

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGAR SANTRALLERİNİN
DİNAMİK MODELLENMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI**

Elektrik Müh. Sait Giray BİRİNÇ

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU

Jüri Üyesi : Doç.Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN

Jüri Üyesi : Yrd.Doç.Dr. Önder Güler (İTÜ)

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖR VE GÜÇ ELEKTORNİĞİ ELEMANLARI.....	4
2.1 Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler	4
2.1.1 Doğru Akım Generatörleri	4
2.1.2 Asenkron Generatörler	4
2.1.2.1 Sincap Kafesli (Squirrel Cage) Asenkron Generatörler [SKAG].....	4
2.1.2.2 Rotoru Sargılı Asenkron Generatörler [RSAG]	5
2.1.2.2.1 Ayarlanabilir Dirençli (Optislip) Rotoru Sargılı Asenkron Generatörler [ADRSAG].....	6
2.1.2.2.2 Çift Beslemeli Asenkron Generatörler [ÇBAG]	6
2.1.3 Senkron Generatörler	7
2.1.3.1 Alan Sargılı Senkron Generatörler [ASSG]	8
2.1.3.2 Daimi Mıknatıslı Senkron Generatörler [DMSG]	8
2.2 Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Güç Elektronik Elemanları	9
2.2.1 Yolverici (Soft-Starter)	9
2.2.2 Kondansatör Grubu.....	9
2.2.3 Güç Dönüştürücüleri.....	9
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ÇALIŞMA ŞEKİLLERİNE GÖRE ÇEŞİTLERİ	11
3.1 Sabit Hızlı Rüzgar Türbinleri (SHRT).....	11
3.2 Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri (DHRT)	11
3.2.1 Sınırlandırılmış DHRT.....	11
3.2.2 Rotor Akım Kontrollü DHRT	12
3.2.3 Güç Dönüştürücülü (Tam ölçekli) DHRT.....	13
4. BOZCAADA ENERJİ AĞININ VE RÜZGAR SANTRALLERİNİN MODELLENMESİ.....	14
4.1 Bozcaada-Çanakkale Enerji Ağı'nın Dinamik Modellemesi	14

4.2	Rüzgar Türbin Modellemesi.....	15
4.2.1	Rüzgar Türbini Mekanik Modeli.....	16
4.2.2	Ayrodinamik Model.....	17
4.3	Generatör Modellemeleri	18
4.3.1	DMSG Modellemesi	18
4.3.1.1	Güç Dönüştürücüsü Kontrolü.....	20
4.3.1.1.1	Generatör Tarafı Kontrolü.....	21
4.3.1.1.2	Şebeke Tarafı Kontrolü	22
4.3.2	ÇBAG Modellemesi	23
4.3.2.1	Güç Dönüştürücüsü Kontrolü.....	25
4.3.2.1.1	Rotor Tarafı Kontrolü	26
4.3.2.1.2	Şebeke Tarafı Kontrolü	27
5.	VERİM VE MALİYET ANALİZİ.....	29
5.1	Maliyet Modeli	29
5.1.1	Enerji Maliyeti.....	29
5.1.2	Sabit Maliyet Oranı (SMO).....	30
5.1.3	Kurulum Maliyeti (KM).....	30
5.1.4	Yıllık Faaliyet Gideri [YFG]	31
5.1.5	Yıllık Net Enerji Üretimi (YNEÜ)	31
6.	SİMÜLASYONLAR VE SONUÇLARI	36
6.1	Yüksek Seviyeli Gerilim Düşümü (%100'lük) Simülasyonu	36
6.2	Düşük Seviyeli Gerilim Düşümü (%45'lik) Simülasyonu.....	43
6.2.1	Rüzgar Hızı Değişikliği	48
7.	SONUÇLAR	54
KAYNAKLAR		56
8.	EKLER.....	59
8.1	Ek 1 Kurulum maliyeti hesaplama formülleri.....	59
8.2	Ek 2 Santrallerin toplam kurulum maliyetleri.....	59
8.3	Ek 3 Bozcaada Rüzgar Enerji Santralinde şebeke kesintisi nedeni ile arıza duruşları	59
Ek 1 Kurulum maliyeti hesaplama formülleri		60
Ek 2 Santrallerin toplam kurulum maliyetleri		64
Ek 3 Bozcaada Rüzgar Enerji Santralinde şebeke arızası nedeni ile arıza duruşları.....		65
ÖZGEÇMİŞ.....		66

SİMGE LİSTESİ

c	Türbin sönüm katsayısı
C_p	Kanat açısı ve kanat uç hız oranına bağlı güç katsayısı
I_{dref}	Stator akımı d -eksen bileşeni referans değeri
I_{qref}	Stator akımı q -eksen bileşeni referans değeri
i_d	Stator akımı d -eksen bileşeni
i_q	Stator akımı q -eksen bileşeni
J_g	Generatör ataleti
J_t	Pervane ataleti
k	Türbin sertlik katsayısı
K_d	Akım kontrolü d ekseni oran kazancı
K_P	Aktif güç kontrolü oran kazancı
K_q	Akım kontrolü q ekseni oran kazancı
K_Q	Reaktif güç kontrolü oran kazancı
K_U	A.A gerilim kontrolü oran kazancı
K_v	D.A gerilim kontrolü oran kazancı
K_β	Kanat açısı kontrolü oran kazancı
L_d	DMSG stator endüktansının d -eksen bileşeni
L_q	DMSG stator endüktansının q -eksen bileşeni
P	Aktif güç (W)
P_{md}	PWM faktörünün d -eksen bileşeni
P_{mq}	PWM faktörünün q -eksen bileşeni
P_{ref}	Aktif Güç referans değeri
P_t	Türbin gücü (W)

Q_{ref}	Reaktif güç referans değeri
R	Pervane yarıçapı (m)
R	Reaktif güç (VAr)
r_r	Rotor direnci
r_s	Stator direnci
T	Servo zaman sabiti
T_d	Akım kontrolü d eksen oran kazancı
T_P	Aktif güç kontrolü zaman sabiti
T_q	Akım kontrolü q eksen zaman sabiti
T_Q	Reaktif güç kontrolü zaman sabiti
$T_{\dot{s}}$	Türbin şaft momenti
T_t	Türbin ayrodinamik momenti
T_U	A.A gerilim kontrolü zaman sabiti
T_v	D.A gerilim kontrolü zaman sabiti
T_{β}	Kanat açısı kontrolü zaman sabiti
U	DMSG Stator gerilimi
u_d	Stator gerilimi d -eksen bileşeni
u_q	Stator gerilimi q -eksen bileşeni
U_{ref}	DMSG Stator geriliminin referans değeri
V_{dc}	Doğru akım bara gerilimi
$V_{dc,ref}$	Doğru akım bara gerilimi referans değeri
v_w	Rüzgar hızı (m/s)
w_g	Generatör açısal hızı
w_{ref}	Referans açısal hız

w_t	Pervane açısısal hızı
β	Kanat açısı (°)
β_{ref}	Referans kanat açısı
ζ	Sönüm oranı
η_{gear}	Dişli kutusu verimi
λ	Kanat uç hız oranı
ρ	Havanın yoğunluğu (kg/m ³)
ψ_d	Manyetik akı d -eksen bileşeni
ψ_{DM}	Daimi mıknatıs akısı
ψ_q	Manyetik akı q -eksen bileşeni

KISALTMA LİSTESİ

AA	Alternatif akım
ADRSAG	Ayarlanabilir dirençli rotoru sargılı asenkron generatör
AKB	Arsa kira bedeli
ASSG	Alan sargılı senkron generatör
BORES	Bozcaada Rüzgar Enerji Santrali
ÇBAG	Çift beslemeli asenkron generatör
DA	Doğru akım
DHRT	Değişken hızlı rüzgar türbini
DMSG	Daimi mıknatıslı senkron generatör
EİE	Elektrik İşleri Etüt İdaresi
EM	Enerji maliyeti
GTO	Gate turn-off thyristor (Kapı kapamalı tristör)
IEC	International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
IGBT	Insolated gate bipolar transistor (İzole kapılı çift kutuplu transistör)
İG	İşletme Gideri
KM	Kurulum maliyeti
PWM	Pulse-width modulation (Darbe genişlik modülasyonu)
RES	Rüzgar enerji santrali
RSAG	Rotoru sargılı asenkron generatör
RT	Rüzgar türbini
SHRT	Sabit hızlı rüzgar türbini
SKAG	Sincap kafesli asenkron generatör
SMO	Sabit maliyet oranı

YFG	Yıllık faaliyet gideri
YİG	Yıllık işletme gideri
YM	Yenileme maliyeti
YNEÜ	Yıllık net enerji üretimi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Sabit hızlı rüzgar türbini	11
Şekil 3.2 Sınırlandırılmış değişken hızlı rüzgar türbini	12
Şekil 3.3 Rotor akım kontrollü değişken hızlı rüzgar türbini	12
Şekil 3.4 Güç dönüştürücülü değişken hızlı rüzgar türbini	13
Şekil 4.1 Bozcaada enerji ağı	14
Şekil 4.2 Rüzgar türbini modeli	15
Şekil 4.3 Türbinin mekanik modeli	16
Şekil 4.4 Kanat açısı kontrolü	17
Şekil 4.5 DMSG'nin $d-q$ referansındaki eşdeğer devresi	19
Şekil 4.6 DMSG türbin modeli	20
Şekil 4.7 Generatör tarafı güç dönüştürücüsü kontrol şeması	21
Şekil 4.8 Şebeke tarafı güç dönüştürücüsü kontrol şeması	22
Şekil 4.9 ÇBAG eşdeğer devresi	23
Şekil 4.10 ÇBAG türbin elektrik modeli	25
Şekil 4.11 ÇBAG vektör kontrolü	26
Şekil 4.12 Rotor tarafı dönüştürücü kontrolü	27
Şekil 4.13 Şebeke tarafı kontrolü	28
Şekil 5.1 Dizayn maliyeti ve ölçekleme modeli	29
Şekil 5.2 ÇBAG'nin rüzgar hızlarına göre türbin çıkış güçleri	32
Şekil 5.3 DMSG'nin rüzgar hızlarına göre türbin çıkış güçleri	33
Şekil 5.4 ÇBAG'nin türbin başına tahmini yıllık enerji üretimi	34
Şekil 5.5 DMSG'nin türbin başına tahmini yıllık enerji üretimi	34
Şekil 5.6 Türbin başına maliyetlerdeki farklılıkları	34
Şekil 6.1 Arızada şebekede oluşan gerilim değişikliği (p.u.)	37
Şekil 6.2 Arıza sırasında santral çıkışlarındaki ortak bağlantı noktası (OBN) gerilim değişiklikleri (p.u.)	38
Şekil 6.3 Arıza sırasında generatör rotor hızlarının değişimi (p.u.)	39
Şekil 6.4 Arıza sırasında türbin mekanik moment değişiklikleri (p.u.)	40
Şekil 6.5 Arıza sırasında türbin elektrik moment değişiklikleri (p.u.)	40
Şekil 6.6 Arıza sırasında DA kapasitesi üzerindeki gerilim değişiklikleri (p.u.)	41
Şekil 6.7 Arıza sırasında güç dönüştürücüsü çıkışındaki frekans değişiklikleri (Hz)	41
Şekil 6.8 Arıza sırasında santrallerin OBN'deki aktif güç değişiklikleri (MW)	42
Şekil 6.9 Arıza sırasında santrallerin OBN'deki reaktif güç değişiklikleri (Mvar)	42

Şekil 6.10 Arızada şebekede oluşan gerilim değişikliği (p.u.)	43
Şekil 6.11 Arıza sırasında santral çıkışlarındaki (OBN) gerilim değişikliği (p.u.)	44
Şekil 6.12 Arıza sırasında generatör hızlarındaki değişiklikler (p.u.)	44
Şekil 6.13 Arıza sırasında türbin mekanik moment değişiklikleri (p.u.)	45
Şekil 6.14 Arıza sırasındaki türbin elektrik moment değişiklikleri (p.u.).....	45
Şekil 6.15 Arıza sırasındaki güç dönüştürücüsündeki frekans değişiklikleri (Hz).....	46
Şekil 6.16 Arıza sırasında DA kapasitesi üzerinde oluşan gerilim değişiklikleri (p.u)	47
Şekil 6.17 Arıza sırasında santrallerin OBN'deki aktif güç değişiklikleri (MW)	47
Şekil 6.18 Arıza sırasında santrallerin OBN'deki reaktif güç değişiklikleri (MVar).....	48
Şekil 6.19 Uygulanan rüzgar hızı değişikliği (m/s)	49
Şekil 6.20 Rüzgar hızı değişikliği sırasındaki kanat açısı (β) değişimi (derece,°)	49
Şekil 6.21 Rüzgar hızı değişimi sırasındaki generatör hızı değişimi (p.u.)	50
Şekil 6.22 Rüzgar hızı değişimi sırasındaki santral çıkışlarındaki aktif güç değişimleri (MW).....	51
Şekil 6.23 Rüzgar hızı değişimi sırasındaki şebekede oluşan gerilim değişimleri (p.u.)	51
Şekil 6.24 Rüzgar hızı değişimi sırasında türbin mekanik moment değişiklikleri (p.u.).....	52
Şekil 6.25 Rüzgar hızı değişimi sırasındaki türbinlerin elektrik moment değişikliği (p.u.)	52
Şekil 6.26 Rüzgar hızı değişimi sırasındaki güç dönüştürücüleri frekans değişiklikleri (Hz) .	53
Şekil 6.27 Rüzgar değişimi sırasındaki DA kapasitesi üzerindeki gerilim değişiklikleri (p.u.).....	53

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1 Türbin karakteristikleri	15
Çizelge 4.2 Kanat açısı kontrolü değerleri.....	18
Çizelge 4.3 DMSG nominal değerleri.....	20
Çizelge 4.4 Doğrultucu değerleri.....	21
Çizelge 4.5 Doğrultucu kontrol entegresi değerleri.....	22
Çizelge 4.6 Evirici değerleri.....	23
Çizelge 4.7 Evirici kontrol entegresinin değerleri.....	23
Çizelge 4.8 ÇBAG nominal değerler	25
Çizelge 4.9 Doğrultucu değerleri.....	27
Çizelge 4.10 Doğrultucu kontrol entegresi değerleri.....	27
Çizelge 4.11 Evirici değerleri.....	28
Çizelge 4.12 Evirici kontrol entegresi değerleri.....	28
Çizelge 5.1 Santral karşılaştırmaları	35

ÖNSÖZ

Bu çalışmada yenilenebilir kaynakların en önemlilerinden biri olan rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine çevrilmesi için kurulan ve işletilen rüzgar enerji santrallerinin dinamik modellemeleri yapılmış ve arıza durumunda çalışma (fault ride through) sırasında dinamik analizleri incelenmiştir. Bunun yanı sıra modellemeleri yapılan santrallerin verimleri ve maliyetleri karşılaştırılmıştır.

Çalışmalarımın her aşamasında bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU'na, yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Bülent VURAL, elektrik mühendisi arkadaşlarım Akın TAŞÇIKARAOĞLU ve Abdulkadir BOSTANCI'ya ve bana her daim güvenen ve destek olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca “Projem İstanbul” kapsamında bu çalışmaya destek olan İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne ve EMA mühendislik yetkilisi Muharrem SAYIN'a teşekkür ederim.

ÖZET

Fosil yakıtlarının tükenmekte olması ve enerji ihtiyacının her geçen gün artması tüm dünya ülkelerini yenilenebilir enerji kaynakları arayışına yönlendirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en çok bilinen ve kullanılanları; hidroelektrik, güneş, rüzgar, jeotermal, biyogaz, biyokütle, dalga enerjisi ve hidrojen enerjisidir.

Dünyadaki gelişmeler çerçevesinde, Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisine önem vermeye başlamıştır. Şu an Türkiye’nin elektrik ihtiyacının %0,4’ü rüzgar enerjisinden sağlanmaktadır (http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/Turkiye_RES.html). Gelecekte bu oranın %1’e çıkarılması planlanmaktadır.

Rüzgar enerjisi her ne kadar temiz bir enerji kaynağı olsa da rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretmek için kullanılan rüzgar türbinlerinin şebeke bağlantısı sırasında bir takım problemler çıkabilmektedir. Ayrıca bağlantı sonrasında rüzgar hızı değiştiği için şebekede fliker, harmonik ve gerilim dalgalanmaları oluşturabilmektedir. Bunun yanı sıra şebekede oluşan arızalar yüzünden türbinler zorlanmaktadır. Hatta bazen devreden çıkarak o an için enerji üretimini durdurabilmektedir ki bu da güç sisteminin enerji kalitesinde ve kararlılığında problemler yaratmaktadır (bazı aşırı durumlarda tümüyle sistemde çökme oluşturmaktadır). Avrupa’da kabul edilen yeni yönetmelikler ile türbinlerin şebekede oluşan kısa süreli arızalar esnasında bağlantılarının kesilmesi yasaklanarak, arıza durumunda çalışması istenmektedir ve bu durum yeni türbin teknolojisi araştırmalarında arıza durumunda çalışmalar üzerinde yoğunlaşmaya yol açmıştır.

Bu çalışmada değişken hızlı rüzgar türbinlerinin şebekeye tam ölçekli güç dönüştürücüsü ile bağlanan daimi mıknatıslı senkron generatörlü ve şebekeye kısmi ölçekli güç dönüştürücüsü ile bağlanan çift beslemeli asenkron generatörlü olmak üzere farklı iki tür modellemesi yapılmıştır. Rüzgar türbinlerinin arıza durumunda çalışmaları ve rüzgar değişimi sırasındaki dinamik davranışları ile ilgili simülasyonlar yapılarak, generatörlerin ve türbinlerin performansları incelenmiştir. Mevcut sistemlerin ayrıca verimleri ve maliyetlerinin karşılaştırmaları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar enerjisi, rüzgar türbini, dinamik modelleme.

ABSTRACT

As the amount of fossil fuels are running low all and demand of energy is increasing day by day, all the world are leaded to emphasize on renewable energy sources. The most known and used renewable energy sources are; hydroelectric, wind, solar, jeothermal, biogas, biomass, wave and hydrogen energies.

Due to the developments all around the world, Turkey also showed a great interest on wind energy. Currently, 0,4% of Turkey's electircal energy demand is corresponded by wind energy (http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/Turkiye_RES.html). This ratio is planned to be increased to 1% in near future.

Although wind is a clean energy source, the wind turbines which convert the wind energy to electrical energy, can suffer some challanges during grid connection. Also, as wind varies time to time, harmonics, flicker, voltage and frequency fluctuations can occur during grid connection of wind turbines. Addition to these the wind turbines are facing some challenges because of the disturbances occurring in the power system. The power system disturbances or voltage fluctuations may lead the wind turbines to trip, which causes power system instability and quality problems (even in extreme cases system collapses). In order to avoid such problems newly installed wind turbines have to comply with new grid connection requirements which are coded by some of the European Countries and because of this the studies became major in the fault ride through subject.

This paper presents dynamic modeling of wind farms which are composed of variable speed wind turbines equipped with permanent magnet synchronous generator connected to grid via full scale power converter and variable speed wind turbines equipped with doubly-fed induction generator connected to grid via partial scale converter. The dynamic behavior of wind turbines during grid faults and wind gusts is simulated and performances of generators as well as wind turbines are analyzed. Furthermore, the wind turbine efficiencies and design costs are compared.

Key Words: Wind power, wind turbines, dynamic modeling.

1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki artış ve bunun yanı sıra gelişmekte olan dünya sanayisi ve ekonomisi, insanoğlunun enerji ihtiyacını her geçen gün artırmaktadır. Kömür, doğalgaz ve petrol gibi fosil enerji kaynaklarının azalması, tüm dünya ülkelerini yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en çok bilinen ve kullanılanları; güneş, rüzgar, hidroelektrik, jeotermal, biyogaz, biyokütle, dalga enerjisi, hidrojen enerjisidir.

Dünyadaki gelişmeler çerçevesinde, Elektrik İşleri Etüt İdaresi verilerine göre, Türkiye’de de rüzgar enerjisi çalışmaları 1995 yıllarında artmış ve 1998 yılının Şubat ayında 1,5 MW’lık Çeşme rüzgar çiftliği kurulmuştur. Aynı yılın Kasım ayında yine Çeşme’de 7,2 MW’lık bir rüzgar çiftliği kurulmuştur. 2000 yılının Haziran ayında da Demirer-Enercon işbirliğinde yapılan 10,2 MW kurulu gücünde Bozcaada (Bores) rüzgar çiftliği kurulmuştur. Türkiye’nin 2008 yılı itibari ile sahip olduğu rüzgar enerji santrallerinin toplam kurulu gücü 147,1 MW olup, Türkiye’nin toplam elektrik enerjisinin % 0,4’ünü karşılamaktadır. Şu an inşası devam eden 144,40 MW ve sözleşmesi yapılmış olan 531,66 MW kurulu güce sahip rüzgar santralleri, Türkiye’nin ileriye dönük olarak rüzgar enerjisine verdiği önemi göstermektedir.

Rüzgar enerjisi, temiz bir enerji kaynağı olduğu gibi, aynı zamanda ürettiği enerjiye göre uygun maliyetlidir. Ne var ki, rüzgar enerjisi santrallerinin, şebeke bağlantısı sırasında şebekeye bozucu etkileri bulunmaktadır. Bu bozucu etkiler arasında kırpışma (flicker), gerilim dalgalanmaları, harmonikler ve frekans dalgalanmaları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra aynı şekilde güç sisteminde oluşan arızalar da, rüzgar türbinleri üzerinde çeşitli bozucu etkilere neden olabilmektedir (Sanz vd., 2000; Soens vd. 2004; TEİAŞ Raporu, 2005). Rüzgar türbinleri ile ilgili araştırmalar, bu bozucu etkenlerin türbin dinamikleri üzerindeki etkilerinde ve türbin kararlılığı üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bilindiği gibi konvansiyonel elektrik santralleri şebekede oluşan gerilim dalgalanmalarını şebekeye reaktif güç enjekte ederek yada şebekeden reaktif güç çekerek düzenlemeye çalışırlar (Kundur, 1994). Rüzgar santrallerinin üretim kapasiteleri, konvansiyonel santrallere göre daha küçük olduğundan şebekeyi arıza durumunda yeterli bir şekilde destekleyemezler. Hatta şebekede oluşan ani gerilim düşümleri ve bozukluklardan dolayı, rüzgar türbinleri devreye girip çıkmakta, bu da sistem karalılığında, sürekliliğinde ve dayanıklılığında problemler oluşturmaktadır. Bazen bu devreye girip çıkmalar, rüzgar santrallerinin çok etkin olduğu yani üretim kapasitelerinin büyük değerlerde olduğu güç sistemlerinde, uzun süreli çöküntülere (black-out) sebep olabilmektedir.

Şebeke bağlantılı rüzgar türbinli enerji sistemlerinin güç kalitesi karakteristiklerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi hususunda Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC), IEC 61400-21:2001 Avrupa standardını kabul etmiştir ve ülkemizde de TSE 61400-21 olarak kabul görmüştür. Bu standardın kabulünden sonra bazı ülkeler şebeke kararlılığı açısından önemli olduğu için rüzgar türbinlerinin şebekede oluşan kısa süreli ani değişimlerde devreden ayrılmadan sistem arıza durumunda (fault-ride through) çalışmaya devam etmesinin gerekliliği üzerine ek kanunlar koymuştur (Elkraft, ELTRA, 2004; TEİAŞ Raporu, 2005). Arıza durumunda çalışma şüphesiz ki, türbin, generatör ve güç elektroniği elemanları üzerinde geçici süreli negatif etkiler oluşturmaktadır.

Rüzgar santralleri kurulmadan önce ilgili bölgenin hem rüzgar gücü bakımından, hem de güç sistemi bakımından iyice incelenmesi gerekmektedir. Bu incelemeler hem simülasyon, hem de yerel ölçümlerle sağlanabilmektedir. Gelişen bilgisayar teknolojileri ve MATLAB, DIgSILENT gibi bilgisayar programları, rüzgar türbinlerinin dinamik modellemelerini ve güç sistemi üzerindeki etkilerini incelemek açısından çok büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Literatürde, rüzgar türbinlerinin geçici hal (transient) olaylarından etkilenmesinin gözlenmesi ve incelenmesi amacıyla dinamik modellemeleriyle ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Saad-Saoud vd. 1995; Sloodweg vd. 2001; Petru vd. 2002; Santoso vd. 2007). Akhmatov vd. (2003,2006), Poller (2003), Gagnon vd. (2005) ve Michalke (2007) çalışmalarında, çift beslemeli asenkron generatörden (ÇBAG) oluşan rüzgar türbinlerinin dinamik modellemesini yapmıştır. Nunes vd. (2005), Svehkarenko (2005) ve Michalke vd. (2007) çalışmalarında daimi mıknatıslı senkron generatörden (DMSG) oluşan rüzgar türbinlerinin dinamik modellemesini yapmıştır. Bu modellemelerle rüzgar hızı değişimi ve şebeke arızalarından dolayı oluşan geçici hal olaylarının, türbinlerin veya santrallerin üzerine etkilerini incelemişlerdir. Bu tez çalışmasında, adı geçen geçici hal olaylarının, aynı güçteki ÇBAG ve DMSG'den oluşan rüzgar santrallerine olan etkilerinin karşılaştırılması amacıyla her iki tür generatörden oluşan santral modellemeleri oluşturulmuştur. Bu şekilde hangi rüzgar santralinin daha çok etkilendiği ve sistem kararlılığı açısından hangisinin daha kararlı olduğu incelenmiştir. Buna ek olarak tasarlanan modellerin, verimleri ve maliyetleri de analiz edilmiştir.

Bu tez çalışmasında modellemeler yapılırken, Bozcaada "BORES" rüzgar santrali baz alınmıştır. Santralde 17 adet rüzgar türbini bulunmaktadır. Her bir türbinin gücü 0,6 MW olup, santralin toplam kurulu gücü ise 10,20 MW'tır. Bu çalışmada DIgSILENT PowerFactory programı kullanılarak Bozcaada rüzgar santralinin, DMSG'li değişken hızlı

türbin modellemesi ve ÇBAG'li değişken hızlı modellemesi yapılmıştır. Bu rüzgar türbinlerinin verim ve maliyetlerinin incelenmesi için Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nın geliştirdiği, türbin dizayn modeli ve maliyet ölçeklemesi çalışmasından faydalanılmıştır (Fingersh, vd. 2006).

Bu tez çalışmasının 2. ve 3. bölümlerinde genel olarak rüzgar türbinlerinden bahsedilmiştir. 4. bölümde ise türbin modellemeleri anlatılmıştır. 5. bölümde modellemeleri yapılan türbin ve rüzgar enerji santrallerinin verim ve maliyet analizleri verilmiş ve 6. bölümde modellemeleri yapılan santrallerin dinamik analizleri verilmiştir.

2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖR VE GÜÇ ELEKTORNİĞİ ELEMANLARI

2.1 Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler

2.1.1 Doğru Akım Generatörleri

Doğru akım generatörlerinin hız kontrolleri kolaydır ancak güvenilirliklerinin düşük olması ve bakım gerektirmesinden dolayı şebeke bağlantılı türbinlerde yaygın olarak kullanılmazlar. Daha çok şebekeden bağımsız ve küçük güçlerdeki rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadırlar (Rashid, 2001).

2.1.2 Asenkron Generatörler

Rüzgar türbinlerinde genel olarak asenkron generatörler kullanılır. Emniyetli, mekanik açıdan basit olmaları ve üretim maliyetlerinin düşük olması türbinlerde kullanılmasını arttırmıştır. En önemli dezavantajları, kendiliğinden magnetik alan oluşturamadığı için, reaktif tahrik akımına ihtiyaç duymalarıdır. Rüzgar türbinlerinde iki tür asenkron generatör kullanılmaktadır; bunlardan birisi sincap kafesli asenkron generatörler ve diğeri ise rotoru sargılı asenkron generatörlerdir.

2.1.2.1 Sincap Kafesli (Squirrel Cage) Asenkron Generatörler [SKAG]

Mekanik olarak basit, yüksek verimli ve bakımları ucuzdur. SKAG'ler sadece sabit hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılır. Generatör ve rüzgar türbini rotoru, rotor ve generatör hızlarının farklı olduğu vites kutusunda birleştirilir.

SKAG'li rüzgar türbinleri, sürücülü bir mekanizmayla donatılır ve reaktif güç kullandığından reaktif güç kompanzasyonu yapılır. SKAG'ler dik bir moment-hız karakteristiğine sahip olduğundan rüzgar hızındaki dalgalanmalar direkt olarak şebekeye aktarılır. Rüzgardaki dalgalanmalar, rüzgar türbinin şebekeye bağlandığı noktalarda, ani akımların nominal akımın 7-8 kat seviyesine kadar çıkarabilmektedir. Bu ani akımlar zayıf bir şebekede şiddetli gerilim dalgalanmaları meydana getirir. Bu yüzden SKAG'nin şebekeye bağlantısı, ani akımları sınırlandırmak amacıyla yavaşça yapılmalıdır (Ackermann, 2005; Uyar vd., 2005) .

SKAG, normal çalışma da güçlü bir AC şebekeye direkt bağlantı süresince, oldukça kararlı ve sağlamdır. Artan yüklerle birlikte akış çeşitlenir ve artar. Şebekeden stator sargılarına verilen mıknatıslanma akımı yüzünden güç faktörü, nispeten düşüktür. Düşük güç faktörlü enerji

üretimine izin verilmediğinden, güç faktörü generatöre kompanzasyon amacıyla bağlanan kapasitörler sayesinde yükseltilir.

SKAG'lerde aktif güç, reaktif güç, kutup gerilimi ve rotor hızı arasında önemli bir ilişki vardır. Yüksek rüzgar hızlarında sadece generatör daha fazla reaktif güç çekerse, türbin daha fazla aktif güç üretir. Rüzgar hızı değişken olduğundan SKAG için tüketilen reaktif güç kontrol edilemez. Reaktif güç üreten herhangi bir eleman yok ise, reaktif güç direkt olarak şebekeden alınır. Şebekeden alınan reaktif güç ek hat kayıpları doğurur ve şebekeyi kararsızlaştırır. Kapasitörler veya güç elektroniği dönüştürücüleri reaktif gücü sınırlamak amacıyla kullanılabilir. Ancak temel sorun devreye girip çıkmaları sırasında oluşturdukları geçici durumlardır (Patel, 2006).

Arıza durumunda reaktif güç kompanzasyonu olmayan SKAG'ler, gerilim bozukluğunu direkt olarak şebekeye yansıtır. Rüzgar türbini hızlanabilir (kayma artar) ve elektrik ve mekanik momentin arasındaki farkın artması nedeniyle arıza meydana gelebilir. Hata düzeltildikten sonra da, SKAG şebekeden yüksek miktarda reaktif güç çeker bu da şebekede gerilim düşüşlerine sebep olur.

SKAG'ler sabit hızlı rüzgar türbinlerinde ve değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılabilir. Genelde sabit hızlı türbinlerde kullanılır. Sabit hızlı türbinlerde kullanıldığında şebekeye, dişli kutusu üzerinden yumuşak yol verici (soft-starter) ve kondansatör grubu ile direkt olarak bağlanmaktadır. Değişken hızlı türbinlerde kullanıldığında şebeke bağlantısı iki adet arka arkaya (back to back) gerilim kaynaklı güç dönüştürücüleri kullanılarak sağlanır.

2.1.2.2 Rotoru Sargılı Asenkron Generatörler [RSAG]

Rüzgar türbinlerinde RSAG kullanılması durumunda, rotorun elektriksel karakteristikleri dışarıdan kontrol edilebilir, bu yüzden rotor gerilimine müdahale edilebilir. Alan sargıları dışarıdan kayan halkalara ve fırçalara veya kayan halka ve fırçalara ihtiyaç duymayan güç elektroniği elemanlarına bağlanabilir (Copçuoğlu ve Önbilgin, 2007). Güç elektroniği elemanları kullanılarak, güç çekilebilir veya rotora aktarılabilir ve generatör stator veya rotor devresinden mıknatıslanabilir. RSAG'ların dezavantajı SKAG'lardan daha pahalı olmaları ve SKAG'lar kadar dayanıklı olmamalarıdır. Rüzgar türbini santrallerin de çoğunlukla RSAG'ların iki türü kullanır; ayarlanabilir dirençli rotoru sargılı asenkron generatörler ve çift beslemeli asenkron generatörler.

2.1.2.2.1 Ayarlanabilir Dirençli (Optislip) Rotoru Sargılı Asenkron Generatörler [ADRSAG]

ADRSAG tipi, Danimarkalı rüzgar türbini üreticisi Vestas tarafından fırtına sırasında rüzgar türbinlerindeki yükü minimize etmek amacıyla tasarlanmıştır. ADRSAG, generatörün değişken kaymalarına (dar bir menzilde) ve uygun kaymayı seçmek için çıkış gücünün küçük dalgalanmaları doğurmasına izin verir. Değişken kayma, yük azaltmalarını sağlamak için; daha karmaşık metotlar olan örneğin tam değişken hızlı tam ölçek kullanan rüzgar türbinleriyle karşılaştırıldığında oldukça basit, güvenilir ve ekonomik bir yoldur.

ADRSAG'ler rotor sargılarına değişken direnç eklenmiş RSAG'lerdir. Generatör kayması, rotor şaftına yerleştirilmiş olan dönüştürücü yardımıyla ayarlanan rotor direnci sayesinde değiştirilebilir. Generatörün statoru direkt olarak şebekeye bağlanır.

Bu generatör tipinin avantajları; basit bir devre yapısının olması, kayma halkalarına ihtiyaç duymaması ve SKAG'lerle karşılaştırıldığında daha iyi bir çalışma hızı menziline sahip olmasıdır. Bu yapı, fırtınalar sonucu ortaya çıkan mekanik yükleri ve güç dalgalanmalarını azaltır. Ancak gene de reaktif güç kompanzasyonuna ihtiyaç duyar. Dezavantajları; hız menzili %0-10 ile sınırlıdır ve değişken rotor direncine bağlıdır, aktif ve reaktif güç kontrolü zayıftır ve kayma gücü değişken dirençte kayıp olarak harcanır (Ackermann, 2005).

2.1.2.2.2 Çift Beslemeli Asenkron Generatörler [ÇBAG]

ÇBAG günümüzde en çok tercih edilen rüzgar generatörüdür. ÇBAG, stator sargıları direkt olarak sabit frekanslı 3 fazlı şebekeye bağlanmış bir RSAG'den ve rotor sargılarına iki yönlü olarak yerleştirilmiş arka arkaya gerilim kaynaklı dönüştürücülerden meydana gelir.

Çift beslemeli terimi; stator geriliminin şebekeden sağlanmasından, rotor geriliminin ise güç dönüştürücüsü tarafından indüklenmesinden doğmuştur. Bu sistem, büyük fakat limitli değişken hızlara izin verir ($\pm\%40$ kadar hız farkı ile çalışabilmektedir). Dönüştürücüler, rotora farklı frekanslarda akım enjekte ederek mekanik ve elektrik frekans ayarını yapar. Generatör davranışları normal çalışma veya arıza durumlarında güç dönüştürücüleri veya kontrolörleri tarafından yönetilir (Ackermann, 2005; Uyar vd., 2005).

Güç dönüştürücü ünitesi, iki adet dönüştürücü içerir; rotor tarafındaki doğrultucu ve şebeke tarafındaki evirici. Bu dönüştürücüler birbirlerini kontrol ederler. Ana fikir; rotor tarafındaki doğrultucunun rotor akım bileşenlerini kontrol ederek aktif ve reaktif güçleri kontrol ederken, şebeke tarafındaki evirici de DA bağlantı gerilimini kontrol eder ve dönüştürücünün

alışmasının g faktörüyle bütünlük içinde olmasını sağlar .

Çalışma şartlarına göre g rotorun içine yada dışına doğru beslenebilir, başka bir deyişle senkronizasyon koşullarından çıkararak dönüştürücü aracılığıyla rotordan şebekeye akabilir veya ters yönde ilerleyebilir. Her iki durumda da stator şebekeye enerji verir.

ÇBAG'n bir çok avantajı vardır. Aktif ve reaktif güç, rotor akımı ile kontrol edebilir. ÇBAG şebekeden mıknatıslanmaya ihtiyaç duymaz, rotor devresinden de mıknatıslanabilir. Statora gönderilecek reaktif güç şebeke tarafındaki eviriciden temin edebilir. şebeke ve trbın arasında reaktif güç değişimine gerek duymaz. Gerilim dalgalanmalarının olduğu zayıf bir şebekede, gerilim kontrolü amacıyla ÇBAG'den reaktif gn bir kısmını engellemesi beklenebilir.

Dönüştürücü g; toplam generatör gyle değil, seçilen hız menziliyle ve dolayısıyla kayma gyle ilişkilidir. Bu yüzden senkron hız menzili arttıkça dönüştürücü maliyeti de artar. Bu yüzden kullanılacak dönüştürücü, yatırım maliyeti ve verimliliği dikkate alınacak şekilde seçilir.

2.1.3 Senkron Generatörler

Senkron generatör aynı ölçülerdeki asenkron generatrdan daha pahalıdır ve daha karmaşık bir mekanik yapıya sahiptir. Fakat oldukça önemli bir avantajı vardır, reaktif ge ihtiyaç duymaz.

Senkron generatörün magnetik alanı, kalıcı mıknatısları kullanarak veya konvensiyonel alan sargılarını kullanarak sağlanabilir. Eğer senkron makine uygun kutup sayısına sahipse, vites kutusuna ihtiyaç duymadan direkt çalıştırılabilir.

Senkron makinenin şebekeye direkt bağlanması en uygun yolu güç elektroniği dnştrcleriyledir. Dönüştürücülerin iki önemli amacı vardır; fırtınalar sebebiyle oluşan g dalgalanmalarında enerji tamponu görevi görmek ve mıknatıslanmayı kontrol ederek şebeke frekansı ile gelen problemlere karşı savunmak. Böyle bir generatör kullanmak, rüzgar trbınlerinde değişken hızların kullanılmasına izin verir. Rüzgar türbini sanayisinde iki çeşit senkron generatör kullanılır; alan sargılı senkron generatörler ve daimi mıknatıslı senkron generatörler.

2.1.3.1 Alan Sargılı Senkron Generatörler [ASSG]

ASSG elektrik üretimi sanayisinde en çok kullanılan tiptir. ASSG'nin stator sargıları direkt olarak şebekeye bağlanmıştır. Bu yüzden devir hızı kaynak şebekenin frekansına sıkı sıkıya bağlıdır. Rotor sargıları uyarılması, kayma halkaları ve fırçalarını kullanarak DA ile veya fırçasız devir düzenleyici uyarıcıyla sağlanır. Asenkron generatörden farklı olarak, senkron generatörler reaktif güç kompanzasyonuna ihtiyaç duymazlar. DA'nın aktığı rotor sargıları, senkron hızı sağlayan uyarıcı alanı oluşturur. Senkron generatörün hızı, döner alanın frekansı ve rotor kutup çiftlerinin sayısı ile hesaplanır.

Bazı türbin üreticileri çok kutuplu (düşük hızlı) ASSG ve vitesiz tipleri kullanır. Vites kutusuna ihtiyaç duymaması önemli bir avantajdır. Ancak vites kutusu olmamasına rağmen fiyatı pahalıdır ve tam ölçekli güç dönüştürücüsü, sistemin tüm güç ihtiyacını karşılamak zorundadır (Ackermann, 2005; Uyar vd., 2005).

2.1.3.2 Daimi Mıknatıslı Senkron Generatörler [DMSG]

Kendinden uyarımlı olması ve yüksek güç faktöründe verimli çalışmasından dolayı DMSG kullanımı bir çok araştırmada önerilmiştir (Gagnon vd., 2005; Michalke, 2007).

Kalıcı mıknatıslı makinede, uyarma için herhangi bir kaynağa ihtiyaç duyulmadığından verim indüksiyon makinesinden daha fazladır. Fakat daimi mıknatıslanmayı sağlayacak ekipmanların üretimi zordur ve maliyetleri yüksektir. Ayrıca kalıcı mıknatıslanma uyarımı, hatta verilecek gerilim ve frekansı düzenlemek için tam ölçekli güç dönüştürücüsüne ihtiyaç duyar. Bu da ek bir maliyet demektir. Ancak her hızda güç üretilebilir. DMSG rotoru, kalıcı bir mıknatıs kutup sistemine sahiptir (çıkık kutuplu veya silindirik kutuplu olabilir). Çıkık kutuplu model özellikle yavaş hızlı makinelerde tercih edilir ve rüzgar türbinleri için en uygundur. Tipik düşük hızlı senkron makineler çıkık kutupludur ve çok kutba sahiptir.

DMSG'nin yol verme, senkronizasyon ve gerilim regülasyonu sırasında sorunlar çıkabilmektedir. Kolaylıkla sabit bir gerilim veremez. Ayrıca senkron çalışma kısa devre durumunda yada rüzgar hızının sabit olmadığı durumlarda, çok sert bir performans sergiler. Dezavantajlarından biri de mıknatıslanma malzemelerinin sıcaklığa çok duyarlı olmasıdır. Bu yüzden soğutma sistemlerine ihtiyaç duyarlar (Ackermann, 2005; Uyar vd., 2005; Copçuoğlu, 2007).

2.2 Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Güç Elektroniği Elemanları

Güç elektroniği elemanlarındaki gelişmeler sayesinde cihazların kontrol ve koruma elemanlarını tasarlamak çok daha kolay ve ucuz hale gelmiştir. Yaşanan bu gelişmeler rüzgar türbinlerinin performansının artırılmasında da kullanılmaktadır.

2.2.1 Yolverici (Soft-Starter)

Yol verici, sabit hızlı rüzgar türbinlerinde şebeke bağlantısı sırasında kullanılan basit ve ucuz bir elemandır. Kullanım amacı, ani akımları sınırlamak ve şebekede gürültü oluşmasını engellemektir. Yolverici olmadan ani akım değerleri normal akım seviyesinin 7-8 katına çıkabilir ve şebekede ciddi problemler meydana getirebilir.

Yolverici, her bir fazda iletişimi sağlayan iki adet tristör içerir ve her bir faza karşılıklı paralel olarak bağlanırlar. Önceden tanımlanmış şebeke periyodu sayısı boyunca tristörün tetikleme açısı ayarlanarak şebekeye yumuşak bir bağlantı yapılır. Tetikleme açısı ile yolverici çıkış akımları arasındaki ilişki non-lineerdir ve bağlı elemanın güç faktörünün fonksiyonudur. Yol verme işlemi bittikten sonra, yani ani akım çekme olasılığının engellenmesinden sonra, sistemin kayıplarının artmasını engellemek amacıyla tristörler devreden çıkarılır ve generatör direkt olarak şebekeye bağlanır (Ackermann, 2005) .

2.2.2 Kondansatör Grubu

Kondansatör grubu, sabit hızlı yada limitli değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılır. İndüksiyon generatörüne reaktif güç sağlayan bir elemandır. Böylece generatörün şebekeden çektiği reaktif güç minimize edilmiş olur.

Rüzgar türbini generatörleri önceden tanımlanmış periyotlardaki generatörün güç ihtiyacına göre bir çok kondansatörün devreye girip çıktığı tam yük dinamik kompanzasyona sahip olabilir.

Kondansatör grupları genellikle kulenin dibine yerleştirilir. Şebekedeki aşırı gerilim yükselmelerinde aşırı yükten dolayı zarar görme ihtimalleri vardır. Bu durumda kondansatörlerin değiştirilmesi gerekir ki bakım maliyetini arttıran önemli faktörlerden biridir (Ackermann, 2005).

2.2.3 Güç Dönüştürücüleri

Klasik bir frekans dönüştürücüsü şunları içerir:

- Enerjinin DA sisteme aktığı durumlarda AA'ı DA'a çeviren bir doğrultucu
- DA Kapasitörü
- Enerjinin AA sisteme aktığı durumlarda DA'yı, AA'ya çeviren bir evirici (kontrol edilebilir frekansta DA'yı AA'ya çevirir).

Diyotlar sadece doğrultucu durumunda, elektronik anahtarlar ise hem doğrultucu hem de çevirici durumunda çalışır. En çok kullanılan doğrultucu modeli; basit yapıları, düşük maliyetleri ve düşük kayıpları nedeniyle diyot doğrultuculardır. Pratikte non-lineerdirler ve harmonik akım üretirler. Diğer bir dezavantajı ise güç akışını dolaylı yoldan kontrol edebilmeleridir. Generatör akımını ve gerilimini kontrol edemediğinden, generatör akım ve gerilimi IGBT gibi çeviriciler yardımıyla kontrol edilir.

Çevirici temeline dayanan tristörler (şebeke uyarımlı); düşük kayıplı, düşük maliyetli ve şebekeye bağlanarak çalışan çeviricilerdir. Bu tür çeviriciler reaktif güç çeker ve büyük harmonikler meydana getirirler. Güç kalitesinin arttırılması yönündeki talepler, tristör çeviriciler yerine GTO çeviricileri ve IGBT'leri daha çekici hale getirmiştir. GTO çeviricinin üstünlüğü IGBT'ye göre daha fazla güçte kullanılabilmesidir, ancak bu özellik gelişen IGBT teknolojileriyle gelecekte önemini yitirecektir. GTO'nun dezavantajı, kapı sistemlerinin daha karmaşık olmasıdır.

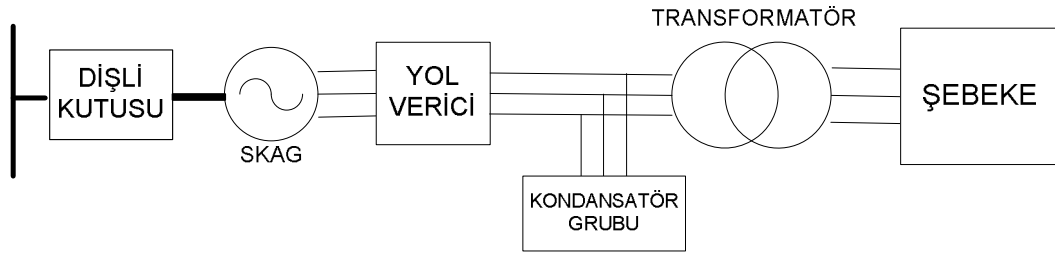
Generatör ve doğrultucu beraber bir çözüm olarak seçilmelidir. Çeviriciler, generatör ve doğrultucuya bağlı olarak seçilebilir. Diyot çevirici yada tristör çevirici, reaktif mıknaatıslanma akımına ihtiyaç duymadığından sadece senkron generatörlerle birlikte kullanılabilir. Buna karşılık reaktif gücü kontrol edebildiklerinden dolayı GTO ve IGBT çeviriciler, değişken hızlı indüksiyon generatörlerinde kullanılmak zorundadır. IGBT'ler iyi bir seçim olmasına rağmen yüksek fiyatlı olması ve kayıplarının yüksek olması gibi dezavantajları vardır. Diyot doğrultuculu bir senkron generatörün fiyatı eşdeğer bir IGBT çeviricili indüksiyon generatöründen çok daha fazladır.

Frekans dönüştürücülerini doğrultucu ve evirici bağlamanın çeşitli yolları vardır. Değişken hızlı generatör çalışmaları için 5 farklı çeşit bağlantı vardır; arka arkaya, çok seviyeli, çiftli, matris ve rezonans bağlantılarıdır. Arka-arkaya dönüştürücüler günümüzde rüzgar türbinleri için en ideal olanıdır ve diğer yöntemlere ilham kaynağı olmuştur. Ancak matris ve çok seviyeli dönüştürücüler de gelecekte arka-arkaya modeline rakip olabilir. Günümüzde rüzgar türbinlerinde en sık kullanılan yapı üç fazlı arka arkaya frekans dönüştürücüleridir (Ackermann, 2005;Hansen, 2007).

3. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ÇALIŞMA ŞEKİLLERİNE GÖRE ÇEŞİTLERİ

3.1 Sabit Hızlı Rüzgar Türbinleri (SHRT)

Sabit hızlı rüzgar türbinlerinde, türbin pervane hızı, şebeke frekansına, dişli kutusu oranına ve generatör tipine göre sabitlenmiştir. SHRT’lerde generatör olarak sincap kafesli indüksiyon generatörleri (SKAG) kullanılır. Generatör, türbin tarafından tahrik edilerek yol verici aracılığı ile transformatör üzerinden şebekeye bağlanır. Generatör, uyartım için sürekli reaktif akım ihtiyacı içinde olacağından reaktif akım ihtiyacını karşılamak için her bir türbin çıkışında kondansatör grubu bulunmaktadır (Ackermann, 2005). SHRT’lerde güç kontrolü yapılamadığından, rüzgar hızındaki dalgalanmalar, mekanik dalgalanmalara, mekanik dalgalanmalar ise elektriksel dalgalanmalara yol açar. Güçlü bir şebeke bağlantısında (kısa devre gücü yüksek bir şebekede), bu dalgalanmalara belli bir seviyeye kadar müsaade edilse de, zayıf şebeke bağlantılarında çok büyük gerilim dalgalanmalara yol açabilmektedir. Şekil 3.1’de SHRT’nin bağlantı şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Sabit hızlı rüzgar türbini

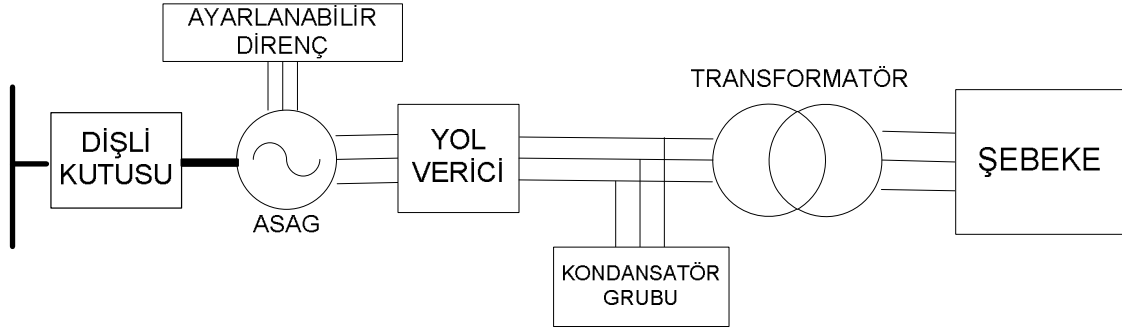
3.2 Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri (DHRT)

Teknolojik gelişmeler sayesinde, DHRT’lerinin rüzgar enerjisi için kullanımı çok yaygınlaşmıştır. Değişken hızlı rüzgar türbinleri, rüzgar enerjisini en iyi ve verimli bir şekilde yakalayarak, mekanik enerjiye çevirmek üzere dizayn edilmişlerdir. Generatör tiplerine göre genelde 3 tip DHRT kullanılmaktadır.

3.2.1 Sınırlandırılmış DHRT

Bu tip türbinlerde, rotor direnci, rotor şaftı üzerine monte edilmiş optik kontrollü konverterle ayarlanarak, alan sargılı asenkron generatör (ASAG) uyartımı, dolayısı ile de güç çıkışı kontrol edilir. Aynı SHRT’ler gibi yol verici üzerinden şebekeye bağlanır ve reaktif akım

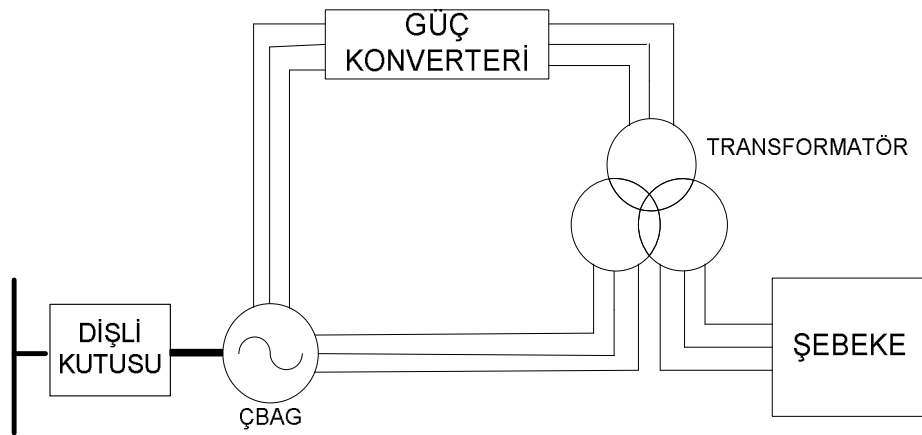
ihtiyacı kondansatör grubundan sağlanır (Ackermann, 2005). Şekil 3.2’de bu tip türbinlerin bağlantısı gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Sınırlandırılmış değişken hızlı rüzgar türbini

3.2.2 Rotor Akım Kontrollü DHRT

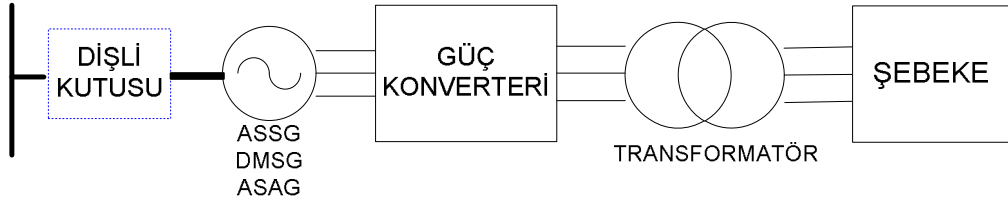
Bu tip türbinlerde, güç ve frekans kontrolünün rotor sargılarına bağlanmış olan güç dönüştürücüsü ile sağlandığı, çift beslemeli asenkron jeneratörler (ÇBAG) kullanılmaktadır. Güç dönüştürücüsü, güç kontrolünün yanı sıra yol verme işlemi ve reaktif güç kompanzasyonu işlemini de gerçekleştirmektedir. ÇBAG’ler de rotordan geçen güç, jeneratörün kayması ile orantılı olduğundan ve bu oran genelde jeneratörün çıkış gücünün %5-%25’i arasında değiştiğinden, kullanılan güç dönüştürücüsünün nominal gücü, türbin gücünün %20-%30’u kadar olabilmektedir. Şekil 3.3’te bu tip türbinlerin bağlantısı gösterilmektedir (Ackermann, 2005).



Şekil 3.3 Rotor akım kontrollü değişken hızlı rüzgar türbini

3.2.3 Güç Dönüştürücülü (Tam ölçekli) DHRT

Bu tip türbinlerde, alan sargılı senkron generatörler (ASSG), daimi mıknatıslı senkron generatörler (DMSG) ve alan sargılı asenkron generatörler kullanılabilmektedir. Türbin tarafından tahrik edilen generatör, frekans ve güç kontrolü yapan güç dönüştürücüsü ile transformatör üzerinden şebekeye bağlanır. Bu tip türbinlerde senkron generatörlerin kullanılması durumunda istenirse dişli kutusu kullanılmayabilir (Ackermann, 2005). Şekil 3.4'te bu tip türbinlere ait prensip şeması gösterilmektedir.



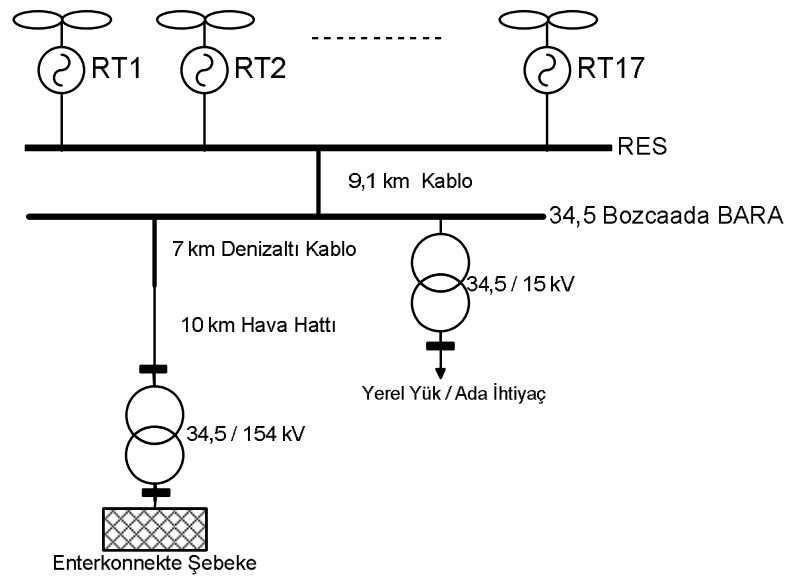
Şekil 3.4 Güç dönüştürücülü değişken hızlı rüzgar türbini

4. BOZCAADA ENERJİ AĞININ VE RÜZGAR SANTRALLERİNİN MODELLENMESİ

DIgSILENT tarafından yazılan PowerFactory programı, endüstriyel ve ticari elektrik sistemlerinin analizi için bilgisayar temelli bir mühendislik analiz programıdır. Elektrik güç sistemlerinin ve kontrol analizlerinin planlanmasına ve işletme optimizasyonunun hesaplanmasına yönelik olan bu program, ileri entegrasyon ve interaktif paketleri içerir.

4.1 Bozcaada-Çanakkale Enerji Ağının Dinamik Modellemesi

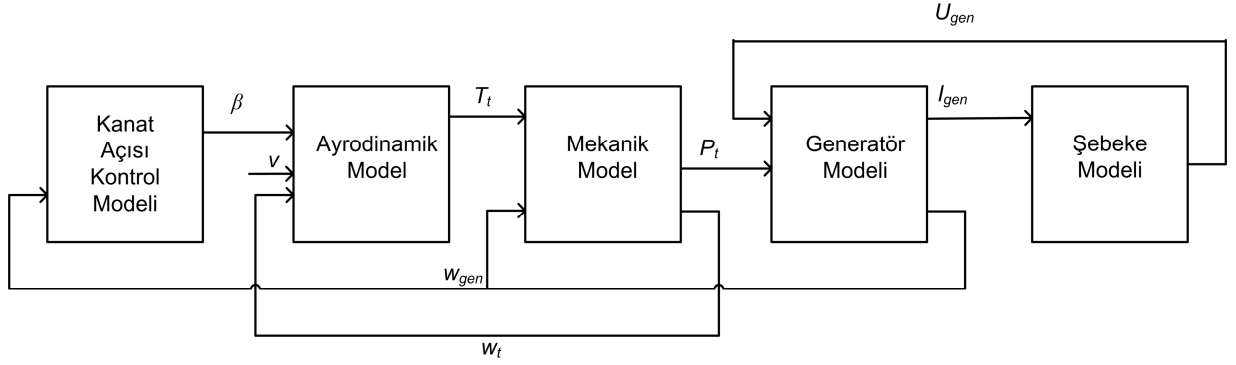
Şekil 4.1’de Bozcaada’nın Çanakkale ili ile enerji bağlantısı gösterilmektedir. Adanın Batı tarafındaki rüzgar santrali, 9,1 km uzunluğundaki bir kablo ile ada dağıtım merkezine (34,5 kV Bozcaada DM) bağlanmaktadır. Ada ihtiyacı için gerilim, dağıtım merkezinde 15 kV’a indirilmektedir. Rüzgar santrali nominal çalışma şartlarında ada ihtiyacının yaklaşık 30 katı kadar enerji üretmektedir (<http://www.demirer.com.tr/bores/index.html>). Rüzgar santrali 10,20 MW enerji ürettiği için ada ihtiyacı $10,20 / 30 = 0,34$ MW olarak kabul edilmiştir. İhtiyaç fazlası olan bütün arta kalan enerji de Çanakkale şebekesine aktarılmaktadır. Bozcaada dağıtım merkezinden 7 km’lik bir denizaltı kablosu ile karaya ulaştırılan enerji bağlantısı, 10 km uzunluğundaki bir hava hattı ile Çanakkale transformator merkezine (Çanakkale Çimento) bağlanmaktadır. Transformator merkezi de Türkiye enterkonnekte sistemine bağlanmaktadır.



Şekil 4.1 Bozcaada enerji ağı

4.2 Rüzgar Türbin Modellemesi

Bozcaada rüzgar santralinde 17 adet türbin bulunmaktadır. Güçleri 0,6 MW olan her bir türbin değişken hızlıdır ve aktif kanat açısı kontrolü bulunmaktadır. Türbin modellemeleri, DIgSLIENT programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



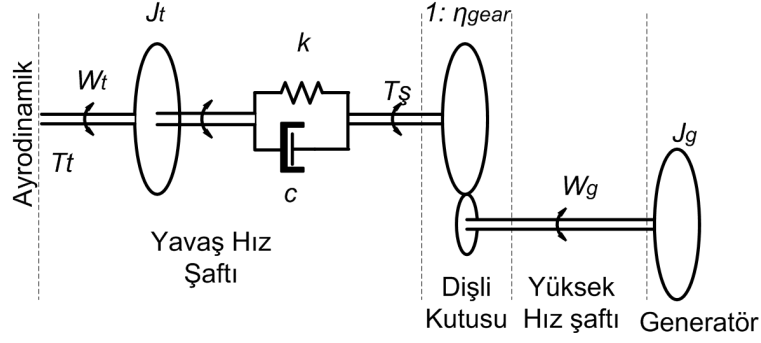
Şekil 4.2 Rüzgar türbini modeli

Şekil 4.2’de gösterilen rüzgar türbin modeli, 5 bölümden oluşmaktadır. Ayrodinamik modele; rüzgar hızı (v), türbin dönüş hızı (w_t) ve kanat açısı (β) girişleri vardır. Ayrodinamik modelin çıkışı türbin momenti (T_t), mekanik modele giriş olmaktadır. Mekanik modele ayrıca generatör modelinin bir çıkışı olan generatör açıl hızı (w_{gen}) da giriş olmaktadır. Mekanik model çıkışındaki türbin gücü (P_t), generatör modeline giriş olmaktadır. Generatör modelinin çıkışından alınan generatör açıl hızı, kanat kontrol modeline de ayrıca giriş yapmaktadır. Generatör modelinin diğer bir çıkışı, generatör akımı (I_{gen}), şebeke modelinin giriş değişkenidir. Generatörler şebeke bağlantılı olduğu için generatörlere, şebeke gerilimi (U_{gen}) giriş olarak verilmektedir. Çizelge 4.1’de türbin karakteristikleri verilmiştir.

Çizelge 4.1 Türbin karakteristikleri

Türbin Gücü	0,6 MW
Kanat Çapı	48 m
Hava yoğunluğu	1,225 kg/m ³
Nominal Türbin Hızı	18 rpm

4.2.1 Rüzgar Türbini Mekanik Modeli



Şekil 4.3 Türbinin mekanik modeli

Mekanik modellemede, biri pervane ataleti J_t , diğeri generatör ataleti J_g olan birbirini karşılayan iki ayrı atalet olarak oluşturulmuştur (Şekil 4.3). Yavaş hız şaftı ise, sertlik katsayısı k ve sönüm katsayısı c ile modellenmiştir. Ayrıca modellemeye ideal dişli kutusu da eklenmiştir.

Sürme (drive-train) bölümünde, türbin ayrodinamik momenti T_t , yavaş hız şaftındaki şaft momentine T_s 'ye dönüştürülür. Mekanik modelin dinamik denklemi aşağıdaki gibidir (Hansen vd., 2007).

$$w_t = (T_t - T_s) / J_t \text{ [rad/s]} \quad (4.1)$$

Şaftın mekanik momenti şu şekilde bulunur;

$$T_s = c \left(w_t - \frac{w_g}{\eta_{gear}} \right) + k \theta_k \text{ [Nm]}. \quad (4.2)$$

Burada, θ_r , θ_g sırasıyla pervane ve generatör açıları olmak üzere, $\theta_k = \theta_r - \frac{\theta_g}{\eta_{gear}}$ 'dır.

Generatörün mekanik gücü ise şu şekilde bulunur.

$$P_t = w_g \frac{T_s}{\eta_{gear}} \text{ [W]}. \quad (4.3)$$

ζ sönüm oranı olmak üzere, sönüm katsayısının c denklemi şu şekildedir.

$$c = 2\xi \sqrt{k J_t}. \quad (4.4)$$

4.2.2 Ayrodinamik Model

Eşitlik (4.5)'te, rüzgar gücünün türbin (P_t) yani mekanik güce dönüştürülmesini göstermektedir.

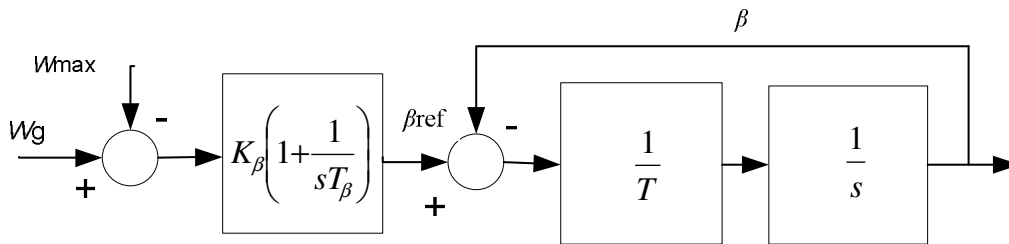
$$P_t = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho}{2} \pi R^2 v_w^3 \quad (4.5)$$

burada; C_p , β ve λ 'ya bağlı güç katsayısı (0,4 olarak alınmıştır), β kanat açısı, ρ hava yoğunluğu (1.225 kg/m^3 olarak alınmıştır), R pervane yarıçapı, v_w rüzgar hızıdır. λ kanat uç-hız oranı ise,

$$\lambda = \frac{w_t R}{v_w} \quad (4.6)$$

şeklinde tanımlanır. Burada; w_t , türbin açısal hızıdır.

Türbin modellemelerinde, generatör hızına göre aktif gücü ayarlayan maksimum güç yakalama (maksimum power tracking, MPT) sistemi bulunmaktadır. Generatörün referans rotor hızının altındaki durumlarda sadece MPT sistemi çalışmakta ve rüzgar hızına göre gerekli enerji çıkışını ayarlamaktadır. Referans hızı yükseldiğinde ise pervane dönüş hızını, dolayısı ile generatör dönüş hızını düşürmek için kanat açısı kontrolü devreye girmektedir. Şekil 4.4'te kanat açısı kontrol denetleyicisinin blok şeması gösterilmektedir.



Şekil 4.4 Kanat açısı kontrolü

Kanat açısındaki PI kontrolü, güç kontrolü için güç çıkış referans noktası ve ortalama güç çıkışı arasındaki farkı alarak, bir kanat açısı referans noktası belirler. Açı referans noktası güvenlik sebebi ile 0-70 derece arası sınırlandırılmıştır. Gerçek uygulamalarda kanat açısı servo motor sistemiyle değişmektedir ve kanat açıları geçici hal durumlarında, gecikmeli olarak değişmektedir. Bundan dolayı daha gerçekçi bir kanat açısı değişimi için servo motor

düzeni zaman sabiti, oran limiti ve açı limiti olmak üzere üç bölümde, kanat açısı değişim kontrolörüne servo motor düzeni eklenmiştir (Michalke vd., 2007). Kanat açısı karakteristikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Hız referansı, ÇBAG generatörde senkronüstü çalışmada %5 kayma olduğu için generatör %5 daha hızlı döneceğinden 1,05 olarak ayarlanmıştır.

Çizelge 4.2 Kanat açı kontrolü değerleri

Kanat Açı Kontrolü	
K_β (kanat açı kontrolü oran kazancı)	100
T_β (kanat açı kontrolü zaman sabiti)	1
Ref_speed (Hız referansı)	1,00-1,05
T (servo zaman sabiti)	0,5
Rate_op (açı değişim sınırı)	5
Beta_max (maksimum kanat açısı)	70

4.3 Generatör Modellemeleri

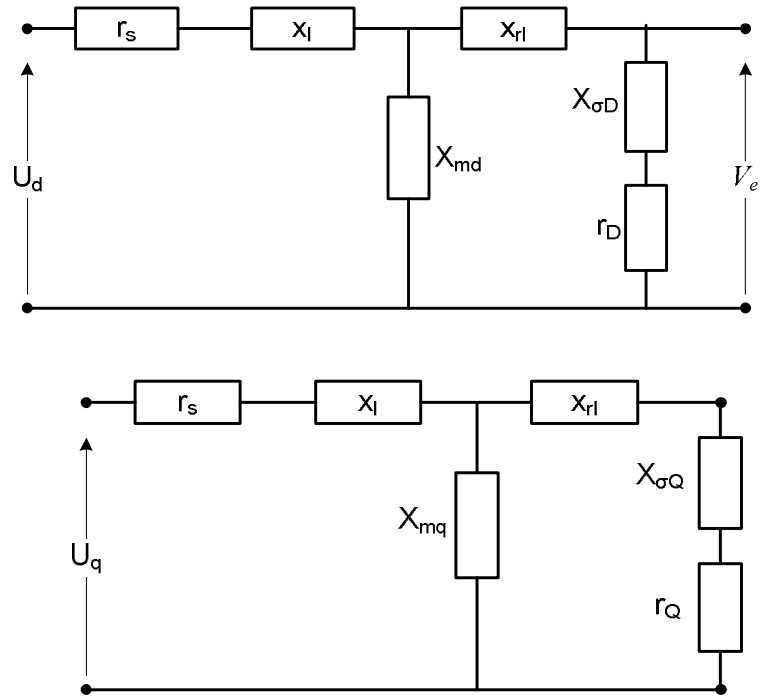
4.3.1 DMSG Modellemesi

Senkron generatör modeli için, DlgSILENT programında bulunun hazır senkron generatör modelleri içinden çıkık rotorlu senkron generatör modeli seçilmiştir. Üç fazlı çıkık rotorlu senkron generatör modelinin eşdeğer devresi Şekil 4.5’te gösterilmektedir. Burada e , V_e ikaz gerilimini sağlayan uyarma sargısıdır. Ayrıca d ve q eksenleri için iki adet sönüm sargısıdır.

DMSG’nin d - q referans durumundaki gerilim denklemleri,

$$\begin{aligned} u_d &= r_s i_d - n \psi_q + \frac{1}{w_n} \frac{d\psi_d}{dt} \\ u_q &= r_s i_q + n \psi_d + \frac{1}{w_n} \frac{d\psi_q}{dt} \end{aligned} \quad (4.7)$$

şeklindedir. Burada, u_d, u_q stator gerilimi, r_s stator direnci, ψ_q, ψ_d magnetik akı w_n generatör rotoru açısal hızı, n devir sayısıdır.



Şekil 4.5 DMSG'nin d - q referansındaki eşdeğer devresi

Stator akı bileşenleri,

$$\begin{aligned}\psi_d &= (x_l + x_{md})i_d + \psi_{DM} \\ \psi_q &= (x_l + x_{mq})i_q\end{aligned}\tag{4.8}$$

biçiminde bulunur. Senkron generatörün aktif ve reaktif gücü ise,

$$\begin{aligned}P &= u_d i_d + u_q i_q \\ Q &= u_q i_d - u_d i_q\end{aligned}\tag{4.9}$$

olarak hesaplanır. d - q referansındaki generatörün elektrik momenti,

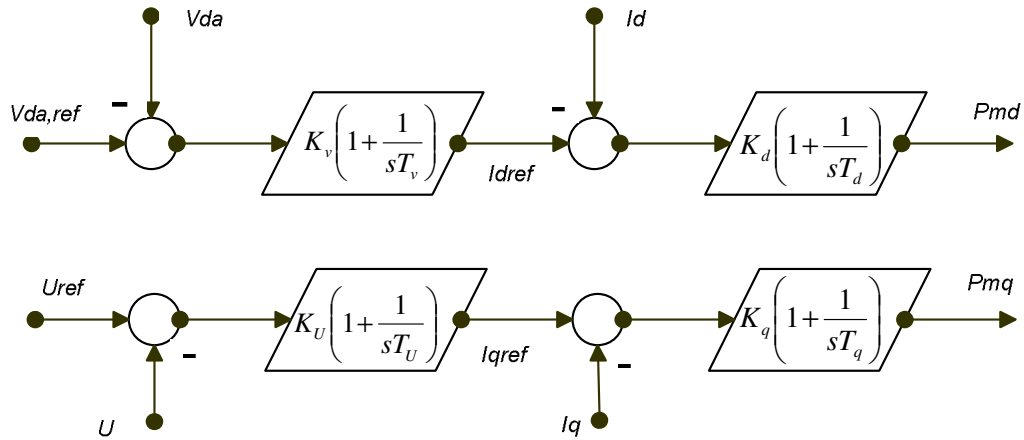
$$t_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d\tag{4.10}$$

eşitliği ile hesaplanır (DIgSILENT GmbH, 2002).

DMSG'yi kontrol etmek için sabit stator gerilimi kontrolü benimsenmiştir (Michalke vd., 2007). Aşırı hızlanmalardan dolayı oluşacak aşırı gerilimleri engellemek amacı ile stator gerilimi kontrol edilir. Bu şekilde stator gerilimi istenilen değerde tutulur. Kontrolde d eksen bileşeni stator gerilimi ile bağlantılıdır. Buradan da anlaşılabileceği gibi stator akımının d eksen bileşeni aktif güçle bağıntılıken, q eksen bileşeni reaktif bileşenle bağıntılıdır.

4.3.1.1.1 Generatör Tarafı Kontrolü

Generatör gücü bir DA barasında toplandığı için DA gerilimi sabit tutulmalıdır. Şekil 4.7'da gösterildiği gibi generatör tarafı dönüştürücüsü dört adet PI kontrol içermektedir. DA bara gerilimi, stator akımının d eksen bileşeninin kontrolü ile referans değeri tutulur. Buna benzer bir şekilde stator gerilimi, stator akımının q eksen bileşeninin kontrolü ile referans değeri tutulur. Kontroldeki hızlı bir iç akım kontrolü döngüsü stator akımının q ve d bileşenlerini kontrol ederken, daha yavaş bir dış döngüde DA gerilimini ve stator gerilimini kontrol etmektedir. Bu şekilde DA ve stator gerilimleri referans değerlerinde tutulur. Ayrıca iç akım döngüsü güç dönüştürücüsüne modülasyon indeksine d ve q bileşenlerinin sinyallerini gönderir. Çizelge 4.4'de doğrultucu ile ilgili değerler verilmiştir.



Şekil 4.7 Generetor tarafı güç dönüştürtücüsü kontrol şeması

Çizelge 4.4 Doğrultucu değerleri

Nominal AA Gerilimi	400 V
Nominal DA Gerilimi	650 V
Nominal Gücü	10,2 MW
Aktif Güç Kontrol Değeri	10.2 MW

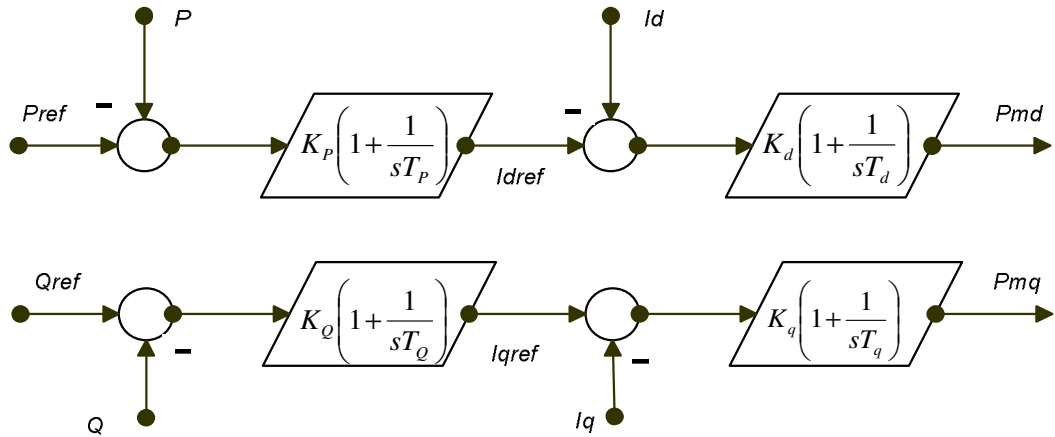
Çizelge 4.5'te doğrultucunun kontrol entegresi değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.5 Doğrultucu kontrol entegresi değerleri

K_d (akım kontrolü d eksen oran kazancı)	1	K_v (D.A gerilimi kontrolü oran kazancı)	1
T_d (akım kontrolü d eksen zaman sabiti)	0.015	T_v (D.A gerilim kontrolü zaman sabiti)	0.1
K_q (akım kontrolü q eksen oran kazancı)	3	K_U (A.A gerilim kontrolü oran kazancı)	1
T_d (akım kontrolü q eksen zaman sabiti)	0.015	T_U (A.A gerilim kontrolü zaman sabiti)	0.1

4.3.1.1.2 Şebeke Tarafı Kontrolü

Kontrol şeması Şekil 4.8'de gösterilen şebeke tarafı dönüştürücüsü (evirici), aktif ve reaktif güç akışını kontrol etmektedir. Aktif güç dönüştürücü akımının d eksen bileşeninin kontrolü ile referans değerinde tutulurken, reaktif güç dönüştürücü akımının q eksen bileşeni ile referans değerinde tutulur. Stator akımının aktif ve reaktif güç bileşenleri hızlı bir iç kontrol döngüsü ile düzenlenirken, daha yavaş bir dış kontrol döngüsü, reaktif ve aktif gücü ayarlayan akım referans noktalarını belirler.



Şekil 4.8 Şebeke tarafı güç dönüştürücüsü kontrol şeması

Çizelge 4.6’te evirici ile ilgili nominal değerler verilmiştir.

Çizelge 4.6 Evirici değerleri

Nominal AA Gerilimi	400 V
Nominal DA Gerilimi	650 V
Nominal Gücü	10.20 MW
DA Gerilimi Kontrol Değeri	1.15 pu

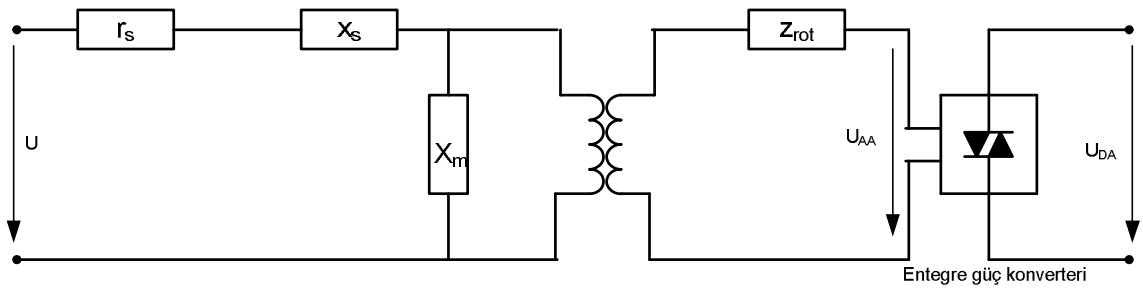
Çizelge 4.7’te evirici kontrol entegresinin değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.7 Evirici kontrol entegresinin değerleri

K_d (akım kontrolü d eksen oran kazancı)	0.2	K_P (aktif güç kontrolü oran kazancı)	1
T_d (akım kontrolü d eksen zaman sabiti)	0.01	T_P (aktif güç kontrolü zaman sabiti)	0.1
K_q (akım kontrolü q eksen oran kazancı)	0.2	K_Q (reaktif güç kontrolü oran kazancı)	1
T_q (akım kontrolü q eksen zaman sabiti)	0.01	T_Q (reaktif güç kontrolü zaman sabiti)	0.1

4.3.2 ÇBAG Modellemesi

DIgSLIENT programında hazır bulunan ÇBAG modelinde, bileziklere bağlı olan PWM güç dönüştürücüsü rotor gerilim ve faz açısını kontrol ederek, generatörün aktif ve reaktif güç çıkışlarını kontrol eder. Şekil 4.9’de de görüleceği üzere generatör modelinde bir DA bir de AA olarak iki çıkış bulunmaktadır.



Şekil 4.9 ÇBAG eşdeğer devresi

Dönüştürücü temel frekans yaklaşımına göre modellenmiştir. AA ve DA gerilimlerinin faz açısı ve büyüklükleri, modülasyon indeksinin (P_m) reel ve imajiner bölümlerine bağlı olarak aşağıdaki gibi belirlenir.

$$\begin{aligned}
U_{AAr} &= \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} P m_r U_{DA} \\
U_{AAi} &= \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} P m_i U_{DA}
\end{aligned}
\tag{4.11}$$

AA ve DA akımları dönüştürücü güç kayıplarını ihmal edersek şu şekilde bulunur;

$$P_{AA} = \text{Re}(\underline{U}_{AA} \underline{I}_{AA}^*) = U_{DA} I_{DA} = P_{DA} \tag{4.12}$$

ÇBAG'ün geçici hal analizi için model denklemleri,

$$\begin{aligned}
\underline{u}_s &= r_s \underline{i}_s + \frac{d\underline{\psi}_s}{w_n dt} + j \frac{w_{ref}}{w_n} \underline{\psi}_s \\
\underline{u}_r &= r_r \underline{i}_r + \frac{d\underline{\psi}_r}{w_n dt} + j \frac{w_{ref} - w_g}{w_n} \underline{\psi}_r
\end{aligned}
\tag{4.13}$$

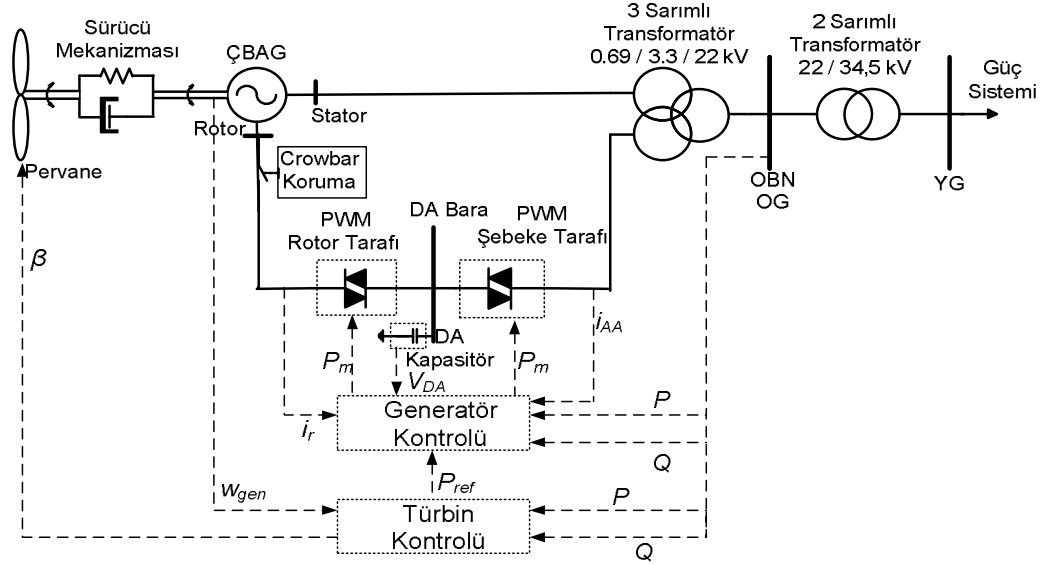
olarak verilir. Burada; $\underline{u}_s, \underline{u}_r$ sırasıyla stator ve rotor gerilimleri, $\underline{\psi}_s, \underline{\psi}_r$ rotor ve stator akı bileşenleri ve r_s, r_r stator ve rotor dirençleridir.

Akı bileşenlerinin denklemleri ise;

$$\begin{aligned}
\underline{\psi}_s &= (x_s + x_m) \underline{i}_s + x_m \underline{i}_r \\
\underline{\psi}_r &= x_m \underline{i}_s + (x_m + x_r) \underline{i}_r
\end{aligned}
\tag{4.14}$$

biçimindedir (DIgSILENT GmbH, 2002).

Santral modellemesi yapılırken 17 adet türbin paralel bağlı olarak kabul edilmiştir. Generatörün statoru şebekeye direkt bağlantılıdır. Generatörün rotor devresi gerilim kaynaklı, akım ayarlı güç dönüştürücüsü ile beslenmektedir. Güç dönüştürücüsü sayesinde çıkış akımının frekansının, şebeke frekansı ile aynı olması sağlanır. Generatörün rotorundan da enerji şebekeye akışının sağlanması için generatör senkron hızın %5 üstünde çalıştırılmaktadır. Generatörle ilgili değerler, Çizelge 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.10 ÇBAG türbin elektrik modeli

Çizelge 4.8 ÇBAG nominal değerler

Nominal Güç	600 kW
Nominal Stator Gerilimi	3.300 V
Nominal Rotor Gerilimi	690 V
Kayma	5%
Nominal Frekans	50 Hz

4.3.2.1 Güç Dönüştürücüsü Kontrolü

Normal çalışmada rotor tarafındaki dönüştürücü, istenilen elektromanyetik momenti elde etmek için rotor akımının büyüklük ve faz açısı değerlerini denetler. Ayrıca stator çıkışlarında ölçülen reaktif gücü ve istenilen güç faktörünü denetleyerek reaktif güç denetimini de gerçekleştirir.

Şebeke tarafı dönüştürücüsü ise iki yönlü çalışmaktadır. Senkron hız üstü çalışmada, şebekeye aktif güç iletir. Eğer generatör senkron hız altında çalışıyor ise şebekeden aktif güç çeker.

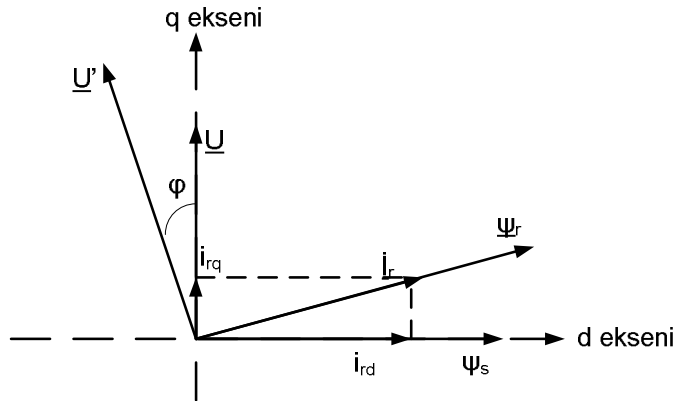
Stator çıkışları rüzgar türbini transformatörünün 3.3 kV'luk sargısına bağlanmıştır. Statorda akım indüklenmesi için şebekeden aktif güç çekilerek güç dönüştürücüsü üzerinen rotor sargılarına akım iletilir.

Stator daima aktif güç üretirken, generatörün ürettiği toplam güç rotordan ve statordan

üretileen gücün toplamıdır. Reaktif güç, rotor tarafı dönüştürücüsünün statordaki dönen manyetik alanla bağlantılı olan ikaz açısı (firing angle) ile üretilir.

Rotor çıkışındaki gerilim değeri ve bu gerilimin faz açısı farkı generatör çıkışındaki aktif ve reaktif gücü belirler. İdeal bir makine de maksimum aktif güç değışimi 90 veya 270 derecelik faz açısında, yani reaktif gücün olmadığı zaman gerçekleşir (Akhmatov vd., 2003; Gagnon vd.,2005; Michalke vd.,2007).

ÇBAG'yi kontrol etmek için vektörel kontrol prensibi benimsenmiştir (Nunes vd., 2005). ÇBAG'nin d ve q eksenlerindeki gerilim, akı ve akım bileşenleri Şekil 4.11'de fazör diyagram olarak gösterilmektedir. Burada $\underline{U}'$ olarak gösterilen değeri, terminal gerilimi $\underline{U}$ 'dan ϕ faz açısı kadar ileride oluşan ve generatörün çalışmasını etkileyen bir değerdir. Rotor devresindeki akı vektörü $\underline{\psi}_r$, $\underline{U}'$ değerinden 90 derece geridedir. Faz açısı ϕ değerioldukça küçük olduğu düşünülürse, rotor akımı $\underline{i}_r$ 'nin değeriarttırmak için, akım bileşeninin d eksen bileşenini (i_{rd}) değıştirmek gerekmektedir. Benzer bir şekilde rotor akımının q bileşenini değıştirilerek rotor akımının faz açısı değıştirilebilir. Reaktif güç ve gerilim kontrolü, rotor akımının d bileşeni değıştirilerek kontrol edilirken, hız ve moment kontrolü de rotor akımının q bileşeni değıştirilerek yapılır.

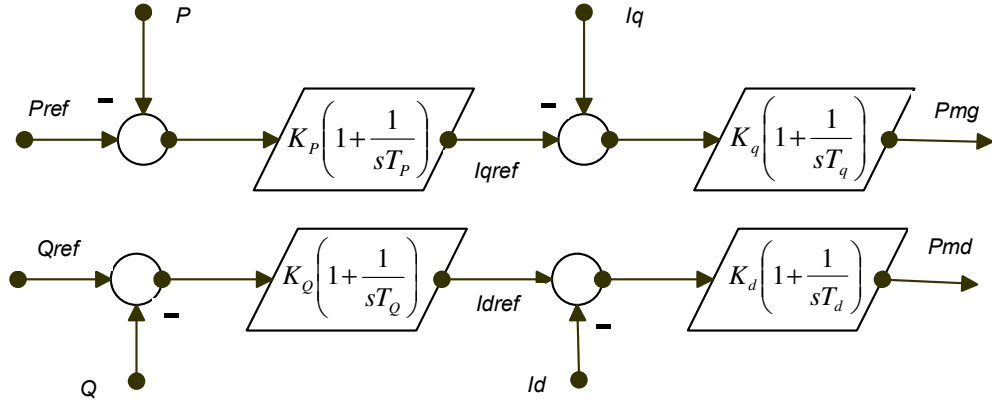


Şekil 4.11 ÇBAG vektör kontrolü

4.3.2.1.1 Rotor Tarafı Kontrolü

Rotor tarafı kontrolü, stator akımının d - q referans bileşenlerinin kontrolü ile çalışmaktadır. Aktif güç, rotor akımının q eksen bileşeninin ayarlanması ile referans değeriinde tutulurken, reaktif güç rotor akımının d eksen bileşeninin ayarlanması ile referans değeriinde tutulur (Şekil 4.12). Rotor akımının aktif ve reaktif güç bileşenleri hızlı bir iç döngü ile düzenlenirken, daha

yavaş bir dış döngü aktif ve reaktif gücü düzenleyen akım referans değerlerini belirler.



Şekil 4.12 Rotor tarafı dönüştürücü kontrolü

Çizelge 4.9’da ve Çizelge 4.10’da sırası ile rotor tarafı dönüştürücüsü (doğrultucu) ile ilgili değerler ve doğrultucu kontrol entegresinin değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.9 Doğrultucu değerleri

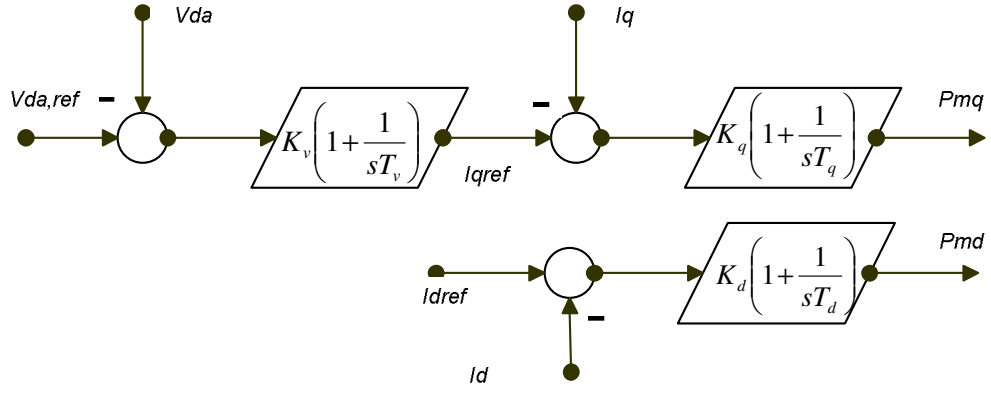
Nominal AA Gerilimi	690 V
Nominal DA Gerilimi	1150 V
Nominal Gücü	3,4 MW
Aktif Güç Kontrol Değeri	10.2 MW

Çizelge 4.10 Doğrultucu kontrol entegresi değerleri

K_d (akım kontrolü d eksen oran kazancı)	0.2	K_P (aktif güç kontrolü oran kazancı)	1
T_d (akım kontrolü d eksen zaman sabiti)	0.01	T_P (aktif güç kontrolü zaman sabiti)	0.1
K_q (akım kontrolü q eksen oran kazancı)	0.2	K_Q (reaktif güç kontrolü oran kazancı)	1
T_d (akım kontrolü q eksen zaman sabiti)	0.01	T_Q (reaktif güç kontrolü zaman sabiti)	0.1

4.3.2.1.2 Şebeke Tarafı Kontrolü

Şekil 4.13’de verilen şebeke tarafı kontrolü, AA geriliminin d - q referans bileşenlerini kontrol eder. Dönüştürücünün aktif ve reaktif güç bileşenleri hızlı bir iç döngü ile düzenlenir. Akımın q eksen bileşenini belirleyen daha yavaş bir dış döngü, DA bara gerilimini düzenler. Ayrıca akımın d eksen bileşeni, reaktif gücü en uygun değerde tutar.



Şekil 4.13 Şebeke tarafı kontrolü

Çizelge 4.11 Evirici değerleri

Nominal AA Gerilimi	690 V
Nominal DA Gerilimi	1150 V
Nominal Gücü	3,4 MW
DA Gerilimi Kontrol Değeri	1.15 pu

Çizelge 4.11’de şebeke tarafı dönüştürücüsü (evirici) ile ilgili nominal değerler verilmiştir.

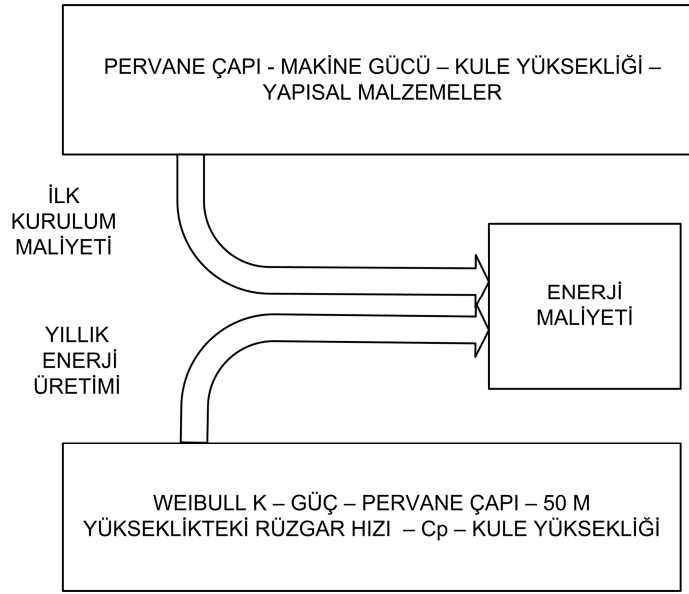
Çizelge 4.12’de evirici kontrol entegresinin değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.12 Evirici kontrol entegresi değerleri

K_d (akım kontrolü d eksenli oran kazancı)	1
T_d (akım kontrolü d eksenli zaman sabiti)	0.015
K_q (akım kontrolü q eksenli oran kazancı)	3
T_q (akım kontrolü q eksenli zaman sabiti)	0.015
K_v (D.A gerilim kontrolü oran kazancı)	1
T_v (D.A gerilim kontrolü zaman sabiti)	0.1

5. VERİM VE MALİYET ANALİZİ

Maliyet hesaplamaları yapılırken, Amerikan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nda geliştirilen rüzgar türbin dizayn maliyeti ve ölçekleme modeli kullanılmıştır (Fingersh vd., 2006). Maliyet hesaplamaları türbin gücü, pervane çapı, kule yüksekliği ve diğer ana parçaların bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Santrallerin yıllık enerji üretimleri 50 metredeki yıllık ortalama rüzgar hızı, Rayleigh olasılığı (Weibull K parametresi 2 alınmıştır), türbin kule yüksekliği ve türbinin rüzgar hızlarına göre üreteceği güçler ile belirlenmiştir. Modellemelerde bahsi geçen ölçeklemede bulunan WindPact temel dizayn modeli seçilmiştir. Şekil 5.1'de ölçeklemenin giriş ve çıkış parametreleri gösterilmektedir.



Şekil 5.1 Dizayn maliyeti ve ölçekleme modeli

5.1 Maliyet Modeli

5.1.1 Enerji Maliyeti

Ölçekleme modeli, türbin bileşenlerinin ve alt sistem merkezlerinin maliyetini basit ölçekleme yaparak hesaplamaya yarayan bir modelledir. Bu ölçeklemeler değişken hızlı, kanat kontrollü, üç kanatlı türbin sistemleri için yapılmıştır.

Modeldeki formüller gayet basitleştirilmiştir. Çoğu örnekte, maliyet ve kütle modelleri, rotor ölçüleri, makine gücü, kule yüksekliği gibi değerlerin direk fonksiyonu yada bunların kombinasyonu şeklindedir.

Bir RES'in enerji maliyetini (EM) hesaplariken, sabit maliyet oranı (SMO), kurulum maliyeti (KM), yıllık net enerji üretimi (YNEÜ) ve yıllık faaliyet giderinin (YFG) hesaplanması veya bilinmesi gerekmektedir. Aşağıdaki eşitlikte EM'nin hesaplanması gösterilmektedir.

$$EM = \frac{(SMO \times KM)}{YNEÜ} + YFG \text{ [$/kWh]} \quad (5.1)$$

5.1.2 Sabit Maliyet Oranı (SMO)

SMO, sermaye, vergi ve diğer sabit giderleri karşılayan ilk yatırım parasının dolar bazında yıllık oranıdır. Bu önceden düzenlenen bir nakit akış modelinde hipotez olarak belirlenmiştir. Bu temel model için SMO, yapım finansmanının, ücret finansmanını, vergi ve harçları, paranın yeniden değerlendirme oranını, gelir vergisi ve emlak vergisini ve sigortayı içermekte olup, senelik 0,1158 olarak kabul edilmiştir (Fingersh vd., 2006).

5.1.3 Kurulum Maliyeti (KM)

KM, türbin sisteminin tümünü ve diğer alt merkezlerin elemanlarının maliyetini kapsayan toplam tutardır. Yapım finansmanını ve finansman giderlerini içermemektedir. Ayrıca yedek sermayeyi de içermemektedir. EK-1'de kurulum maliyetinin hesaplama formülleri gösterilmiştir. Modeldeki ana elemanlar şunlardır;

- Pervane
 1. Kanat
 2. Ana göbek (hub)
 3. Fren ve açma mekanizması
 4. Mil ve burun konisi
- Sürücü mekanizması ve gövde (Drive train & nacelle)
 1. Yavaş hız şaftı
 2. Frenleme
 3. Dişli kutusu
 4. Mekanik fren ve hızlı bağlantı ve bileşen elemanları
 5. Generatör
 6. Değişken hız elektroniği elemanları
 7. Rota ve fren mekanizması
 8. Ana gövde
 9. Elektrik bağlantısı

10. Hidrolik ve soğutma sistemi

11. Gövde kaplaması

- Kontrol, koruma sistemi ve durum izleme
- Kule
- Merkez giderleri
 1. Temel masrafları
 2. Nakliye
 3. Yollar ve sivil işçilik
 4. Montaj ve kurulum
 5. Elektrik bağlantısı ve kurulum
 6. Mühendislik ruhsatları ve projeleri

Kıyı türbinleri (Off-shore) göze alınırsa ek olarak şunlarda maliyete dahil edilmelidir.

- Marina düzenlemesi
- Liman ve konaklama
- Personel ulaşımı
- Aşınmadan koruma
- Komisyon karşılaması için senet tazminatı
- Kıyı garanti primi

5.1.4 Yıllık Faaliyet Gideri [YFG]

YFG'nin hesaplanması için arsa kira bedeli (AKB), işletme gideri (İG), bakım maliyeti (BM) ve YNEÜ bilinmelidir. Eşitlik 5.2'de YFG'nin hesaplanması gösterilmektedir.

$$YFG = AKB + \frac{(İG + BM)}{YNEÜ} \text{ [$/kWh]} \quad (5.2)$$

İG içerisinde işçilik, rutin ve rutin olmayan parça değişikliği maliyetleri, rutin ve rutin olmayan bakım maliyetleri ve yönetim kadrosu giderleri vardır. BM ise genel bakım ve parça giderlerini içerir.

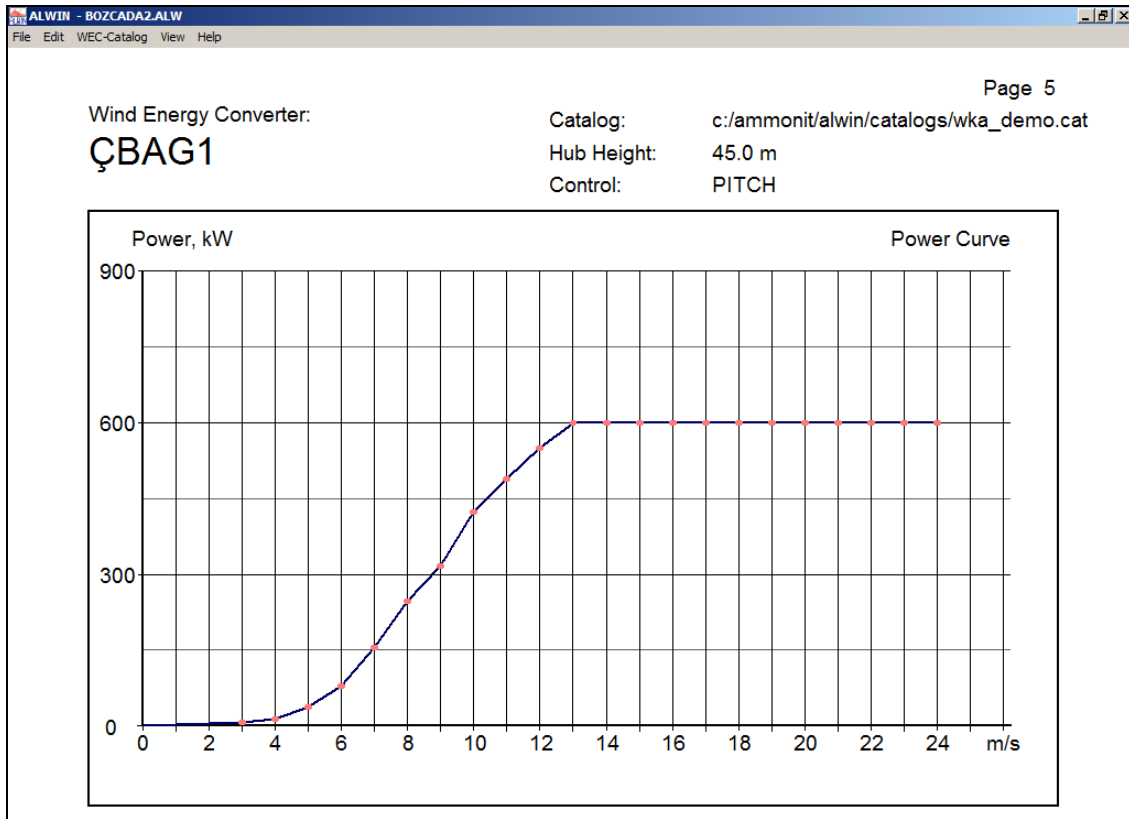
5.1.5 Yıllık Net Enerji Üretimi (YNEÜ)

Yıllık net enerji üretimi, bir yılda türbinin ortalama rüzgar hızında üreteceği toplam enerjidir. Pervane güç katsayısı, mekanik ve elektrik dönüşüm kayıpları, kir kayıpları, yerleşim planı kayıpları ve makine çalışma sürelerine göre değişir. Bir türbinin yıllık enerji üretimi bulunurken ALWIN[®] programından faydalanılmıştır. Bozcaada'nın 50 metredeki ortalama

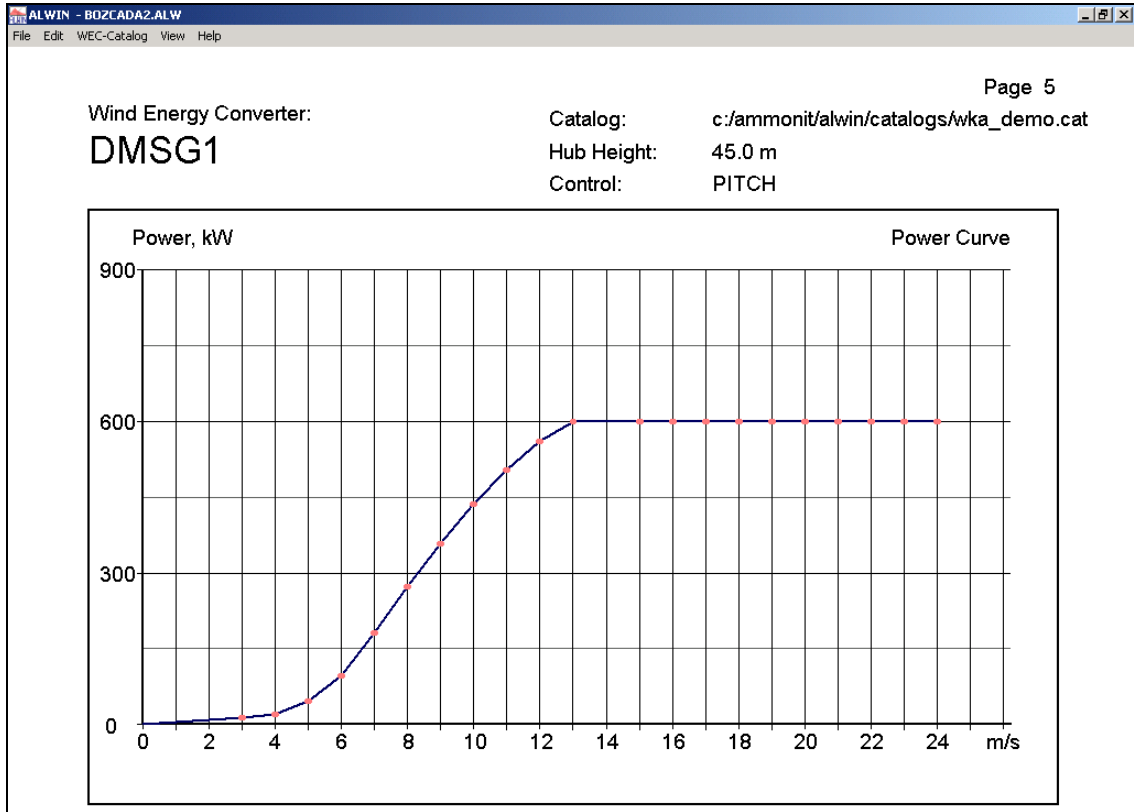
rüzgar hızı EİE rüzgar enerji atlasına göre 8,00 m/s'dir. Türbinlerin kule göbek yükseklikleri 45 m'dir. Havanın yoğunluğu $1,225 \text{ kg/m}^3$, hava sıcaklığı 15°C ve rüzgar hızının üssel artışı $1/7$ olarak kabul edilmiştir.

Türbinlerin rüzgar hızına göre ürettiği güçler Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de gösterilmektedir. DMSG'li türbinin kapasite faktörü 43,20 ve ÇBAG'li türbinin kapasite faktörü 40,80'dir. DMSG'li türbinin, ÇBAG'e göre kapasite faktörü %2,4 daha fazladır.

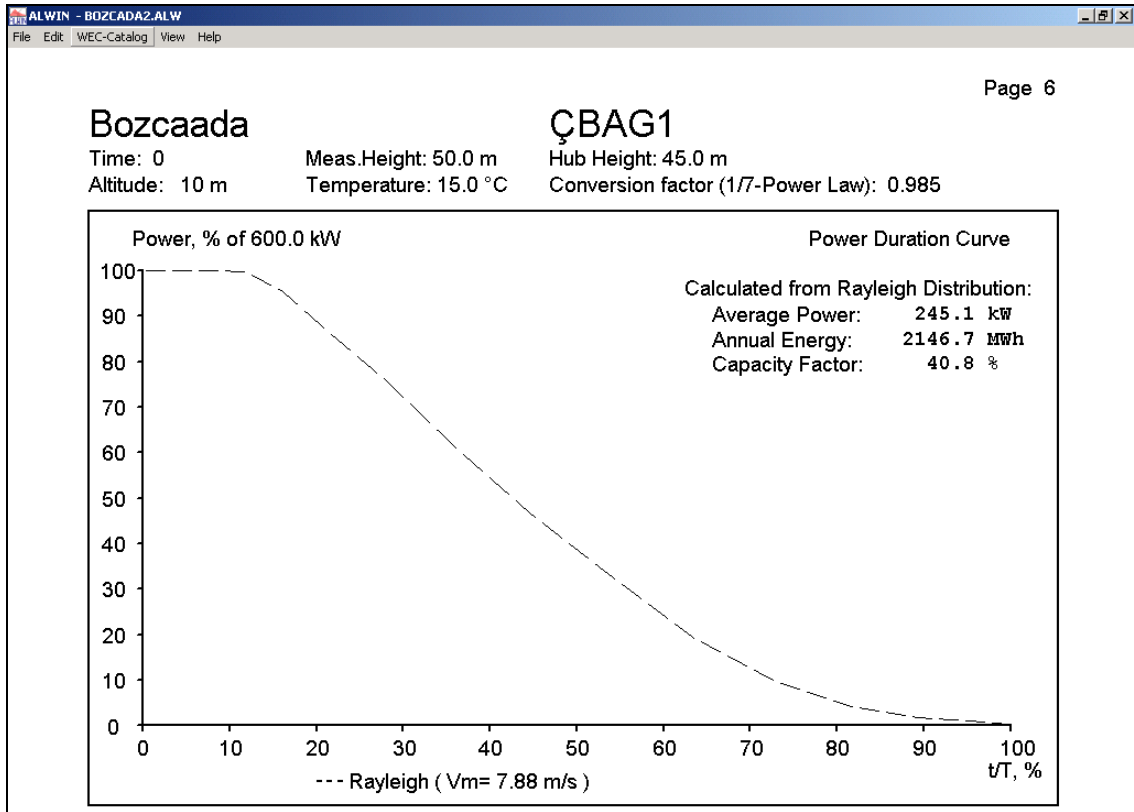
Şekil 5.4'te ve Şekil 5.5'te sırası ile ÇBAG'li ve DMSG'li türbinlerin her birinin yıllık tahmini enerji üretimi gösterilmektedir. DMSG'li santralin yıllık enerji üretimi $2.272,30 \text{ MWh/yıl} \times 17 = 38.629,10 \text{ MWh/yıl}$ olarak tahmin edilirken, ÇBAG'li santralin yıllık enerji üretimi $2.146,70 \text{ MWh/yıl} \times 17 = 36.493,90 \text{ MWh/yıl}$ olarak tahmin edilmektedir. EK-2'de santrallerin toplam kurulum maliyetleri gösterilmektedir. İlk kurulum maliyetleri açısından karşılaştıracak olursak DMSG'li santralinin maliyeti 13.285.103 \$ olarak tahmin edilirken, ÇBAG'li santralin maliyeti 445.123 \$ daha düşük olmak üzere, 12.839.980 \$ olarak tahmin edilmektedir. Türbin maliyetlerinin ölçekleme modeline göre ana farklılıkları Şekil 5.6'te gösterilmektedir.



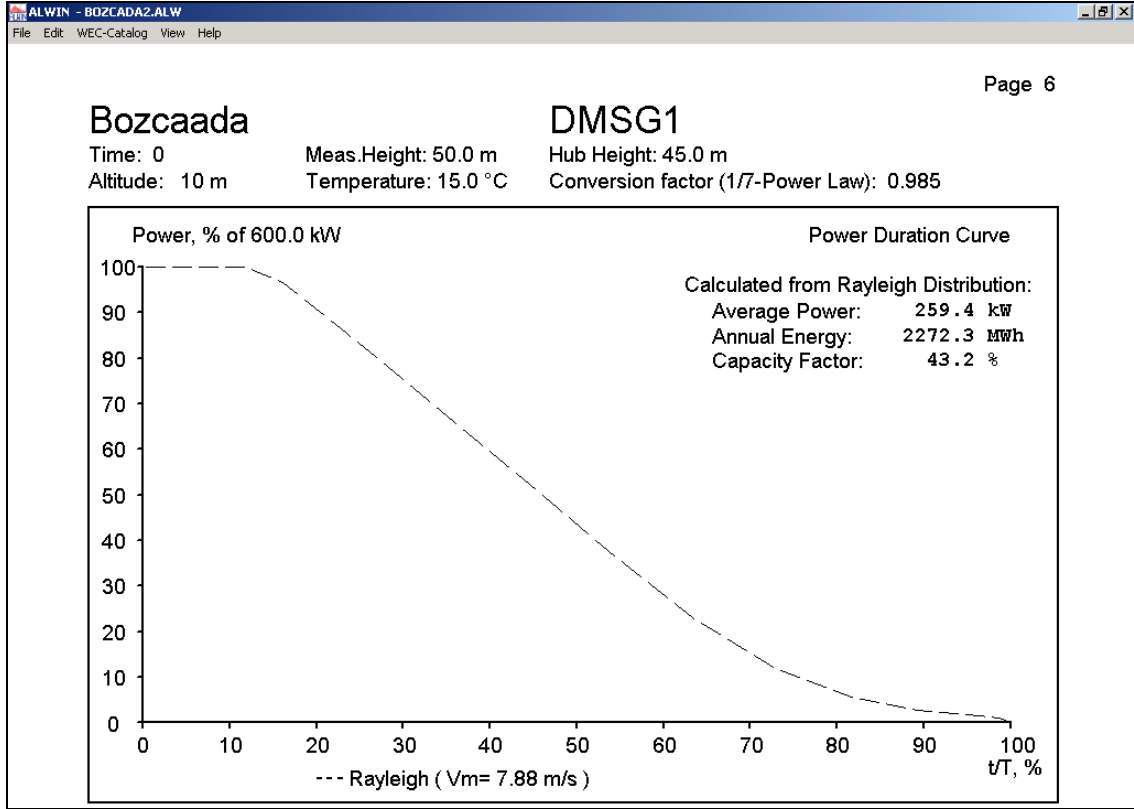
Şekil 5.2 ÇBAG'nin rüzgar hızlarına göre türbin çıkış güçleri



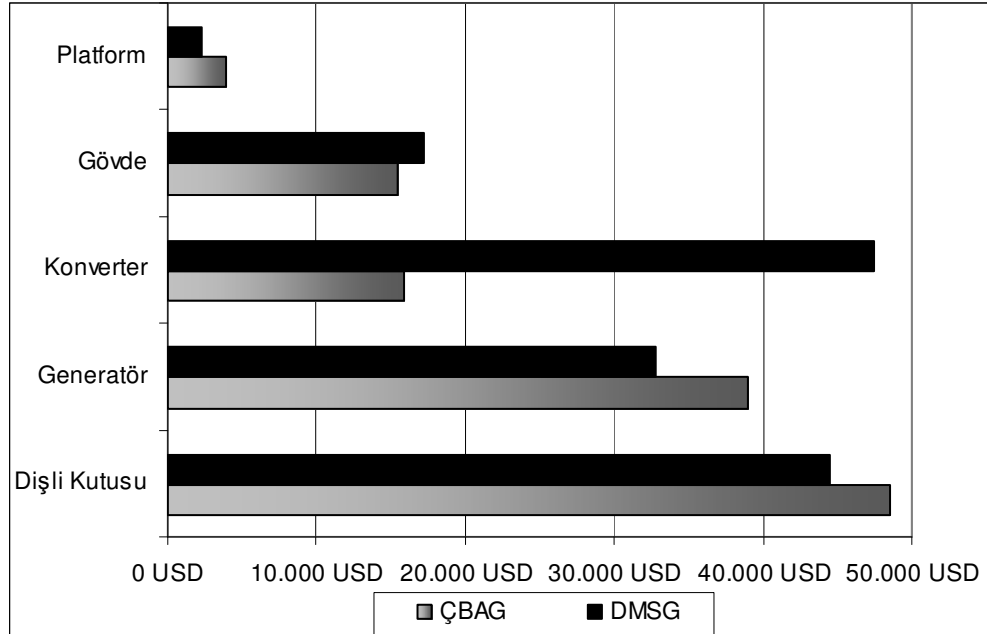
Şekil 5.3 DMSG'nin rüzgar hızlarına göre türbin çıkış güçleri



Şekil 5.4 ÇBAG'nin türbin başına tahmini yıllık enerji üretimi



Şekil 5.5 DMSG'nin türbin başına tahmini yıllık enerji üretimi



Şekil 5.6 Türbin başına maliyetlerdeki farklılıkları

Çizelge 5.1’de santral karşılaştırmaları ve DMSG’nin ÇBAG’ye göre yüzdesel farkları gösterilmektedir. DMSG’li türbinin ilk kurulum maliyeti daha yüksek olmasına karşın yıllık enerji üretimi daha yüksek olduğu için enerji maliyeti %1,78 daha düşüktür.

Çizelge 5.1 Santral karşılaştırmaları

	DMSG	ÇBAG	%'sel farklar
Türbin Maliyeti	781.476,68 \$	755.234,14 \$	3,51%
Santral Maliyeti	13.285.103,70 \$	12.838.980,40 \$	3,51%
Türbin Kapasite Faktörü	43,20%	40,80%	2,40%
Türbin Ortalama Gücü	259,40 kW	245,10 kW	5,83%
Türbin Yıllık Enerji Üretimi	2.272,30 MWh	2.146,70 MWh	5,85%
Santral Yıllık Enerji Üretimi	38.629,10 MWh	36.493,90 MWh	5,85%
Enerji Maliyeti	0,050525 \$/kWh	0,051443 \$/kWh	-1,78%

6. SİMÜLASYONLAR VE SONUÇLARI

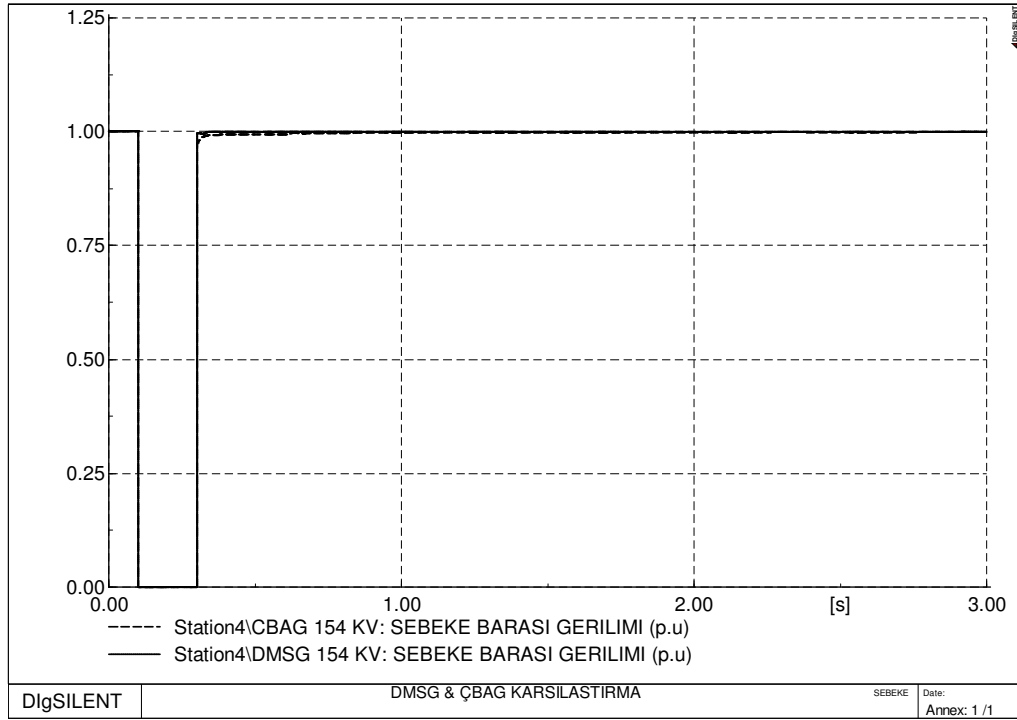
Rüzgar santrallerinin dinamik davranışlarının ve kararlılıklarının analizini yapabilmek için bazı simülasyonların yapılması gerekmektedir (Poller, 2003; Michalke vd., 2007). Her iki modellemenin de dinamik performanslarını incelemek amacı ile üç adet ani değişim (geçici hal) olayı gerçekleştirilmiştir. Türbinler üzerinde şebeke hatasından dolayı oluşacak davranışları incelemek amacı ile Poller (2003) ve Michalke vd. (2007) makaleleri örnek alınarak, yüksek seviyeli gerilim düşümü (%100'lük) oluşturacak arıza durumu ve düşük seviyeli gerilim düşümü (%45'lik) oluşturacak arıza durumu simülasyonları uygulanmıştır. Bunun yanı sıra türbinlerin rüzgar değişimi ile vereceği tepkileri incelemek amacı ile rüzgar hızı değişikliği simülasyonu uygulanmıştır.

6.1 Yüksek Seviyeli Gerilim Düşümü (%100'lük) Simülasyonu

Enerji sisteminde gerilim kararlılığı büyük önem arz etmektedir. Gerilim kararlılığı, sistemde oluşan herhangi bir hataya veya bozulmaya karşı sistem baralarındaki gerilim değerlerinin sabit kalmasıdır. Kararsızlık durumunda ise baralarda gerilim dalgalanmaları oluşmaktadır. Gerilim kararsızlıklarını, yükteki değişimler yada güç sistemindeki akışı bozabilecek kısa devreler oluştururlar.

Yapılan her iki Bozcaada rüzgar santrali modellerinin kararlılık analizini yapmak için Çanakkale Transformatör Merkezinin enterkonnekte şebekeye bağlanan, 154 kV'lık yüksek gerilim barasında 200 ms boyunca 3 fazlı kısa devre meydana getirilmiştir. Bu 3 fazlı kısa devre barada, %100'lük bir gerilim düşümü oluşturmuştur (Şekil 6.1).

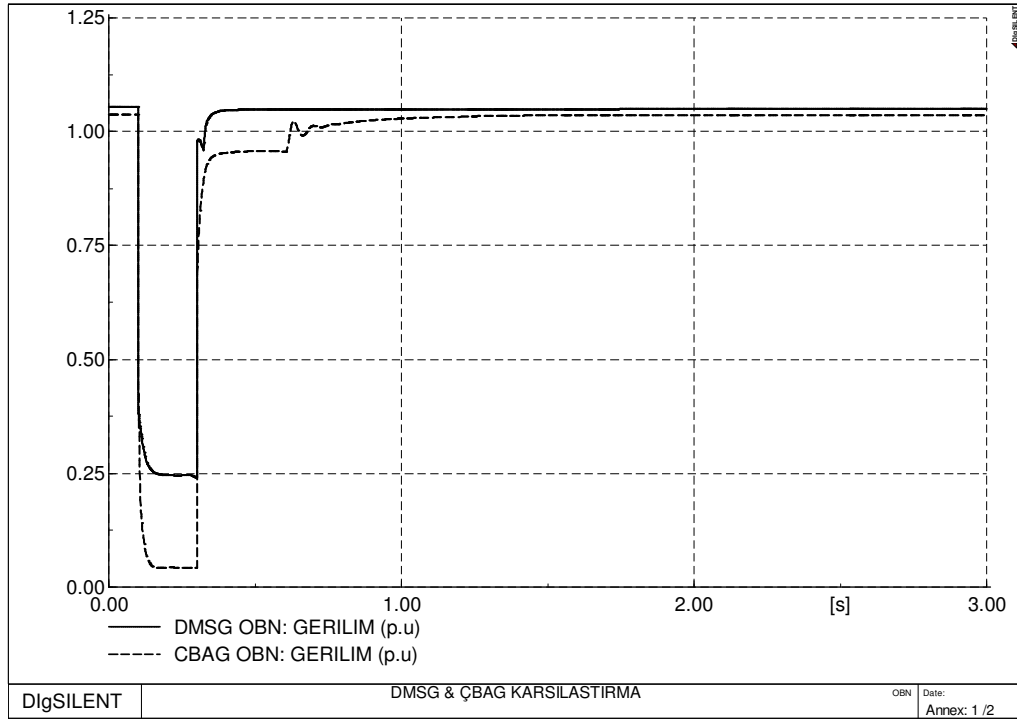
Şekil 6.2'de santral çıkış baralarındaki gerilim değişikliği gözlenmektedir. ÇBAG'den oluşan santralde gerilim düşümü, şebekedeki gerilim düşümü ile neredeyse aynıdır. DMSG'den oluşan santral da ise, santral gerilimi %25'e kadar destekleyebilmiş ve baradaki gerilim düşümü %75 kadar olmuştur. Bunun sebebi, DMSG'li modellemelerde güç akışı bütünüyle güç dönüştürücüleri üzerinden akmasıdır. ÇBAG'li modelleme de ise, rotora eklenen koruma sisteminden dolayı sınırsız koruma direnci (Crowbar) devreye girerek, generatörleri devreden çıkarmadan şebekeye enerji aktarımını engellemektedir.



Şekil 6.1 Arızada şebekede oluşan gerilim değişikliği (p.u.)

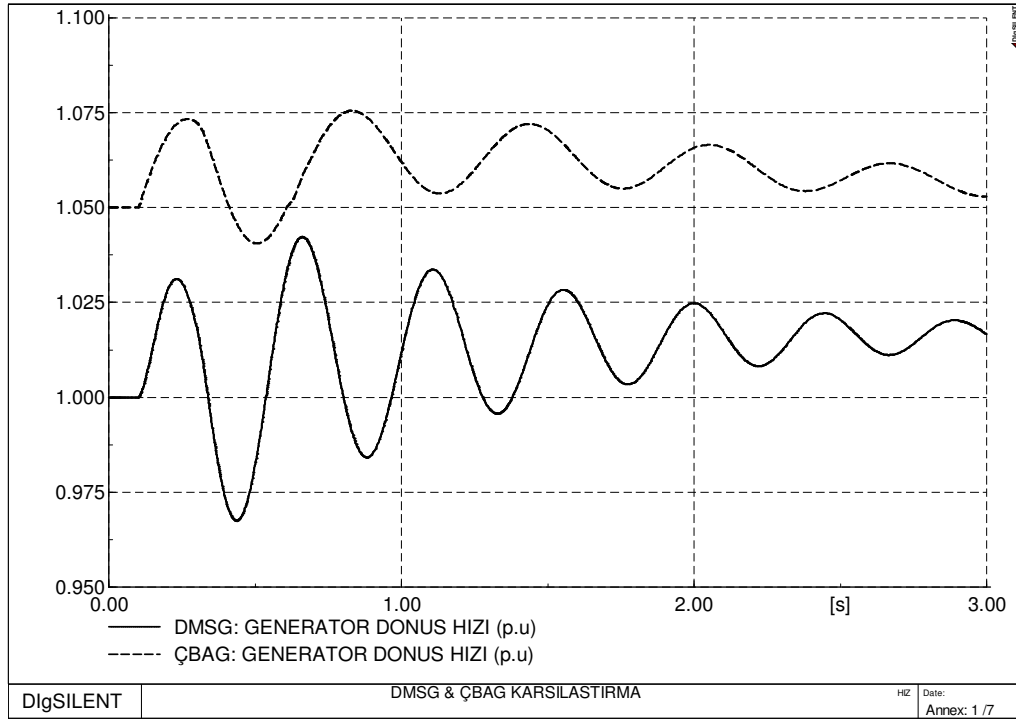
Aşırı gerilim düşmeleri generatörlerin adım dışına çıkmasına (out of step) sebep olabilmektedir. Örneğin, iki makine ya da makineler arası rotor açısı farkı 180 dereceyi geçerse bu durumla karşılaşılmaktadır. Rotor açısı kararlılığı, güç sisteminde oluşabilecek bozuklukların enterkonnekte sisteme bağlı olan genaratörün normal koşullarda çalışmakta olduğu senkron duruma dönebilme özelliğidir. Bu da senkron makinenin elektromanyetik ve elektromekanik eşitliklerinin dengede tutulmasıyla sağlanabilir. Sistemdeki generatörlerin açısal dalgalanmalarının fazlalaşarak diğer makinelerle oluşabilecek senkronizmayı kaybetmesi, sistemde kararsızlığa yol açabilmektedir (Kundur,1994).

Rotor açısı kararlılığı, sistemin genelinde zaten var olan elektromekanik dalgalanmalarla alakalıdır. Bunun temelinde ise, genaratör çıkış gücünün değişmesi ile rotor açısının değişmesi özelliği yatmaktadır.



Şekil 6.2 Arıza sırasında santral çıkışlarındaki ortak bağlantı noktası (OBN) gerilim değişiklikleri (p.u.)

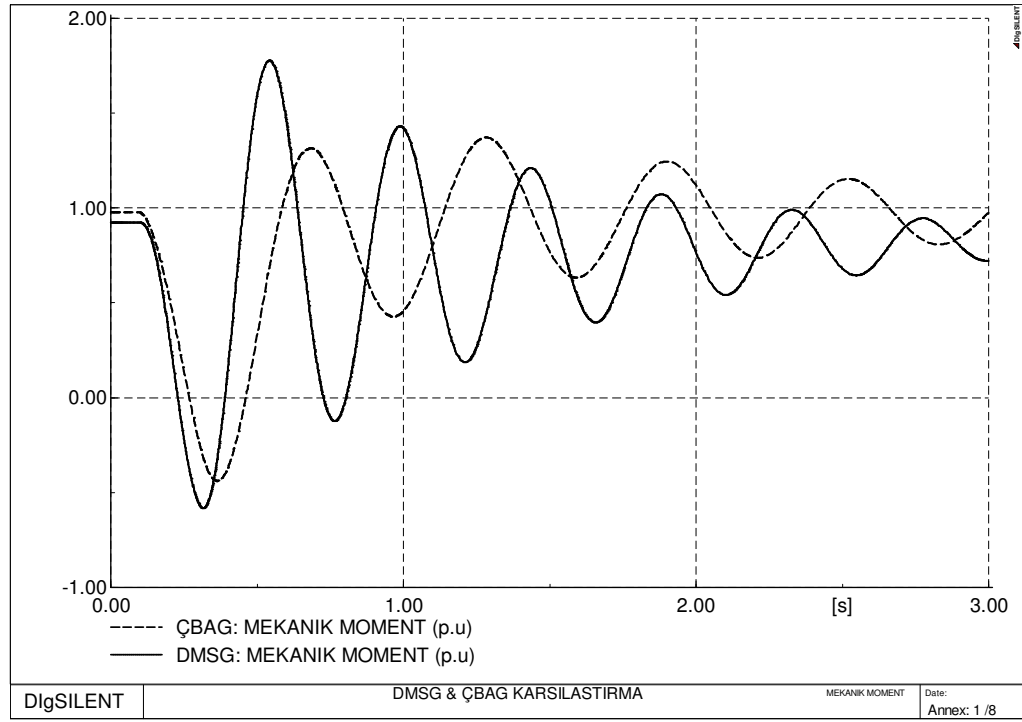
Kararlı halde makinelerin giriş mekanik momenti ve çıkış elektrik momenti eşitliği ve generatör hızı sabittir. Sistemde bir dengesizlik oluşması durumunda eşitlik bozularak, dönen kütlelerin hareket kurallarına göre rotor dönüşü hızlanmakta veya yavaşlamaktadır. Eğer bir generatör daha hızlı dönmeye başlarsa, hızlı dönenin rotor açısı yavaş döneninkinden önde olacaktır. Oluşan açısal fark yük yoğunluğunun yavaş makineden hızlı makineye doğru yoğunlaşmasını sağlayacaktır. Bu da güç açısından ve yük akışında büyük değişikliğe yol açarak sistemin aktif gücünü düşürecektir. Şekil 6.3'te generatörlerin arıza sırasındaki dönüş hızlarının değişimi gösterilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi DMSG'deki salınımlar ÇBAG'ye göre daha fazladır.



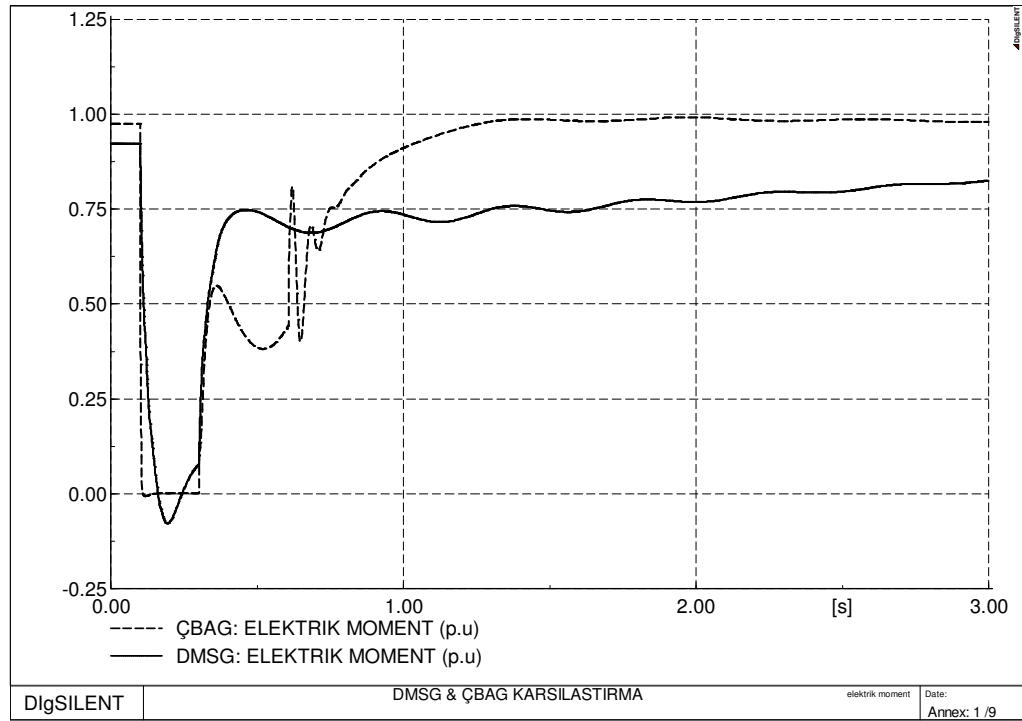
Şekil 6.3 Arıza sırasında generatör rotor hızlarının değişimi (p.u.)

Şekil 6.4'te ve Şekil 6.5'te sırasıyla türbinlerdeki mekanik ve elektrik moment değişiklikleri gösterilmektedir. Aynı yük akışı için 3 fazlı arızaya karşı oluşan gerilim düşümünde DMSG'nin elektrik momenti daha çok düşmektedir. Elektrik momentindeki ani düşüş sırasında, elektrik moment ve mekanik moment arasındaki dengesizliğin giderilmesi gerekir. Bu dengeleme sırasındaki DMSG'nin mekanik moment dalgalanması, ÇBAG'nin mekanik moment dalgalanmasından daha şiddetli ve daha uzun sürmektedir. Elektrik moment ile mekanik moment arasındaki eşitsizlik generatör hızını etkilemenin yanında, generatör mili ile dişli mili arasındaki mekanik baskıyı (stresi) da artırdığından istenmeyen bir durumdur. Bu durumda %100'lük gerilim düşümü DMSG'li türbinde daha fazla mekanik baskı yaratacaktır.

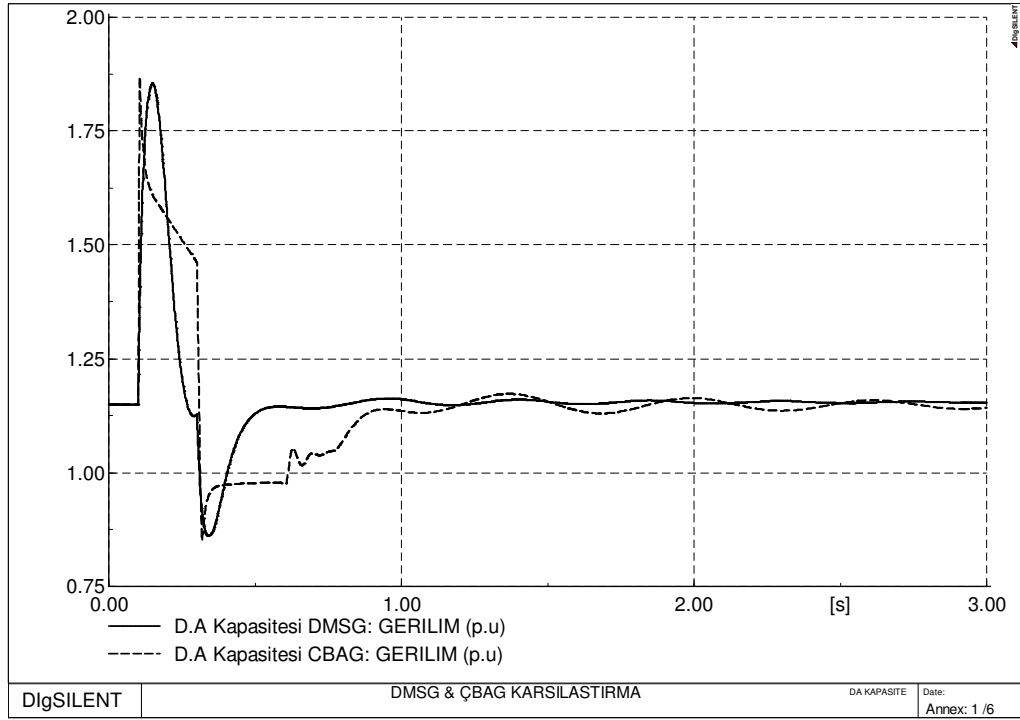
Arızanın oluşumundan itibaren, stator gerilimi düşünce, stator ve rotor sargılarında geçici hal akım yükselmeleri oluşur. Rotor tarafı dönüştürücüsü rotordaki akımın artışını dengelemek için rotor gerilimi referansını yükseltir, bu da rotor çıkışlarından dönüştürücü üzerine aşırı akım akmasına neden olur. Diğer bir yandan da şebeke tarafı dönüştürücüsü enerjiyi şebekeye aktaramadığı için DA barasında enerji birikmesi olur. Bu da DA geriliminde ani artışa sebep olur. Şekil 6.6'da türbinlerin DA kapasitesi üzerinde oluşan gerilim değişikliği gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da sırasıyla güç dönüştürücü üzerindeki frekans değişimi ve santral çıkışlarındaki güç dalgalanmaları gösterilmektedir.



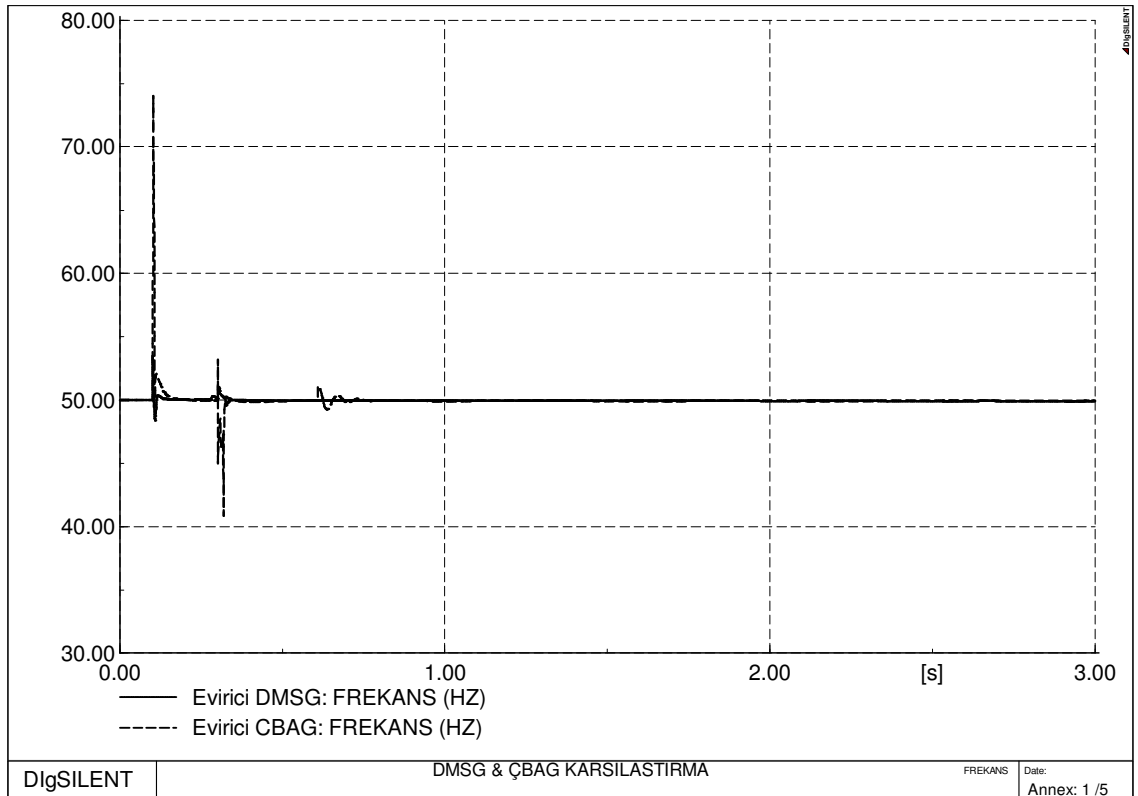
Şekil 6.4 Arıza sırasında türbin mekanik moment değişiklikleri (p.u.)



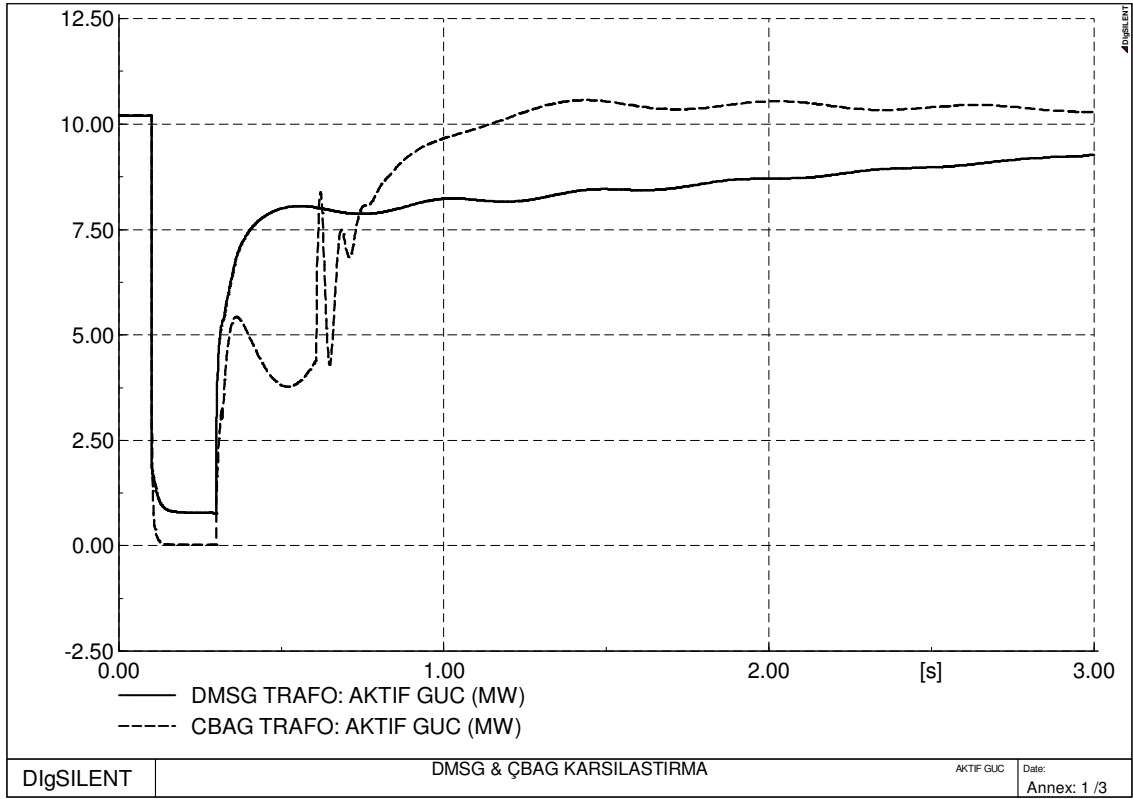
Şekil 6.5 Arıza sırasında türbin elektrik moment değişiklikleri (p.u.)



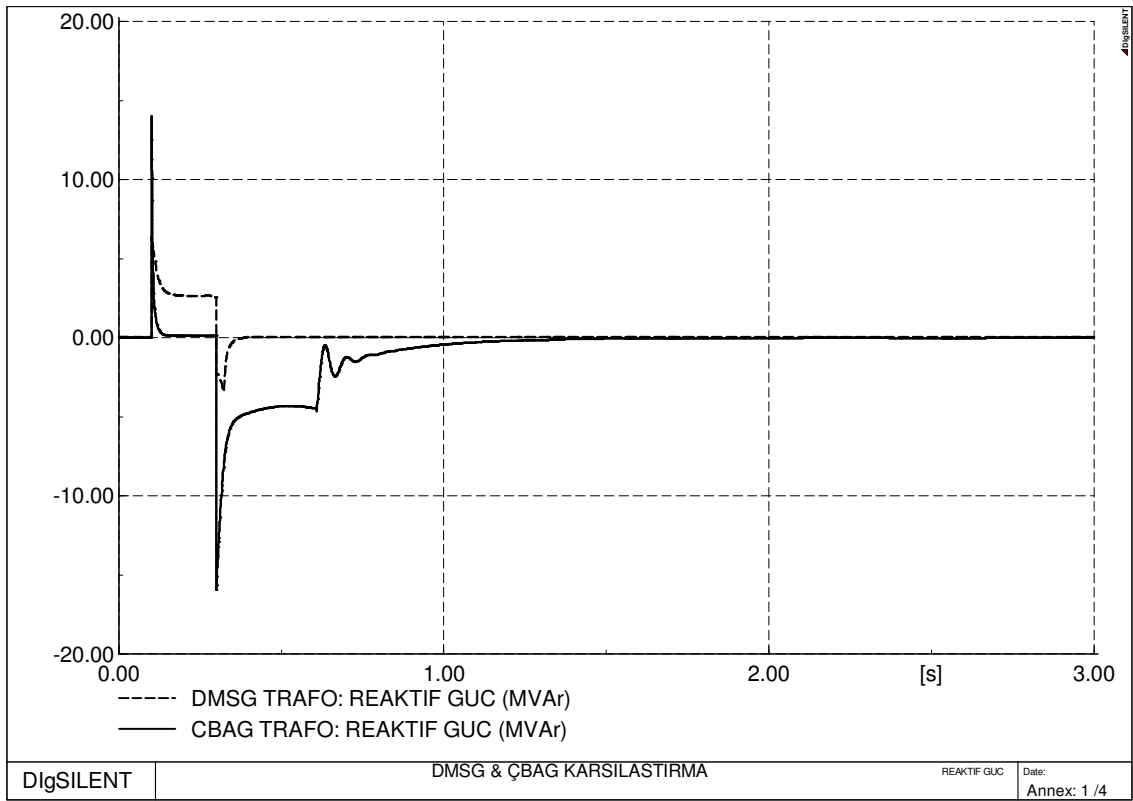
Şekil 6.6 Arıza sırasında DA kapasitesi üzerindeki gerilim değişiklikleri (p.u.)



Şekil 6.7 Arıza sırasında güç dönüştürücüsü çıkışındaki frekans değişiklikleri (Hz)



Şekil 6.8 Arıza sırasında santrallerin OBN'deki aktif güç değişiklikleri (MW)



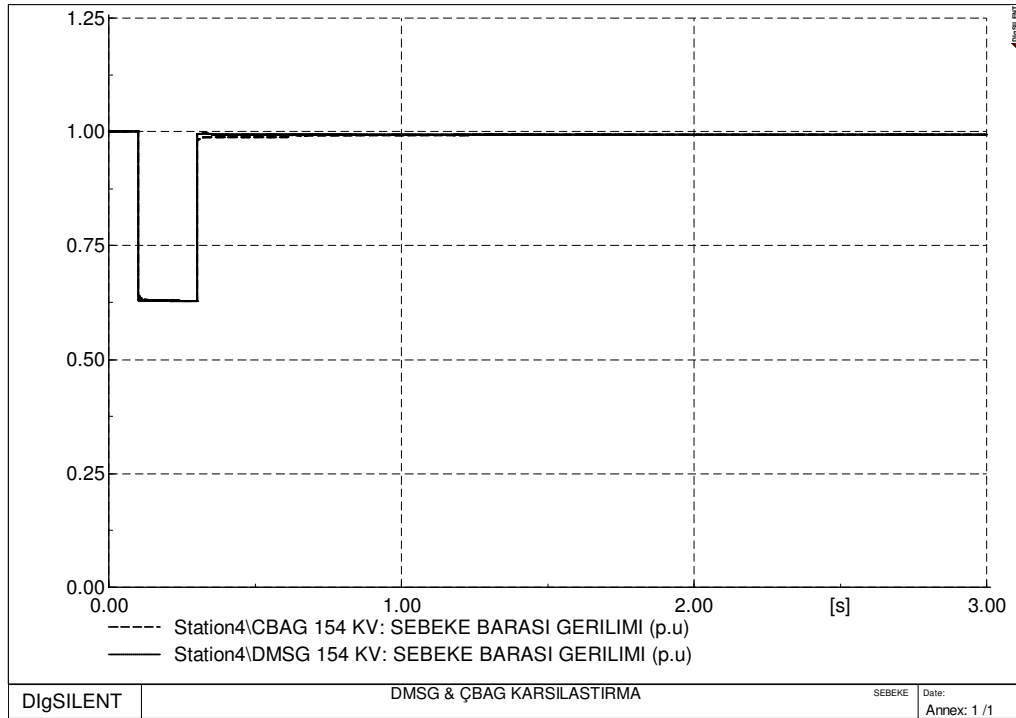
Şekil 6.9 Arıza sırasında santrallerin OBN'deki reaktif güç değişiklikleri (Mvar)

6.2 Düşük Seviyeli Gerilim Düşümü (%45'lik) Simülasyonu

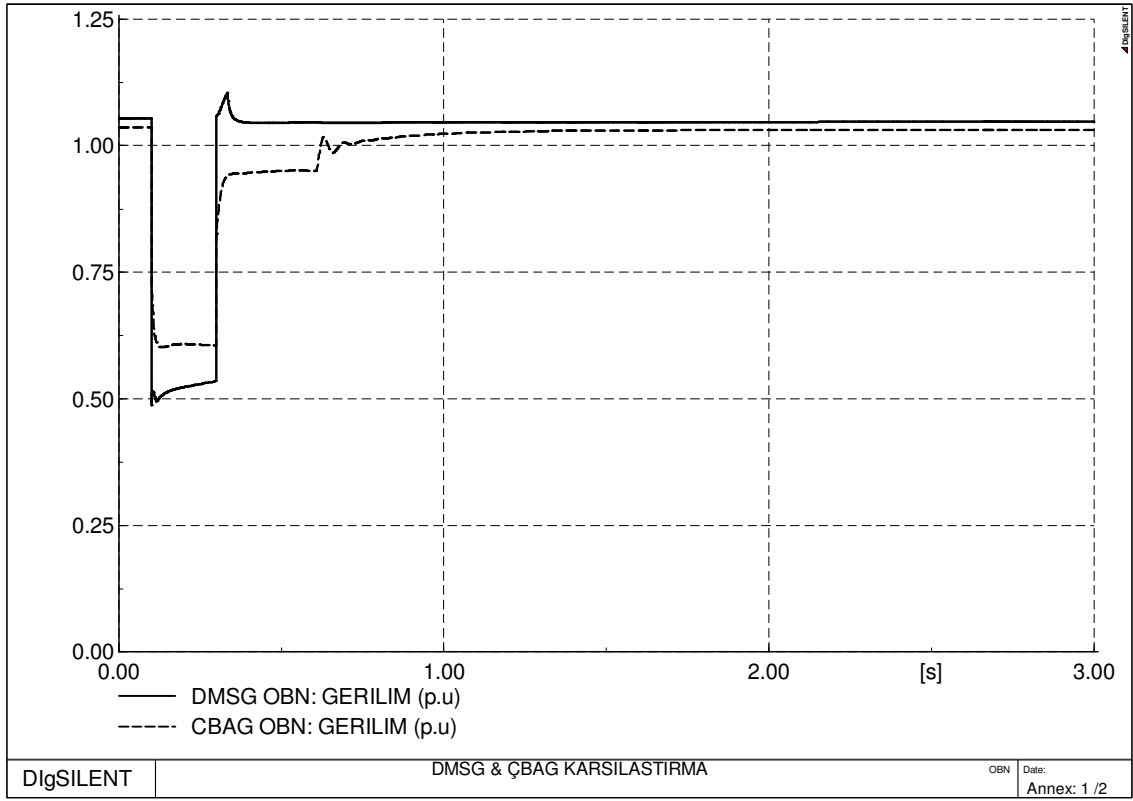
Aynı %100'lük gerilim düşümü simülasyonunda olduğu gibi Çanakkale Trafo Merkezinin 154 kV'lık yüksek gerilim barasında 200 ms'lik bir 3 faz kısa devre uygulanmıştır. Ancak gerilim düşüşünü zayıflatmak yani baradan uzak bir yerde arıza oluşumunu gerçekleştirmek amacı ile 23 Ω 'luk hata direnci eklenmiştir. Bu arıza yüksek gerilim barasında %45'lik bir gerilim düşümü oluşturmaktadır (Şekil 6.10).

Bu gerilim düşümü santral baralarında Şekil 6.11'de gösterilen düşümleri oluşturmaktadır. ÇBAG modellemesi şebekeyi %55'e kadar desteklerken, DMSG modeli ancak %50'ye kadar destekleyebilmektedir.

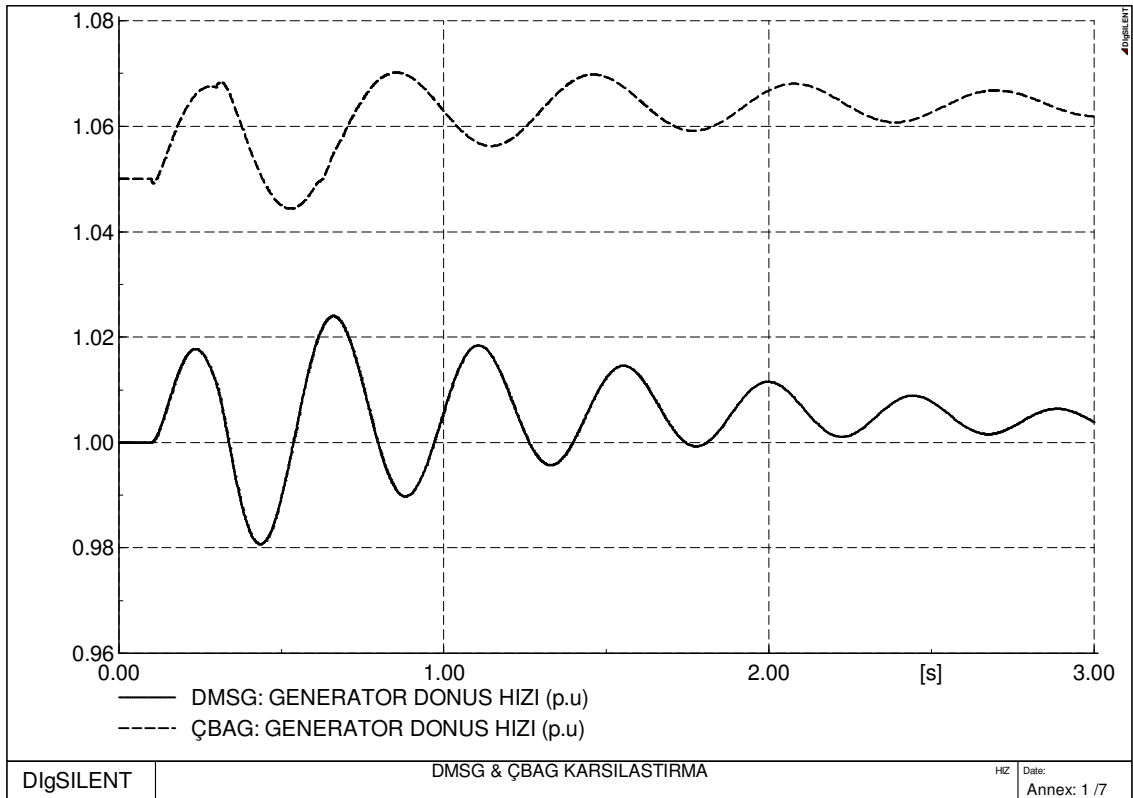
Şekil 6.12'de generatör hızlarının arıza sırasındaki hız değişimleri gösterilmektedir. Arızada hız salınımları, %100'lük gerilim düşümünde olduğu gibi DMSG'li türbinde daha fazla olmaktadır. Generatörlerin mekanik ve elektrik momentlerindeki değişiklikleri de sırasıyla Şekil 6.13 ve 6.14'te gösterilmektedir. DMSG'li modellemedeki mekanik moment değişikliği daha yüksek olmasına karşın ÇBAG'li modellemede elektrik momentte daha yüksek seviyede anlık değişim olmaktadır. Mevcut analizlere göre %45'lik gerilim düşümünde de DMSG'li türbin daha fazla mekanik baskıya maruz kalacaktır.



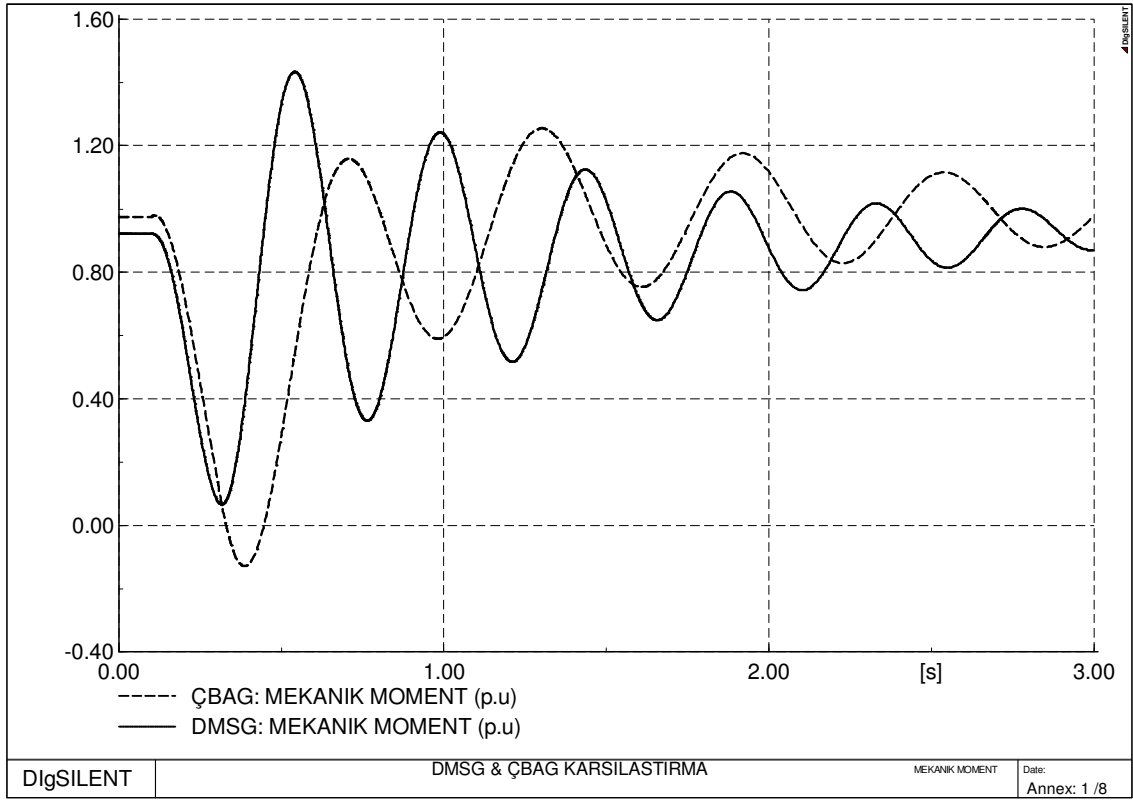
Şekil 6.10 Arızada şebekede oluşan gerilim değişikliği (p.u.)



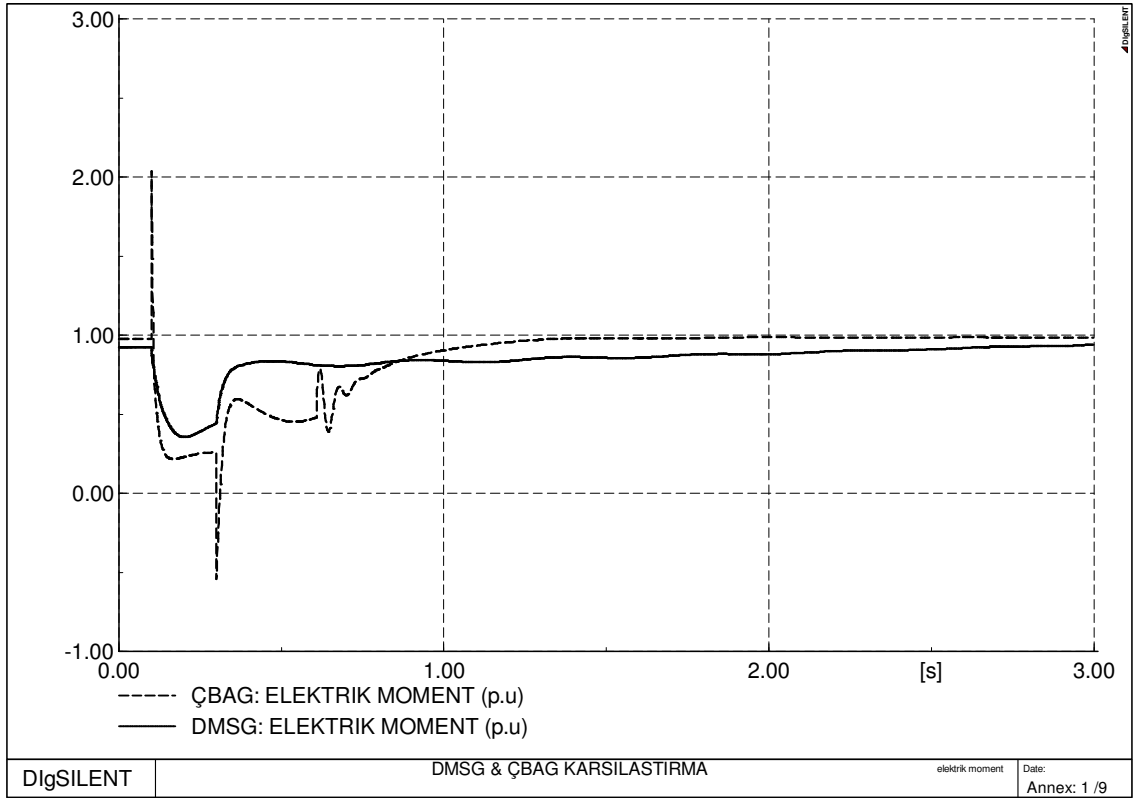
Şekil 6.11 Arıza sırasında santral çıkışlarındaki (OBN) gerilim değişikliği (p.u.)



Şekil 6.12 Arıza sırasında generatör hızlarındaki değişiklikler (p.u.)

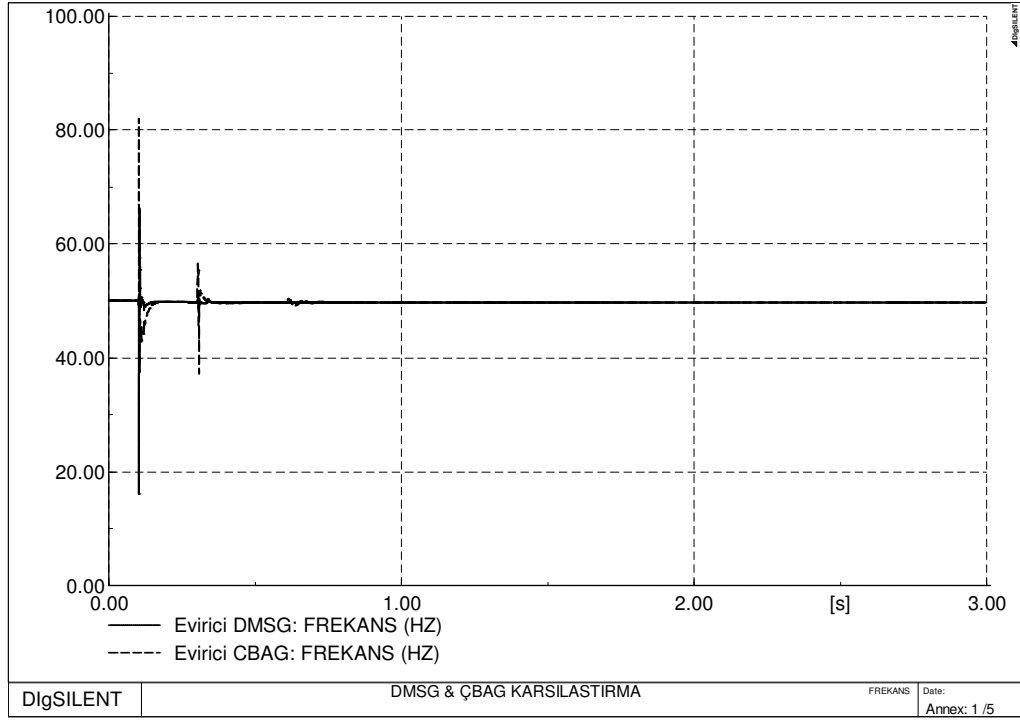


Şekil 6.13 Arıza sırasında türbin mekanik moment değişiklikleri (p.u.)

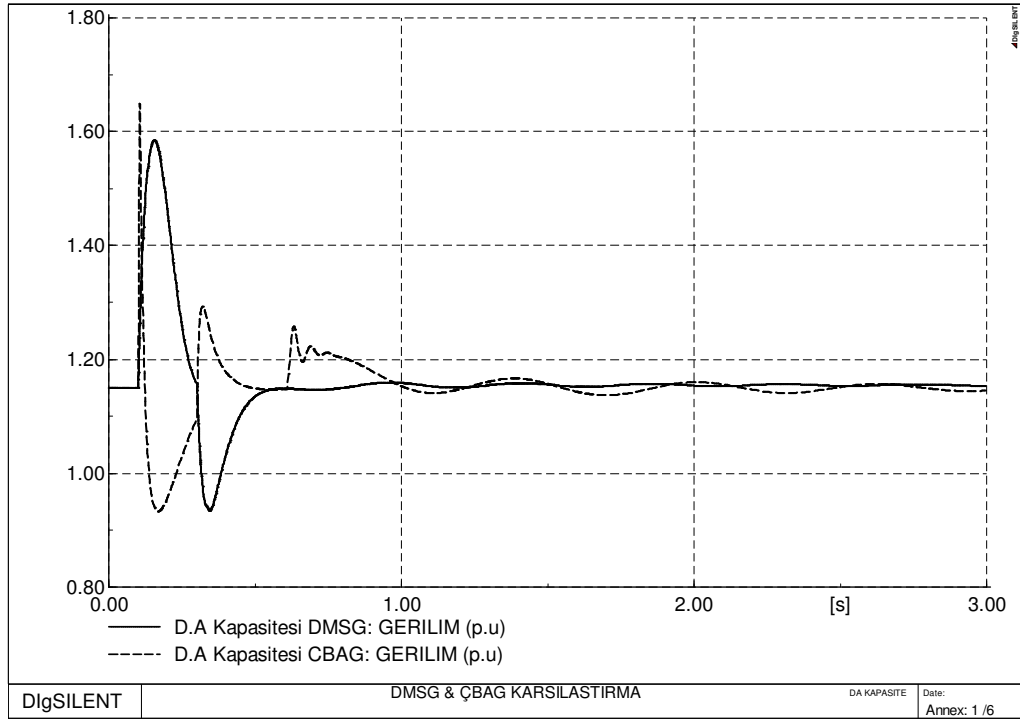


Şekil 6.14 Arıza sırasındaki türbin elektrik moment değişiklikleri (p.u.)

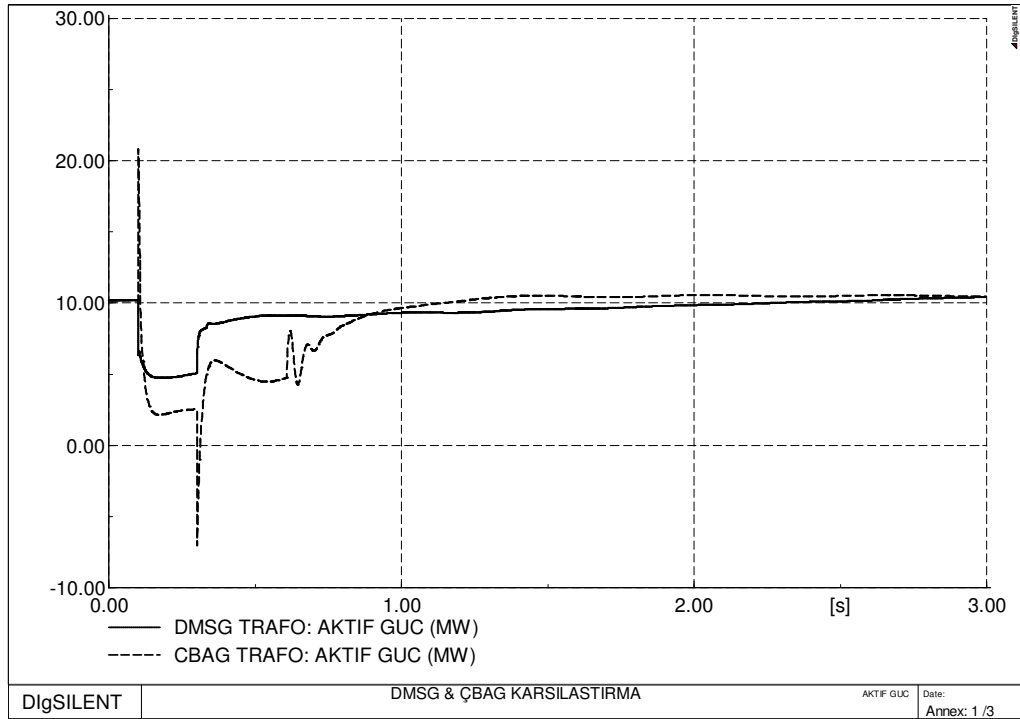
Şekil 6.15'te şebeke tarafı güç dönüştürücüsünde oluşan frekans değişikliği gösterilmektedir. ÇBAG'li türbinde daha fazla bir ani değişiklik gözlenmektedir. Şekil 6.16'da DA kapasitörleri üzerinde oluşan gerilim dalgalanmaları gösterilmektedir. Şekil 6.17 ve 6.18'de sırasıyla santral çıkışlarındaki aktif ve reaktif güç değişimleri gösterilmektedir. Burada da DMSG'li türbinin güç dönüştürücüleri yüksek değerlerde olduğu için daha az bir dalgalanma gözlenmektedir.



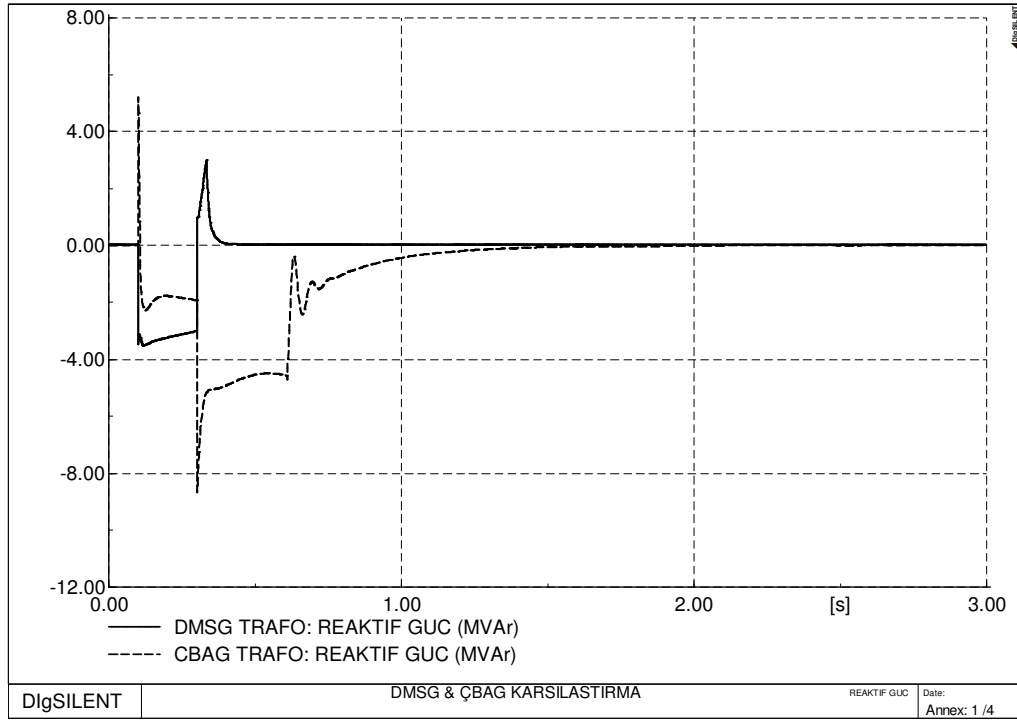
Şekil 6.15 Arıza sırasındaki güç dönüştürücüsündeki frekans değişiklikleri (Hz)



Şekil 6.16 Arıza sırasında DA kapasitesi üzerinde oluşan gerilim değişiklikleri (p.u)



Şekil 6.17 Arıza sırasında santrallerin OBN'deki aktif güç değişiklikleri (MW)



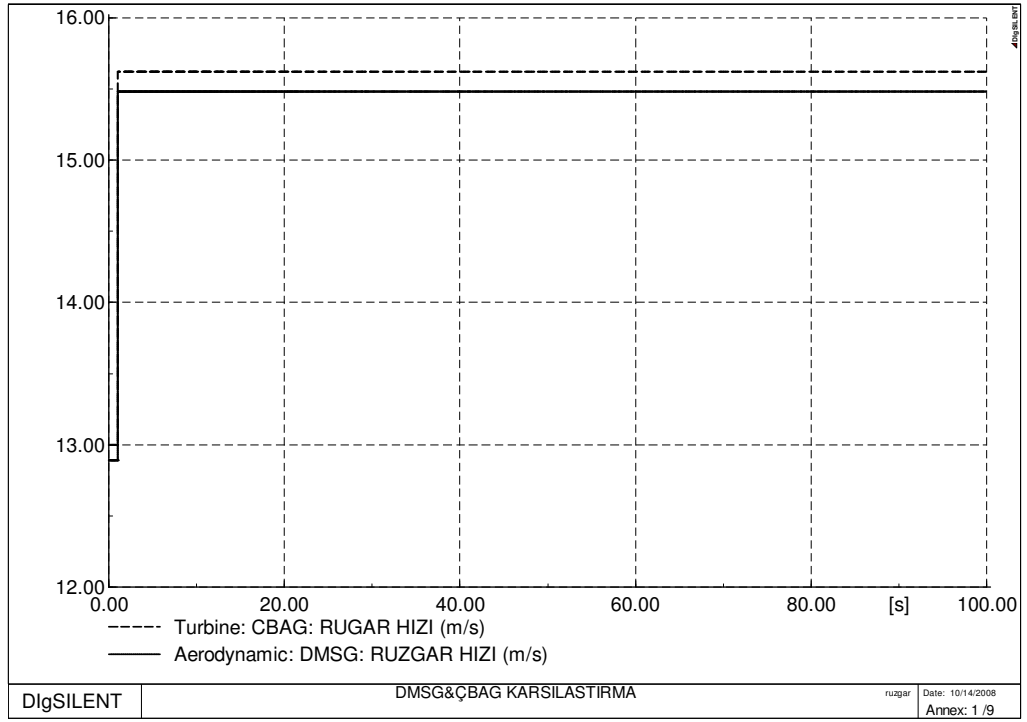
Şekil 6.18 Arıza sırasında santrallerin OBN'deki reaktif güç değişiklikleri (MVAr)

6.2.1 Rüzgar Hızı Değişikliği

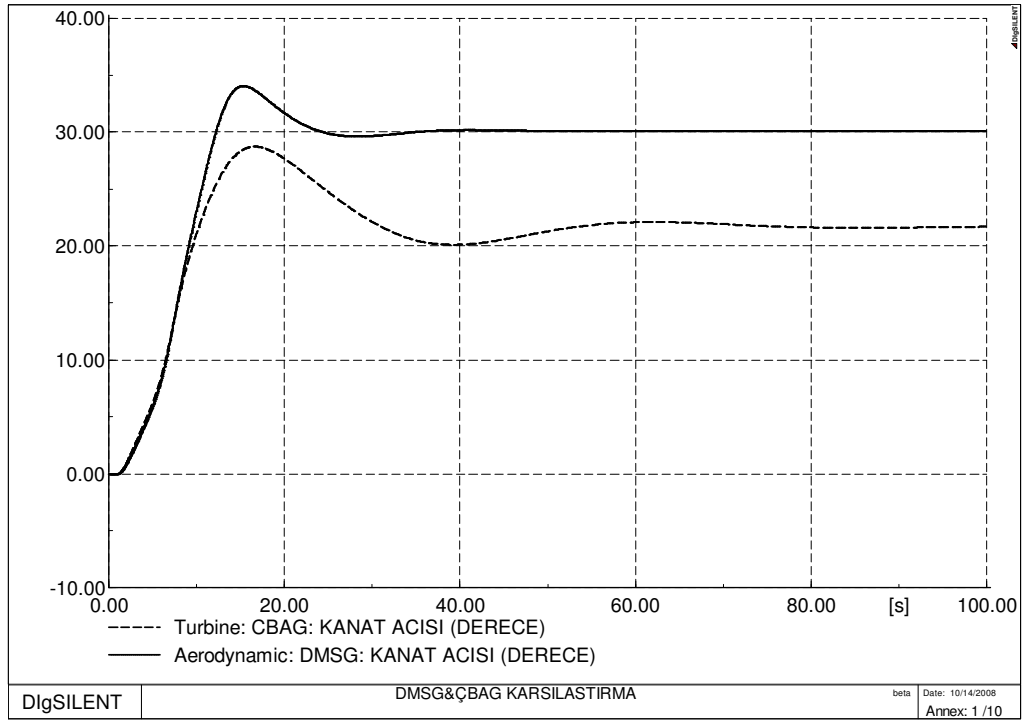
Rüzgar santrali modellerinin rüzgar hızı değişimi esnasındaki performanslarını incelemek amacı ile 1. saniyede bir rüzgar hızlarını anlık %20 artıracak şekilde 100 saniye boyunca rüzgar hızı değişikliği simülasyonu uygulanmıştır (Şekil 6.19).

Nominal çalışma koşullarında türbinlerin güç akışları da 600 kW'tır. 600 kW'lık güç akışı için DMSG 12.89 m/s rüzgar hızına ihtiyaç duyarken, ÇBAG 13.04 m/s'de aynı güce ulaşmaktadır. Bundan dolayı rüzgar hız değişimleri Şekil 6.19'da görüleceği gibi farklı olmaktadır.

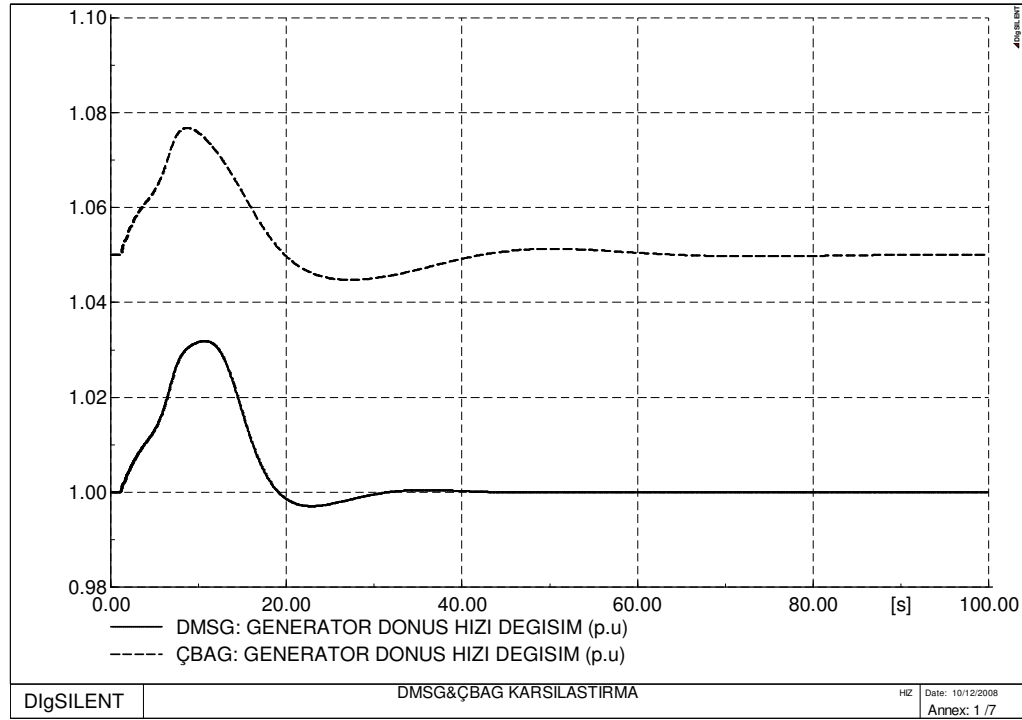
Şekil 6.20 ve 6.21'de sırasıyla rüzgar değişimlerinden dolayı oluşan kanat açısı değişimi ve generatör hız değişimleri gözlenmektedir. Rüzgar hızı arttıkça generatör hızı artmakta ve generatör hızını referans hıza düşürmek amacı ile kanat açısı değişmektedir. DMSG'li türbin aynı rüzgar hızı için ÇBAG'den daha fazla enerji üretmektedir yani daha verimlidir. Bu yüzden aynı orandaki anlık rüzgar değişimlerinden daha fazla etkilenmektedir ve kanat açısındaki değişiklik daha fazla olmaktadır. ÇBAG kanatları 22° değişirken, DMSG kanatları 30° değişmektedir.



Şekil 6.19 Uygulanan rüzgar hızı değişikliği (m/s)



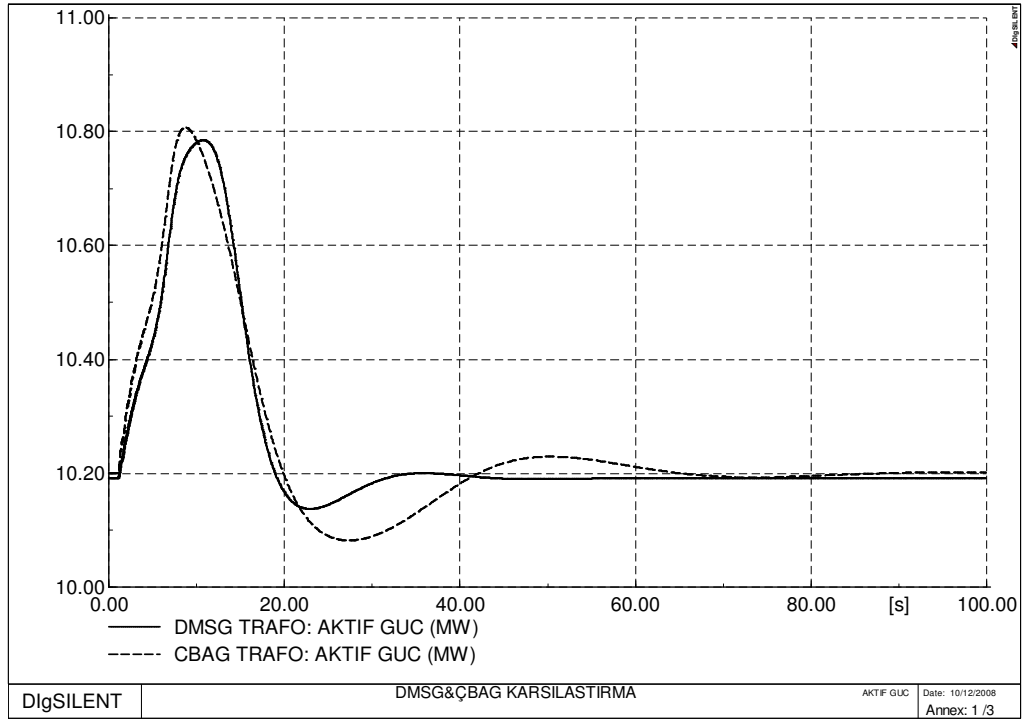
Şekil 6.20 Rüzgar hızı değişikliği sırasındaki kanat açısı (β) değişimi (derece, °)



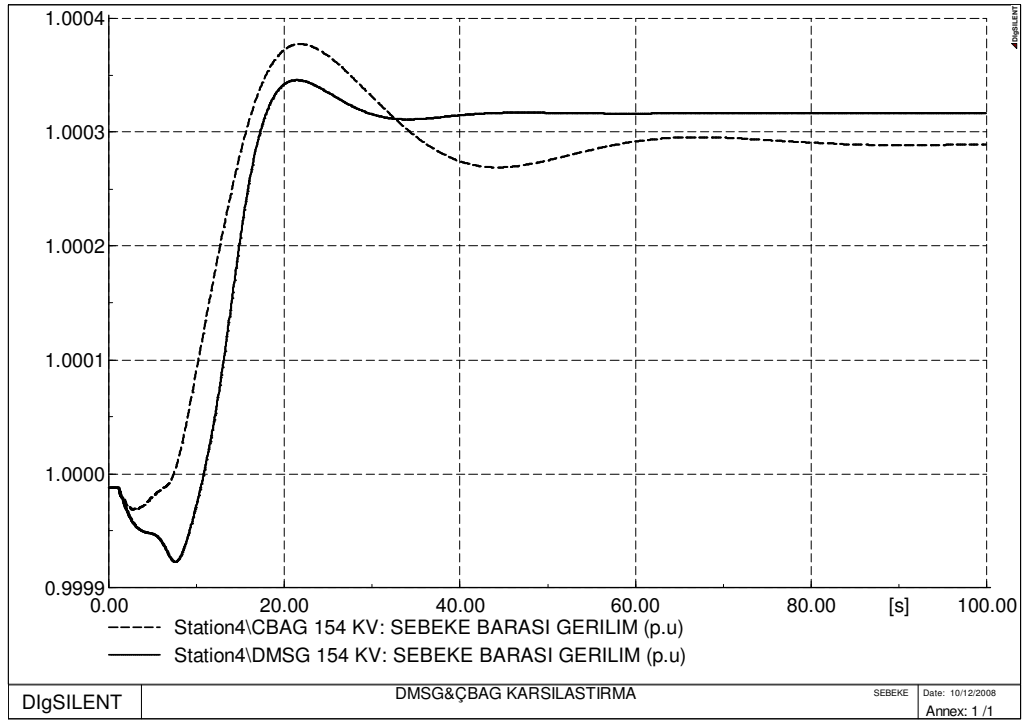
Şekil 6.21 Rüzgar hızı değişimi sırasındaki generatör hızı değişimi (p.u.)

Aktif güç ve santral çıkış gerilim değişimleri benzerlik göstermektedir ancak DMSG'li türbinde biraz daha fazla salınım oluşturmaktadır ve bu durumlar sırasıyla Şekil 6.22 ve 6.23'te gösterilmektedir. Şekil 6.24 ve Şekil 6.25'te sırasıyla türbinlerin mekanik ve elektrik moment değişiklikleri gösterilmektedir. Her iki türbinde de aynı oranda salınımlar olduğu gözlenmektedir ki, bu da her iki türbin içinde sürme mekanizmasında aynı oranda mekanik baskı olacağını göstermektedir.

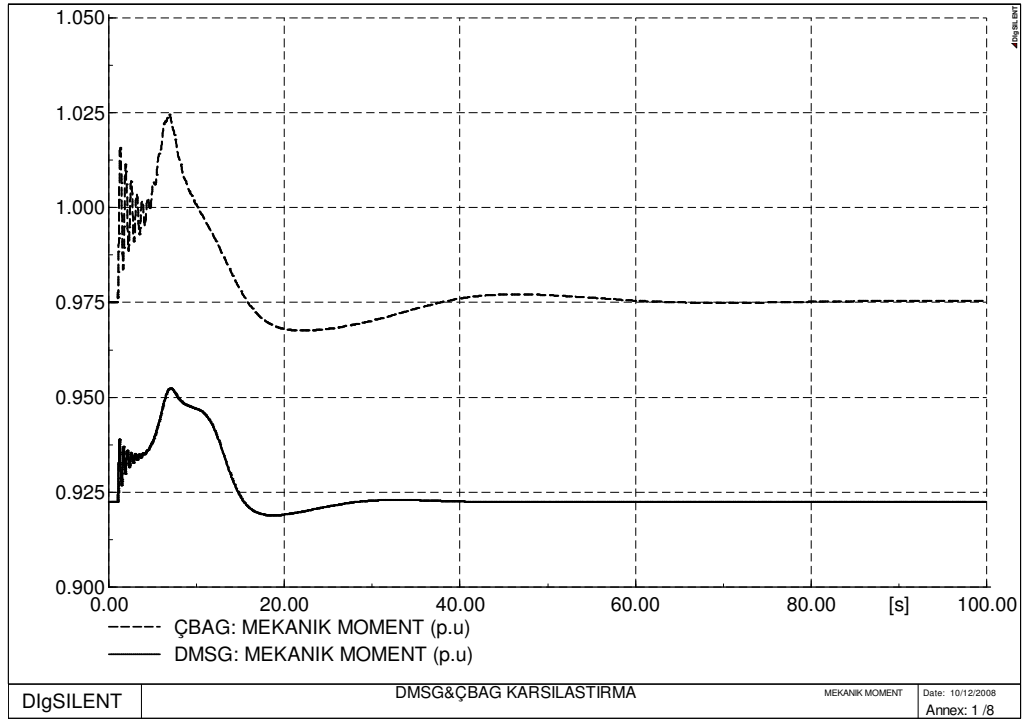
Santral çıkış frekanslarındaki salınımları inceleyecek olursak, DMSG'li türbinde daha fazla bir salınım olmaktadır (Şekil 6.26). Şekil 6.27'de ise türbinlerin rüzgar değişimi sırasında DA kapasitörleri üzerinde oluşan gerilim değişikliği gösterilmektedir ve ÇBAG'da daha fazla salınım olduğu gözlenmektedir.



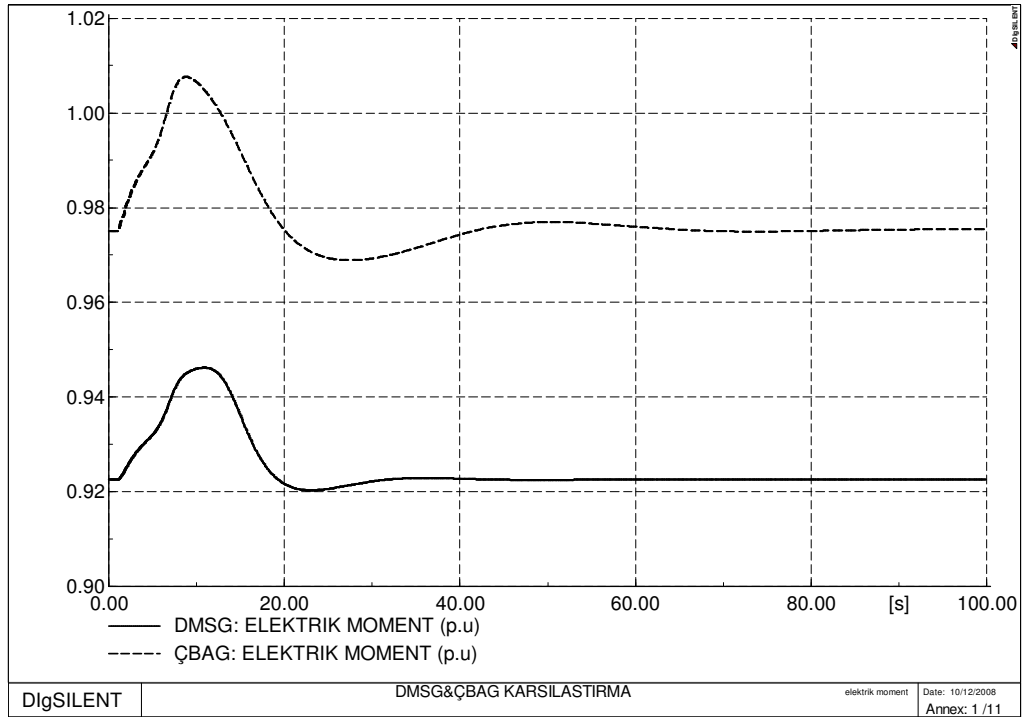
Şekil 6.22 Rüzgar hızı değişimi sırasındaki santral çıkışlarındaki aktif güç değişimleri (MW)



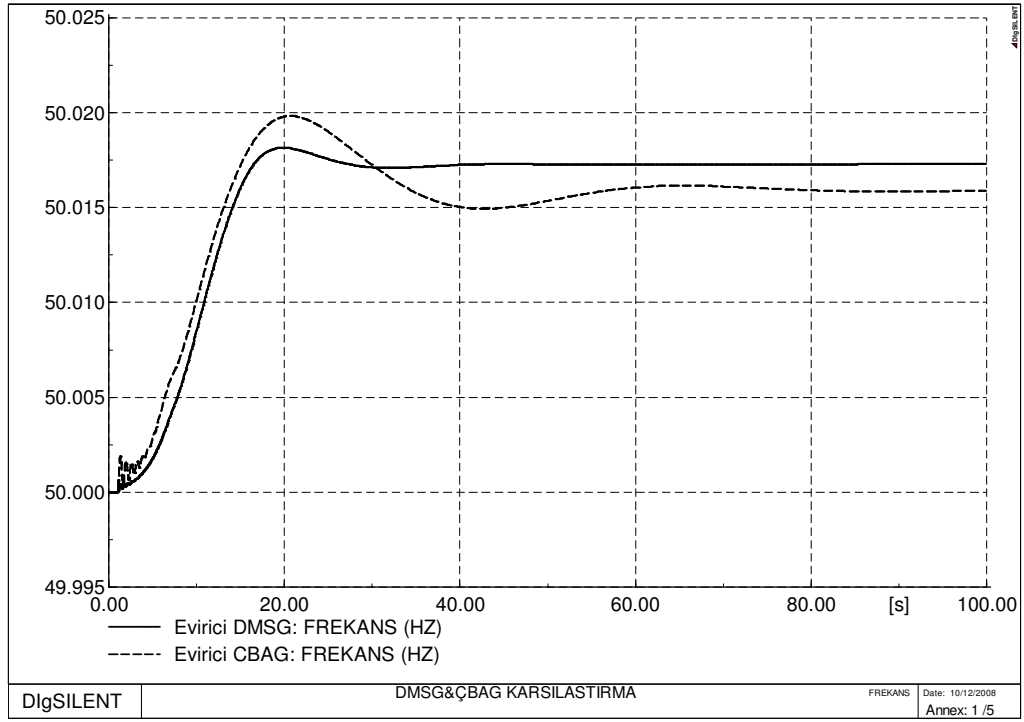
Şekil 6.23 Rüzgar hızı değişimi sırasındaki şebekede oluşan gerilim değişimleri (p.u.)



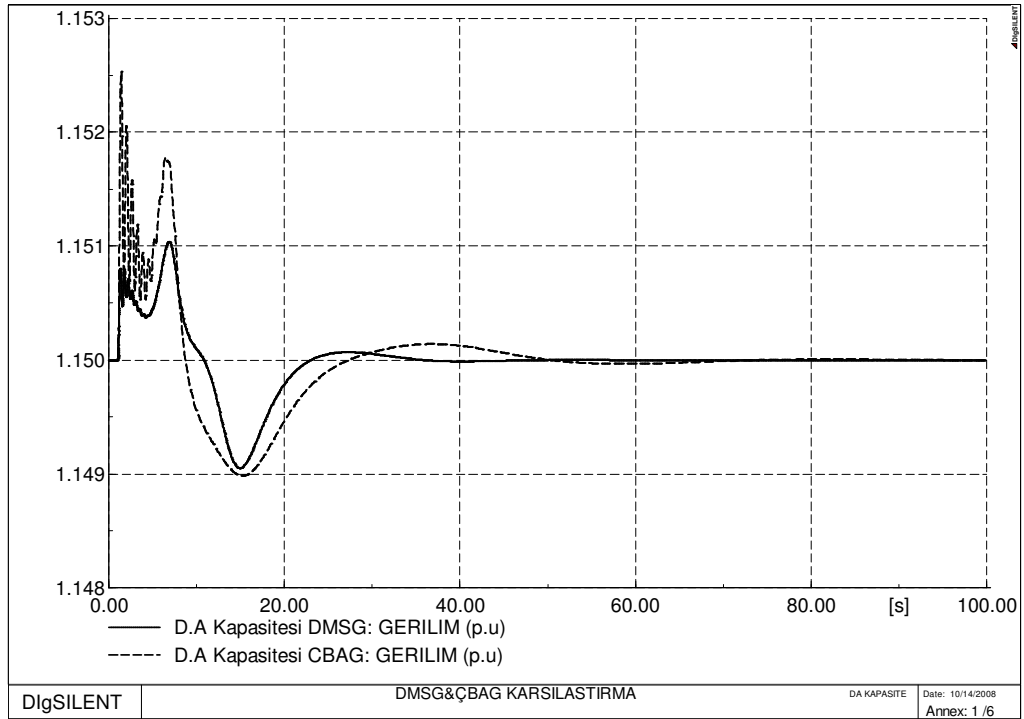
Şekil 6.24 Rüzgar hızı değişimi sırasında türbin mekanik moment değişiklikleri (p.u.)



Şekil 6.25 Rüzgar hızı değişimi sırasındaki türbinlerin elektrik moment değişikliği (p.u.)



Şekil 6.26 Rüzgar hızı değişimi sırasındaki güç dönüştürücüleri frekans değişiklikleri (Hz)



Şekil 6.27 Rüzgar değişimi sırasındaki DA kapasitesi üzerindeki gerilim değişiklikleri (p.u.)

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada rüzgar enerjisinden elektrik üretmek amacı ile kullanılan rüzgar santrallerinin modellenmesi açıklanmış ve bunlardan DMSG'li ve ÇBAG'li olanların Türkiye'deki Bozcaada "BORES" rüzgar santrali temel alınarak dinamik modellemesi oluşturulmuş ve karşılaştırılmaları yapılmıştır. Aşağıdaki verilen sonuçlar belli bir güç değeri ve belli şartlar kabul edilerek değerlendirilmiştir. Başka koşul ve şartlar altında daha değişik sonuçlar çıkabilir.

Santralde 600 kW gücünde 17 adet türbin bulunmaktadır. Santralin DMSG'li türbinler ile oluşturulması durumunda maliyeti 13.285.103 \$ tahmin edilirken, ÇBAG'li türbinlerden oluşturulması durumunda 12.838.980 \$ tahmin edilmektedir. DMSG'li santralin kapasite faktörü, ÇBAG'li santrale göre %2,4 daha iyidir. Bundan dolayı santral kurulum maliyeti yüksek olmasına karşın birim enerji maliyeti daha düşüktür.

Modellemesi yapılan santrallerin ani olaylardaki dinamik davranışları, şebekede oluşan %100'lük gerilim düşümü ve %45'lik gerilim düşümü durumunda incelenmiştir. Arıza durumunda çalışmaya devam ettikleri sırada ÇBAG'li türbinler DMSG'liye göre daha az mekanik baskıya maruz kalmıştır. %100'lük gerilim düşümü arızası karşısında DMSG'li santral şebekeye %25'lik daha fazla destek sağlarken, %45'lik gerilim düşümü arızası karşısında ÇBAG daha %5'lik daha iyi destek sağlamaktadır. Rüzgar hızı değişiminde ise her iki türbinde benzer davranışlar sergilemektedir ancak daha verimli olduğu için DMSG'nin kanat açısı değişimi daha fazla olmaktadır. Ayrıca, frekans ve gerilim kontrolü açısından ÇBAG biraz daha iyi bir performans sergilemektedir.

Ek 3'te Bozcaada Rüzgar Enerji Santralinin 2001 yılının Ocak ayından, 2003 yılının Temmuz ayına kadar uzanan süre boyunca şebekede oluşan arızalar nedeni ile santraldeki duruş sayıları gösterilmektedir. Bütün bu arızaların kısa süreli olduğunu varsayarak hareket edersek, modellenmesi yapılan santraller bu arızalar sırasında çalışmaya devam edecektir. Arıza sırasında çalışmada DMSG'li türbinlerde daha fazla mekanik baskı oluşacağından, mekanik arıza yapma riski daha yüksek olacaktır, buna karşın adaya ve şebekeye daha iyi elektrik desteği verecektir. ÇBAG'li türbinlerde ise mekanik baskı daha az olduğu için mekanik arıza yapma olasılığı daha düşüktür.

Mevcut analizler ve ada koşulları göz önüne alındığında, Bozcaada santralinde her ne kadar enerji maliyeti daha yüksek olsa da bu kayda değer bir yükseklik olmadığı için ÇBAG'li türbinlerin kullanılması arıza durumunda çalışmada daha iyi bir performans gösterdiği için

daha uygundur. Daha az mekanik arıza yapma olasılığından dolayı ve daha az mekanik baskıya maruz kalacağından daha az bakım gerektirecektir. Santral yapımında DMSG'li türbin kullanılması durumunda daha düşük enerji maliyeti olacaktır ancak arıza durumunda çalışma koşullarında mekanik arıza yapma riski daha yüksek olacaktır. Bu da yıl içindeki şebeke de oluşan arıza sayısı arttıkça daha fazla bakım ve kontrol maliyeti ortaya çıkaracaktır.

Bu çalışmada iki farklı içerikli rüzgar santrallerinin arıza durumunda çalışmaları (fault ride through) ile ilgili analizler yapılmıştır. Mevcut çalışmanın 3. bölümde adı geçen diğer türbin modelleri içinde uygulanıp, incelemeleri yapılarak kurulum için hangilerinin Türkiye'nin hangi bölgeleri açısından daha ekonomik ve yararlı olacağı araştırılabilir. Ayrıca arıza durumunda çalışma için türbinlere destek açısından reaktif güç veya gerilim regülasyonu yapabilecek ek ekipmanlar veya uygulamalar açısından da araştırmalar yapılabilir. Bu çalışmada yapılan maliyet analizleri için Amerikan Rüzgar Enerji Laboratuvarında oluşturulan ölçekleme modelinden faydalanılmıştır. Mevcut modele Türkiye'deki ekonomik veriler eklenerek Türkiye açısından daha doğru maliyet sonuçları alınabilir.

KAYNAKLAR

Ackermann, T., (2005), “Wind Power in Power Systems”, John Wiley & Sons, Ltd., UK.

Akhmatov, V., (2006), “Aggregated Modeling and Short-Term Voltage Stability of Large Wind Farms”, Wind Engineering, 30, 5: 447-449.

Akhmatov, V., Knudsen, H., Nielsen, A.H., Pedersen, J.K ve Poulsen, N.K., (2003), “Modeling Transient Stability of Large Wind Farms”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 25, 2:123-144.

“Ammonit GmbH Homepage, ALWIN programı” (<http://www.ammonit.de>)

Copçuoğlu, O. ve Önbilgin, G., (2007), “Yel Enerji Dönüşüm Sistemleri için Uygun Generatör Türlerinin Değerlendirilmesi”, 4.Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Gaziantep.

“Demirer Holding, BORES Rüzgar Santrali” (<http://www.demirer.com.tr/bores/bores.html>)

DIgSLIENT GmbH "DIgSlent PowerFactory V13- User Manual" DIgSLIENT GmbH, 2003.

Elkraft, ELTRA, (2004), Vindmøller Tilsluttet Net Med Spændinger Over 100 kV, Dok. No. 212765v1, Elkraft System, Ballerup, DK.

“EİE Genel Müdürlüğü Ana Sayfa” (http://www.eie.gov.tr/turkce/ruzgar/Turkiye_RES.html)

Fernandez, L.M., Jurado, F. ve Saenz, J.R., (2007), “Aggregated Dynamic Model for Wind Farms with Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines”, Renewable Energy, 33:129-140.

Fingersh, L., Hand, M. ve Laxson, A., (2006), “Wind Turbine Design Cost and Scaling Model”, Technical Report, NREL/TP-500-40566.

Gagnon, R., Sybille, G., Bernard, S., Pare, D., Casoria, S. ve Larose, C., (2005), “Modeling and Real - Time Simulation of a Doubly-Fed Induction Generator Driven by a Wind Turbine”, International Conference on Power Systems Transients, Canada.

Garcia, M.G., Comech, M.P., Sallan, J. ve Lombart, A., (2007), “Modeling Wind Farms for Grid Disturbances”, Renewable Energy Technical Report.

Hansen, A.D., Jauch, C., Sorensen, P., Iov, F. ve Blaanjerg, F., (2007), “Dynamic Wind Turbine Models in Power System Tool DIgSLIENT. Risø Report-1400, Risø National Laboratory, Denmark.

Jauch, C., Sorensen, P., Islam, S.M. ve Jensen, B.B., (2007), “Design of a Wind Turbine Pitch Angle Controller for Power System Stabilization”, Renewable Energy, 32:2334-2349.

Jauch, C., Sorensen, P., Norheim, I. ve Rasmussen, C., (2007), “Simulation of the Impact of Wind Power on the Transient Fault Behavior of the Nordic Power System”, Electric Power Systems Research, 77, 2:135-144.

Kundur, P., (1994), Power System Stability and Control, McGraw-Hill, New York.

Michalke, G., Hansen, A.D. ve Hartkopf T., (2007), "Control Strategy of a Variable Speed Wind Turbine with Multi Pole Permanent Magnet Synchronous Generator", Risø Report-1400, Risø National Laboratory, Denmark.

Michalke, G., Hansen, A.D. ve Hartkopf, T., (2007), "Dynamic Behavior of a DFIG Wind Turbine Subjected to Power System Faults", *Renewable Energy*, 32, 9:1594-1610.

Mihet-Popa, L., Blaabjerg, F. ve Boldea, I., (2004), "Wind Turbine Generator Modeling and Simulation where Rotational Speed is the Controlled Variable", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40, 1:3-10.

Nunes, M.V.A., Vieira, J.P.A., Bezerra, U.H. ve Lopez, J.P.A., (2005), "New Mathematic Models to Represent Variable Speed Wind Generation Systems in Transient Stability Studies", *Power Systems Computation Conference (PSCC'05)*.

Patel, M.R., (2006), *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation*, CRC press Boca Raton.

Petru, T. ve Thringer, T., (2002), "Modeling of Wind Turbines for Power System Studies", *IEEE Trans. Power Syst.* 19, 4:1132-1139.

Poller, M.A, (2003), "Doubly-Fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms", *IEEE Power Tech Conference Proceedings*, 3:6.

Rashid, M.H., (2001), *Power Electronics for Renewable Energy Sources*, Academic Press Series in Engineering, USA.

Saad-Saoud, Z. ve Jenkins, N., (1995), "Simple Wind Farm Dynamic Model", *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, 142, 5:545-548.

Sanchez, J.A., Vegabzones, C., Martinez, S., Blazquez, F., Herrero, N. ve Wiklhelmi, J.R., (2008), "Dynamic Model of Wind Energy Conversion Systems with Variable Speed Synchronous Generator and Full-Size Power Converter for Large Scale Power System Studies", *Renewable Energy*, 33, 6:1186-1198.

Santoso, S. ve Ha Thu Le., (2007), "Fundamental Time-Domain Wind Turbine Models for Wind Power Studies", *Renewable Energy*, 32:2436-2452.

Sanz, M., Llombart, A., Bayod, A.A. ve Mur, J., (2000), "Power Quality Measurements and Analysis for Wind Turbines", *IEEE Instruments and Measuremants Technologies Conf.*, 3: 1167-1172.

Seyoum, D., Grantham, C. ve Rahman, M.F., (2003), "The Dynamic Characteristics of an Isolated Self-Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine", *IEEE Industry Applications Conference, 38th Annual Meeting* 1:568-575.

Slootweg, J.G., de Haan, S.W.H., Polinder, H. ve Kling, W.L., (2001), "Modeling Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 1:22-26.

Soens J., Driesen, J. ve Belmans, R., (2004), "Interaction between Electrical Grid Phenomena and the Wind Turbine's Behaviour", *Noise and Vibration Engineering Conf.*, Belgium.

Svechkarenko, D., (2005), “Simulation and Control of Direct Driven Permanent Magnet Synchronous Generator”, Project Work, Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics.

TEİAŞ Mart Raporu, (2005), “Yenilenebilir Kaynaklardan Değişken Üretim Yapan Santrallerin Elektrik Üretim – İletim Sistemine Teknik ev Ekonomik Etkileri ve AB Uygulamaları”, Türkiye.

Uyar, M., Gencoğlu M.T., ve Yıldırım, S., (2005), “Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri için Generatör Sistemleri”, 3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Ekim, Mersin.

Yang, C., Liang, H. ve Jiang, J., (2006), “Modeling and Simulation of AC-DC-AC Converter System for MW-Level Direct-Drive Wind Turbine Grid Interface, 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1-4.

Zhang, F., Tong, N., Wang, H., Li, W. ve Wang, F., (2004), “Modeling and Simulation of Variable Speed Constant Frequency Wind Power Generation System with Doubly Fed Brushless Machine”, Power System Technology on PowerCon, 1:801-805.

8. EKLER

- 8.1 Ek 1 Kurulum maliyeti hesaplama formülleri
- 8.2 Ek 2 Santrallerin toplam kurulum maliyetleri
- 8.3 Ek 3 Bozcaada Rüzgar Enerji Santralinde şebeke kesintisi nedeni ile arıza duruşları

Ek 1 Kurulum maliyeti hesaplama formülleri

1.Kanatlar:

Static yük dizaynına göre ;

$$\text{Kütle} = 0,2113 * R^{2,8833}$$

$$\text{Maliyet} = (\text{materyal maliyeti} + \text{işçilik}) / (1 - 0,28)$$

2.Ana Göbek (Hub)

$$\text{kütle} = 0,954 * (\text{pervane kütlesi} / \text{tek kanat kütlesi}) + 5680,3$$

$$\text{maliyet} = \text{kütle} * 4,25$$

3.Açı ve Frenleme mekanizması

$$\text{fren kütlesi} = 0,1295 * \text{pervane kütlesi} + 491,31$$

$$\text{toplam açı sistemi kütlesi} = (\text{fren kütlesi} * 1,328) + 555$$

$$\text{maliyet} = 2,28 * (0,2106 * R^{2,6578})$$

4.Mil ve Burun konisi

$$\text{kütle} = 18,5 * R - 520,5$$

$$\text{maliyet} = \text{kütle} * 5,57$$

5.Yavaş Hız Şaftı

$$\text{Kütle} = 0,0142 * R^{2,888}$$

$$\text{Maliyet} = 0,01 * R^{2,887}$$

6.Ana fren sistemi

$$\text{kütle} = (R * 8 / 600 - 0,033) * 0,0092 * R^{2,5}$$

$$\text{maliyet} = 2 * \text{kütle} * 17,6$$

7.Dişli Kutusu

tek seviyeli ve orta hızlı generatörlü;

$$\text{kütle} = 88,29 * \text{yavaş hız momenti}^{0,774}$$

$\text{maliyet} = 74,1 * \text{makine gücü}$

8.Mekanik Fren, Hızlı akuple ve bileşenleri

$\text{maliyet} = 1,9894 * \text{makine gücü} - 0,1141$

$\text{kütle} = \text{maliyet} / 10$

9.Generatör

3 seviyeli Yüksek Hızlı Generatör için;

$\text{kütle} = 6,47 * \text{makine gücü}^{0,9223}$

$\text{maliyet} = \text{makine gücü} * 65$

Tek seviyeli sürmeli orta hızlı DMSG;

$\text{Kütle} = 10,51 * \text{makine gücü}^{0,9223}$

$\text{Maliyet} = \text{makine gücü} * 54,73$

Direk Sürme Senkron Generatör;

$\text{Kütle} = 661,25 * \text{yavaş hız şaftı momenti}^{0,606}$

$\text{Maliyet} = \text{makine gücü} * 219,33$

10.Güç elektroniği

$\text{maliyet} = \text{makine gücü} * 79$

11.Rota Mekanizması

$\text{kütle} = 1,6 * (0,00009 * R^{3,314})$

$\text{maliyet} = 2 * (0,0339 * R^{2,964})$

12.Ana Gövde

3 seviyeli hızlı generatör;

$\text{kütle} = 2,233 * R^{1,953}$

$\text{maliyet} = 9,489 * R^{1,953}$

tek seviyeli orta hızlı daimi mıknatıslı generatör;

$$\text{k\u00fctle}=1,295*R^{1953}$$

$$\text{maliyet}=303,96*R^{1,067}$$

direk s\u00fcr\u00fccl\u00fc senkron genrat\u00f6r;

$$\text{k\u00fctle}=1,228*R^{1953}$$

$$\text{maliyet}=627,28*R^{0,85}$$

platform ve kenarlık;

$$\text{k\u00fctle}=0,125*\text{ana g\u00f6vde k\u00fctle}$$

$$\text{maliyet}=\text{k\u00fctle}*8,7$$

13.Elektrik ba\u011flantısı

$$\text{maliyet}=\text{makine g\u00fc}c\u00fc*40$$

14.Hidrolik ve So\u011futma Sistemi

$$\text{maliyet}=\text{makine g\u00fc}c\u00fc*12$$

$$\text{k\u00fctle}=0,08*\text{makine g\u00fc}c\u00fc$$

15.G\u00f6vde kaplaması

$$\text{maliyet}=11,537*\text{makine g\u00fc}c\u00fc+3849,7$$

$$\text{k\u00fctle}=\text{maliyet}/10$$

16.Kontrol, koruma ve durum kontrol\u00fc sistemi

kara i\u00e7in; 35,000\$

kıyı i\u00e7in; 55,000\$

17.Kule

$$\text{k\u00fctle}=0,3973*\text{s\u00fc}p\u00fcrme alanı*\text{kule kule y\u00fc}ksekli\u011fi-1414$$

$$\text{maliyet}=\text{k\u00fctle}*1,50 \quad (\u00e7eli\u011fin kilosu 1,50\$/kg oldu\u011fundan 2002 de)$$

18.Temel

$$\text{maliyet}=303,24*(\text{kule y\u00fc}ksekli\u011fi*\text{s\u00fc}p\u00fcrme alanı)^{0,4037}$$

19.Nakliye

nakliye maliyet faktörü= $1,581E-makine\ gücü^2-0,0375*makine\ gücü+54,7$ (\$7kW)

maliyet= $makine\ gücü*maliyet\ faktörü$

20.Yol ve Sivil İşçilik

faktör= $2,17E-6*makine\ gücü^2-0,0145*makine\ gücü+69,54$

maliyet= $makine\ gücü*faktör$

21.Montaj ve Kurulum

maliyet= $1,965*(yükseklik*R)^{1,1736}$

22.Elektrik bağlantısı

faktör= $3,49-6*makine\ gücü^2-0,0221*makine\ gücü+109,7$

maliyet= $makine\ gücü*faktör$

23.Mühendislik ve Ruhsat

faktör= $994E-4*makine\ gücü+20,31$

maliyet= $makine\ gücü*faktör$

24.Yenileme

faktör= $10,7\$/kW\ makine\ gücü$

yıllık maliyet= $makine\ gücü*faktör$

25.İşletme Maliyeti

karada; maliyet= $0,007*YNEÜ$

3.1.26.Arsa Kira Bedeli

maliyet= $0,00108*YNEÜ$

Ek 2 Santrallerin toplam kurulum maliyetleri

DEĞİŞKENLER					
Çelik malzemenin kilosu	1,5	\$	R (Pervane Çapı)	48	m
Yükseklik	45	m	Generatör Gücü	600	kW
Süpürme alanı	1.810	m ²	DFIG Elektronik Gücü	200	kW
			PMSG Elektronik Gücü	600	kW

ÇBAG		
Kanat Maliyeti	22.592,67	USD
Anagöbek Maliyet	26.261,21	USD
Açı Mek Maliyeti	11.203,71	USD
Mil ve Kon. Maliyeti	62.404,65	USD
Ana Fren Sis Maliyet	2.302,56	USD
Dişli Kutusu Maliyet	48.537,43	USD
Mek. Fren Maliyeti	1.193,53	USD
Generatör Maliyet	39.000,00	USD
Elektronik Maliyet	15.800,00	USD
Gövde Maliyet	15.392,01	USD
Rota Mek. Maliyet	50.399,17	USD
Platform maliyet	3.935,33	USD
Elektrik Bağ. Maliyeti	24.000,00	USD
Hidrolik Maliyet	7.200,00	USD
Gövde Kaplaması maliyet	10.771,90	USD
Kontrol Koruma maliyet	35.000,00	USD
Kule Maliyeti	69.628,69	USD
Temel Maliyeti	29.128,17	USD
Nakliye Maliyeti	22.734,96	USD
Yol ve Sivil İşçilik maliyeti	36.972,72	USD
Montaj ve kurulum maliyeti	14.532,11	USD
Elektrik Şeb. Maliyet	58.617,84	USD
Müh.ve Ruh. Maliyeti	12.543,84	USD
TOPLAM		
2004 yılı Türbin Maliyeti	620.152,51	USD
2004 yılı Santral Maliyeti	10.542.592,62	USD
2008 yılı Türbin Maliyeti	755.234,14	USD
2008 yılı Santral Maliyeti	12.838.980,40	USD

DMSG		
Kanat Maliyeti	22.592,67	USD
Anagöbek Maliyet	26.261,21	USD
Açı Mek Maliyeti	11.203,71	USD
Mil ve Kon. Maliyeti	62.404,65	USD
Ana Fren Sis Maliyet	2.302,56	USD
Dişli Kutusu Maliyet	44.460,00	USD
Mek. Fren Maliyeti	1.193,53	USD
Generatör Maliyet	32.838,00	USD
Elektronik Maliyet	47.400,00	USD
Gövde Maliyet	17.233,78	USD
Rota Mek. Maliyet	50.399,17	USD
Platform maliyet	2.282,24	USD
Elektrik Bağ. Maliyeti	24.000,00	USD
Hidrolik Maliyet	7.200,00	USD
Gövde Kaplaması maliyet	10.771,90	USD
Kontrol Koruma maliyet	35.000,00	USD
Kule Maliyeti	69.628,69	USD
Temel Maliyeti	29.128,17	USD
Nakliye Maliyeti	22.734,96	USD
Yol ve Sivil İşçilik maliyeti	36.972,72	USD
Montaj ve kurulum maliyeti	14.532,11	USD
Elektrik Şeb. Maliyet	58.617,84	USD
Müh.ve Ruh. Maliyeti	12.543,84	USD
TOPLAM		
2004 yılı Türbin Maliyeti	641.701,76	USD
2004 yılı Santral Maliyeti	10.908.929,87	USD
2008 yılı Türbin Maliyeti	781.476,68	USD
2008 yılı Santral Maliyeti	13.285.103,70	USD

Ek 3 Bozcaada Rüzgar Enerji Santralinde şebeke arızası nedeni ile arıza duruşları

	2001	2002	2003	
	Duruş sayısı	Duruş sayısı	Duruş sayısı	
OCAK	8	16	28	
ŞUBAT	11	5	20	
MART	15	12	7	
NİSAN	8	15	6	
MAYIS	9	10	8	
HAZİRAN	11	3	8	
TEMMUZ	9	1		
AĞUSTOS	7	3		
EYLÜL	17	14		
EKİM	3	7		
KASIM	30	10		
ARALIK	34	8		
TOPLAM	162	104	77	343

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 16.05.1982

Doğum yeri Bursa

Lise 1993-2001 Kadıköy Anadolu Lisesi

Lisans 2001-2005 Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fak.
Elektrik Mühendisliği Bölümü