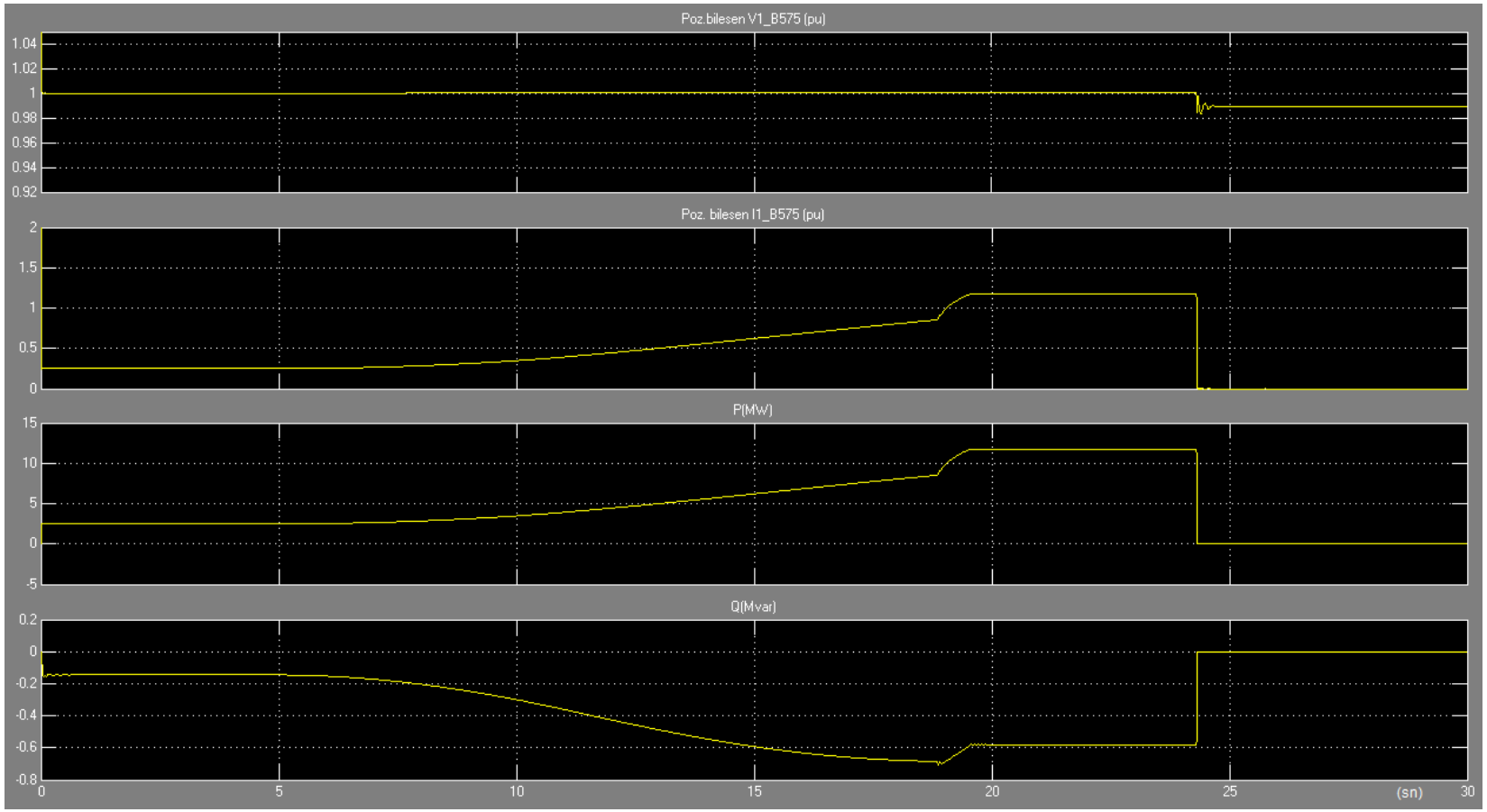


Şekil 4.5 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %5'i iken şebekenin davranışı

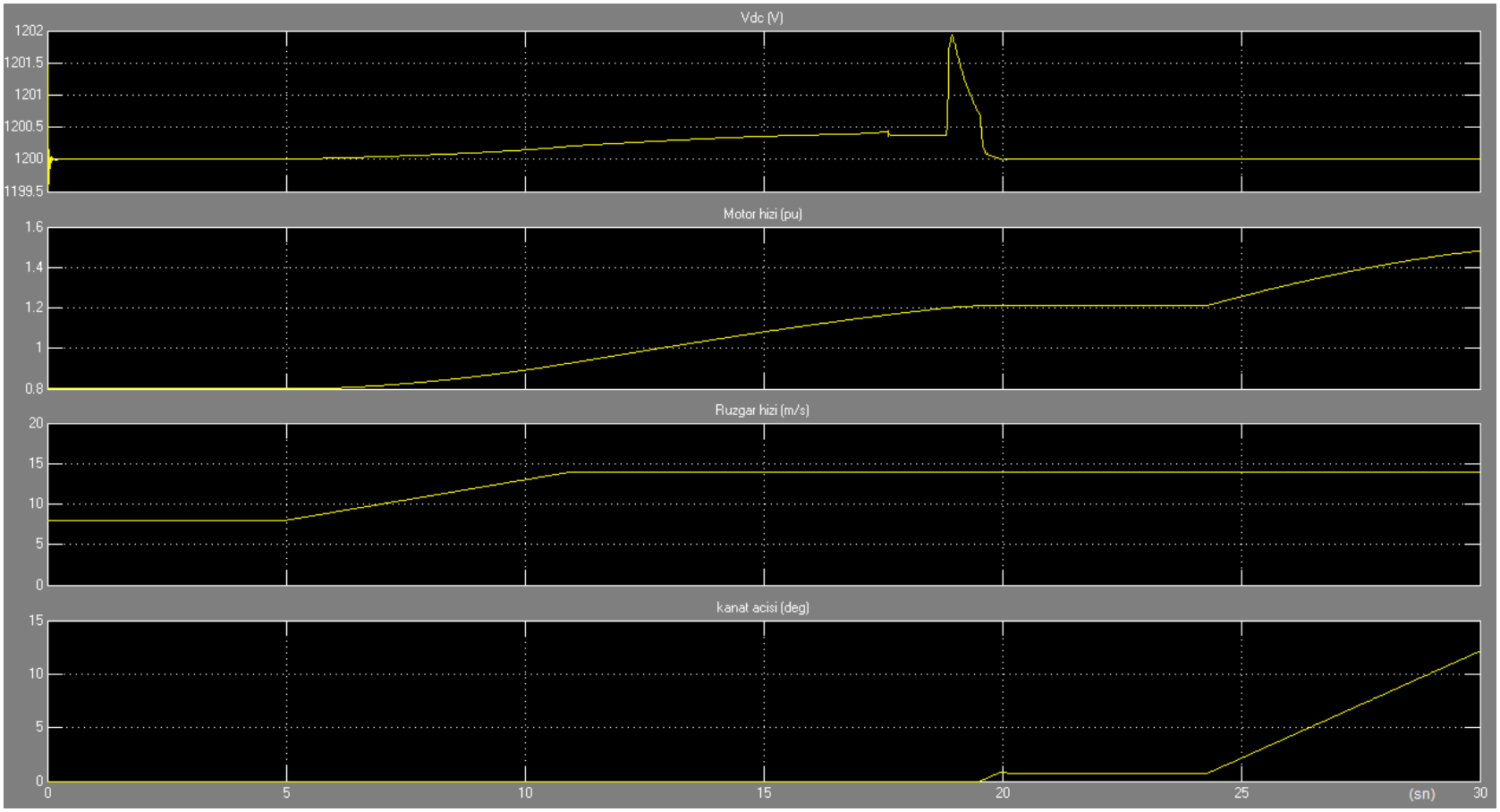
4.2.1.2 Şebeke bağlantı kriteri analizi – %10

Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de görüleceği üzere rüzgar hızının 8m/s den 14 m/s ye t=5s de arttığı durumda, t=18s sonunda, rüzgar generatörünün ürettiği güç 12 MW' a çıkıyor. Bu süre zarfında türbin hızı 0,8pu'den 1,2pu'e çıkıyor.İlk aşamada (pitch angle) kanat açısı 0^o (sıfır) ve rüzgar hızı artışından sonra, $0,79^o$'ye, mekanik gücü sınırlamak üzere çıkıyor. Şekil 4.9'da görüleceği üzere, t=24.3s de türbin aşırı akım hatası vererek açma yapıyor ve devreden çıkıyor. Bu esnada, türbinin gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %10'u mertebesinde, yani 12MW dır.

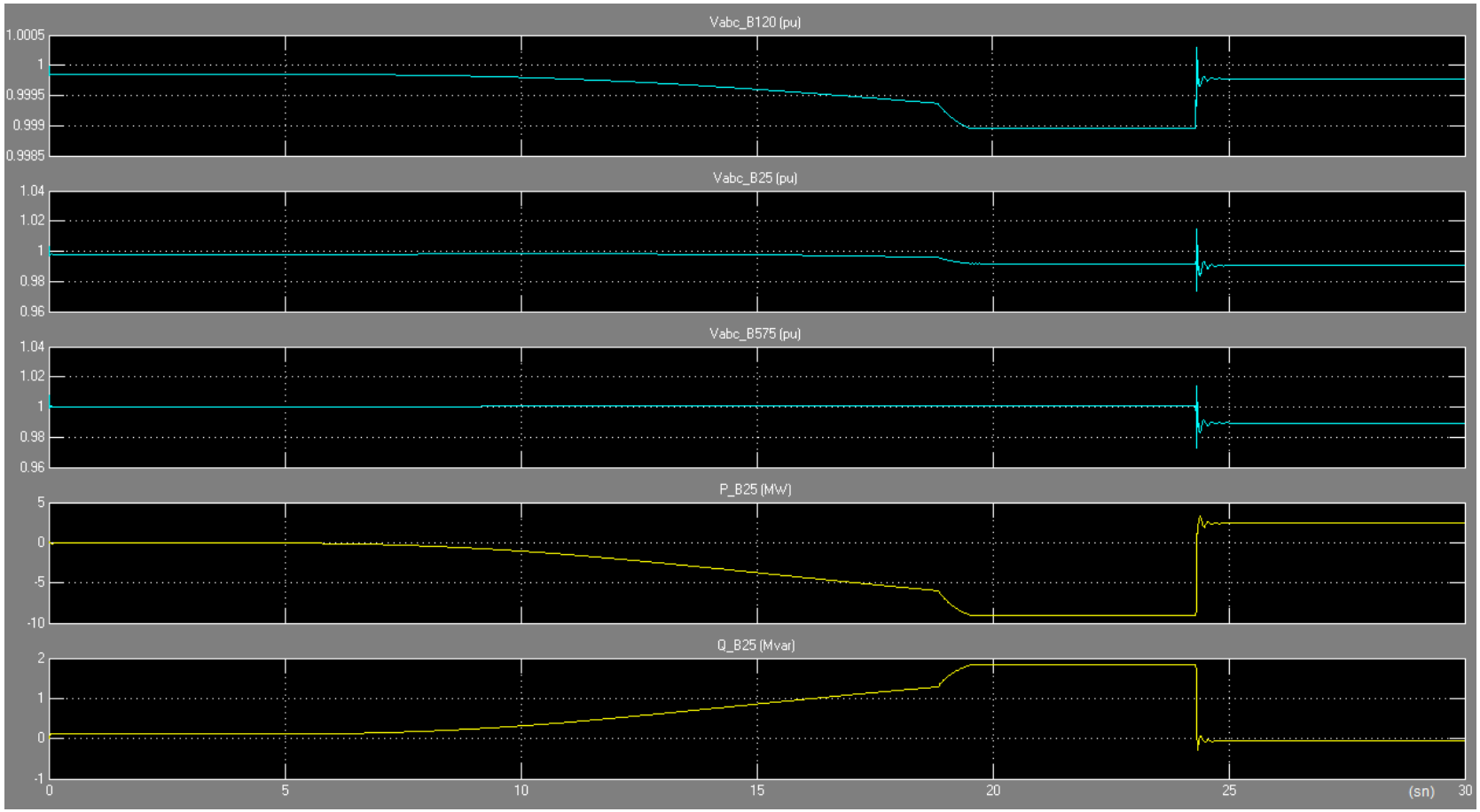
Şebeke tarafında ise türbininin bir anda devreden çıkması nedeniyle ani bir gerilim yükselmesi meydana gelmiştir. Bu andan sonra, rüzgar türbininin bağlandığı baradan sonra bağlı olan fabrika ve rezistif yük, türbinin bağlı olduğu baranın açma yapmasıyla beraber devreden çıkmışlardır.



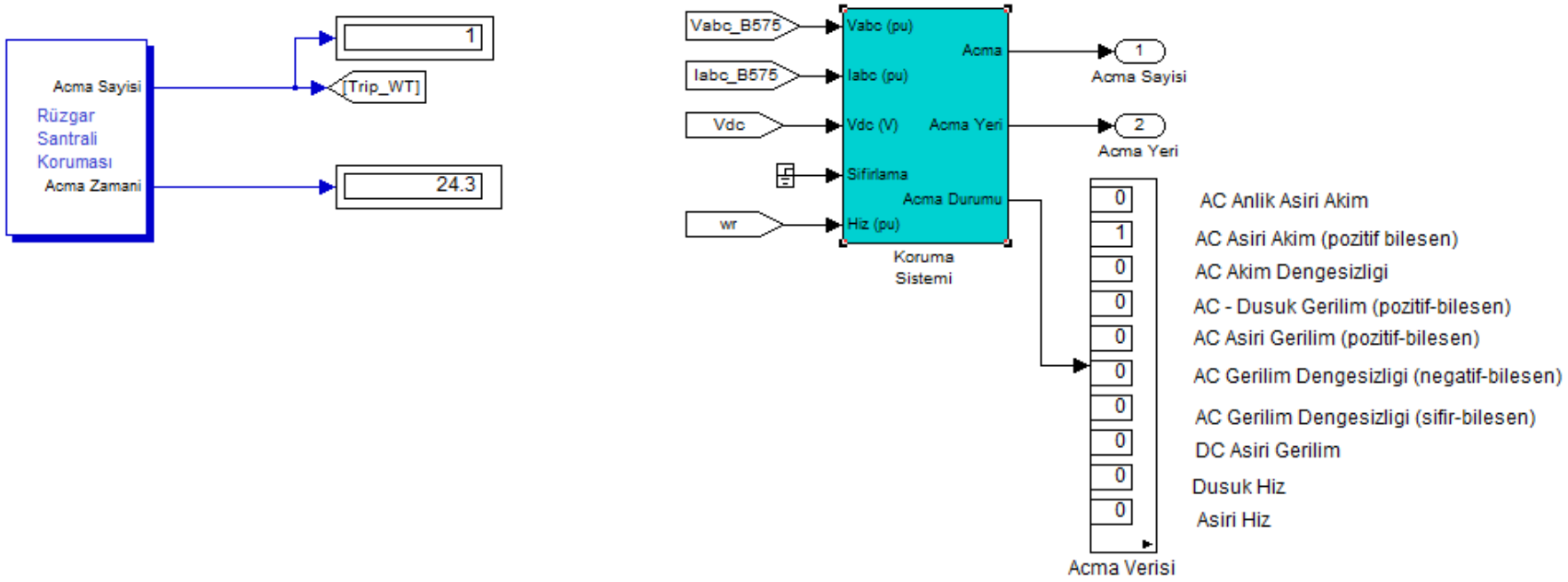
Şekil 4.6 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %10'u iken Rüzgar Santralinin davranışı - 1



Şekil 4.7 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %10'u iken Rüzgar Santralinin davranışı – 2



Şekil 4.8 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %10'u iken şebekenin davranışı

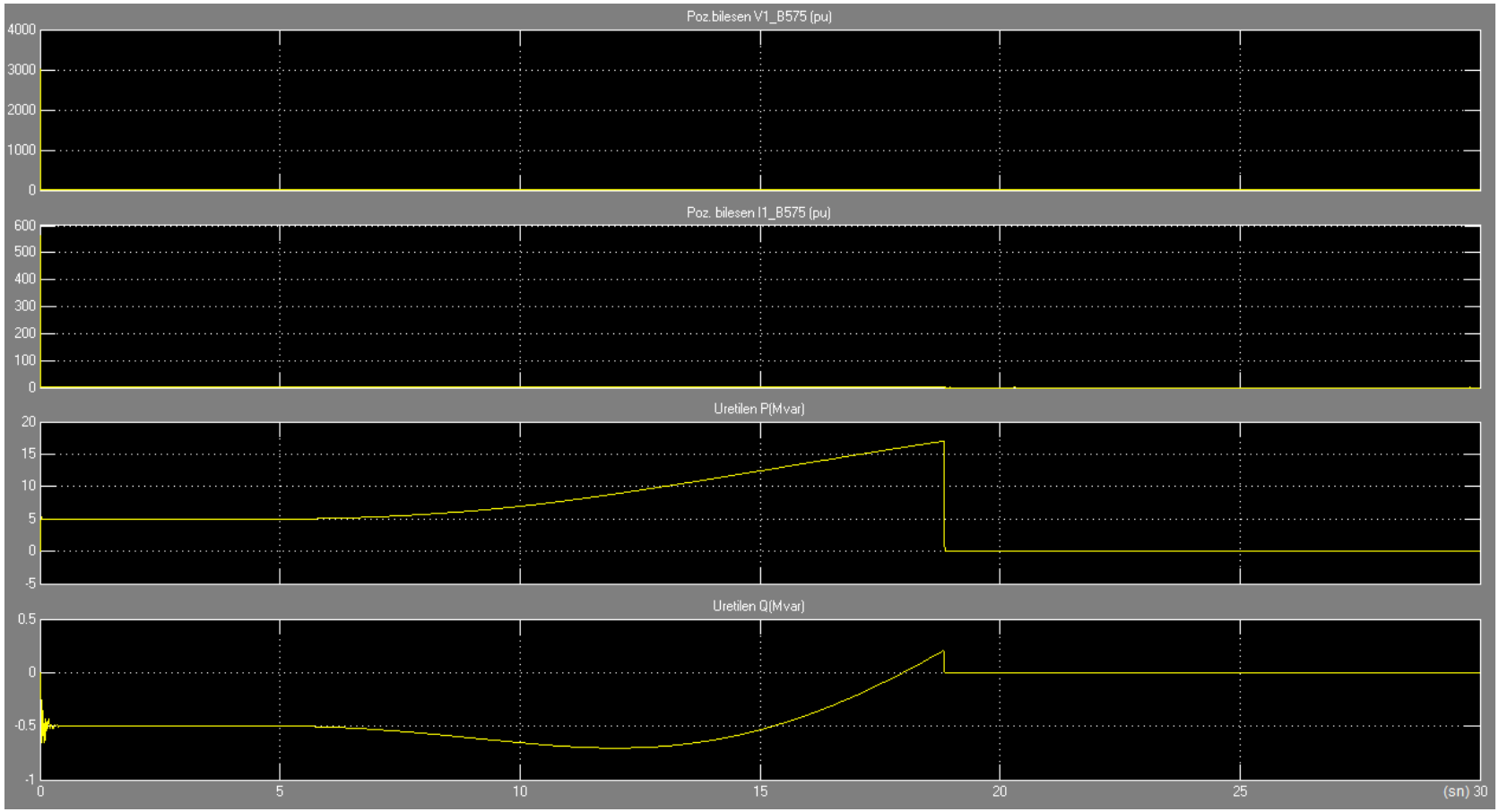


Şekil 4.9 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %10'u iken Rüzgar Santralinin koruması

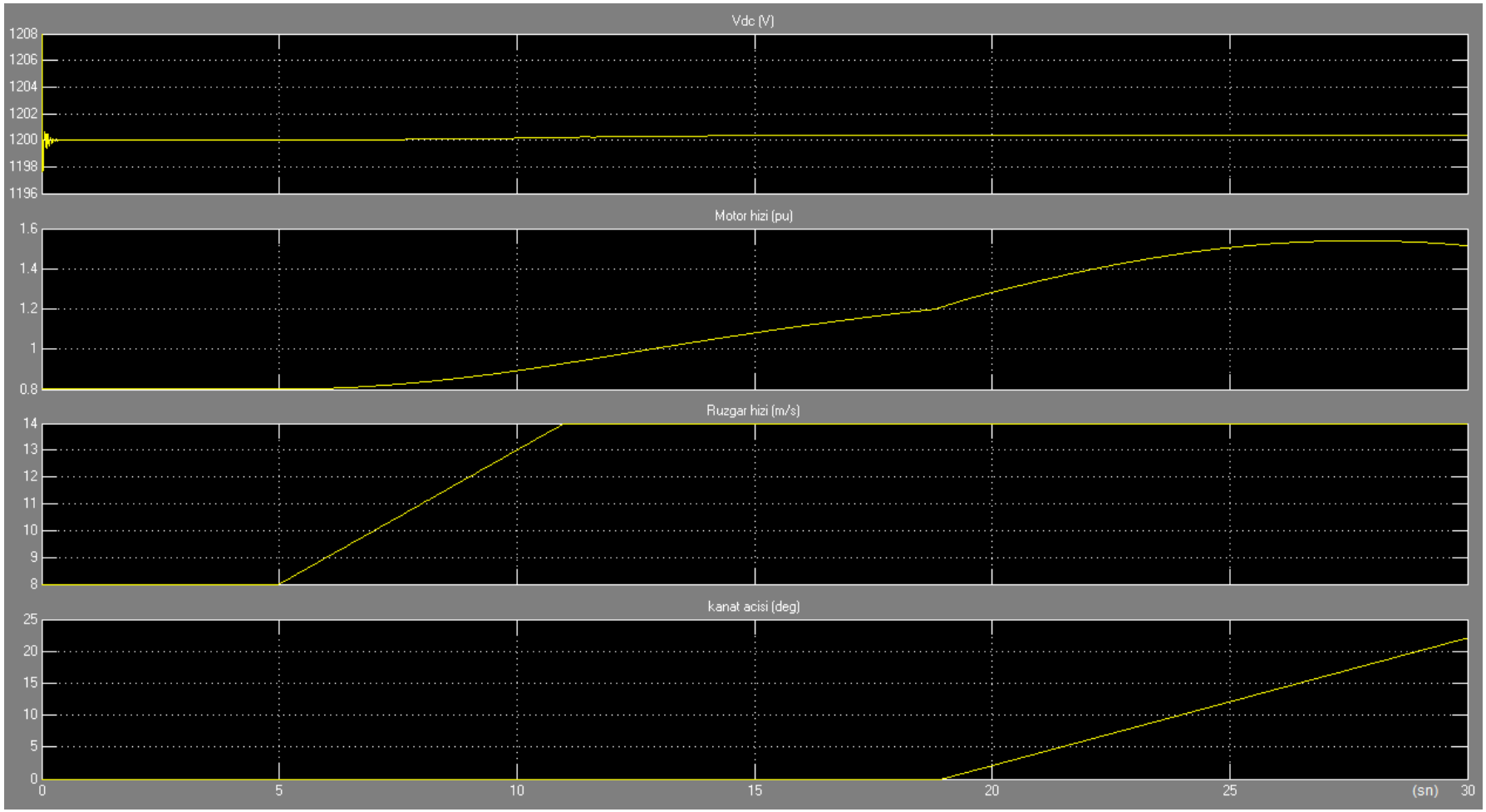
4.2.1.3 Şebeke bağlantı kriteri analizi – %20

Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de görüleceği üzere rüzgar hızının 8m/s den 14 m/s ye t=5s de arttığı durumda, t=18s sonunda, rüzgar generatörünün ürettiği güç 24 MW' a çıkıyor. Bu süre zarfında türbin hızı 0,8pu'den 1,2pu'e çıkıyor.İlk aşamada (pitch angle) kanat açısı 0^o (sıfır) ve rüzgar hızı artışından sonra, $0,79^o$'ye, mekanik gücü sınırlamak üzere çıkıyor. Şekil 4.9'da görüleceği üzere, t=18.83s de türbin aşırı akım hatası vererek açma yapıyor ve devreden çıkıyor. Bu esnada, türbinin gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %20'si mertebesindedir.

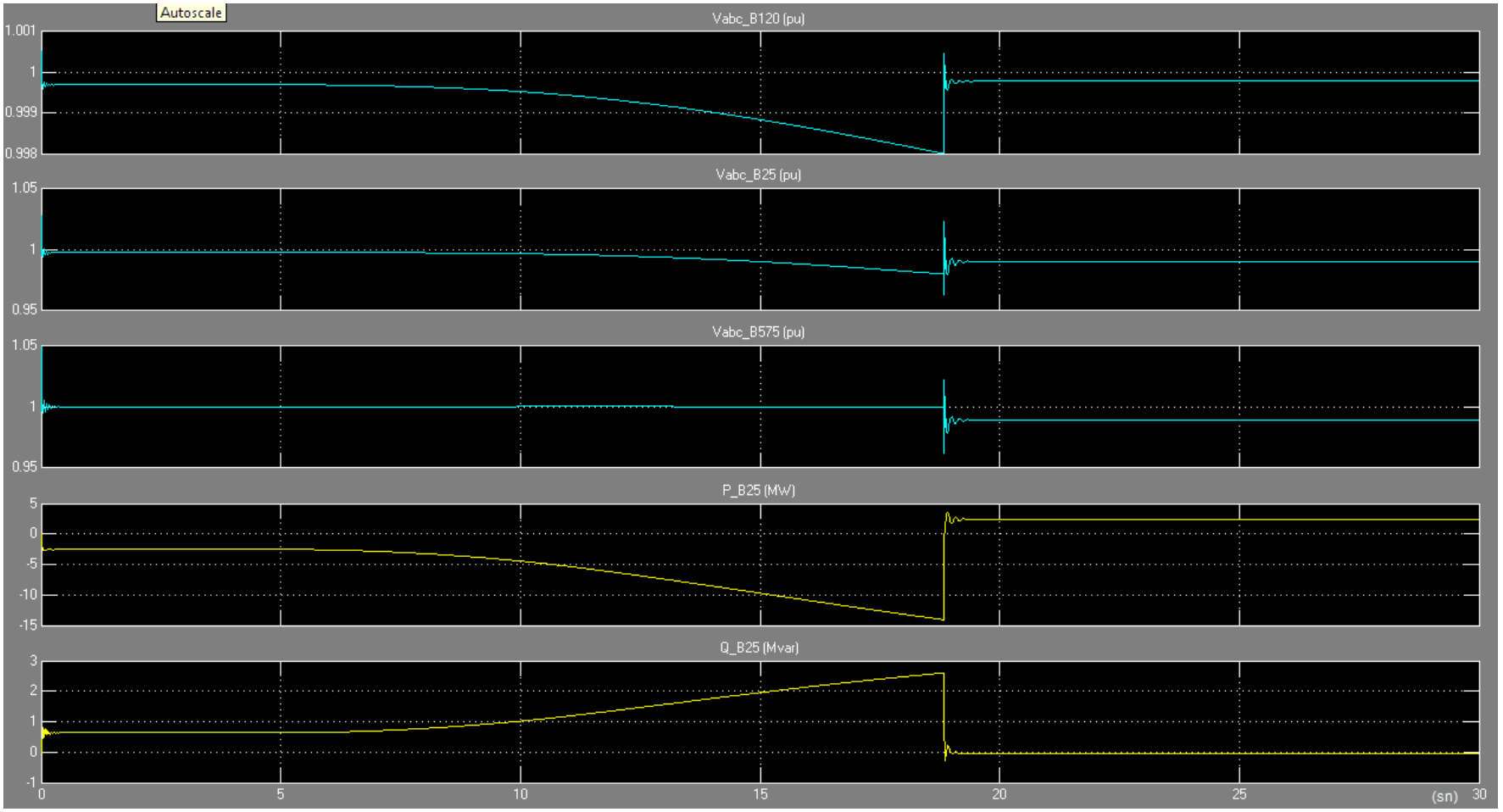
Şebeke tarafında ise türbininin bir anda devreden çıkması nedeniyle ani bir gerilim yükselmesi meydana gelmiştir. Bu andan sonra, rüzgar türbininin bağlandığı baradan sonra bağlı olan fabrika ve rezistif yük, türbinin bağlı olduğu baranın açma yapmasıyla beraber devreden çıkmışlardır.



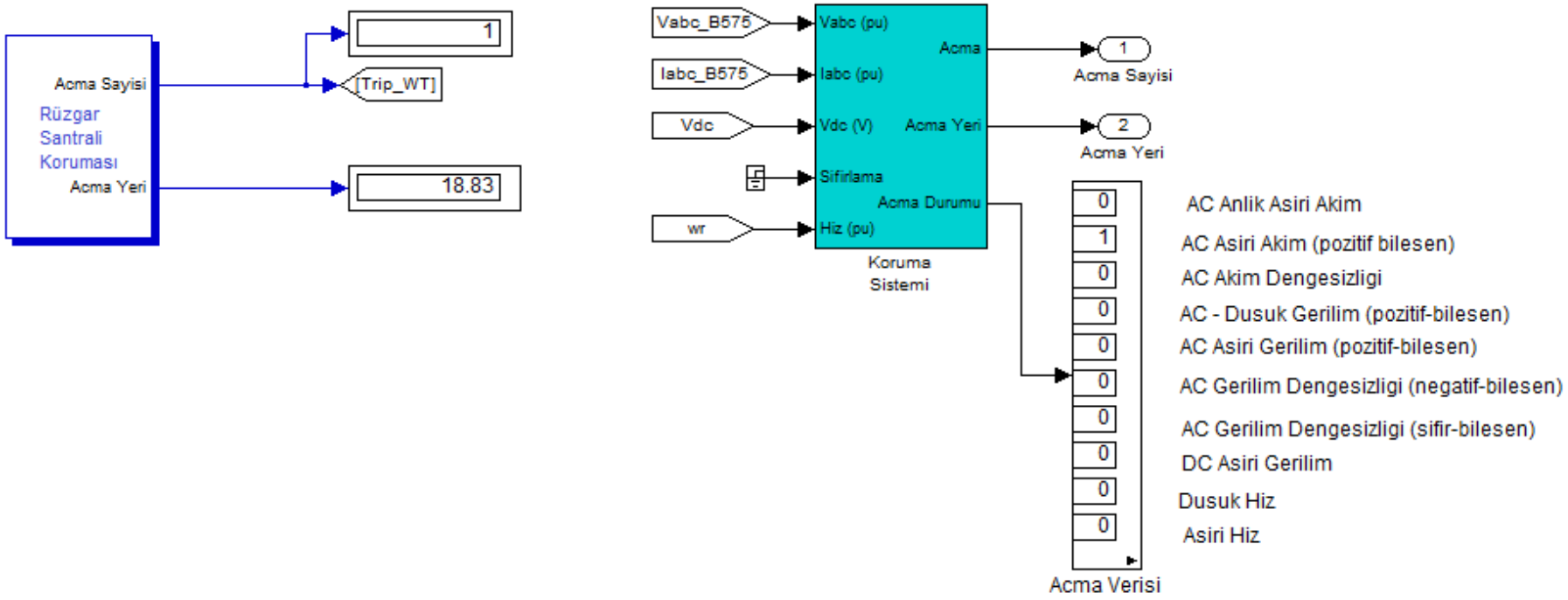
Şekil 4.10 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %20'si iken rüzgar santralinin davranışı - 1



Şekil 4.11 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %20'si iken rüzgar santralinin davranışı - 2



Şekil 4.12 : Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %20'si iken şebekenin davranışı



Şekil – 4.13 Generatörün gücü, bağlantı noktasının kısa devre gücünün %20'si iken rüzgar santralı koruması

4.2.2 Rüzgar hızı artarken ve azalırken, normal çalışma durumu

Ana şebekeye paralel bağlanan DFIG'lü rüzgar türbinlerinin rüzgar hızı değişimlerine verdiği tepkiler incelenecektir. Bunun için rüzgar hızının 8-14 m/s aralığında artış ve 14-8 m/s aralığında azalış durumlarındaki santral ve şebeke parametreleri incelenecektir.Santral gücü bu esnada 9 MW olarak sabit tutulmuştur.

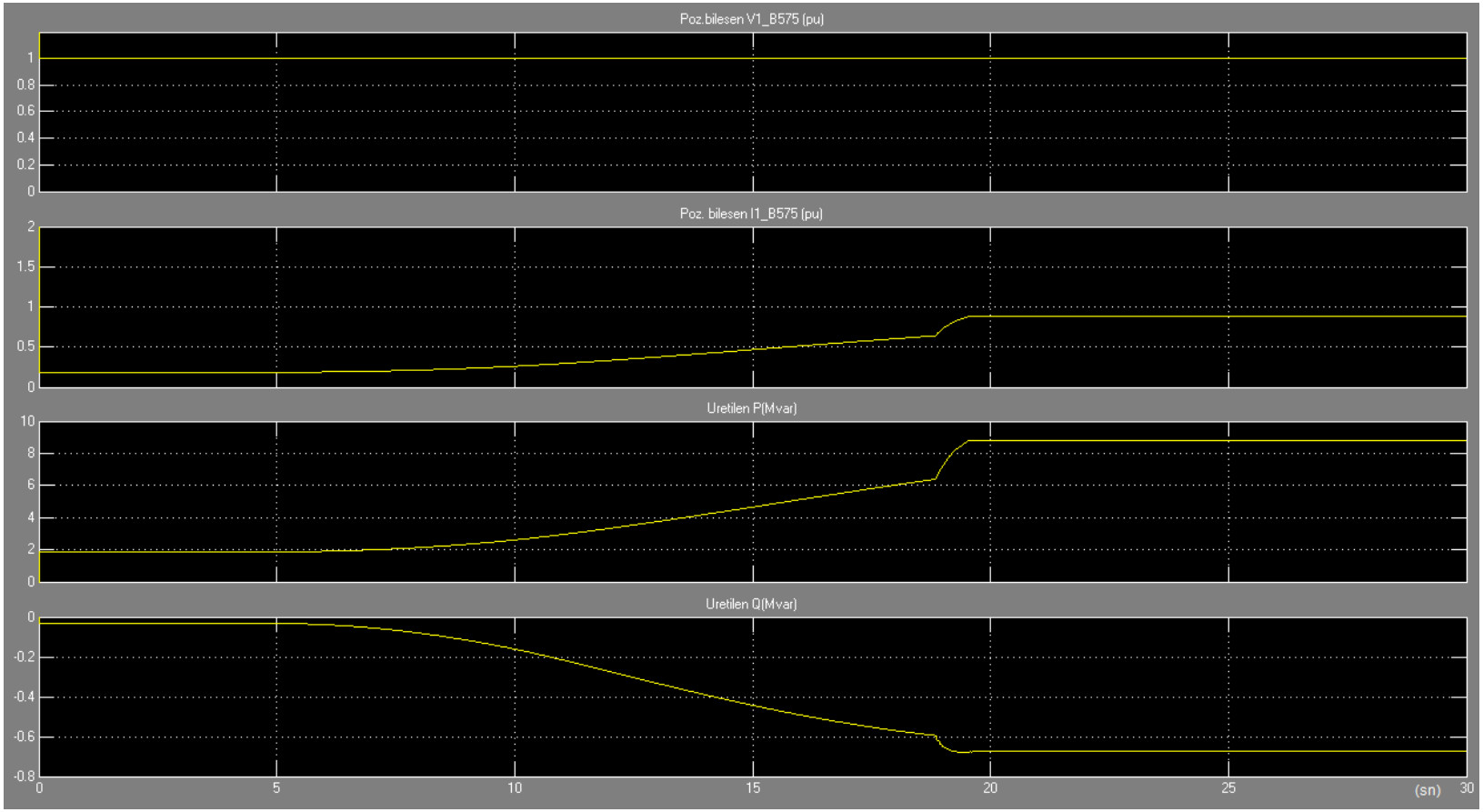
4.2.2.1 Normal çalışma durumu – Rüzgar hızı artıyor

Şekil 4.14 ve 4.15'de görüleceği üzere rüzgar hızının 8m/s den 14 m/s ye t=5s de arttığı durumda, t=15s sonunda, rüzgar generatörünün ürettiği güç 9 MW a çıkıyor. Bu süre zarfında türbin hızı 0,8pu'den 1,2pu'e çıkıyor.İlk aşamada (pitch angle) kanat açısı 0^o (sıfır) ve rüzgar hızı artışından sonra, $0,79^o$'ye, mekanik gücü sınırlamak üzere çıkıyor.

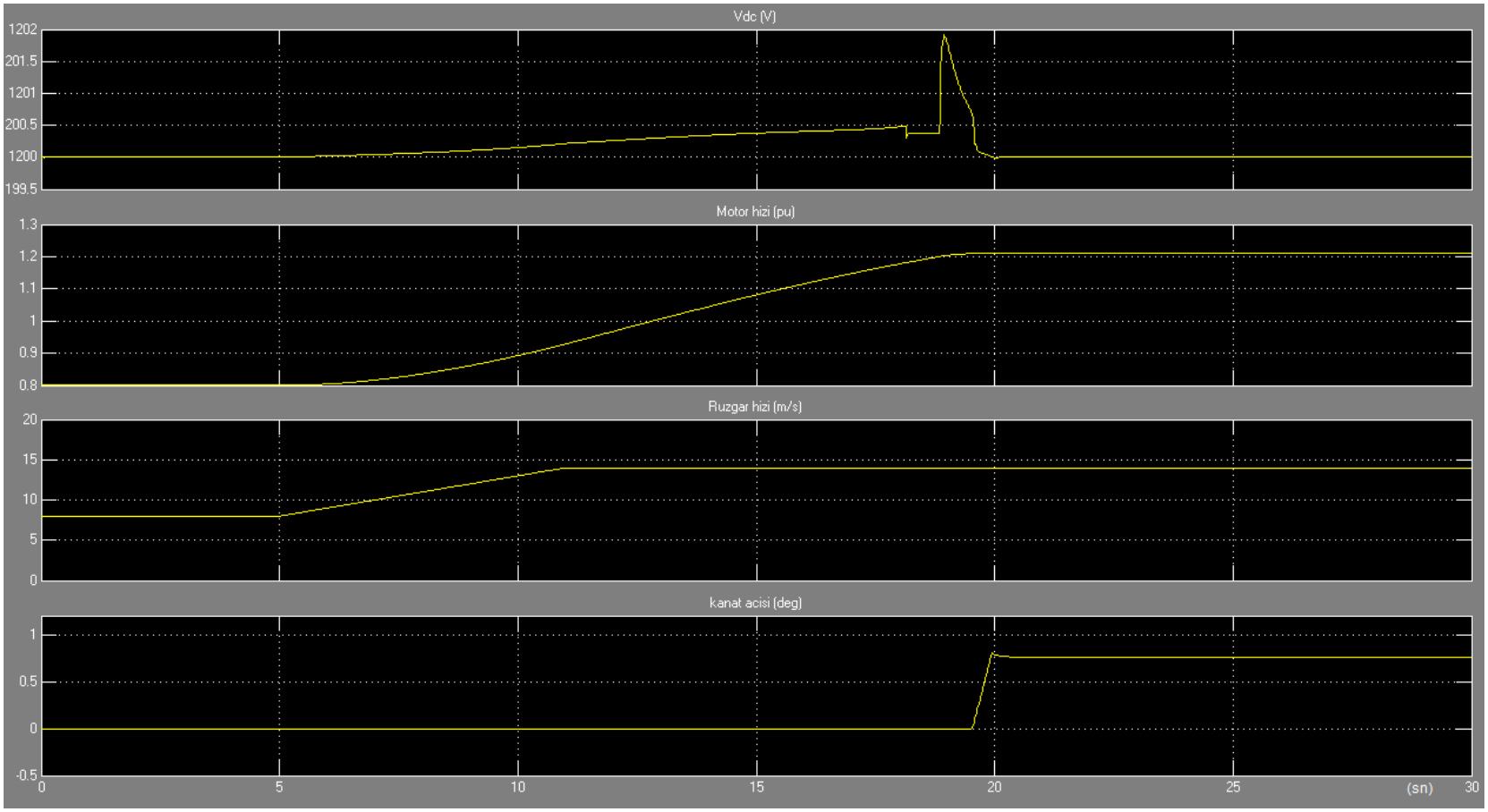
Rüzgar Santrali, gerilim regülasyonu modunda çalıştığı için, gerilim 1pu'de sabit tutulmaya çalışılıyor. Bunu sağlamak için de Rüzgar santrali, şebekeden 0,68 MVAr güç çekiyor.

Eğer, santral VAr regülasyonu modunda çalıştırılırsaydı, Q_{ref}=0 (PF=1,00) olduğu ve gerilimin 1,021 pu'e çıktığı gözlenecekti.

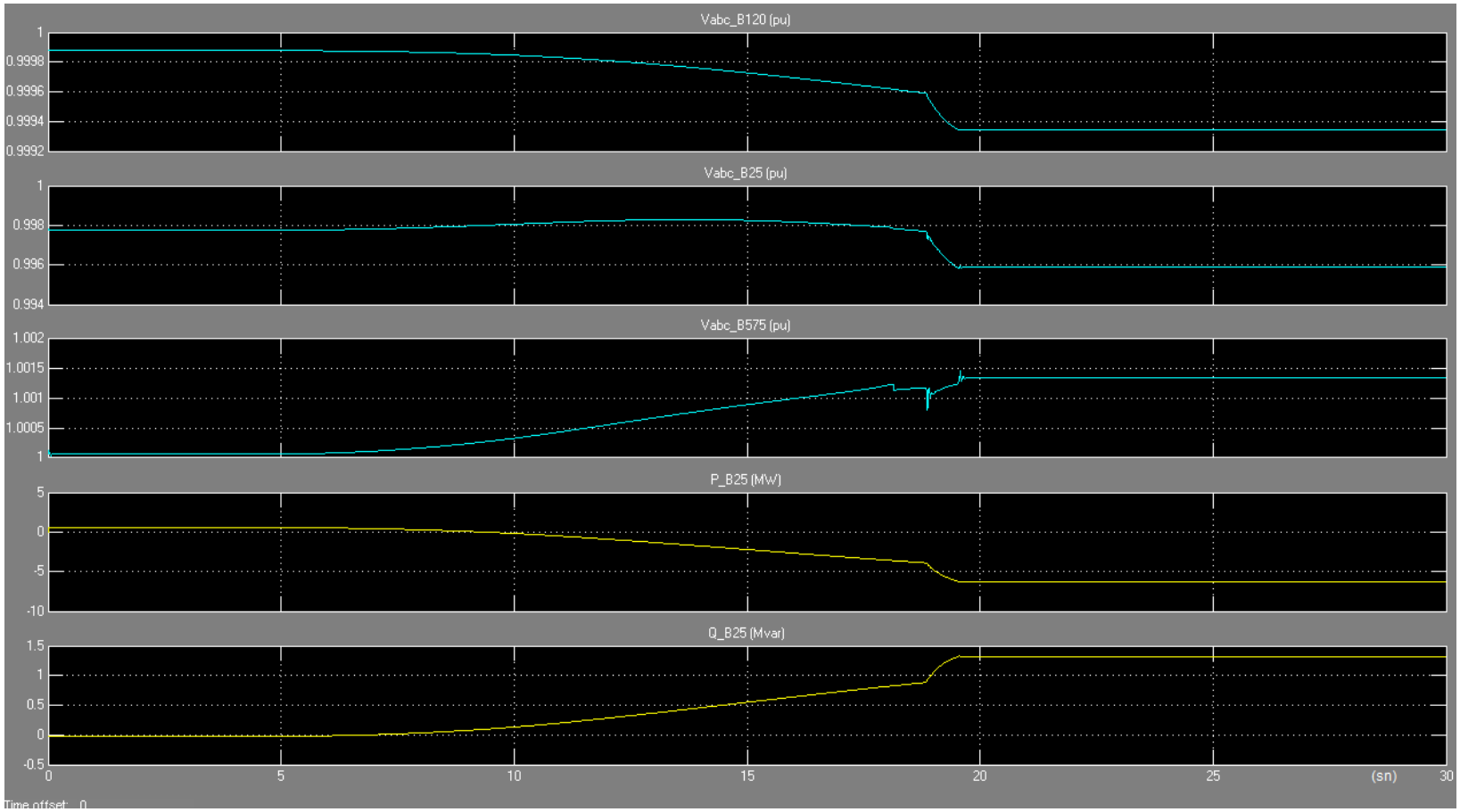
Şekil 4.16'da görüleceği üzere, bu esnada, şebekede ise t=15s sonunda, yani, t=20s den hemen önce, P25 barasından şebekeye doğru aktif güç iletildiği görülmektedir. Bu miktar 6MW civarındadır, geri kalan ~3MW yük ise P25 barasından hemen önce yer alan, fakat Rüzgar santralinin haricinde yer alan yük tarafından çekilmiştir.



Şekil 4.14 : Rüzgar hızı artarken, normal çalışma durumunda rüzgar santralinin davranışı – 1



Şekil – 4.15 : Rüzgar hızı artarken, normal çalışma durumunda rüzgar santralinin davranışı – 2



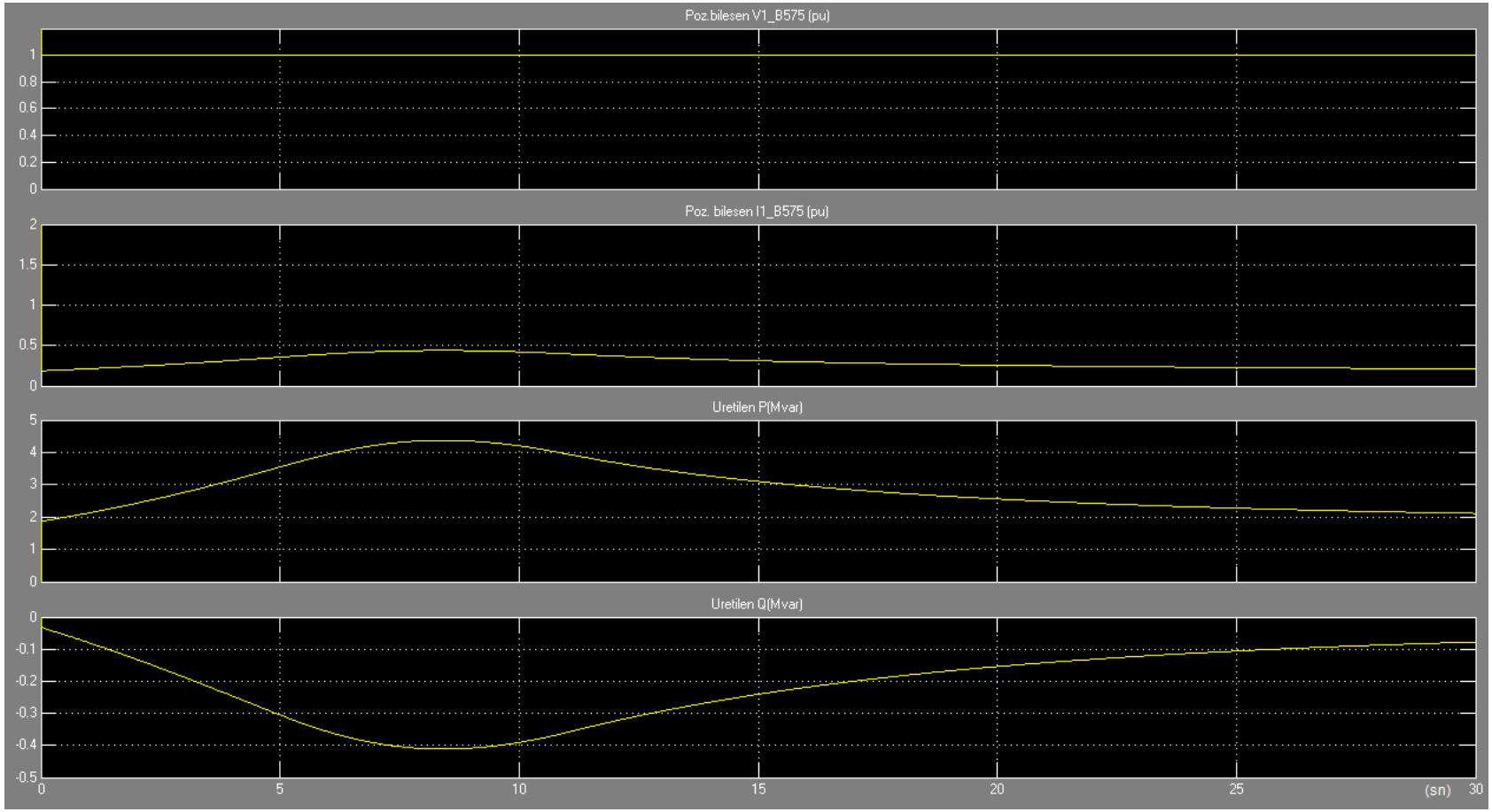
Şekil 4.16 : Rüzgar hızı artarken, normal çalışma durumunda şebekenin davranışı

4.2.2.2 Normal çalışma durumu – Rüzgar hızı azalıyor

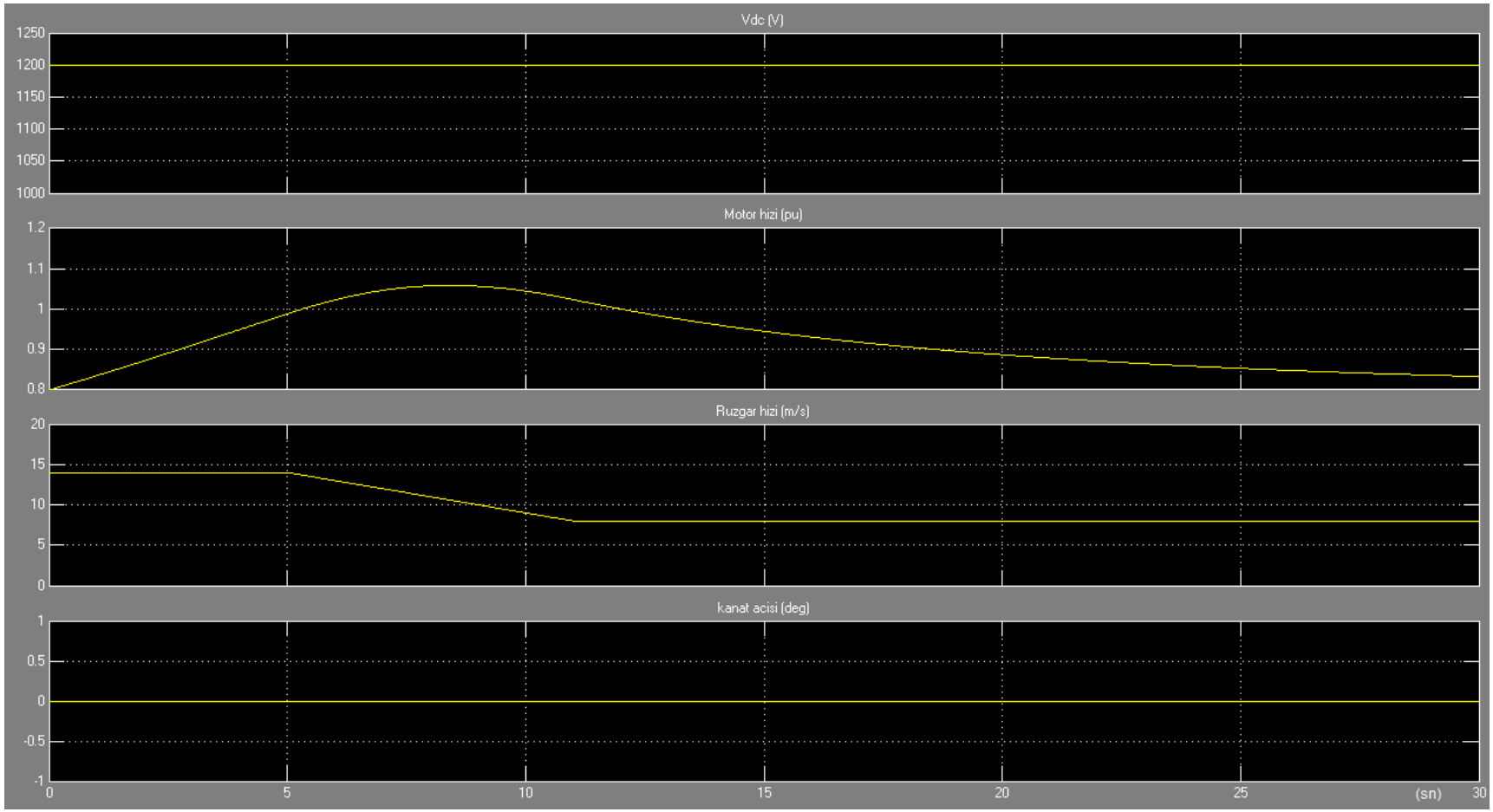
Şekil 4.17 ve 4.18'de görüleceği üzere, rüzgar hızının 14m/s den 8 m/s ye t=5s de düştüğü durumda, t=8s sonunda, rüzgar generatörünün ürettiği güç anlık olarak 4,4 MW a çıkıp,t=15s sonunda 1,9MW a düşmektedir. Bu süre zarfında türbin hızı 0,8pu'den 1,05pu'e anlık olarak çıkıp, tekrar 0.8pu seviyesine geri dönüyor.

Rüzgar Santrali, gerilim regülasyonu modunda çalıştığı için, gerilim 1pu'de sabit tutulmaya çalışılıyor. t=15s sonunda ise generatörün çektiği reaktif güç 0,08MVAr civarına sabitlenmektedir.

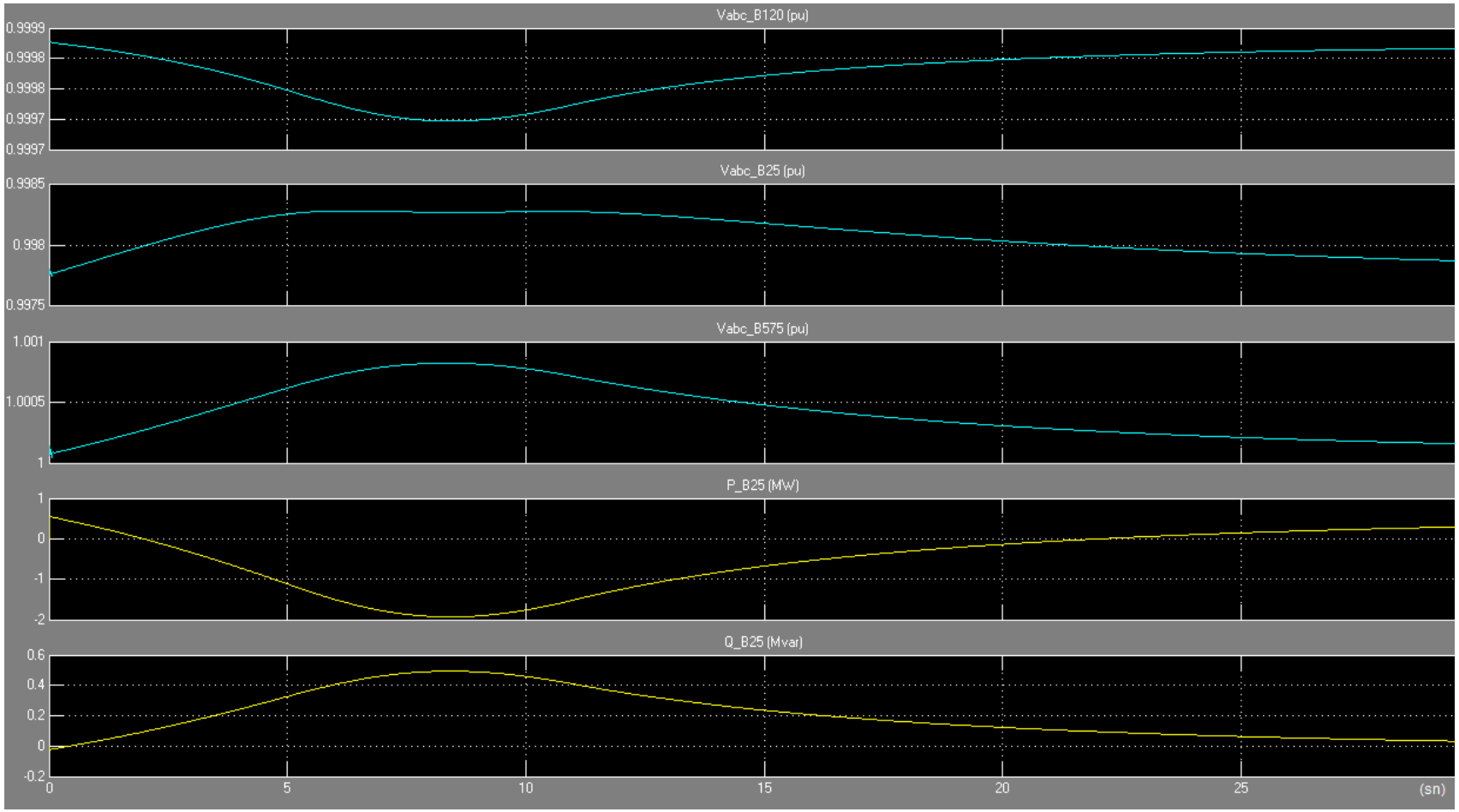
Şekil 4.19'de görüleceği üzere, şebekede ise t=20s sonunda, P25 barasından şebekeye doğru 0,5MW aktif güç iletildiği görülmektedir.



Şekil 4.17 : Rüzgar hızı azalırken, normal çalışma durumunda rüzgar santralinin davranışı – 1



Şekil 4.18 : Rüzgar hızı azalırken, normal çalışma durumunda rüzgar santralinin davranışı - 2



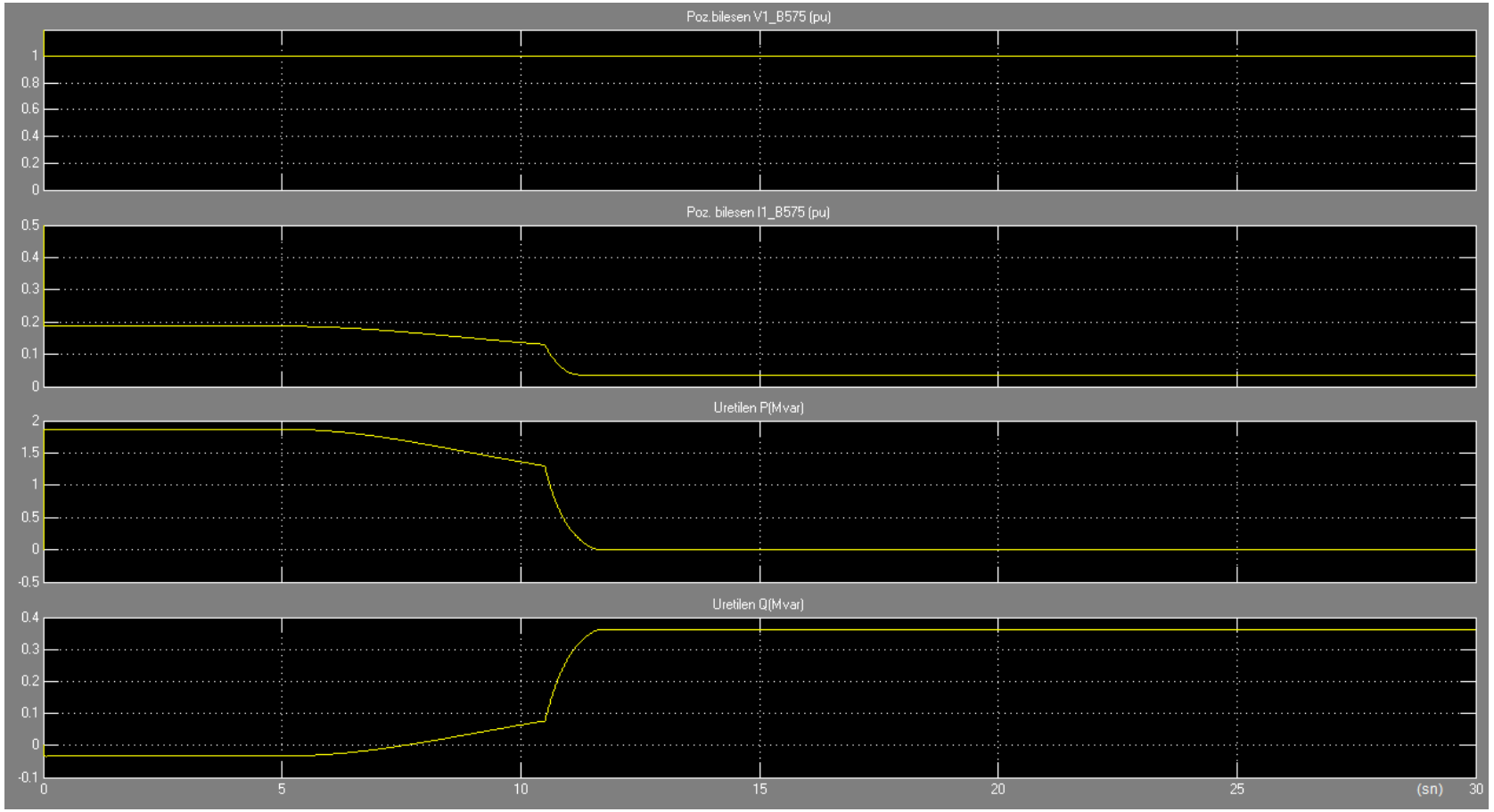
Şekil 4.19 : Rüzgar hızı azalırken, normal çalışma durumunda şebekenin davranışı

4.2.3 Rüzgar hızının birden sıfırlandığı durum

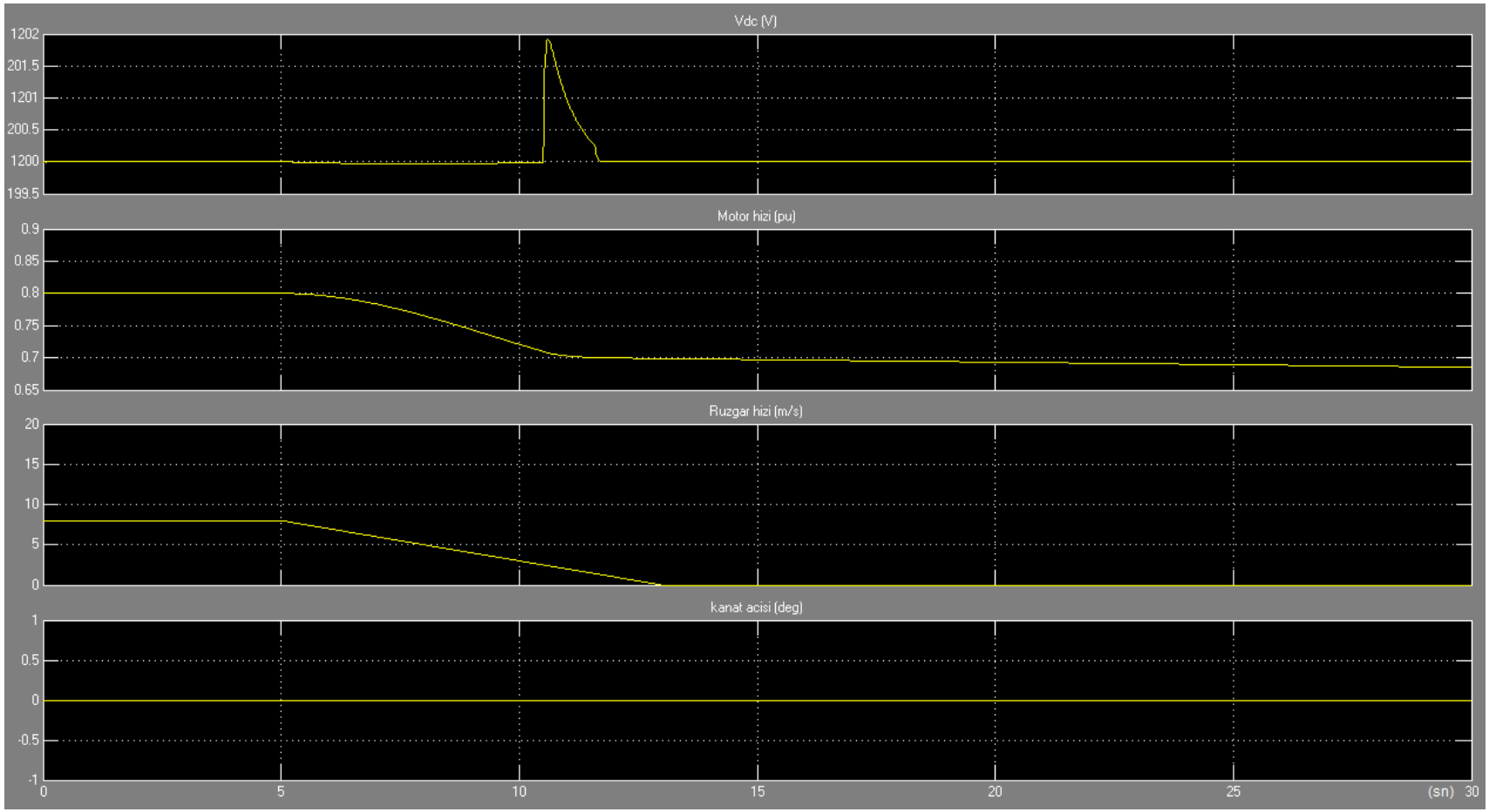
Rüzgar hızının t=5s'de bir anda 8m/s seviyesinden,0 m/s'ye ye düşmesi durumunda santral ve şebeke parametreleri incelenmiştir.

Şekil 4.20 ve 4.21'de görüleceği üzere, bu esnada türbin motor hızı giderek 0 pu'e yaklaşmakatadır. Üretilen aktif güç – P(MW) ise t=11s de 0MW a düşmektedir. Buna karşın bu süre sonunda 0,35 MVAr lık bir reaktif güç çekilmektedir.

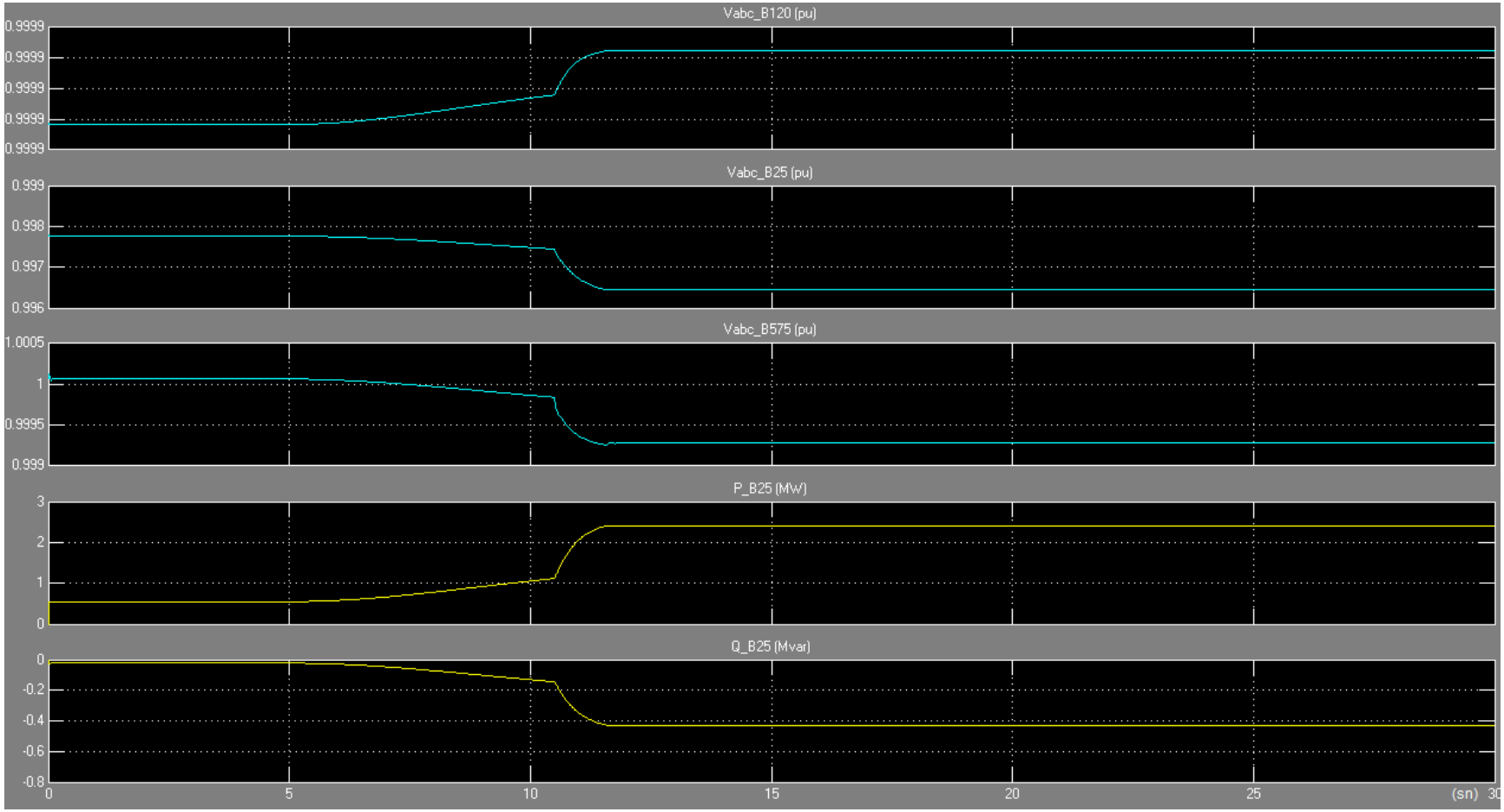
Şebeke tarafında ise Şekil 4.22'de görüleceği üzere B25 barasındaki gerilim 0,0015pu azalırken, B575 barasındaki gerilim 0,0005 pu azalmaktadır. Rüzgar hızı sıfır olmasına rağmen, santral halen devrededir.



Şekil 4.20 : Rüzgar hızı birden durduğunda, rüzgar santralinin davranışı - 1



Şekil 4.21 : Rüzgar hızı birden durduğunda, rüzgar santralinin davranışı - 2



Şekil 4.22 : Rüzgar hızı birden durduğunda, şebekenin davranışı

4.2.4 Santralin bağlı olduğu orta gerilim hattında arıza durumu

Rüzgar hızının 8-14 m/s aralığında artışında 25kV luk barada oluşacak 1 faz-toprak, 3-faz toprak ve faz-faz arızalarında şebeke ve santral parametreleri, rüzgar hızı sıfırken ve rüzgar hızı artarken, karşılaştırılarak incelenecektir. Santral bağlı iken gücü 9 MW olarak sabit tutulacaktır.

4.2.4.1 Santral tarafında 1-faz toprak arızası durumunda çalışma

Santral şebekeye bağlı değil :

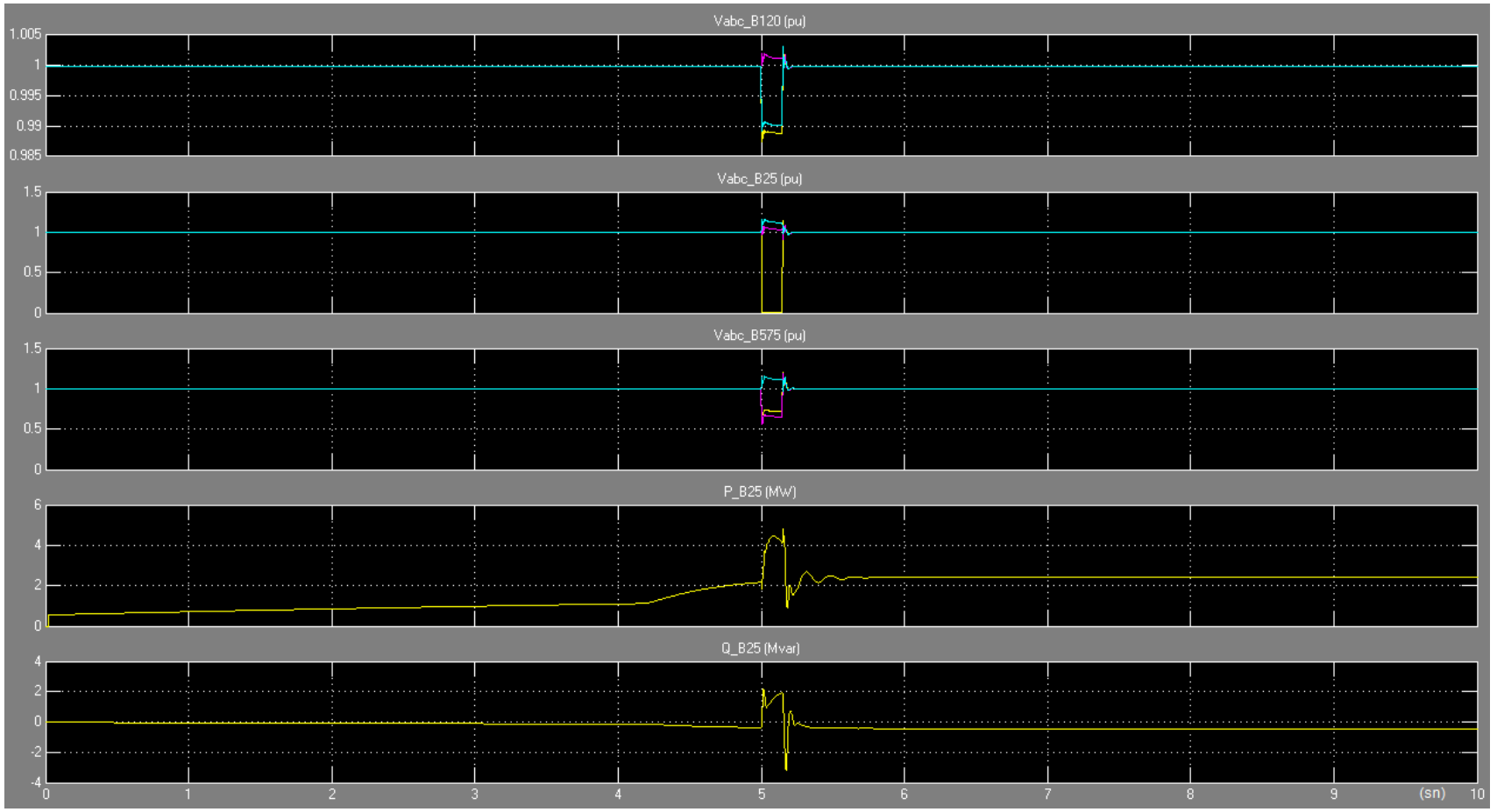
Şekil 4.23'de görüleceği üzere, santralin şebekeye bağlı olmadığı durumda, orta gerilim tarafındaki B25 barasında t=5s'de 9 döngülük 1faz-toprak arızası meydana geliyor. Bu arıza açmaya neden olmamaktadır.

Santral şebekeye bağlı :

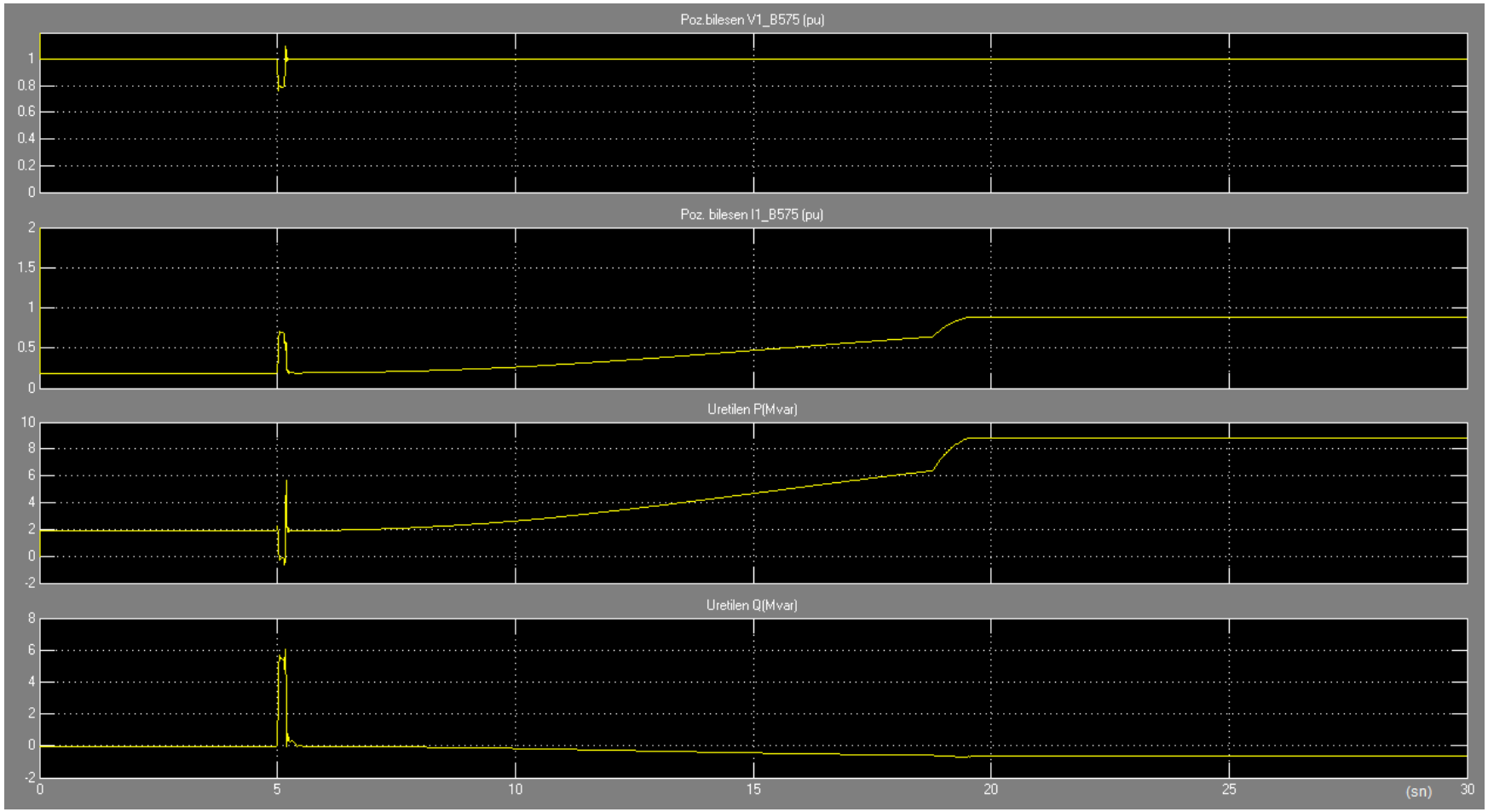
Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da görüleceği üzere, rüzgar hızının 8m/s den 14 m/s ye t=5s de arttığı durumda, santral tarafında t=5s'de 9 döngülük 1faz-toprak arızası meydana geliyor.

V1_B575'deki pozitif bileşenin değeri t=5s de arıza boyunca 0,8pu'e düşüyor. Santrale ait düşük gerilim koruma rölesinin açma sınırı 0,75pu'e ayarlandığı için, santral açma yapmadan çalışmasına devam etmektedir.

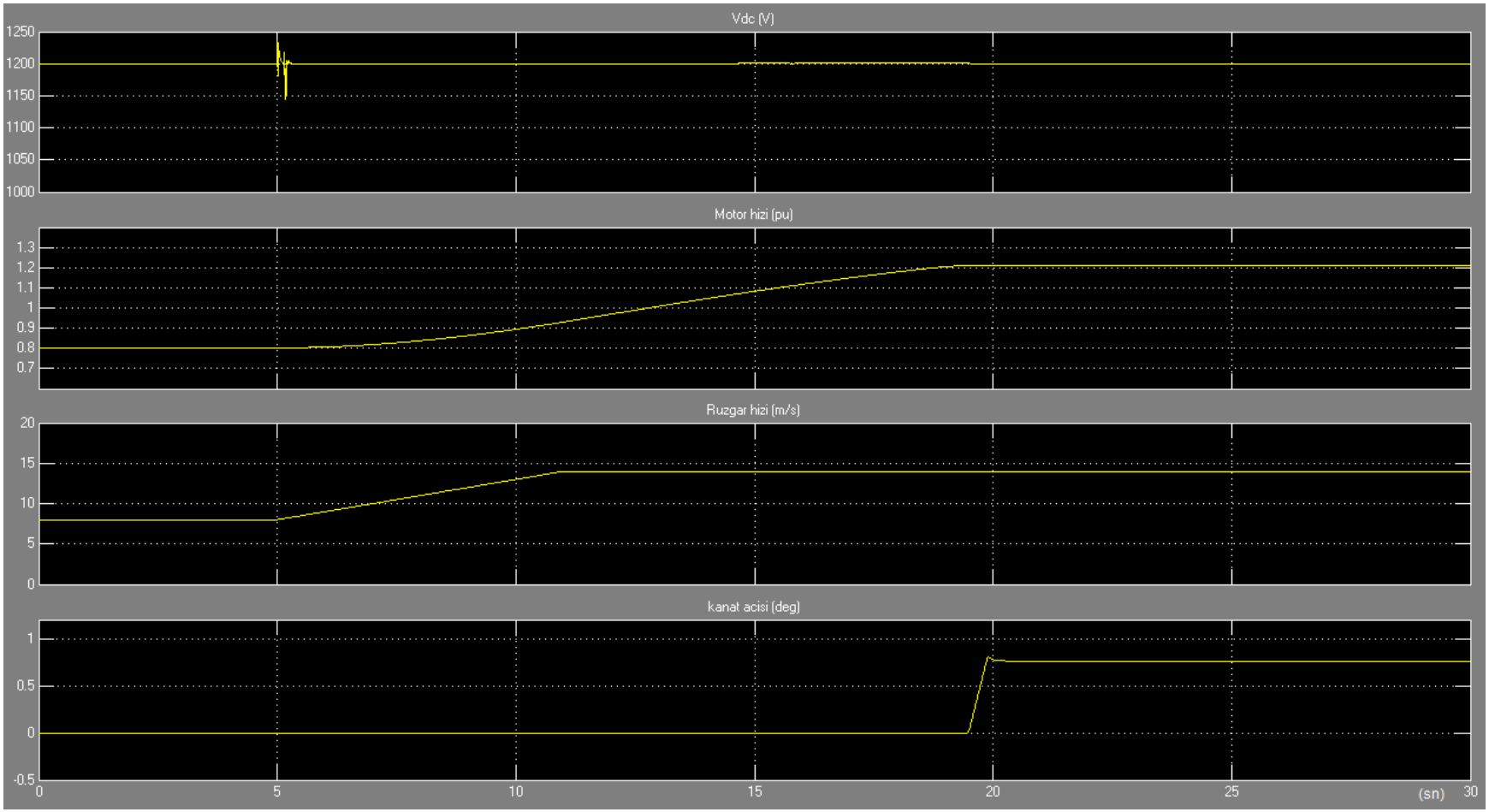
t=15s sonunda, rüzgar generatörünün ürettiği güç 8,8 MW a çıkıyor. Bu süre zarfında türbin hızı 0,8pu'den 1,2pu'e çıkıyor.İlk aşamada (pitch angle) kanat açısı 0^o (sıfır) ve rüzgar hızı artışından sonra, $0,79^o$'ye, mekanik gücü sınırlamak üzere çıkıyor.



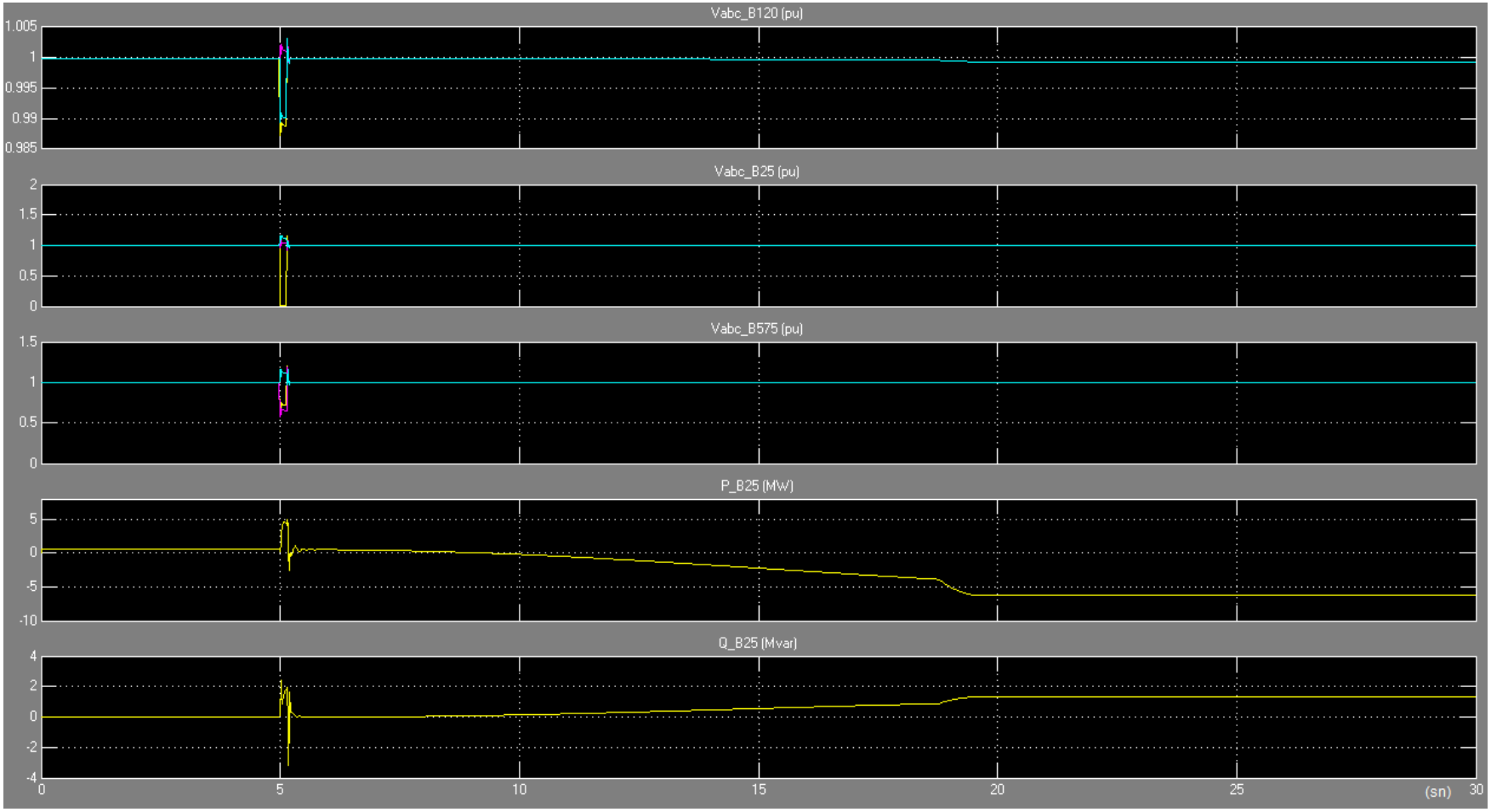
Şekil 4.23 : Rüzgar Santrali şebekeye bağlı değilken 1-faz toprak arızası durumunda şebekenin davranışı



Şekil 4.24 : Rüzgar santrali bağlı iken, santral tarafında 1-faz toprak arızası durumunda rüzgar santralinin davranışı - 1



Şekil 4.25 : Rüzgar hızı artarken, santral tarafında 1-faz toprak arızası durumunda rüzgar santralinin davranışı - 2



Şekil 4.26 : Rüzgar hızı artarken, santral tarafında 1-faz toprak arızası durumunda şebekenin davranışı

4.2.4.2 3-faz toprak arızası durumunda çalışma

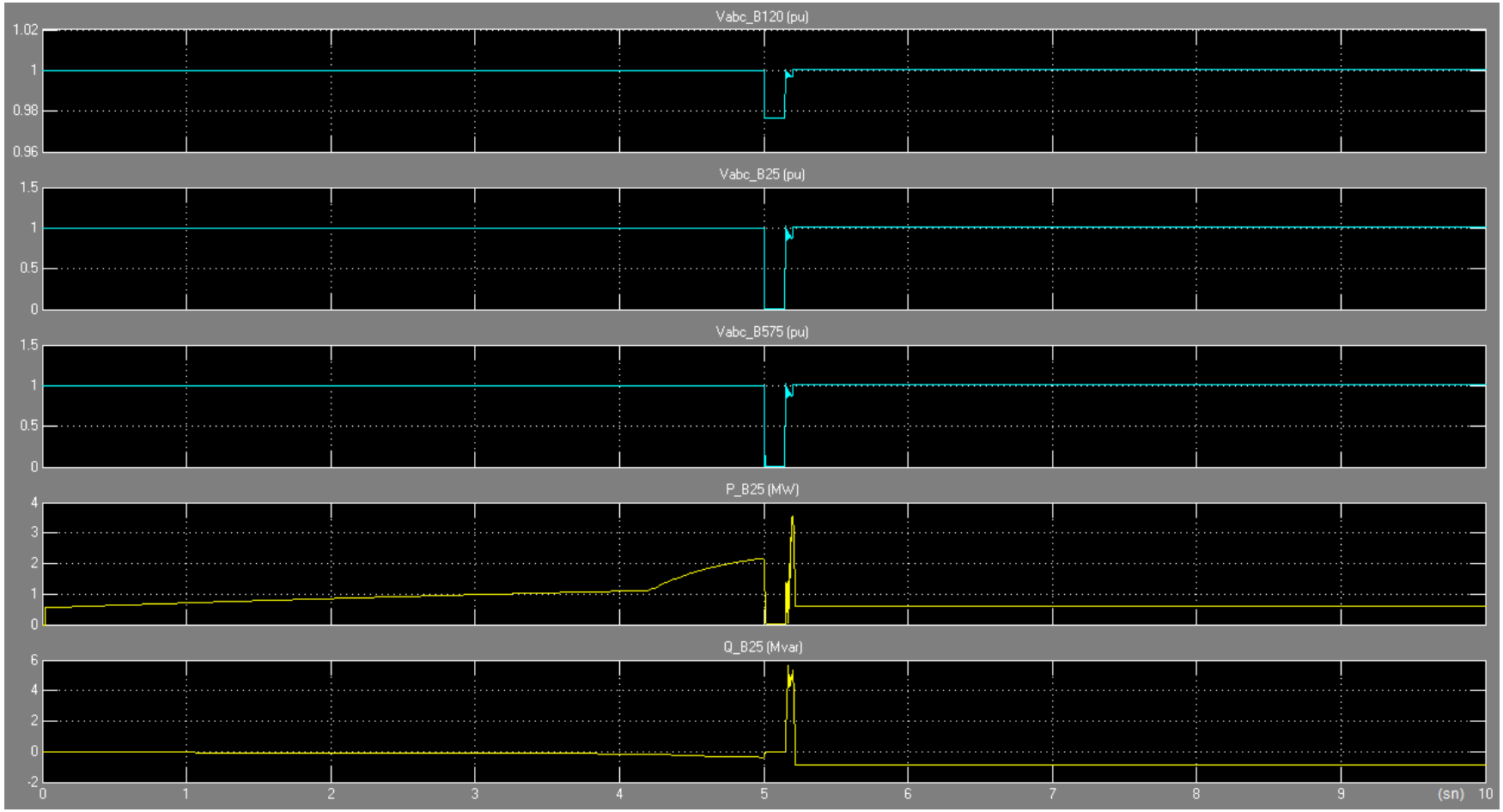
Santral şebekeye bağlı, rüzgar hızı = 0 m/s:

Şekil 4.27'de görüleceği üzere, t=5,01s de koruma rölesi, DC Aşırı Gerilim'den dolayı açma gerçekleştirerek, santrali devreden çıkarmaktadır. Santralin DFIG generatörüne ait konvertördeki 1900V DC lik aşırı gerilim üst seviyesinin 2000V'a çıkması ile, santral ile trafo arasındaki koruma röleleri, generatörü şebekeden ayırarak, generatörün korunmasını sağlıyor. Bu yüzden arıza sonrası rüzgar santrali şebekeden ayrılmaktadır.

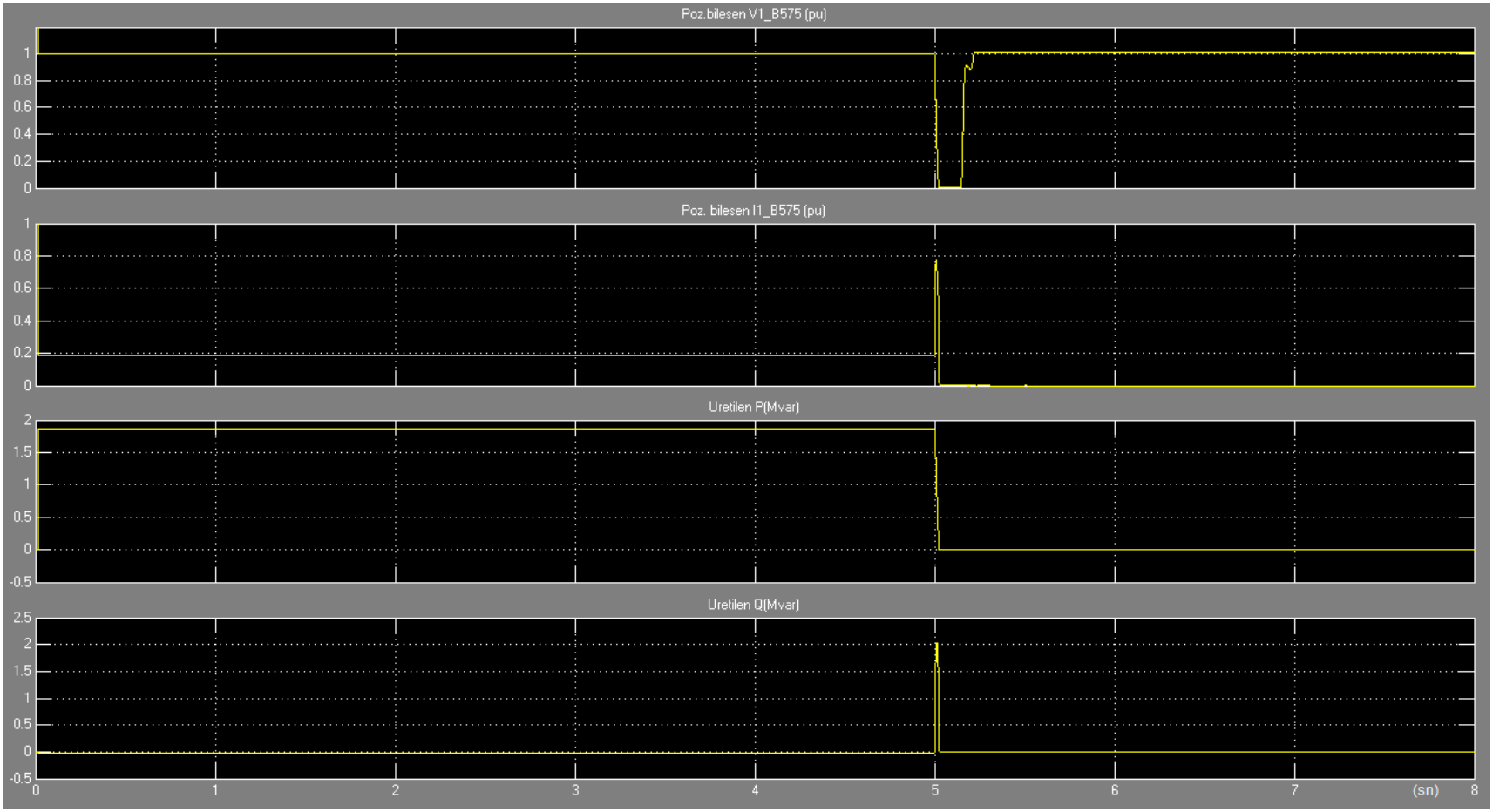
Santral şebekeye bağlı, rüzgar hızı artıyor :

Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da görüleceği üzere, rüzgar hızının 8m/s den 14 m/s ye t=5s de arttığı durumda, santral tarafında, t=5s'de 9 döngülük 3 faz-toprak arızası meydana geliyor. Arıza, santralin orta gerilime bağlanmasını sağlayan trafodan sonra gerçekleştiği için, santralin DFIG generatörüne ait konvertördeki 1900V DC lik aşırı gerilim üst seviyesinin 2000V'a çıkması ile, santral ile trafo arasındaki koruma röleleri, generatörü şebekeden ayırarak, generatörün korunmasını sağlıyor. Bu yüzden arıza sonrası rüzgar santrali şebekeden ayrılmaktadır.

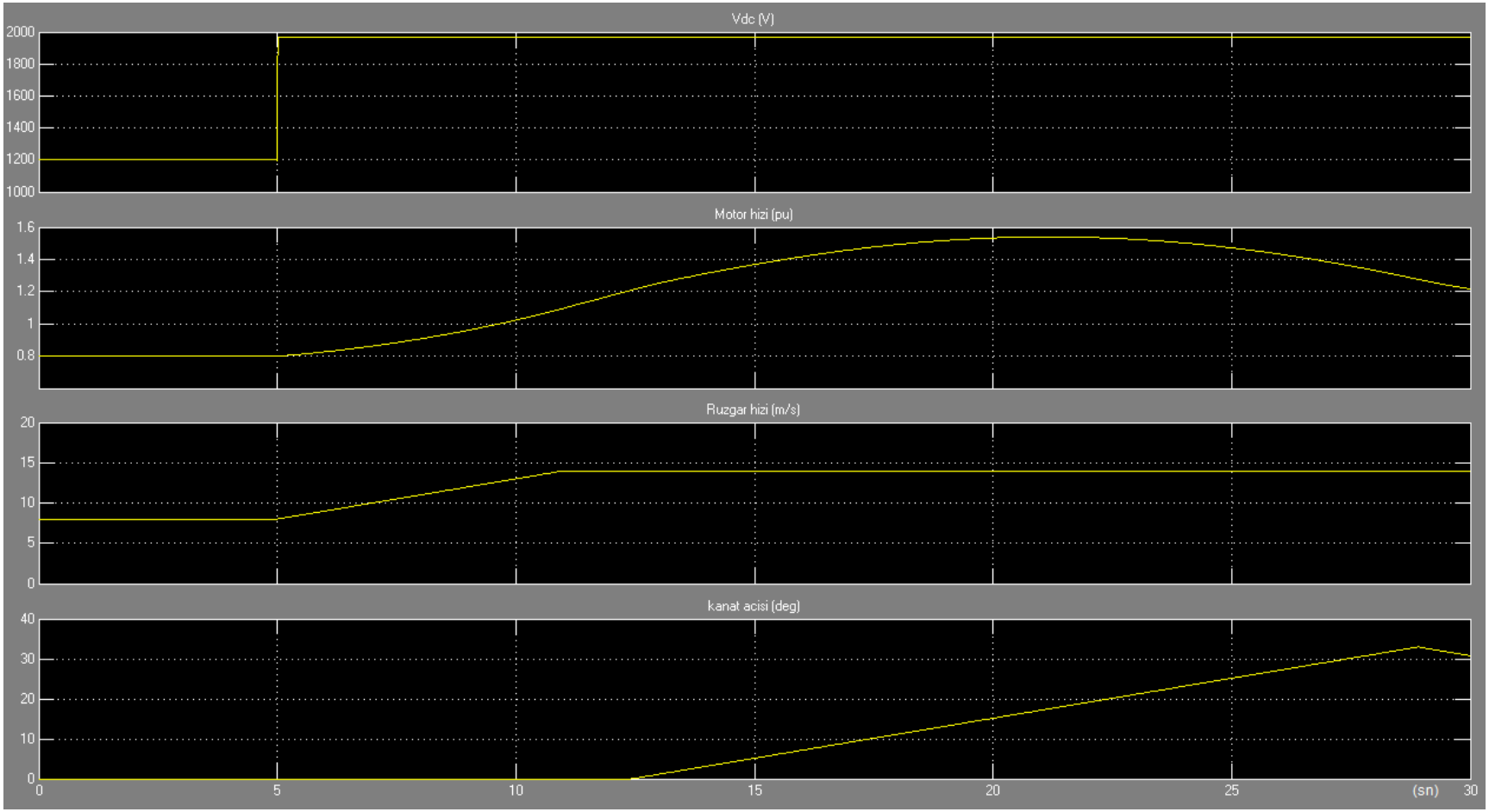
Şekil 4.30'da görüleceği üzere, bu esnada şebeke ise, t=5s'den başlayarak, arıza süresi boyunca, yüksek gerilim tarafında 0,02pu'lik bir gerilim çökmesi yaşar. Orta gerilim tarafında ise, 0pu'e düşen gerilim, arıza sonrası normal değerine geri döner. DFIG generatörü devre dışı kalır, Rüzgar santralinin artık besleyemediği 2 MVA lık fabrika ve 500kW lık yük şebekeden, yani orta gerilimden gelen aktif güç ile beslenmeye devam eder.



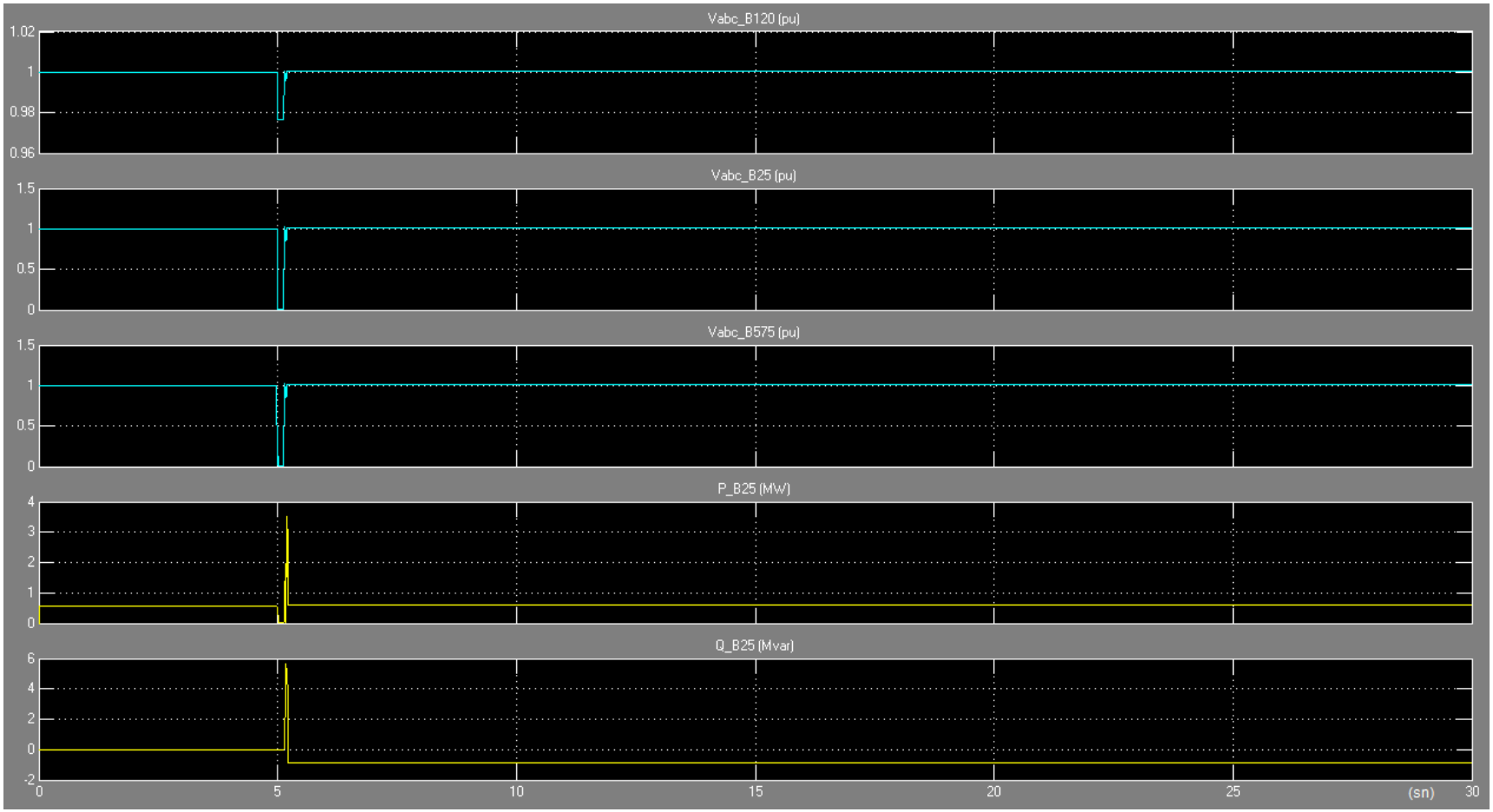
Şekil – 4.27 Rüzgar Santralı, şebekeye bağlı fakat rüzgar hızı sıfırken, 3-faz toprak arızası durumunda şebekenin davranışı



Şekil 4.28 : Rüzgar Santralı, şebekeye bağlı iken 3-faz toprak arızası durumunda rüzgar santralinin davranışı - 1



Şekil 4.29 : Rüzgar Santralı, şebekeye bağlı iken 3-faz toprak arızası durumunda rüzgar santralinin davranışı - 2



Şekil 4.30 : Rüzgar Santralı, şebekeye bağlı iken 3-faz toprak arıza durumunda şebekenin davranışı

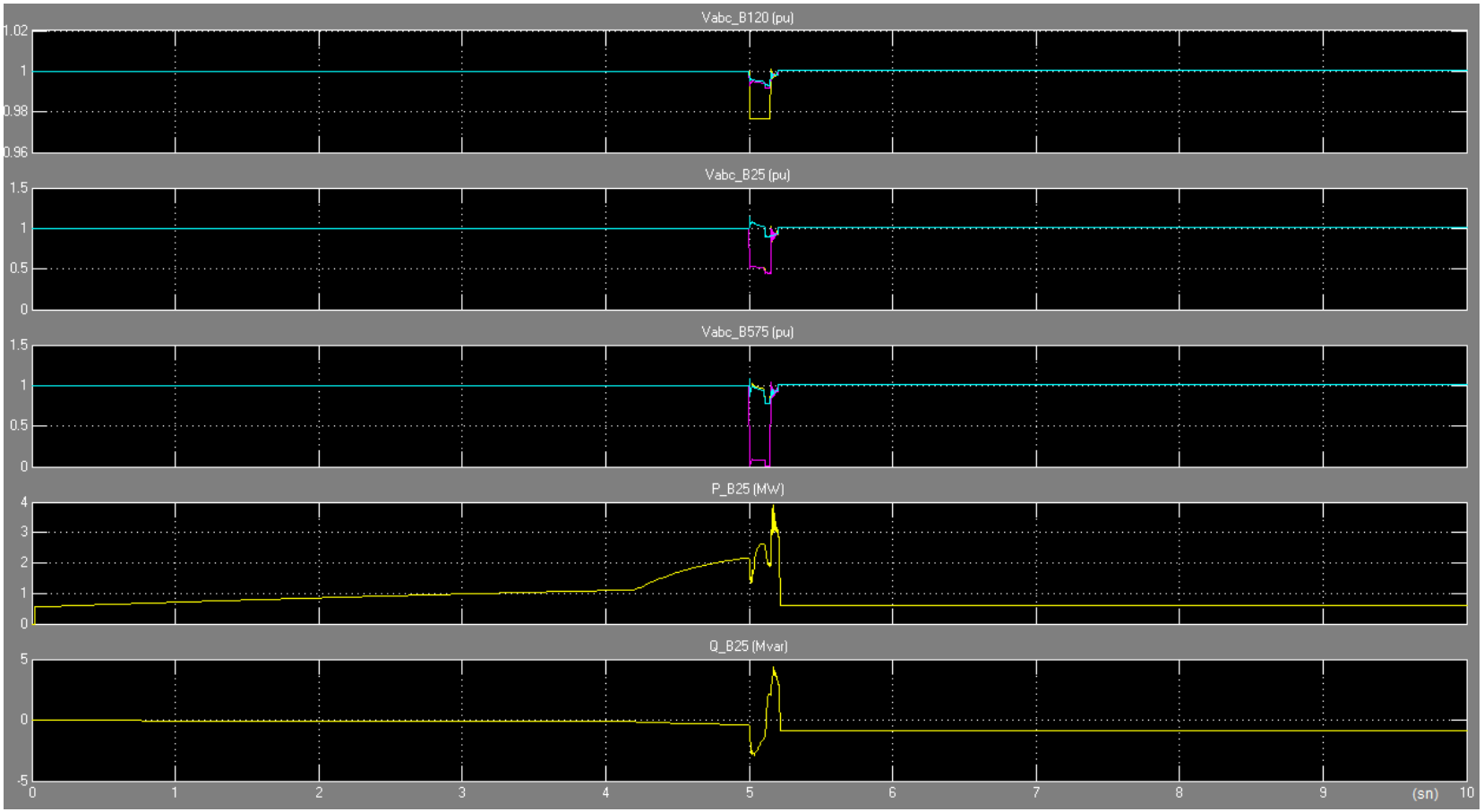
4.2.4.3 Faz- faz arızası durumunda çalışma

Santral şebekeye bağlı, rüzgar hızı=0 m/s:

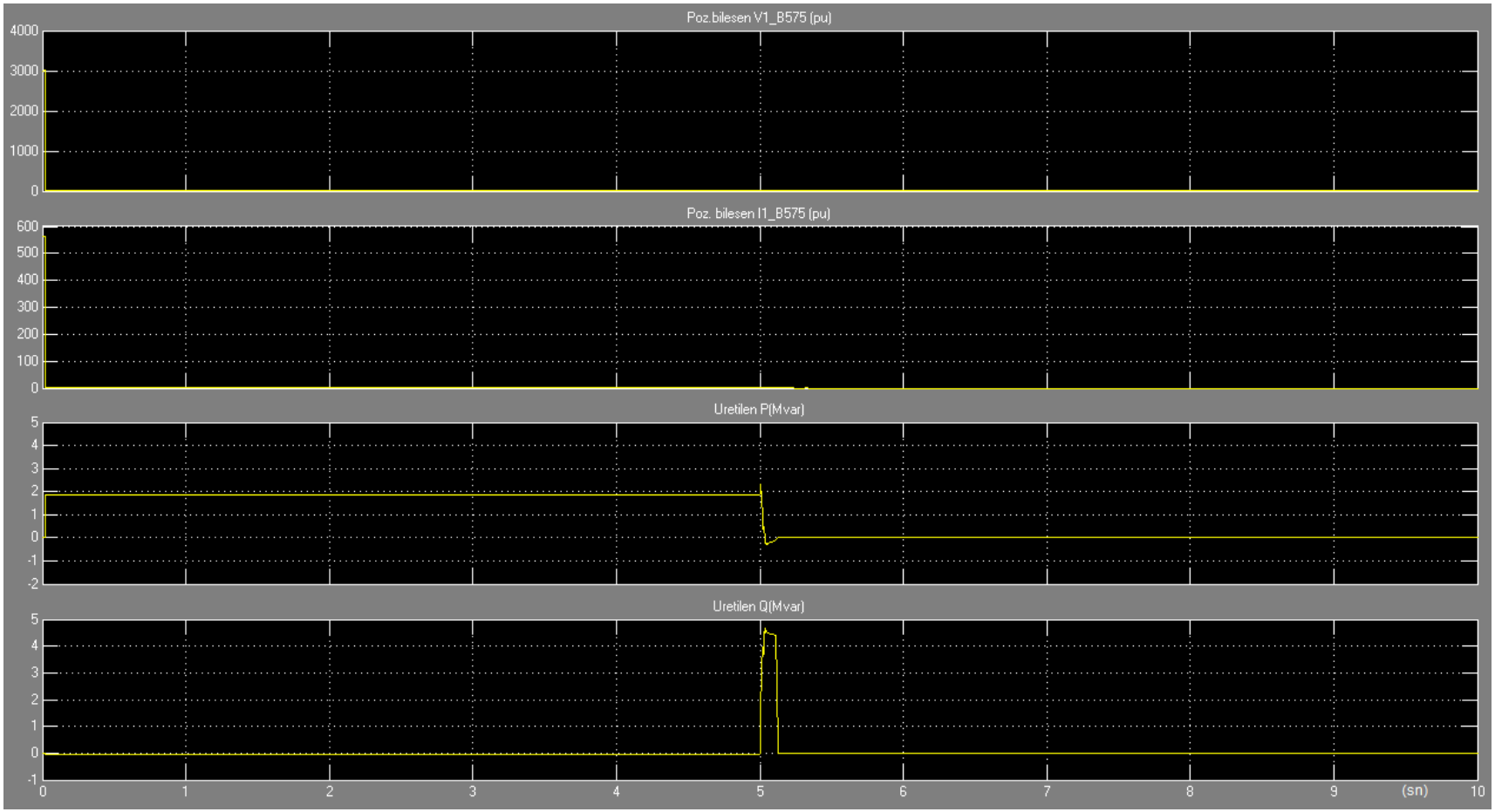
Rüzgar hızı sıfırken, yani santral devrede değil iken, faz-faz arızası olması durumunda, santralin düşük gerilim açma değeri 0,75 pu a ayarlandığı için ve faz-faz arızasında B575 barasındaki gerilim değeri 0,5pu e düştüğü için t=5,1s de koruma devreye girerek, düşük gerilimden dolayı açma yapar.

Santral şebekeye bağlı :

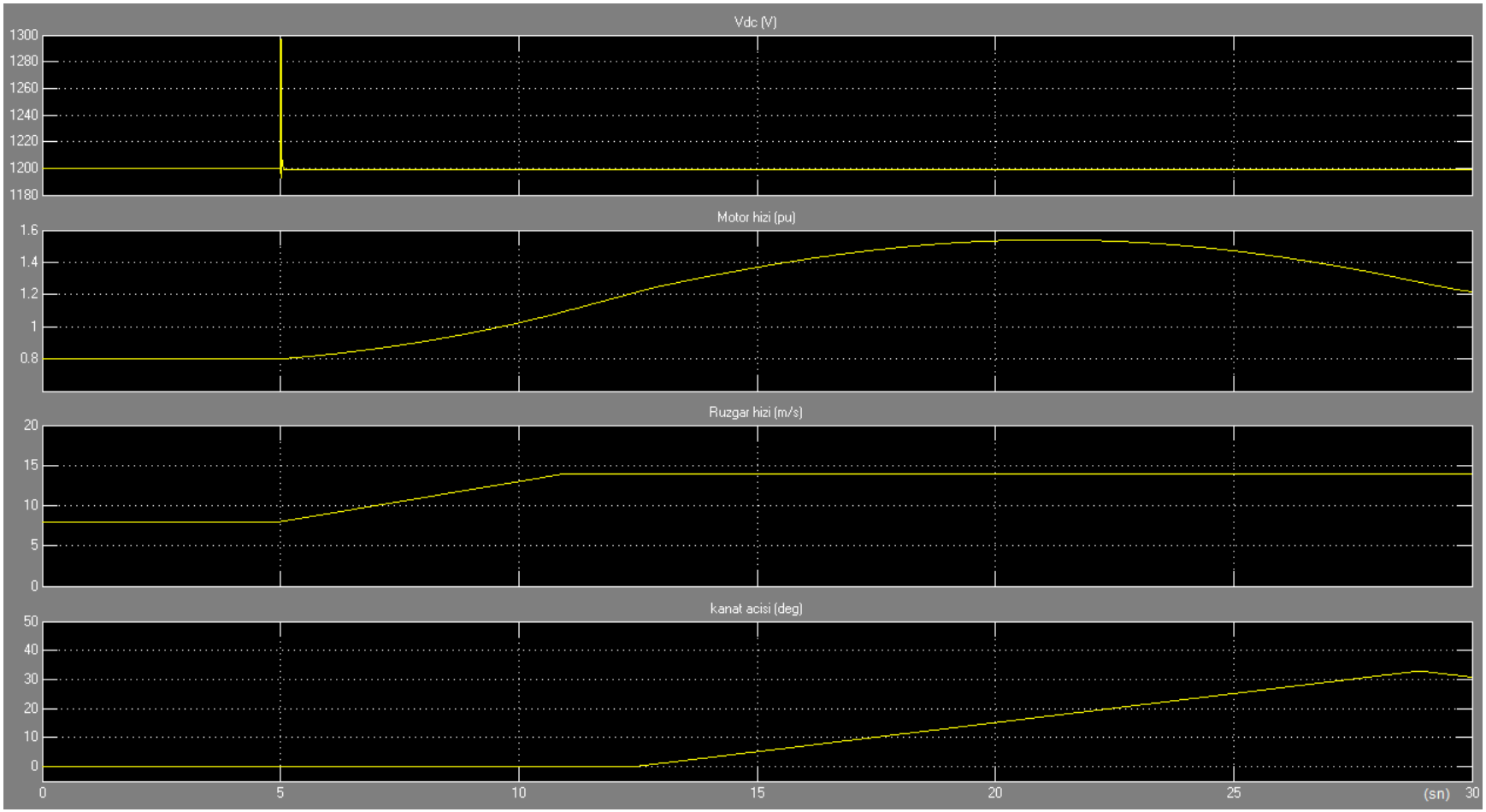
Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'te görüleceği üzere, rüzgar hızının 8m/s den 14 m/s'ye ye t=5s de arttığı durumda, santral tarafında, t=5s'de 9 döngülük faz-faz arızası meydana gelmektedir. B575 barasında 0,5pu lik bir gerilim düşümü gerçekleşir ve koruma rölesinde düşük gerilim 0,75 pu'e ayarlandığı için röle, santrali devreden çıkarmaktadır.



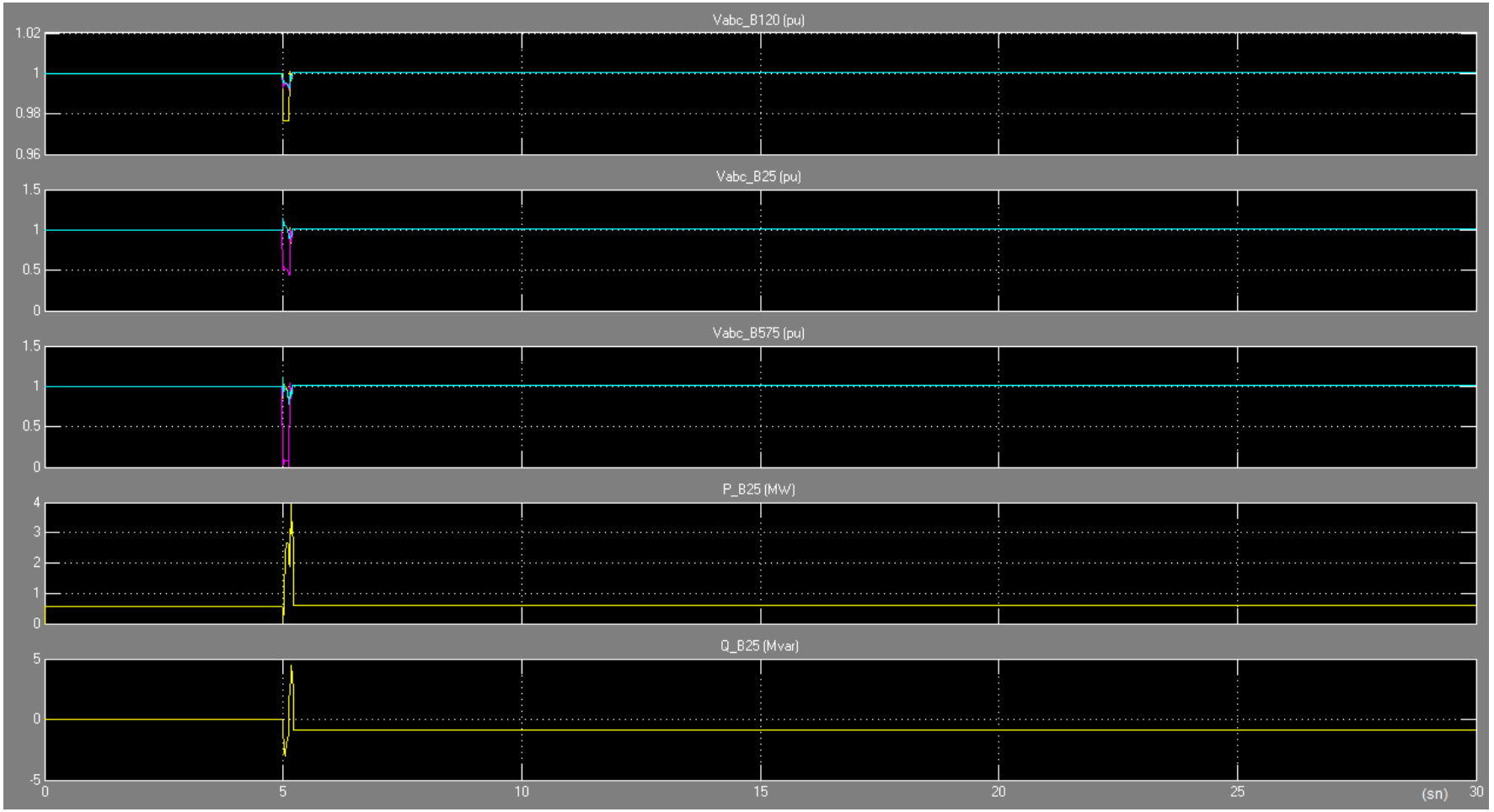
Şekil 4.31 : Rüzgar Santralı, şebekeye bağlı değil iken, santral tarafında faz-faz arıza durumunda şebekenin davranışı



Şekil 4.32 : Rüzgar Santralı, şebekeye bağlı iken, santral tarafında faz-faz arıza durumunda santralin davranışı - 1



Şekil 4.33 : Rüzgar Santralı, şebekeye bağlı iken, santral tarafında faz-faz arıza durumunda santralin davranışı – 2



Şekil 4.34 : Rüzgar Santralı, şebekeye bağlı iken, santral tarafında faz-faz arıza durumunda şebekenin davranışı

5. SONUÇ

Rüzgar santrallerinin kurulum gücü tespit edilirken; rüzgar generatörü modeli, şebekenin bağlantı noktasının kısa devre gücü temel parametrelerdir. Literatür araştırmaları sonucuna göre, bir rüzgar santralinin şebekeyle optimum şekilde bağlanabilmesi için aşağıdaki özellikleri sağlamak zorunda olduğu bilinmektedir:

- Değişen aktif ve reaktif güç üretimlerinden dolayı şebeke de istenmeyen gerilim değişimlerinin önlenmesi,
- Mevcut şebeke elemanların kısa devre akım limitlerinin zorlanmaması,
- Kırpışma ve harmonik üretiminin kabul edilebilir sınırlar içinde olması,
- Anahtarlama olaylarından ve anlık devreye girme olayları gibi geçici durumlarda şebekenin kararsızlığa gitmemesi gerekmektedir.[12].

Rüzgar santrallerinin şebekeye entegrasyonu esnasında:

- Şebeke bağlantı kriteri analizi; rüzgar santralininin gücü bağlantı yapılacak baranın kısa devre gücünün %5, %10, %20'si iken ve
- Rüzgar hızı artarken ve azalırken normal çalışma durumu,
- Rüzgar hızının birden sıfırlandığı durum,
- Rüzgar hızı sıfırken ve rüzgar hızı artarken, santralin bağlı olduğu orta gerilim hattında 1 faz-toprak, 3 faz-toprak ve faz-faz arızalarında santralin ve şebekenin davranışları incelenmiştir.

Şebeke bağlantı kriteri analizi yapıldığında, rüzgar santralininin gücü bağlantı yapılacak baranın kısa devre gücünün %5'i iken santral, normal çalışmasını sürdürerek, kendisinden beklenen gücü üretip, kendine bağlı yükleri beslemektedir. Bu değer %10 alındığında santralin aşırı akım rölesi t=24.3s de arıza vererek açma yapıyor ve santrali devreden çıkıyor. Şebeke tarafında ise santralin bir anda devreden çıkması nedeniyle ani bir gerilim yükselmesi meydana gelmiştir. Bu andan sonra, rüzgar santralinin bağlandığı baradan sonra bağlı olan fabrika ve rezistif yük, santralin bağlı olduğu baranın açma yapmasıyla beraber devreden çıkmışlardır. Santralin gücü, bağlantı yapılacak baranın kısa devre gücünün %20 si olduğunda ise t=18.83s de santral aşırı akım rölesi arıza vererek açma yapıyor ve santrali devreden çıkarıyor. Şebeke tarafında ise türbininin bir anda devreden çıkması nedeniyle ani bir

gerilim yükselmesi meydana gelmektedir. Bu andan sonra, rüzgar santralinin bağlandığı baradan sonra bağlı olan fabrika ve rezistif yük, santralin bağlı olduğu baranın açma yapmasıyla beraber devreden çıkmışlardır.

Rüzgar hızının 8m/s den 14 m/s ye arttığı durumda, rüzgar santrali 9 MW güç üretmektedir. Bu esnada, şebekede ise santralden şebekeye doğru aktif güç iletilmektedir. Bu miktar 6MW civarındadır, geri kalan ~3MW yük ise rüzgar santralinin haricinde yer alan yükler tarafından çekilmiştir.

Rüzgar hızının 14m/s den 8 m/s ye düştüğü durumda, santralin ürettiği güç anlık olarak 4,4 MW a çıkıp, daha sonra 1,9MW a düşmektedir. Şebekeye doğru ise 0,5MW aktif güç iletilmektedir.

Rüzgar hızının bir anda 8m/s seviyesinden, 0 m/s'ye ye düşmesi durumunda üretilen aktif güç 0 MW'a düşmektedir. Buna karşın 0,35 MVAr lık bir reaktif güç çekilmektedir.

Şebeke tarafında ise orta gerilim barasındaki gerilim 0,0015pu azalırken, alçak gerilim barasındaki gerilim 0,0005pu azalmaktadır. Rüzgar hızı sıfır olmasına rağmen, santral halen devrededir.

Santralin şebekeye bağlı olmadığı durumda, orta gerilim tarafında meydan gelen 1faz-toprak arızası santralin koruma grubunda açmaya neden olmamaktadır.

Santralin şebekeye bağlı olduğunda, rüzgar hızının 8m/s den 14 m/s ye arttığı durumda, santral tarafında meydana gelen 1faz-toprak arızası sonucunda, alçak gerilim tarafındaki gerilim arıza boyunca 0,8pu'e dümekte ve santrale ait düşük gerilim koruma rölesinin açma sınırı 0,75pu'e ayarlandığı için, santral açma yapmadan çalışmasına devam etmektedir.

Bu esnada, rüzgar santralinin ürettiği güç 8,8 MW a çıkıyor. Şebeke tarafında ise gerilimlerde geçici bir salınım olup, arıza sonunda normal değeri olan 1pu e dönmektedir.

Santralin şebekeye bağlı olduğu ve rüzgar hızı sıfırken, meydan gelecek bir 3-faz toprak arızası sonucunda koruma rölesi, santral generatörlerindeki konvertör DC Aşırı Gerilim'den dolayı açma gerçekleşmekte ve santrali devreden çıkarmaktadır. Bu şekilde generatörün korunmasını sağlanmakta arıza sonrası rüzgar santrali şebekeden ayrılmaktadır.

Mevzubahis olan 3-faz toprak arızası rüzgar hızının artması durumunda meydana geldiğinde de, aynı şekilde DC Aşırı Gerilim'den dolayı açma yapmaktadır.Şebeke tarafında ise, arıza süresi boyunca, yüksek gerilim tarafında 0,02pu'lik bir gerilim çökmesi yaşanmakta, orta gerilim tarafında ise, 0pu'e düşen gerilim, arıza sonrası normal değerine geri dönmektedir. 3-faz toprak arızası sonucu santral devre dışı kalır ve rüzgar santralinin artık besleyemediği yükler , orta gerilim barasında gelen aktif güç ile beslenmeye devam ederler.

Rüzgar hızı sıfırken, yani santral devrede değil iken, faz-faz arızası olması durumunda, santralin koruma rölesi devreye girerek, düşük gerilimden dolayı açma yapmaktadır.

Santral devrede iken faz-faz arızası olması durumunda, rüzgar hızının da arttığı durumda, santral tarafında meydana gelen faz-faz arızası alçak gerilim barasında bir gerilim düşümü gerçekleşmekte, bu da koruma rölesinin açmasına neden olmakta ve dolayısıyla, santrali devreden çıkarmaktadır. Şebeke tarafında ise arıza süresi boyunca oluşan geçici bir salınımdan sonra gerilim değerleri 1pu e geri dönmektedir.

Bunlara benzer şekilde daha farklı senaryolar da oluşturulabilir.

Netice olarak, rüzgar santralinin şebekeye paralel çalışması, diğer müşterilere sağlanan elektriğin kalitesini bozmamalıdır.

Ülkemizde, rüzgar gücü ile üretim yapan santrallerin sayısı arttıkça, bunların şebeke ile bağlantısı giderek daha önem kazanacak ve bu konuda yapılacak çalışmalar daha da artacaktır.

KAYNAKLAR

[1] **Malkoç Y.**, 2007 : EMO ENERJİ – Eylül 2007 – Sayı 3 – Sy 45-50

[2]<http://www.rüzgarenerjisibirligi.org.tr/dokumantasyon>, Rüzgar Lisans Başvurularında Son Durum, Yücel YAMAN - Enerji Uzmanı, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 13 Mayıs 2010, ICCI/İstanbul.

[3] <http://www.windpowermonthly.com>, 21 Kasım 2010.

[4] <http://www.nrel.gov/wind>, 23 Kasım 2010.

[5] **Morren J., Pierik J. and Sjoerd W.H. de Han** , 2006: Inertial Response Of Variable Speed Wind Turbines", Electric Power Systems Research, Vol.**76**, no. 11, pp. 980-987.

[6] **Vihliara H**., 2002: Control of Variable Speed Wind Turbine, *Ph.D Thesis*, Tampere University of Technology, Finland.

[7] **Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P.**, 1995: Nonlinear and Adaptive Control Design", Wiley Interscience Publication.

[8] **Marques J., Pinheiro H., Gründling H.A., Pinheiro J.R. and Hey H.L.**, 2008 : A Survey On Variable-Speed Wind Turbine System, *39th Power Electronics Specialists Conference, IEEE*, Rhodes, Greece, June 15-19.

[9] **Maligo B.**, 2003 : Modeling and Control of Wind Turbine as a Distributed Resource in an Electric Power System", *System Theory 2003. Proceedings of the 35th Southeastern Symposium*, West Virginia, USA, March 16-18.

[10] **Johnson K.E., Pao L.Y., Balas M.J., Kulkarni V. and Fingersh L.J.,** 2004 : Stability Analysis of an Adaptive Torque Controller for Variable Speed Wind Turbines, *CDC. 43rd IEEE Conference on Decision and Control*, Vol.**4**, pp. 4087-4094.

[11] **Johnson K.E., Pao L.Y., Balas M.J., Kulkarni V. and Fingersh L.J.**, 2006 : Control of Variable Speed Wind Turbine, *IEEE Control Systems Magazine*, 2006.

[12] **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.

[13] **Ackermann T**., 2009, Güç Sistemlerinde Rüzgar, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, pp. 447-460, Ankara.

[14] **TEİAŞ APK Dairesi Başkanlığı**, 2005 : Yenilenebilir Kaynaklardan Değişken Üretim Yapan Santrallerin Elektrik Üretim-İletim Sistemine Teknik ve Ekonomik Etkileri ve AB Uygulamaları, Ankara.

[15] **Çadirci I., Ermiş M.,** 1992 : Double-Output Induction Generator Operating at Subsynchronous and Supersynchronous Speeds: Steady-State Performance Optimisation and Wind Energ Recovery, *IEE Proceedings B- Electric Power Applications*, Vol. 139, no. 5, pp. 429-442.

[16] **Marques G.D**., 1999 : Numerical Simulation Method for the Slip Power Recovery System, *IEE Proc., Electr. Power Application*, Vol. 146, no.1,pp.17–24.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Mehmet Akif AK

Doğum Yeri ve Tarihi: Diyarbakır, 08.10.1978

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği