

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

**ENERJİ İLETİM VE DAĞITIM SİSTEMLERİNDE RÜZGÂR ENERJİ
SANTRALLERİNİN GÜÇ AKIŞINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

TUNCAY ALTUN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. ERCAN İZGİ**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ İLETİM VE DAĞITIM SİSTEMLERİNDE RÜZGÂR ENERJİ
SANTRALLERİNİN GÜÇ AKIŞINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Tuncay ALTUN tarafından hazırlanan tez çalışması 03.01.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç.Dr. Ercan İZGİ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç.Dr. Ercan İZGİ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof.Dr. Hakan ÜNDİL

İstanbul Üniversitesi

Prof. Dr. Nurettin UMURKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Elektrik enerjisinin ilk bulunduğu zamandan bu yana kullanım alanını sürekli artırması ve yaşamın her alanında hayati derecede önem kazanması, güç sistemi analizini ve planlanmasını zorunlu kılmıştır. Kesintisiz, kaliteli ve güvenilir enerjinin üreticiden tüketiciye ulaşmasının takibinin yapıldığı bu çalışma tüketicinin aldığı enerjinin sabit gerilimde, sabit frekansta ve sürekliliğinin en optimum şekilde planlanmasını sağlamaktadır. Bu planlama tüketici gelişimine göre üretim, iletim ve diğer parametrelerin planlaması olarak ifade edilebilir.

Bu tez çalışmasında verileri daha önce gerekli kurumlardan alınan 154/34,5 kV iletim ve dağıtım şebekesinin modellemesi Matlab (2012a) kullanılarak yapılmıştır. Şebeke modellemesine rüzgâr santralleri eklenerek güç akış analizi yapılmıştır. Bu modelleme kullanılarak yenilenebilir enerji santrallerinin şebekeye bağlantıları, etkileri çözüm yöntemleri belirlenen senaryolarla incelenmiştir.

Tezimin hazırlanmasında desteğini ve zamanını benden esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Doç.Dr. Ercan İZGİ' ye, ailem ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Aralık, 2013

Tuncay ALTUN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2.....	3
ENERJİ SİSTEMLERİ ANALİZİ	3
2.1 Üretim Sistemi	3
2.2 İletim Sistemi	3
2.3 Dağıtım Sistemi	4
2.4 Enterkonnekte Sistemi.....	5
2.5 Türkiye Enterkonnekte Elektrik Güç Sistemi.....	7
BÖLÜM 3.....	11
GÜÇ AKIŞI	11
3.1 Güç Akışı Hesaplamaları.....	13
3.2 Gauss Seidel Metodu ile Güç Akış.....	16
3.3 Newton Raphson Metodu ile Güç Akışı	18
3.4 Ayrık ve Hızlı Ayrık Newton-Raphson Metodu	23

3.5	Yük Akışı Analizinde Kullanılan İterasyon Metodlarının Karşılaştırılması .	23
3.6	Yük Akışı Analizlerinin Kullanıldığı Alanlar	24
BÖLÜM 4	.....	26
RÜZGÂR SANTRALLERİNDE ELEKTRİK SİSTEMLERİ	.....	26
4.1	Rüzgâr Türbinlerinde Generatörler ve Güç Elektroniği Bileşenleri.....	26
4.1.1	Rüzgâr Türbini Teknolojilerine Genel Bakış.....	26
4.1.1.1	Sabit Hızlı Rüzgâr Türbinleri	26
4.1.1.2	Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri.....	27
4.1.2	Rüzgâr Türbini Teknolojisinde Kullanılan Generatörler.....	28
4.1.2.1	Tip A: Sabit Hız	30
4.1.2.2	Tip B: Sınırlı Değişken Hız	30
4.1.2.3	Tip C: Kısmi Ölçekli Frekans Çeviricili Değişken Hız.....	31
4.1.2.4	Tip D: Tam Ölçekli Frekans Çeviricili Değişken Hız.....	31
4.1.3	Generatör Sistemleri	31
4.1.3.1	Asenkron Generatör.....	32
	Sincap Kafesli Asenkron Genaratörü	32
	Bilezikli Asenkron Generatörü	34
4.1.3.2	Senkron Generatör.....	36
	Bilezikli Senkron Generatörü	37
	Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörü.....	37
4.1.4	Rüzgâr Santrallerinde Kullanılan Güç Elektroniği Bileşenleri	38
4.1.4.1	Yol Vericiler	38
4.1.4.2	Kondansatör Gurupları.....	39
4.1.4.3	Doğrultucu ve Eviriciler	39
4.1.4.4	Frekans Çeviriciler	40
4.2	Rüzgâr Türbinlerinde Koruma	41
4.3	Rüzgâr Türbinlerinde Topraklama Sistemleri	42
BÖLÜM 5	.....	45
ŞEBEKEYE BAĞLI RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN KULLANIMININ ŞEBEKEYE ETKİLERİ	.....	45
5.1	Giriş	45
5.2	Rüzgâr Türbinlerinin Şebekeye Bağlanması.....	46
5.2.1	Genel Kısıtlamalar.....	46
5.2.2	Rüzgâr Türbinlerinin Dağıtım Şebekesine Bağlantısı	47
5.2.3	Rüzgâr Türbinlerinin İletim Şebekesine Bağlantısı	47
5.3	Rüzgâr Türbinlerinin Bölgesel ve Şebeke Genelindeki Bozucu Etkileri.....	48
5.3.1	Bölgesel Bozucu Etkileri.....	49
5.3.2	Şebekeye Olan Bozucu Etkileri	50
5.3.2.1	Sistem Dinamiği ve Kararlılığı Etkisi	51
5.3.2.2	Reaktif Güç Üretimi ve Gerilim Kontrolü Üzerindeki Etkileri.....	51
5.3.2.3	Frekans Kontrolü ve Yük Eğrisinin Takibi Konularına Etkileri.....	53
5.4	Büyük Rüzgâr Çiftlikleri Planlamasında Sürekli Hal Güç Sistemi Sorunları	54
5.5	Bölgesel Şebekelerde Gerilim Kararlılığı Limitleri ve Büyük Ölçekli Rüzgâr Gücü Entegrasyonu	56

5.6	Kısa-Devre Arızası Durumunda Rüzgâr Türbinlerinin Tepkisi	57
5.7	Rüzgâr Santrallerinin Şebekeyi Besleme Kapasitesi Limiti ve Önemi	60
BÖLÜM 6	.....	63
MODELLENEN ŞEBEKE ÜZERİNDE UYGULAMA	.....	63
BÖLÜM 7	.....	966
SONUÇ VE ÖNERİLER	.....	966
KAYNAKLAR	.....	988
EK-A	.....	1008
MODELLENEN ŞEBEKEYE AİT VERİLER	.....	1008
ÖZGEÇMİŞ	.....	1044

SİMGE LİSTESİ

V	Gerilim
I	Akım
Y_{bara}	Bara Admitans Matrisi
Z_{bara}	Bara Empedans Matrisi
δ	Gerilim Açısı Değeri
J	Jakobian Matris
R	Reaktans
L	Endüktans
$\cos\phi$	Güç Faktörü
ϕ	Faz Açısı
B	Suseptans
P	Aktif Güç
Q	Reaktif Güç
S	Görünür Güç
F	Frekans
P.u.	Per-Unit Değer

DGKÇS	Doğal Gaz Kombine Çevrim Santrali
EİH	Enerji İletim Hattı
TM	Transformatör Merkezi
ACSR	Alüminium-Conductor Steel Reinforced
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
DFIG	Double Fed Induction Genarator
ÇBAG	Çift Beslemeli Asenkron Generatör
MBK	Modüler Hücreli Beton Köşk
UCTE	Avrupa Elektrik İletimi Koordinasyon Birliği
PMUM	Piyasa Mali Uzlaştırma Merkezi
SCIG	Sincap Kafesli Asenkron Generatör
WRIG	Bilezikli Asenkron Generatör
PMSG	Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör
WRSG	Bilezikli Senkron Generatör
Img	İmajiner

	Sayfa
Şekil 2. 1	Enerji Dağıtımı (Ring Şebeke) 4
Şekil 2. 2	Enerji Dağıtımı (Çift Ring Şebeke) 4
Şekil 2. 3	Enterkonnekte Şebeke Prensibi 5
Şekil 3. 1	Genel bir bara gösterimi 15
Şekil 3. 2	İki bara arasındaki hattın aktif ve reaktif güçler 22
Şekil 4.1	Tipik rüzgâr türbini konfigürasyonları 29
Şekil 4.2	Rüzgâr santrali topraklama sistemi şeması 43
Şekil 5.1	Rüzgâr santrali ve şebekenin Thevenin eşdeğer devre modeli. 60
Şekil 6.1	Newton Raphson Metoduyla bulunan güç akış değerleri 64
Şekil 6.2	Osmanca TM ana bara gerilim değerleri 65
Şekil 6.3	Osmanca TM aktif ve reaktif güç değerleri 66
Şekil 6.4	Bolu I TM ana bara gerilim değerleri 67
Şekil 6.5	Bolu I TM aktif ve reaktif güç değerleri 67
Şekil 6.6	Bolu I TM 154/34.5 kV TRA çıkış bara gerilim değerleri 68
Şekil 6.7	Bolu I TM 154/34.5 kV TRB çıkış bara gerilim değerleri 68
Şekil 6.8	Bolu I TM 154/34.5 kV TRA aktif ve reaktif güç değerleri 69
Şekil 6.9	Bolu I TM 154/34.5 kV TRB aktif ve reaktif güç değerleri 69
Şekil 6.10	Bolu I TM ana bara kısa devre gerilim değerleri 71
Şekil 6.11	Bolu I TM ana bara kısa devre ortalama gerilim değerleri 71
Şekil 6.12	Bolu I TM ana bara kısa devre akım değerleri 72
Şekil 6.13	Bolu I TM 154 kV giriş ana bara kısa devre ortalama akım değerleri 73
Şekil 6.14	Bolu I TM 154 kV giriş ana bara kısa devre aktif ve reaktif güç değerleri... 73
Şekil 6.15	Rüzgâr türbinlerinin arıza sonrasında sağlaması gereken tepki 74
Şekil 6.16	RES Tesisleri Tarafından Sisteme Verilecek Reaktif Güç Desteği Eğrisi 75
Şekil 6.17	Matlab ile Modellenen Güç sistemi 76
Şekil 6.18	Bolu I Fider 7 Sonuna Eklenen ÇBAG Sahip Rüzgâr Santrali Ve Şebeke 77
Şekil 6.19	Çift Beslemeli Asenkron Generatöre Sahip Rüzgâr Santraline Ait Veriler .. 78
Şekil 6.20	Dağıtım hattına RES bağlandıktan sonra Bolu I TM A güç değerleri 79
Şekil 6.21	3 Faz Arızası Durumunda ÇBAG Sahip Rüzgar Santraline Ait Veriler 80
Şekil 6.22	Ölçü bloğunda aktif reaktif güç değerleri(DFIG) 81
Şekil 6.23	3 faz arızası durumunda aktif reaktif güç değerlerinin değişimi(DFIG) 81
Şekil 6.24	Şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatör[22] 82
Şekil 6.25	Kaskad konverterli değişken hız kontrollü asenkron generatör[22] 83
Şekil 6.26	Çift beslemeli asenkron generatör[22] 83
Şekil 6.27	Bolu I Fider 7 Sonuna Eklenen SMSG Sahip Rüzgâr Santrali Ve Şebeke 84
Şekil 6.28	Senkron Generatöre Sahip Rüzgâr Santraline Ait Veriler 85
Şekil 6.29	Dağıtım hattına SMSG bağlanması durumunda Bolu I TMA güç değerleri. 86
Şekil 6.30	3 Faz Arızası Durumunda SMSG Sahip Rüzgâr Santraline Ait Veriler 87
Şekil 6.31	Şebekeye doğrudan bağlı senkron generatör[22] 88
Şekil 6.32	Ölçü bloğunda aktif reaktif güç değerleri 88
Şekil 6.33	3 faz arızası durumunda aktif reaktif güç değerlerinin değişimi 89
Şekil 6.34	DC bara bağlantılı senkron generatörler 90
Şekil 6.35	Enerji iletim hattına bağlanan rüzgar enerji santrali 92

Şekil 6.36	Rüzgar enerji santralinin bulunduğu sistemin yük akış sonuçları.....	93
Şekil 6.37	RES iletim hattına bağlı olduğu durumda Bolu I TM güç akışı	94
Şekil Ek-A.1	Bolu-Düzce bölgesi 154 kV iletim hatları blok parametre değerleri	100
Şekil Ek-A.2	Bolu I TM dağıtım hatları blok parametre değerleri	100
Şekil Ek-A.3	154 kV / 34,5 kV iletim ve dağıtım şebekesi trafolarının parametreleri..	101
Şekil Ek-A.4	Bolu I TM dağıtım hatları yük parametre değerleri.....	101
Şekil Ek-A.5	34,5- 31,5 ve 6,3 kV dağıtım hatları blok parametre değerleri.....	102
Şekil Ek-A.6	İletim ve dağıtım şebekesi aktif ve reaktif yük tablosu	103

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Toplam kurulu gücün enerji kaynaklarına göre dağılımı.	9
Çizelge 3.1 Güç sistem baralarının yük akışı için sınıflandırılması.....	13

**ENERJİ İLETİM VE DAĞITIM SİSTEMLERİNDE RÜZGÂR ENERJİ
SANTRALLERİNİN GÜÇ AKIŞINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Tuncay ALTUN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ercan İZGİ

Günümüzde enerji, üretimin ana girdilerinden birisidir. Mevcut enerji kaynaklarını ekonomik ve güvenli bir şekilde kullanabilmek günümüzde çok önemli hale gelmiştir. Ülkemizde kullanılan teçhizatlarda farklı standartlar olduğu için elektrik enerjisinin üretim, iletim, dağıtım, tüketim ve kontrolünde sıkıntılar yaşanmaktadır. Bu sıkıntıları gidermenin en etkili yolu, tüm elektrik tesislerinde ar-ge çalışması yapmak, ileri teknoloji ürünü otomasyon sistemleri kurmak ve geliştirmektir.

Matlab, temel matematik ve mühendislik dallarında kullanıcıya ciddi imkânlar sunar. Bu tez çalışmasında 154 kV/34,5 kV elektrik iletim ve dağıtım şebekesi, Simulink araç kutusu kullanılarak modellenmiş ve analiz edilmiştir.

Ayrıca sisteme yenilenebilir enerji santralleri belirlenen senaryolarla dahil edilerek sistem tepkisi enerji kalitesi açısından incelenmeye çalışılmıştır. Özellikle değişik rüzgâr türbini generatör çeşitlerinin şebekeye bağlantı sorunları ve enerji kalitesine etkileri incelenmiş ve yapılan simülasyonlar aracılığıyla gerekli öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yük Akışı Analizi, Kısa Devre Analizi, Matlab (Benzetimi) ve Simulink Araç Kutusu (Toolbox) Yardımı ile Enerji İletimi ve Kısa Devre Analizi.

ABSTRACT

IN POWER TRANSMISSION AND DISTRIBUTION SYSTEM OF THE WIND ENERGY PLANTS TO STUDY THE EFFECTS ON POWER FLOW

Tuncay ALTUN

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc.Prof.Dr.Ercan İZGİ

At the present day, energy is the main input of production and it has become much important to use the existing energy sources economically and safely. In our country, it is faced difficulties at the production, transmission and distribution of electrical energy due to the different standards used at equipment. The most effective way of resolving these problems, do R & D work in all power plants, high-tech automation systems is to establish and develop. Matlab presents serious possibilities to the user at basic maths and engineering. In this thesis study, with 154 kV/34,5 kV electricity transmission and distribution network is modelled and analysed by using the Simulink toolbox. In addition to the system by including renewable energy plants with the specified system response scenarios in terms of power quality have been studied.

In particular, various types of wind turbine generator and power quality of the network connectivity issues were investigated and the necessary recommendations have been presented through simulation.

Keywords: Load flow analysis, short circuit analysis, energy transmission and short circuit analysis with matlab and simulink toolbox.

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

1.1 Literatür Özeti

Elektrik enerjisi üretim, iletim, dağıtım aşamalarından geçerek tüketilmektedir. Elektrik enerjisi, elektrik enerjisi üretim santrallerinde üretildikten sonra çok yüksek gerilimlerde (380,154 veya 66 kV) enterkonnekte sisteme enerji nakil hatları ile iletilir. Belirli noktalarda bulunan ototrafolar ile 154 kV ve 66 kV gerilim seviyelerinde yine iletim hatlarıyla tüketim noktalarına daha yakın olan transformatör merkezlerine iletilir. Burada 34.5, 31.5 ve 15 kV gerilim seviyelerine düşürülen enerji dağıtım hatlarıyla tüketim noktalarına ulaştırılır ve 34.5/6.3 kV ve 34.5/0.4 kV gerilimindeki dağıtım transformatörleri yardımıyla gerilim seviyesi düşürülerek fabrika, işyeri, ticarethane ve evlerde tüketilir.

Bu tez çalışmasında Türkiye Elektrik Üretim A.Ş., Türkiye Elektrik İletim A.Ş.'den alınan bilgiler doğrultusunda 154/34.5 kV iletim ve dağıtım şebekesini oluşturan bir tane hidroelektrik santral, bir tane 380/154kV TM, beş tane 154/34.5 kV TM, bir tane 154/6.3 kV TM ile iletim ve dağıtım hatlarıyla birlikte yük durumları incelenmiş, yenilenebilir enerji santralleri çeşitli senaryolarla sisteme dahil edilerek yenilenebilir enerji santrallerinin enterkonnekte şebekeye bağlantı sorunları, etkileri analiz edilmiştir. Ayrıca değişik enerji taleplerine göre iletim ve dağıtım sisteminin, elemanlarının bu taleplere karşı vereceği tepkilerde bu çalışma ile analiz edilmeye çalışılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Belirlenen bir güç sistemi modelleyerek bu sisteme yenilenebilir enerji santrallerinin dahil olması durumundaki sorunların tespiti, bu durumda güç akışı hesaplarının yapılması ve yenilenebilir enerji santrallerinin enerji kalitesine etkilerinin araştırılması ve karşılaşılan sorunlara çözüm önerisi geliştirmektir. Bu tezde salınım barası haricindeki tüm bara gerilimlerinin genlikleri ve açıları bulunmaktadır. Daha sonra, sistemdeki hatlardan iletilen, aktif ve reaktif güçler ve hatlardaki kayıplar hesaplanmaktadır. Ayrıca optimal güç akışı analizi ile üretim birimlerinin sistemin maliyetini minimuma indirebilecek şekilde yüklenmesini ve aynı zamanda tüm bara gerilimlerinin genlikleri ve açılarını, reaktif güçlerini hesaplamaktır.

1.3 Hipotez

Güç sistemlerinin tasarımı ve işletilmesi oldukça karmaşık bir problemdir. MATLAB Simulink gibi modelleme araçları kullanılarak güç sistemlerinin tasarımı, kurulabilecek yeni iletim hatlarının, ilave transformatörlerin ve üretim ünitelerinin planlanmasını yaparak güç sistemlerinin en uygun çalışma noktaları bulunur. Son yıllarda artan yenilenebilir enerji santralleri de modellemenin içinde yer alarak güç sistemlerine etkileri tespit edilecektir. Böylece gerçeğe daha yakın senaryolar uygulanarak güç sisteminin veriminin üst seviyelerde tutulması için gerekenler ve oluşabilecek arızalar önceden anlaşılabilecektir.

BÖLÜM 2

ENERJİ SİSTEMLERİ ANALİZİ

Elektrik enerjisi üretim aşamasından tüketicilere ulaşıncaya kadar gerek cihaz etkisi gerekse tesis uygunlukları açısından kontrol ve takip edilmesi gereken bir enerji biçimidir. Enerji gereksinimiyle beraber enerji kaynak çeşidinin de arttığı son dönemlerde diğer enerji türlerine kolay çevrilebilmesi gibi birçok avantaj sağlayan elektrik enerjisinin tüm kaynak etkilerinin bilinmesi gerekir.

2.1 Üretim Sistemi

Elektrik enerjisinin üretimi üretim santrallerinde kurulan çeşitli güç ve bağlantı şeklindeki senkron veya asenkron generatörlerce yapılmaktadır. Üretim tesisinde kullanılan generatör sargıları yıldız bağlı olup, nötr (yıldız) noktası ya doğrudan doğruya toprağa bağlanır veya bir empedans üzerinden topraklanır ya da boşta bırakılır ki, bu takdirde, generatör nötrü yalıtımlı olarak çalışması sağlanır. Ancak yüksek güçlü generatörlerde, yıldız noktası doğrudan toprağa bağlanmaz. Bağlanması durumunda stator sargılarında oluşabilecek bir arıza anında oluşacak yüksek akımlar generatöre zarar verir. Yıldız noktasının yalıtım edilmesi durumunda, faz toprak arızalarını farketmek zorlaşır ve bu durum yalıtım arızalanmalarına yol açar. Bu sebepten dolayı yıldız noktası direnç üzerinden topraklanır.

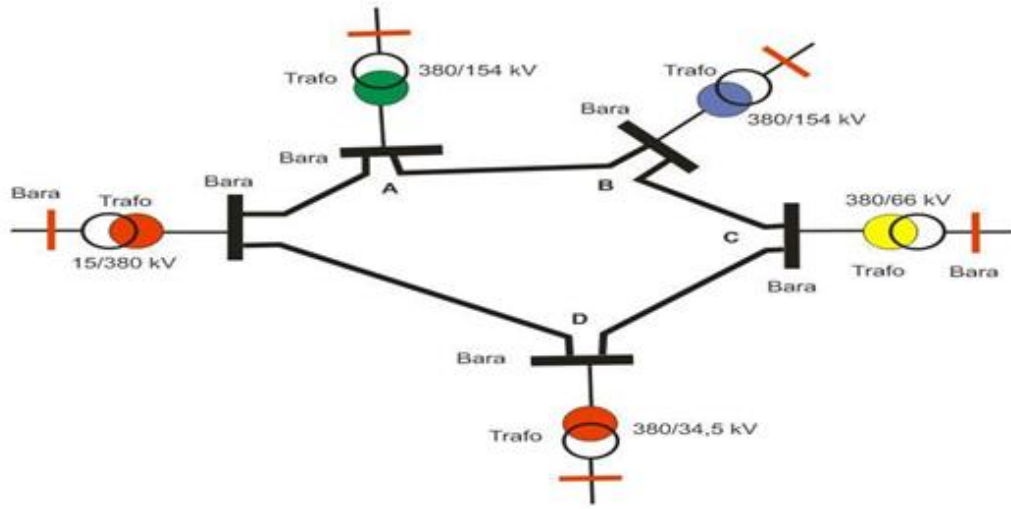
2.2 İletim Sistemi

Doğal enerji kaynaklarının bulunduğu akarsu ve/veya rüzgar arazileri gibi yerlerde üretilen enerjinin tüketici kaynaklara taşınması için enerji iletim hatları gerekir. Enerjinin kaynaktan tüketiciye olan uzaklığı ve gücün miktarı iletim gerilim cinsini, iletim tesisi

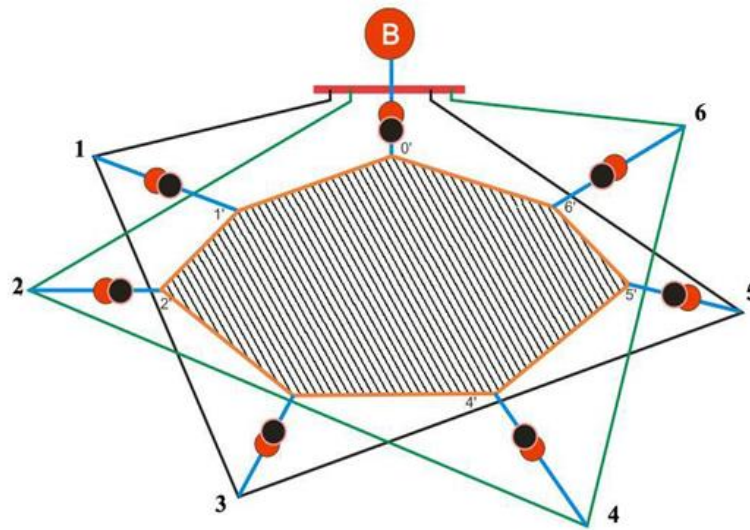
karakteristiklerini (direk, izalatör, kesit v.b.) etkiler. Gerektiği durumlarda indirici trafo merkezleri de şebekeye ilave edilerek iletim tesisi kurulur.

2.3 Dağıtım Sistemi

İletim tesislerinin sonuna kurulan ve yüksek gerilim ile taşınan enerjinin uygun gerilim seviyesine indirmek için kesici ölçü kabinlerinde, MBK ve direk tipi trafo gibi enerji dönüşüm noktalarında güç transformatörleri kullanılır. Elektrik makinası olarak da bilinen bu güç transformatörleri üç fazlı olup çeşitli güç ve bağlantı tiplerinde üretilirler. Örneğin Y-Y bağlantı, Y- Δ bağlantı, Δ -Y bağlantı, Zikzak v.b.



Şekil 2.1 Enerji Dağıtım (Ring Şebeke)

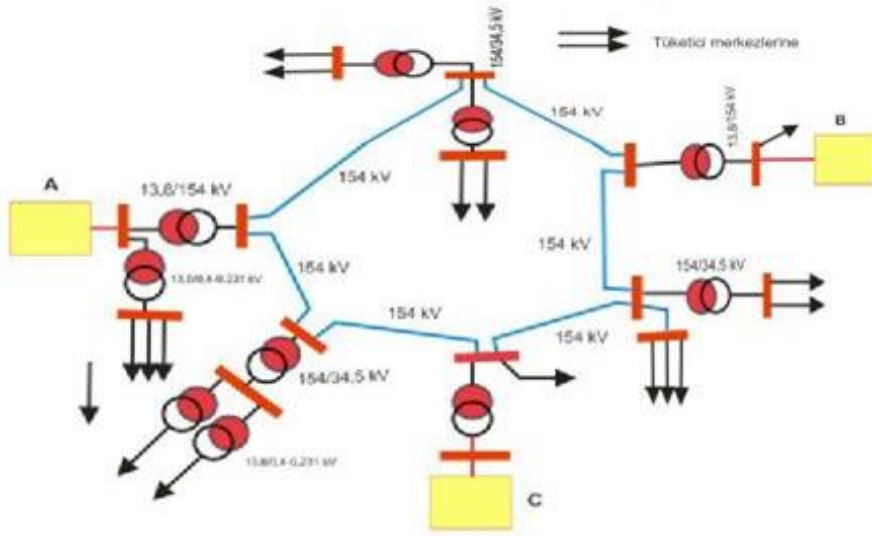


Şekil 2.2 Enerji Dağıtım (Çift Ring Şebeke)

2.4 Enterkonnekte Sistemi

Enerji sektöründeki gelişmelere bağlı olarak her bir bölge için üretilen elektrik enerjisinin tüketim için uygun olmadığı görülmüştür. Buna bağlı olarak üretim için kurulan santrallerinin yerleri ve üretimde kullandıkları yer altı kaynaklarının ekonomik olması istenmektedir. Bu nedenle su santralleri su kuvvetinin ve inşaatının en müsait durum arz eden yere, termik santrallerin ise kömürün çıktığı yere kurulması gerekir. Aynı şekilde taşkömürü, doğalgaz, petrol, rüzgâr ve jeotermal santraller içinde benzer veya özelliklerine göre farklılıklar bulunmaktadır. Elektrik santralleri en müsait yerlerde, muhtelif tip ve kapasitelerde kurulur.

Bunlar bir birlerine yüksek veya çok yüksek gerilim grubuna dâhil olan gerilimlere haiz enerji nakil hatları ile birleştirilerek, mevcut bölgelerin elektrikle beslenmesi gerçekleştirilir. Böylece enerji nakil hatları, bütün bölgenin elektrikleendirilmesini temin edecek şekilde tertip ve tesis edilirler.



Şekil 2.3 Enterkonnekte Şebeke Prensibi

Bir memleketin tamamının veya belli bölgelerinin elektrik enerji ihtiyacını karşılayacak üretim ve tüketim merkezleri arasındaki enerji alışverişini temine yarayan enerji nakil hatlarının teşkil ettiği sisteme genel ağ sistemi (enterkonnekte sistem) denir. Genel ağ sistemini besleyen santraller, muhtelif tip ve kapasitede termik, taşkömürü, doğalgaz, petrol, rüzgâr, jeotermal ve hidroelektrik santraller olabilirler. Bu santrallerdeki alternatörlerin çıkış gerilimleri de; 6,3, 6,9, 10,5, 10,8, 13,8 ve 14,4 kV'tan biri olmaktadır.

Bu nedenle alternatör çıkış gerilimleri, yükseltici trafolar yardımı ile yükseltilerek genel ağ sistemine bağlanmaktadır.

Şekil 2.3'te 154 kV 'luk bir genel ağ şebeke sistemi görülmektedir. Aşağıdaki şekilde belli yerdeki santralde üretilen elektrik enerjisi yükseltici trafo yardımıyla 154 kV 'luk genel ağ şebekesine bağlanarak, alçaltıcı trafolar vasıtasıyla elektrikleştirilen bölgeleri beslediği görülmektedir. Her bölgedeki enerji dağıtımı yukarıda izah edildiği şekilde yapılır. Belli bir yerdeki santral 154 kV 'luk genel ağ sistemini beslemekten başka, bir de kendi bara sistemleri üzerinden bulundukları bölgeyi de doğrudan doğruya besleyebilirler.

Genel ağ şebeke sistemin üretim ve tüketim yönünden emniyetli, kaliteli ve ekonomik olarak işletilmesine devamlı olarak nezaret eden, işletme manevralarının koordinasyon ve kumandasını yapan işletme merkezine, yük tevzi merkezi adı verilir. Böylece bölge santrallerinin gücü, kendi bölgelerini beslemeye yeterli gelmediği zaman, bağlı bulunduğu genel ağ şebeke sisteminden lüzumu kadar enerji çekebilmesi ekonomik olarak sağlanmaktadır [1]. Enterkonnekte çalışmanın avantajları aşağıda belirtildiği gibi sayılabilir;

- Kontrol alanları arasında yardımlaşmalı yük paylaşımı yapılır. Her kontrol alanı sistem yükünü, yük-frekans kontrolü sayesinde kendi üretim kapasitesiyle orantılı olarak paylaşır.
- Kontrol alanının kapasitesinin üzerinde bir yük talebi dahi, ortak yardımlaşma sayesinde enterkonnekte sistem tarafından karşılanabilir.
- Büyük üretim ünitelerinin ekonomik kullanımı ile üretim maliyeti düşürülebilir.
- Enterkonnekte sistemde tüm üretim üniteleri büyük küçük ayrımı yapılmaksızın şebekeye bağlanarak grid yapı kurulur. Böylece bir bölgeyi besleyen bir üretim ünitesi devre dışı kaldığında, tüketiciler enerjilerini komşu üretim ünitelerinden almaya devam edebilirler ya da elektrik enerjisi yalnızca o bölgede kesintiye uğrar.
- Üretim ünitelerinin kontrol rezerv güçleri düşük tutulabilir. Enterkonnekte sisteme bağlı üretim ünitelerinin sayısı ve kapasiteleri arttıkça, ani yük talebi karşısında sistem

frekansının kontrol edilebilmesi için üretim üniteleri tarafından şebekeye aktarılmak üzere tutulması gereken rezerv güç miktarı da azalır.

Yukarıda da belirtildiği gibi enterkonnekte çalışmanın temel amacı, sistemdeki güç dengesinin sağlanması için kontrol alanları arasındaki yardımlaşmayı gerçekleştirmektir. Bu sayede, enterkonnekte güç sistemlerinde, anma frekansının yük değişiminden daha az etkilenmesi sağlanarak tüketiciye kesintisiz ve daha kaliteli elektrik enerjisi sunulabilmektedir.

2.5 Türkiye Enterkonnekte Elektrik Güç Sistemi

Ülkemizde enterkonnekte sistemin temel taşı, 1902 yılında Tarsus'ta ilk elektrik üretim tesisinin kuruluşu ile başlamıştır. Tarsus Bentbaşı mevkiinde kurulu bir su değirmenine bağlı 2 kW gücünde bir dinamo ile elektrik enerjisi üretilerek 1800 m mesafedeki şehir merkezine sokak aydınlatması sağlanabilmektedir. İlk elektrik santrali ise 1914 yılında İstanbul'da kurulan ve toplam gücü 13400 kW olan Silahtar santralidir. Bununla birlikte, Türkiye'de bir elektrik şebekesinin tesisi ile ilgili asıl çalışmalar cumhuriyet dönemiyle başlamıştır. 1924 yılında Ankara'da Bentderesi mevkiinde ve 1928 yılında İzmir'de Darağacı mevkiinde ilk büyük santraller kurulmuştur[2].

1952 yılında, 60 MW kurulu güce sahip Çatalağzı santrali kurulmuş ve aynı dönemde Silahtar santralinin kurulu gücü 70 MW'a yükseltilmiştir. Bu iki santral 66 ve 154 kV ara-bağlantı hatları ile paralel bağlanmış ancak yük tevziinin temel işlevleri olan santraller arası yük paylaşımı ile gerilim ve frekans ayarlanması gibi teknik sebepler nedeniyle 1953 yılında tekrar ayrılmıştır. 1956 yılında işletmeye geçirilen Tunçbilek santrali ile Çatalağzı ve Silahtar santralleri paralel bağlanmış, yük tevzi işletmeciliğini ise Ümraniye trafo merkezi üstlenmiştir. Ardından aynı yıl Adapazarı'nda Kuzey Batı Anadolu Yük Tevzi Merkezi tesis edilmiştir. 1957 yılında Soma santralinin devreye girmesiyle Soma ve Darağacı santralleri paralel bağlanmış ve Batı Anadolu'daki ilk yük tevzi merkezi Bornova trafo merkezinde kurulmuştur. 1958 yılında Kemer ve 1960 yılında Demirköprü santrallerinin devreye girmesinden sonra, paralel çalışan 4 santral ve 7 adet 154 kV'lık trafo merkezi ile Batı Anadolu şebekesi meydana getirilmiştir. 1960 yılında ise Bornova'da bulunan Batı Anadolu Yük Tevzi Merkezi Soma'ya taşınmıştır. Kuzey Batı Anadolu ve Batı Anadolu Yük Tevzi Merkezleri 1963 yılına kadar birbirinden bağımsız

alışmış, 1963 yılında kurulan 154 kV'luk Göbel – Bursa ara-bağlantı hattı ile Kuzey Batı Anadolu ve Batı Anadolu şebekeleri birleştirilmiştir. Her iki şebekenin yük tevzi görevi Kuzey Batı Anadolu Yük T evzi Merkezine devredilmiştir. Kuzey Batı Anadolu Yük T evzi Merkezi bugünkü anlamda ilk Milli Yük T evzi Merkezi olmuştur. Batı Anadolu Yük T evzi Merkezi 1976 yılında İzmir Işıkent'e taşınmıştır. 1959 yılında Hirfanlı'da Orta Anadolu Yük T evzi Merkezi kurulmuştur. Bu merkez 1988 yılında Glbaşına taşınmıştır. 1971 yılında Adana Seyhan'da Çukurova Elektrik A.ř. Yük T evzi Merkezi kurulmuş, ardından 1972 yılında Samsun'da Kuzey Doğu Anadolu Yük T evzi Merkezi kurulmuştur. Bu merkez de 1985 yılında arşamba'ya, 2005 yılında ise tekrar Samsun'a nakledilmiştir. 1974 yılında Keban'da Güney Doğu Anadolu Yük T evzi Merkezi kurulmuştur. 1984 yılında ise Gölbaşı'nda Ulusal Yük T evzi Merkezi kurulmuş ve o güne kadar Kuzey Batı Anadolu Yük T evzi Merkezi tarafından yürütülen ulusal yük tevzi merkezi işlevini devralmıştır. Bundan sonra ise 2002 yılında İstanbul İkitelli'de Trakya Yük T evzi Merkezi, 2004 yılında Erzurum'da Doğu Anadolu Yük T evzi Merkezi ve 2004 yılında Antalya'da Kepez Yük T evzi Merkezleri kurulmuştur [2].

Ülkemizde halen toplam kurulu gücü 61984 MW, yıllık toplam üretim kapasitesi 5430 milyar kWh ve verilere göre toplam puant yükü 38455 MW olan 400 kadar santral vardır ve bu santraller Türkiye enterkonnekte g sistemini oluşturmak üzere birbirlerine paralel bağlanmıştır. Oluşturulan enterkonnekte sistem, bir adet Milli Yük T evzi Merkezi (Gölbaşı) ve dokuz adet Bölgesel Yük T evzi Merkezi (Adapazarı, arşamba, Keban, İzmir, Gölbaşı, İkitelli, Erzurum, Çukurova ve Kepez) ile izlenip yönetilmektedir. Sistemin işletilmesi, 380 kV trafo merkezlerini ve 50 MW'ın üzerindeki tüm santralleri kapsayan bir SCADA ve Enerji İşletim Sistemi Programı ile yapılmaktadır. Bu sayede sistem işleticisi, gerekli olan her türlü sistem çalışmasını, günlük işletme programlarını ve yük frekans kontrolünü otomatik olarak gerçekleştirebilmektedir. 30 Kasım 2013 tarihi itibarıyla TEİAş'dan alınan toplam kurulu gücün enerji kaynaklarına göre ayrımı izelge 2.1'de gösterilmiştir [3].

Çizelge 2.1 Türkiye enterkonnekte güç sisteminde toplam kurulu gücün enerji kaynaklarına göre dağılımı.

Enerji Kaynağına Göre Kurulu Güç	
Termik	37175,5 MW
Hidrolik	21875 MW
Rüzgar	2694,6 MW
Jeotermal	310,8 MW
Toplam	62663,9 MW

Ülkemizin enterkonnekte sistemi halen tüm komşu ülkelerin sistemleri ile bağlantı kurmuş durumdadır. Bulgaristan, Yunanistan, Suriye, Irak ve İran ile 380 kV, Gürcistan ve Ermenistan ile 220 kV ve Azerbaycan ile 154 kV ara-bağlantı hatları mevcuttur. Bununla birlikte, Türkiye'nin Avrupa enterkonnekte sistemine bağlanması için de çalışmalar, Avrupa enterkonnekte sisteminin genişletilmesinden sorumlu kuruluş olan Avrupa Elektrik İletimi Koordinasyon Birliği (UCTE) ile 28 Eylül 2005 tarihinde başlatılmıştır. Amacı 22 Avrupa ülkesi arasında kurulu olan Avrupa enterkonnekte sisteminin, güvenilir bir şekilde planlanması, işletilmesi ve tüketicilere kaliteli, yeterli ve ucuz elektrik enerjisi sağlanması olan; bu amaçla da farklı güç sistemlerinin senkronize bir şekilde işletilmesini sağlayan UCTE, Avrupa enterkonnekte sistemi üzerinden 500 milyondan fazla insana elektrik enerjisi sağlamaktadır. Bu sisteme bağlanmasıyla birlikte; Türkiye elektrik üretiminin, Avrupa enterkonnekte sistemi ile yük paylaşımı yaparak gelecekteki puant talebini daha rahat karşılamasının yanında, enerji tedarikçisi olarak Avrupa pazarına açılması ile önemli ticari kazanımlar da sağlanmış olacaktır [4]. Bununla birlikte Türkiye enterkonnekte sisteminin, Avrupa enterkonnekte sistemine bağlanması için UCTE tarafından belirlenmiş bazı kriterlerin karşılanması gerekmektedir. Bu kriterler, 22 Ocak 2003 tarihinde yeniden düzenlenerek uygulanmaya başlanan Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği ile üretim üniteleri için yasal yükümlülük haline getirilmiştir. Bu kriterlerin en önemlilerinden birisi güç sisteminin anma frekansının kontrolüdür ve ülkemizde buna

yönelik olarak ikincil kontrol içeren yük-frekans kontrolü yalnızca Atatürk, Keban ve Karakaya gibi büyük hidroelektrik santrallerinde uygulanmaktadır. Bununla beraber, Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği ile “Sistemin anma frekansı, TEİAŞ tarafından 50 Hz etrafında ve 49,8 - 50,2 Hz aralığında kontrol edilir.” denilmektedir ve bu amaçla, “50 MW ve üzerinde ünite gücüne veya toplam 100 MW ve üzerinde kurulu güce sahip üretim tesisleri zorunlu yan hizmetler anlaşması kapsamında birincil frekans kontrolüne katılmakla yükümlüdürler. Bu tesisler ile ayrıca, ticari yan hizmetler anlaşması kapsamında da ikincil frekans kontrolü yapılır.”

Yükümlülüğü getirilmiştir[4]. Ülkemizde, uygun olan tüm santraller için bu hüküm yerine getirildiğinde, enterkonnekte sisteme bağlı daha fazla üretim ünitesi yük frekans kontrolüne katılacak ve enterkonnekte çalışmanın sunduğu yardımlaşma sayesinde ani yük değişimlerinde oluşan frekans sapmaları UCTE tarafından belirlenen değerlerde tutularak tüketiciye daha kaliteli elektrik enerjisi sunulabilecektir.

BÖLÜM 3

GÜÇ AKIŞI

Güç sisteminin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan analiz, yük akış analizidir. Yük akış kontrolü, güç üretim sistemlerinin tüm tüketim baralarındaki talebi karşılamak amacıyla üretim santrallerinde üretilen enerjinin, iletim-dağıtım hatlarında ve transformatörlerdeki değişimin analizlerle hesaplanmasıdır[5].

Enterkonnekte güç sistemlerinde iletim-dağıtım hatlarının ve güç transformatörlerin aşırı ve dengesiz yüklenmemesi, tüm baralardaki gerilimlerin uygun limitlerde kalması ve jeneratörlerin reaktif üretimlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalması gereklidir.

Güç sistemlerinde yük akışı analizleri güç sistemlerinin planlanmasında, kontrolünde ve işletilmesinde kullanıldığı gibi, gelecekte tesis edilecek santral ve iletim-dağıtım tesislerinin planlanmasında da kullanılır.

Güç sistemlerinin modellenmesi ve güç akışının kontrol edilmesi enterkonnekte sistemin güvenilir ve sağlıklı bir şekilde işletilmesi için önemlidir. Ayrıca yeni üretim tesislerinin veya tüketicilerin sisteme bağlanmasını ya da ilave edilen iletim hattının devreye girmeden önce etkilerinin bilinmesi önemlidir. Elektrik tesislerinin yük akışı analizleri ile güç faktörünün belirlenmesi baralardaki gerilimlerin yükseltilmesi için kapasitörlerin sisteme konulacağı en uygun yerin ve kapasitelerinin belirlenmesi açısından gereklidir.

Ayrıca güç sistemlerinde yük miktarı analizi veya güç analizi ile belirlenen işletme koşulunda, sistemdeki aşırı ve dengesiz yüklenen hatların ve iletim-dağıtım hattı limitlerinin belirlenmesi mümkündür. Sistemdeki bir iletim-dağıtım hattının veya

jenaratörün devre dışı olması durumunda enterkonnekte sisteme etkisini kontrol ve incelemek için yapılan analiz ile sistem güvenilirliği kontrol altında tutulur.

Güç akışı analizi veya yük akışı analizi bir güç sisteminin mevcut tesis karakterizasyonunu modeller. Bilinen yük akışı analizlerinin sonuçları bara gerilimleri ve arıza akımlarıdır. Güç akışı analizi güç sistemi planlaması ve kontrolünde büyük öneme sahiptir. Güç sistemi yükleri kesici ölçü kabinlerinde, büyük güçlü tüketicilerde, tüm elektrik üretici santrallerde, iletim-dağıtım hatlarında yakından ve önemle takip edilirler. Saatlik, günlük, haftalık ve mevsimlik yük tahminleri yapılabilmektedir. Piyasa Mali Uzlaştırma Merkezi(PMUM) tarafından yapılan tahminler ile üretim ve planlama amaçları hedeflenmekte ve yıllık tepe yük talebi ve elektrik şirketleri için enerji tahminleri yapılmaktadır. Yük akışı analizinin amacı; bara gerilimleri, hat, transformatör, kablo güç akışları, empedansları ve yükleri hesaplayarak, üretimleri belirleyerek enerji talebini karşılayarak arz güvenliği oluşturmaktır. Sürekli çalışma koşulu altında, dengeli ve üç fazlı enerji sistemlerinde kullanılan güç akışı algoritması genellikle aşağıdaki kabuller üzerine kuruludur;

1. Üretim tesislerindeki generatörler enterkonnekte sisteme bağlı tüm yük taleplerini ve iletim hatlarındaki toplam güç kaybını karşılar.
2. Tüm bara gerilim genlikleri nominal gerilim sınırları civarındadır.
3. Generatörler kendilerine ait aktif ve reaktif güç sınırlarını aşmazlar.
4. İletim hatları ve transformatörler aşırı yüklenmezler.

Bir güç sistemindeki yük akışı analizinin amacı; bara gerilimlerini hat, transformatör, kablo, güç akışlarını, empedanslarını, yükleri hesaplamak ve üretim kapasitelerini belirlemektir. İdeal olarak bir güç sisteminin çalışması için hesaplanmış bara gerilimleri kabul edilebilir sınırlar içinde olmalıdır.

Güç akışı analizinde yukarıda açıklanan temeller altında bara gerilimleri ve hat akımları bulunur. Yük akışı analizinde her barada dört parametre vardır. Bunlar sırasıyla gerilimin genliği V , gerilimin açısı (δ), aktif güç(P) ve reaktif güçtür (Q). Bunlardan en az ikisi belli iken diğer ikisi hesaplanabilir. Çoğu baralar için P ve Q güçleri bellidir. Buradan V ve δ hesaplanır. P ve Q değerlerinin belli olmadığı baralardan dolayı sistem kayıpları daha

önceliklidir. Bu yüzden besleme baralarından biri salınım barası olarak seçilmelidir. Yani bu baranın P gücü kayıpları da karşılayacaktır. Salınım barası genellikle merkezde ve en büyük generatör olarak seçilir. Bu generatörün gerilim açısı

$\delta = 0$ olarak alınır.

Çizelge 3.1 Güç sistem baralarının yük akışı için sınıflandırılması

Baralar	Bilinenler	Bilinmeyenler
PQ (yük barası)	P,Q	V, δ
PV (besleme barası)	P,V	δ ,Q
V δ (salınım barası)	V, δ	P,Q

Güç sistemi analizi hesabında genellikle yük akışı programları dengeli, üç fazlı, sinüsoidal sürekli hal koşulları altında yazılarak oluşturulur. Algoritma sonlandırıldığında sistemdeki tüm bara gerilim genlik ve açıları, gerilim düşümleri, iletim hatları üzerinden akan aktif ve reaktif güçler ve sisteme ilişkin toplam güç kaybı hesaplanmış olur. Sistem yükleri aktif ya da reaktif güç olarak verildiğinden, generatörler gerilim ya da akım kaynağı yerine güç kaynağı olarak modellendiğinden bilinen düğüm ve çevre denklemleri çalışan yük veya güç akışı için uygun olmamaktadır. Bu nedenle aşağıda güç veya yük akışı hesaplamalarında kullanılan yöntemler tanıtılmıştır[4].

3.1 Güç Akışı Hesaplamaları

Bara sayısı n adet olan simetrik ve dengeli bir enerji sisteminde i. baradan alternatif akım hattına verilen kompleks güç birim değeri olarak (tek faz için)[6];

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (3.1)$$

ifadesi ile yazılır. Yukarıda verilen akım fazörü eşlenik değeri, bara gerilimleri ve sistem elemanlarının admitansları cinsinden yazılırsa;

$$I_i^* = \sum_{j=1}^n Y_{ij}^* V_j^* \quad (3.2)$$

Olur. (3.1) ifadesindeki V_i ifadesi yerine,

$$\underline{V_i} = V_i(\cos\delta_i + j\sin\delta_i) \quad (3.3)$$

ifadesi konulabilir. V_i ; i. baraya ilişkin kompleks değerde bara gerilimidir. V_j^* ise j. barayla ilgili eşlenik bara gerilim değeridir. δ_i ; verilen bir referansa (genellikle salınım barasına) göre i. baranın gerilim faz açısıdır. (3.2) eşitliğinde kullanılan y_{ij} admitansı, ybara admitans matrisinin $[y_{\text{bara}}]$ (i,j) elemanı olup [6],

$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (3.4)$$

ifadesiyle açıklanabilir. (3.2),(3.3) ve (3.4) eşitlikleri (3.1) ifadesinde yerine konularak, ifade düzenlenirse;

$$S_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j^* (g_{ij} \cos \delta_{ij} + j \sin \delta_{ij}) + jv_i \sum_{j=1}^n V_j^* (g_{ij} \sin \delta_{ij} + b_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (3.5)$$

(i=1,2,...,n)

olur. (3.5) eşitliğinde kullanılan δ_{ij} ,

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j \quad (3.6)$$

Değerinde olup, i. ve j. bara gerilim fazörlerinin açıları arasındaki faz farkıdır. Yukarıda (3.5) eşitliği reel ve sanal kısımlarına ayrılırsa, i. baradan alternatif akım hattına verilen aktif ve reaktif güç değerleri;

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j^* (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3.7)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j^* (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (3.8)$$

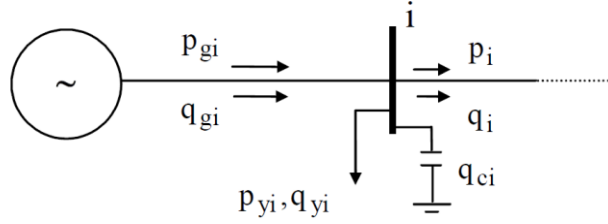
olur. i. baraya bağlı generatör aktif gücü P_{gi} , i. baraya bağlı yükün aktif bileşeni P_{yi} ve i. baraya bağlı tüm hatlara verilen aktif güç değeri P_i ise, i. baradaki aktif güç dengesinden,

$$P_{gi} = P_{yi} + P_i \quad (3.9)$$

ifadesiyle yazılabilir. i. baraya bağlı generatör reaktif gücü Q_{gi} , i. baraya bağlı kontrol edilebilen şönt reaktif üreteç güç değeri Q_{ci} (bu üreteç güç katsayısını düzeltici bir kapasite olabileceği gibi senkron bir makinede (senkron kondenser) olabilir), i. baraya bağlı yükün reaktif bileşeni Q_{yi} ve i. baraya bağlı tüm hatlara verilen reaktif güç değeri Q_i ise, i. baradaki reaktif güç dengesinden,

$$Q_{gi} + Q_{ci} = Q_{yi} + Q_i \quad (3.10)$$

olur.



Şekil 3. 1 Genel bir bara gösterimi

Şekil 3.1'deki bara için güç veya yük akış algoritması .

$$P_i - (P_{gi} - P_{yi}) = P_i - P_{hati} = 0 \quad (i=2,3,\dots,n) \quad (3.11)$$

$$Q_i - (Q_{ci} - Q_{yi}) = Q_i - Q_{hati} = 0 \quad (i=ng+1,\dots,n) \quad (3.12)$$

Denklemlerini sağlanması durumunda son bulur. (3.12) 'deki ifadede ng; sistem içindeki toplam generatör sayısını göstermektedir. Enerji iletim sistemlerinde her bir baranın tüm karakteristikleri dört değişken yardımı ile belirlenmektedir. Bunlar; P_{hati} , Q_{hati} , V_i ve δ_i değerleridir. Güç veya yük akışında bu değişkenlerden her bir barada iki tanesinin bilindiği kabul edilerek, bilinmeyen diğer ikisi bulunmaya çalışılır. Buradaki değişkenlere bağlı olarak baraların üç grup içerisinde incelenir;

1. Serbest (salınım) bara olarak bilinen bara türünde V_i ve δ_i değerleri bilinir. Yani bu değerler sabit tutulmaya çalışılarak, P_{hati} , Q_{hati} değişkenleri hesaplanır.
2. Diğer bara türü P_{hati} ve V_i değerlerinin bilindiği için, Q_{hati} ve δ_i değerlerinin arandığı PV olarak sembolize edilen gerilim kontrollü bara veya generatör barasıdır. Eğer bu baraya generatör bağlı ise P_{gi} (dolayısı ile P_{hati}), türbin karakteristikleri değiştirilir. Ve V_i ise makinanın uyarmasına etki yapan otomatik gerilim regülatörleri yardımıyla ayarlanarak sabit tutulmaya çalışılmaktadır. Eğer barada şönt olarak bir reaktif güç üreticisi varsa, reaktif gücü ayarlayan kontrol devresi yardımıyla V_i sabit tutulabilir.
3. Üçüncü bara türü ise P_{hati} ve Q_{hati} değerlerinin bilinip V_i ve δ_i değerlerinin arandığı PQ yük barasıdır. Bu baralar genellikle şehir ve sanayi baralarına karşı gelmektedir.

3.2 Gauss Seidel Metodu ile Güç Akış

Güç akışında hesaplanması gereken veriler bu metod ile bilinmeyenlerin başlangıç değerleri tahmin edilir, ilk eşitlikte elde edilen değer V_1 , eşitlikte yerine konulursa V_2 'nin hesaplanmasında kullanılır. Bu işlem, her yakınsama kriterini sağlayana kadar devam eder[4].

Ohm yasasından bilindiği üzere,

$$[I_{\text{bara}}] = [Y_{\text{bara}}][V_{\text{bara}}] \quad (3.13)$$

Matris eşitliği açıkça yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{12} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2n} \\ Y_{13} & Y_{23} & Y_{33} & \dots & Y_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{1n} & Y_{2n} & Y_{3n} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

ifadesi elde edilir. Yukarıdaki (3.13) eşitliğinde bilinmeyen $[V_{\text{bara}}]$ elemanlarının olduğu kabul edilerek, (3.14) eşitliğinde gerilim değerleri yalnız bırakılırsa, (i+1). Gauss-Seidel iterasyonu sonunda;

$$V_1^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{11}} \left(I_1^{(i)} - Y_{12}V_2^{(i)} - Y_{13}V_3^i \dots - Y_{1n}V_n^i \right) \quad (3.15)$$

$$V_2^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{22}} \left(I_2^{(i)} - Y_{21}V_1^{(i)} - Y_{23}V_3^i \dots - Y_{2n}V_n^i \right) \quad (3.16)$$

$$V_3^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{33}} \left(I_3^{(i)} - Y_{31}V_1^{(i)} - Y_{32}V_2^{(i)} \dots - Y_{3n}V_n^i \right) \quad (3.17)$$

$$V_n^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{nn}} \left(I_n^{(i)} - Y_{n1}V_1^{(i)} - Y_{n2}V_2^{(i)} \dots - Y_{nn}V_n^i \right) \quad (3.18)$$

ifadeleri elde edilir. Yukarıdaki (3.15), (3.16), (3.17) ve (3.18) eşitliklerinde görülen

I_i (akım vektörü elemanları), güç cinsinden;

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^{(i)*}} \quad (3.19)$$

olarak yazılabilir. Son ifade, gerilim eşitliklerinde yerine konulursa (3.14), (3.15), (3.16) ve (3.17) ifadeleri kısaca; (1 numaralı bara salınım barası yani referans barası olarak kabul edilirse)

$$V_k^{(i+1)} = \frac{1}{y_{kk}} \left(\frac{P_k - jQ_k}{V_k^{(i)*}} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n y_{kj} V_j^{(i)} \right) \quad (k=2,3,\dots,n) \quad (3.20)$$

olur. Salınım barası bir numaralı bara kabul edildiği için, bu baranın gerilim genlik ve açısı bilindiği kabul edilir. Ve (3.20) eşitliğine $k=2$ 'den başlanarak Gauss-Seidel metodu uygulanır.

Örnek olarak k. bara (PQ) yük barası olsun. Yük barasında P ve Q değerleri bilindiği için yalnızca V değerlerine ihtiyaç vardır. İlk döngüde ($i=0$ için) (3.20) eşitliği,

$$V_k^{(1)} = \frac{1}{y_{kk}} \left(\frac{P_k - jQ_k}{V_k^{*(0)}} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n y_{kj} V_j^{(0)} \right) \quad (3.21)$$

olur. Yakınsamayı daha hızlı sağlamak için aynı (k.) bara numarası için (3.18) işlemi bir kaç kere (genellikle iki kere) daha tekrarlanır. Ancak önceden yapılandan farklı olarak, (3.21) eşitliği ile elde edilen $V_k^{(1)}$ değerinin eşleniği alınarak, (3.21) eşitliğinde, (tekrar edilen her iki iterasyonda da) $V_k^{*(0)}$ yerine konulur. Bu işlem geri kalan PQ baraları ve aşağıda anlatılan şekliyle tüm PV baraları için (3.15), (3.16), (3.17) ve (3.18) eşitliklerinde gösterilen iterasyon adımlarıyla tekrar yapılır. Aşağıdaki (3.22) eşitsizliği sağlanınca algoritma tamamlanır.

$$\left| x_k^{i+1} - x_k^{(i)}(0) \right| \leq \varepsilon \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (3.22)$$

PV generatör barası m. bara ise yukarıda anlatılan adımlar tümüyle aynen uygulanmaz. Çünkü (3.20) ifadesinde Q değeri bilinmemektedir (ilk iterasyonda tahmini bir değer konulsa bile sonraki iterasyonlarda Q yerine konulacak değer bilinemez). Generatör akımı;

$$I_g = \frac{P_g - jQ_g}{V_m^*} = y_{m1} V_1 + y_{m2} V_2 + y_{m3} V_3 + \dots + y_{mn} V_n \quad (3.23)$$

ya da

$$P_g - jQ_g = V_m^{(i)*} \left[\sum_{j=1}^n y_{mj} V_j^{(i)} \right] \quad (3.24)$$

Eşitlikleri yardımıyla bulunabilir. Yukarıdaki (3.24) eşitliğinin sanal kısmı alınır;

$$Q_g = -I_m \left[V_m^{(i)*} \left(\sum_{j=1}^n y_{mj} V_j^{(i)} \right) \right] \quad (3.25)$$

ifadesi elde edilir. Yukarıdaki (3.25) eşitliğinde tüm gerilim değerleri yerlerine konularak (ilk iterasyonda $V(0)$, sonraki iterasyonlarda ise bir önceki iterasyondan elde edilen V değerleri kullanılarak) Q_g değeri bulunur. Eğer bulunan Q_g değeri veri dosyasında verilen Q_{gmax} değerinden büyükse $Q_g = Q_{gmax}$ alınır. Şayet bulunan Q_g değeri veri dosyasında verilen Q_{gmin} değerinden küçükse $Q_g = Q_{gmin}$ alınarak, bulunan Q_g değeri (3.20) denkleminde yerine konulur. PV baralarına ilişkin gerilim fazörlerinin hesaplanması, PQ baralarına ilişkin gerilim fazörlerinin hesaplanması gibi yapılır. Hesaplanan gerilim genlik değeri veri dosyasında verilen V_{gmax} değerinden büyükse $V_g = V_{gmax}$ alınır. Şayet bulunan V_g değeri veri dosyasında verilen V_{gmin} değerinden küçükse $V_g = V_{gmin}$ alınır. Fakat her iki durumda da hesaplama sonunda elde edilen gerilim açısı değeri muhafaza edilerek, bir sonraki iterasyonda aynen kullanılır.

Güç akışı analizi yapılacak tüm bara gerilim genlik ve açıları bulunduktan sonra (3.7) ve (3.8) eşitliklerinde $i=1$ konularak salınım barasına ilişkin generatör aktif ve reaktif güç değerleri elde edilir.

3.3 Newton Raphson Metodu ile Güç Akışı

Güç akışı analizinde kullanılan Newton-raphson metodunda, hesaplanamayan değerler için tahmini değerler atanır, Fonksiyonla ilişkilendirilmiş bağımsız değişkenler için hata düzeltmesi yapılarak, fonksiyondaki düzeltme sıfıra götürülür. Hatanın sıfıra gitmesi için, fonksiyon x_0 civarında Taylor serisine açılarak, iterasyon ile çözüme ulaşılmaya çalışılır. Bir güç sistemindeki sistem yükleri aktif ya da reaktif güç olarak verildiğinden, generatörler gerilim ya da akım kaynağı olarak değil de güç kaynağı olarak modellendiği için, bilinen düğüm ve çevre denklemleri, çalışılan yük akışı için uygun olmamaktadır. Güç karakteristiklerinin kullanılmasıyla lineer olmayan denklemler algoritmamızda yer almaktadır. Bu nedenle güç akışı algoritmasında Newton-Raphson yöntemi kullanılmaktadır.

Lineer olmayan bir matris denklemi [7];

$$\begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} = [y] \quad (3.26)$$

olarak verilsin. Bu eşitlik Taylor serisine açılır, ikinci ve daha yüksek terimler ihmal edilir ise, (3.26) eşitliğini sağlayan x değerleri (i+1). iterasyonda;

$$[x(i+1)] = [x(i)] + [J^{-1}(i)][y - f(x(i))] \quad (3.27)$$

eşitliği kullanılarak bulunur. Yukarıdaki (3.27) denkleminde geçen $[y - f(x(i))]$ vektör matrisi, (3.11) ve (3.12) eşitliklerinde verilen iki alt vektör matrisin, tek bir vektör matrisi olarak ifade edilmesiyle elde edilir. $[y]$ vektör matrisi (3.11) ve (3.12) eşitliklerinde görüldüğü gibi iterasyon adımından bağımsızdır. Yine de herhangi bir iterasyon sonunda,

$$|x(i+1) - x(i)| \leq \varepsilon \quad (3.28)$$

ifadesi sağlanırsa Newton-Raphson algoritması sonlanır, aksi halde en son iterasyondaki x değerleri bir sonraki iterasyonda başlangıç değerleri olarak kullanılır. Ve algoritma kaldığı yerden devam eder. Yukarıdaki (3.27) ifadesindeki $[J]$, Jacobian matrisi olarak adlandırılır ve $(n \times n)$ boyutundadır;

$$[J(i)] = \left[\frac{df}{dx} \right]_{x=x(i)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{x=x(i)} \quad (3.29)$$

Güç akışı algoritmasında yukarıda verilen kabuller altında Taylor açılımı kullanıldığı takdirde, (3.27)'de verilen ifadeler yukarıdaki bölüm 3.1'de verilen ifadelerle karşılaştırılmalıdır. Bu durumda;

$$[x]^T = [\delta_2 \dots \delta_n \ v_{ng+1} \dots v_n] \quad (3.30)$$

$$[y]^T = [P_{hat2} \dots P_{hatn} \ Q_{hat(ng+1)} \dots Q_{hatn}] \quad (3.31)$$

$$[f(x)]^T = [P_2 \dots P_n \ Q_{(ng+1)} \dots Q_n] \quad (3.32)$$

Olacaktır. Jacobian matris ifadesi yukarıda (3.29)'da gösterilmiş olup, Jacobian matris elemanları (matrisin ana köşegen ve ana köşegen dışı elemanları için);

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial p_2}{\partial \delta_3} & \cdot & \cdot & \frac{\partial p_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial p_2}{\partial v_{ng+1}} & \frac{\partial p_2}{\partial v_{ng+2}} & \cdot & \cdot & \frac{\partial p_2}{\partial v_n} \\ \frac{\partial p_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial p_3}{\partial \delta_3} & \cdot & \cdot & \frac{\partial p_3}{\partial \delta_n} & \frac{\partial p_3}{\partial v_{ng+1}} & \frac{\partial p_3}{\partial v_{ng+2}} & \cdot & \cdot & \frac{\partial p_3}{\partial v_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial p_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial p_n}{\partial \delta_3} & \cdot & \cdot & \frac{\partial p_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial p_n}{\partial v_{ng+1}} & \frac{\partial p_n}{\partial v_{ng+2}} & \cdot & \cdot & \frac{\partial p_n}{\partial v_n} \\ \hline \frac{\partial q_{ng+1}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial q_{ng+1}}{\partial \delta_3} & \cdot & \cdot & \frac{\partial q_{ng+1}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial q_{ng+1}}{\partial v_{ng+1}} & \frac{\partial q_{ng+1}}{\partial v_{ng+2}} & \cdot & \cdot & \frac{\partial q_{ng+1}}{\partial v_n} \\ \frac{\partial q_{ng+2}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial q_{ng+2}}{\partial \delta_3} & \cdot & \cdot & \frac{\partial q_{ng+2}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial q_{ng+2}}{\partial v_{ng+1}} & \frac{\partial q_{ng+2}}{\partial v_{ng+2}} & \cdot & \cdot & \frac{\partial q_{ng+2}}{\partial v_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial q_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial q_n}{\partial \delta_3} & \cdot & \cdot & \frac{\partial q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial q_n}{\partial v_{ng+1}} & \frac{\partial q_n}{\partial v_{ng+2}} & \cdot & \cdot & \frac{\partial q_n}{\partial v_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial \delta_i} = J1(i, i) = V_i \sum_{j=1}^n V_j (-g_{ij} \sin \delta_{ij} + b_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial \delta_j} = J1(i, j) = V_i V_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial v_i} = J2(i, i) = V_i \sum_{j=1}^n V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) + 2V_i g_{ii} \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial v_j} = J2(i, j) = V_i (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial \delta_i} = J3(i, i) = V_i \sum_{j=1}^n V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial \delta_j} = J3(i, j) = -V_i V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial v_i} = J4(i, i) = V_i \sum_{j=1}^n V_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) - 2V_i b_{ii} \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial v_j} = J4(i, j) = V_i (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (3.41)$$

olur. Newton-Raphson algoritması sonlandırıldığında x durum değişkenleri vektörü elde edilmiş olur. PV baralarında ise Q_g değerleri bilinmediğinden tüm PV (referans barası dahil) baraları için (3.8) eşitliği kullanılarak Q_i ($i=1, \dots, ng$) değerleri aranarak, bulunur. Daha sonra yine tüm PV baralarına (3.12) eşitliği uygulanarak bilinmeyen tüm Q_g (referans

barası dahil) değerleri elde edilir. Referans barasına ilişkin P_{g1} generatör aktif gücünü bulmak için önce (3.7) eşitliğinde $i=1$ için P_1 elde edilir. Ardından bulunan bu değer (3.11) ifadesinde $i=1$ için yerine konularak, P_{g1} elde edilir. Hatlarda kaybolan aktif güç değeri ise;

$$\sum_{i=1}^{ng} P_{gi} - \sum_{j=1}^n P_{yj} = \text{Toplam aktif güç kaybı} \quad (3.42)$$

ile elde edilir. Güç akışı hesaplamaları tamamlandıktan sonra iki bara arasındaki hattan akan aktif ve reaktif güç değerlerini bulmak için aşağıdaki şekil 3.2. eşitliği kullanılır. i. ve j. baraların arasındaki hattın admitansı y_{ij} , hattın π eşdeğer devresi kullanıldığında, her bir baraya bağlanan hattın şönt admitans değeri y'_{ij} olarak alınırsa, i. ve j. baralar arasındaki hattan akan kompleks güç;

$$S_{ij} = P_{ij} + Q_{ij} = V_i(V_i^* - V_j^*)y_{ij}^* + V_i V_i^* \left(\frac{y'_{ij}}{2}\right)^* \quad (3.43)$$

olarak ifade edilir. i. ve j. baralar arasındaki hattan akan aktif ve reaktif güç değeri;

$$P_{ij} = \text{Re} \left\{ V_i(V_i^* - V_j^*)y_{ij}^* + V_i V_i^* \left(\frac{y'_{ij}}{2}\right)^* \right\} \quad (3.44)$$

$$Q_{ij} = -\text{Im} \left\{ V_i(V_i^* - V_j^*)y_{ij}^* + V_i V_i^* \left(\frac{y'_{ij}}{2}\right)^* \right\} \quad (3.45)$$

Denklemleri kullanılarak bulunur.

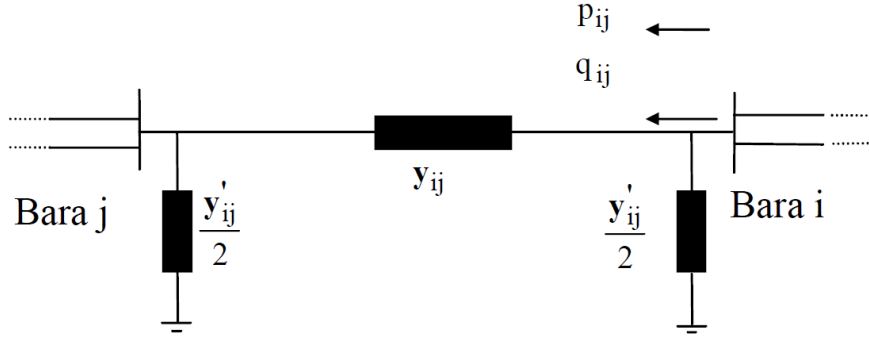
Başlangıç değerleri (3.46),(3.47),(3.48) formüllerine gösterilmiştir.

$$\Delta P_i^k = P_i^{sch} - P_i^k \quad (3.46)$$

$$\Delta Q_i^k = Q_i^{sch} - Q_i^k \quad (3.47)$$

$$\Delta \delta_i^{k+1} = \delta_i^k + \Delta \delta_i^k \quad (3.48)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^k| - \Delta |V_i^k| \quad (3.49)$$



Şekil 3. 2 İki bara arasındaki hattın aktif ve reaktif güçler

Güç akışı sonunda bazı değişken değerleri kendilerine ilişkin minimum ve maksimum sınırları aşarsa algoritmada bazı değişiklikler yapılması gerekir.

1-) Bir güç sistemindeki güç akışı analizi sonucunda PQ baralarından birisinde, bara gerilim genlik değeri sınır değerlerinden uzaklaşmış ise (alt sınırın altına düşmüş ya da üst sınırın üstüne çıkmış) bu bara için $V = V_{\min}$ ya da $V = V_{\max}$ alınarak, Q_y (baradan çekilen reaktif güç) değeri serbest bırakılır. Bu durumda bara, PQ yük barası olmaktan çıkarılıp, PV barası yapılmaktadır. Bu baraya ilişkin aktif güç değeri ise $P_y = P_{\text{gen}}$ alınarak, bu yeni değerler veri kabul edilerek güç akışı algoritmasının yeniden analiz edilmesi gerekir. Analiz sonunda mevcut baranın alternatif akım sisteminden çektiği reaktif güç değeri ilgili eşitliklerle elde edilir.

2-) Güç akışı çalışması sonucunda PV baralarından birisinde (bara gerilim genlik değeri sabit tutulmaya çalışılırken) bu baraya ilişkin reaktif güç değeri sınır değerlerinden uzaklaşmış ise (alt sınırın altına düşmüş ya da üst sınırın üstüne çıkmış) bu bara için $Q = Q_{\min}$ ya da $Q = Q_{\max}$ alınarak, V (bu baraya ilişkin bara gerilim genlik) değeri serbest bırakılır. Bunun sonucunda bara, PV barası olmaktan çıkarılıp PQ yük barası yapılmaktadır. Bu baraya ilişkin aktif güç değeri ise $P_{\text{gen}} = P_y$ alınarak, bu yeni değerler veri kabul edilerek güç akışı algoritması yeniden başlatılır. Hesaplama sonunda bu baranın gerilim genlik değeri bulunur.

3-) Sitemdeki güç akışı analizi sonunda, salınım(referans) barasından alternatif akım sistemine aktarılan reaktif gücün sınır değeri aştığı görülürse $Q_1 = Q_{1\min}$ ya da $Q_1 = Q_{1\max}$ alınarak, salınım bara gerilim genlik değeri V_1 sabit tutulmadan değişken yapılır. Bu

durumda (1 numaralı) salınım barası PQ (yük barası) olarak hizmet görmeye başlar. Salınım barası olarak PV baralarından güçlü (P_{gen} değeri büyük olan) bir bara alınır.

3.4 Ayırık ve Hızlı Ayırık Newton-Raphson Metodu

Gauss-Seidel metodu lineer denklemlerin, Newton-Raphson ise lineer olmayan denklemlerin analizi için geliştirilmişlerdir. Ancak yinede bu yöntemler yük akışı problemini çözmede de kullanılır. Hızlı ayırık (Fast Decoupled) metodu ile güç sistemleri özelliklerinden yararlanılarak Newton-Raphson metodunun sadeleştirilmesiyle elde edilen bir çözüm yoludur.

Elektrik güç sistemlerinde elektriksel karakteristikler, nominal işletme koşullarında bara gerilimlerindeki değişimler genellikle reaktif güç akışını, gerilim faz açılarındaki değişimler ise aktif güç akışını etkiler.

Güç sistemlerinde güç akışı veya yük akışı algoritmasında kullanılan ve (3.33) ifadesiyle verilen Jacobian matris içinde, $Q-\delta$ ve $P-V$ arasındaki zayıf ilişki nedeniyle, hızlı ayırık güç akışı yaklaşımında J_2 ve J_3 alt matrisleri ihmal edilmektedir. Böylece güç akışı algoritması hem hızlandırılır, hem de bilgisayar bellek gereksinimi azaltılır. Güç veya yük akışı algoritmasının daha da hızlandırılması için ilave olarak $V_i \approx V_k \approx 1$ kabul edilip, $\delta_i \approx \delta_k$ alınabilir. Bu son kabuller de kullanılırsa J_1 ve J_4 sabit matris özelliğini kazanır. Böylece Newton-Raphson algoritmasında her iterasyonda Jacobian matrisin tekrar hesaplanması gerekmez. Dolayısıyla da algoritmanın sonlanması hızlı gerçekleşir. Bu yöntemler kullanılarak hızla sonuç beklenen sistemlerde oldukça yaygın bir şekilde tercih edilir.

Büyük boyutlu enerji sistemlerinin izlenmesi ve kontrolü amacıyla ana bilgisayarda sık sık güç ve yük akışı hesabı yapılır. Algoritma olarak Newton-Raphson metodu tercih edilmişse, sistemin büyümesi Jacobian matrisini de oldukça büyütür. Bu nedenle bilgisayar bellek gereksinimi artarak, algoritmanın yakınsaması uzar. Bu olumsuzlukları gidermek amacıyla hızlı ayırık güç akışı çalışmaları başlamıştır.[5]

3.5 Yük Akışı Analizinde Kullanılan İterasyon Metodlarının Karşılaştırılması

Güç sistemlerinde yük akışı analizlerinde takip edilen yöntemler elektrik şebekelerinin ve istenilen çözümün özelliklerine göre değişmektedir. Güç sistemlerinin kapasitesinin

gittikçe büyümesi, çeşitliliğin genişlemesi ve daha fazla analiz yapma gereksiniminin artması, en kısa zamanda ve en fazla işi yapacak olan yöntemlerin seçilmesi gerekliliğini getirmektedir. Bazı durumlarda birkaç farklı yöntem kullanılarak çözüme ancak ulaşılabilmektedir.

Örneğin, bir güç sistemindeki başlangıç olarak seçilen tahmini gerilim değerleri çözümden uzak ise, ilk olarak Gauss-Seidel metodunun kullanılması daha sonra elde edilen başlangıç değerlerinin Newton-Raphson metodu ile doğru sonuca ulaşmasını hızlandırmaktadır.

Gauss-Seidel metodu ile yük akışı problemini çözmek için genellikle başlangıç gerilimleri tüm jeneratör baralarında $V_i^0 = 1$ pu ve açılarıda $\delta_i^0 = 0$ kabul edilir. Her iterasyonda elde edilen değerler bir önceki iterasyona göre sabit kalmaktadır. Bu da, sonuca ulaşmak için çok sayıda iterasyon gerektirmektedir.

Newton-Raphson metodunda Gauss-Seidel metoduna göre daha fazla analize gerek vardır. Çünkü her iterasyonda Jakobien matrisinin hesaplanması ve lineer denklemlerin çözülmesi gerekir. Gerçeğe yakın çözüme ise Gauss-Seidel metoduna göre daha az iterasyon ile ulaşılır.

3.6 Yük Akışı Analizlerinin Kullanıldığı Alanlar

Güç sistemlerinde yük akışı analizleri, güç sistemlerinin planlanmasında ve işletilmesinde kullanılır. Güç sistemi planlanmasında amaç, tüm tüketim tesislerine yeterli, güvenilir, kaliteli, ekonomik ve sürekli enerji sağlamaktır. Güç sistemi planlanması, iletim planlanması (iletim tesislerinin tasarımı, analizini ve iletim sisteminin gelişimini), güç sistemleri arasında enerji alış-verişini, üretimin arz çalışmasını ve sisteme yeni ilave edilen santrallerin fayda-maliyet analizlerini içerir. Ayrıca güç üretim santrali planlaması da güç sistemi planlamasının bir parçasıdır.

Güç sistemlerinde yük akışı analizlerinden fazlaca yararlanılan modelleme iletim sistemi planlamasıdır. İletim sisteminin gelecekte alacağı modeller tasarlanarak, puant yük koşullarında oluşturulan modeller ile yük akışı analizleri yapılır. Yapılan bu analizlerle iletim sisteminde kullanılacak elemanların (iletkenlerin tipi ve kesiti, transformatörler, kapasitörler vb) karakteristik özellikleri ve optimizasyonu belirlenir.

Güç sistemlerinde yük akışı analizleri ile iletim hatlarının yüklenme durumları, baralarda sınırlar haricinde kalan gerilimler, üretim santrallerinde üretilen reaktif üretimler ve işletmede karşılaşılabilecek diğer elektriksel karakteristikler belirlenir. Güç sistemlerinde yük akışı puant yük koşulları yaygın olarak kullanılsa da aslında minimum yük koşullarında da yük akışı analizlerinin yapılması gerekir. Minimum yük koşullarında, puant yük koşulunda belirlenemeyen gerilim dalgalanmaları olabilmektedir.

Güç sisteminin kontrollü bir şekilde işletilmesi için, tüm baralardaki gerilimlerin ölçümü, iletim sistemi taşıma ve yalıtım elemanlarının yüklenme durumları, sistemdeki kayıplar ve hata/arıza kontrollerinin yapılması gereklidir. Ayrıca sistemde kısıtlılık kontrolü yapılarak sistemdeki elemanlardan birinin veya bir kaçının arızalanması durumunda, sisteme olan etkisi belirlenir. Böyle bir durumda alınması gereken önlemler önceden tespit edilmeye çalışılır.

Güç sistemlerinde yapılan analizler sistemin normal işletme koşullarında olduğu dikkate alınarak yapılır. Böyle bir durumda tüm hatların devrede olduğu varsayılır ve (n-1) kriterine göre sistemdeki elemanların her biri ayrı ayrı devre dışı edilerek sisteme etkisi belirlenir.

Güç sistemindeki her bir şebeke hattı elemanın arıza anında devre dışı kalması ile diğer hatların aşırı yüklendiği durumlar olabilmektedir. Aşırı yüklenen hatlardaki koruyucu röleler ile bu hatlar da güç sisteminden izole edilir. Birbirini takip eden olaylar sonucu güç sisteminin büyük bir kısmı enerjisiz kalabilmektedir. Kısıtlılık analizi ile bu gibi hata ve arıza durumlarını engellemek ya da minimuma indirmek için gerekli tedbirler alınabilir.

RÜZGÂR ENERJİ SANTRALLERİNDE ELEKTRİK SİSTEMLERİ

Tezde şimdiye kadar incelenen güç akış hesapları ve simülasyonlarına yenilenebilir enerji santrallerinin dâhil edilmesi ve bunların incelenmesi için hidroelektrik santrallerden sonra en yaygın yenilenebilir enerji olan rüzgâr enerji santrallerinin analizi yapılmıştır.

4.1 Rüzgâr Enerji Santrallerinde Generatörler ve Güç Elektroniği Bileşenleri

Günümüzde rüzgâr türbinlerinde, teknolojiye ilerlemelere bağlı olarak geliştirilen olan generatörler ve güç elektroniği ekipmanları kullanılır. Rüzgâr santrallerinin elektriksel sistemleri hakkında genel bir bilgi vermeye amaçına ilişkin, rüzgâr türbinleri tasarımlarında kullanılan generatörlerden, güç elektroniği ekipmanlarından, rüzgâr türbinlerinde koruma ve topraklama yapısı hakkında kısaca aşağıda değinilmiştir.

4.1.1 Rüzgâr Türbini Teknolojilerine Genel Bakış

Rüzgâr türbinleri sabit veya değişken hızlarda çalışabilirler. Bu nedenle çalışma hızlarına göre rüzgâr türbinleri sınıflandırabiliriz.

4.1.1.1 Sabit Hızlı Rüzgâr Türbinleri

Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde genelde asenkron generatörü (sincap kafesli veya bilezikli) bulunmaktadır. Bu asenkron generatörü doğrudan elektrik şebekesine bağlı olup, reaktif güç tüketimini azaltabilmek için yol vericiler ve kondansatör grupları içerir. Sabit hızlı rüzgâr türbinleri tek bir rüzgâr hızında azami verimlilikte çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Güç üretimini artırabilme amacı için sabit hızlı generatörlerde iki set sargı

bulunmaktadır. Bu sargılardan biri düşük rüzgâr hızında (tipik olarak 8 kutuplu), diğer sargı ise orta ve yüksek rüzgâr hızlarında (tipik olarak 4-6 kutuplu) kullanılır.

Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin avantajı basit, sağlam, güvenilir ve kendini ispatlamış olmasıdır. Ayrıca sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin elektrik aksamaları ucuzdur. Dezavantajları ise kontrol edilemeyen reaktif güç tüketimi, mekanik baskı ve sınırlı güç kalitesi kontrolüne sahip olmalarıdır. Bu türbinlerin sabit hızda çalışma şekline bağlı olarak rüzgâr hızındaki değişimler, sistemin mekanik dönme momentindeki oynamalar ve dolayısıyla elektrik şebekesinde iniş çıkışlarına sebep olmaktadır. Zayıf elektrik şebekelerinde bu iniş ve çıkışlar gerilimde büyük oynamalara ve dolayısıyla elektrik hatlarında önemli kayıplara yol açmaktadır [8].

4.1.1.2 Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri

Değişken hızlı rüzgâr türbinleri geniş bir rüzgâr hızı aralığında maksimum aerodinamik verimliliğe ulaşacak şekilde tasarlanmıştır. Bu türbinlerin değişken hızlarda çalışması ile sürekli değişen rüzgâr hızına (hızın artması veya azalması durumları) göre pervane hızı ayarlanabilmesini sağlamaktadır. Sabit hız sisteminin tam tersine değişken hızlı türbinler, generatör dönme momentini, değişen rüzgâr hızına göre değişebilen generatör hızı sayesinde oldukça sabit tutarlar.

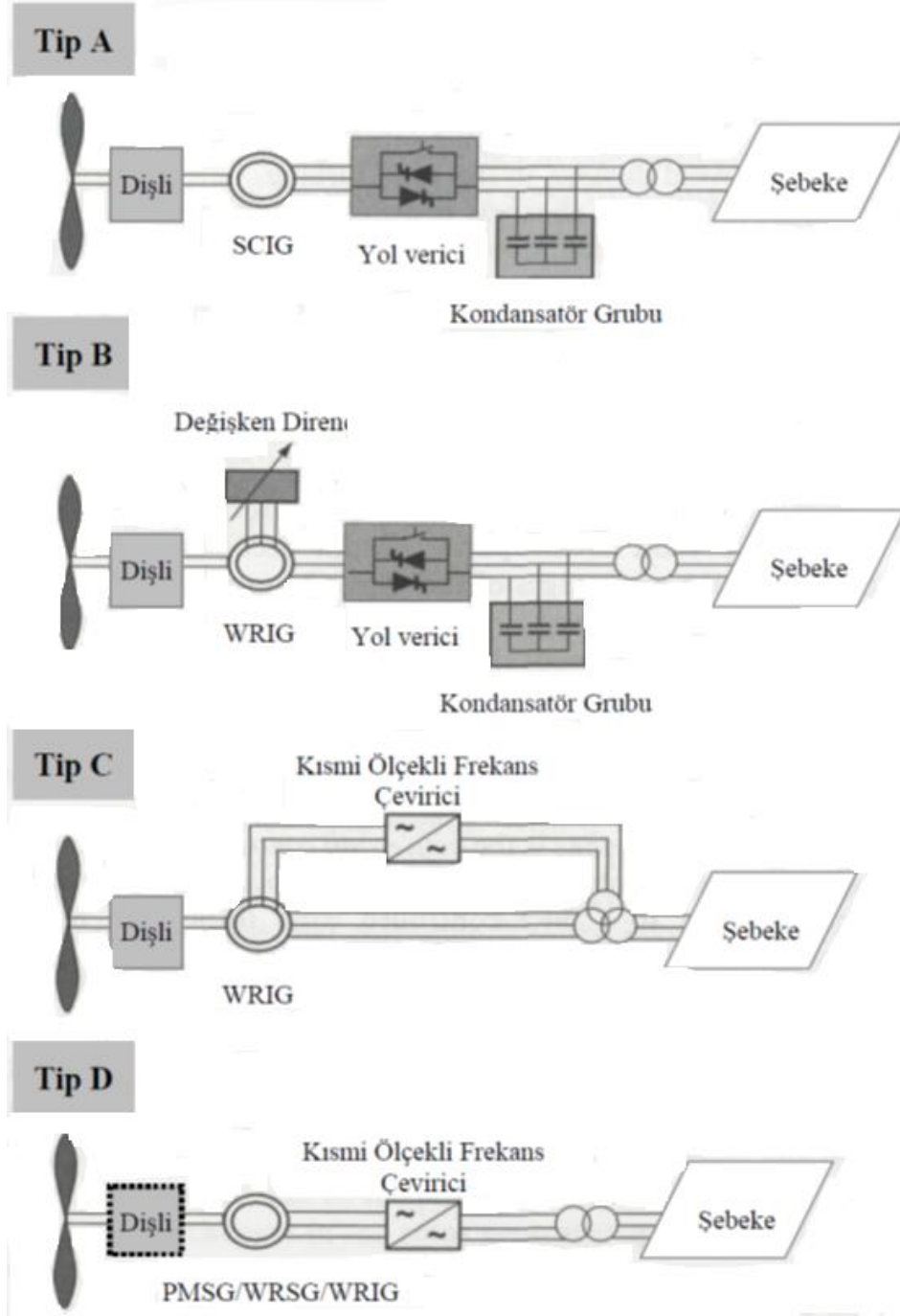
Elektrik aksamaları açısından sabit hızlı sistem değişken hızlı sistemden daha karmaşıktır. Bu sistem genelde asenkron veya senkron generatör içerir ve şebekeye bir güç çeviricisiyle bağlanır. Güç çeviricisi generatörün hızını kontrol eder. Diğer bir ifadeyle, güçteki iniş ve çıkışlara sebep olan rüzgâr hızındaki değişimler, generatör motoru hızındaki değişimlerle absorbe edilir ve sonuçta rüzgâr türbinin pervane hızında bu değişime göre ayarlanmış olur.

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin avantajları; daha az enerji kaybına yolaçmaları, gelişmiş güç kaliteleri ve rüzgâr türbini üzerinde daha az mekanik baskıya neden olmaları olarak sıralanabilir. Bu sistemin dezavantajları ise; sistemin güç elektroniği aksamlarındaki arızaların daha fazla parça gerektirmesi ve güç elektroniği aksamalarının donanımlarının pahalı olmasıdır.

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin kullanımlarıyla generatör türleri ve generatör türüyle birleştirilebilecek güç çeviricileri için seçim alternatiflerinin çeşitliliğine olanak sağlanmış olur. Son birkaç yılda kurulan rüzgâr türbinlerinde genellikle değişken hızlı rüzgâr türbinleri tercih edilmektedir [8].

4.1.2 Rüzgâr Türbini Teknolojisinde Kullanılan Generatörler

Aşağıda, en çok kullanılan rüzgâr türbini konfigürasyonları, hız kontrol özellikleri ve kullandıkları güç kontrol türlerine göre sınıflandırılmıştır. Hız kontrolü kriterine göre, şekil 4.1’de gösterildiği gibi dört ana rüzgâr türbini tipi vardır.



Şekil 4.1 Tipik rüzgâr türbini konfigürasyonları

SCIG; Sincap Kafesli Asenkron Generatör, WRIG; Bilezikli Asenkron Generatör, PMSG; Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör ve WRSG; Bilezikli Senkron Generatörüdür. Tip D’de kesik çizgilerle gösterilen dişli kutusu kullanılabilir ya da kullanılmayabilir.

4.1.2.1 Tip A: Sabit Hız

Bu konfigürasyon, transformatör aracılığıyla şebekeye adapte edilmiş Sincap Kafesli Asenkron Generatörlü (SCIG) bir sabit hızlı rüzgâr türbinini göstermektedir. SCIG, şebekeden daima reaktif güç alması sebebiyle bu konfigürasyonda reaktif güç kompanzasyonu için kondansatörler kullanılmaktadır. Bir yol verici vasıtasıyla daha işlevsel bir şebeke bağlantısı sağlanabilir.

Sabit hızlı rüzgâr türbinindeki güç kontrol prensibinden farklı olarak, rüzgâr dalgalanmaları önce mekanik, daha sonrada elektrik gücü dalgalanmalarına dönüştürülür. Rüzgâr dalgalanmaları zayıf bir şebeke durumunda ise bağlantı noktasında gerilim dalgalanmalarına yolaçabilirler. Bu gerilim dalgalanmalarından ötürü sabit hızlı rüzgâr türbini (kondansatörler yoksa) şebekeden değişik miktarlarda reaktif güç çeker. Bu durum gerilim dalgalanmalarını ve hat kayıplarının artmasına yolaçabilir. Bu yüzden, bu sistemin en olumsuz yanı olarak; hız kontrolünü desteklememesi, kuvvetli bir şebekeye ihtiyaç olması ve mekanik yapısının yüksek mekanik baskıları kaldırmak durumunda olması şeklinde sıralayabiliriz.

4.1.2.2 Tip B: Sınırlı Değişken Hız

OptiSlip olarak bilinen konfigürasyon, değişken generatör rotor dirençli, sınırlı değişken hızlı rüzgâr türbinine karşılık gelmektedir. Generatör, şebekeye doğrudan bağlı haldedir. Reaktif güç kompanzasyonu kondansatör grupları ile sağlanmaktadır. Bir yol verici vasıtasıyla daha düzgün bir şebeke bağlantısı sağlanabilmektedir. Ayrıca değişken bir rotor direncine sahip olması bu konseptin en önemli ve kendine has özelliğini oluşturmaktadır. Bu dirençte rotor milindeki çevirici tarafından manipüle edilmektedir. Dolayısıyla toplam rotor direnci kontrol edilebilmesi sağlanmaktadır. Rotor direnci değiştirilebilmesinden dolayı kayma da kontrol altında olacaktır. Bu yolla sistemde güç çıkışının da kontrol edilebilmeside sağlanmaktadır. Dinamik hız kontrolünün aralığı, değişken rotor direncinin büyüklüğüne göre farklılık göstermektedir. Tipik olarak hız aralığı senkron hızın %0-10 üzerinde diye ifade edebiliriz [9].

4.1.2.3 Tip C: Kısmi Ölçekli Frekans Çeviricili Değişken Hız

Çift beslemeli asenkron generatörü (DFIG) konsepti olarak bilinen bu konfigürasyon, bilezikli asenkron generatörü (WRIG) ve rotor devresinde kısmi ölçekli frekans çeviricili (nominal generatör gücünün yaklaşık %30'una ayarlanmış) sınırlı değişken hızlı rüzgâr türbinine karşılık gelmektedir. Kısmi ölçekli frekans çevirici, reaktif güç kompanzasyonu ve daha düzgün ve işlevsel bir şebeke bağlantısı sağlamaktadır. Frekans çeviricinin büyüklüğüne değişmekle beraber Tip B'ye göre daha geniş dinamik hız kontrol aralığına sahiptir. Tipik olarak, hız menzili -%40'tan +%30'a kadar senkron hızları kapsar. Daha küçük olan frekans çevirici, bu konsepti ekonomik olarak daha çekici hale getirmektedir. En büyük dezavantajları olarak; kayar halka kullanımı ve şebeke hatalarındaki korunmadır sıralayabiliriz [10].

4.1.2.4 Tip D: Tam Ölçekli Frekans Çeviricili Değişken Hız

Bu tip, generatörü şebekeye tam ölçekli frekans çevirici aracılığıyla bağlı tam değişken hızlı rüzgâr türbinine karşılık gelmektedir. Reaktif güç kompanzasyonu ve düzgün şebeke bağlantısı frekans çevirici tarafından sağlamaktadır. Generatör elektriksel olarak, bilezikli senkron generatörü, bilezikli asenkron generatörü veya sürekli bir mıknatısla (sürekli mıknatıslı senkron generatör) uyarılabilir. Bazı tam değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin dişli kutusu yeralmamaktadır. Bu durumlarda, doğrudan çalıştırılan, büyük çaplı, çok kutuplu generatörler kullanılmaktadır [10].

4.1.3 Generatör Sistemleri

Temel olarak bir rüzgâr türbini, üç fazlı generatörlerin herhangi bir tipiyle çalışabilmektedir. Bugün, generatörler değişken frekanslı alternatif akım veya doğru akım verseler, çevirici kullanımıyla şebeke uyumlu elektrik akımı ihtiyacı karşılanmasına olanak sağlamaktadırlar.

Rüzgâr türbinlerinde şu türler kullanılabilir:

1-Asenkron generatör:

a) Sincap kafesli asenkron generatörü (SCIG)

b) Bilezikli asenkron generatörü (WRIG)

-OptiSlip asenkron generatörü (OSIG)

-Çift beslemeli asenkron generatörü (DFIG)

2-Senkron generatör:

a) Bilezikli senkron generatörü (WRSG)

b) Sürekli mıknatıslı senkron generatörü (PMSG)

Aşağıda bu tip generatörlerin temel özellikleri incelenmiştir [10].

4.1.3.1 Asenkron Generatör

Rüzgâr türbinlerinde en yaygın kullanılan generatör türü olarak asenkron generatörü söyleyebiliriz. Bu tip generatörler bazı avantajlara sahiptirler. Bu avantajlar; sağlamlık, mekanik basitlik ve seri halde üretilebildiği için düşük fiyatlara sahip olmalarıdır. Bu generatör türünün en önemli dezavantajı ise; statorun reaktif mıknatıslanma akımına ihtiyaç duymasısıdır. Asenkron generatör sürekli mıknatıslar içermez ve uyarılmazlar. Bu sebepten dolayı, uyarma akımını başka bir kaynaktan almaktadır ve reaktif güç tüketmektedir. Reaktif güç, bir elektrik şebekesinden veya bir güç elektroniği sisteminden karşılanmaktadır. Generatörde manyetik alan sadece elektrik şebekesine bağlandığı durumda oluşur. AC uyarması sırasında oluşturulan manyetik alan, akımın frekansı ve sargıdaki kutup sayısı tarafından belirlenen bir hızda senkron olarak döner. Böylece, eğer rotorun hızı senkron hızını aştığı bir durum olursa, rotor ve dönen stator arasında, bağıl hareket (kayma) aracılığıyla bir elektrik alanı indüklenmesini sağlar ve bu rotor sargılarında bir akıma neden olur. Stator alanı ile rotor manyetik alanının etkileşimi sonucu olarak rotorun üstüne dönme momenti uygular.

Bir asenkron generatörün rotoru, sincap kafesli rotor (kısa devre rotor) veya bilezikli olarak tasarlanabilir[11].

Sincap Kafesli Asenkron Genaratörü

Son yıllara kadar, sincap kafesli asenkron generatörü (SCIG), mekanik aksamının basitliği, yüksek verimi ve daha az bakım gerektirmesi nedeniyle en yaygın kullanım türü olmuştur. Şekil 4.1’de gösterildiği gibi, Tip A için, SICG, direkt olarak şebekeyle kuplajlıdır.

SCIG'nin hızı, rüzgârın hızı değiştiğinde generatör kayması nedeniyle çok az miktarlarda değişir. Bu sebepten dolayı bu tür generatörler sabit hızlı türbinlerde kullanılır (Tip A). Bir SCIG üzerindeki rüzgâr türbinleri reaktif güç harcadıklarından dolayı, tipik olarak yol verici mekanizması ve reaktif güç kompanzasyonu sistemiyle beraber kurulurlar. SCIG'ler aşırı dönme momenti hızı karakteristiğine sahiptir ve bu nedenle rüzgâr gücündeki dalgalanmalar şebekeyi direkt olarak etkiler. Bu geçişler rüzgâr türbininin şebeke bağlantısında çok önem göstermektedir. Çünkü içeriye iletilen akım nominal akımdan 7-8 kat daha büyüktür. Zayıf bir şebekede yüksek hızda içeriye iletilen akım, büyük gerilim sorunlarına neden olmaktadır. Bu yüzden, içeriye iletilen akımın kesilmesi için, SCIG'nin şebekeye bağlanması, kısım kısım gerçekleştirilmelidir.

Kuvvetli bir AC şebekesine doğrudan bağlantı ve normal bir çalışma esnasında, SCIG çok sağlam ve kararlı bir yapı sergiler. Kayma, artan yüke göre artar ve değişir. Stator sargısına şebekeden sağlanan manyetik akım nedeniyle tam kapasite güç faktörü, bağlı olarak düşüktür. Çok düşük güç faktörü, generatöre paralel bağlı kondansatörler yardımıyla kompanze edilir.

SCIG'ler de aktif güç, reaktif güç, terminal gerilimi ve rotor hızı arasında mükemmel bir ilişki vardır. Bunun anlamı yüksek hızlı rüzgârların olduğu zamanlarda rüzgâr türbini, ancak generatör daha fazla reaktif güç çekerse daha fazla aktif güç üretilir. SCIG için, tüketilen reaktif güç miktarı kontrol etmek imkânsızdır, çünkü rüzgâr şartlarına göre değişkenlik göstermektedir.

Reaktif gücü destekleyecek elektrik bileşenleri olmazsa generatör için gerekli güç şebekeden temin edilir. Şebekeden alınan reaktif güç, bazen ilave hat kayıplarına sebep olarak şebekenin kararsız olmasına yolaçabilir. Kondansatör gurupları veya modern güç elektroniği çeviricileri reaktif güç tüketiminin azaltılabilmesini sağlayabilir. Bu noktada en büyük dezavantaj, anahtarlama sırasında geçici rejimlerin oluşmasıdır.

Bir hata sırasında, reaktif güç kompanzasyonu olmayan SCIG, şebekede gerilim kararsızlığı oluşturabilir. Rüzgâr türbin rotoru hızlanabilir ve kayma artabilir. Örneğin, bir hata esnasında, elektrik ve mekanik dönme momenti arasında dengesizliğin meydana gelmesi gibi. Bu sayede, hata düzeltildiğinde, SCIG'ler şebekeden daha fazla miktarlarda reaktif güç çekerek gerilimin dahada düşmesine neden olmaktadır. SCIG'ler sabit hızlı

rüzgâr türbinlerinde (Tip A) ve tam değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde (Tip D) kullanılabilir [11].

Bilezikli Asenkron Generatörü

Bilezikli asenkron generatörü (WRIG) kullanılması, rotorun elektriksel karakteristikleri dışarıdan kontrol edilebmesini sağlar. Sargılı rotorun sargıları, dışarıdan kayar bilezikler ve fırçalarla veya güç elektroniği düzeneği ile bağlanır. Güç elektroniği düzeneği kullanılması ile güç rotor devresine aktarılabilir veya etkileyebilir böylelikle generatör, rotor ya da stator devresiyle mıknatıslanabilir. Böylelikle rotor devresinde harcanan enerjinin geri kazanımı sağlamak ve statorun çıkışına vermek mümkün kılınır. WRIG'in dezavantajı, SCIG'den daha pahalı ve SCIG kadar sağlam olmamasıdır.

Rüzgâr türbini endüstrisinin en çok kullandığı WRIG konfigürasyonları;

- OptiSlip Asenkron Generatörü (OSIG), Tip B'de kullanılır.
- Çift Beslemeli Asenkron Generatörü (DFIG), Tip C'de kullanılır.

OptiSlip Asenkron Generatörü:

Optislip asenkron generatörü, çok güçlü rüzgârlar sırasında, rüzgâr türbinindeki yükün azaltılmasını sağlamak için üretilmiştir. OptiSlip özelliği sayesinde generatörün kısıtlı aralıkta değişken kaymaya sahip olması ve optimum kaymayı seçebilmesine, güç çıkışında ve sürücü dönme momentinde daha küçük dalgalanmalara olanak sağlar.

OSIG'ler çeşitli rotor dirençlerinin, rotor sargılarına dışarıdan bağlanmasıyla oluşan WRIG'lerdir (Şekil 4.1). Rotor şaftının üzerine monte edilen bir çeviricinin vasıtasıyla, toplam rotor direncinin modifiye edilmesi sonucu generatörün kayması değiştirilebilir. Çevirici optik olarak kontrol edilebilir, yani kayar bilezikler gerekli değildir. Generatörün statoru şebekeye direkt bağlıdır.

Bu generatör konseptinin avantajları olarak; basit devre topolojisi, kayar bilezikler gerek olmaması ve SCIG ile karşılaştırıldığında daha verimli çalışma hızı aralığından bahsedilebilir. Bunlara ek olarak söylenebilecek; bu konseptin, mekanik yüklerin ve kuvvetli rüzgârın yol açtığı güç dalgalanmalarını azaltabilme yetisidir. Bununla beraber, yinede reaktif güç kompanzasyon sistemine gerek duyulmaktadır. Değişken rotor

direncine göre, hız aralığının % 0-10 ile sınırlandırılmış olması, aktif ve reaktif güç kontrolünün düşük miktarlarda sağlanması dezavantajlarıdır.

Çift Beslemeli Asenkron Generatörü :

Çift beslemeli asenkron generatör (DFIG) konsepti, büyüyen taleple beraber çekici bir seçenektir. DFIG, stator sargıları sabit frekanslı üç fazlı şebekeye direkt olarak bağlanmış WRIG'den oluşur ve rotor sargıları çift yönlü arka arkaya bağlı bir IGBT gerilim kaynağı çeviricisine monte edilmiştir.

Çift yönlü besleme terimi, statordaki gerilimin şebekeden uygulanması ve güç çeviricisi tarafından indüklenen rotordaki gerilimden dolayı kullanılmaktadır. Bu sistem, geniş ama kısıtlı bir aralıkta, değişken hızda çalışmaya izin verir. Çevirici, mekanik ve elektriksel frekans arasındaki farkı, değişken frekanslı rotor akımı ile kompanze eder. Böylelikle, hem normal çalışma esnasında, hem de hata anlarında, generatörün davranışı, güç kontrolörü ve çevirici tarafından denetlenmektedir.

Güç çeviricisi, iki çeviriciden oluşmaktadır. Bunlar birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilen, rotor yanı çevirici ve şebeke yanı çeviricidir. Asıl amaç, şebeke yanı çeviricisi DC-link gerilimini kontrol ederken ve bir güç faktöründe (reaktif güç sıfır iken) bir çevirici çalışması sağlarken, rotor yanı çeviricisinin, rotor akım bileşenlerinin kontrolü yardımıyla, aktif ve reaktif gücü kontrol etmesidir.

Sürücünün çalışma şartına bağlı olarak, güç rotora içerden veya dışardan verilir ve senkronun üzerinde, çevirici aracılığıyla rotordan şebekeye iletilir, oysa güç senkronun altında ters yönde iletilmektedir. Her iki koşulda da, yani senkron altında ve senkron üstünde, stator şebekeye enerji verir.

DFIG'nin bazı avantajlara sahiptir. Reaktif gücü kontrol edebilme ve rotor uyarma akımını bağımsız şekilde kontrol ederek aktif ve reaktif güç kontrolünü ayırma yeteneğine sahiptir. DFIG'nin güç şebekesinden mıknatıslanmasına gerek bulunmamaktadır, çünkü rotor devresinden de güç alabilmektedir. Ayrıca şebeke tarafındaki çevirici vasıtasıyla, statora aktarılabilecek reaktif güç üretebilmektedir. Ancak, şebeke tarafında bulunan çevirici, bir güç faktöründe çalışmaktadır ve türbinle şebeke arasındaki reaktif güç değişiminde etkili değildir. Zayıf bir şebeke durumunda gerilim dalgalanabilir, böyle

durumlarda, gerilimin kontrolü amacıyla, DFIG'den, şebekeye reaktif güç üretmesi veya şebekeden reaktif güç çekmesi istenebilir.

Çeviricinin büyüklüğünün, toplam generatör gücüyle alakası yoktur ama seçilen hız aralığı ile alakası bulunmaktadır. Bundan dolayı çeviricinin masrafı, senkron hız çevresindeki hız aralığı arttıkça artmaktadır. Çift beslemeli asenkron generatörünün bir ana dezavantajı kayar bilezik ihtiyacı bulunmasıdır [11].

4.1.3.2 Senkron Generatör

Senkron generatör, aynı büyüklükte bir asenkron generatöründen çok daha pahalı ve mekanik olarak da karmaşık bir yapıya sahiptir. Ancak, asenkron generatörü ile kıyaslandığında reaktif mıknatıslama akımına ihtiyaç duymamaları bariz bir avantaj olarak söylenebilir.

Senkron generatördeki manyetik alan, sürekli mıknatıslar veya konvansiyonel alan sargıları kullanılarak sağlanabilir. Eğer senkron generatörün yeterli sayıda kutba sahipse (çok kutuplu bir WRSG ya da çok kutuplu bir PMSG), direkt sürücülü uygulamalar için, herhangi bir dişli kutusuna gerek duymadan kullanılabilir.

Senkron generatörler, en çok tam güç kontrolüne uygundur ve şebekeye de bir güç elektroniği çeviricisiyle bağlıdır.

Çeviricinin iki ana amacı vardır;

-Çok kuvvetli bir rüzgâr enerjisinin dolayı oluşan güç dalgalanmalarına karşı koymak ve şebeke tarafından gerçekleşen geçici olaylar için, bir enerji tamponu olmak

-Mıknatıslanmayı kontrol etmek ve şebeke frekansıya senkron kalarak, problemlere engel olmak.

Böyle bir generatör kullanımı, rüzgâr türbinlerinin değişken bir hızda çalışmasına imkan sağlarlar.

Rüzgâr türbini endüstrisinde genellikle iki klasik senkron generatör tipi kullanılmıştır:

1- Bilezikli senkron generatör (WRSG)

2- Sürekli mıknatıslı senkron generatör (PMSG) [11].

Bilezikli Senkron Generatörü

Bilezikli senkron generatörü (WRSG), elektrik güç endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. Hem hatalı durum performansı açısından hem de sürekli durum performansı, açısından bakıldığında, yıllar içinde birçok araştırma raporlarından güzel sonuçlar almıştır.

WRSG'nin stator sargıları, doğrudan şebekeye bağlıdır ve böylece dönüş hızı kesinlikle şebeke frekansına bağlıdır. Rotor sargısı, kayar bilezikler ve fırçalar kullanılarak, doğru akımla ya da döner doğrultuculu bir fırçasız uyarma ile uyarılır.

Asenkron generatörünün aksine, senkron generatörlerde fazladan reaktif güç kompanzasyon sistemine ihtiyaç duyulmamaktadır. İçerisinden doğru akım geçen rotor sargısı, uyarma alanı oluşturur ve senkron hızda dönmeye başlar. Senkron generatörün hızı, döner alanın frekansıyla ve rotorun kutup çiftleri sayısı ile belirlenir.

Ayrıca dişli kutusuna gerek olmaması avantajına sahiptir. Ama dişlisiz bir tasarıma ödenecek maliyet, büyük ve ağır bir generatör ile sistemin tüm gücünü idare etmesi gereken tam ölçekli güç çeviricisidir [9].

Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörü

Birçok araştırma sonucunda, kendinden uyarımalı olması, yüksek güç faktöründe ve yüksek verimde çalışabilmeye olanak sağlaması nedeniyle, rüzgâr türbinlerinde sürekli mıknatıslı senkron generatör (PMSG) kullanımını tavsiye edilmektedir. Sürekli mıknatıslı (PM) makinede, verim asenkron makinesinden yüksektir. Çünkü uyarma, herhangi bir enerji kaynağı olmadan sağlanır. Ancak, sürekli mıknatıslar için kullanılan malzemeler pahalıdır ve üretim sırasında pek çok güçlük yaşanmaktadır. Diğer bir taraftan, PM uyarma kullanımı, üretimin frekansını ve gerilimini, iletimin frekansı ve gerilimine ayarlamak için tam ölçekli bir güç çeviricisi kullanımını gerektirmektedir. Bununla beraber sürekli koşullara uyum sağlayacak şekilde, herhangi bir hızda güç üretebilmesi faydasıda bulunmaktadır. PMSG'nin statoru sargılıdır ve rotorunda sürekli mıknatıslı kutup sistemi vardır ve kutupları çıkıntılı ya da silindirik olabilir. Çıkıntılı kutuplar, düşük hızlı makinelerde daha fazla kullanılmaktadır ve bir rüzgâr türbini uygulaması için en etkili versiyon denebilir.

Tipik düşük hızlı senkron makineler, çok kutuplu ve çıkıntılı kutuplu tiplerdir. PMSG'nin senkron niteliği, senkronizasyon ve gerilim regülasyonu sırasında, çalıştırma sırasında, problemlere neden olabilir. Kolay bir şekilde sabit bir gerilim sağlamaz.

Rüzgâr hızının düzensiz olması durumunda veya bir dış kısa devre durumunda senkron çalışma performans çokça etkilenir. PMSG'lerin bir başka dezavantajıda, manyetik malzemelerin sıcaklığa karşı duyarlı nitelikte olmalarıdır. Örnek olarak; bir hata esnasında ortaya çıkabilecek yüksek sıcaklık değerlerinde, mıknatıs manyetik özelliğini yitirebilir. Bu yüzden, PMSG'nin sıcaklığı sürekli olarak kontrol edilmeli ve bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulmalıdır [12].

4.1.4 Rüzgâr Santrallerinde Kullanılan Güç Elektroniği Bileşenleri

Güç elektroniği çok hızlı gelişen bir bilim dalıdır. Bileşenleri, yüksek oranlarda gerilimleri ve akımları kontrol edebilmektedir. Bu durum sonucunda, cihazlar daha güvenilir hale gelmekte ve güç kayıpları azalmaktadır. Cihazlar, büyük ölçekli güç amplifikasyonu ile kolay bir şekilde kontrol edilir. Güç elektroniği sistemlerinin fiyat/güç oranı sürekli düşmektedir ve rüzgâr türbinlerinin performansını artırma konusunda, güç çeviricileri giderek daha etkin hale gelmeye başlamışlardır. Bu bölümde, rüzgâr türbinlerinde kullanılan güç elektroniği bileşenlerinin avantaj ve dezavantajlarından kısaca bahsedilmiştir [12].

4.1.4.1 Yol Vericiler

Yol vericiler için sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin şebekeye bağlanması sırasında kullanılan basit ve ucuz elektriksel bileşenler olarak tanımlayabiliriz (Şekil 4.1'de Tip A, Tip B). Yol vericinin fonksiyonu olarak; yığılma akımını düşürerek şebeke üzerinde oluşacak problemleri azaltmaktadır denebilir. Yol verici kullanılmazsa, yığılma akımı nominal akımın 7-8 katı kadar büyüyebilir ve bu durum şebekede büyük gerilim sıkıntılarına sebep olabilir.

Yol vericide, her fazda komütasyon aracı olarak, iki tristör bulunmaktadır. Her faz için antiparalel bağlanırlar. Şebeke periyodu boyunca, tristörlerin ateşleme açısının (α) belirlenmesiyle generatörün şebekeye düzgün bağlanması sağlanmış olur. Ateşleme

açısıyla, yol vericinin ortaya çıkan amplifikasyonu arasındaki ilişki lineer değildir ayrıca bağlanan elemanın güç faktörünün bir fonksiyonudur. Yığılma akımından sonra, tüm sistemin kaybını azaltmak için tristörler by-pass edilir [13].

4.1.4.2 Kondansatör Grupları

Kondansatör gurupları, limitli değişken hızlı veya sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılır (Şekil 4.1’de Tip A, Tip B). Asenkron generatörüne reaktif güç sağlayan bir elektriksel bileşen olarak tanımlanabilir. Busayede generatörün şebekeden çektiği reaktif güç en aza indirilir.

Rüzgâr türbinlerinin generatörleri, belirli sayıda kondansatörün ayrıldığı yerde ve sürekli bağlandığı, tam yüklü dinamik kompanzasyona sahip olabilirler. Bu, daha önceden belirlenmiş bir zaman dilimi içerisinde, generatörün ihtiyacı olan reaktif gücün ortalama miktarına bağlıdır.

Kondansatör guruplarının yeri, genellikle rüzgâr türbini kabini veya kulenin dibidir. Kondansatör gurupları, aşırı yüklenme ve şebekedeki aşırı gerilimler sebebiyle zarar görebilirler. Bu nedenle sistemin bakım masrafları artabilir [14].

4.1.4.3 Doğrultucu ve Eviriciler

Geleneksel bir frekans çeviriciye ayarlanabilir hız sürücüsü ismide verilebilir ve doğrultucu, eviriciden ve kondansatörden oluşur.

Bir doğrultucunun görevi olarak alternatif akımı doğru akıma dönüştürmesidir. Kondansatör, enerji depolayıcı görevini yaparken, evirici, kontrol edilebilir frekans ve gerilimle doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için kullanılır. Diyotlar sadece doğrultma modunda kullanılırken, elektronik anahtarlar hem evirme modunda hem de doğrultma kullanılabilir.

Basit olmasından, düşük maliyeti ve kayıp azlığından dolayı en etkin doğrultucu çözümü, diyot doğrultucusudur. Lineer olmamasından dolayı harmonik akımlar üretebilir. Bir başka dezavantajı olarak; sadece tek yönlü bir güç akışına izin vermesidir ve generatör gerilimini ya da akımını kontrol edememesi gösterilebilir. Bu nedenle, sadece gerilimi

kontrol edebilen bir generatörle ve akımı kontrol edebilen bir eviriciyle (örneğin; IGBT, yani, yalıtılmış kapılı iki kutuplu transistörler) beraber kullanılabilir.

Tristör bazlı (şebeke komütasyonlu) evirici çözümü, ucuz bir evirici metodudur. Bunun yanısıra kayıpları azdır ve doğası gereği eviricinin çalışabilmesi için şebekeye bağlanması gerekmektedir. Ama reaktif güç harcamakta ve büyük harmonikler üretmektedirler. Güç kalitesi bakımından artan ihtiyaç, tristör eviricilerini, GTO (kapıdan tıkanabilen tristör) ve IGBT'ler gibi kendinden komütasyonlu eviricilerden daha az rağbet görür hale getirmiştir. Bir GTO eviricinin avantajı, IGBT'den daha fazla güçle başa çıkabilmesidir, ama bu özellik, IGBT'lerin hızlı gelişiminden ötürü gelecekte önemini yitirebilir.

Evirici, generatör ve doğrultucudan neredeyse bağımsız seçilebilirken, generatör ve doğrultucu bir kombinasyon halinde seçilmek zorundadır. Bir tristör doğrultucu veya diod doğrultucu sadece senkron bir generatörle birlikte kullanılabilir. Çünkü reaktif bir mıknatıslanma akımına ihtiyaç duymaz. Buna karşılık, GTO ve IGBT doğrultucuların, değişken hızlı asenkron generatörleriyle kullanılmaları gerekmektedir, çünkü reaktif gücü kontrolünü sağlayabilirler. Ancak, IGBT'ler çok çekici bir seçim olsa da yüksek fiyat ve büyük kayıp dezavantajları sahiptirler. Örneğin; diod doğrultuculu senkron generatörün toplam fiyatına oranla ona denk IGBT eviricili ya da doğrultuculu bir asenkron generatöründen çok daha yüksektir [14].

4.1.4.4 Frekans Çeviriciler

Son yıllarda, rüzgâr türbinlerinde değişik çevirici topolojilerinin kullanılması incelenmiştir. Bir frekans çeviricisine, bir evirici ve bir doğrultucunun bağlanmasının farklı yöntemleri bulunmaktadır. Bunlar; arka arkaya çeviriciler, çok düzeyli çeviriciler, tandem çeviriciler, matris çeviriciler ve rezonant çeviriciler olarak sıralanabilir. Bugün rüzgâr türbinlerinde en fazla kullanılan üç fazlı frekans çevirici arka arkaya bağlı frekans çeviricidir. İki konvansiyonel darbe genişlik modülasyonlu (PWM) gerilim kaynaklı çeviricilerden oluşan çift yönlü bir güç çeviricidir [14].

4.2 Rüzgâr Türbinlerinde Koruma

Yüksek gerilim güç sistemlerinin her bölümü, arızalı devreleri izole ederek açan devre kesiciler ve anormal durumları saptayan röleler tarafından korunur. Bazı daha düşük gerilimli devreler sigortalar tarafından korunur, ancak, bunlar daha ucuz olmasına rağmen, rölelerin ve devre kesicilerin sağladığı kadar emniyet sağlayamazlar. Bir dağıtım şebekesinde, korunma sisteminin temel olarak amacı, devrelerde izolasyon hatalarından dolayı oluşan aşırı akımları tespit etmektir. İzolasyon hatalarına, katı maddeden yapılmış izolasyonun delinmesi veya havanın delinmesi örnek olarak gösterilebilir bu durumda, fazlar arası veya fazlarla toprak arasında aşırı akımlar geçmesine neden olurlar. Bu durumlarda meydana gelen tehlikeleri kısıtlamak için, aşırı akımların maksimum bir saniye sürmesine izin verilir.

Bu tehlikeler;

-Yüksek akımların toprak empedansına akışı nedeniyle, aşırı gerilimlerin neden olduğu hayati tehlike,

-Yüksek akımların elektromanyetik etkilerinin ve yüksek derecede ısınması nedeniyle tesise (santrale) zarar verme riski,

-Güç sisteminin kararlılığının riske sokulması olarak sıralanabilir.

Rüzgâr santrallerinin ve rüzgâr türbinlerinin elektriksel koruma prensipleri, diğer elektrik santrallerine uygulanan korunma prensipleri ile aynıdır, ancak, aralarında iki önemli fark bulunmaktadır.

İlk olarak; rüzgâr santralleri genellikle güç sisteminin çevresine kurulduğundan, izolasyon hatalarından meydana gelen hata akımları oldukça küçüktür. Bu özellik tehlikeyi azalttığından dolayı, her ne kadar arzu edilen bir durum olsa da, düşük kaçak akımların hızlı ve güvenilir şekilde saptanmasında ciddi sorunlar meydana getirirler. Özellikle, yüksek gerilim kesicilerinin bazı tasarımlarının, doğru çalışabilmesi için, ark içindeki enerjiye bağımlıdır. Bu yüzden ark enerjisi düşük olduğunda küçük hata akımları kesilemeyebilir. İkinci farklılık olarak; sabit hızlı rüzgâr türbinleri asenkron makineleri kullanırlar ve değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin şebekeye bağlanması gerilim kaynaklı çeviricilerle yapılması gerekmesi gösterilebilir. Ne gerilim kaynaklı çeviriciler ne de

asenكرون generatörler, hata akımları için güvenilir kaynaklar değildirler. Bu nedenle, rüzgâr türbini generatörlerinden kaynaklanan anormal durumları ortaya çıkarmak için, gerilim veya frekans algılamalı rölelere gerek duyulmaktadır. Rüzgâr santralının korunması, şebekeye geri besleme yapabilecek makine sürücüleriyle donatılmış büyük endüstriyel yüklerin (tesislerin) korunmasına benzer pekçok özellik göstermektedir.

Dağıtım şebekesi, güvenli bir hata akımı sağlayarak izolasyon hatalarının saptanmasını sağlamasının yanısıra, dönen makinelerden kaynaklanan hata akımının katkı olasılığı, göz ardı edilmemelidir. Buna ek olarak, rüzgâr santralının güç sisteminden ayrıldığı zamanlarda, normalden daha uzun bir süre için rüzgâr santralinde, anormal frekans veya gerilim üretilmesi tehlikesi de oluşabilir [15].

4.3 Rüzgâr Enerji Santrallerinde Topraklama Sistemleri

Bütün elektrik santrallerinde, aşağıdaki gösterilen sebeplerden dolayı topraklama yapılması gereklidir.

Bunlar;

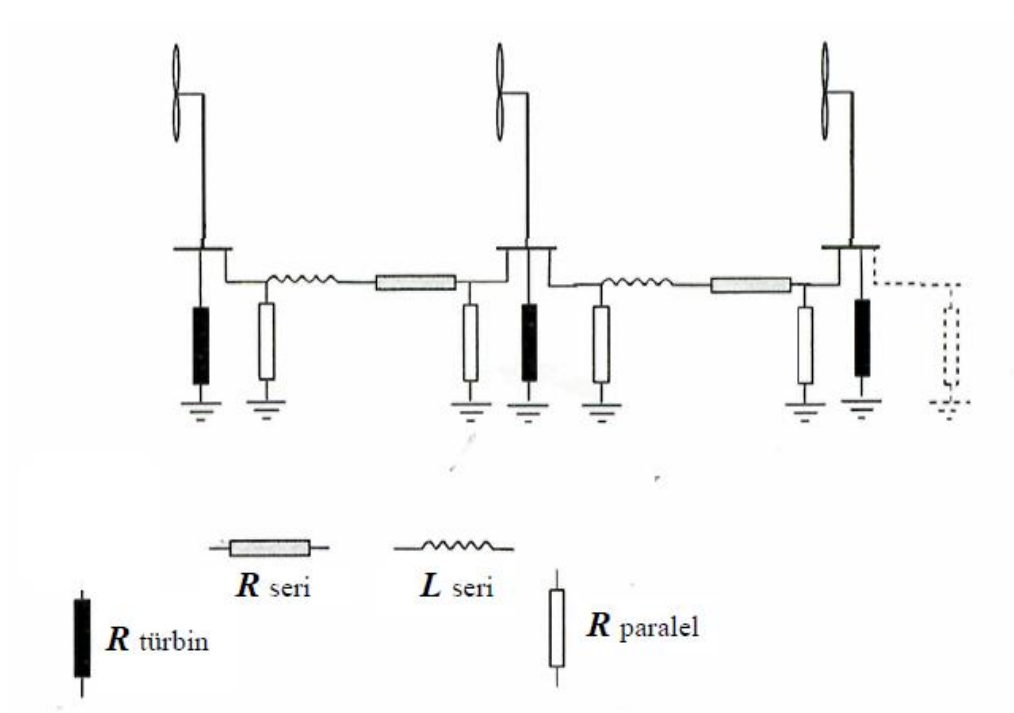
- Etrafta bulunan hayvanların ve çalışanların elektriğe çarpılma tehlikesinin minimuma indirgenmesi,
- Kaçak akımların düşük empedanslı bir hat tesis ederek toprağa geçmesi sağlanarak, çalışma için etkin bir koruma elde edilmesi;
- Makul sınırlar içinde gerilimin kalmasının sağlanması ve yıldırıma karşı korumanın geliştirilmesi;
- Yüksek elektrik potansiyeli farklarının oluşması engellenerek çalışanların ve ekipmanların korunması olarak gösterilebilir.

Rüzgâr türbini tesislerinde topraklama için özel gereksinimler vardır. Bu tesisler genellikle kilometrelerce uzanan bir alana yayılmış olup, türbin kulelerinin yüksekliğinden dolayı, yıldırım çarpmalarına daha çok maruz kalmaktadırlar. Ayrıca, genellikle direnci yüksek zeminler üzerinde kurulmuşlardır. Bu yüzden normal topraklama işlemlerini bu tesislerde uygulamak mümkün olmayabilir ve özel uygulamalar gerekmektedir. Rüzgâr santralının bütün ekipmanlarının kesintisiz bir

topraklama sistemine bağlanması gerekmektedir. Bu topraklama sistemine, kuleler, ara istasyonlar, rüzgâr türbin generatörleri, transformatörler ve elektronik ekipmanlar da ilave edilmelidir. Bu uygulama sayesinde, genelde çıplak bir iletkenin, güç toplama kablosu boyunca eklenmesi sonucunda, rüzgâr santrali tesisindeki tüm ekipmanların hem birbirine bağlanmış olması sağlanır, ayrıca uzun yatay bir elektrot görevi yaparak topraklama sisteminin direncini azalması sağlanmış olur.

Bir rüzgâr santralinde topraklama sistemi, hem 50/60 Hz elektrik şebekesi akım frekansları için, hem de tipik olarak $10\ \mu\text{s}$ 'den daha az yükselme süresi olan yıldırım düşmelerine karşı etkilenmeden çalışabilmelidir. Normal olarak hem elektrik şebekesi akım frekansları için, hem de yıldırım düşmelerine karşı aynı fiziksel topraklama sistemi kullanılmakla beraber, topraklama sisteminin yıldırım akımının yüksek frekanslı bileşenlerine karşı tepkisi, 50 Hz şebeke akımına olan tepkisinden çok daha farklıdır.

Rüzgâr santrali topraklama sistemi aşağıda şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Rüzgâr santrali topraklama sistemi şeması

Her bir rüzgâr türbini kulesinin temelini 1 metre altında halka şeklinde bir iletken konularak, buna dikey metal çubuklar yere çakılır. Genellikle, rüzgâr türbin kulesinin çelik kafesinin temeli de, bu yerel topraklama şebekesine bağlanır. Bu yerel topraklama

sayesinde, yıldırım düşmeleri ve şebekede oluşan kaçak akımların etkilerine karşı, rüzgâr santralinde topraklama sistemine, her bir birimin eş potansiyelde bağlanması sağlanmış olur.

Türbinlerin topraklaması, Şekil 4.2’de $R_{\text{türbin}}$ olarak gösterilmiştir. Türbinlerin topraklama şebekesi, sadece 15 metre çaplı bir halka ve dikey çubuklardan oluştuğundan bu sistemin sadece empedans amaçlı olduğu söylenebilir. Fakat türbinleri birbirine bağlayan uzun elektrotlar, daha karmaşık bir davranış biçimine sahiptirler. Bunlar Şekil 4,2’de π eşdeğer devreleri olarak gösterilmişlerdir. Böylece, seri empedanslar R_{seri} ve L_{seri} ’nin kombinasyonları iken, topraklama direnci R_{paralel} olarak verilmiştir. R_{seri} , basit olarak topraklama telinin direnci ve L_{seri} ise, topraklama devresinin self-endüktansıdır. Büyük rüzgâr santrali tesislerinde, uzun topraklama şebekesinin bu seri empedansı, göz ardı edilemez. Buradan hemen anlaşılacağı gibi, bir rüzgâr türbinine düşen yıldırımın yüksek frekanslı bileşenleri için, seri endüktans topraklama şebekesini, etkin bir şekilde bir birim türbinin topraklanmasına indirger. 50 Hz hata akımlı seri empedans bile, seri empedansın ihmal edilebileceği coğrafi alan olarak, küçük topraklama sistemlerinden beklenebilecek değerden çok daha yüksek bir topraklama direncine yol açabilir. Bu açıklamalarda, her ne kadar çok yüksek frekanslarda önemli olsada, şönt kapasitans ihmal edilmiştir [16].

ŞEBEKEYE BAĞLI RÜZGÂR ENERJİ SANTRALLERİNİN ŞEBEKEYE ETKİLERİ

5.1 Giriş

1990'ların başlarından buyana birçok ülke, güç sistemlerindeki dağıtılmış üretilere ilişkin önemli deneyimler kazanmışlardır. Dağıtılmış üretimlerin şebeke bağlantıları, özellikle dağıtım şebekeleri üzerinde yeni problemlerin oluşmasına neden olmuştur ve bu durum kısıtlamalar oluşturmıştır. Bu kısıtlamalar, sistem operatörlerine, elektrik kurumlarına, hükümetlere ya da düzenleyici kurullara kadar geniş bir alanda, dağıtılmış üretim birimlerinin şebeke bağlantısı için, teknik gereksinimleri belirlemede yol göstermiştir.

Geçen on yıllık süreçte, rüzgâr enerjisinin, dağıtım ve iletim şebekeleri üzerinde kullanımının yaygınlaşması ile birlikte mevcut teknolojilere ilişkin problemler artmıştır. Bu gelişmeler ile birlikte, rüzgâr çiftliklerinin şebekeye bağlanması, bazı kuralların tanımlanması için yol göstericilik sağlamıştır.

Başlangıçta, rüzgâr santralleri için şebeke gereksinimleri, klasik üretim birimleri için olandan daha esnektir denebilir. Ancak, rüzgâr gücünün hızla gelişimi ile elektrik şebekeleri üzerindeki etkileri giderek daha çok önemli hale gelmiştir ve bu durum gittikçe daha katı gereksinimlerin tanımlanmasına neden olmuştur. Bu nedenle, çözümler için şu andaki gereksinimler, giderek çok daha karmaşık ve güvenilir, aynı zamanda çok daha pahalı bir hal almaktadır [16].

5.2 Rüzgâr Enerji Santrallerinin Şebekeye Bağlanması

Bir rüzgâr çiftliği, şebekeye bağlandığı zaman yaşanan problemler ve kısıtlamalar şebekenin kendisi ile alakalı olabilir ve bu yüzden her tür dağıtılmış üretim santrallerine bağlı olabilirler. [17].

5.2.1 Genel Kısıtlamalar

Rüzgâr enerjisi kesintisiz bir enerji kaynağı değildir. Bu nedenle, rüzgâr enerjisini hiçbir kısıtlamaya tabi tutmadan elektrik enerjisine çevirerek şebekeye veren bir rüzgâr türbininin de, kesintili bir elektrik enerjisi üretmesi doğal bir durumdur. Kesintili yük çeken tesislerin, elektrik şebekesindeki neden oldukları olumsuzluklar bilinen bir durumdur. Bu nedenle, kesintili üretim yapan bir rüzgâr türbininin, şebekeye yaptığı olumsuz etkileri kontrol altına almak için, diğer ülkelerde olduğu gibi, ülkemizde de bazı kısıtlamalar bulunmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin şebekeye yaptığı olumsuz etki, şebekeye bağlantı noktasındaki kısa devre gücü ile doğrudan alakalıdır [12]. Ülkemizde, TEİAŞ tarafından uygulanmakta olan, bağlantı noktasındaki minimum kısa devre gücünün (MVA), en fazla yüzde beşi kadar kurulu güçte rüzgâr santralinin bağlantısına izin verilmesi şartı yeralmaktaydı ve bu elektriğin arz kalitesi için temel şart olarak vurgulanmıştı [18]. Ancak Ocak 2013'te çıkarılan yönetmelikle bu konuda TEİAŞ sorumlu kurum olarak belirlenmiş ve TS EN 61400 standartları uygulanması gerektiği vurgulanmıştır.

Ancak, rüzgâr türbinleri son 5-10 yıllık zaman diliminde önemli gelişme göstermiştir. Günümüzdeki modern rüzgâr türbinlerinde, rüzgâr enerjisi elektrik enerjisi olarak şebekeye verilmeden önce, çeşitli aşamalardan geçmektedir. Türbinlerin çalışmaya başlarken çektikleri akım kısıtlandırılarak, şebekeye olan etkisi azaltılmaktadır. Rüzgâr hızına göre, kanat açıları sürekli değiştirilerek, üretimi sabit tutmak amaçlanmaktadır. Bazı rüzgâr türbinlerinde, ani gelen rüzgâr darbelerinin neden olması sonucu, üretim yapmadan türbinin dönüş hızını artırmakta böylelikle rüzgâr darbesinin elektrik darbesi olarak şebekeye aktarılmasını kısmen engellemektedir. Ayrıca günümüzde geliştirilen çoğu rüzgâr türbinlerinde, türbinlerin gerilim seviyesini, şebekenin mevcut geriliminden daha düşük veya daha yüksek tutmak suretiyle, şebekenin gerilim regülasyonuna katkıda bulunmak da mümkün olmaktadır[11].

5.2.2 Rüzgâr Enerji Santrallerinin Dağıtım Şebekesine Bağlantısı

Dağıtım gerilimi seviyesinde şebekeye bağlanması planlanan bir rüzgâr santrali, diğer enerji santralleri veya otoprodüktör santraller gibi, ancak bağımsız bir enerji iletim hattı ile dağıtım merkezine veya trafo merkezine bağlanabilir. Can güvenliği ve sistem emniyeti açısından, dağıtım hatlarına saplama girmelerine müsaade edilmemektedir.

Ülkemiz açısından değerlendirme yaparsak, elektrik dağıtım şebekemiz, genelde 34,5 kV ve daha düşük gerilim seviyesindedir. Rüzgâr açısından zengin kıyı bölgelerimizde, trafo merkezlerinin güçlerinin 25-50 MW olduğu, bu bölgedeki iletim sistemimizin genellikle radyal yapıya sahip olduğu ve minimum sistem empedansı göz önüne alınırsa, kısa devre güçleri 200-300 MVA ile sınırlı kalmaktadır. Önceki uygulamalarda bu durum dağıtım şebekelerine bağlanacak rüzgâr santrallerinin gücünü azami 15 MW civarında olmasına yol açmaktaydı.

Gelişmiş ülkelerde rüzgâr türbinleri, kesiciler ve her bir türbin için bir trafo ile şebekeye bağlanmakta ve sistemin başında personel olmaksızın işletilmektedir. Başında elaman olmadan işletildikleri için, türbini her türlü şebeke ve türbin arızasına karşı koruyan bilgisayar sistemine sahiptirler. Nadiren meydana gelen arızalarda, türbin kontrol sistemi tarafından sinyal gönderilmekte ve uzaktan müdahale ile veya teknisyen göndererek sorun çözülmektedir [12].

5.2.3 Rüzgâr Enerji Santrallerinin İletim Şebekesine Bağlantısı

İletim şebekesine bağlanacak rüzgâr santralleri, ya bir iletim hattı ile en yakın trafo merkezine, ya da en yakın iletim hattına girdi çıktı yaparak şebekeye bağlanabilir.

Ülkemizde genel olarak iletim şebekemizin gerilim seviyesi 154 veya 380 kV' dur. Bu gerilimdeki trafo merkezlerimizin minimum kısa devre güçleri, 300-400 MVA'dan başlamakta, 10.000 MVA'ya hatta daha üst seviyelere çıkabilmektedir. Bu sebeple büyük güçte rüzgâr santrali tesisi kurmak isteyenler, ancak iletim şebekesine bağlanabilecekti.

Dağıtım sistemine bağlanacak bir rüzgâr çiftliğindeki elektrik bağlantılarının gerilim seviyesi, tercihen bağlanacakları trafo merkezinin gerilim seviyesi olarak seçilmektedir.

Bu durumda santral çıkışına ilave olarak yükseltici (veya düşürücü) transformatör tesis maliyetine sebep olmayacaktır.

İletim şebekesine bağlanan rüzgâr santrallerinde, ekonomik etkinlik sağlamak anlamında en uygun dağıtım gerilim seviyesi seçilebilir. Yedekleme sorunu, santral çıkışında kullanılacak yükseltici transformatörün ülkemizdeki standartlardan farklı olması durumunda ortaya çıkabilir.

Rüzgâr santrallerinin iletim şebekesine bağlanmasının diğer yöntemi ise, kısa devre gücünün çok daha yüksek olduğu bir 380 kV merkeze bağlanmalarıdır. Ülkemizdeki 380 kV merkezlerin en az kısa devre güçleri, genelde 5000 MVA'nın üzerinde olduğundan böyle bir merkeze çok sayıda rüzgâr santrali, şebekeyi rahatsız etmeyecek şekilde bağlanabilir. Burada önemli olan, çok sayıda transformatör maliyetinden tasarruf etmek için, gerektiğinde sadece rüzgâr santrallerinin bağlanacağı bir kirli bara tesis ederek, en ekonomik çözümün bulunmasıdır [11].

5.3 Rüzgâr Enerji Santrallerinin Bölgesel ve Şebeke Genelindeki Bozucu Etkileri

Değişken üretim yapma özellikleri nedeniyle, rüzgâr santralleri konvansiyonel santrallerden çok daha farklıdır. Rüzgâr santrallerinin toplam kurulu gücü büyüdükçe, sistem üzerindeki olumsuz etkileri ve bu etkilerin sebep olacağı tehlikeler de artmaktadır [16].

Rüzgâr gücü dönüştürme sisteminin kısmen küçük bir miktarının şebekeye bağlanması, genellikle büyük problemlere neden olmazlar. Enerji sağlarken biryandan da kalite ve güvenilirlik için bakım yapılır. Bunun yanı sıra rüzgâr gücü dönüşüm sisteminin büyük bir miktarı, bir konvansiyonel sisteme bağlandığı zaman, şebekede önemli çalışma problemleri meydana gelebilir.

Rüzgâr gücünün mevcut bir güç sistemine bağlanmasının etkisini değerlendirme, bozulmaları (gerilim ve frekans değişimleri) hesaba katmayı gerektirir. Şiddetli rüzgârlar, kısa devreler, rüzgâr santralının veya onun bir parçasının bağlantısının aniden kesilmesi ve diğer bazı anormal çalışma koşulları altındaki rüzgâr gücü dönüştürme sistemleri bunlara neden olabilir [15].

Bu bozulmalar, güç sistemindeki kararlılık ve güç kalitesi incelemelerinden tespit edilebilirler.

Rüzgâr santrallerinin arz güvenliği ve kalite kriterlerine olumsuz etkileri incelendiği zaman, rüzgâr santrallerinin bölgesel ve şebeke dayalı etkilerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bölgesel etkiler, diğer rüzgâr santrallerinden bağımsız olarak her bir santralin bağlı olduğu transformatör merkezinde, görülmektedir. Rüzgâr santrallerinin şebekeye olan toplu bozucu etkileri sonucunda ise, bütün sistem rahatsız olmaktadır [16].

5.3.1 Bölgesel Bozucu Etkileri

Bölgesel etkileri iletim hatları ve trafo akışları, koruma sistemleri, trafo merkezlerinde gerilimlerde değişiklikler, kısa devre arıza akımları ve şalt tesislerinde değişiklikler ile harmonikler, titreme ve gerilim dalgalanmaları gibi arz kalitesinde meydana gelen değişiklikler olarak özetleyebiliriz.

Bahsi geçen ilk iki konu, yeni bir rüzgâr santrali için bağlantı başvurusu yapılması durumunda incelenmektedir. Bu çalışmalar, rüzgâr santrallerine mahsus olmayıp, genel olarak tüm santrallere bağlantı başvurusu yapılırsa standart olarak yapılmaktadır. Ama rüzgâr santrallerinin arz güvenliği ve kalitesinin yerel etkileri, türbin tipine bağlı olarak (sabit hızlı veya değişken hızlı) farklılık göstermektedir.

Arz kalitesiyle ilgili olan üçüncü konuyu kendi içerisinde harmonikler, fliker ve gerilim dalgalanmaları olarak ayırt edebiliriz.

Harmonikler, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılan elektronik güç çeviricilerinden meydana gelmektedirler [15].

Güç elektroniği çeviricileri genellikle harmonik oluştururlar. Bununla beraber, harmonik akımlar, büyük ölçüde onun özelliklerine bağlı bir güç elektroniği çevircisi tarafından yayılırlar. Örneğin, kuvvetlendirilmiş anahtarlı eviricilerin kullanılması vasıtasıyla, evirici terminallerinde elektriksel niceliklerin dalga boylarına ilişkin daha etkin bir kontrol sağlanmış olur. Bunun yanı sıra, harmonik akımların seviyesi limit değerleri aşmaması gerekir [14].

Titreme, sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin, mekanik dalgalanmaları elektriksel çıktıya aynen yansıtmalarından meydana gelen bir durumdur [19].

Gerilim dalgalanmaları, rüzgâr türbini anahtarlama operasyonlarıyla bağlantıları ile alakalı bir durumdur. Rüzgâr hızındaki değişimler ya da kulenin gölge etkisi, özellikle zayıf şebekelerde (düşük kısa devre güç seviyelerinde) titreme problemlerine neden olabilmektedir.

Gerilim dalgalanmalarıyla alakalı olarak rüzgâr gücü santrallerinin değişik türlerde gerilim dalgalanmaları oluşturabildiklerini söyleyebiliriz. Bunlar, rüzgâr hızındaki değişimler sebebiyle, güç değişimlerinin sonucu oluşan, yavaş gerilim dalgalanmaları ve yol verme esnasında ya da generatörler arası değişim esnasında ve benzeri durumlarda meydana gelen gerilim değişimleridir [16].

5.3.2 Şebekeye Olan Bozucu Etkileri

Rüzgâr türbinlerinin veya rüzgâr santrallerinin, şebekeyi bozan etkilerinin farklı nedenleri vardır ve çoğu türbin ile alakalı nedenlerdir. Ortalama güç üretimi, türbülans şiddeti ve rüzgâr makaslamayla alakalıdır ve bunlar meteorolojik ve coğrafi koşullarla saptanırlar. Diğer bütün nedenlerin, rüzgâr türbininin teknik performansı ile ilişkili olduğu söylenebilir. Performans, sadece generatörler, transformatörler v.s. gibi elektriksel bileşenlerin karakteristikleriyle belirlenmez. Rotor ve sürücünün mekanik ve aerodinamik hareketleri de önemlidir. Türbin tipinin, rüzgâr türbinleri ve rüzgâr santrallerinin güç kalitesi karakteristikleri üzerinde büyük bir önemi vardır [16].

Şebekeye olan bozucu etkileri arasında;

- Sistem dinamiği ve kararlılığı,
- Reaktif güç kontrolü ve gerilim,
- Frekans kontrolü ve konvansiyonel santrallerde sık sık yük alma/yük atma problemleri meydana gelmektedir [18].

5.3.2.1 Sistem Dinamiği ve Kararlılığı Etkisi

Rüzgâr santrallerinin sistem dinamiği ve kararlılığı üzerindeki dezavantajları, bu santrallerin türbinlerindeki generatör sistemlerinin, konvansiyonel santrallerdeki senkron generatörlerden farklılığından kaynaklanan bir durumdur. Bu generatörlerin bağlantı noktalarında gerilim ve frekansa bağlı olarak tepkiler oluşmaktadır, bu tepkiler diğer senkron generatörlerden farklılık göstermektedir. Değişken hızlı türbinlerin elektronik güç çeviricileri, gerilim düşümüyle meydana gelen aşırı akımlara çok duyarlı olduğundan, küçük bir gerilim düşümü olsa bile, bir bölgedeki rüzgâr santrallerini topluca açabilmektedir. Bu durumda, sistem kararlılığının korunmasında çok önemli sorunlar meydana getirebilmektedir.[18].

Esasen, rüzgâr santralının çalışması, şebekenin dinamik davranışı ve şebeke çalışmasını veya şebekeye bağlı özel cihazların çalışmasını etkilememeli veya zarar vermemelidir. Bu durum, rüzgâr çiftliğinin çeşitli konfigürasyonlar ve çalışma koşulları için kontrol edilmek zorundadır. Bunlara, santralin çalışmayı kesmesi, çalışmaya başlaması ve rüzgâr hızı değişimleri gibi örnekler gösterilebilir.

Diğer taraftan, rüzgâr çiftliğinin devre dışı olarak bağlantısının kesilmesi, ani gerilim düşmeleri ve arızalar gibi şebeke üzerinde yaşanan güçlü sorunlar durumu kötüleştirebilmektedir. Bu durum, ada şebekelerde veya yüksek rüzgâr gücü bağlantılı iletim şebekelerindeki üç fazlı hatalarda özellikle geçerli bir olgudur. Rüzgâr çiftliğinin devre dışı kalması büyük ölçüde üretim kayıplarına yol açabilir. Bu durum, enerji dağıtım istasyonlarında oluşan aşırı yükü kaldırmak adına, belirli bölgelerde kısa süreli elektrik kesintilerine ve hatta daha kötü durumda sistemin çökmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle, bağlantı noktasındaki gerilim seviyesine göre, şebeke operatörleri, rüzgâr çiftliklerinin hata taşıma yeteneğine sahip olması gerekliliği doğar Bu sayede önceden belirlenmiş ani gerilim düşmelerine karşı koyabilirler [18].

5.3.2.2 Reaktif Güç Üretimi ve Gerilim Kontrolü Üzerindeki Etkileri

Güç sistemleri içinde, hatlar, yükler ve transformatörler gibi birbirinden farklı bileşenler genellikle reaktif güç tüketirler. Reaktif güç tüketimini kompanze etmek ve şebekede güç iletimini sağlamak adına, kondansatör gurupları veya üretim santralleri gibi diğer tip

cihazlar tarafından reaktif güç sağlanması gerekmektedir. Diğer üretim araçları gibi rüzgâr çiftlikleride bu kompanzasyona katılmak zorunda olabiriler [18].

Rüzgâr türbinlerinin reaktif güç çıkışı kapasitesine bağlı olarak reaktif güç üretimi ve gerilim kontrolü üzerindeki etkileri, değişebilir(değişken reaktif güç çıkışı kapasitesi bütün rüzgâr türbinlerinde aynı değildir). Rüzgâr santrallerinin kurulacağı yere göre veya şebekeye uyumluluğuna bağlı olarak değişebilir (rüzgâr türbinlerinin çıkış gerilimleri, göreceli olarak daha düşük olup, şebekenin genellikle zayıf olduğu uzak noktalarda kurulmaktadır). Bu sebeple, gerilim kontrolüne katkıda bulunmazlar. Bölgede konvansiyonel senkron generatörlerin yerine büyük kurulu güçte rüzgâr santralı kurulmasının teklif edilmesi durumunda, bölgedeki gerilim kontrolü yönetiminin dikkatle irdelenmesi gerekmektedir [18].

Şebeke çalışması, üretim birimleri tarafından yapılan bir şebeke gerilim kontrolü ihtiyacı oluşturur. Rüzgâr türbinlerinin çok kısıtlı reaktif güç tüketim ve üretim yeteneğine sahip olmalarına rağmen, gerilim kontrolüne katılmaları gerekebilir [18].

Esasında bütün rüzgâr santrallerinin aktif gerilim kontrolüne katılım kapasitesine sahip olmaları sağlanmalıdır. Sincap kafesli indüksiyon generatörleri için rotor hızı, aktif güç, reaktif güç ve gerilim arasında sabit ilişki bulunur. Bu nedenle bu tip türbinler gerilim kontrolünü reaktif güç çıkışıyla yapamazlar. Gerilim çıkışının kontrolü için, kontrol edilebilir reaktif güç üretebilecek ilave teçhizatın kurulumunun sağlanması gerekmektedir. Değişken karakteristikli (aniden dalgalanan) rüzgâr ile üretim yapan sabit hızlı türbinler şebekede titremeye (türbinin ürettiği dalgalı güç çıkışına bağlı olarak şebeke geriliminde oluşan gerilim dalgalanmaları) neden olmaktadır. Değişken hızlı türbinler, reaktif güç çıkışlarını ayarlayarak gerilim kontrolü sağlayabilirler. Ancak bu gerilim kontrolü yeteneği çevirici ve kontrol sistemlerinin kapasiteleriyle alakalı ve sınırlıdır. Genelde rüzgâr türbinlerinin, özellikle şebekenin zayıf olduğu uç noktalarında gerilim sorununa sebep olabileceği unutulmamalıdır. Enterkonnekte sisteme rüzgâr santrallerinin bağlantısında bozucu etkiler kadar önemli bir unsur olduğu ve ayrıca bağlantı noktalarında iletim kapasitesinin yetersiz kalabilmesi sorundur. Rüzgâr potansiyeli, yerleşim merkezlerinden uzak bölgelerde olmakla beraber bu bölgeler şebekenin zayıf olduğu noktalardır. İletim Sistemi, bu bölgelere başka noktalardan

bölgenin enerji ve güç tüketimi taşıyabilecek şekilde tasarlanmıştır. Özellikle iletim sistemine büyük güçte rüzgar enerjisi entegre edilirse, üretilecek elektrik enerjisini her zaman sistemin güçlü tüketim noktalarına taşımak için yeni iletim tesisleri gerekecektir. Bunun için ya bağlantının doğrudan uzun hatlarla güçlü noktalara yapılması ya da bağlantı noktası ile sistemin güçlü tüketim noktaları arasındaki iletim sisteminin yeni hatların tesisi ile güçlendirilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, büyük enerji kapasitelerinin sisteme entegrasyonu için, oldukça büyük iletim tesisi yatırımlarına ihtiyaç duyulmaktadır [16].

5.3.2.3 Frekans Kontrolü ve Yük Eğrisinin Takibi Konularına Etkileri

Şebeke çalışması frekans kontrolünü de beraberinde getiri ve bu üretim birimleri tarafından yapılır. Rüzgâr türbinleri, büyük ölçüde rüzgâr enerjisinin değişken karakteristik özelliğinden dolayı, frekans kontrolüne ilişkin kısıtlı kontrol yeteneğine sahiptirler. Ayrıca, ürettikleri aktif gücün yüksek değişkenlik özelliğinden dolayı, rüzgâr enerjisinin yüksek seviyede bağlantısı, frekans kontrol yeteneğinde bir artışı gerektirmektedir. Bu, frekans kontrolü için şebekedeki diğer üretim birimlerinin aktif güç değişimlerinde bir artışa ve çalışma programını tanımlamada zorluklara yol açar [16].

Rüzgâr santrallerinin dalgalı ve kontrolsüz rüzgâr enerjisine dayalı üretim yapmaları nedeniyle, üretim programının yapılamaması, tahmin edilebilen ve tahmin edilemeyen (örneğin; kısa devre arızası, rüzgârın fazla hızlı esmesi nedeniyle santralin devreden çıkması) üretim dalgalanmalarının dengelenmesi ve yük eğrisinin izlenmesi için, yeterli yedek konvansiyonel santral bulundurulması gerekmektedir. Bunun yanında, rüzgâr santrallerinin frekans üzerindeki bozucu etkilerini kompanze etmek, üretim dengesizliklerini gidermek ve yük eğrisini takip etmek için ayrılan konvansiyonel santrallerden oluşan yedek generatörlerin, artan rüzgâr santrali kurulu gücü nedeniyle, teknik yeteneklerinin arttırılması gerekmektedir. Sistem frekansının ilgili yönetmeliklerdeki kriterlere uygun sınırlar içinde tutulabilmesi için yedek konvansiyonel santrallerin çok daha hızlı ve daha yüksek kapasitede (tepki süresi kısa ve ulaştığı üretim miktarı yüksek) devreye alınmalarının sağlanması gerekir[16].

Değişken karakteristikli rüzgâr enerjisi ile üretim yapan rüzgâr santrallerinin primer frekans kontrolüne katkıda bulunması mümkün görülmemektedir. Ancak, frekanstan

bağımsız işletme prensibiyle çalıştırılmadıkları sürece frekans kontrolüne katkıda bulunamazlar. Teknik olarak, bazı rüzgâr türbinleri (kanat kontrollü) nominal çıkış gücünün altında işletilmesi durumunda, frekans kontrolüne katkı yapabilmektedir. Rüzgâr türbinlerinin sebep olduğu güç dalgalanmaları, ancak konvansiyonel santrallerle dengelenebilmektedir. Şebeke arızası veya aşırı rüzgâr hızı nedeniyle santralin durması gibi nedenlerle, rüzgâr santrali üretimindeki beklenmeyen ani kayıplar için, yeterli yedek kapasite ayrılması gerekmektedir. Artan rüzgâr santrali kurulu gücünün sebep olacağı frekans dalgalanmalarının, ilgili yönetmeliklerdeki sınırlar içinde tutulabilmesi için, yedekte tutulan konvansiyonel santrallerin artan sistem gereksinimlerine cevap vermesi gerekecektir.

Yeni şebekeye bağlantı şartlarından biri de, frekans yükselmesi durumunda rüzgâr santrallerinin güç çıkışının azaltılması veya sınırlandırılmasıdır[18].

5.4 Büyük Rüzgâr Çiftlikleri Planlamasında Sürekli Hal Güç Sistemi Sorunları

Araştırmalar göstermiştir ki, maksimum rüzgâr çiftliği kapasitesi, tek tek rüzgâr türbinlerinin elektriksel konfigürasyonuna çok bağlıdır. Asenkron generatörler kullanıldığı zaman, reaktif güç kompanzasyonu, izin verilen kapasiteyi arttırır. Değişken hızlı generatörler, en iyi elektriksel karakteristiklere sahiptirler ve asenkron generatörler ile kıyaslandığında, rüzgâr çiftliğinin maksimum kapasitesinin artmasını sağlarlar.

İç rüzgâr çiftliği şebekesindeki kayıplar ve dış şebekedeki kayıplar, rüzgâr çiftliğinin boyutunun yanında, elektriksel konfigürasyondan etkilenir. Asenkron generatörlü bir konfigürasyon düşünüldüğünde, reaktif kompanzasyon, iç ve dış şebekede artan kayıplar vermez.

Şebekeye maksimum kapasitede bağlanmak kayıpları arttıracaktır. Bir rüzgâr çiftliği planlarken, ana mesele, en uygun oranı (tesis edilecek güç açısından) ve tesisatın tasarımını belirlemektir. Sürekli hal gerilim kısıtlamaları, ısı kısıtlamalar ve şebeke tıkanması gibi bir kaç önemli sebep, rüzgâr çiftliğinin mümkün olan maksimum kapasitesini sınırlar [15].

Genellikle, rüzgâr çiftliğinin bağlantı noktasında ve rüzgâr çiftliğinin bağlandığı besleyicide (ana kabloda) gerilim yükselir. Gerilimin belirlenmiş olan limit değerleri

aşmaması sağlanmalıdır. Ayrıca, bir rüzgâr çiftliğinin şebekeye bağlantısı, şebeke üzerindeki gerilim profilini, sadece bağlantının gerilim seviyesinde değil aynı zamanda düşük gerilim seviyelerinde de etkiler.

Şebeke bileşenlerindeki aşırı akımlar, rüzgâr çiftliklerinin bağlantı noktası yakınında meydana gelebilirler. Bazı çok büyük rüzgâr çiftliği örneklerinde veya rüzgâr enerjisinin yüksek bir bağlantı seviyesi için, iletim şebekesinde ve hatta bazen komşu ülkelerin iletim sistemi ile uluslararası bağlantılarda tıkanıklık problemleri de meydana gelebilir[17]. Bununla birlikte, şebekedeki sınırlamalar rüzgâr çiftliğinin tasarımına bağlıdır ki, teknoloji seçimi ve reaktif güç kontrolü bu noktada önemlidir. Güç sisteminde, maksimum rüzgâr çiftliği kapasitesinde sürekli hal sınırlamaları, farklı rüzgâr türbinlerinde elektriksel konfigürasyonun seçimine bağlı olarak değişir.

Asenkron generatörlü rüzgâr türbinleri için, reaktif güç kompanzasyonu izin verilebilir maksimum tesis kapasitesini artırır. Bununla birlikte, kapasitif kompanzasyonun yüksek derecesi, kademe değiştiricili transformatör kullanıldığı zaman problemlere yol açabilir (kademe değiştirildiğinde, gerilim değişimlerinin artmasından dolayı). Bu, planlanan rüzgâr çiftliğinin kapasitesi için sınırlama faktörü olabilir.

Değişken hızlı generatörler kullanıldığı yerlerde, reaktif güç kesin olarak kontrol edilebilir en iyi elektriksel karakteristikleri verirler ve en yüksek izin verilebilir rüzgâr çiftliği kapasitesini sağlarlar. Rüzgâr santralinde, tek olarak değişken hızlı generatörlere reaktif güç kontrolü uygulayarak, izin verilebilir rüzgâr santrali kapasitesi ayrıca artırılabilir.

Reaktif kompanzasyon stratejisi, rüzgâr santralinin içindeki ve dışındaki şebekedeki kayıpları da etkileyecektir. Asenkron generatörler kullanıldığında ve reaktif kompanzasyon olmadığı zaman, tüm kayıplar önemli ölçüde artacaktır. Dış şebekenin artan kullanımı, daha yüksek kayıplara yol açar. Rüzgâr santralinin, reaktif güç karakteristiğinin geliştirilmiş kontrol metodları, izin verilebilir rüzgâr çiftliği kapasitesini artırır. Fakat azaltılmış reaktif güç transferinden dolayı, dış kayıplar azalır [16].

5.5 Bölgesel Şebekelerde Gerilim Kararlılığı Limitleri ve Büyük Ölçekli Rüzgâr Gücü Entegrasyonu

Dünya’da toplam rüzgâr gücü kapasitesi, her geçen gün hızla artıyor ve artacaktır. Bu tip üretim birimleri müşterilere ve kamu hizmeti gören şirketlere yeni fırsatlar ve problemlerde getirecektir. Onların, elektrik şebekesi üzerindeki gerilim kararlılığına etkisini değerlendirmek, önemli ve gereklidir. Özellikle zayıf bağlı sistemler için. Rüzgâr santrallerinin artışı, gün geçtikçe daha fazla dikkate değer olmaktadır ve problemlerde daha detaylı araştırmayı gerektirmektedir. Ana güç iletim sisteminden epeyce uzaktaki alanlarda, büyük ölçekli rüzgâr gücü santralleri geliştirilip planlanacağı zaman, gerilim kontrolü değerlendirmesi ve reaktif güç kompanzasyonu artarak önem kazanır [16].

Bölgesel şebekenin gerilim kararlılığı, rüzgâr santralinin çalışması ve maksimum derecelendirilmesinde ana sınırlayıcı olabilir. Zayıf şebekelere rüzgâr gücü entegrasyonuna ilişkin teknik problemler, genel olarak şebekenin ısı kapasitesine ve/veya rüzgâr gücünün gerilim kalitesi ve kararlılığına ters etkisi ile ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte, bazı durumlarda yeni iletim hatlarının geliştirilmesine ve mevcut hatların kapasitelerinin arttırılmasına ilişkin yerel sıkıntılar, onu dikkate değer yapabilir. Mevcut hatlar, en kötü durumda, belli bir seviyede sistemin normal teknik sıkıntılarıyla çalışmayı gerektirebilir.

Araştırmalar göstermiştir ki, geleneksel gerilim kararlılığı limitlerinin ötesinde elektrik güç sistemini çalıştırmak teknik olarak mümkün olabilir. Bu limitleri yükseltmek için, ekstra reaktif güç kompanzasyonu, yani bir SVC (Statik VAR Kompanzatör) uygulamasına gidilebilir. Ancak, bu çözüm fiyat açısından pahalıdır. Ana hedef, gerçek bölgesel sistemin ısı kapasitesinin tamamını kullanmaktır. Örneğin; onun ısı limitine mümkün olduğunca yakın sistem çalışması gibi. Ayrıca, kabul edilebilir güç kalitesi, daimi müşteriler tarafından bağlantı noktasında korunmak zorundadır. Bu amaçları gerçekleştirmek için, SVC uygulaması önemlidir.

Rüzgâr türbini generatör tasarımlarındaki yeni gelişmelere, şebeke ve generatör arasındaki güç elektroniği çeviricileri dâhildir[15].

Bugün rüzgâr çiftlikleri, hem boyut hemde sayı olarak geliyor. Reaktif güç için yüksek istek, büyük rüzgâr çiftlikleri için önemli bir özellik olarak bilinir. Eğer şebeke, rüzgâr çiftliği reaktif güç ihtiyacını karşılayamazsa, rüzgâr çiftliği gücünün sisteme entegrasyonu sınırlanacaktır. Rüzgâr çiftliğinin çalışmasına bağlı reaktif güç eksikliği, şebeke genel kayıplarının artmasına ve gerilim kararlılığına ters yönde etki yapabilir.

Rüzgâr çiftliğinin şebekeye bağlantı noktasının özel önemi vardır. Rüzgâr çiftliğinin büyük yüke daha yakın ve daha yüksek gerilim seviyesinde şebekeye bağlanması, kayıpları azaltır, reaktif kompanzasyon gerekliliğini azaltır ve rüzgâr çiftliğinin sistem gerilim kararlılığına ters etkisini azaltır [14].

5.6 Kısa-Devre Arızası Durumunda Rüzgâr Enerji Santrallerinin Tepkisi

Rüzgâr gücünün şebekeye bağlantı seviyesinin sürekli artması, mevcut şebekenin çalışmasında bazı etkilenmelere sebep olur, özellikle güç kalitesi açısından. Yeni gereksinimlere göre, dış şebekedeki bir kısa devre hatasının temizlenmesinden sonra, şebekeye bağlı rüzgâr türbini, gerilim düşmesi ve yığılma akımı nedeniyle bağlantı kesilmeden, minimize edilmiş güç kaybı ile onun normal çalışmasına geri dönmelidir. Rüzgâr gücü bağlantı düzeyi yüksek olduğu zaman, rüzgâr gücünün büyük miktarının bağlantısının kesilmesi, önemli üretim kaybına sebep olarak, güç sistemi kararlılığını tehdit edebilir [19].

Şebekede meydana gelen herhangi kısa devre arızası sonrasında, gerilim düşümü oluşur ve sistemde ilerleyerek rüzgâr santrallerine kadar ulaşır. Rüzgâr santraline ulaşan gerilim düşümünün karakteristiği, arızanın yerine, tipine, bölgedeki senkron generatörlerinin sayısına ve kurulu gücüne ve bunların gerilim kontrolüne katkıda bulunmak için üretecekleri reaktif güç çıkışı miktarına dayalı olarak farklılıklar göstermektedir.

Rüzgâr santrali kurulu gücünün fazla, senkron santral kurulu gücünün de az olduğu bölgelerde, gerilim düşümü son derece önemli sorunlara sebep olmaktadır. Alışıldığı üzere, gerilim düşüşü olduğunda, rüzgâr santralleri saniyeler içinde sistemden ayrılmaktadır. Elektronik güç çeviricilerinin arıza akımlarından korunması amacıyla, bağlantı noktasındaki gerilim şebeke geriliminin %10-20 altına düştüğünde, generatör salınımlarının yol açacağı gerilim dalgalanmalarının ve generatörler tarafından

şebekeden aşırı reaktif güç çekişinin önlenmesi için, rüzgâr santralleri sistemden ayrılmaktadır [16].

Asenkron generatörlü sabit hızlı rüzgâr türbinlerine ilişkin olarak, bir dış hatanın temizlenmesinden sonra, normal çalışmaya geri döndürmeye, dinamik reaktif kompanzasyon, rüzgâr türbinlerinin röle ayarlamaları ve rüzgâr türbinlerinin kontrol kabiliyetleri yardım edebilir [15].

Sincap kafesli makineli bir rüzgâr türbinine gerilim düşüşü ulaştığında, aktif mekanik güç sabit kalmakta, üretilen aktif güç azalmakta, generatör hızlanmakta, akım ve reaktif güç tüketimi önemli ölçüde artmaktadır. Asenkron generatörün tüketimini kompanze etmek amacıyla kurulmuş olan kapasitörler tarafından üretilen reaktif güç hızla azalmakta ve iletim/dağıtım hatlarında reaktif güç kayıpları artmaktadır. Makine, atalet sabitinin küçük olması durumunda, çok çabuk hızlanmaktadır. Arıza temizlendikten sonra, makinenin hızlanmış olmasına bağlı olarak, aktif güç çıkışı arıza öncesindeki değerinden daha fazla olma eğilimindedir. Ancak, bu durumda daha yüksek akımlar gerekecek, hat ve trafolar da daha fazla gerilim düşüşü olacak ve asenkron generatörü arıza öncesi gerilimi sağlayamayacaktır. Sonuç olarak, aşırı akım koruma sistemi nedeniyle, makine açmaya gidecektir.

Sincap kafesli asenkron makinelerin, ilk 100 msn. için kısa devre arıza akımına katkısı, senkron generatörlere oldukça benzemektedir. Ancak, bu tip rüzgâr türbinlerinin, arıza temizlendikten sonra, aşırı reaktif güç tüketerek gerilim kararsızlığına neden olması, senkron makinelerden farklı bir davranıştır. Arıza süresi uzuyorsa ve rüzgâr santrali şebekenin zayıf olduğu bir bölgede bulunuyorsa, gerilim kararsızlığı riski ve rotor hızı kararsızlığı artar. Normalde gerilim veya rotor hızı kararsızlığı olmadan önce, aşırı akım koruma sistemi devreye girmektedir [18].

Çift beslemeli asenkron generatörlü değişken hızlı rüzgâr türbinleri, dünyada tesis edilen değişken hızlı rüzgâr türbinlerinden en popüleridir ve sabit hızlı rüzgâr türbinleri ile mukayese edildiğinde, kısa devre hataları boyunca sistem kararlılığına ilişkin davranışları daha iyidir. Bunun sebeplerinden biri, onun aktif ve reaktif güç çıkış kontrol kabiliyeti olabilir. Dış şebekedeki bir kısa devre arızasının temizlenmesinden sonra, bu gibi türbinlerin normal çalışmasına geri dönmesini incelemek oldukça ilginçtir ki, bir dış kısa

devrenin temizlenmesinden sonra, rüzgâr türbininin normal çalışmasına geri dönmesinin, kontrol planlarıyla nasıl etkili bir şekilde sağlanacağı görülür [18].

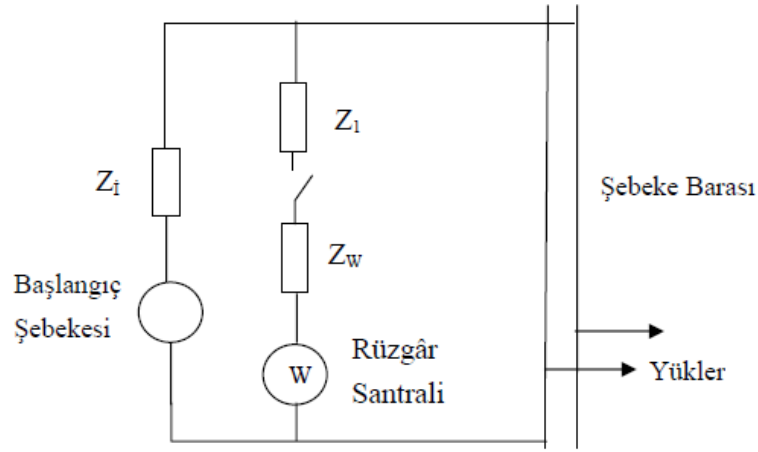
Çift beslemeli asenkron generatörlü türbinler de kısa devre arıza akımına katkıda bulunurlar. Günümüzde, aşırı akıma çok duyarlı olan elektronik güç çeviricilerinin koruma sistemleri, arıza durumunda şebekeden hızla ayrılmayı sağlamaktadır. Bir çözüm olarak, bazı durumlarda rotor tarafındaki çeviriciyi, aşırı rotor akımlarından korumak için, arıza sırasında rotor by-pass edilir. Rotor akımının sınırlandırılması ve makinenin hız-dönme momenti karakteristiğinin etkilenmesi amacıyla, rotor tercihen direnç üzerinden by-pass edilebilir. Makine hızlanabilir ve şebekeden önemli miktarda reaktif güç çekebilir. Ancak, gerilim düzelmedikçe, makine çok hızlı olarak sistemden ayrılacaktır. Elektronik çeviricinin kapasitesine bağlı olarak, senkron generatörler kısa devre arıza akımına katkıda bulunmaktadır. Eski çeviricilerin çoğu, ucuz olmaları için, en büyük nominal akım değerine dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Bu çeviriciler, (ve kontrol sistemleri) arıza akımını nominal akım değeriyle sınırlandırmaktadır. Mevcut durumda, senkron generatörler arıza olduğunda hızla şebekeden ayrılmaktadır. Rüzgâr santrallerinin kurulduğu bölgede, arıza sonrası bütün rüzgâr santrallerinin gerilim düşümü nedeniyle aniden devre dışı olması, bölgede önemli bir üretim açığına sebep olmaktadır. Bu, sistem emniyeti, arz güvenliği ve kalitesi açısından büyük olumsuzluklara neden olabileceğinden, istenen bir durum değildir [18].

Sonuç olarak şunlar söylenebilir ki, rüzgâr güç santrali, şebekedeki hata akımlarına katkıda bulunabilir. Rüzgâr çiftliğinin entegrasyonunu takiben, maksimum kısa devre gücü veya akımları, şebeke ekipmanlarının farklı bileşenleri için maksimum kabul edilebilir değerleri aşmamalıdır [16].

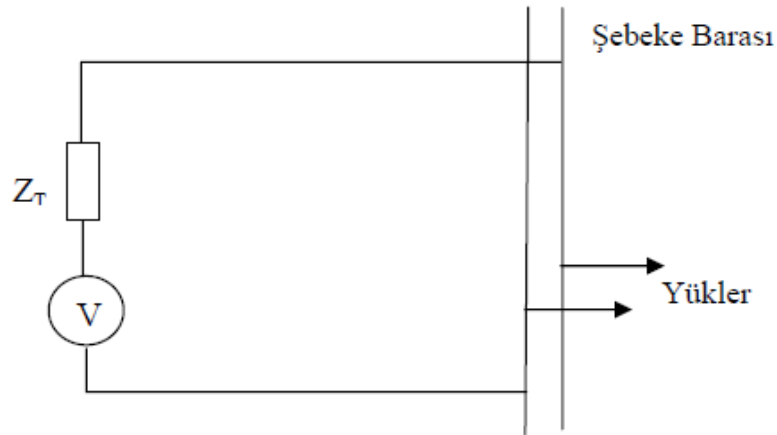
Arz Güvenliği ve Kalite Yönetmeliği'nde de yer alan, rüzgâr santrallerinin, arıza sonrasında belirli süre ve büyüklükte gerilim düşüşü olmasına rağmen, sisteme bağlantılarını sürdürme ve şebekenin toparlanmasına katkıda bulunma yeteneğinin olması gerekmektedir [18].

5.7 Rüzgâr Enerji Santrallerinin Şebekeyi Besleme Kapasitesi Limiti ve Önemi

Şebeke bağlantısı konusu, mevcut rüzgâr kaynaklarının tamamının işletilmesini sınırlayan çok önemli bir faktördür. Yüksek rüzgâr gücü potansiyeline sahip bölgeler, genelde zayıf elektrik şebekesine sahiptir. Hindistan, Çin ve Meksika gibi gelişmekte olan bir çok ülkede, mühendisler güç kalitesi açısından mevcut şebeke ile bağlantının uygun olduğu yerlerde problemlerle karşı karşıya kalırlar. Bu gibi kararlarda temel düşünce, bağlantı yaptıktan önce ve sonraki kaynak empedansıdır. Bu konuyla ilgili başka bir bakış açısında, planlanan bağlantı noktasındaki, sistem sertliği veya hata seviyesi olarak bilinen mevcut kısa devre gücüdür (MVA).



a) Rüzgâr santrali bağlanmadan önce



b) Rüzgâr santrali bağlandıktan sonra

Şekil 5.1 Rüzgâr santrali ve şebekenin Thevenin eşdeğer devre modeli.

Bağlantı yaptıktan sonra, sistem sertliğini değerlendirmenin bir başka yolu, yukarıda Şekil 5.1’de gösterildiği gibi rüzgâr santrali ve şebekenin thevenin eşdeğer devresinin ayrı ayrı kullanılmasıdır.

V =Planlanan bağlantı noktasındaki şebeke gerilimi

Z_i =Bağlantıdan önceki şebekenin kaynak empedansı

Z_w =Rüzgâr santralinin kaynak empedansı

Z_1 =Rüzgâr santrali ile şebeke arasındaki bağlantı hattının empedansı

Z_T =İki sistemin birleştirilmiş toplam kaynak empedansı ise,

Şebekeye bağlanması planlanan rüzgâr kapasitesi ile sisteme bağlantıdan sonra, birleştirilmiş eşdeğer thevenin şebekesi şekil 5.1 (b) gibi olacaktır.

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{Z_i} + \frac{1}{Z_w + Z_1} \quad (5.1)$$

Bağlantı noktasındaki birleştirilmiş kısa devre gücü MVA ;

$$MVA_{SC} = \frac{\text{Nominal MVA Kapasitesi}}{Z_{Tbirim}} \quad (5.2)$$

Daha yüksek kısa devre gücü (MVA) daha sert şebeke demektir. Rüzgâr gücü kapasitesine ilişkin belirli olan minimum şebeke sertliği, meydana gelen şebekenin güç kalitesinin korunmasını gerektirir. Bu düşünce, sisteme eklenecek toplam rüzgâr gücü kapasitesini sınırlar.

Sadece Z_T ’nin büyüklüğü önemli değil, Z_T ’nin bileşenleri R direnci ve X reaktansı da ayrı öneme sahiptirler. Temel devre teorisi ifade eder ki, herhangi bir elektrik şebekesinde aktif ve reaktif güç ayrı bir şekilde dengede tutulmalıdır. Bu yüzden rüzgâr generatörü empedansının aktif ve reaktif bileşenleri şebekeye etki edecektir.

Asenkron motoru gibi bir rüzgâr generatörüne yol verme, şebekeden içeriye akan bir akıma sebep olabilir ve bu bir kaç saniye için ani gerilim düşmesi ile sonuçlanabilir. Bu düşüş, şebeke hattının tolerans sınırının dışında olabilir. Çoğu ülkede, bu geçici gerilim düşmesi, % 2-5 ile sınırlanır. Gelişmekte olan ülkelerde, daha yüksek değer hâkimdir. Birçok makineli rüzgâr santralleri için, makineler bu etkiyi minimize etmek için düzenli çalıştırılabilir. Bununla birlikte, çok zayıf bir sistem için, bu konu şebekeye bağlanabilecek

makinelerin sayısı ile sınırlanabilir. Gerilim titreme şiddeti, makinelerin sayısının karekökü kadar artar. Bir makineye yol vermenin sebep olduğu titreme, şebeke bağlantı noktasındaki hata seviyesi ile ters bir şekilde değişir ve bu yüzden daha zayıf şebekelerde bir sorun olabilir[17].

Kamu hizmeti gören elektrik şebekelerinde, planlanan bağlantı noktasındaki şebekenin kısa devre gücünün (MVA) küçük yüzdesinin daha azına, toplam yenilenebilir güç oranlarını sınırlayarak ve güç kalitesi korunarak ihtiyaç karşılanabilir. Bu limit gelişmiş ülkelerde genellikle % 2-3, gelişmekte olan ülkelerde ise % 5'tir ve epeyce kısıtlayıcı olur. Çünkü güçlü rüzgâr alanı genellikle şebekenin zayıf olduğu kırsal alanlarda mevcuttur [18].

MODELLENEN ŞEBEKE ÜZERİNDE UYGULAMA

Bu tez çalışmasında Türkiye Elektrik Üretim A.Ş., Türkiye Elektrik İletim A.Ş.'den alınan bilgiler doğrultusunda 154/34.5 kV iletim ve dağıtım şebekesini oluşturan, bir tane 380/154kV TM, beş tane 154/34.5 kV TM, bir tane 154/6.3 kV TM ile iletim ve dağıtım hatlarıyla birlikte yük durumları incelenmiş, rüzgar enerji santralleri çeşitli senaryolarla sisteme dahil edilerek rüzgar enerji santrallerinin enterkonnekte şebekeye bağlantı sorunları, etkileri analiz edilmiştir.

Güç akış metotları kullanılarak Bolu-Düzce enerji iletim hattının gerekli hesaplamaları yapılmış ve bu iletim hattı Matlab kullanılarak modellenmiştir. Rüzgâr enerjisi günümüzün en hızlı gelişen endüstrisi olarak son yıllarda güç sistemi içerisindeki payının artması, rüzgâr türbinlerinden beklentiyi de arttırmaktadır. Modellenen iletim hattında Newton-Raphson Güç akış metodu kullanılarak baralar arasındaki güç akışları hesaplanmıştır. Ayrıca toplam gereken generatör gücü, çekilen aktif, reaktif güçler ve hat kayıpları da bulunmuştur. Rüzgar enerji santrallerinin ayrı ayrı iletim ve dağıtım hattına bağlantısı yapılarak sonuçlar gözlemlenmiştir.

>> dokuzbara

Power Flow Solution by Newton-Raphson Method
Maximum Power Mismatch = 9.76425e-07
No. of Iterations = 4

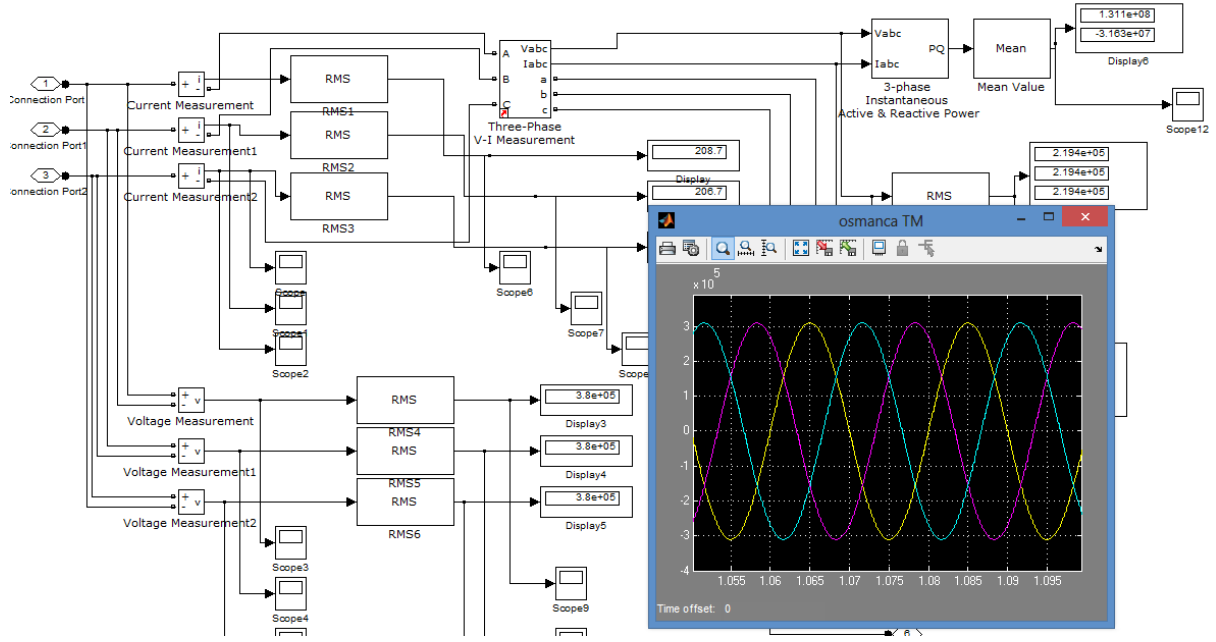
Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected
			MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar
1	1.000	0.000	0.000	0.000	126.586	33.357	0.000
2	0.997	-0.372	96.300	19.400	0.000	0.000	0.000
3	0.974	-0.734	44.900	4.500	0.000	0.000	0.000
4	0.955	0.111	30.100	3.800	0.000	0.000	0.000
5	0.940	-1.433	25.200	4.700	0.000	0.000	0.000
6	0.937	-1.751	24.000	2.500	0.000	0.000	0.000
7	0.919	-3.141	34.000	14.800	0.000	0.000	0.000
8	1.000	12.518	0.000	0.000	160.000	-7.539	0.000
9	0.996	11.217	21.000	3.150	0.000	0.000	0.000
Total			275.500	52.850	286.586	25.817	0.000

Line Flow and Losses

--Line--		Power at bus & line flow			--Line loss--		Transformer
from	to	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	tap
1	2	126.586	33.357	130.907	0.048	-32.315	
2	3	-96.300	-19.400	98.235	0.048	-32.315	
2	1	-126.538	-65.672	142.565	0.398	-1.380	
2	3	30.238	46.272	55.276			
3	4	-44.900	-4.500	45.125	0.398	-1.380	
3	2	-29.840	-47.652	56.224	0.346	-1.909	
3	4	-15.060	43.152	45.705			
4	3	-30.100	-3.800	30.339	0.346	-1.909	
4	5	15.406	-45.061	47.622	0.810	0.606	
4	8	84.470	19.334	86.654	8.929	18.916	
4	8	-129.975	21.927	131.812			
5	4	-25.200	-4.700	25.635	0.810	0.606	
5	6	-83.660	-18.728	85.730	0.119	-0.202	
5	6	58.460	14.028	60.119			
6	5	-24.000	-2.500	24.130	0.119	-0.202	
6	7	-58.341	-14.230	60.051	0.341	-3.070	
6	7	34.341	11.730	36.289			
7	6	-34.000	-14.800	37.082	0.341	-3.070	
7	6	-34.000	-14.800	37.082			
8	4	160.000	-7.539	160.178	8.929	18.916	
8	9	138.904	-3.011	138.937	0.096	-7.678	
8	9	21.096	-4.528	21.576			
9	8	-21.000	-3.150	21.235	0.096	-7.678	
9	8	-21.000	-3.150	21.235			
Total loss					11.086	-27.032	

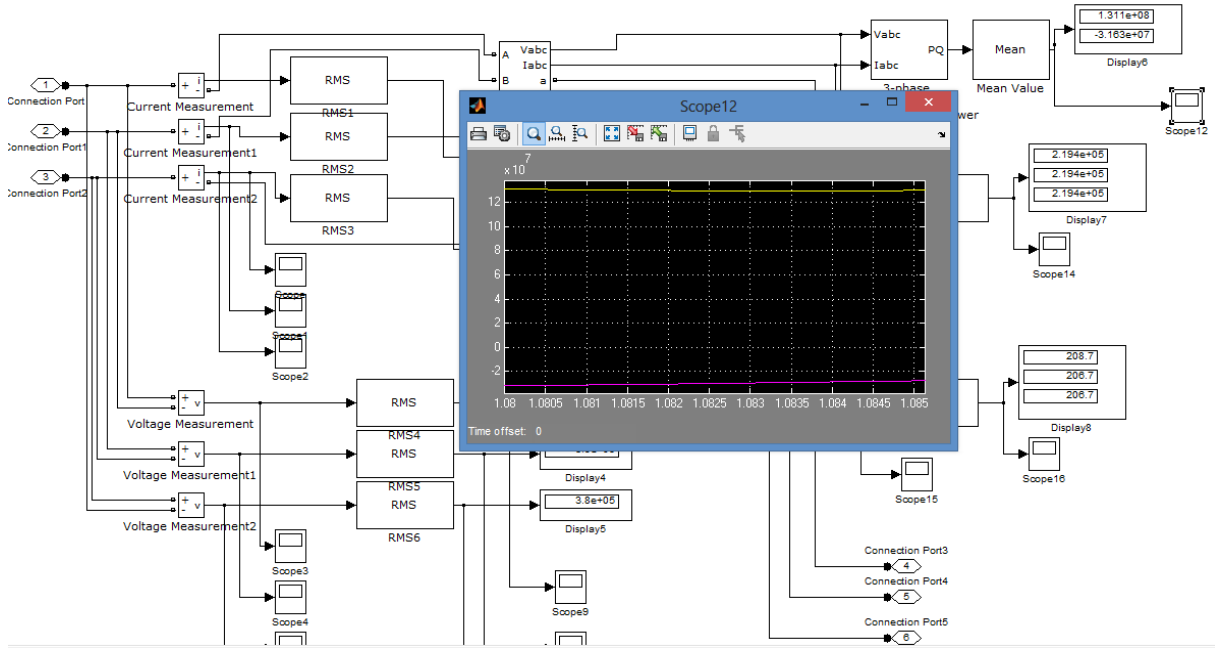
Şekil 6.1 Newton Raphson Metoduyla bulunan güç akış değerleri

Öncelikle mevcut modellenen sistemin şuan ki haliyle uygulamanın bazı baraları örnek gösterilerek gerekli güç akışı ve kısa devre analizleri yapılarak gerekli önlemler için öneriler yapılacaktır. Osmanca, Bolu I gibi çeşitli trafo merkezlerinin ana bara gerilim değerleri, aktif ve reaktif güç değerleri incelenerek aynı trafo merkezleri için kısa devre analizlerinin yapıldığı aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Osmanca TM ana bara gerilim değerleri

Şekil 6.2’de Osmanca trafo merkezine ait 380 kV’a bağlı ana baranın gerilim değişimi osiloskop aracılığıyla görülmektedir. Simulasyonlarda göstergelerden okunan değerler faz-nötr gerilimi $2,194 \times 10^3$ ve faz –faz gerilimi 380 kV olarak okunmaktadır. Yakın değerleri Newton-Raphson metoduyla yazılan programında verdiği Şekil 6.1’de görülmüştür. Programda 0.997 p.u yani 378.86 kV olarak hesaplanmıştır.

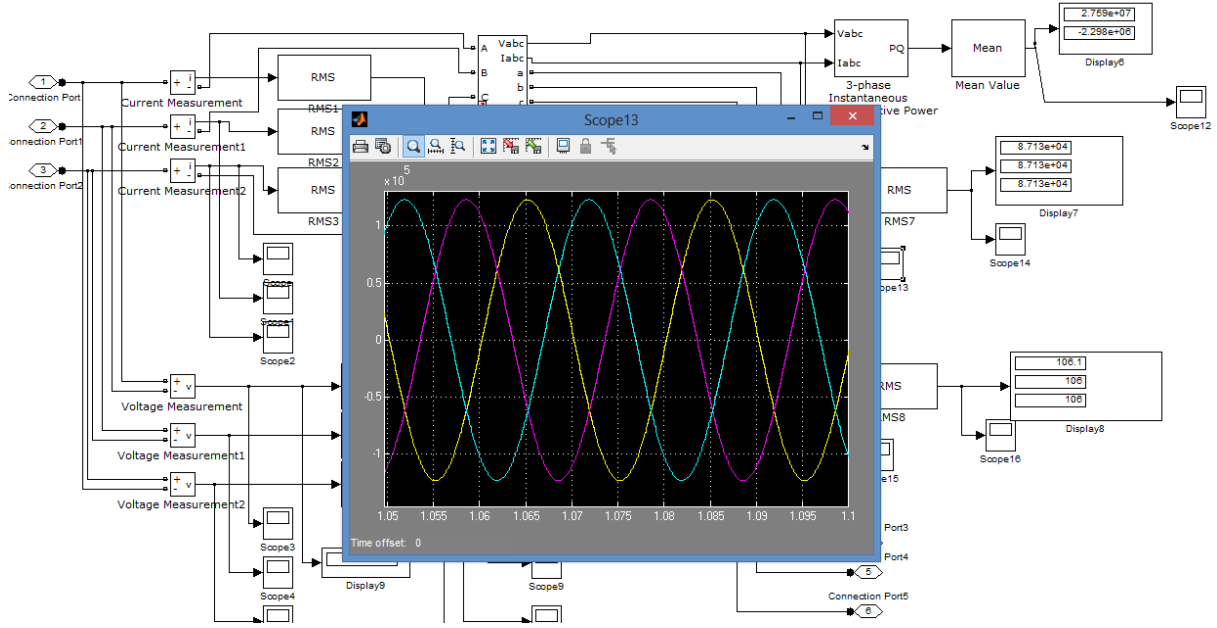


Şekil 6.3 Osmanca TM aktif ve reaktif güç değerleri

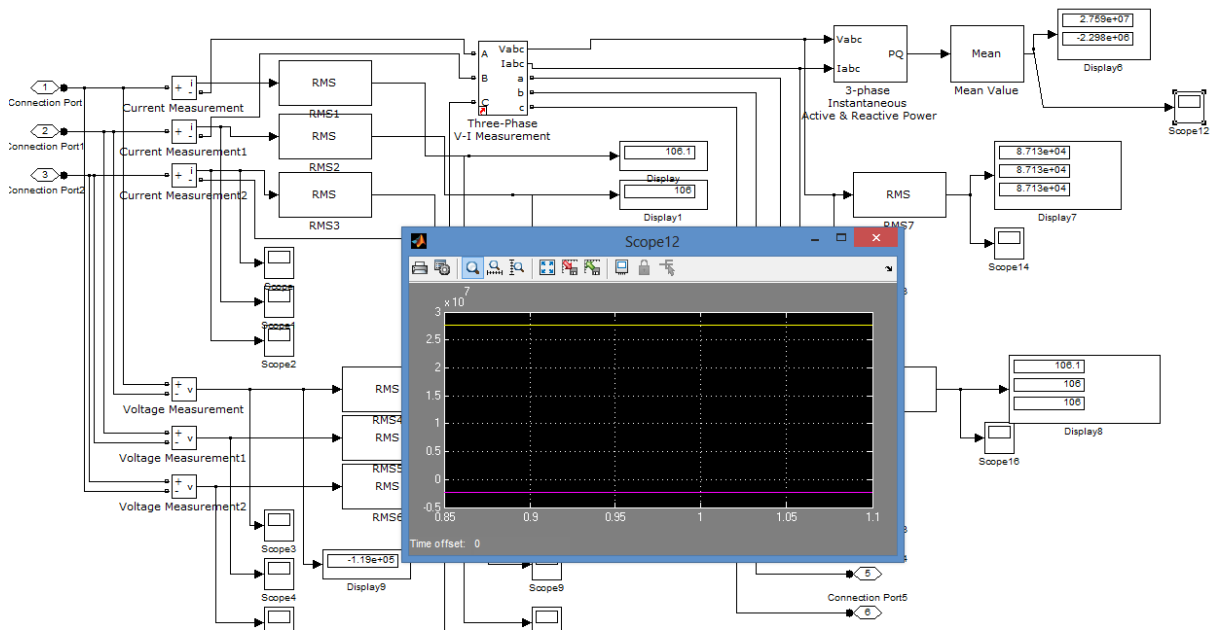
Şekil 6.3’de Osmanca TM ait ana baradaki aktif reaktif güç değerleri görülmektedir. Osiloskopta görünen değerler ortalama aktif ve reaktif güç değerleri olup sarı renk aktif güç bordo renk reaktif güç değerlerini göstermektedir.

Şekil 6.1’de hesaplanan değerlere bakıldığında aktif ve reaktif güçler 126,586 MW ve 33,557 MVAR olarak hesaplanmış ve ölçü bloğu kullanılarak ölçülen değerler Şekil 6.3’de görüldüğü gibi 136 MW ve 31,6 MVAR’tir.

Şekil 6.4’de Bolu I trafo merkezi ana bara gerilim değerlerinin faz-nötr değerleri ölçü ekranından ve sinyal şekli osiloskoptan görülmektedir. Burada ölçü ekranındaki değerler $\sqrt{3}$ ile çarpılırsa 150,09 kV yani faz-faz gerilim değeri bulunacaktır. Hesaplanan değerlerde ise 0,955 p.u yani 147,1 kV olarak hesaplanmıştır.



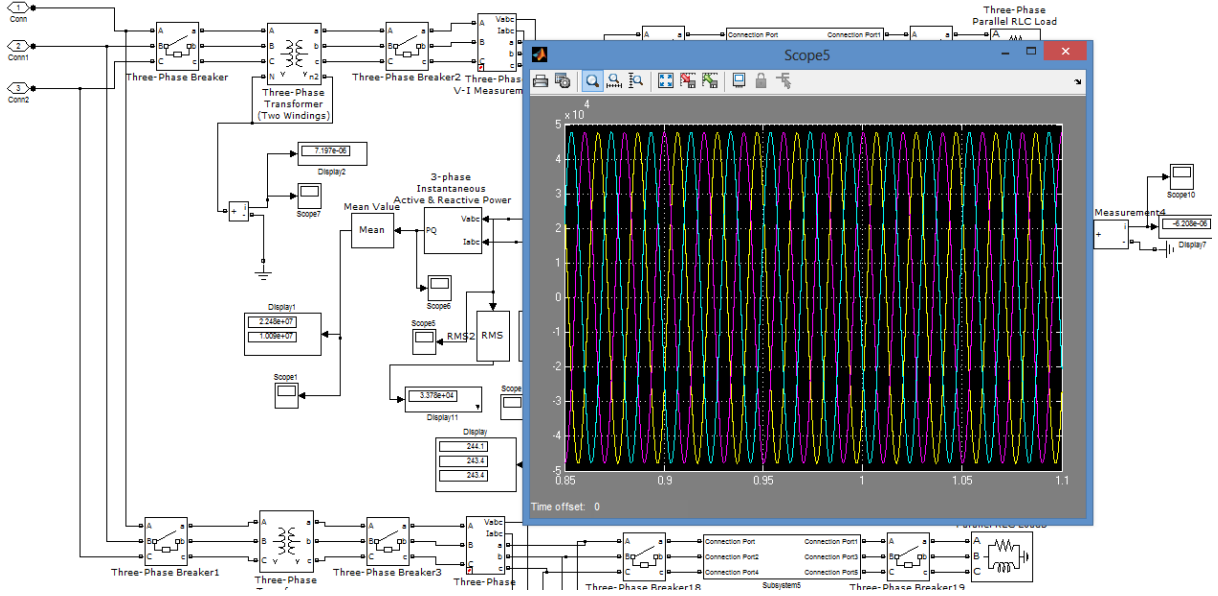
Şekil 6.4 Bolu I TM ana bara gerilim değerleri



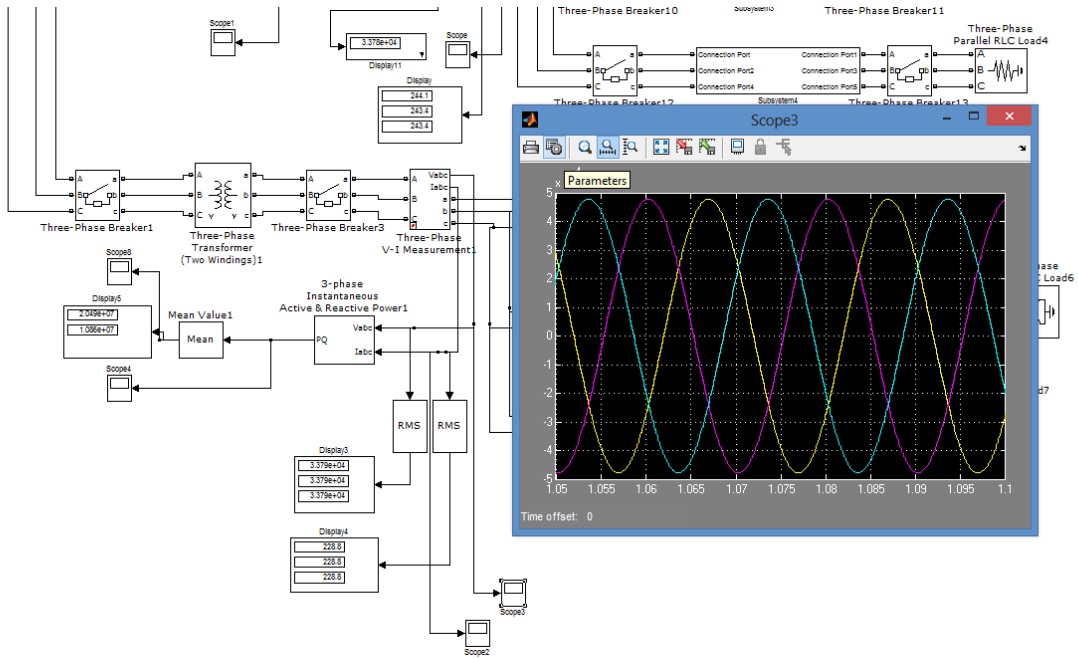
Şekil 6.5 Bolu I TM aktif ve reaktif güç değerleri

Şekil 6.5’de Bolu I trafo merkezine ait aktif ve reaktif güç değerleri okunmaktadır. Şekil 6.6’ da Bolu I trafo merkezinin 154/34.5kV, 25 MVA TRA çıkış bara değişim grafiği verilmiş 27,6 MW ve 2,3 MVAR değerleri ölçülmüştür. Ölçülen değerlere yaklaşık değerlerin hesaplada bulunduğu Şekil 6.1’de görülmektedir.

Şekil 6.6 ve Şekil 6.7 Bolu I TM’lerinden trafo-A ve trafo-B’ye ait gerilim genliği değerleri gösterlerden okunmuş ve tepe değerleri osiloskop vasıtasıyla görülmektedir.

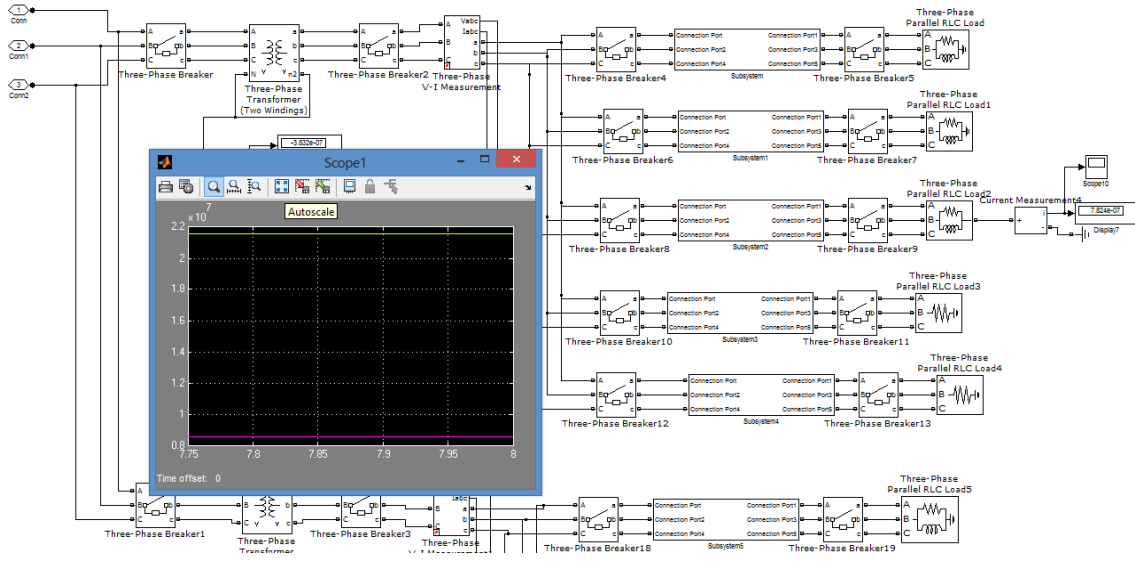


Şekil 6.6 Bolu I TM 154/34.5 kV TRA çıkış bara gerilim değerleri



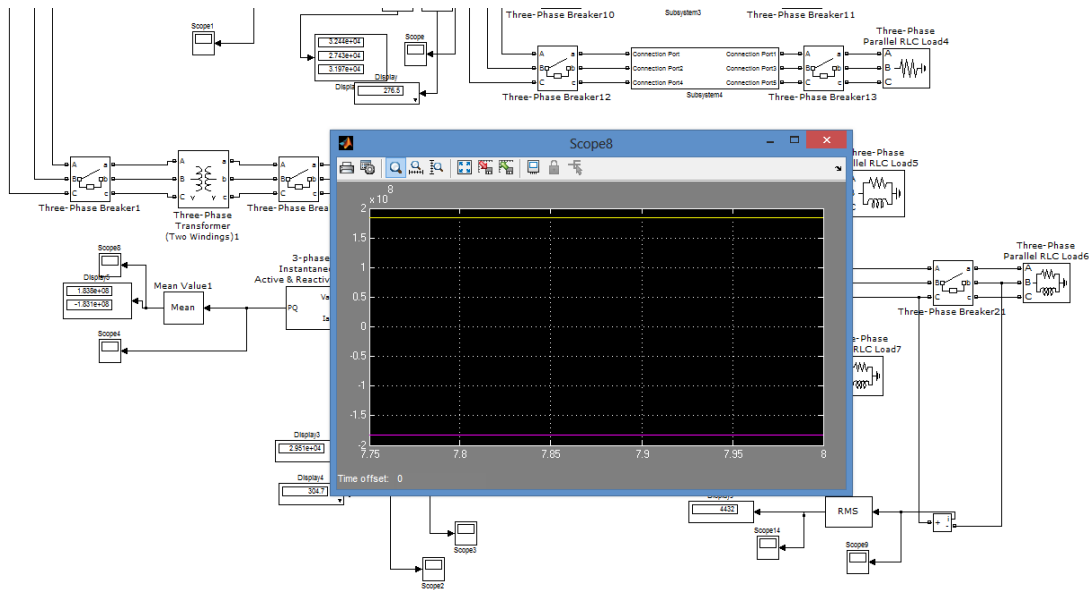
Şekil 6.7 Bolu I TM 154/34.5 kV TRB çıkış bara gerilim değerleri

Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da Bolu I trafo merkezi 154/34.5 kV trafo A ve trafo B’nin aktif ve reaktif güç değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6.8 Bolu I TM 154/34.5 kV TRA aktif ve reaktif güç değerleri

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8 'de gösterilen ortalama aktif ve reaktif güç değerleri kullanılarak 25 MVA'lık trafo A ve trafo B'ye ilave edilebilecek güç bilgisine ulaşarak enerji planlaması yapılabilir. Bununla birlikte trafonun yükleme sınırına ulaşması durumunda, trafodan beslenen yüklerin mevcut ring dağıtım hatları vasıtasıyla kapasitesi uygun olan trafolara aktarımı gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca fiderlere takılabilecek sayaçlar sayesinde reaktif güç takibi yapılarak gerekli yerlere kondansatör ilavesi yapılarak enerji kalitesinin yükseltilmesi sağlanabilir. Ayrıca bu sayaçlarla birlikte enerji nakil hatlarında oluşan gerilim düşümü ve güç kaybı analizi ile yapılan işlem yapılan dağıtım hattının planlanması yapılabilir.



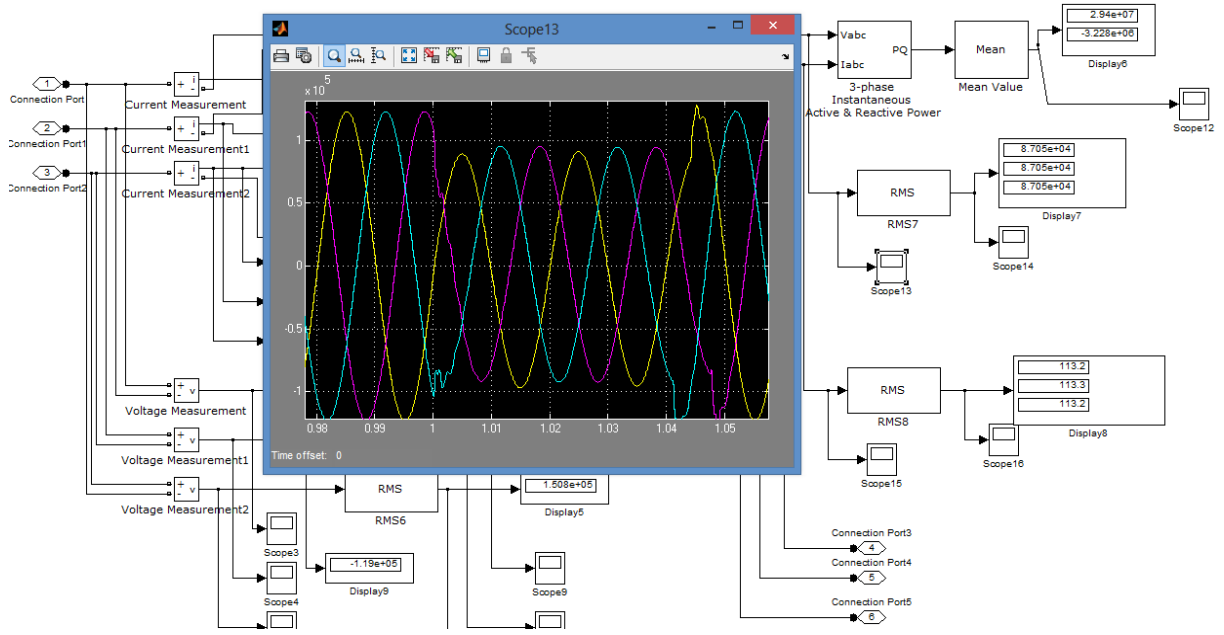
Şekil 6.9 Bolu I TM 154/34.5 kV TRB aktif ve reaktif güç değerleri

Trafo A ve trafo B’de gözlemlenen ortalama aktif ve reaktif güç değerleri kullanılarak trafo A için $S = \sqrt{21.58^2 + 8.57^2} = 23.22 \text{ MVA}$ olarak bulunur. Buradan mevcut 25 MVA kapasitedeki trafoya 1.78 MVA’lık yükleme yapılabileceği ve böylece enerji verimliliğinin arttırılabileceği görülmüştür. Trafo B için aynı hesap yapılacak olursa 18.61 MVA kullanılan kapasite ve 6.386 MVA yükleme yapılabileceği görülmektedir.

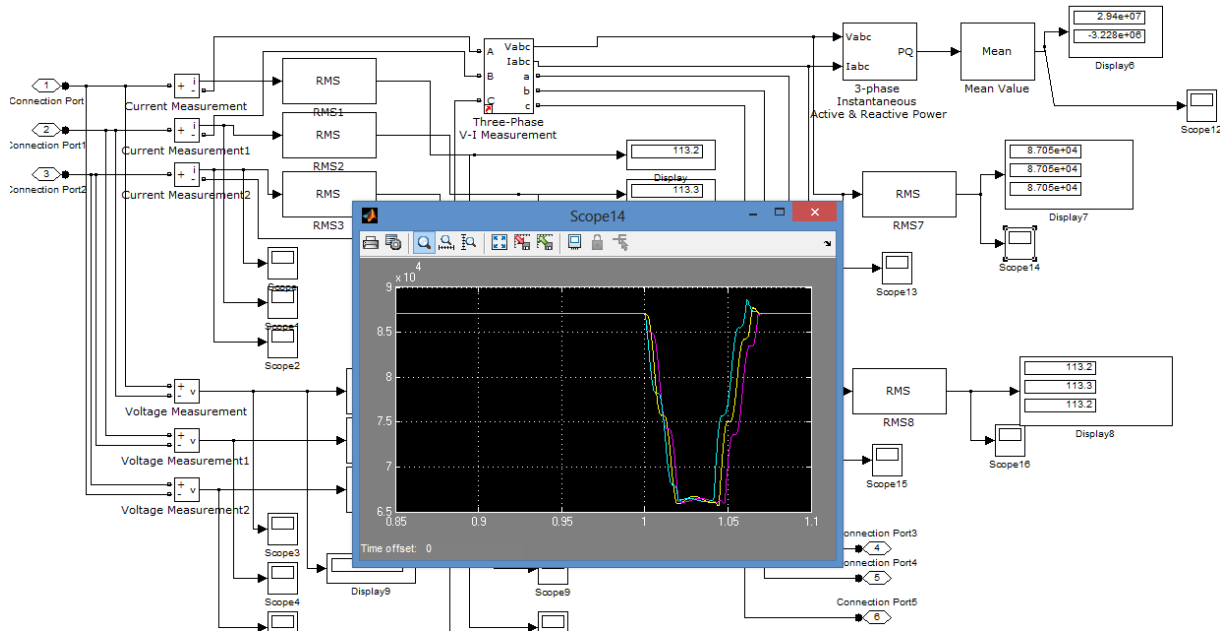
Modellenen güç sistemi için üç faz arızası analizi yapılarak kesicilerin açma güçleri bulunabilir ve gerekli röle koordinasyonu sağlanabilmektedir.

Kaynaşlı-Bolu I arası enerji nakil hattının sonunda üç faz kısa devre arızası senaryosu oluşturulmuş ve sisteme etkileri incelenmiştir. Arıza 1-1.04 saniyeleri arasında gözlenmektedir.

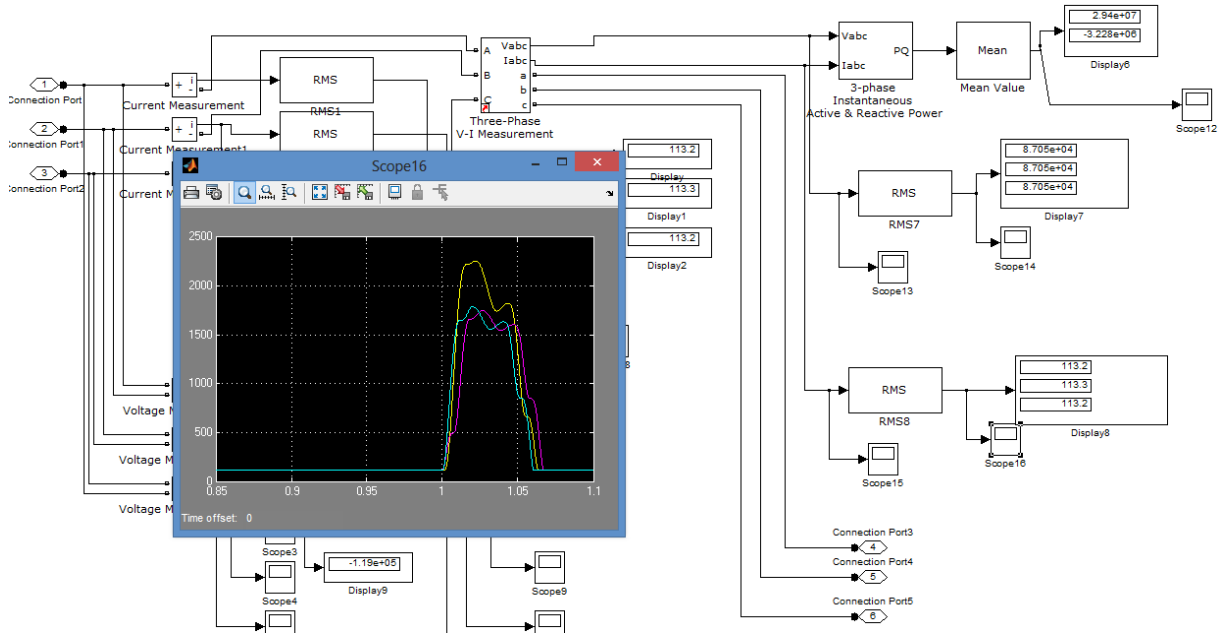
Yukarıdaki şekil 6.10.’de Bolu I TM giriş ana barası kısa devre sonucundaki gerilim değişim değerleri görülmektedir. Bolu I TM, TRA Fider 7 enerji nakil hattının sonunda oluşan kısa devrede Bolu I TM ’nin giriş kısmındaki gerilim grafiğinde gerilim çökmesinin olduğunu şekil 6.10’dan rahatlıkla görmekteyiz. Kısa devrenin şebekede gerçekleşmesi 1. saniyede başlamaktadır. Bu zaman dilimine kadar şebekede güç akışı sonucundaki gerilim değişimleri 154 kV seviyesinde iken, bu süreden sonra 128,89 kV seviyesine düştüğü görülmektedir. Şekil 6.10’da bulunan göstergede kısa devre sonundaki gerilim değerleri $7,45 \times 10^4 \text{ V}$ olarak görülmektedir. Aşağıdaki şekil 6.11’de kısa devre sonucundaki gerilim değişiminin ortalama değerleri bulunmaktadır. Şekil 6.11’de kısa devre öncesinde $8,895 \times 10^4 \text{ V}$ ortalama gerilim değeri görülürken, kısa devre sonunda $7,45 \times 10^4 \text{ V}$ olarak görülmektedir.



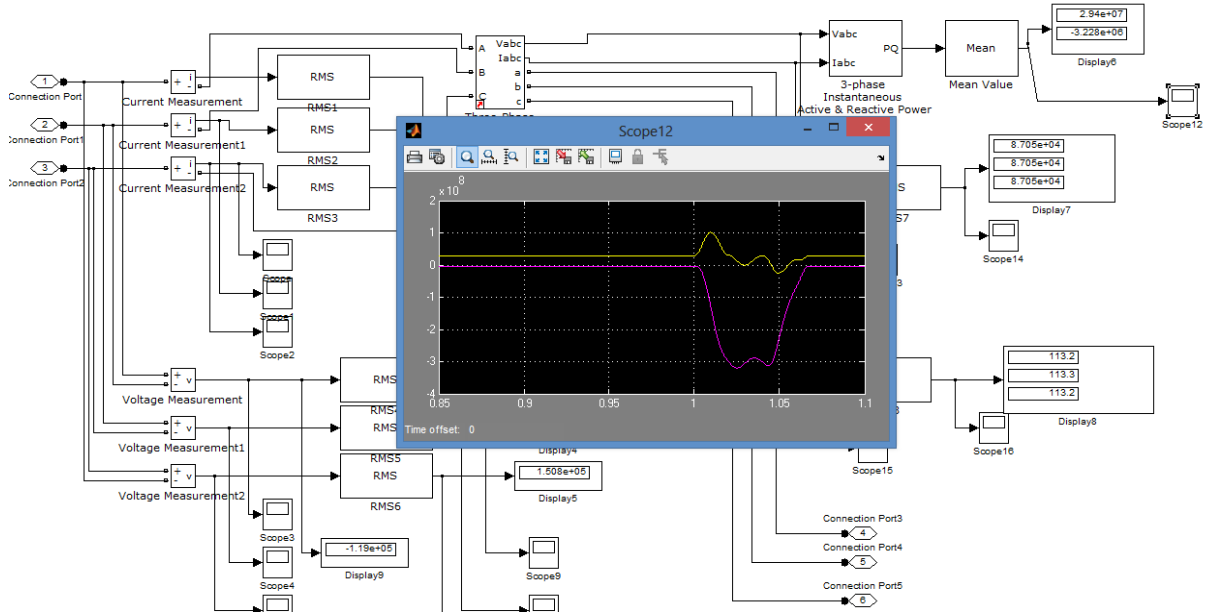
Şekil 6.10 Bolu I TM ana bara kısa devre gerilim değerleri



Şekil 6.11 Bolu I TM ana bara kısa devre ortalama gerilim değerleri



Şekil 6.13 Bolu I TM 154 kV giriş ana bara kısa devre ortalama akım değerleri

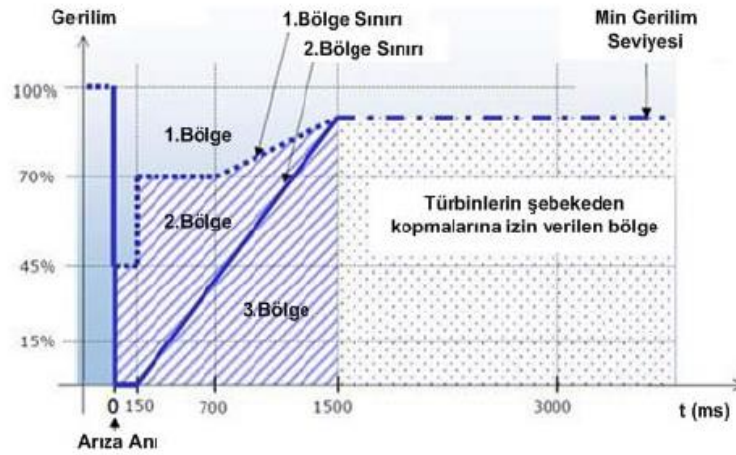


Şekil 6.14 Bolu I TM 154 kV giriş ana bara kısa devre aktif ve reaktif güç değerleri

Yukarıdaki şekil 6.14’de Bolu I TM ’nin giriş ana barasında üç faz hata sonucundaki aktif ve reaktif güç değişimi bulunmaktadır. Şekil 6.14’de görüldüğü üzere Bolu I TM kısa devreden önce $2,759 \times 10^7$ W aktif, $2,3 \times 10^6$ VAR reaktif güç çekerken, kısa devrenin sona erdiği 1,04 saniyede $2,92 \times 10^7$ W aktif, 3×10^7 VAR reaktif güç çekilmektedir. Bu durum kısa devre sonucunda oluşan gerilim çökmesi ve akım değerlerinin artması nedeniyle meydana gelmektedir.

Yukarıda incelenen sistemde güç akış analizi yapılmıştır. Bu sistemin yine Bolu I trafo merkezinin bulunduğu baraya ayrı ayrı 1.5 MVA'lık 8 adet çift beslemeli asenkron generatör ve 2 MVA'lık 6 adet sabit mıknatıslı senkron generatörün rüzgar santrali senaryosu oluşturulmuştur. Her iki sistem için yukarıda sistemde takibi yapılan ana bara gerilim değerleri, aktif ve reaktif güç değerleri ve kısa devre arızası anında tepkileri incelenmiştir. Ayrıca rüzgâr enerji santralleri dağıtım ve iletim hattına ayrı ayrı bağlanarak etkileri incelenmiştir. Büyük güçlü olarak üretilen rüzgâr santralleri karmaşık yapılı güç sistemleri ile birleşmesi sonucu güç sistemlerinin çalışma koşullarında iyileşme ve güvenilirlik gibi birçok avantaj kazandırmaktadır. Ancak rüzgâr santrallerinin çalışması esnasında oluşabilecek geçici durumlar rüzgâr santrallerine zarar verebileceği gibi tüketicilerin kaliteli bir enerji elde edememesine sebep olur[21].

Rüzgâr Enerjisine Dayalı Üretim Tesislerinin Şebeke Bağlantı kriterleri yönetmeliği gereğince iletim veya dağıtım sistemi bağlantı noktasındaki şebeke faz-faz geriliminin Şekil 6.15'de

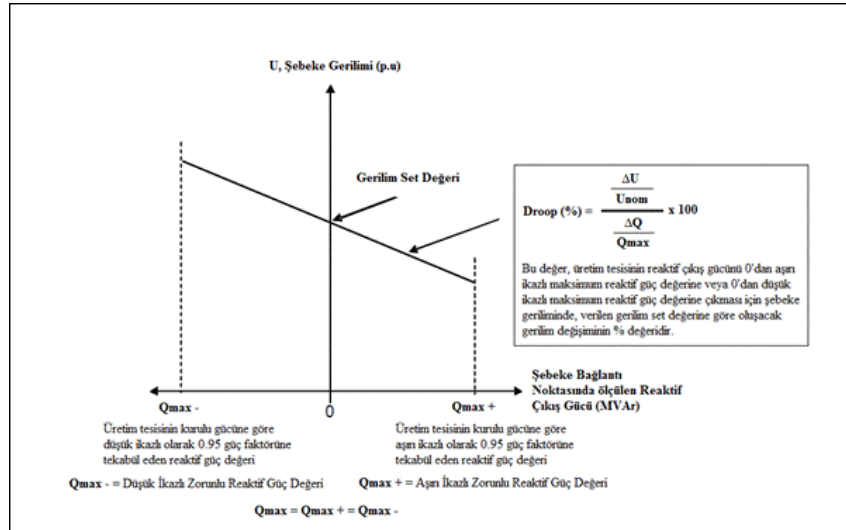


Şekil 6.15 Rüzgâr türbinlerinin arıza sonrasında sağlaması gereken tepki

verilen 1 numaralı ve 2 numaralı bölgelerde kaldığı süre boyunca, herhangi bir fazda veya tüm fazlarda oluşan gerilim düşümünde rüzgar türbinleri şebekeye bağlı kalmalıdır. Arıza sırasında gerilim düşümünün 1 numaralı bölgede kaldığı durumlarda, rüzgar türbine aktif gücü, arıza temizlendikten hemen sonra saniyede nominal gücünün en az %20'si oranında artırılarak, üretilebilecek maksimum aktif güç değerine ulaşmalıdır. Arıza sırasında gerilim düşümünün 2 numaralı bölgede kaldığı durumlarda ise, rüzgar türbini aktif gücü, arıza temizlendikten hemen sonra saniyede nominal gücünün en az %5'i oranında artırılarak, üretilebilecek maksimum

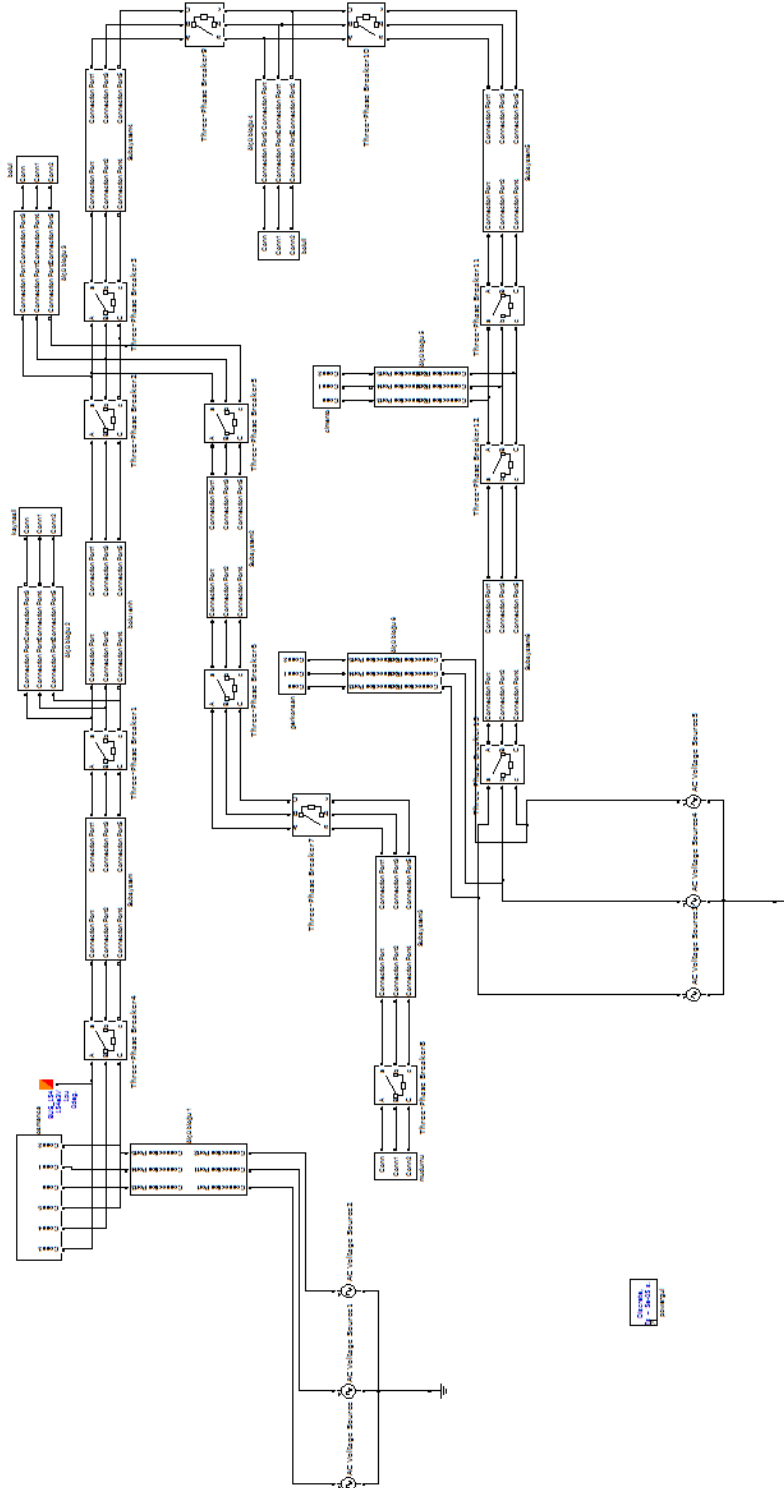
aktif güç değerine ulaşmalıdır. Şebeke bağlantı noktasında meydana gelen $\pm \%10$ 'a kadar olan gerilim dalgalanmaları (0,9pu – 1,1pu) normal işletme koşulları olup, rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisleri reaktif güç desteği Şekil 6.16'de belirtilen karakteristikler arasında sürekli olarak cevap vermelidir [19].

Rüzgâr santralinin şebekeye bağlantı noktasının neresi olacağı, elektrik enerji sisteminde meydana gelecek çeşitli arızalar durumunda sistem üzerinde yaşanacak gelişmeler üzerine incelemeler önemlidir.



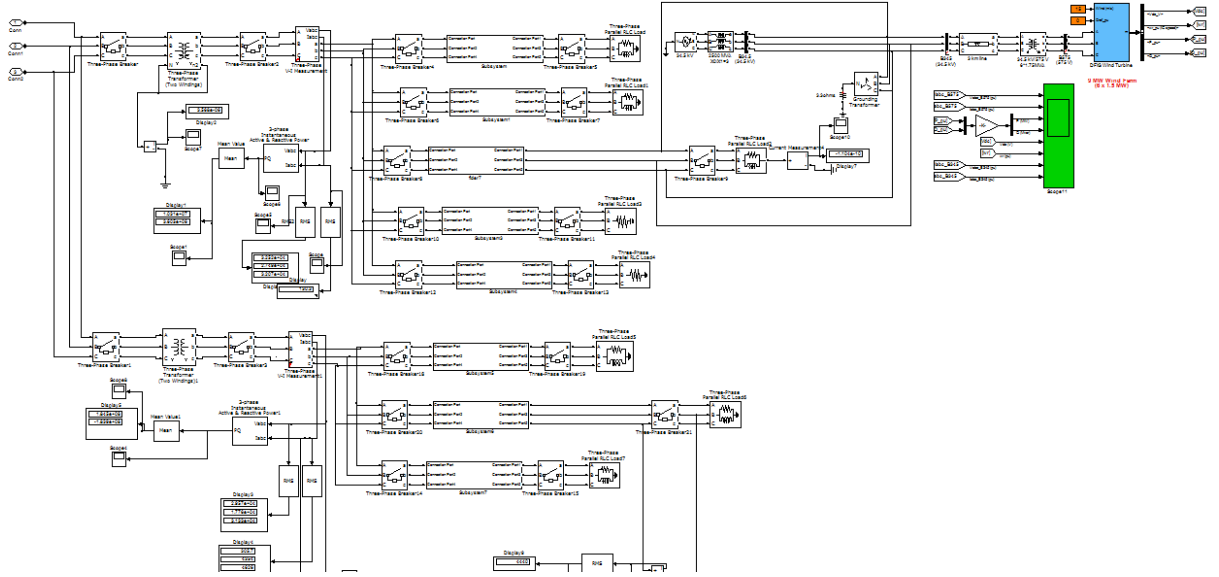
Şekil 6.16 Rüzgara Dayalı Üretim Tesisleri Tarafından Sisteme Verilecek Reaktif Güç Desteği Eğrisi

Bu tez çalışmasında, dokuz baralı bir şebeke üzerinde, çeşitli yerlerde ve tiplerdeki kısa devreler, rüzgâr santralinin şebekeye bağlı kalması durumları için incelenmiştir. Bunun için ele alınan Matlab ile modellenen dokuz baralı güç sistemi, Şekil 6.17'de gösterilmiştir. Elektrik dağıtım sistemine ilişkin veriler ekte ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. İncelemeler için üç fazlı arıza durumu göz önüne alınmıştır.

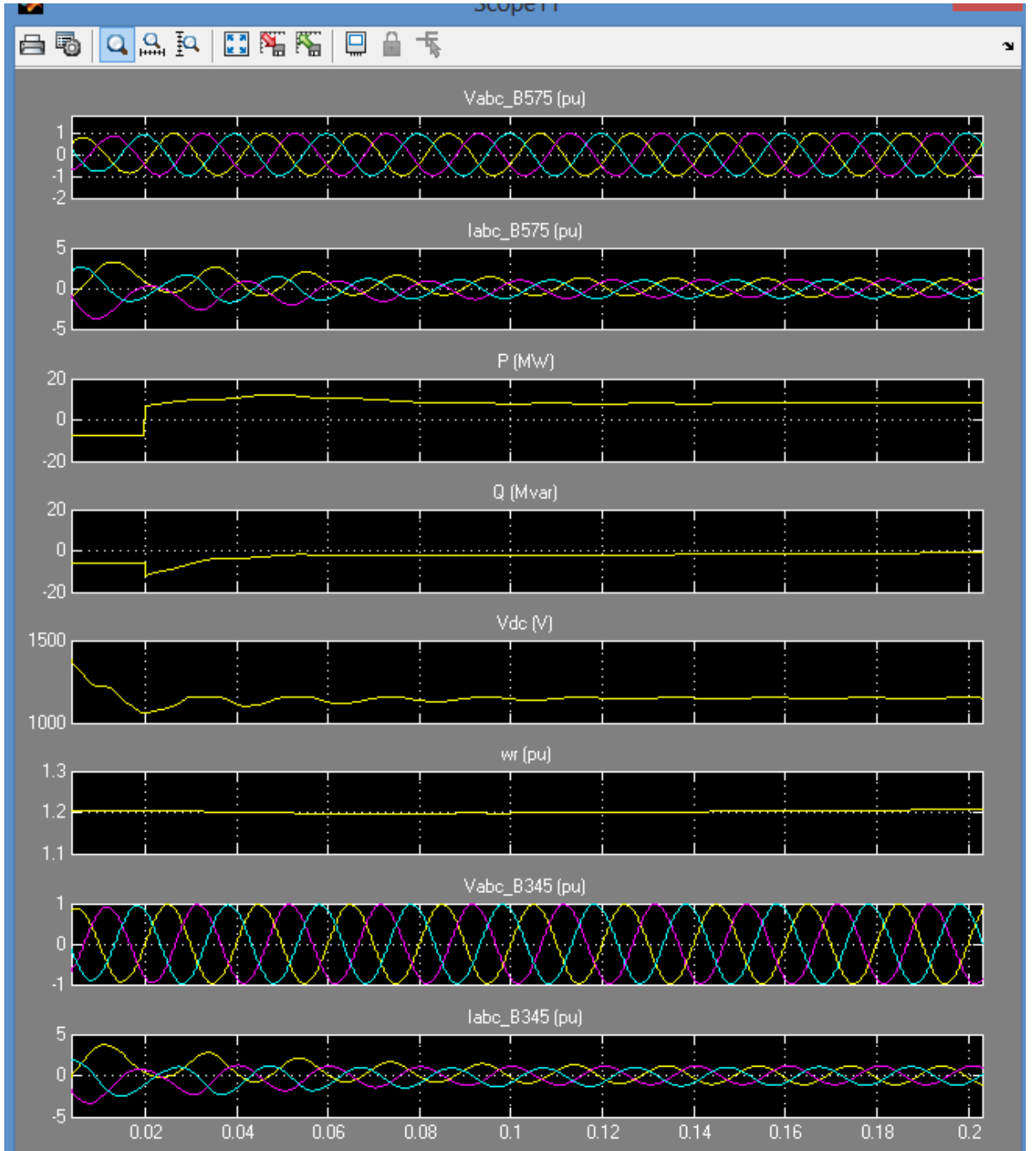


Şekil 6.17 Matlab ile Modellenen Güç sistemi

Şekil 6.18'da Bolu I trafo merkezi sonuna eklenen çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgâr santrali görülmektedir.

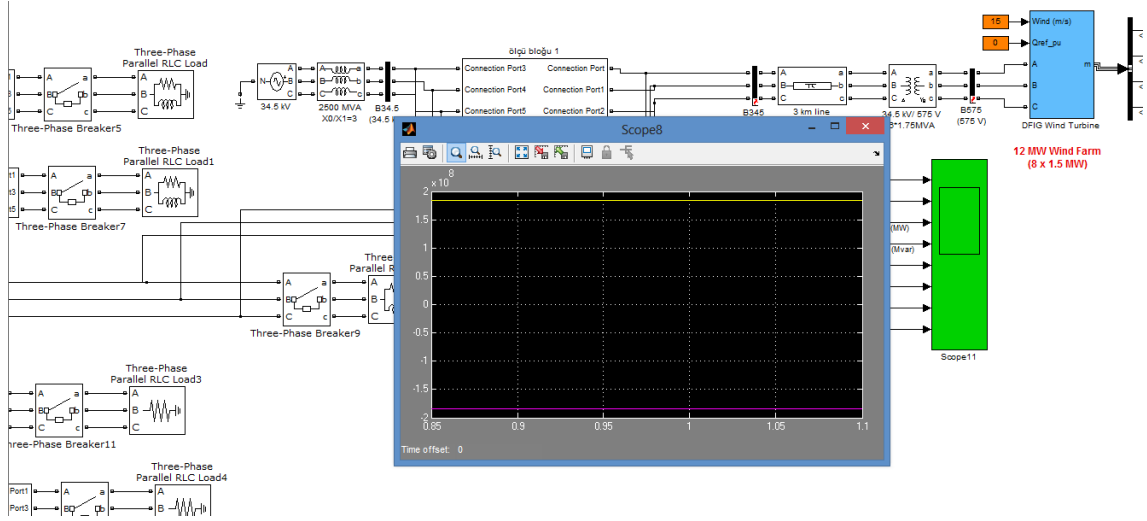


Şekil 6.18 Bolu I Fider 7 Sonuna Eklenen Çift Beslemeli Asenkron Generatöre Sahip Rüzgâr Santrali Ve Şebeke



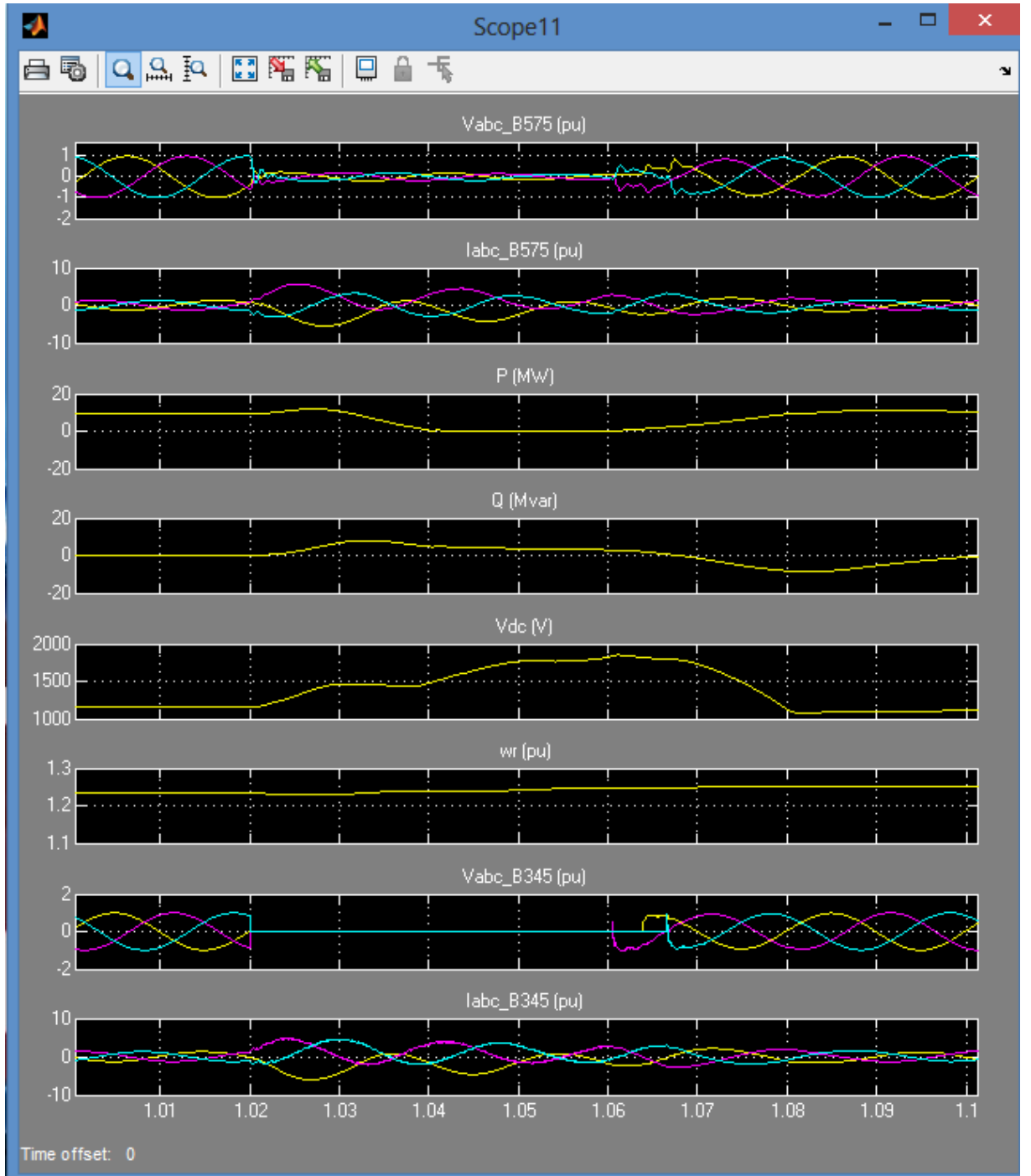
Şekil 6.19 Çift Beslemeli Asenkron Generatöre Sahip Rüzgâr Santraline Ait Veriler

Şekil 6.19’da normal çalışma şartları altında rüzgâr türbinlerine ait üretilen gerilim, aktif, reaktif güç, asenkron generatör hız değişimi ve rüzgâr santralinin dc gerilim değişimleri görülmektedir. Ayrıca Rüzgâr santrali Bolu Fider 7 arasına konulan ölçü bloğu ile de bara gerilimleri ve aktif, reaktif güç değişimleri takip edilebilir.

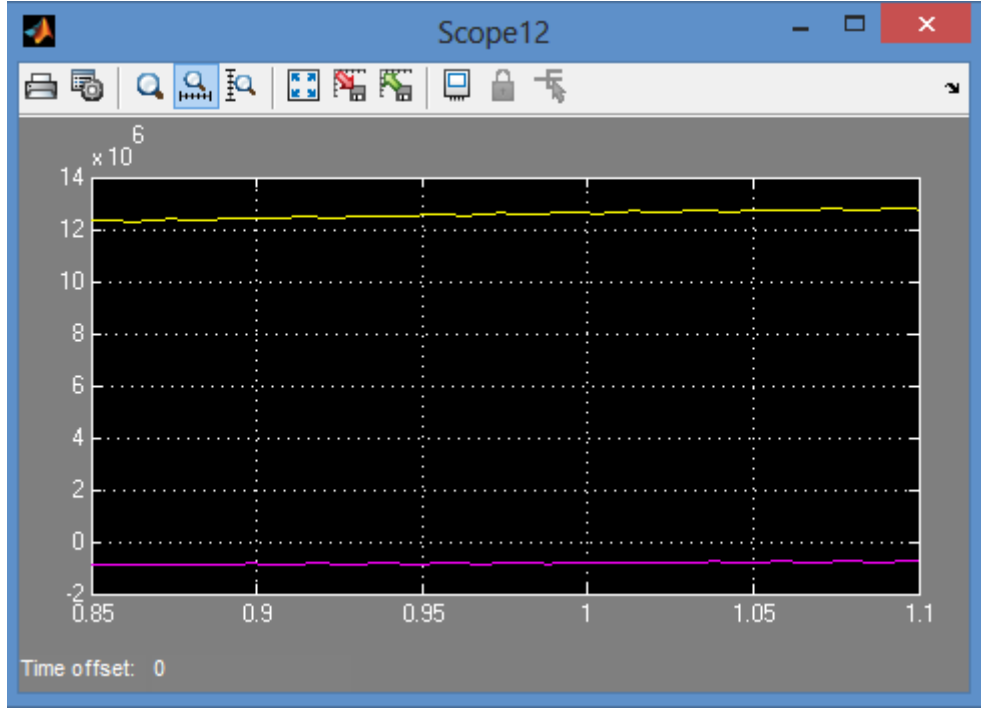


Şekil 6.20 Dağıtım hattına RES bağlandıktan sonra Bolu I TM A güç değerleri

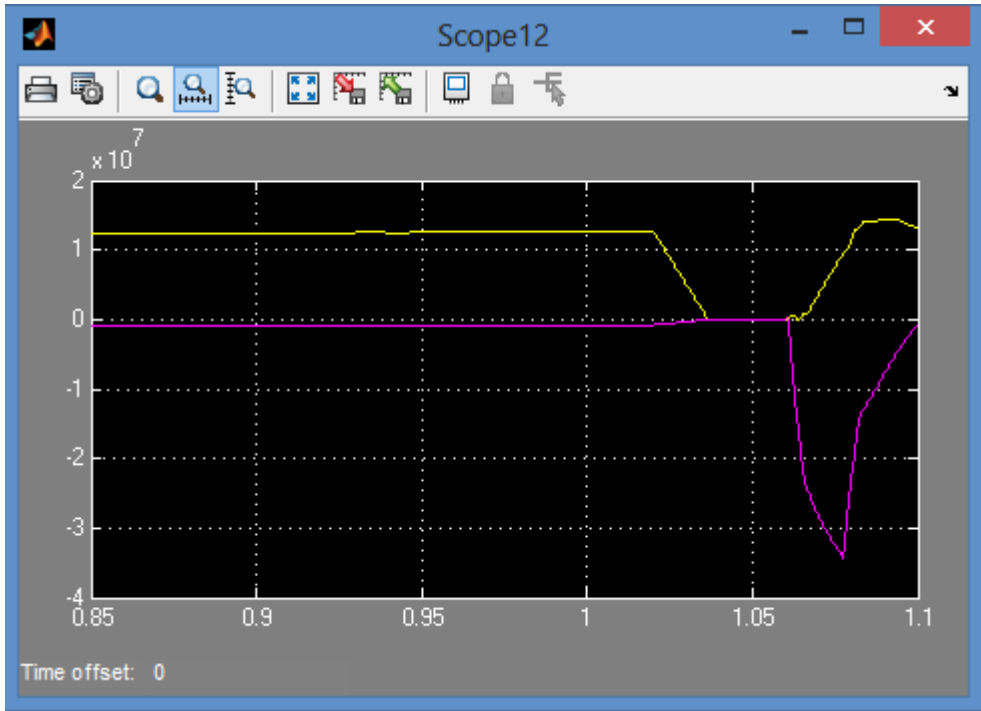
Aynı güç sistemi modelinde 3 faz kısa devre arızası 1.02-1.06 saniyeleri arasında meydana geldiğinde rüzgâr türbinine ait veriler Şekil 6.21'deki gibi olmaktadır. Yukarıda yönetmeliğin istediği kriterlerin sağlanıp sağlanmadığı incelenmiştir.



Şekil 6.21 3 Faz Arızası Durumunda Çift Beslemeli Asenkron Generatöre Sahip Rüzgar Santraline Ait Veriler



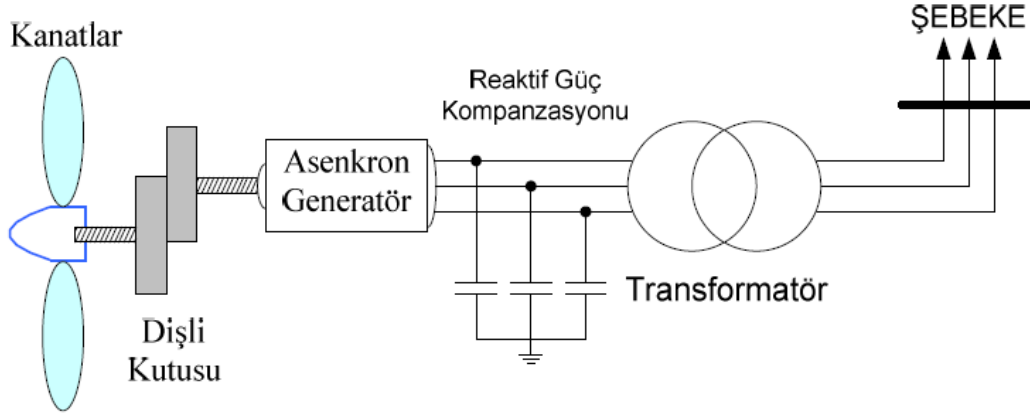
Şekil 6.22 Ölçü bloğunda aktif reaktif güç değerleri(DFIG)



Şekil 6.23 3 faz arızası durumunda aktif reaktif güç değerlerinin değişimi(DFIG)

Temel olarak enerji dönüşüm sistemlerinde kullanılan asenkron generatörler 3 çeşittir. Bunlar sincap kafesli, bilezikli (rotoru sargılı) ve çift beslemeli asenkron generatörlerdir. Sincap kafesli asenkron makine bir AC sisteme doğrudan bağlanıp sabit hızda işletilebileceği gibi güç elektroniği üniteleri ile birlikte değişken hızlarda da işletilebilir.

Bilezikli asenkron generatörler ise kayma kontrolünü sağlayan rotor dirençleri ile birlikte bir AC sisteme doğrudan bağlanabilirler. Burada kayma kontrolü ile işletim hızı ancak belirli hız aralıklarında ayarlanabilir. Çift beslemeli asenkron generatör ise güç elektroniği dönüştürücülerinin boyutuna bağlı olarak çok daha geniş aralıklarda hız ayarlama imkânı verir.

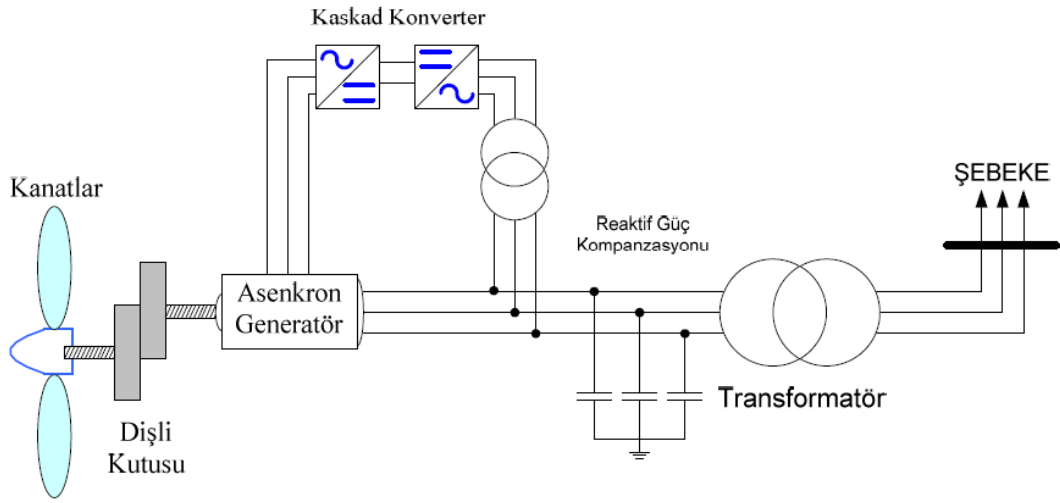


Şekil 6.24 Şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatör[22]

Rotorda durdurma regülasyonu yüksek rüzgâr hızlarındaki gücü kısıtlar. Rüzgâr hızları değiştikçe kayma değiştiğinden, bu generatörlerin hızı, rüzgâr hızı değiştikçe değişmektedir. Dolayısı ile bu makineler hızlı değişen dalgalanmaları azaltabilir. Asenkron rüzgâr generatörleri sırasal hız değişimleri arasında yaklaşık %10'luk bir değişime müsaade eder. Bununla beraber, kaymanın yükselmesi ile kayıplar artacak, yani verim düşecektir. Bu nedenle modern uygulamalarda değişken kayma (s) özelliğine sahip asenkron makineler kullanılır. Bu generatörlerde sargı uçları kısa devre edilmiş kafes rotorlar kullanılmaz. Buna mukabil kontrol edilebilir değişken dirençli rotor devreleri yer alır. Rotor sargıları ya harici değişken bir dirence bilezikler vasıtasıyla bağlıdır, ya da rotor ile birlikte dönen kontrol edilebilir bir dirence bağlıdır[22].

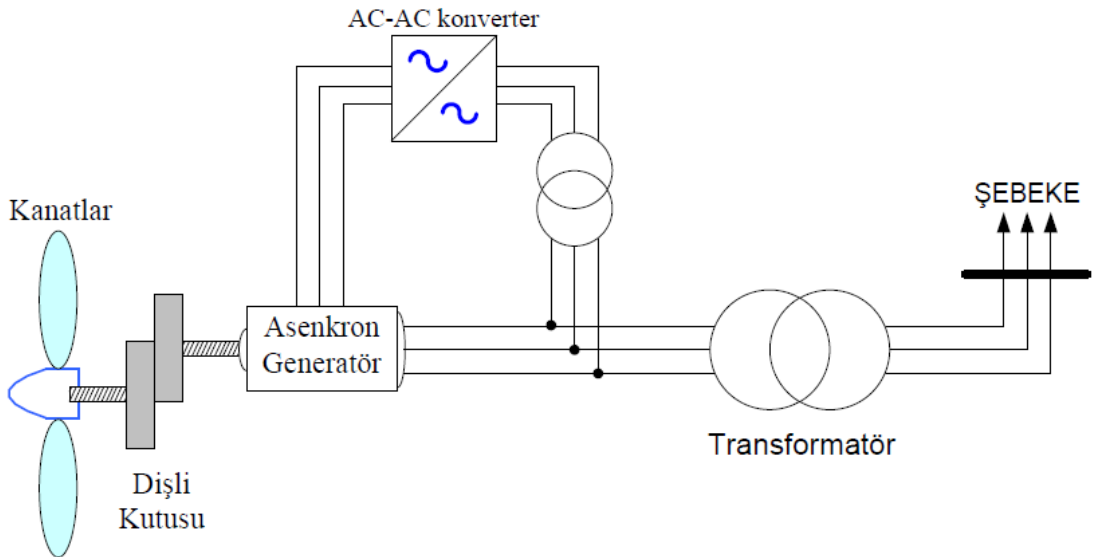
Rüzgâr türbin modelinde kullanılan değişken hız kontrollü asenkron generatörler şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatörlerde olduğu gibi değişken kayma özelliği generatörün hızını değiştirebilir. Ancak yüksek kayma oranı, rotorda yüksek kayıplara neden olacağından, kayma miktarının %10 seviyelerini geçmemesine dikkat edilir. Bununla birlikte rotor gücü şebekeye aktarılacak generatör hız kontrolü için kullanılabilir. Eğer generatör hızı sadece şebeke frekansından daha yüksek hızlara ulaşacak ise, bu durum için kullanılacak devre senkron üstü (oversynchronous convertor) kaskad

konvertör olarak adlandırılır. Bu devrenin en büyük dezavantajı, yüksek reaktif güç talebidir[22].



Şekil 6.25 Kaskad konverterli değişken hız kontrollü asenkron generatör[22]

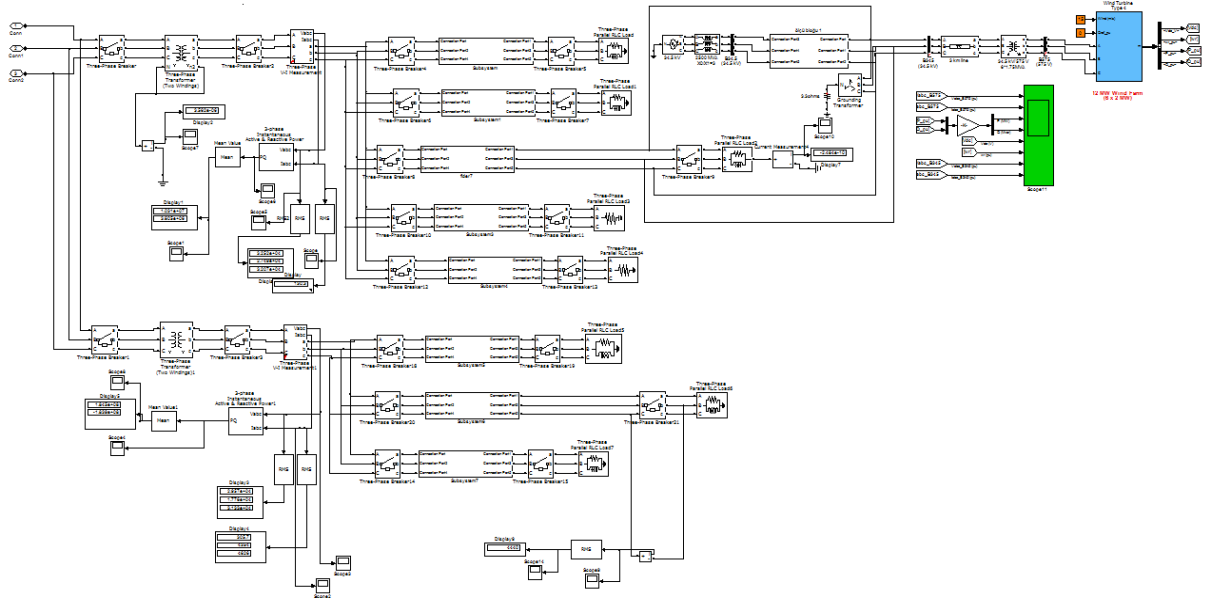
Senkron üstü (oversynchronous convertor) kaskad konverter sadece rotor gücünü şebekeye aktarabilirken çift beslemeli (double-fed) asenkron generatör her iki yönde de güç transferine imkân tanır (rotordan şebekeye ve şebekeden rotora). Bu amaçla Şekil 6.26'da gösterildiği gibi direkt olarak bağlı bir AC/AC konverter kullanılabilir.



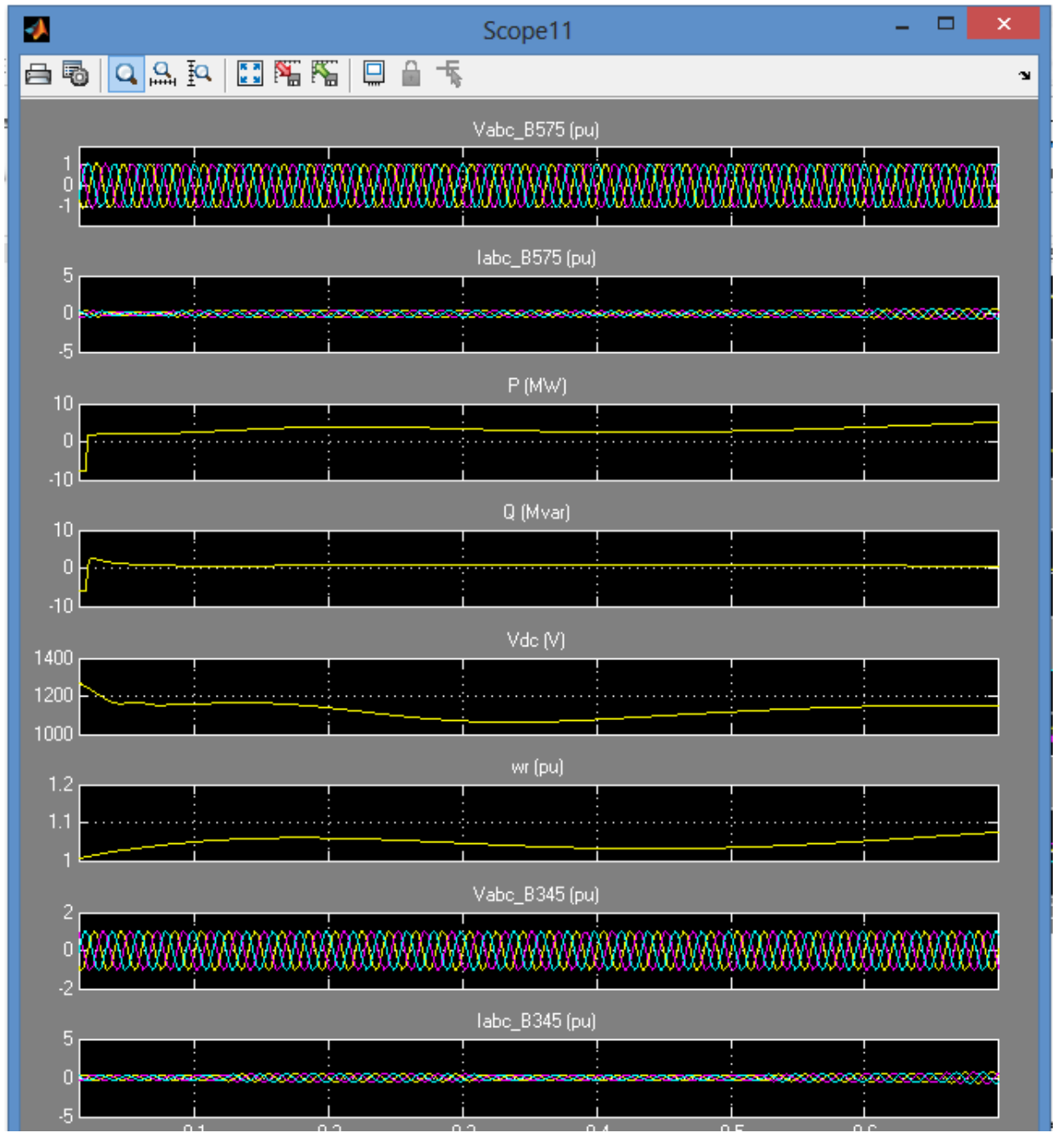
Şekil 6.26 Çift beslemeli asenkron generatör[22]

Çift beslemeli bir asenkron generatör hem senkron üstü, hem de senkron altı hızda işletilebilir. Böylelikle generatörün reaktif güç ihtiyacı kontrol edilebilir. Bu sistemin dezavantajı yüksek maliyeti ve enerji kalitesi ile ilgili problemlere neden olmasıdır.

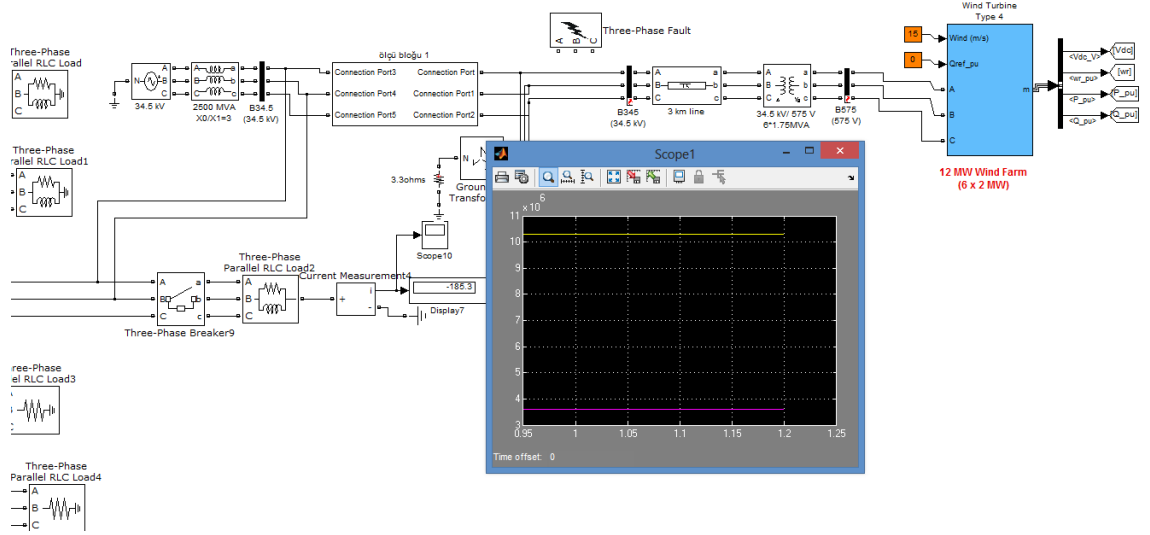
Çift beslemeli asenkron generatörün Bolu I trafo merkezi fider 7 enerji iletim hattı sonuna bağlanması durumu incelenirse



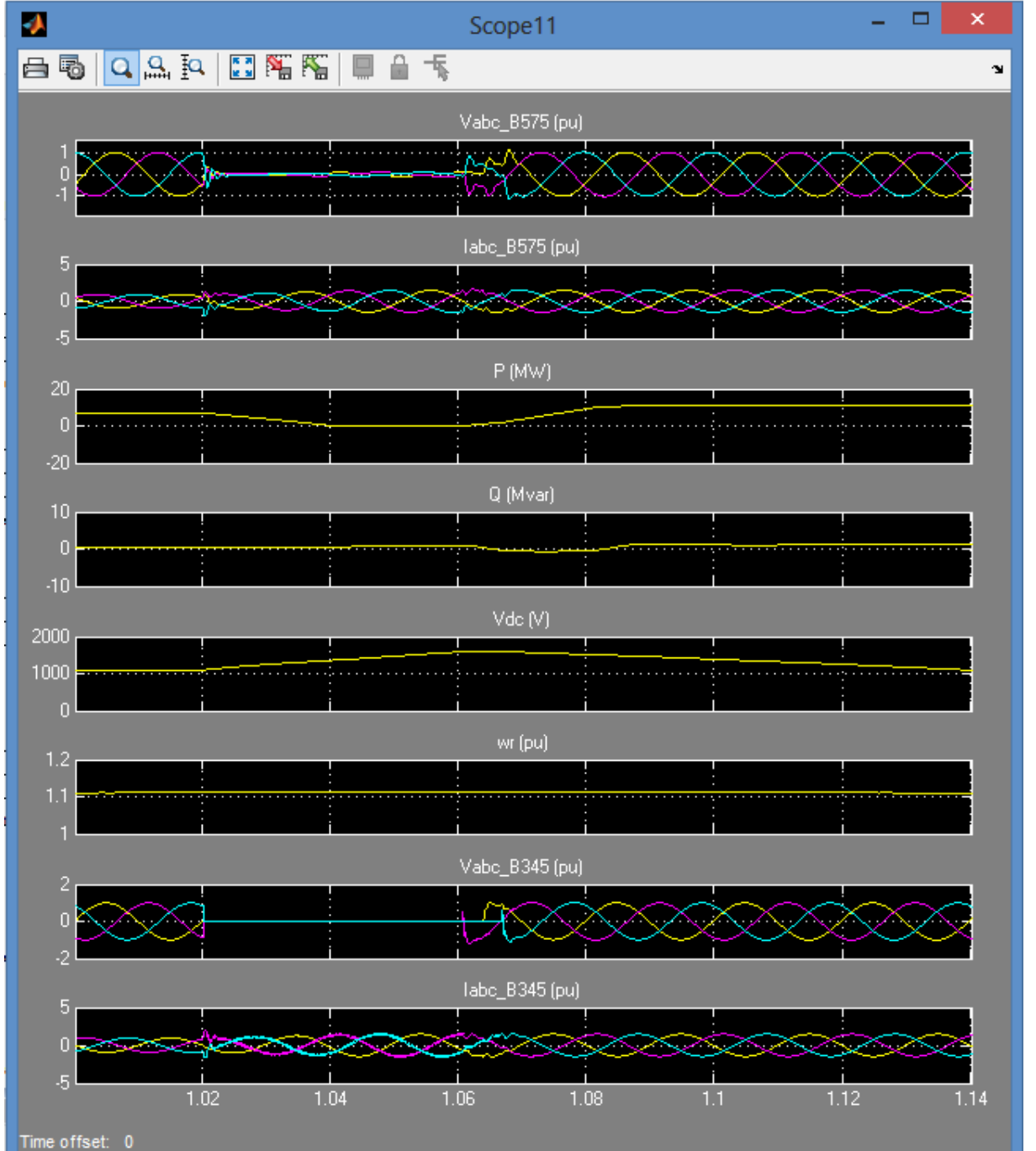
Şekil 6.27 Bolu I Fider 7 Sonuna Eklenen Senkron Generatöre Sahip Rüzgâr Santrali Ve Şebeke



Şekil 6.28 Senkron Generatöre Sahip Rüzgâr Santraline Ait Veriler



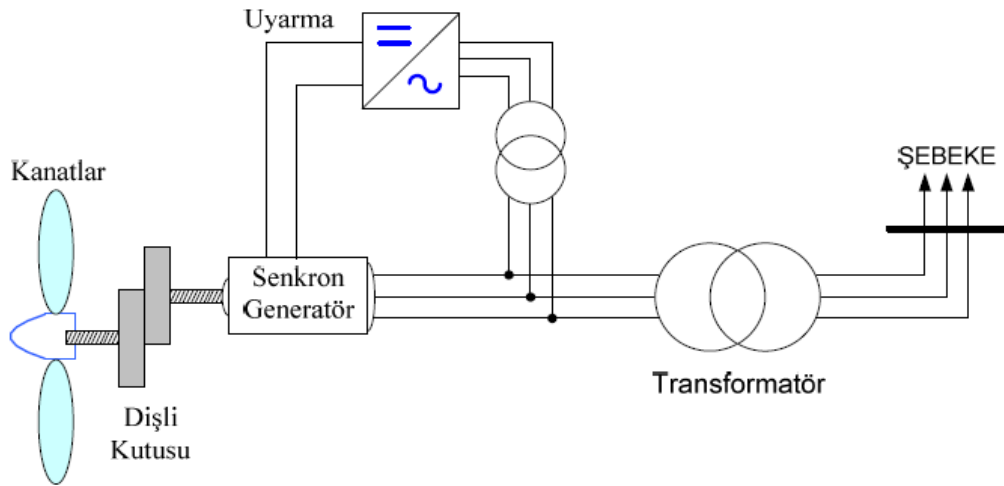
Şekil 6.29 Dağıtım hattına Senkron Generatörlü RES bağlanması durumunda Bolu I TMA güç değerleri



Şekil 6.30 3 Faz Arızası Durumunda Senkron Generatöre Sahip Rüzgâr Santraline Ait Veriler

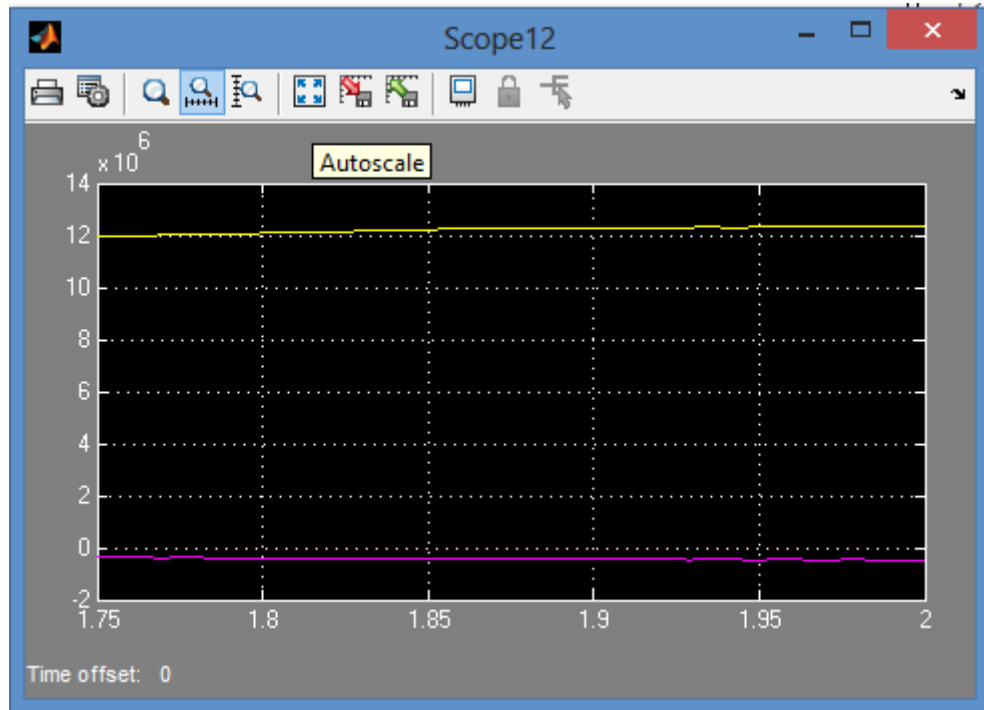
Senkron makine belirli bir sabit frekansı üreten ve sabit hızda çalışan bir elektrik makinesidir. Bu sebepten dolayı rüzgâr santrallerinde değişken hızda işleme çok uygun değildir. Ayrıca makinenin DC uyarıma ihtiyacı olduğundan bilezikler üzerinde kayan karbon fırçalara ihtiyacı vardır. Bu durum senkron makinenin rüzgâr türbinlerinde kullanımda bir sınırlama oluşturur. Senkron makineler uyarıma akımları kontrol edilmek

sureti ile hem reaktif güç üreticisi hem de reaktif güç tüketicisi olabilir. Yani reaktif güç talepleri kontrol edilebilir. Senkron makineleri uyarmak için sabit mıknatıslarda kullanılabilir. Ancak bu durumda senkron makinelerin reaktif gücü kontrol edilemez.

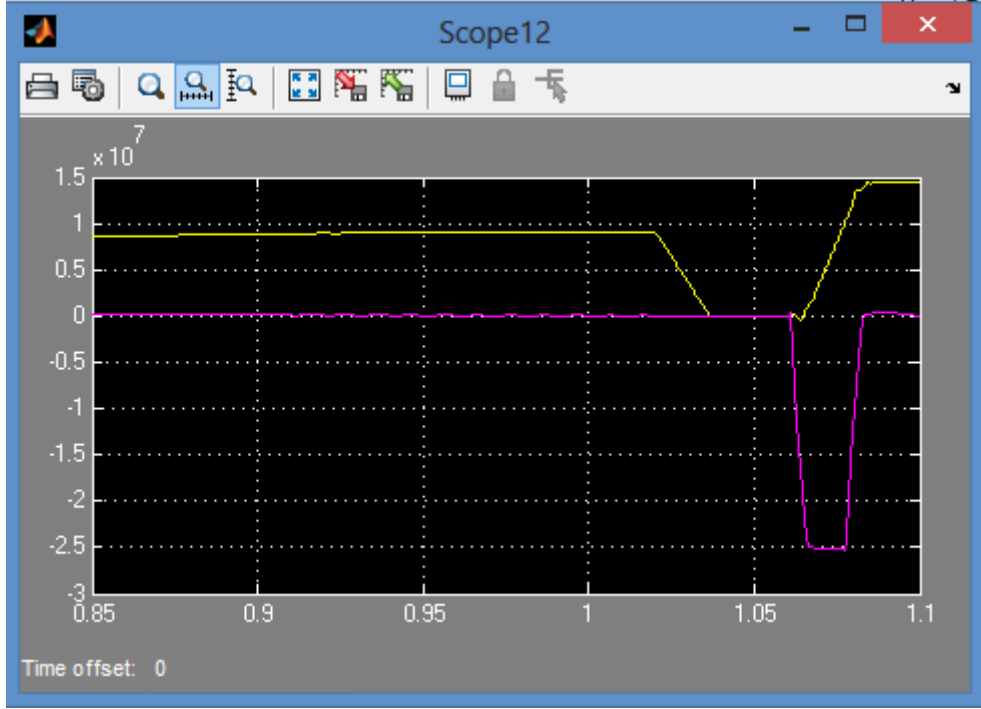


Şekil 6.31 Şebekeye doğrudan bağlı senkron generatör[22]

3 faz arızası durumunda ölçü bloğundan takip edilen aktif ve reaktif güç değerleri Şekil 6.32 'de gösterildiği gibidir.



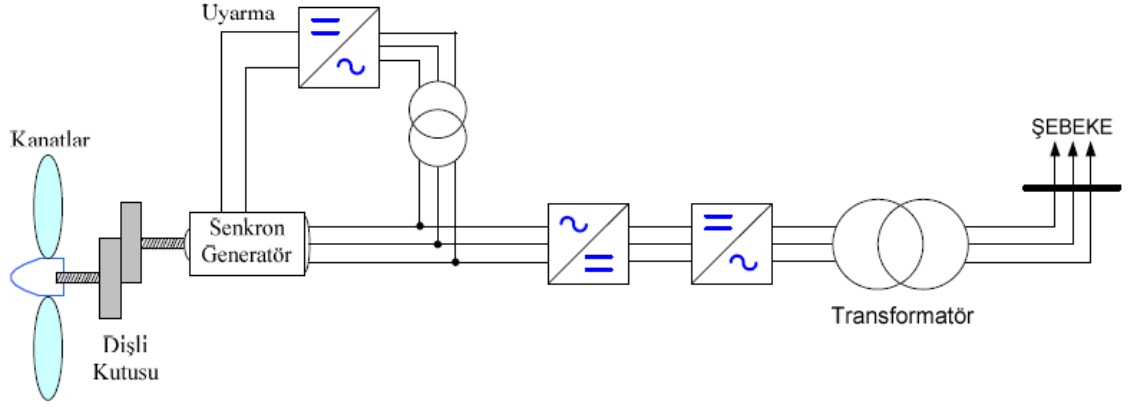
Şekil 6.32 Ölçü bloğunda aktif reaktif güç değerleri



Şekil 6.33 3 faz arızası durumunda aktif reaktif güç değerlerinin değişimi

Asenkron generatörün aksine, senkron generatör sabit hızda işletilir. Bu durum ise rüzgâr türbinlerinde oldukça zor bir durumdur. Bu nedenle doğrudan bağlantılı senkron generatörler ada şebeke uygulamalarında bağımsız uygulamalar için kullanılırlar. Bu makinenin şebekeye direkt olarak bağlanması neticesinde oluşacak bir diğer mahsur ise şebekedeki yük değişimlerinin generatör üzerinde yüksek mekanik zorlamalar oluşturmasıdır. Bu nedenlerden ötürü senkron makineler genellikle şebekeye direkt olarak bağlanmazlar.

DC bara bağlantılı senkron generatörler (frekans konvertörlü senkron makinalar da denmektedir) şebekeye doğrudan bağlı senkron generatörlerin dezavantajlarını ortadan kaldırabilir.



Şekil 6.34 DC bara bağlantılı senkron generatörler

Şekil 6.34’da görüldüğü üzere düşük ve orta hızlı tüm rüzgâr hızlarında rotor hızı değiştirilerek maksimum güç noktaları yakalanabilmektedir. Yüksek rüzgâr hızlarında ise gücü sınırlamak türbin güvenliği açısından zaten gereklidir.

Frekans konvertörleri vasıtası ile şebeke frekansı yakalanabildiğinden ilave bir dişli kutusuna ihtiyaç duymazlar. Bu nedenle günümüzde birçok makina dişli kutusu barındırmazlar. Ancak bu türbinler için üretilen senkron makineler yüksek sayıda kutuplu yapırlar (kutup sayısı genelde 80 ve üzeridir.) Bu makinaların belli başlı avantajları:

- Daha az malzeme ihtiyacı
- Daha düşük maliyet
- Daha az gürültü

Çift beslemeli asenkron generatörlü değişken hızlı rüzgâr türbinleri, dünyada tesis edilen değişken hızlı rüzgâr türbinlerinden en popüleridir ve sabit hızlı rüzgâr türbinleri ile mukayese edildiğinde, kısa devre hataları boyunca sistem kararlılığına ilişkin davranışları daha iyidir. Bunun sebeplerinden biri, onun aktif ve reaktif güç çıkış kontrol kabiliyeti olabilir. Dış şebekedeki bir kısadevre arızasının temizlenmesinden sonra, bu gibi türbinlerin normal çalışmasına geri dönmesini incelemek oldukça ilginçtir ki, bir dış kısa devrenin temizlenmesinden sonra, rüzgâr türbininin normal çalışmasına geri dönmesinin, kontrol planlarıyla nasıl etkili bir şekilde sağlanacağı görülür [16].

Günümüzde, aşırı akıma çok duyarlı olan elektronik güç çeviricilerinin koruma sistemleri, arıza durumunda şebekeden hızla ayrılmayı sağlamaktadır. Bir çözüm olarak, bazı durumlarda rotor tarafındaki çeviriciyi, aşırı rotor akımlarından korumak için, arıza

sırasında rotor by-pass edilir. Rotor akımının sınırlandırılması ve makinenin hız-dönme momenti karakteristiğinin etkilenmesi amacıyla, rotor tercihen direnç üzerinden by-pass edilebilir. Makine hızlanabilir ve şebekeden önemli miktarda reaktif güç çekebilir. Ancak, gerilim düzelmedikçe, makine çok hızlı olarak sistemden ayrılacaktır. Elektronik çeviricinin kapasitesine bağlı olarak, senkron generatörler kısa devre arıza akımına katkıda bulunmaktadır. Eski çeviricilerin çoğu, ucuz olmaları için, en büyük nominal akım değerine dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Bu çeviriciler, (ve kontrol sistemleri) arıza akımını nominal akım değeriyle sınırlandırmaktadır. Mevcut durumda, senkron generatörler arıza olduğunda hızla şebekeden ayrılmaktadır. Rüzgâr santrallerinin kurulduğu bölgede, arıza sonrası bütün rüzgâr santrallerinin gerilim düşümü nedeniyle aniden devre dışı olması, bölgede önemli bir üretim açığına sebep olmaktadır. Bu, sistem emniyeti, arz güvenliği ve kalitesi açısından büyük olumsuzluklara neden olabileceğinden, istenen bir durum değildir [19].

Sonuç olarak şunlar söylenebilir ki, rüzgâr güç santrali, şebekedeki hata akımlarına katkıda bulunabilir. Rüzgâr çiftliğinin entegrasyonunu takiben, maksimum kısa devre gücü veya akımları, şebeke ekipmanlarının farklı bileşenleri için maksimum kabul edilebilir değerleri aşmamalıdır [18].

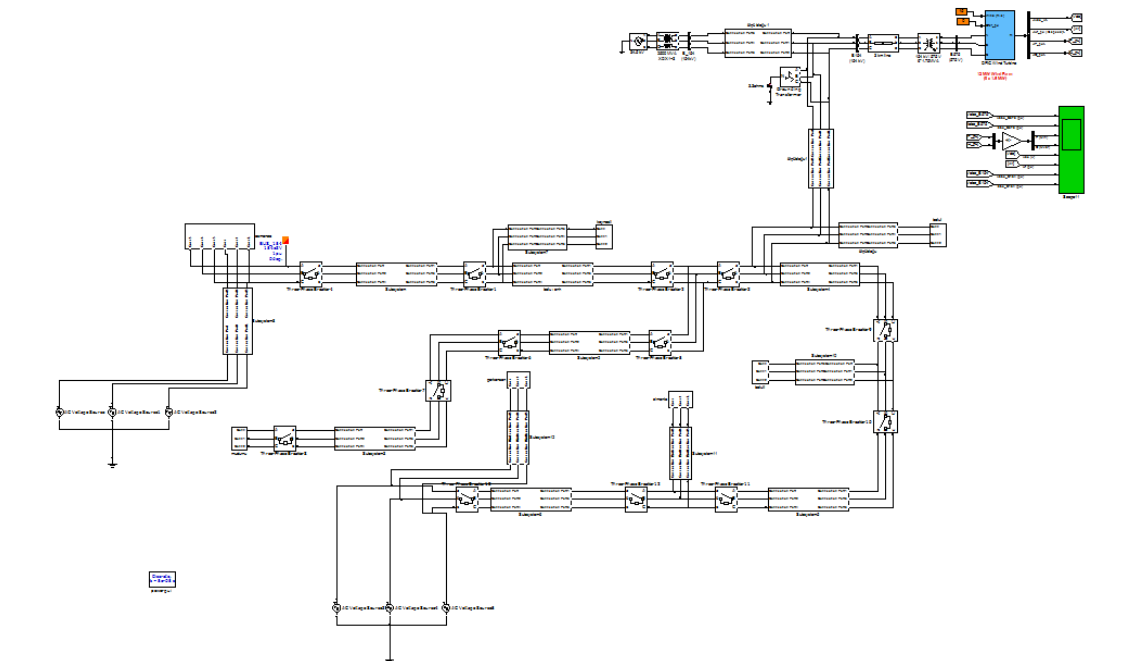
Arz Güvenliği ve Kalite Yönetmeliği'nde de yer alan, rüzgâr santrallerinin, arıza sonrasında belirli süre ve büyüklükte gerilim düşüşü olmasına rağmen, sisteme bağlantılarını sürdürme ve şebekenin toparlanmasına katkıda bulunma yeteneğinin olması gerekmektedir [17].

Çift beslemeli asenkron generatör tipi rüzgâr türbinlerinde kullanılan çevirgeçler, genel olarak generatörün anma gücünün yaklaşık %30'u kadar güçtedir. Sürekli mıknatıslı senkron generatör tipi türbinlere göre daha düşük güçlü çevirgeç, daha az güç kayıpları ve daha az masraflı rüzgâr türbini demektir. Bu avantajlarına rağmen, çevirgeç gücü düşük olmasından dolayı çift beslemeli asenkron generatör tipi rüzgâr türbinlerinin üretebileceği reaktif güç, sabit mıknatıslı senkron generatör tipi türbinlere göre daha azdır. Ayrıca, çift beslemeli asenkron generatör tipi rüzgâr türbinlerin şebekeye doğrudan bağlı olmasından dolayı, şebeke etkilerinin generatör, çevirgeç ve türbin

sistemi üzerinde görülmesidir. Bu sebepten dolayı, generatör hız ve tork değerlerinde oluşan salınımlar şebeke gerilimine de yansır[20].

Sabit mıknatıslı senkron generatör tipi türbinlerde çevirgeçler, generatör ve türbini şebekeden ayırdıkları için şebeke arızalarından daha az etkilenirler. Bu türbinler, türbin anma gücünde reaktif güç üretebildikleri ve aktif güçlerini belli bir artış hızıyla arttırabildikleri için şebeke yönetmeliğindeki gereklilikleri daha rahat sağlayabilirler. Bunun yanında, DC baradaki frenleme direncinin fazla enerjiyi harcayabilmesi sayesinde, ortak bağlantı noktası gerilim seviyesi çok düşük seviyelere inse bile yeterli sisteme bağlı kalabilime performansı gösterebilir. Bunlara ek olarak, sabit mıknatıslı senkron generatör tipi türbinlerde dişli kutusu kullanılmayabilir, bu durum kurulum ve bakım maliyetlerini düşüren başka bir avantajdır.

Uygulamada şimdiye kadar rüzgar enerji santrallerinin dağıtım hattına bağlı olduğu durumlar incelenmiştir. Şekil 6.35'te Kaynaşlı-Bolu I TM arası enerji iletim hattına bağlanan çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgar enerji santrali görülmektedir.



Şekil 6.35 Enerji iletim hattına bağlanan rüzgar enerji santrali

Simülasyon haricinde rüzgâr enerji santralinin sabit güç ürettiği varsayılarak 12 MW güç üreten bir güç barası olarak Newton-raphson metodu kullanılarak yük akış analizi yapılmıştır.

Power Flow Solution by Newton-Raphson Method
Maximum Power Mismatch = 0.000977116
No. of Iterations = 3

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.000	0.000	0.000	0.000	114.273	4.271	0.000
2	0.999	-0.339	96.300	19.400	0.000	0.000	0.000
3	0.989	-0.619	44.900	4.500	0.000	0.000	0.000
4	0.985	0.281	30.100	3.800	0.000	0.000	0.000
5	0.971	-1.171	25.200	4.700	0.000	0.000	0.000
6	0.968	-1.471	24.000	2.500	0.000	0.000	0.000
7	0.950	-2.774	34.000	14.800	0.000	0.000	0.000
8	1.000	12.837	0.000	0.000	160.000	-26.835	0.000
9	0.996	11.536	21.000	3.150	0.000	0.000	0.000
10	1.000	0.239	0.000	0.000	12.000	44.028	0.000
Total			275.500	52.850	286.273	21.464	0.000

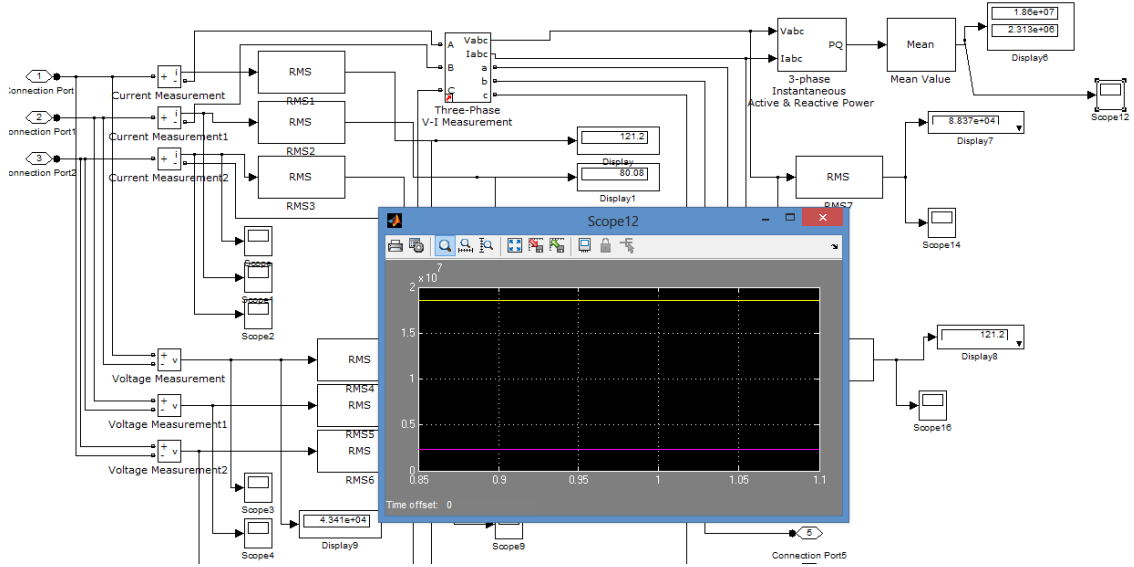
Line Flow and Losses

--Line-- from to		Power at bus & line flow			--Line loss--		Transformer tap
		MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	
1	1	114.273	4.271	114.352			
	2	114.334	4.334	114.416	0.035	-32.628	
2		-96.300	-19.400	98.235			
	1	-114.299	-36.962	120.127	0.035	-32.628	
	3	17.999	17.562	25.147	0.085	-2.427	
3		-44.900	-4.500	45.125			
	2	-17.914	-19.989	26.842	0.085	-2.427	
	4	-26.986	15.489	31.115	0.154	-2.664	
4		-30.100	-3.800	30.339			
	3	27.140	-18.153	32.652	0.154	-2.664	
	5	84.386	18.623	86.417	0.757	0.313	
	10	-11.786	-45.609	47.107	0.214	-1.470	
5		-25.200	-4.700	25.635			
	4	-83.629	-18.310	85.610	0.757	0.313	
	6	58.429	13.610	59.993	0.111	-0.264	
6		-24.000	-2.500	24.130			
	5	-58.318	-13.874	59.946	0.111	-0.264	
	7	34.318	11.374	36.154	0.318	-3.426	
7		-34.000	-14.800	37.082			
	6	-34.000	-14.800	37.082	0.318	-3.426	
8		160.000	-26.835	162.235			
	4	138.904	-22.285	140.680	9.064	19.054	
	9	21.096	-4.528	21.576	0.096	-7.678	
9		-21.000	-3.150	21.235			
	8	-21.000	-3.150	21.235	0.096	-7.678	
10		12.000	44.028	45.634			
	4	12.000	44.139	45.741	0.214	-1.470	
Total loss					10.834	-31.191	

Şekil 6.36 Rüzgar enerji santralinin bulunduğu sistemin yük akış sonuçları

Simulasyon sonuçları hesap sonuçları ile karşılaştırılması için Bolu I TM örnek olarak seçilmiş ve yük akış analizi için bilinmesi gereken aktif güç, reaktif güç ve gerilimin genliği

bilinmeyenleri iki yöntemlede bulunmuştur. 4. Bara olan Bolu I TM merkezi gerilim genliği değerleri hesap yöntemi ile 0.985 p.u yani 151.69 kV ölçü bloğu kullanılarak ölçüldüğünde 153.06 kV olarak görülmüştür. Şekil 6.37'de de Bolu I TM ait rüzgâr enerji santralinin iletim hattına bağlı olduğu durumda aktif reaktif güç akışı görülmektedir.



Şekil 6.37 RES iletim hattına bağlı olduğu durumda Bolu I TM aktif, reaktif güç akışı Simulasyon vasıtasıyla yük akış analizi için istenen tüm değerler ölçü bloğu kullanılarak modellenen sistemin her barasındaki değerleri ölçebilir ve yük akış analizi yapmamız sağlanır.

Yapılan uygulama neticesinde;

Çift beslemeli asenkron generatör tipi rüzgar türbinlerinin çevirgeç gücü düşük olduğundan, şebeke arızası boyunca reaktif güç üretimleri Sabit mıknatıslı senkron generatör tipi türbinlere göre daha azdır.

Çift beslemeli asenkron generatör tipi rüzgar türbinlerinde stator şebekeye doğrudan bağlı olduğu için türbin ve generatörşebeke arızalarından kolayca etkilenir; tork, güç, generatör hızı ve gerilimi sabit mıknatıslı senkron generatör tipi rüzgar türbinine göre daha fazla salınır[21].

Çift beslemeli asenkron generatör tipi rüzgâr türbinlerinde çevirgeç koruması için kullanılan koruma devresi devreye girdiğinde generatör reaktif güç üretmez, tam tersine mıknatıslanma devresi için şebekeden reaktif güç çeker. Bu durum gerilim kararlılığını olumsuz yönde etkiler[22].

Sabit mıknatıslı senkron generatör tipi rüzgar türbinlerinde, çevirgeçler generatör ve türbini şebekeden izole ettiği için hem generatör hem de türbin, Çift beslemeli asenkron generatör sistemlerine kıyasla, şebeke arızalarından daha az etkilenir[25].

Sabit mıknatıslı senkron generatör tipi rüzgar türbinleri daha esnek kontrol sistemlerine sahip olduğu için, arıza sonrasında durağan durumuna daha çabuk ulaşır. Bu sonuçlardan da anlaşılabileceği gibi, sabit mıknatıslı senkron generatör tipi rüzgar türbinleri, arıza esnasında ve sonrasında sistemin toparlanmasına Çift beslemeli asenkron generatör tipi rüzgar türbinlerine göre daha çok yardımcı olur.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Matlab yazılım programının Simulink araç kutusu kullanılarak 154 / 34,5 kV iletim ve dağıtım şebekesinin güç akışı ve kısa devre olayları bilgisayar ortamında incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Güç akışı sonucunda 154 kV / 34,5 kV iletim ve dağıtım şebekesinde bulunan trafo, enerji nakil hatları ve yüklerde akım, gerilim, aktif ve reaktif güç değişimleri gözlenmiştir. Tez çalışmasında yapılan güç akışı sonucunda trafo merkezlerinde trafoların aktif ve reaktif yükler takip edilerek ilave edilecek güç miktarı tespit edilmektedir. Bu veriler doğrultusunda enerji alanında ilgili bölgeye yapılacak yatırım planlaması önceden gerçekleştirilebilir. Örneğin, Kaynaşlı TM 'nin kapasite sınırına ulaşması nedeniyle mevcut trafolarının gücünün artırılması yapılabilir.

Güç akışı sonucunda bölgedeki trafoların kullanım kapasiteleri tespit edilerek, trafoların kapasite sınırına ulaşmasında ilgili trafodan beslenen yüklerin mevcut ring dağıtım hatları vasıtasıyla kapasitesi uygun olan trafo ve merkezlerine aktarımı gerçekleştirilerek, enerjinin sürekliliği sağlanmaktadır. Örneğin, Bolu I TM 'de bulunan 25 MVA iki adet trafonun güç kapasite sınırına ulaşmasında, 2x50 MVA gücü bulunan Bolu II TM 'ye ring dağıtım hatları vasıtasıyla yük aktarımı yapılmaktadır.

Güç akışı sonucu trafo merkezlerinde elde edilen aktif ve reaktif güç değerleri karşılaştırılarak, ilgili trafo merkezinin müşteri hizmetleri yönetmeliğinde belirtilen reaktif kullanım oranını geçmemesi için gerekli kondansatör ilavesi yapılmaktadır. İlgili trafo merkezlerinde müşterilerden kaynaklanan reaktif kullanım miktarı mevcut şebekenin kullanım kapasitesini sınırladığından enerjinin iletim ve dağıtım kalitesinin bozulmasına neden olarak enerji kayıplarına yol açmaktadır. Bu nedenle trafo

merkezlerinin fiderlerine takılacak sayaçlar vasıtası ile de reaktif güç takibi yapılarak, gerekli yerlere kondansatör ilavesinin gerçekleştirilmesiyle mevcut teçhizatın kapasite kullanımı arttırılarak güç kalitesi yükseltilebilir.

Güç akışı sonunda 154 kV / 34,5 kV iletim ve dağıtım şebekesinde bulunan yüklerde gerilim değerleri ile beslendiği kaynaktaki ana bara gerilim değerleri karşılaştırılarak, enerji iletim ve dağıtım hatlarında oluşan gerilim düşümü ve hat kayıpları tespit edilmektedir. Bu veriler ışığında iletken kesitlerinin yükseltilmesi ve yeni hatların yapılması planlanabilir.

154 kV / 34,5 kV iletim ve dağıtım şebekesinin bilgisayar ortamında kısa devre hatasının incelenmesinde normal çalışma şartlarına göre aşırı akım akmaktadır. Sistemde oluşan bu akım ile sistem ana gerilim değeri kullanılarak güç hesabından kesicinin açma gücü hesaplanır. Kısa devre analizi sonucunda şebekede bulunan, yenilenmesi gereken ve ilave edilecek kesicilerin açma gücü tespit edilebilmektedir. Bunun sonucunda elektrik sistemlerinde A noktasında açması istenen kesici yerine, B noktasındaki kesicinin açmaması parametrelerin doğru tespit edilmesiyle mümkündür. Kısa devre sonucunda kesicilerin açma güçleri tespit edilerek üretim, iletim ve dağıtım şebekesinde kullanılanların röle ayarları yapılarak, sistemde röle koordinasyonu sağlanmaktadır.

154 kV / 34,5 kV iletim ve dağıtım şebekesinin bilgisayar ortamında modellemesinin en önemli faydası mevcut sistemin bilgisayar ortamında görülerek, gerçek sistemdeki manevra ve kumanda ayarlarını ekrandaki verilerden hesaplabilmek, sorunları grafiklerden ve analiz sonuçlarından muhakeme ederek gerçek sistemdeki problemlere önceden müdahale edilebilmesine olanak sağlayabilmesidir.

Rüzgâr santrali bağlanacak güç sistemlerinde önceden bilgisayar ortamında modellenmesi gerçek sistemde oluşabilecek tepki ve arıza durumlarının önceden kestirilme ve çözüm önerileri üretilmesi açısından oldukça kullanışlıdır.

Kullanılan çift beslemeli asenkron generatörlü ve senkron generatörlü rüzgar türbinleri arıza esnasında ve sonrasında sistemin toparlanması açısından karşılaştırıldığında senkron generatörlü rüzgar türbinlerinin daha yetenekli olması sebebiyle tercih edilmesi gerekir.

KAYNAKLAR

- [1] Türkiye Elektrik Kurumu, (1990). Elektrik Üretim İletim Müessesesi, Röle Ölçü Aletleri Grup Müdürlüğü, Orta Gerilim Elektrik Tesislerinde Koruma ve Kontrol.
- [2] UÇKU, K.,(1974). Elektrikle Enerji Dağıtımı ve Projesi – Birinci Kısım, Ankara Devlet Mühendislik ve Mimarlık Akademisi M.M.Y.O., Tisa Matbaacılık Sanayi, Ankara,
- [3] Özdemir,E.,(2013).Türkiye Elektrik İletim Sistemi Rüzgar Santrali Bağlantıları, Türkiye Rüzgar Enerjisi Kongresi, İstanbul,Türkiye.
- [4] TEİAŞ, Yük Tevzii Dairesi Başkanlığı, (2006). Etüt ve Raporlama Müdürlüğü, 2005 Puant (Kış) Yük Şartlarında Yük Akışı, Üç Faz ve Faz Toprak Kısa Devre Etüdü, Ankara,.
- [5] ARİFOĞLU, U.,(2005). Matlab 7.04 Simulink ve Mühendislik Uygulamaları, Alfa Yayınları, İstanbul.
- [6] Saadat,H.,(2002). Power System Analysis”, Electric Power Research Institute, Mc Graw Hill.
- [7] Howard R. Hughes Colleges of Engineering, University of Nevada,Las Vegas <http://www.egr.unlv.edu/~eebag/Power%20Flow%20Analysis.pdf>, 29 Aralık 2013.
- [8] Mutlu, Ö.S.(2009). Effects of Wind Turbines on Power System Operation. Ph.D. Thesis. Dokuz Eylül University.
- [9] Tanrıöven,M.,(2013). Rüzgâr ve Güneş Enerji Sistemler Ders Notu.
- [10] DPT, Mutlu, Ö.S. ve Akpınar, E.,(2005).Elektrik Güç Sistemine Bağlı Rüzgâr Enerjisi DönüşümSistemlerinin Bütünleşik Modellenmesi. 5. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu. Haziran 2009. Diyarbakır-Türkiye 90-97.
- [11] Uyar, M., Gencoğlu, T.G.,Yıldırım, S.,(2005). “Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri İçin Generatör Sistemleri”, III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Mersin, Türkiye, 2-5. Kundur P.,(1994).
- [12] Döşoğlu,K.,(2012). Rüzgâr Santralinde Geçici Durum Etkilerinin İncelenmesi, Elektrik Mühendisleri Odası Dergisi 43-47.

- [13] Foote, C.E.T., Ault, G.W., McDonald, J.R., Silvestro, F.,(2005). Information requirements and methods for characterising distributed generation, CIRED 18th International Conference on Electricity Distribution, Turin
- [14] Johnson B. K., (2002). Power system modelling requirements for rotating machine interfaced distributed resources, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, USA, 161-166.
- [15] Ürgüplü, Z.,(2008).Elektrobank, 2. Baskı, Bizim Büro Basımevi, Ankara.
- [16] Altas, İ. Ve Mengi, O.,(2008). “Rüzgar Enerji Sisteminde Harmoniklerin Azaltılması”, VII. Ulusal Temiz Enerji Kongresi, 17-19 Aralık 2008, İstanbul.
- [17] Kundur P., Paserba J., Vitet S., Overview on definition and classification of power system stability, IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions
- [18] T.C. Resmi Gazete Elektrik Piyasası Şebekesine Dair Yönetmelik.(28517),03.01.2013.
- [19] Power system stability and control, Electric Power Research Institute, Mc Graw Hill.
- [20] M. Y. Chong, A. A. Rahman, N.A. Aziz, A. Khamis, M. F. M. Basar.(2010). Performance Comparison of Bidirectional Converter Designs for Renewable Power Generation. The 4th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO 2010), Shah Alam Selangor. 23-24 June 2010.
- [21] UCTE, 2004. Union for the co-ordination of transmission of electricity, Operation Handbook.
- [22] Ackermann, T.,(2005). “Wind Power in Power Systems”, John Wiley & Sons, Ltd.
- [23] TEİAŞ, (2002). Sistem Araştırma ve Kontrol Müdürlüğü, Türkiye Ulusal Elektrik Ağındaki Havai Hatların Trafoların ve Generatörlerin Elektriki Karakteristiği, Ankara.
- [24] DURSUN, İ.,(2006). Boğaziçi Elektrik Dağıtım A.Ş. Beyoğlu İşletme Bölgesi 34,5 kV’luk Bir Besleme Hattının Simulink ile Modellenmesi, Yüksek Lisans, T.C., Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [25] Tekin,K.,(2006). Rüzgâr Santrali İçeren Elektrik Sistemlerinde Etkilenmeler Ve Kısa Devre İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

MODELLENEN ŞEBEKEYE AİT VERİLER

İLETİM HATTININ ADI	UZUNLUK (km)	İLETKEN KESİTİ	R (Ohm/km)	L (H/km)	C (µF/km)
Osmanca TM_ Akçakoca ENH	23,160	477 MCM	0,133851	0,001347590	0,008498069
Sarıyar_Bolu I TM ENH	81,753	477 MCM	0,134552	0,001371227	0,008355914
Bolu I TM_Kaynaşlı TM ENH	26,060	477 MCM	0,134305	0,001368718	0,008358956
Bolu I TM_Bolu II TM ENH	17,288	477 MCM	0,133040	0,001344771	0,008473902
Bolu II TM_Çimento TM ENH	5,119	477 MCM	0,136745	0,001368699	0,008585475
Çimento TM-Gerkonsan TM ENH	38,566	477 MCM	0,134834	0,001362541	0,008406467
Osmanca TM_Hendek ENH	41,800	477 MCM	0,133971	0,001371408	0,008350349
Osmanca TM_Karasu ENH	43,700	795 MCM	0,082380	0,001289918	0,008796222
Osmanca TM_Kaynaşlı TM	21,977	477 MCM	0,131956	0,001376656	0,008361376
Sarıyar_Mudurnu TM ENH	62,154	795 MCM	0,082054	0,001296349	0,008843864
Sarıyar_Toyoto ENH	120,000	795 MCM	0,082500	0,001297771	0,008840234

Şekil Ek-A.1 Bolu-Düzce bölgesi 154 kV iletim hatları blok parametre değerleri

T.M. ADI	GERİLİM	FİDER / ENH ADI	İLETKEN CİNSİ VE KESİTİ	UZUNLUK (km)	R (Ohm/km)	L (H/km)	C (µF/km)
BOLU T.M. I (TR-A)	154 / 34,5 kV	FİDER 5 / MUDURNU - SEBEN ENH.	1/0	3	0,67476	0,001479618	0,009808917
BOLU T.M. I (TR-A)	154 / 34,5 kV	FİDER 6 / ŞEHİR 2 - BEŞKAVAKLAR D.M.	477	1,1	0,134915	0,001097452	0,008407643
BOLU T.M. I (TR-A)	154 / 34,5 kV	FİDER 7 / ŞEHİR 3 - KILIÇARSLAN D.M.	1x240 mm ² XLPE	0,85	0,0754	0,006	0,2
BOLU T.M. I (TR-A)	154 / 34,5 kV	FİDER 8 / KAYNAŞLI-1	266	15	0,240474	0,001160828	0,008980892
BOLU T.M. I (TR-A)	154 / 34,5 kV	FİDER 9 / KAYNAŞLI-2	266	15	0,240474	0,001160828	0,008980892
BOLU T.M. I (TR-B)	154 / 34,5 kV	FİDER 1 / ARDEM D.M. - BOLU T.M. II	477	5,5	0,134915	0,001097452	0,008407643
BOLU T.M. I (TR-B)	154 / 34,5 kV	FİDER 2 / ARDEM D.M. - BOLU T.M. II	477	5,4	0,134915	0,001097452	0,008407643
BOLU T.M. I (TR-B)	154 / 34,5 kV	FİDER 3 / ŞEHİR 4 - KILIÇARSLAN D.M.	1/0	0,75	0,67476	0,001479618	0,009808917
BOLU T.M. I (TR-B)	154 / 34,5 kV	FİDER 4 / ŞEHİR 1 - BEŞKAVAKLAR D.M.	1/0	0,88	0,67476	0,001479618	0,009808917

Şekil Ek-A.2 Bolu I TM dağıtım hatları blok parametre değerleri

BOLU-DÜZCE BÖLGESİ				1. SARGI PARAMETRELERİ		2. SARGI PARAMETRELERİ		MANYETİK PARAMETRELERİ	
TRAFO ADI	S (MVA)	BAĞLANTI GR.	GERİLİM (kV)	R1 (Ohm)	L1 (Henry)	R2 (Ohm)	L2 (Henry)	Rm (Ohm)	Lm (Henry)
Bolu I TRA	25	Yy0	154/34,5	0,08	0,00344	0,004	0,00172	750485,62	1149,06
Bolu I TRB	25	YNyn0	154/34,5	0,093	0,0362	0,00466	0,00181	849699,63	898,66
Kaynaşlı TRA	25	YNyn0	154/34,5	0,09	0,0332	0,0045	0,00166	849699,63	898,66
Kaynaşlı TRB	25	YNyn0	154/34,5	0,093	0,036	0,00466	0,0018	849699,63	898,66
Mudurnu	25	YNyn0	154/34,5	0,093	0,0373	0,00466	0,00187	849699,63	898,66
Gerkonsan	25	YNyn0	154/31,5	0,0914	0,0342	0,00458	0,00171	849710,4	995,27
Çimento TRA	20	YNyn0	154/6,3	0,0266	0,00623	0,00000445	0,0000104	1871916,24	10738,94
Çimento TRB	20	YNyn0	154/6,3	0,00316	0,00621	0,0000053	0,0000104	1867519,066	9.429,16
Bolu II TRA	50	YNyn0	154/34,5	0,68685	0,071269	0,03568	0,003576	753401,788	4.500,04
Bolu II TRB	50	YNyn0	154/34,5	0,687	0,070969	0,03447	0,003561	753401,788	4.500,04
Osmanca TRA	150	YNyn0	380/158	1,0126	0,1702	0,175069	0,029438	1860928,623	1.480,44
Osmanca TRB	150	YNyn0	380/158	1,0126	0,1702	0,175069	0,029438	1860928,623	1.480,44

Şekil Ek-A.3 Bolu-Düzce bölgesi 154 kV / 34,5 kV iletim ve dağıtım şebekesi trafolarının parametreleri

T.M. ADI	GERİLİM	FİDER / ENH ADI	P (MW) (AKTİF GÜÇ)	Q (MVAR) (REAKTİF GÜÇ)
BOLU T.M. I (TR-A)	154 / 34,5 kV	FİDER 5 / MUDURNU - SEBEN ENH.	1,6	0,403
BOLU T.M. I (TR-A)	154 / 34,5 kV	FİDER 6 / ŞEHİR 2 - BEŞKAVAKLAR D.M.	5,5	1,21
BOLU T.M. I (TR-A)	154 / 34,5 kV	FİDER 7 / ŞEHİR 3 - KILIÇARSLAN D.M.	9	0,96
BOLU T.M. I (TR-A)	154 / 34,5 kV	FİDER 8 / KAYNAŞLI-1	0,1	0
BOLU T.M. I (TR-A)	154 / 34,5 kV	FİDER 9 / KAYNAŞLI-2	0,6	0
BOLU T.M. I (TR-B)	154 / 34,5 kV	FİDER 1 / ARDEM D.M. - BOLU T.M. II	0	0
BOLU T.M. I (TR-B)	154 / 34,5 kV	FİDER 2 / ARDEM D.M. - BOLU T.M. II	4,5	1,09
BOLU T.M. I (TR-B)	154 / 34,5 kV	FİDER 3 / ŞEHİR 4 - KILIÇARSLAN D.M.	6	1,323
BOLU T.M. I (TR-B)	154 / 34,5 kV	FİDER 4 / ŞEHİR 1 - BEŞKAVAKLAR D.M.	8	0,96

Şekil Ek-A.4 Bolu I TM dağıtım hatları yük parametre değerleri

T.M. ADI	GERİLİM	FİDER / ENH ADI	İLETKEN ÇİNSİ VE KESİTİ	UZUNLUK (km)	R (Ω/km)	L (H/km)	C (μF/km)
BOLUÇİMENTO (TR-A)	134 / 6,3 kV	FİDER 1	2x240 mm ² XLPE	0,10	0,0377	0,00029	0,9
BOLUÇİMENTO (TR-A)	134 / 6,3 kV	FİDER 2	2x240 mm ² XLPE	0,10	0,0377	0,00029	0,9
BOLUÇİMENTO (TR-B)	134 / 6,3 kV	FİDER 1	4x240 mm ² XLPE	0,07	0,01883	0,000143	1,8
BOLUT.M. I (TR-A)	134 / 34,5 kV	FİDER 5 / MU DURNU - SEBEN ENH.	1/0	3	0,67476	0,001479618	0,009 808917
BOLUT.M. I (TR-A)	134 / 34,5 kV	FİDER 6 / ŞEHİR 2 - BEŞKAVAKLAR D.M.	477	1,1	0,134913	0,001097432	0,008 407643
BOLUT.M. I (TR-A)	134 / 34,5 kV	FİDER 7 / ŞEHİR 3 - KILIÇARSLAN D.M.	1x240 mm ² XLPE	0,83	0,0734	0,006	0,2
BOLUT.M. I (TR-A)	134 / 34,5 kV	FİDER 8 / KAYNAŞLI-1	266	13	0,240474	0,001160828	0,008 980892
BOLUT.M. I (TR-A)	134 / 34,5 kV	FİDER 9 / KAYNAŞLI-2	266	13	0,240474	0,001160828	0,008 980892
BOLUT.M. I (TR-B)	134 / 34,5 kV	FİDER 1 / ARDEM D.M. - BOLU T.M. II	477	3,3	0,134913	0,001097432	0,008 407643
BOLUT.M. I (TR-B)	134 / 34,5 kV	FİDER 2 / ARDEM D.M. - BOLU T.M. II	477	3,4	0,134913	0,001097432	0,008 407643
BOLUT.M. I (TR-B)	134 / 34,5 kV	FİDER 3 / ŞEHİR 4 - KILIÇARSLAN D.M.	1/0	0,73	0,67476	0,001479618	0,009 808917
BOLUT.M. I (TR-B)	134 / 34,5 kV	FİDER 4 / ŞEHİR 1 - BEŞKAVAKLAR D.M.	1/0	0,88	0,67476	0,001479618	0,009 808917
BOLUT.M. II (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 1 / BOLUT.M. I - 2nci DEVRE	477	9,33	0,134913	0,001097432	0,008 407643
BOLUT.M. II (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 2 / BOLUT.M. I - 1nci DEVRE	477	9,33	0,134913	0,001097432	0,008 407643
BOLUT.M. II (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 3 / ÇİMENTO ENH. - 1	477	3	0,134913	0,001097432	0,008 407643
BOLUT.M. II (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 4 / ÇİMENTO ENH. - 2	477	3	0,134913	0,001097432	0,008 407643
BOLUT.M. II (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 5 / RÜZ D.M.	477	4,3	0,134913	0,001097432	0,008 407643
BOLUT.M. II (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 6 / ORGANİZE SAN. ENH.	477	4,3	0,134913	0,001097432	0,008 407643
BOLUT.M. II (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 10 / KÖYLER ENH.	1/0	3	0,67476	0,001479618	0,009 808917
BOLUT.M. II (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 13 / KARTALKAYA ENH.	3/0	13,2	0,4333	0,001419743	0,009 490446
BOLUT.M. II (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 14 / YENİÇAĞA ENH.	1/0	10,3	0,67476	0,001479618	0,009 808917
BOLUT.M. II (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 15 / ALIÇÖREN ENH.	1/0	3,8	0,67476	0,001479618	0,009 808917
MU DURNU T.M.	134 / 34,5 kV	FİDER 1 / İLÇE MERKEZİ ENH.	3/0	0,2	0,4333	0,001419743	0,009 490446
MU DURNU T.M.	134 / 34,5 kV	FİDER 2 / TAŞKESTİ	3/0	14	0,4333	0,001419743	0,009 490446
MU DURNU T.M.	134 / 34,5 kV	FİDER 3 / TAVUKÇULUK	1/0	0,3	0,67476	0,001479618	0,009 808917
MU DURNU T.M.	134 / 34,5 kV	FİDER 6 / ORMANPINAR GRP. ENH.	1/0	0,2	0,67476	0,001479618	0,009 808917
MU DURNU T.M.	134 / 34,5 kV	FİDER 7 / SEBEN ENH.	3/0	46,6	0,4333	0,001419743	0,009 490446
MU DURNU T.M.	134 / 34,5 kV	FİDER 8 / BOLU GRP. KÖYLER ENH.	1/0	9,2	0,67476	0,001479618	0,009 808917
MU DURNU T.M.	134 / 34,5 kV	FİDER 10 / GÖYNÜK - 1 ENH.	3/0	38,3	0,4333	0,001419743	0,009 490446
MU DURNU T.M.	134 / 34,5 kV	FİDER 11 / GÖYNÜK - 2 ENH.	3/0	38,3	0,4333	0,001419743	0,009 490446
GERKON SAN T.M.	134 / 31,5 kV	FİDER 1 / GERKON SAN - 1	3/0	0,3	0,4333	0,001419743	0,009 490446
GERKON SAN T.M.	134 / 31,5 kV	FİDER 2 / GERKON SAN - 2	3/0	0,3	0,4333	0,001419743	0,009 490446
GERKON SAN T.M.	134 / 31,5 kV	FİDER 3 / GERED - 1	1/0	8,9	0,67476	0,001479618	0,009 808917
GERKON SAN T.M.	134 / 31,5 kV	FİDER 4 / GERED - 2	3/0	2,3	0,4333	0,001419743	0,009 490446
GERKON SAN T.M.	134 / 31,5 kV	FİDER 5 / O.S.B.	1x93 mm ² XLPE	0,1	0,193	0,0068	0,13
GERKON SAN T.M.	134 / 31,5 kV	FİDER 6 / ÇAMLIDERE ENH.	3/0	13	0,4333	0,001419743	0,009 490446
GERKON SAN T.M.	134 / 31,5 kV	FİDER 7 / CİVAR KÖYLER ENH.	1/0	0,8	0,67476	0,001479618	0,009 808917
GERKON SAN T.M.	134 / 31,5 kV	FİDER 8 / YENİÇAĞA - 1	3/0	13	0,4333	0,001419743	0,009 490446
GERKON SAN T.M.	134 / 31,5 kV	FİDER 9 / YENİÇAĞA - 2	3/0	13	0,4333	0,001419743	0,009 490446
GERKON SAN T.M.	134 / 31,5 kV	FİDER 10 / MENGEN - 1	3/0	28,3	0,4333	0,001419743	0,009 490446
GERKON SAN T.M.	134 / 31,5 kV	FİDER 11 / MENGEN - 2	3/0	28,3	0,4333	0,001419743	0,009 490446
GERKON SAN T.M.	134 / 31,5 kV	FİDER 12 / ESKİ KÖYLER ENH.	3/0	9,3	0,4333	0,001419743	0,009 490446
GERKON SAN T.M.	134 / 31,5 kV	FİDER 13 / GERED - 3	1/0	2,3	0,67476	0,001479618	0,009 808917
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 1 / ŞEHİR ENH.	1/0	1	0,67476	0,001479618	0,009 808917
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 2 / DÜZCE KÖYLER ENH.	477	3,3	0,134913	0,001097432	0,008 407643
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 3 / DÜZCE D.M.-6	477	7,3	0,134913	0,001097432	0,008 407643
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 4 / SAZKÖY KÖYLER ENH.	477	7,3	0,134913	0,001097432	0,008 407643
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 5 / SÜPERLİT - ANLAŞ ENH.	3/0	2,3	0,4333	0,001419743	0,009 490446
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 6 / OSMANCA SANAYİ ENH.	266	12	0,240474	0,001160828	0,008 980892
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 7 / BOLU KÖYLER ENH.	266	10	0,240474	0,001160828	0,008 980892
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 8 / DÜZCE D.M.-1	266	12	0,240474	0,001160828	0,008 980892
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 9 / BOLU T.M.-1	266	10	0,240474	0,001160828	0,008 980892
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 10 / DÜZCE O.S.B.-1	477	10	0,134913	0,001097432	0,008 407643
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	134 / 34,5 kV	FİDER 11 / DÜZCE O.S.B.-2	477	10	0,134913	0,001097432	0,008 407643

Şekil Ek-A.5 Bolu-Düzce bölgesi 34,5- 31,5 ve 6,3 kV dağıtım hatları blok parametre değerleri

T.M. ADI	GERİLİM	FİDER / ENH ADI	P (MW) (AKTİF GÜÇ)	Q (MVAR) (REAKTİF GÜÇ)
BOLU ÇİMENTO (TR-A)	154 / 6,3 kV	FİDER 1	5,5	0,5
BOLU ÇİMENTO (TR-A)	154 / 6,3 kV	FİDER 2	4,5	0,5
BOLU ÇİMENTO (TR-B)	154 / 6,3 kV	FİDER 1	14	1,5
BOLU T.M. I (TR-A)	154 / 34,5 kV	FİDER 5 / MUDURNU - SEBEN ENH.	1,6	0,403
BOLU T.M. I (TR-A)	154 / 34,5 kV	FİDER 6 / ŞEHİR 2 - BEŞKAVAKLAR D.M.	5,5	1,21
BOLU T.M. I (TR-A)	154 / 34,5 kV	FİDER 7 / ŞEHİR 3 - KILIÇARSLAN D.M.	9	0,96
BOLU T.M. I (TR-A)	154 / 34,5 kV	FİDER 8 / KAYNAŞLI-1	0,1	0
BOLU T.M. I (TR-A)	154 / 34,5 kV	FİDER 9 / KAYNAŞLI-2	0,6	0
BOLU T.M. I (TR-B)	154 / 34,5 kV	FİDER 2 / ARDEM D.M. - BOLU T.M. II	4,5	1,09
BOLU T.M. I (TR-B)	154 / 34,5 kV	FİDER 3 / ŞEHİR 4 - KILIÇARSLAN D.M.	6	1,323
BOLU T.M. I (TR-B)	154 / 34,5 kV	FİDER 4 / ŞEHİR 1 - BEŞKAVAKLAR D.M.	8	0,96
BOLU T.M. II (TR - A/B)	154 / 34,5 kV	FİDER 1 / BOLU T.M. I - 2nci DEVRE	4,2	0,498
BOLU T.M. II (TR - A/B)	154 / 34,5 kV	FİDER 1 / BOLU T.M. I - 1nci DEVRE	4,4	0,613
BOLU T.M. II (TR - A/B)	154 / 34,5 kV	FİDER 3 / ÇİMENTO ENH. - 1	0,4	0
BOLU T.M. II (TR - A/B)	154 / 34,5 kV	FİDER 4 / ÇİMENTO ENH. - 2	0	0
BOLU T.M. II (TR - A/B)	154 / 34,5 kV	FİDER 5 / FİLİZ D.M.	5,7	0,86
BOLU T.M. II (TR - A/B)	154 / 34,5 kV	FİDER 6 / ORGANİZE SAN. ENH.	12,6	2,3
BOLU T.M. II (TR - A/B)	154 / 34,5 kV	FİDER 10 / KÖYLER ENH.	0,7	0,21
BOLU T.M. II (TR - A/B)	154 / 34,5 kV	FİDER 13 / KARTALKAYA ENH.	0,3	0
BOLU T.M. II (TR - A/B)	154 / 34,5 kV	FİDER 14 / YENİÇAĞA ENH.	0,3	0,058
BOLU T.M. II (TR - A/B)	154 / 34,5 kV	FİDER 15 / ALIÇÖREN ENH.	0,6	0,105
MUDURNU T.M.	154 / 34,5 kV	FİDER 1 / İLÇE MERKEZİ ENH.	2	0,552
MUDURNU T.M.	154 / 34,5 kV	FİDER 2 / TAŞKESTİ	0,9	0,069
MUDURNU T.M.	154 / 34,5 kV	FİDER 5 / TAVUKÇULUK	0,5	0,005
MUDURNU T.M.	154 / 34,5 kV	FİDER 6 / ORMANPINAR GRP. ENH.	0,6	0,08
MUDURNU T.M.	154 / 34,5 kV	FİDER 7 / SEBEN ENH.	2,5	0,067
MUDURNU T.M.	154 / 34,5 kV	FİDER 8 / BOLU GRP. KÖYLER ENH.	2,4	0,079
MUDURNU T.M.	154 / 34,5 kV	FİDER 10 / GÖYNÜK - 1 ENH.	3,7	0,75
MUDURNU T.M.	154 / 34,5 kV	FİDER 11 / GÖYNÜK - 2 ENH.	8,4	1,44
GERKONSAN T.M.	154/31,5 kV	FİDER 1 / GERKONSAN - 1	0	0
GERKONSAN T.M.	154/31,5 kV	FİDER 2 / GERKONSAN - 2	0,9	0,018
GERKONSAN T.M.	154/31,5 kV	FİDER 3 / GERDE - 1	1	0,105
GERKONSAN T.M.	154/31,5 kV	FİDER 4 / GERDE - 2	6,2	0,372
GERKONSAN T.M.	154/31,5 kV	FİDER 5 / O.S.B.	0,5	0,049
GERKONSAN T.M.	154/31,5 kV	FİDER 6 / ÇAMLIDERE ENH.	8,7	0,144
GERKONSAN T.M.	154/31,5 kV	FİDER 7 / CİVAR KÖYLER ENH.	0,7	0,042
GERKONSAN T.M.	154/31,5 kV	FİDER 8 / YENİÇAĞA - 1	1,6	0,145
GERKONSAN T.M.	154/31,5 kV	FİDER 9 / YENİÇAĞA - 2	1,5	0,167
GERKONSAN T.M.	154/31,5 kV	FİDER 10 / MENGEN - 1	2	0,001
GERKONSAN T.M.	154/31,5 kV	FİDER 11 / MENGEN - 2	3,7	0,274
GERKONSAN T.M.	154/31,5 kV	FİDER 12 / ESKİ KÖYLER ENH.	0,8	0,004
GERKONSAN T.M.	154/31,5 kV	FİDER 13 / GERDE - 3	6	0,872
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	154/34,5 kV	FİDER 1 / ŞEHİR ENH.	1,2	0,33
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	154/34,5 kV	FİDER 2 / DÜZCE KÖYLER ENH.	6,5	2,12
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	154/34,5 kV	FİDER 3 / DÜZCE D.M.-6	10,2	2,478
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	154/34,5 kV	FİDER 4 / SAZKÖY KÖYLER ENH.	0,5	0,08
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	154/34,5 kV	FİDER 5 / SÜPERLÜT - ANLAŞ ENH.	3,2	0,44
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	154/34,5 kV	FİDER 6 / OSMANCA SANAYİ ENH.	1,6	0,049
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	154/34,5 kV	FİDER 7 / BOLU KÖYLER ENH.	1,6	0,042
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	154/34,5 kV	FİDER 8 / DÜZCE D.M.-1	12	0,35
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	154/34,5 kV	FİDER 9 / BOLU T.M. I	1	0
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	154/34,5 kV	FİDER 10 / DÜZCE O.S.B.-1	6	0,027
KAYNAŞLI T.M. (TR - A/B)	154/34,5 kV	FİDER 11 / DÜZCE O.S.B.-2	0,1	0
OSMANCA T.M.	154/154 kV	AKÇAKOCA ENH	14,3	5,4
OSMANCA T.M.	154/154 kV	HENDEK ENH	67	8
OSMANCA T.M.	154/154 kV	KARASU ENH	15	6
SARIYAR SANTRALI	154/154 kV	TOYOTO ENH	20	2

Şekil Ek-A.6 Bolu-Düzce bölgesi iletim ve dağıtım şebekesi aktif ve reaktif yük tablosu

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Tuncay ALTUN
Doğum Tarihi ve Yeri :28.04.1987/SİVAS
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :tuncayaltun@cumhuriyet.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lise	Fen Bilimleri	Sivas Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012 -	Cumhuriyet Üniversitesi	Araştırma Görevlisi