
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

RÜZGÂR SANTRALLERİNİN GÜÇ SİSTEMİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Onur ŞAHİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKİM 2015

Onur ŞAHİN tarafından hazırlanan "RÜZGÂR SANTRALLERİNİN GÜÇ SİSTEMİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ'' adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Öğr. Gör. Dr. Süleyman SUNGUR TEZCAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum ..……

Başkan : Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum ……...

Üye : Yrd. Doç. Dr. İbrahim EKE

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum ……...

Tez Savunma Tarihi: 26/10/2015

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……..…….

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Onur ŞAHİN

26/10/2015

RÜZGÂR SANTRALLERİNİN GÜÇ SİSTEMİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Onur ŞAHİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2015

ÖZET

Fosil yakıt kaynaklarının sınırlı oluşu ve hava kirliliği, asit yağmurları ile sera etkisi şeklinde ortaya çıkan çevresel sorunlar nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynakları tüm dünyada giderek artan bir ilgi ile karşılanmakta ve enerji gereksiniminin karşılanmasında önemli bir kaynak olarak görülmektedir. Yenilenebilir, temiz, ucuz bir enerji olan rüzgâr enerjisi de bu yenilenebilir enerji kaynaklarına bir örnektir. 2013 yılı itibari ile dünyadaki toplam kurulu rüzgâr gücü 318 GW'tır. Türkiye'nin rüzgâr enerjisi ile ilgilenmeye başlaması büyük ölçüde 1990'lı yılların ortalarına rastlar. Türkiye'nin kurulu rüzgâr enerji kapasitesi 1998'de 9 MW iken 2004'de 20 MW'a 2014 yılında 3548 MW'a yükselmiştir. Rüzgâr santrallerinin enterkonnekte sistemlere bağlanmasının teknik ve fiziksel problemleri, bu yenilenebilir enerji kaynağının önemli bir yönüdür. Bu çalışmada son 20 yıldaki araştırmalar, rüzgâr türbinlerinin ve rüzgâr çiftliklerinin elektrik şebekesine entegrasyonundaki problemler analiz edilmiştir. Özellikle rüzgâr santrallerinin elektrik iletim sisteminde sık sık meydana getirdiği gerilim değişimlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Matlab simulink programında bir rüzgâr santralinin simülasyonu yapılmış, Pss-e programıyla da gerçek sistem üzerinde rüzgâr santralleri üzerinde çalışma yapılmıştır. Simülasyon ve gerçek sistem üzerinde, elektrik sisteminde rüzgâr santrallerinin meydana getirdiği gerilim bozulmaları gösterilmiştir. Türkiye'nin rüzgâr enerjisi ve rüzgâr santrallerinin enterkonnekte sistemlere entegrasyonu ile karşılaşılan problemler için öneriler sunulmuştur.

Bilim Kodu : 905.1.150

Anahtar Kelimeler : Rüzgâr Enerjisi, Rüzgâr Türbinleri, Gerilim Bozulması, Enterkonnekte Sistemler

Sayfa Adedi : 95

Danışman : Öğretim Gör. Dr. Süleyman Sungur TEZCAN

THE IMPACT ON THE POWER SYSTEM OF WIND POWER PLANTS

(M.Sc. Thesis)

Onur ŞAHİN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2015

ABSTRACT

Due to limited fossil fuels and their negative impact on environment such as air pollution, acid rains and greenhouse effect, the interest on renewable energy resources has been increasing, gradually, all over the world. Wind energy is also an example for these renewable, clean and cheap energy resources. Global installed capacity has managed 318 GW in 2013. Wind energy is noticed on late 1990's in Turkey. The installed capacity of Turkey's wind energy has increased 9 MW in 1998 to 20 MW in 2004 to 3548 MW in 2014. Technical, physical problems and connection of interconnected system of the wind power plants are important aspect of these renewable energy sources. In this study, the results of nearly two decades of research mean that the integration of wind-turbine and wind farms into electricity networks generally analyzed problems. Especially wind power plants in the electricity transmission system was aimed to evaluate the voltage changes brought occur frequently. It made a wind farm simulation in Matlab Simulink program, PSS-E program is made with the work on the wind farm on the actual system. Simulation and on a real system, the electrical system has been shown voltage distortions caused by the wind farms. The proposals are presented wind energy of Turkey and integration of the wind power plants to interconnected system and the solution of these problems.

Science Code	:	905.1.150
Key Words	:	Wind Energy, Wind Turbines, Voltage Distortion, Interconnected Systems
Page Number	:	95
Supervisor	:	Instructor Dr. Süleyman Sungur TEZCAN

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim sırasında her zaman yakın ilgisini ve desteğini esirgemeyen, çalışmalarım süresince bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren, danışman hocam Öğr. Gör. Dr. Süleyman SUNGUR TEZCAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tezimin hazırlanmasında emeği geçen ve manevi desteğini ile her zaman yanımda olan sevgili eşim Ecz. Şule ŞAHİN'ne ve oğlum Selim ŞAHİN'e çok teşekkür ediyorum. Ayrıca beni bugünlere getiren sevgili anne ve babama sonsuz sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

RESİMLERİN LİSTESİ xv

HARİTALARIN LİSTESİ xvi

SİMGELER VE KISALTMALAR xvii

1. GİRİŞ 1

2. RÜZGÂR ENERJİSİ 5

2.1. Rüzgârın Tanımı 5

2.2. Rüzgârdaki Enerji 6

2.3. Rüzgâr Enerjisinin Kısa Tarihçesi 6

2.4. Dünyada Rüzgâr Enerjisi 7

2.5. Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi 8

2.6. Rüzgâr Potansiyeli ve Belirlenmesi 9

2.7. Rüzgâr Türleri 12

2.7.1. Küresel rüzgârlar 12

2.7.2. Geostrofik rüzgârlar 13

2.7.3. Yerel rüzgârlar 13

2.8. Rüzgâr Enerjisini Etkileyen Faktörler 14

2.8.1. Yüzey pürüzlülüğü 14

2.8.2. Rüzgâr engelleri 14

Sayfa

3. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ 15
3.1. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması 15
3.1.1. Yapılarına göre rüzgâr türbinleri 15
3.1.2. Güçlerine göre rüzgâr türbinleri 17
3.1.3. Şebeke açısından rüzgâr türbinleri 18
3.1.4. Kanat sayısına göre rüzgâr türbinleri 20
3.2. Rüzgâr Türbinlerinin Parçaları 21
3.2.1. Doğrultucu ve gerilim regülâtörü 22
3.2.2. Generatör 23
3.2.3. İnverter 26
3.2.4. Kanatlar 27
3.2.5. Kule 27
3.2.6. Rotor 28
3.2.7. Vites kutusu (Gear box) 28
3.2.8. Fren sistemi 29
3.2.9. Dişli kutusu 29
3.2.10. Anemometre ve yelkovan 30
3.2.11. Otomatik yöneltme düzeni 31
3.2.12. Rüzgâr türbini yaw mekanizması 31
3.3. Rüzgâr Türbinlerinin Güç Kontrolü 31
3.3.1. Stall kontrol mekanizması 31
3.3.2. Pitch kontrol mekanizması 32
3.4. Rüzgâr Türbininin Güç Eğrisi 32
3.5. Rüzgâr Türbini Ömrü 33

Sayfa

3.6. Rüzgâr Türbinlerinin Bakımı 34

3.7. Rüzgâr Türbinin Güvenliği 34

3.8. Rüzgâr Türbinlerinin Gelişiminde Ulaşılan Düzey..... 35

4. RÜZGÂR SANTRALLERİNİN ŞEBEKE BAĞLANTILARI VE GÜÇ KALİTESİ..... 39

4.1. Literatür Taraması 39

4.2. Rüzgâr Enerjisi ile Şebeke Entegrasyonunda Teknik Problemler 44

4.2.1. Geçici zaman kararlılığı 45

4.2.2. Voltaj kontrolü 45

4.2.3. Frekans kontrolü 46

4.2.4. Kısa devre akımları 46

4.2.5. Güç kalitesi sorunları 46

4.2.6. Aktif güç 46

4.2.7. Reaktif güç 47

4.3. Rüzgâr Türbinlerinin Güç Kalitesi Karakteristikleri ve Ölçümleri..... 48

4.3.1. Akım harmonikleri iç harmonikler ve yüksek frekans cevapları 49

4.3.2. IEC 61000-4-7 ‘ye göre alt kategorili harmonik, iç harmonik ve yüksek frekans akım bileşeni ölçümü 49

4.3.3. Gerilim düşümü cevapları 51

4.3.4. Aktif ve reaktif güç 53

4.3.5. Gerilim dalgalanmaları (Flicker) 54

5. RÜZGÂR SANTRALİ MATLAB SİMULASYONU VE PSS-E PROGRAMINDA UYGULAMASI..... 57

5.1. Rüzgâr Santralinin Matlab Simulink Programında Simulasyonu 57

5.1.1. Simulasyondaki parametre giriş sayfaları 58

Sayfa

5.1.2. Simülasyon modelinin pitch açısı 0^0 ve $V_{Rüzgâr}$= 8, 9, 10 m/s' de çalıştırılması 64

5.1.3. Simülasyon modelinin pitch açısı -45^0 ve $V_{Rüzgâr}$= 8, 9, 10 m/s de çalıştırılması 65

5.1.4. Simülasyon modelinin $V_{Rüzgâr}$= 10 m/s'de, pitch açısı 0^0, -30^0 ve -45^0 iken çalıştırılması 68

5.2. Rüzgâr Santrallerinin Türkiye Elektrik Sistemine Etkilerinin PSS-E Programında İncelenmesi 71

5.2.1. PSS/E programı ve ekranları 71

5.2.2. PSS/E programıyla yapılan çalışma 75

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 87

KAYNAKLAR 91

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Kurulu rüzgâr gücü bakımından ilk beş ülke..... 8

Çizelge 2.2. Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli 10

Çizelge 3.1. Rüzgâr türbini güç eğrisi 33

Çizelge 4.1. a) Rüzgâr hızı b) Aktif güç grafikleri. 47

Çizelge 4.2. a) aktif güç üretimi ve reaktif güç grafiği b) reaktif güç ve zaman grafiği 48

Çizelge 4.3. Alt harmonik grupları ve alt iç harmonik'lerin gruplandırılması 50

Çizelge 4.4. Türbinin aktif güce test serileri..... 52

Çizelge 5.1. 0^0 ve -45^0'lik Pitch açılarında farklı rüzgâr hızları için güç, gerilim ve akım değerleri..... 67

Çizelge 5.2. Rüzgâr türbinindeki gerilim değişiminin üç farklı rüzgâr hızı için gerçek sistem ve simülasyon modelinde karşılaştırılması 70

Çizelge 5.3. Rüzgâr santralleri ve kullanılan generatör tipleri 76

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Dünyadaki kurulu rüzgâr güçlerinin değişimi 7

Şekil 3.1. Yatay eksenli rüzgâr türbini (YERT) 16

Şekil 3.2. Düşey eksenli rüzgâr türbini (DERT) 17

Şekil 3.3. Küçük rüzgâr türbinleri temel parçaları 18

Şekil 3.4. Şebekeden bağımsız rüzgâr türbinlerinin şematik gösterimi 19

Şekil 3.5. Bir rüzgâr türbinini oluşturan elemanlar ve konumları 22

Şekil 3.6. Rüzgâr türbini elektrik blok şeması 23

Şekil 3.7. Örnek bir 50 A köprü doğrultucu resmi 23

Şekil 3.8. Doğru akım generatorü blok şeması 24

Şekil 3.9. Senkron generatorü blok şeması 24

Şekil 3.10. Senkron generator çalışma prensibi 25

Şekil 3.11. Sargılı rotorlu asenkron generatorü blok şeması 25

Şekil 3.12. Sincap kafesli asenkron generator blok şeması 26

Şekil 3.13. Temel iki tip kule örneği 28

Şekil 3.14. Örnek dişli kutusu yerleşim çizimi 30

Şekil 3.15. Pitch (kanat) açısı 32

Şekil 4.1. Tipik rüzgâr türbini bağlantıları 45

Şekil 4.2. Ölçüm için kullanılan test düzeneği 52

Şekil 4.3. IEC 61000-4-15'de verilen ölçümler için kullanılan devre şeması 55

Şekil 5.1. Rüzgâr santralinin enerji üretimi Matlab simülasyon modeli 58

Şekil 5.2. Rüzgâr kaynağı parametreleri 59

Şekil 5.3. Pitch açısı parametre sayfası 59

Şekil 5.4. Rüzgâr türbin parametreleri 60

Şekil 5.5. Generator parametre sayfası 61

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.6. Tüketim merkezi (Fabrika) 62

Şekil 5.7. Tüketim merkezi iç yapısı (Fabrika)..... 62

Şekil 5.8. Tüketim merkezi (Seri yük)..... 63

Şekil 5.9. Tüketim merkezi (Paralel yük) 63

Şekil 5.10. Rüzgâr hızları =10 m/s, 9 m/s ve 8 m/s iken rüzgâr türbininin güç değişimleri..... 64

Şekil 5.11. Rüzgâr hızları =10 m/s, 9 m/s ve 8 m/s iken rüzgâr türbininin gerilim değişimleri..... 64

Şekil 5.12. Rüzgâr hızları =10 m/s, 9 m/s ve 8 m/s iken rüzgâr türbininin akım değişimleri..... 65

Şekil 5.13. Rüzgâr hızları =10 m/s, 9 m/s ve 8 m/s iken rüzgâr türbininin güç değişimleri..... 66

Şekil 5.14. Rüzgâr hızları 10 m/s , 9 m/s ve 8 m/s iken rüzgâr türbininin gerilim değişimleri..... 66

Şekil 5.15. Rüzgâr hızları 10 m/s, 9 m/s ve 8 m/s iken rüzgâr türbininin akım değişimleri..... 67

Şekil 5.16. Pitch açısı 0, -30 ve -45 iken rüzgâr türbininin güç değişimleri..... 68

Şekil 5.17. Rüzgâr hızı 3.26 m/s iken simülasyonda ölçülen gerilim değeri..... 69

Şekil 5.18. Rüzgâr hızı 3.26 m/s iken simülasyonda ölçülen gerilim değeri..... 69

Şekil 5.19. Rüzgâr hızı 4.917 m/s iken simülasyonda ölçülen gerilim değeri..... 70

Şekil 5.20. PSS/E programında bara data ekranı 71

Şekil 5.21. Sistemde modellenen üretim tesisleri ekranı 72

Şekil 5.22. Sistemdeki reaktörler ve kapasitörlerin ekranı 73

Şekil 5.23. PSS/E programında iletim hatlarının modellendiği ekran..... 74

Şekil 5.24. Sistemde yer alan trafolarla ilgili veriler. 75

Şekil 5.25. Ezine trafo merkezinin tek hat şema gösterimi..... 77

Şekil 5.26. Ezine TM tüketimi 17 MW iken rüzgâr santrallerinin üretim yapmaması durumu 78

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.27. Ezine TM tüketimi 17 MW iken rüzgâr santrallerinin maksimum (tam kapasitede) çalışma durumu 79

Şekil 5.28. Ezine TM tüketimi 6 MW iken rüzgâr santrallerinin üretim yapmaması durumu 80

Şekil 5.29. Ezine TM tüketimi 6 MW iken rüzgâr santrallerinin maksimum (tam kapasitede) çalışma durumu 80

Şekil 5.30. Ezine TM tüketimi 30 MW iken rüzgâr santrallerinin üretim yapmaması durumu 81

Şekil 5.31. Ezine TM tüketimi 30 MW iken rüzgâr santrallerinin maksimum (tam kapasitede) çalışma durumu 82

Şekil 5.32. Rüzgâr santrallerinin minimum ve maksimum üretim yapmaları durumunda gerilim değişimlerinin karşılaştırılması 83

Şekil 5.33. Ezine TM'nin üç farklı tüketim değeri (6, 17 ve 30 MW) için İntepe santraline farklı yüzdelerde üretim yapılması durumunda bara gerilim değişimi 83

Şekil 5.34. Ezine TM'nin üç farklı tüketim değeri (6, 17 ve 30 MW) için Çamseki santraline farklı yüzdelerde üretim yapılması durumunda bara gerilim değişimi 84

Şekil 5.35. Ezine TM'nin üç farklı tüketim değeri (6, 17 ve 30 MW) için Sares santraline farklı yüzdelerde üretim yapılması durumunda bara gerilim değişimi 84

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Örnek kurulu bir rüzgâr türbini evirici sistemi 27

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita **Sayfa**

Harita 2.1. Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli atlas (REPA) 11

Harita 2.2. Türkiye geneli 50 metre yükseklikteki ortalama yıllık rüzgâr hızları dağılımı 11

Harita 2.3. Türkiye geneli 50 metre yükseklikteki ortalama güç yoğunluğu dağılımı 12

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
m	Metre
s	Saniye
V	Volt
A	Amper
Hz	Hertz
kWh	Kilovat saat
Kg	Kilogram
W	Vat
TM	Trafo merkezi

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AB	Avrupa Birliği
AREB-TŞ EİAŞ	Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği Türkiye Şubesi
ASSG	Sekron Generatör
a.a.	Alternatif Akım
ÇBAG	Sargılı Rotorlu Asekron Rotor
DMİ	Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
DMSG	Doğru Akım Generatörü
d.a.	Doğru Akım
ENTSO-E	Avrupa Elektrik İletimi Koordinasyonu Birliği
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
SKAG	Sincap Kafesli Asekron Generatör
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
THC	Toplam Harmonik Bozulma
WECS	Çağdaş Rüzgâr Enerjisi Çevrim Sistemleri
YEGM	Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerjilerin tümü (gel-git ve jeotermal enerji hariç) ile fosil yakıtların kaynağı güneştir. Yeryüzü, güneşten 1,74 x 10^{17} kWh gücünde enerji alır. Güneşten gelen enerjinin %1–2'si rüzgâr enerjisine dönüşür [1]. Güneş enerjisinin karaları, denizleri ve atmosferi homojen ısıtmaması nedeniyle oluşan sıcaklık ve basınç farkları, rüzgârları oluşturmaktadır. Rüzgâr yüksek basınç alanından, alçak basınç alanına yer değiştiren havanın, dünya yüzeyine göre bağıl olarak yaptığı hareketlerdir. Yeryüzünde oluşan hava kütlesi hareketleri, yerin dönmesinden kaynaklanan "Coriolis" büküm kuvvetinden ve yeryüzü ile akışkan hava kütlesi arasındaki sürtünme kuvvetinden etkilenir. Ayrıca rüzgârlar bir merkez çevresinde dolandıklarından, merkezkaç kuvveti etkisinde kaldıkları gibi, yeryüzü ile hava arasındaki sürtünme kuvvetinden de etkilenirler. Kutuplar ve ekvator arasındaki hava akımlarına bağlı belli rüzgârlar varsa da enerji üretimi açısından denizler, karalar, dağlar ya da vadiler arasındaki hava akımlarına dayanan yerel rüzgârlar daha önemlidir.

Enerjinin yeterli, zamanında, kaliteli, ekonomik, güvenilir ve temiz olarak sunumu günümüzde ülkelerin gelişmişlik düzeylerini belirleyen en önemli göstergelerden biridir. Artan dünya nüfusu, modern hayatın getirdiği yenilikler ve teknolojinin gelişimi enerjiye olan bağımlılığı ve ihtiyacı son yıllarda daha belirgin bir biçimde artırmış ve enerji, en önemli sorunlardan biri haline gelmiştir [1].

Gelişmişliğin göstergesi olarak elektrik enerjisi kurulu gücü ve buna bağlı olarak kişi başına düşen tüketim miktarlarının değerlendirildiği günümüzde, fosil enerji kaynaklarının bilinçsizce kullanılarak insanlığın hizmetine sunulması, hem sınırlı ve yenilenemeyen doğal kaynakların kısa zamanda tükenmesine hem de bilinçsiz tüketim yoluyla çevrenin kirlenmesine neden olmaktadır. Bu sorunlar mevcut enerji kaynaklarının iyi kullanılması ve yeni enerji kaynaklarının bulunması ile aşılmaya çalışılmaktadır [2].

Yenilenebilir, temiz, ucuz bir enerji olan rüzgâr enerjisi de bu yeni enerji kaynaklarına bir örnektir. Rüzgâr enerjisi çağdaş ülkelerin gündemine 1980'li yılarda girmiş ve hızla önemini arttırmıştır [3].

Avrupa Birliği (AB) ülkeleri Kyoto protokolü çerçevesinde CO_2 emisyon oranını 2020 yılına kadar mevcut duruma göre % 20 düşürmeyi hedeflemektedir. Herhangi bir önlem alınmadığı takdirde 2020 yılında CO_2 emisyon oranının mevcut duruma göre % 50 daha fazla olacağı bildirilmektedir. Bu nedenle AB ülkelerinde yenilenebilir enerji kaynaklarından üretim yapılması teşvik edilmektedir [4].

AB standartlarına göre yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi teşvik edilmekle birlikte, kaynak seçimi konusunda herhangi bir hedef gösterilmemektedir. Her ülke bağımsız olarak, ulusal çıkarları ve programları doğrultusunda, en ekonomik ve en güvenilir yenilenebilir enerji kaynağını öncelikle değerlendirebilir. Hâlihazırda, ülkemizde ekonomik olarak enerji üretiminde değerlendirilebilecek hidrolik kaynakların 2013 yılı sonu itibariyle %35'i kullanılmış ve % 8'i inşa halinde olup, % 57'si de değerlendirilmeyi beklemektedir.

AB ülkelerinde hidrolik potansiyelin hemen tamamına yakını elektrik üretiminde değerlendirilmiştir. Mevcut durumda İspanya'daki bir proje dışında AB ülkelerinde büyük hidrolik santral potansiyeli kalmamıştır. AB ülkelerinde yenilenebilir enerji kaynakların kullanımı konusunda büyük hidrolik santrallerin gündemde olmamasının nedeni budur. AB ülkelerindeki hidrolik kaynakların tamamına yakını değerlendirildiğinden, hidrolik dışındaki yenilenebilir yeni enerji kaynakların ekonomik olarak kullanımı konusundaki çalışmalar ön plana çıkmaktadır [4].

Almanya ve Danimarka'da, diğer yenilenebilir kaynakların kıtlığı ve tamamına yakınının değerlendirilmiş olması, ayrıca bu ülkelerin rüzgâr santralleri üretimi ve geliştirilmesi teknolojisinin önde gelen temsilcilerinden olmaları nedeniyle, ulusal çıkarlarına uygun olarak rüzgâr santrallerinden elektrik üretimi teşvik edilmektedir.

Türkiye'de enerjinin; maliyeti, yeterli ölçüde sağlanması ve çevreye etkileri halen tartışılmaktadır. Bu durum, incelenmesi gereken sorunlar olduğunu açıkça göstermektedir. Bir sorunun aşılması için problemin doğru olarak tanımlanması ve uygulanabilir çözümler bulunması gerekmektedir. Bunun için, doğru ve taze bilgiye ulaşılması, en gelişmiş karar destek araçlarının kullanılması ve toplumdaki bu konuda deneyimli kişilerle görüş alış-verişi içinde olunması gerekmektedir.

Türkiye'deki enerji profili gözden geçirildiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarının yeri ve önemi açıkça görülmektedir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı oldukça düşük düzeylerdedir (%1 ve altında) ve bu enerji türleri ile yeterince ilgilenilmemektedir. Özellikle, güneş ve rüzgâr enerjisinin kullanımı, Türkiye 'nin enerji bütçesine ciddi katkılar sağlayacaktır [5]. Enerji açığının kapatılması amacıyla yenilenebilir doğal enerji kaynaklarından yararlanılması bir yöntem olarak düşünülebilir [6].

Rüzgâr santral başvuruları otoprodüktör statüsünde artarak devam etmektedir. Rüzgâr enerjisi santralleri, yapıları gereği sisteme bağlandıkları noktada elektrik enerjisinin kalitesi üzerinde ani gerilim değişimi, fIiker, harmonik gibi bazı bozucu etkiler yapmaktadır. Bu etkilerin aynı noktadaki diğer müşteriler için izin verilen limitler içinde kalmasını sağlamak üzere bağlanabilecek kapasite ile ilgili bazı kısıtlar getirilmektedir. Bu kısıtlar konusunda bugüne kadar belli bir standart belirlenmemiş olup, her ülkede değişik uygulamalar yapılmaktadır. Ülkemizde ise bağlantı noktasında sistemin kısa devre gücüne bakılarak santrallerin kurulması için direkt ya da dağıtım sistemi üzerinden bağlı olduğu indirici merkez kısa devre gücünün %5'i kadar rüzgâr santrali bağlanabileceğinin belirtildiği Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) kararına uyması gerekmektedir. Bu sebeple erken yapılacak bir başvuruda firma diğer firmaların önüne geçecektir.

Bağlantı noktasında santralin yarattığı ani gerilim değişimi, fliker ve harmonikler gibi bozucu etkiler hesaplanarak belirtilen sınırlar içinde kalıp kalmadığı araştırılmakta ve buna göre karar verilmektedir. Bunun için TEİAŞ'a başvuru aşamasında tesis edilecek santral ve teknik karakteristiği (Doğalgaz, kömür, hidroelektrik santrali ve türbinlerinin özellikleri) ile ilgili olarak detay bilgilere ihtiyaç duyulmakta, bu bilgilerin temininde güçlük yaşanmakta ve montajı yapılan tesis ile farklılık yaşanabilmektedir. Ayrıca bu metotla belli teknolojileri dolayısıyla türbin jeneratör üreticilerini sınıflandırma riski bulunmaktadır. Bu nedenle bugüne kadar uygulana gelmiş yöntemle rüzgâr santrallerinin sisteme bağlantısının incelenmesi uygun görülmektedir.

Bu çalışmada rüzgâr enerjisi hakkında genel bilgiler ortaya konularak, Türkiye'nin rüzgâr santrallerinin Enterkonnekte Sistemlere Entegrasyonu araştırılmış olup, bağlantı aşamasında karşılaşılan problemler ve çözüm önerileri ile rüzgâr türbinlerinin şebekeye katkıları ve faydaları incelenmiştir. Bu amaçla, rüzgâr enerjisi ile ilgili araştırma yapan kamu kuruluşları ve özel sektör kuruluşlarından, uzman kişilerden; rüzgâr enerjisi, rüzgâr

türbinleri hakkında genel bilgiler alınarak, rüzgâr santrallerinin elektrik sistemlerine etkileri simülasyon programında modellenmiştir.

2. RÜZGÂR ENERJİSİ

2.1. Rüzgârın Tanımı

Rüzgâr, yeryüzünün eşit olmayan şekilde ısınması ve soğuması sonucu ortaya çıkan kuvvetlerin etkisi ile oluşan hava hareketleridir. Hava hareketlerinin temel sürücüsü, atmosfer basıncının bölgeler arasında farklı değerlerde bulunmasıdır. Rüzgâr, alçak basınçla yüksek basınç bölgesi arasında yer değiştiren hava akımıdır ve daima yüksek basınç alanından alçak basınç alanına doğru hareket eder. İki bölge arasındaki basınç farkı ne kadar büyük olursa, hava akım hızı o kadar fazla olur. Rüzgâr sahip olduğu hıza göre esinti, fırtına gibi isimler alır. Rüzgâr enerjisi ise, rüzgârı oluşturan hava akımının sahip olduğu hareket enerjisidir. Havanın dünya yüzeyi üzerinde hareket edebilmesini sağlayarak rüzgârı meydana getiren ve rüzgârın hızına etki eden atmosfer içindeki belli başlı kuvvetler ise; basınç gradyan kuvveti, coriolis kuvveti, merkezkaç kuvveti, sürtünme kuvvetidir. Basınç gradyan kuvveti, havayı yüksek basınçtan alçak basınca doğru akıtmaya çalışacak şekilde etki eden kuvvettir. Coriolis kuvveti ise, yer dönmesinin saptırıcı kuvveti olarak bilinmektedir.

Rüzgâr gücü, enerjisi ve teknolojisi günümüz dünyasında bütün ülkeler ve çevreler tarafından kabul görmüş, faydası tartışılmaz, temiz ve yenilenebilir enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bilindiği üzere teknolojinin, sanayinin gelişmesi ve nüfusun artmasıyla birlikte dünyamız yoğun bir enerji talebiyle karşı karşıya kalmıştır. Bu talebin karşılanması büyük oranda fosil kaynaklardan sağlanmaktadır. Fakat fosil yakıtların tükenme tehlikesi ve aynı zamanda çevreye verdiği zararları göz önünde bulundurursak alternatif enerji kaynaklarına yönelmemiz kaçınılmazdır. İşte bu kaynakların en önemlilerinden biri de rüzgârdır. Eski çağlardan bu yana insanlar rüzgârın gücünden çeşitli şekillerde faydalanmışlardır. 20.yüzyılın başlarında ilk rüzgâr türbinleri kurulmaya başlanmış ve bununla birlikte rüzgâr gücünden elektrik üretimi giderek artmıştır. Bugün dünyadaki hemen hemen her ülke rüzgâr enerjisinden çeşitli şekillerde faydalanmaktadır. Özellikle günümüzde gelişmiş ülkelerde rüzgâr türbinlerinden megavatlar düzeyinde elektrik üretilmektedir.

2.2. Rüzgârdaki Enerji

Güneş kaynaklı olan rüzgâr enerjisi, doğal enerji dönüşümü sonucunda kendisini atmosferde hava hareketi ve denizlerde dalga hareketi olarak hissettirmektedir. Bu kinetik enerji, rüzgâr enerjisi tesislerinde elektrik enerjisine, su pompalama tesislerinde mekanik enerjiye dönüştürülebilmektedir [7].

Rüzgâr Enerjisi insanoğlunun tarihin ilk çağlarından beri farkında olduğu ve yararlanmaya çalıştığı bir enerji türüdür. İnsanoğlu doğrudan kullanılabilen bu büyük güçten en iyi biçimde yararlanmaya çalışarak açık denizlere açılabilmek için yelkenli gemiler yapmış, tabii vantilasyon yöntemleriyle yaşadığı mekânları iklimlendirmiş, hatta daha ileriki dönemlerde rüzgâr gücünü mekanik güce dönüştürmeyi başararak tahıl öğütmek için yel değirmenleri inşa etmiş, kuyu veya diğer su kaynaklarından su çekmek için rüzgâr pompaları imal etmiştir.Günümüzde rüzgâr veya yel değirmenlerine benzer yapılar rüzgâr gücünü elektrik enerjisine dönüştüren rüzgâr türbinleri olarak karşımıza çıkmaktadırlar [8].

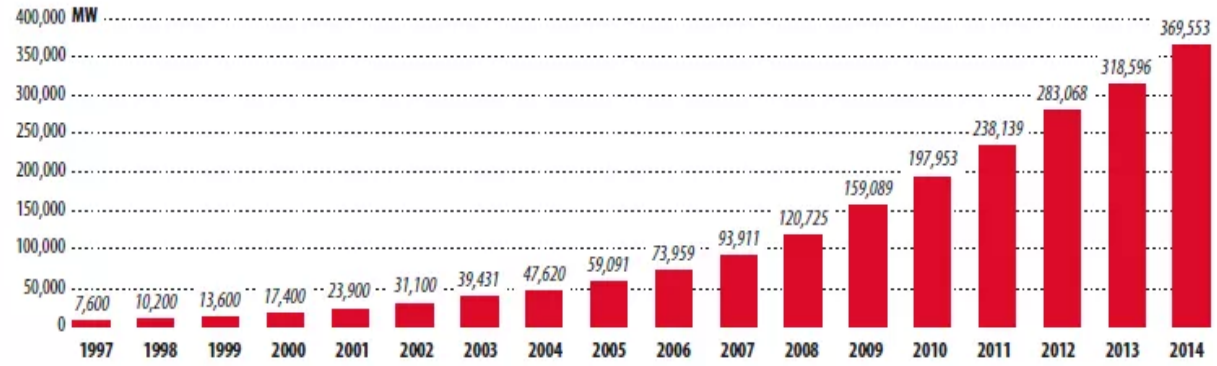
2.3. Rüzgâr Enerjisinin Kısa Tarihçesi

Rüzgâr türbinleri tarihçesiyle ilgili değişik dokümanlara rastlanmakla birlikte, en eski rüzgâr kuvvet makinesi olan yel değirmeninin, bundan 3000 yıl önce İskenderiye yakınlarında yapıldığı tahmin edilmektedir. Türkler tarafından ilk defa M.S. 640 yılına doğru imal edilen yel değirmeni tipleri, haçlı seferleri sırasında Avrupa'ya geçmiştir. Yel değirmenleri, 1105 tarihinde Fransa'da görülmeye başlanmış ve 1143'de İngiltere'de ilk yel değirmeni yapılmıştır. XIX. yüzyıl sonlarına doğru Almanya'da rüzgâr ile çalışan kuvvet makinaları görülmeye başlandı. Hollanda'da ise çatısı dönen yel değirmenleri XVIII. yüzyıl başlarında kullanılmıştır Yazılı belgeli ilk yel değirmeni, M.S. 644 yılına ait İran-Afganistan sınırındaki Seistan'dadır. Yel değirmenleri, Çin'de M.S. 750-850 yıllarında pirinç tarlalarının sulanmasında kullanılmıştır. İlk olarak Doğuda kullanılan düşey eksenli yel değirmenleri, Batılılar tarafından geliştirilmiş ve yatay eksenli hale getirilmiştir. Yatay eksenli ilk yel değirmeni örneği, 1180 yılında Normandiya Krallığı zamanına aittir. Yatay eksenli ve mekanik enerji amaçlı yel değirmenlerinin gelişimi; ayaklı yel değirmeni (Almanya), kule tipi yel değirmeni (Akdeniz Ülkeleri, Alaçatı), döner çatılı Hollanda tipi yel değirmeni (Hollanda) ve 1850 yılında Daniel Halladay tarafından rüzgâr yönü yönlendiricisi takılan çok kanatlı Amerikan tipi yel değirmeni olarak

sıralanabilir. 1882 yılında New York' da elektrik santrali kurulmuş ve daha sonra da elektrik enerjisi kullanımı yaygınlaşmıştır. İlk rüzgâr elektriği de, Danimarkalı Profesör Paul La Cour tarafından 1891 yılında üretilmiştir. Doğru akım elde eden Paul La Cour, elektroliz yoluyla hidrojen gazı elde etmiş ve bu şekilde rüzgâr enerjisini depolamıştır. 1918 yılı sonrasında büyük şehirler elektriğe kavuşmuş ve dizel yakıtların ucuzluğu nedeniyle rüzgâr enerjisini değerlendirme çabaları, bir kenara bırakılmıştır. Rüzgâr enerjisinin bu bir kenara itilmişliği, enerji sıkıntısı nedeniyle 2. Dünya Savaşı'na kadar sürmüştür. Rüzgâr enerjisi kullanımının tarihsel gelişimine; 1942 yılında üretilen 17,5 m pervane çaplı ve 50 kW nominal güçlü Smidth rüzgâr türbini ve 1957 yılında üretilen 24 m pervane çaplı ve 200 kW nominal güçlü Gedser rüzgâr türbini örnek verilebilir.

2.4. Dünyada Rüzgâr Enerjisi

2004 yılında 47616,4 MW, 2013 sonu itibari ile dünyadaki toplam kurulu rüzgâr gücü 318 GW' tır. Dünyadaki kurulu rüzgâr güçlerinin 1997 yılından günümüze kadar olan değişimi Şekil 2.1'de verilmektedir. Çizelgeden de görüldüğü gibi rüzgâr enerjisindeki kurulu güçler artan eğilimini sürdürmektedir. Bu dönemler içerisinde rüzgâr enerjisi kurulu güçlerindeki ortalama artış oranı %29 gibi oldukça yüksek bir değerde gerçekleştirilmiştir. 2004 yılı itibari ile en yüksek kurulu rüzgâr gücüne sahip olan ilk 5 ülkenin, MW cinsinden toplam kurulu rüzgâr güçleri, km^2 başına düşen toplam kurulu rüzgâr güçleri kW cinsinden ve kişi başına kurulu rüzgâr güçleri watt cinsinden Çizelge 2.1' de verilmektedir.



Şekil 2.1. Dünyadaki kurulu rüzgâr güçlerinin değişimi

Çizelge 2.1. Kurulu rüzgâr gücü bakımından ilk beş ülke

Ülke	Toplam kurulu rüzgâr gücü (MW)	kW/km3	W/kişi
Almanya	16628,8	46,5	199,7
İspanya	8263	16,4	206,2
ABD	6740	0,7	24
Danimarka	3117	72,3	580,6
Hindistan	2985	0,91	2,85

Çizelge 2.1'den de görüldüğü gibi en yüksek kurulu rüzgâr gücüne sahip ülke Almanya'dır. Buna karşılık hem km^2 başına hem de kişi başına en yüksek değerlere sahip ülke ise Danimarka'dır. 2014 verilerine göre en yüksek kurulu rüzgâr gücüne sahip ilk 5 ülke ve kurulu güçleri;

1. Çin : 91 424 MW
2. ABD : 61 091 MW
3. Almanya : 34 250 MW
4. İspanya : 22 960 MW
5. Hindistan : 20 150 MW

olarak sıralanmıştır. 2013 yılı verilerine göre Almanya elektrik enerjisi ihtiyacının %12'sını, İspanya %13'ünü, Danimarka %20'sini, ABD ise %4'den daha az bir oranını rüzgârdan sağlamaktadır. Kurulu rüzgâr güçlerinin dünyadaki durumu kıtalara göre incelendiğinde Avrupa'daki Kurulu güç oranının %73 ile en fazla olduğu görülmektedir. Avrupa kıtasını %15 ile Amerika, %10 ile Asya ve %1'er oranlar ile Avustralya ve Afrika kıtaları izlemektedir.

2.5. Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr potansiyeli bakımından zengin olan bölgelerimiz Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz kıyılarıdır. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan "Türkiye Rüzgâr Atlası" na göre yerleşim alanları dışında 50 m yükseklikteki rüzgâr hızları, Marmara, Batı Karadeniz, Doğu Akdeniz kıyılarında 6,0–7,0 m/sn, iç kesimlerde ise 5,5–6,5 m/sn civarında, Batı Akdeniz kıyılarında 5,0–6,0 m/sn iç kesimlerde 4,5 – 5,5 m/sn, Kuzey –Batı

Egede ise kıyılarda 7,0-8,5 m/sn, iç kesimlerinde ise 6,5-7,0 m/sn dir. Diğer taraftan ABD' nin uzay çalışmaları ile saptadığı meteorolojik veriler, Türkiye' nin rüzgâr enerjisi bakımından zengin olduğunu göstermektedir. Türkiye'nin bulunduğu coğrafi yöreye bağlı olarak komşu ülkelerde ve bölge ülkelerinde yapılmış ölçüm verileri de bu bulguyu desteklemektedir [9]. Türkiye'nin bugünkü teknik koşullarda rüzgâr enerjisi teknik potansiyeli 88 000 MW, ekonomik potansiyelinin ise 10 000 MW civarında olduğu tahmin edilmektedir [10]. Wijk, A.J.M. van, ve Coelingh J.P.' nin 1983 yılında yapmış oldukları çalışmaya göre ise, Türkiye' nin teknik potansiyeli 83 GW, üretim potansiyeli ise 166 TWh/yıl'dır [11]. Buna karşılık Türkiye'nin toplam kurulu rüzgâr gücü 2959 MW' tır. 2014 yılında rüzgârdan üretilen elektrik enerjisi 8520,1 GWh'tir ve bu değer üretilen toplam elektrik enerjisinin %3,4' üne karşılık gelmektedir. 2005 Ocak ayı itibari ile elektrik üretimi için Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından lisans alan 243 projenin 36'sı rüzgâr santrali projesidir. Yapılması planlanan bu 36 projenin güçleri 0,66 MW ile 135 MW arasında değişmekte ve toplam kapasiteleri de 1406,92 MW' tır. Bu rüzgâr santrali projelerinin 15'i toplam 596,46 MW ile Marmara bölgesinde, 11' i 373,01 MW ile Ege bölgesinde, 9'u ise 394,45 MW ile Akdeniz bölgesinde ve 1' i 43 MW ile Güney Doğu Anadolu bölgesindedir. Bu santralların devreye girmesi ile yılda 4914,9 GWh'lik elektrik üretiminin, 214 başka bir deyişle yaklaşık Türkiye'nin bugünkü toplam elektrik enerjisinin %3,3'ünün sağlanabileceği tahmin edilmektedir. Bu santralların yansıra rüzgâr santrali kurumu için lisans alabilmek için toplam 106 başvuru vardır ve bunların toplam gücü 3309,63 MW'dır.

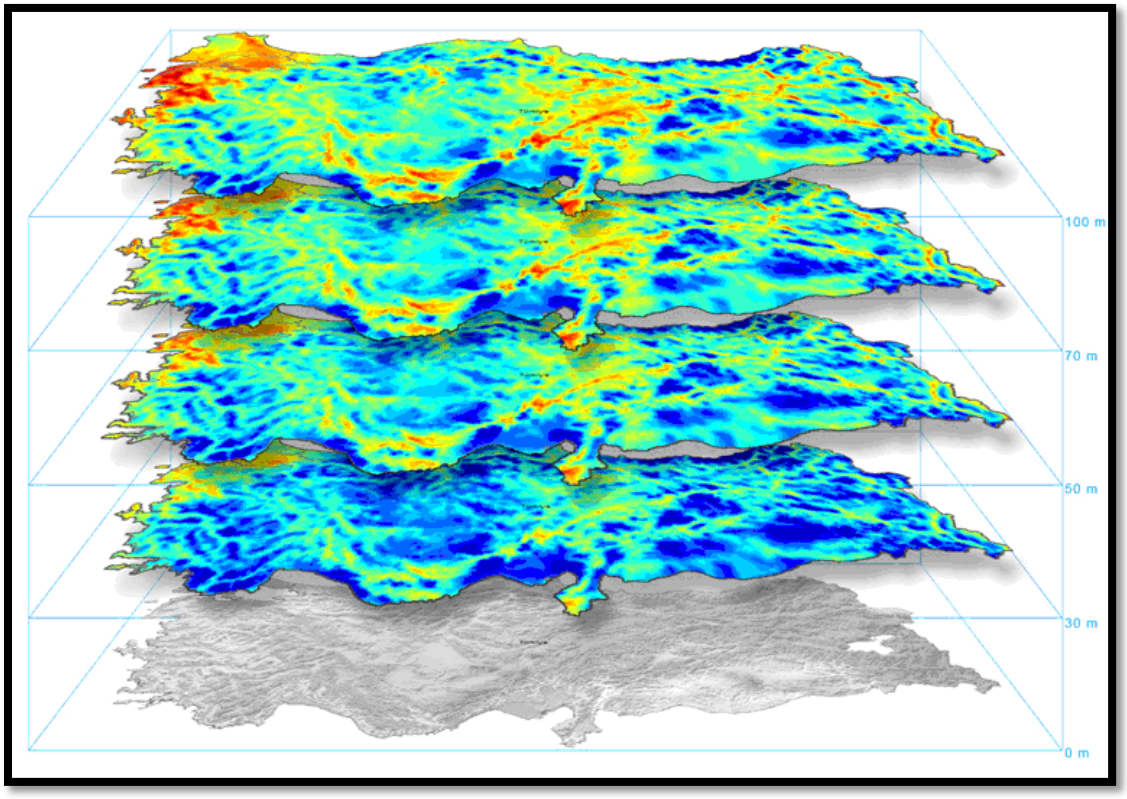
2.6. Rüzgâr Potansiyeli ve Belirlenmesi

Rüzgâr enerjisi kaynağı güneştir. Güneş enerjisinin karaları denizleri ve atmosferdeki her yeri özdeş ısıtamamasından dolayı oluşan sıcaklık ve buna bağlı basınç farkları rüzgârı oluşturmaktadır. Rüzgâr yüksek basınç bölgesinden alçak basınç bölgesine yer değiştiren havanın dünya yüzeyine göre bağıl hareketidir. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin çok küçük bir kısmı (yaklaşık %2'si) rüzgâr enerjisine çevrilebilmektedir. Rüzgâr enerjisi potansiyeli; doğada mevcut haliyle doğal potansiyel, doğal potansiyelin teknoloji aracılığı ile kullanılabilir enerjiye dönüştürülmüş şekline teknik potansiyel ve diğer enerji kaynaklarıyla karşılaştırılması sonucu ekonomik olarak nitelenen miktarına da ekonomik potansiyel olarak adlandırılır. Bugün dünyadaki mevcut toplam teknik olarak enerji elde edilebilecek rüzgâr kaynağı 53 000 TWh/yıldır. Bu enerji 1998 yılında dünyadaki toplam

elektrik tüketiminin dört katıdır. 2020 yılına kadar dünya elektrik tüketiminin %10 onu rüzgâr gücüyle sağlansa bile rüzgâr potansiyelinin çoğu hala kullanılmamış olacaktır. 2020 yılında 1245 GW dünya rüzgâr gücü hedefine ulaşmak için gereken yatırım miktarı 692 milyar $ dır. Rüzgâr enerjisi üretim maliyetinin azalması ve verimliliğin artması günümüzde bu enerjiye olan yatırımı artırmaktadır. Kısa bir süre içinde üretim maliyetlerinin 5-8 ECU/kWh'dan 3-4 ECU/kWh'a düşmesi beklenmektedir. Yine bu süre içinde dünya çapında rüzgâr endüstrisinde imalat, kurulum ve diğer iş kollarında, milyonlarca kişilere iş imkânı sağlanacaktır. Rüzgâr enerjisi enerji ihtiyacımızı karşılamada ve iklim değişikliğini önlemede çok büyük rol oynamaktadır. Halen dünyada en hızlı büyüyen enerji sektörlerinden biridir. Gelişmiş ülkeler sera gazı emisyonlarından korunmak için rüzgâr enerjisinden faydalanmayı teşvik etmektedir. Günümüzün küresel enerji politikaları, sadece iklim değişikliği ile değil, aynı zamanda enerji talep artışları ve enerji arz güvenliği konuları ile de ilgilidir. Türkiye karasal rüzgâr açısından zengin sayılabilecek bir konumdadır. Yapılan çalışmalar neticesinde ulaşılan sonuçlar, Türkiye'nin teknik rüzgâr enerjisi potansiyeli ve kurulu rüzgâr gücünün aşağıdaki Çizelge 2.2'de göstermektedir. Harita 2.1'de Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli Atlası, Harita 2.2'de Türkiye geneli 50 metre yükseklikteki ortalama yıllık rüzgâr hızları dağılımı, Harita 2.3'te Türkiye geneli 50 metre yükseklikteki ortalama güç yoğunluğu dağılımı gösterilmektedir.

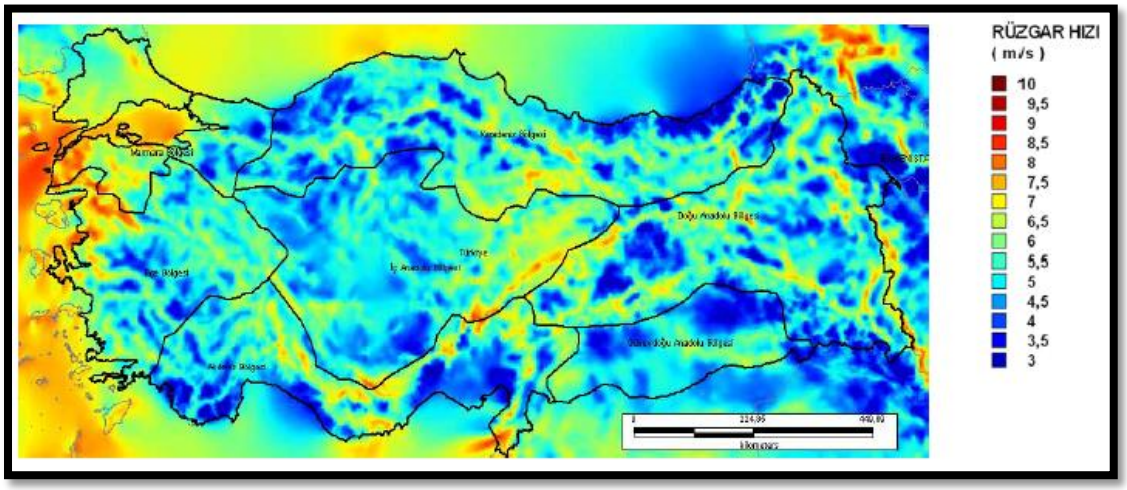
Çizelge 2.2. Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli

Teknik potansiyel *(MW)*	Teknik potansiyel *(TWh/yıl)*	Rüzgâr kurulu gücü *(MW)*	Rüzgâr kurulu güç verimi
83 000	166	279	%33-35

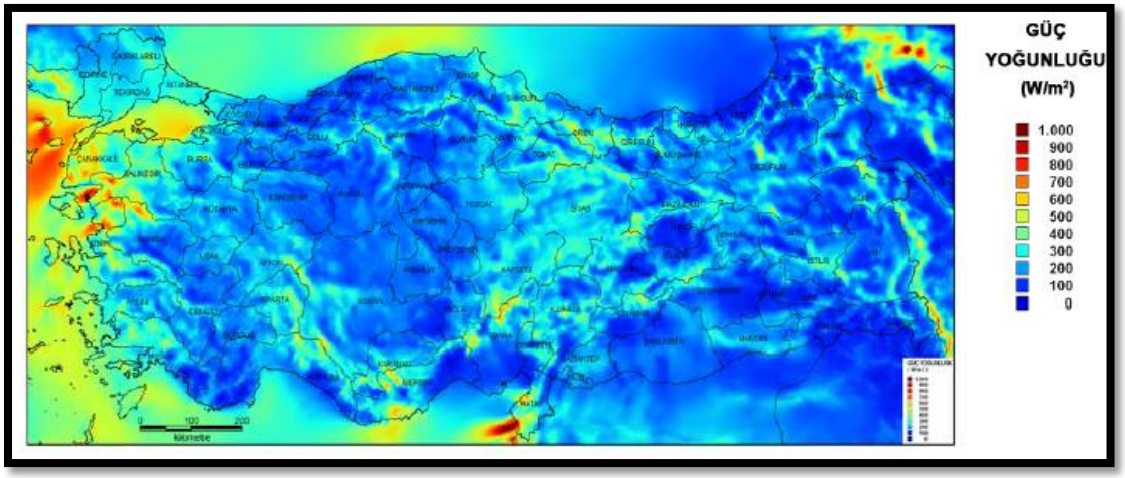


Harita 2.1. Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli atlas (REPA) [12]

REPA ile denizlerde, kıyılarda ve yüksek rakımlı bölgelerde daha önce ölçülemeyen yüksek yoğunluklu potansiyeller görünür hale gelmiştir.



Harita 2.2. Türkiye geneli 50 metre yükseklikteki ortalama yıllık rüzgâr hızları dağılımı [12]



Harita 2.3. Türkiye geneli 50 metre yükseklikteki ortalama güç yoğunluğu dağılımı [12]

YEGM'nin ölçüm istasyonlarından elde edilen ortalama rüzgâr hızı verileri, bu bölgelerin bir çoğunun rüzgâr enerjisi uygulamaları için elverişli olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar bazı firmaları rüzgâr tarlaları kurmak için cesaretlendirmiş ve kendi rüzgâr ölçümlerini yapmasına neden olmuştur. Firmaların sunduğu ön fizibilite ve fizibilite raporları YEGM tarafından, gerek yasal mevzuatlar açısından gerekse de WASP ve WindPro yazılımları kullanılarak santral sahasından üretilebilecek enerji miktarının tespiti ve optimum tarla tasarımının değerlendirilmesi açısından incelenmektedir. Ayrıca 5584 sayılı Enerji verimliliği Kanunu'nun 15 inci maddesine göre "yalnızca kendi ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı, kurulu gücü azami 200 KW'lık üretim tesisi kuran gerçek ve tüzel kişiler lisans alma ve şirket kurma yükümlülüğünden muaftır." Her isteyen tüketicinin yasada belirlenen kurulu güç sınırları içerisinde rüzgâr üretim tesisi kurabileceği öngörülmektedir. Ancak yasanın yürürlüğe giriş tarihinden bir yıldan fazla süre geçmesine rağmen ilgili düzenlemeler henüz yapılamamıştır [13].

2.7. Rüzgâr Türleri

2.7.1. Küresel rüzgârlar

Rüzgâr, dünyanın ekvator bölgesinden yükselerek hem kuzeye hem güneye doğru atmosferin yüksek tabakaları içerisinde hareket eder. Havanın her iki yarımküredeki 30° enlemleri civarında daha yükseklere çıkması Coriolis kuvveti tarafından önlenir. Bu

enlemlerdeki yüksek basınçtan dolayı hava tekrar alçalmaya başlar. Rüzgâr, ekvatordan yükselirken kuzey ve güneyden gelen yer seviyesi çekimindeki rüzgârlara kadar düşük basınçlı bir alan oluşacaktır. Kutuplarda ise havanın soğumasından dolayı yüksek basınç meydana gelecektir. Bu basınç farkından dolayı da küresel rüzgârlar oluşacaktır.

2.7.2. Geostrofik rüzgârlar

Geostrofik rüzgârlar, sıcaklık farklılıkları dolayısıyla oluşan basınç farklılıklarından meydana gelir. Yer seviyesinin yaklaşık 1000 metre üzerinde görünen Geostrofik rüzgârlar, yer yüzeyinin yapısından fazla etkilenmezler ve hızları hava balonları kullanılarak ölçülebilir.

2.7.3. Yerel rüzgârlar

Küresel rüzgârlar belirli alanlardaki hâkim rüzgâr yönünü tespit etmekte önemli olmasına rağmen, yerel iklim koşulları rüzgâr yönündeki değişimde önemli rol oynarlar. Önemli yerel rüzgârlar; deniz ve kara meltemi, dağ ve vadi meltemi ile musondur. Deniz meltemi gün boyunca kara ile deniz arasındaki ısı farklığından oluşur. Gündüzleri kara üzerindeki hava kütlesi, deniz üzerindeki hava kütlesine göre daha çok ısınır. Hava kütlesi yukarıya doğru hareket etmeye başlar. Böylece kara üzerinde alçak basınç oluşur. Bu alana denizdeki hava kütlesi hareket ederek deniz meltemini oluşturur. Bu rüzgâr karada 50–150 km kadar içerilere sokulur. Akşam, kara ve deniz sıcaklıklarının eşitlenmesi süreci olduğundan hava sakindir. Gece ise kara denizden daha soğuk olduğu için deniz meltemindeki olayın tersine hareket başlar. Buna kara meltemi denir. Bu rüzgârlar deniz meltemine göre daha az şiddetlidir. Çünkü geceleyin kara ve deniz sıcaklıkları birbirine daha yakındır. Kara meltemi soğuyan karadan denize doğru eser. Dağda da benzer bir mekanizma, vadi meltemi ile dağ melteminin dönüşümlü olarak esmesine yol açar. Vadi meltemi, gün boyunca vadiden tepelere doğru eser. Dağ meltemi ise gece boyunca tepelerden ovaya doğru eser. Muson rüzgârları, tropikal enlemlerde, özellikle Güney Asya'da görülür. Yazın denizden karaya (yaz musonu), kışın karadan denize doğru esen mevsimlik rüzgârlardır [14].

2.8. Rüzgâr Enerjisini Etkileyen Faktörler

2.8.1. Yüzey pürüzlülüğü

Rüzgâr, yer seviyesinin yaklaşık 1 km üzerindeki yüksekliklerde yeryüzünün yüzey şekillerinden veya engebeliğinden hemen hemen hiç etkilenmez. Ancak 1 km' nin altındaki yüksekliklerde yer yüzeyinden dolayı sürtünmeler, rüzgâr hızını azaltmakta ve yönünü değiştirmektedir. Yeryüzü ne kadar çok pürüzlü veya engebeli ise rüzgâr hızı da o kadar az olacaktır. Rüzgâr hızı ölçümleri Dünya Meteoroloji Teşkilatı'nın belirlemiş olduğu l0 m yükseklikte yapılmaktadır.

2.8.2. Rüzgâr engelleri

Binalar, ormanlar, kayalar gibi rüzgârın hızını azaltan engellerin çevresinde türbülanslar meydana gelir. Türbülansın oluştuğu alan, engelin yüksekliğinin üç katına kadar çıkabilir. Türbülans, engelin arka tarafında daha belirgin haldedir. Bu nedenle türbinin kurulacağı alanda bu tür engellerden kaçınılmalıdır. Engellerin rüzgâr hızına olan etkisi engelin porozitesine bağlıdır. Porozite, rüzgârın çarptığı nesnenin açık alanlarının yüzdesidir. Binaların porozitesi %0, sık ağaçların porozitesi %30, ağaçların porozitesi %50 ve yaprakları seyrek olan ağaçların porozitesi %70'dir.

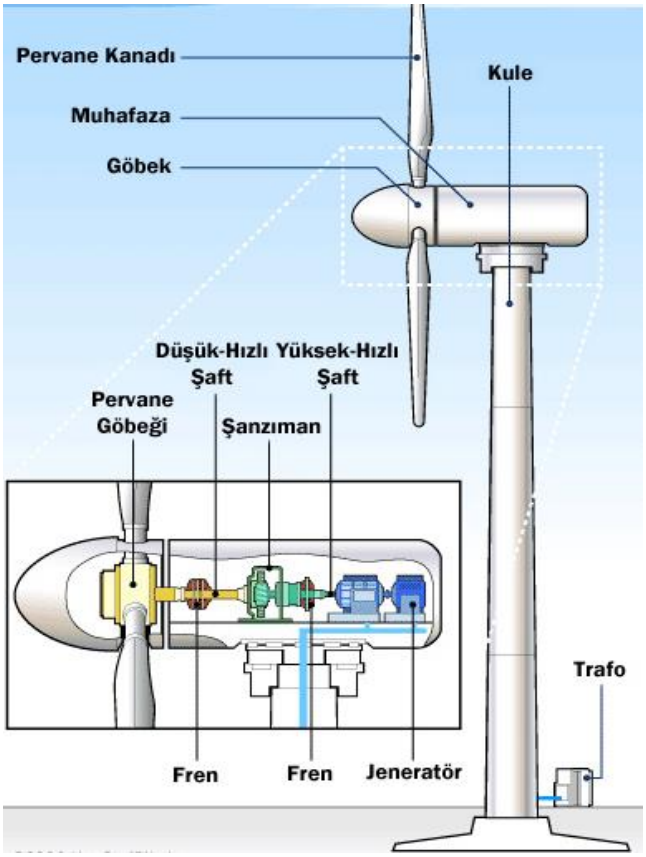
3. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ

3.1. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

3.1.1. Yapılarına göre rüzgâr türbinleri

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT)

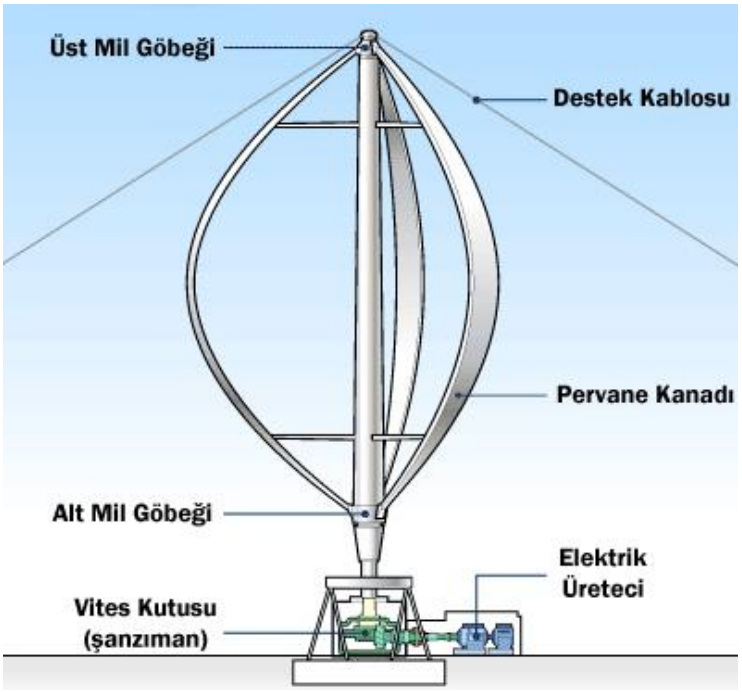
Yer konumuna göre rotoru yatay eksende çalışan bu makineler klasik ve daha modern bir kullanımı sunarlar. Yatay eksenli makinelerin maksimum enerji tutabilmeleri için rotorları daima rüzgâr akış yönünde olmalıdır. Bu da rotorun kule üstünde dönmesi ile sağlanır. Rüzgârın yönüne dönme hareketi iki değişik yapı ile sağlanır. Bunlar "öne-rüzgâr" ve "arkaya rüzgâr" olarak adlandırılırlar. Eğer kanat rüzgârı ön yüzünden alıyorsa rotorun arkasına bir kılavuz kanat takılır. Diğer şekilde ise kanat rüzgârı arka kısımdan alır veya kanatlar biraz konik yapılır. Böylece sistem rüzgârı takip ederek maksimum faydayı sağlar. YERT'lerin rotorları maksimum enerjiyi tutabilmek için rüzgâr akısına dik olarak durmalıdır. YERT'ler bu konuma, rotor kule üzerinde döndürülerek getirilir. YERT'ler kule üzerinde yatay eksen yönündeki hareketi motorlar (rüzgâr veya elektrik) rüzgâra yönelik birimlerde kılavuz bir kuyruk ve rüzgârı arkadan gören birimlerde ise oluşturulan konik açı ile sağlanır.



Şekil 3.1. Yatay eksenli rüzgâr türbini (YERT) [16]

Düşey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT)

DERT'lerin rüzgârı her yönden kabul edebilme üstünlüğü vardır. Kanatların güç üretebilmeleri rüzgârdan daha hızlı dönmelerini gerektirdiğinden, ilk harekete geçişleri güvenilir değildir. DERT'lerin bir diğer üstünlüğü ise makine aksamı, hız yükselticisi ve jeneratörün toprak üzerine konulabilmesidir. Dönme ekseni rüzgâr yönüne dik ve düşey olan bu türbinin kanatları da düşeydir. Günümüzde çeşitli ülkelerdeki elektrik enerjisi üretimi uygulamalarının çoğunluğu 2 ve 3 kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbinleri oluşturmaktadır. Büyük güçlü düşey eksenli uygulamalarda mevcuttur. Özellikle Dorrieus tipi türbinler ve bunun geliştirilmiş daha karmaşık yapılı olanı Cyclogino tipi rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır [15].



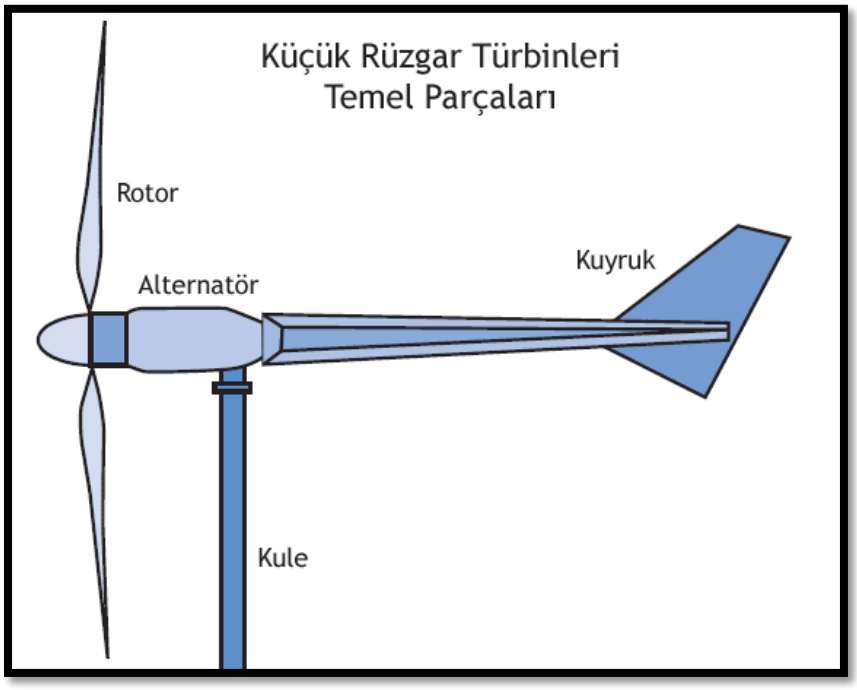
Şekil 3.2. Düşey eksenli rüzgâr türbini (DERT) [16]

3.1.2. Güçlerine göre rüzgâr türbinleri

Mikro türbinler

Genellikle müstakil konutlarda, denizcilikte teknelerde ve benzeri yerlerde enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılırlar. Bir evin çatısına kurulabilecek kadar küçük ve kompakt yapıdadırlar.

Genellikle; kanatlardan oluşan rotor, rotora bağlı alternatör, sistemi rüzgâra doğru yönlendiren kuyruk (sıklıkla), kule, kablo bağlantılarından oluşur. Sistemin ürettiği elektrik ya bir şarj kontrol ünitesi ile aküleri doldurur ve akü grubundan bir invertör aracılığı ile 220 volta çevrilip kullanılır, üretilenin fazlası bir denge yükü üzerinde harcanır; ya da doğrudan 220 volta çevrilip çift taraflı bir elektrik sayacı vasıtası ile şebekeye ve evinize bağlanır. Bu sistemde üretilen elektrik doğrudan kullanılır, fazlası ise şebekeye satılabilir. Çift taraflı sayaç ile ay sonunda ne kadar elektrik satıldığı ya da şebekeden ne kadar çekildiği görülebilir. Şekil 3.3’ de küçük güçlü türbinleri temel parçaları gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Küçük rüzgâr türbinleri temel parçaları [14]

Küçük güçlü rüzgâr türbinleri

Güçleri 30 kW'tan az olan türbinlerdir [16].

Orta güçlü rüzgâr türbinleri

Güçleri 30-100 kW arasında olan türbinlerdir [16].

Büyük güçlü rüzgâr türbinleri

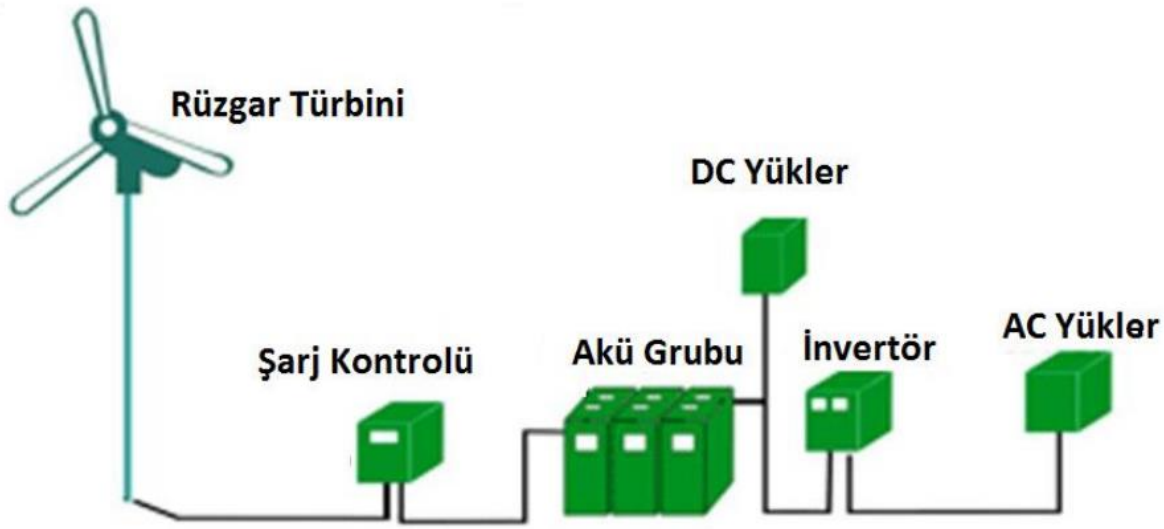
Güçleri 100 kW-1 000 kW arasında olan türbinlerdir [16].

3.1.3. Şebeke açısından rüzgâr türbinleri

Şebekeden bağımsız sistemler

Bu tür rüzgâr jeneratörleri genellikle üç kanatlı, aktarım sistemi, DC jeneratör, yöneltici kuyruk ve fren sisteminden oluşmaktadır. Makine daha çok direk tipi kule üzerine yerleştirilir. Elde edilen DC elektrik akü ile depolanabilir. Şebekeden bağımsız rüzgâr

elektrik sistemleri birkaç kW ile 100 kW arasında kullanılmakla birlikte, çoğunlukla 30 kW kurulu gücü aşmamaktadır. Şekil 3.4'de şebekeden bağımsız rüzgâr türbinlerinin şematik hali gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Şebekeden bağımsız rüzgâr türbinlerinin şematik gösterimi [16]

Bu tür sistemler özellikle kırsal alanlarda ve enterkonnekte şebekeye uzak olan bölgelerde tercih sebebidir. Türbinden elde edilen elektrik çeşitli ünitelerden geçerek kullanıma sunulmaktadır. Rüzgârın esmediği durumlarda ise yani türbin tarafından elektrik üretimi olmadığında; akü içerisinde depolanmış olan elektrik kullanıma sunulur. Türkiye'de özellikle 10 kW'dan küçük güçlerde rüzgâr ve güneş enerjisinin beraber kullanıldığı elektrik sistemlerine bir talep olduğu ve bu tür sistemlerin piyasaya çıkarıldığı da görülmektedir. Bu sistemler DC karakterli ve akülüdürler. Ancak, pahalı olmaları yaygınlaşmalarını engellemektedir.

Şebekeye bağlı sistemler

Rüzgâr enerjisi çok kesintili bir enerji kaynağıdır. Bugün kullanılan modern rüzgâr türbinlerinde olduğu gibi rüzgâr enerjisi, elektrik enerjisine çevrilerek şebekeye verilmeden önce çeşitli kademelerden geçmektedir. şebeke bağlantılı rüzgâr türbinleri yüksek rüzgâr hızlarında, yüksek devir sağlamak için genelde 3 kanatlı yapılmaktadır. Su pompalamak için kurulan rüzgâr türbinleri ise, çok kanatlı olduğu için düşük devir sağlamaktadır. şebeke bağlantılı rüzgâr santralleri küçük ölçekli ihtiyaçları karşılayabileceği gibi, belirli bir yerde çok sayıda şebekeye elektrik sağlamak amacıyla da kurulurlar. Günümüzün

büyük güçlü rüzgâr santralleri elektrik şebekesine bağlı ve birden fazla türbin içeren rüzgâr çiftlikleri biçimindedir. Merkezi elektrik şebekesine elektrik veren rüzgâr türbinleri, uygulamada en çok rastlanan sistemlerdir. Birbirine bağlanmış çok sayıda rüzgâr türbini yerel dağıtım şebekesini besler ve yerel tüketici firmalara da bu elektrik satılabilir. Bunun dışında rüzgâr türbinleri genel elektrik şebekesine bağlı olan meskenlere, işyerlerine ve çiftliklere elektrik vermek üzere tesis edilirler. Rüzgâr gücünün düşük olduğu zamanlarda elektrik genel şebekeden satın alınır. Rüzgâr türbinleri fazla güç ürettiğinde ise elektrik genel şebekeye verilir.

3.1.4. Kanat sayısına göre rüzgâr türbinleri

Kanat sayısına bağlı olarak rüzgâr türbinleri tek kanatlı, çift kanatlı, üç kanatlı olarak sınıflandırılabilir.

Tek kanatlı rüzgâr türbinleri

Tek kanatlı rüzgâr türbininin yapılmasının sebebi, kanat sayısına göre dönme hızının yüksek olması ve bu sayede makine kütlesini ve rotorun döndürme momentini azaltmaktır. Ek olarak rotor kanadı, kanat üzerindeki yapısal yükleri azaltacak mekanizma ve kanat mekanizma hareketinin pürüzsüz olabilmesi için, tek menteşe ile sabitleştirilip, 2 karşı ağırlıkla dengelenmelidir. Diğer taraftan tek kanatlı rotorlarda, ilave yüklerden ortaya çıkan aerodinamik dengesizlik ve mekanizma hareketinin kontrol altında tutulması için rotor göbeği çok iyi yapılmalıdır. En önemli ticari dezavantajı, yüksek hızlarda kanat uç hızının sebep olduğu rotorun aerodinamik gürültü seviyesidir. Ticari kullanımı yok denecek kadar azdır.

İki kanatlı rüzgâr türbinleri

Üç kanatlı türbinlere göre rotor maliyetinin azaltılmak istenmesi bu türbin fikrini doğurmuştur. Birçok ülkede 10 ile 100 m rotor çaplı ölçülerde rüzgâr türbinleri tasarlanıp, Avrupa ve ABD'de çalışmaya başlamıştır. Bu ticari rüzgâr türbinlerinden sadece birkaç tanesi prototip durumundan, seri üretime geçebilmiştir. Almanya'da da örnekleri vardır. İki kanatlı rotorun balansı, bir kanatlı rotora göre daha düzgündür. Fakat iki kanatlı rotorun sebep olduğu dinamik hareketleri önlemek için rotora kadran sistemi ilave edilmiştir. Bu

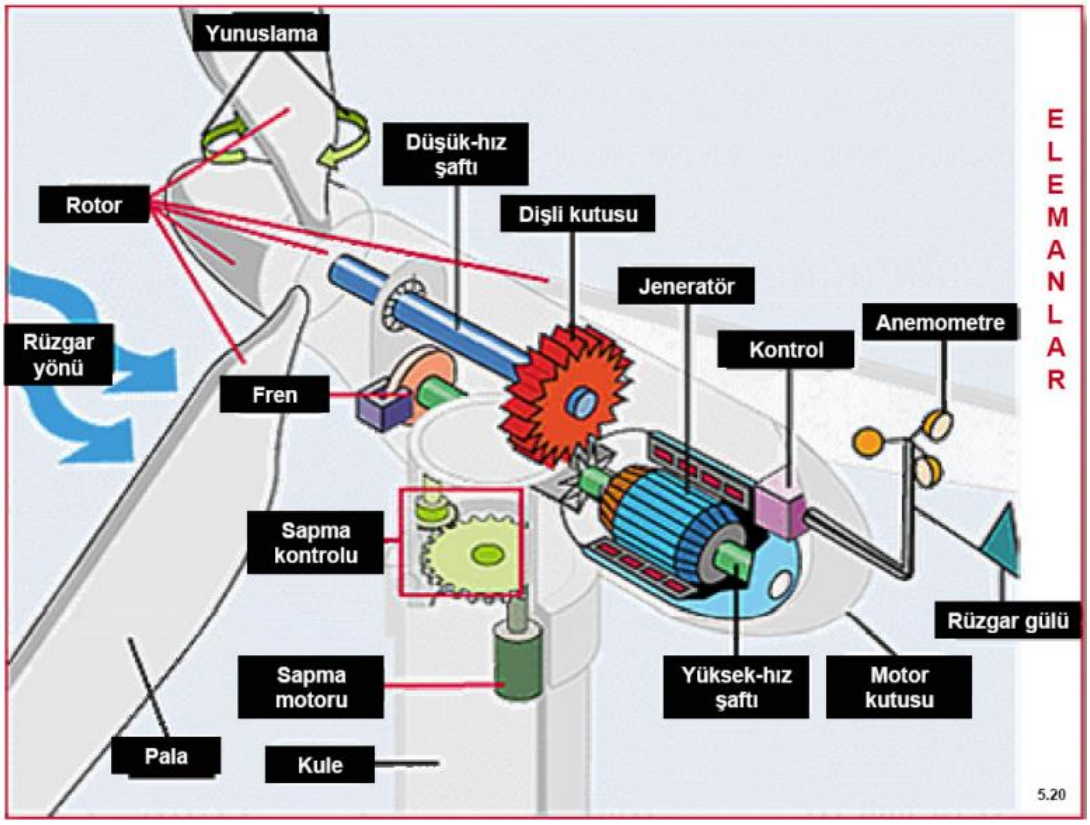
kadran, rotor şaftına dikey ve iki rotor kanadına yerleştirilir. Üç kanatlı rotorla karşılaştırıldığında en büyük avantajı; kanat uç hızlarının yüksek olmasıdır. Bu rüzgâr türbinin gürültü seviyesinin yüksek olması ve düşük rüzgâr hızlarında (3 m/s) çalıştırılması dezavantajıdır. Ticari kullanımı sınırlıdır.

Üç kanatlı rüzgâr türbinleri

Üç kanatlı modern türbinler, dünyanın dört bir tarafında kullanılmaktadır. Üç kanat kullanılmasının asıl sebebi, dönme hareketinin daha düzgün olmasıdır. Bu türbinde, türbin üzerinde depolanan yüklerden dolayı salınım yapan atalet momenti olmadığından, rotor göbeği içinde titreşimi önleyici pahalı parçalara gerek yoktur. Kanat uç hızı düşük olduğundan gürültünün düşüklüğü, sarsıntısız döndükleri için göz estetiğini bozmamaları önemli avantaj olup, teknik açıdan kabul görmüştür.

3.2. Rüzgâr Türbinlerinin Parçaları

Bir rüzgâr türbini başlıca; dişli kutusu, rotor, anemometre, otomatik yöneltme düzeni, frenleme düzeni, yaw mekanizması ve kuleden meydana gelmektedir. Şekil 3.5'de tipik bir rüzgâr türbinine ait elemanlar ve konumları görülmektedir. Bu ekipmanlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

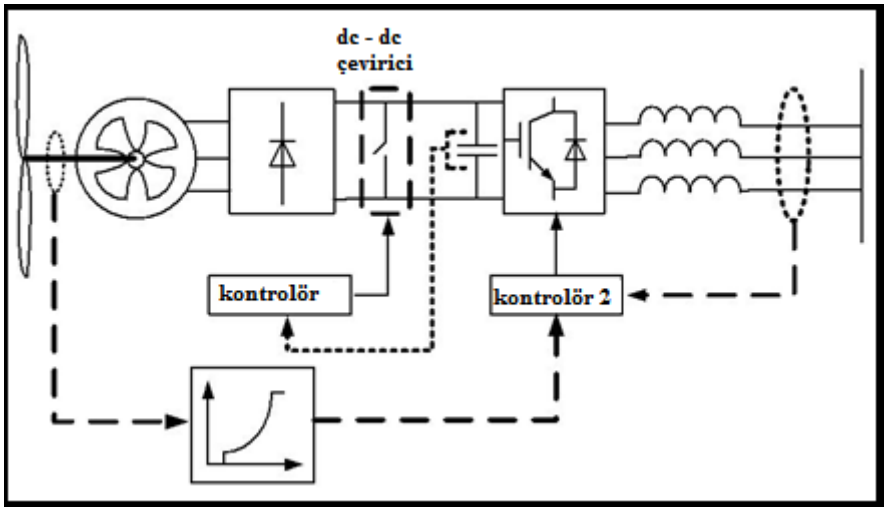


Şekil 3.5. Bir rüzgâr türbinini oluşturan elemanlar ve konumları [17]

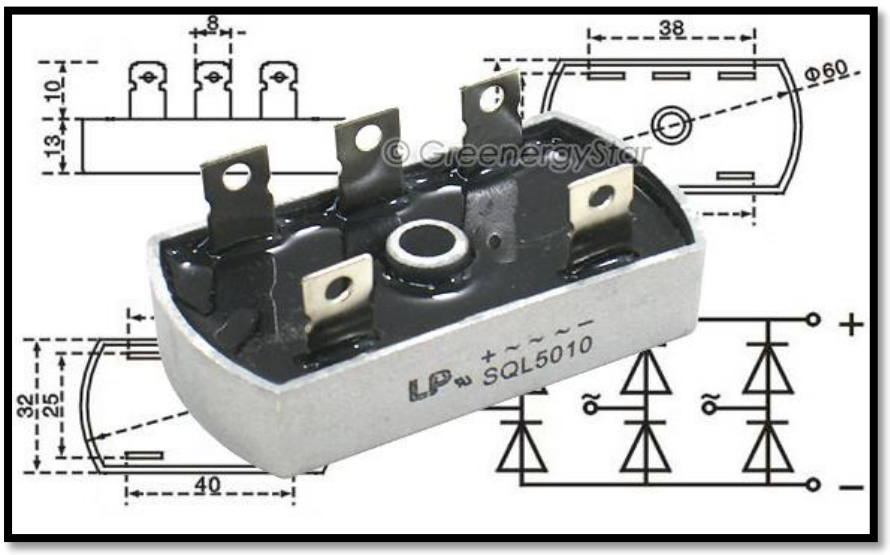
3.2.1. Doğrultucu ve gerilim regülâtörü

Doğrultucular, rüzgâr türbinlerinde generatörde üretilen enerjinin kontrol edilmesi prosesindeki ilk aşamadır. Değişen rüzgâr hızlarından dolayı generatörde elde edilen değişken frekanslı alternatif akım, doğrultucu grupları vasıtasıyla DC'ye dönüştürülür. Doğrultucular genelde köprü doğrultucu modülü şeklinde üretilip, kullanılacak akım ve gerilim tipine göre eleman seçimi yapılır. Yüksek güçlü yapılar için büyük akım taşıma kapasiteli güç diyotlarından oluşan modüller ve bunlardan oluşan gruplar kullanılır.

Burada elde edilen DC akım daha sonra regüle edilir ve sabit frekanslı Alternatif Gerilime dönüştürülmek üzere evirici'e iletilir. Basit bir rüzgâr türbini elektrik blok şeması Şekil 3.6'da ve örnek bir 50 A köprü doğrultucu resmi Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Rüzgâr türbini elektrik blok şeması



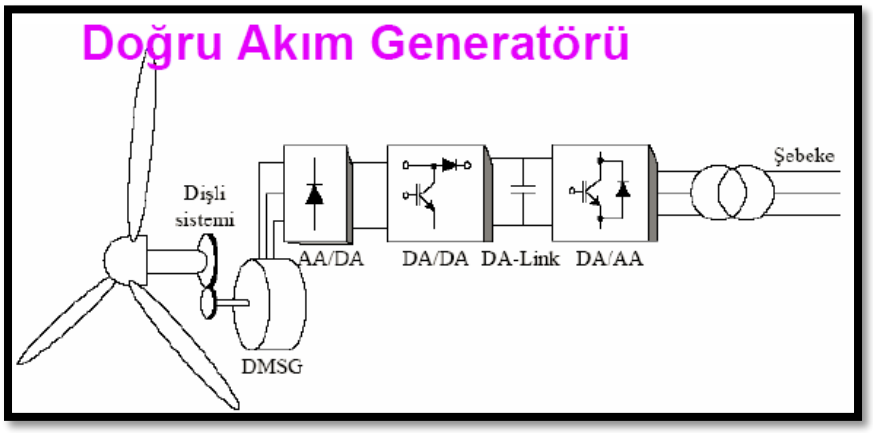
Şekil 3.7. Örnek bir 50 A köprü doğrultucu resmi

3.2.2. Generatör

Generatör, kanatların döndürdüğü milde oluşan döndürme enerjisini elektrik enerjisine çeviren elektrik makinasıdır. Rotor ’da oluşan mekanik enerji elektrik enerjisine çevrilir. Doğru Akım, Asenkron ve Senkron olmak üzere temel üç tiptedir ve tip yapısına göre milden sonraki mekanik düzenler farklılık göstermektedir.

Doğru Akım generator;
Sabit mıknatıslı yapıdadır ve genelde düşük güçlerde kullanılırlar. Genel çalışma prensibi şekilde gösterilmiştir. Yükseltici (DA/DA kıyıcısı) elektromanyetik torku kontrol eder.

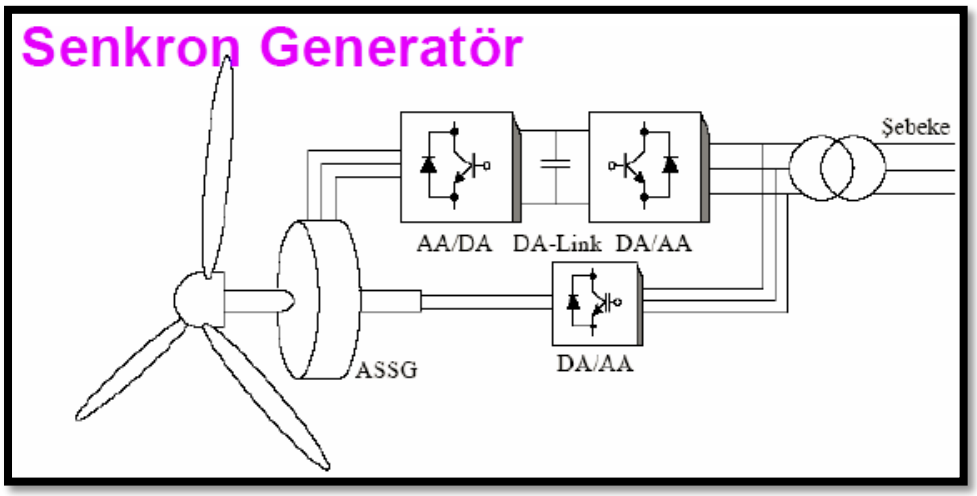
Konverter (DA/AA) girişin güç faktörünü kontrol eder ve DC link gerilimini düzenler. Şekil 3.8'de doğru akım generatorü blok şeması gösterilmiştir.



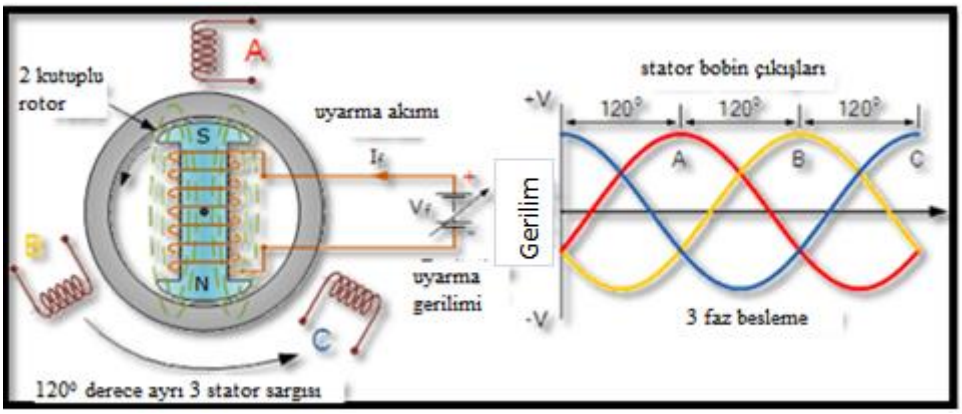
Şekil 3.8. Doğru akım generatorü blok şeması [34]

Senkron Generatör;

Senkron generatörler düşük devir – yüksek tork sisteminde çalışan, sabit mıknatıslı ya da dışardan uyarmalı, çok kutuplu generatörlerdir. Düşük devir yüksek tork prensibine göre çalıştıkları için, dişli sistemine gerek olmadan kanat miline bağlanabilirler. Bu durumda dişli kutusu olmadığından maliyet tasarrufu sağlar. Şekil 3.9'da senkron generatorü blok şeması ve Şekil 3.10'da senkron generator çalışma prensibi gösterilmiştir.



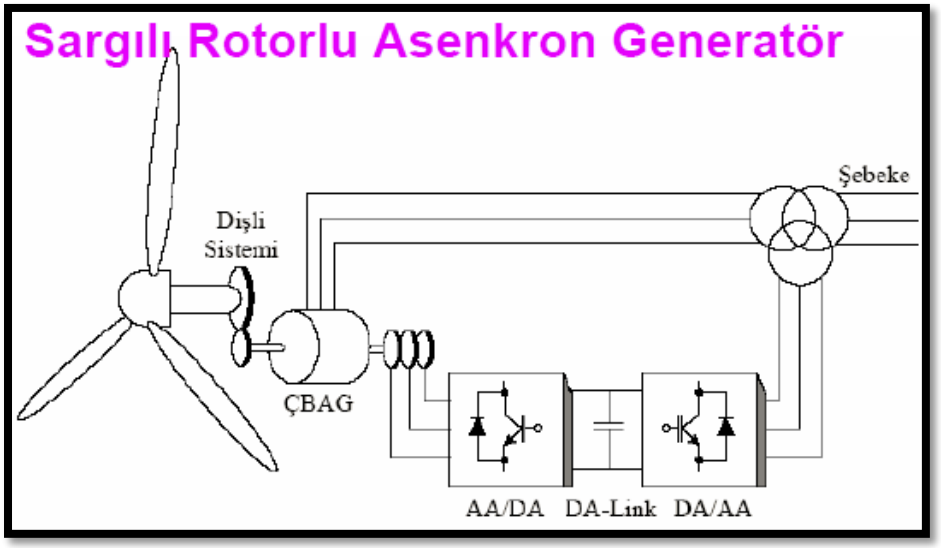
Şekil 3.9. Senkron generatorü blok şeması [34]



Şekil 3.10. Senkron generator çalışma prensibi

Rotoru Sargılı Asenkron Generatör;

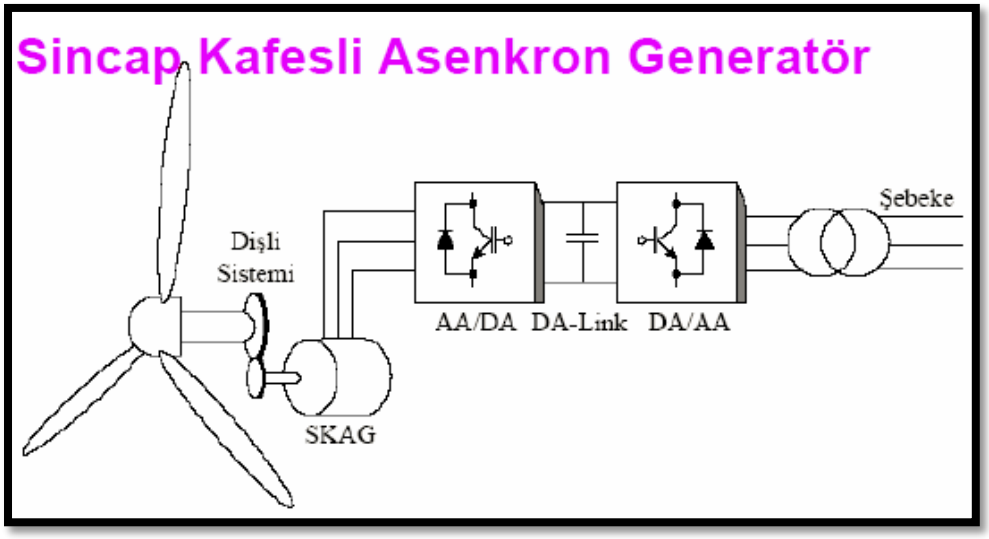
Rotoru Sargılı Asenkron Motor olarak uzun zamandır endüstride kullanılan motor tipinin generator olarak kullanılmasıdır. Stator sargıları doğrudan şebekeye bağlıdır. Rotor sargıları DGM (Darbe Genişlik Modülasyonu) yöntemi ile dört bölgeli sürücü ile kontrol edilir. Şekil 3.11'de sargılı rotorlu asenkron generatorü blok şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Sargılı rotorlu asenkron generatorü blok şeması [34]

Sincap Kafesli Asenkron Generatör;

Endüstri'de uzun yıllardır kullanılan Sincap Kafesli Asenkron Motor'un generator olarak kullanılmasıdır. Devri kanat rotorunun devrinden yüksek olduğundan arada dişli kutusu kullanımını gerektirir. Stator sargılarında üretilen enerji alternatif akım kıyıcıları ile kontrol edilir. Şekil 3.12'da sincap kafesli asenkron generator blok şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Sincap kafesli asenkron generator blok şeması [34]

3.2.3. İnverter

Üretilen enerji doğrultulup regüle edildikten sonra evirici ile sabit şebeke frekansında (50 – 60 Hz) Alternatif Akım'a dönüştürülür. İnverterler, kullanılan güç seviyesine göre MOSFET'lerin ya da IGBT'lerin bir mikroişlemci kontrolör yardımıyla uygun bir modülasyon tekniği ile anahtarlanarak alternatif akım elde edildiği cihazlardır. Çok yüksek güçlerde Tristörlü eviriciler de kullanılmaktadır.

Tristörlü Eviriciler;
Altı darbeli evirici köprülerinde yüksek harmonik salınımları şebeke akımının sinüzoidal formunda önemli sapmalara neden olmaktadır bundan dolayı maliyeti yüksek filtre cihazları kullanılmalıdır. Ayrıca şebeke akımının faz sırasını ve frekansını ayarlamak mümkün değildir. Bunlar tristörün tetikleme bağlı olduğu gibi, şebeke ve rüzgâr santrali sistemine göre önceden de belirlenebilir. Şebekeye uygunluk 12 darbeli eviricileri ile mümkündür. 12 darbeli evirici, iki adet 6 darbeli eviricinin paralel bağlanması ve 30 derece faz farklı 2 sekonder sargılı transformatörün kullanılması ile 45 derece elde edilir. Böylece şebeke akımı sinüzoidal forma oldukça yaklaşır. 5. ve 6. harmonikler altı darbeli eviriciye oranla, hemen hemen kaybolur. Bununla beraber 12 darbeli eviriciler, generatörün ve 2 sekonderi olan transformatörün özel tasarımını gerektirir. Örnek kurulu bir rüzgâr türbini evirici sistemi resim 3.1'de gösterilmiştir.



Resim 3.1. Örnek kurulu bir rüzgâr türbini evirici sistemi

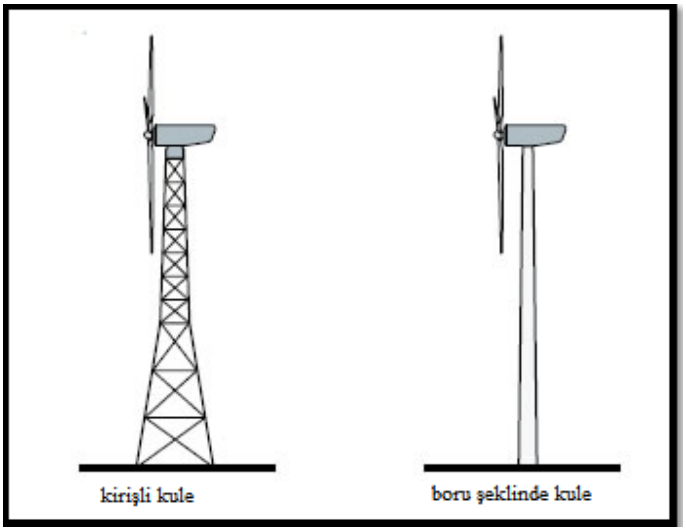
3.2.4. Kanatlar

Kanatlar; gelen rüzgâr hareketini, şaft vasıtasıyla dişli kutusuna, oradan da jeneratöre gönderen en dış birimdir. Rotor kanadından etkiyen rüzgâr, kanadın gövdesine ve rotorun merkezine doğru hareketlendikçe, daha dik bir açıdan gelir. Eğer rotor kanadı çok dik bir rüzgâr geliş açısı etkisinde kalırsa, rüzgârın kanadı kaldırma kuvveti azalır ve sıfırlanır. Bu nedenle, rotor kanadı burulmak zorundadır ve kanadın arka ucu esen rüzgârla aynı yöne doğru itilir.

3.2.5. Kule

Kule, rüzgâr türbinlerinde nacelle (rüzgâr türbininin dişli kutusunu ve jeneratör dahil ana parçalarını içine alan kısım) ve rotoru taşır. Kuleler genellikle tüp şeklinde çelik, kafes yapılı veya betonarme olarak inşa edilir. Halat destekli direk tipi kuleler genellikle küçük türbin uygulamalarında kullanılır. Tüp şeklindeki kule şekli en çok tercih edilen kule şeklidir. Genellikle 20 – 30 metre yükseklikte üretilir. Kafes yapılı kuleler çelik profillerin kaynaklanarak birleştirilmesi ile oluşturulur. En temel avantajları maliyetlerinin düşük olmasıdır. Benzer boyutlarda bir tüp kulenin hemen hemen yarısı kadar malzeme ve yapım maliyeti vardır. Birçok küçük türbin halat destekli direk tipi kule kullanılarak inşa edilir. En büyük avantajı ağırlığının çok az ve maliyetlerinin çok düşük olmasıdır. Dezavantajları

ise araziye kurulum zorluğu ve tarım alanlarının kullanımını engellemesidir. Rotorun kulenin tepesine yerleştirilmesi durumunda direğin gölgesi kanatlar üzerinde etkili olmayacağı için daha yüksek güç elde edilebilir. Bu durum aynı zamanda daha düşük gürültü daha az kanat yorgunluğu ve daha düzgün güç üretilmesi gibi avantajlar sağlar. Şekil 3.13'de temel iki tip kule örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Temel iki tip kule örneği [34]

3.2.6. Rotor

Rotor; gelen rüzgâr hareketini, şaft vasıtasıyla dişli kutusuna, oradan da jeneratöre gönderen en dış birimdir. Rotor kanadından etkiyen rüzgâr, kanadın gövdesine ve rotorun merkezine doğru hareketlendikçe, daha dik bir açıdan gelir. Eğer rotor kanadı çok dik bir rüzgâr geliş açısı etkisinde kalırsa, rüzgârın kanadı kaldırma kuvveti azalır ve sıfırlanır. Bu nedenle, rotor kanadı burulmak zorundadır ve kanadın arka ucu esen rüzgârla aynı yöne doğru itilir.

3.2.7. Vites kutusu (Gear box)

Vitesler düşük hız milini, yüksek hız miline bağlayarak dönüş hızını 30-60 devir/dakikadan(rpm) 1000-1800 devir/dakikaya seviyesine (elektrik üretmek için gerekli olan dönüş hızı) çıkartırlar. Vites kutusu bir rüzgâr türbininin pahalı (ayni zamanda ağır) bir parçasıdır. Günümüzde vites kutusuna gerek kalmadan doğrudan sürüş özelliğine sahip, düşük rotasyonlu hızlarda elektrik üretebilen jeneratör teknolojileri alanında araştırmalar sürmektedir.

3.2.8. Fren sistemi

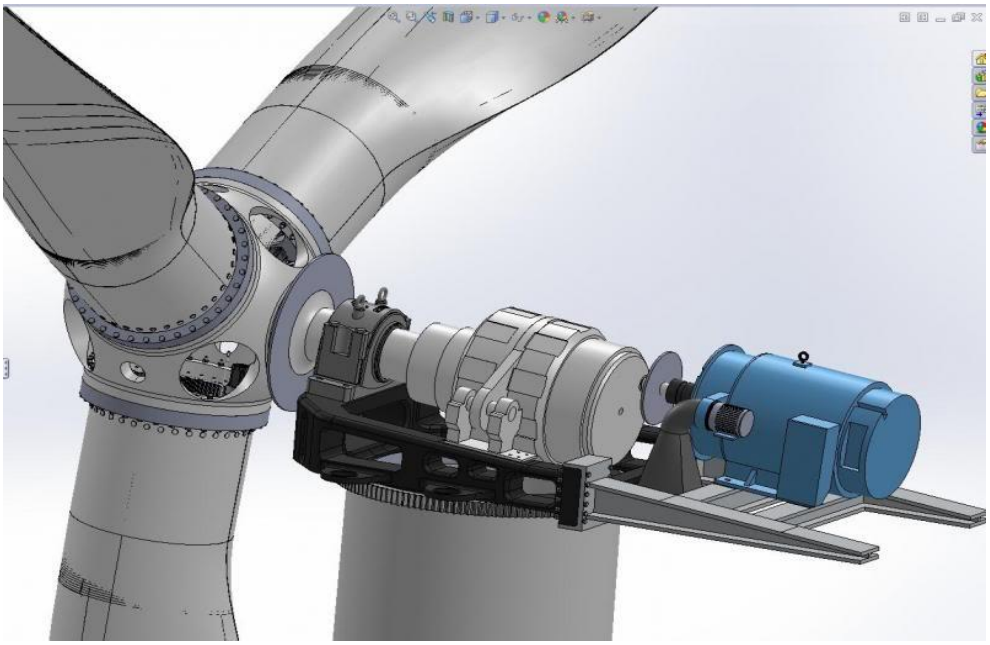
Devir sayısının belirli bir değerden sonra sabit tutulması, belirli bir sınırı aşmasına engel olması, çarkın ve palaların korunması yönünden çok önemlidir. Özellikle fırtınalı havalarda rüzgâra karşı küçük bir yüzey çıkarmak, hatta tesisten yararlanılmayacaksa tamamen durdurmak gerekir. Bu sonuçları elde etmek amacıyla çeşitli sistemler uygulanmaktadır. Mekanik fren, dişli kutusuna yerleştirilen bir diskten oluşmaktadır. Fren diski çelikten yapılır ve mil üzerine sabitlenir. Olabilecek arızalara karşı frenleme sistemini korumak için hidrolik yağ basıncı gerekmektedir. Hidrolik sistem türbinin aerodinamik frenlerini ayarlamak için kullanılır. Yağ basıncı olmadığında, fren blokları fren diskini sıkıştıracaktır. Frenleme, fren bloğu ile disk arasındaki sürtünmenin bir sonucudur.

3.2.9. Dişli kutusu

Dişli kutusu bir rüzgâr türbininin aktarma sisteminin önemli bir bileşenidir. Normal bir rüzgâr türbin pervanesinin hızı 30 – 50 tur/dak iken bir generatörün optimum hızı 1000 – 1500 tur/dak civarındadır. Bu yüzden dönme hızının generatörün hız gereksinimlerine göre ayarlanabilmesi için iletim hattında güç aktarma sisteminin bulunması gerekir. İdeal bir dişli sistemi, rüzgâr türbininin işletme ömrü boyunca, sert iklim ve yükleme koşulları altında bile pürüzsüzce ve sessiz bir şekilde çalışmalıdır. Beşikteki bazı kısıtlamalar yüzünden, boyutlar da önemli bir faktördür. Küçük türbinlerde hedeflenen hız oranına iki ya da üç kademeli dişli takımları vasıtasıyla ulaşılır. Örneğin, 150 kW'lık bir türbinin dişli sistemi Şekil 3.3′de gösterilmiştir. Pervanenin dönüş hızı 40 tur/dak iken generatörün hızı 1000 tur/dak olarak tasarlanmıştır. Böylece 25 olması gereken dişli oranı şekildeki gibi iki kademeli bir sistemle gerçekleştirilir. Pervaneye bağlı düşük hız mili daha büyük bir dişliye bağlıdır. Bu dişli de orta kısımdaki daha küçük bir dişliyi besler. Büyük ve küçük dişli arasındaki diş oranı 1: 5'tir. Böylece orta mil yavaş milinkinin 5 katı hızla döner. Orta mile bağlı büyük bir dişliyi generatör miline bağlı daha küçük bir dişliye bağlayan ikinci bir sistem sayesinde hız daha da artırılır. Bu iki ardışık sistem sayesinde 1:25'lik dişli oranına ulaşılır. Daha yüksek dişli oranlarına gereksinim duyulursa, başka bir ara mile bağlı ilave bir dişli takımı sisteme eklenir. Bununla beraber dişli takımları arasındaki oran 1:6 ile sınırlıdır. Bu yüzden, büyük türbinlerde planet dişlilerle normal dişlilerin kombinasyonundan oluşan bütünleşik dişli takımları kullanılır. Normal bir dişli kutusunda istenilen hız seviyesinin yakalanabilmesi için birinci kademe planet dişliler iki kademeli

ikincil düz dişli takımıyla birleştirilir. Planet dişlilerin sisteme dahil edilmesiyle dişli kutusunun ebatları büyük oranda azaltılır. Bunun yanında planet dişliler ağır yükleri daha güvenli bir şekilde aktarabilir.

Kompakt tasarımları nedeniyle planet dişlilerde güç iletimi sırasında ortaya çıkan ısıyı dağıtmak zordur. 600 kW gücünde normal bir rüzgâr türbini tam kapasiteyle çalışırken 18 kW eşdeğer ısı üretir. Diğer bir problem de bu dişlilerin üretimlerindeki zorluktur. Bitişik dişliler arasındaki yük aktarımlarının daha yumuşak olmasından dolayı konik dişliler daha sessiz çalışır. Fakat konik dişliler planet dişli sistemlerinde kullanılamazlar. Şekil 3.14'de örnek dişli kutusu yerleşim çizimi gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Örnek dişli kutusu yerleşim çizimi [34]

3.2.10. Anemometre ve yelkovan

Anemometre (rüzgâr ölçer) ve yelkovan, rüzgâr hızı ve yönünü ölçmek için kullanılır. Anemometreden gelen elektronik sinyaller, rüzgâr türbininin elektronik kontrol ünitesi tarafından rüzgâr hızı yaklaşık 5 m/s'ye yaklaştığında rüzgâr türbinini çalıştırmak için kullanılır. Bilgisayar, türbini ve çevresini korumak için rüzgâr hızı 25 m/s'yi aştığında türbini otomatik olarak durdurur. Yelkovan, sinyalleri rüzgâr türbininin elektronik kontrol ünitesi tarafından rüzgâr türbinini rüzgâra karşı döndürmek üzere kullanılır.

3.2.11. Otomatik yöneltme düzeni

Çeşitli yönlerden esen rüzgârlardan yararlanabilmek için, değişken çarkın, her an rüzgâr doğrultusuna dikey konumda olması istenir. Bu yöneltme, çark düzlemine dikey olan büyük düzeyli bir dümenle veya yardımcı bir çarkla otomatik olarak sağlanabilmektedir.

3.2.12. Rüzgâr türbini yaw mekanizması

Rotorun rüzgâra dik olmadığı durumlarda rüzgâr türbinin bir yaw (rotadan çıkma) hatasına sahip olduğu söylenir. Bir yaw hatası, rüzgârdaki enerjinin düşük bir kısmının rotor alanına doğru akmasını ifade eder. Yaw kontrolü, rüzgâr türbin rotorunun güç giriş kontrolünün en iyi yoludur. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin çoğunda yaw döndürme mekanizması kullanılır.

3.3. Rüzgâr Türbinlerinin Güç Kontrolü

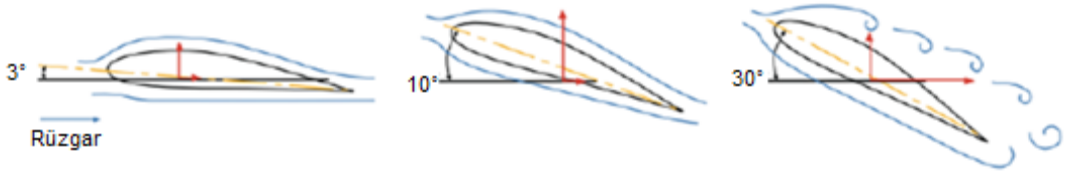
Pervane kanatlarının üzerine etkiyen aerodinamik kuvvetlerden dolayı rüzgâr türbinleri, rüzgârdaki kinetik enerjiyi dönme (rotasyonel) mekanik enerjisine çevirir. Pervane kanatlarındaki bu kuvvetler uçak kanatlarının maruz kaldığı kuvvetlere çok benzer. Günümüzde kullanılan modern rüzgâr türbinlerinde, iki farklı aerodinamik kontrol mekanizması kullanılır. Bunlar Stall (Pasif) ve Pitch (Aktif) kontrol mekanizmalarıdır. Bu iki mekanizma, jeneratörün rüzgârdan çıkarabileceği enerjiye göre ayarlanır. Eskiden çoğu küçük ve orta büyüklükteki türbinler stall kontrol kullanırken, günümüzde rüzgâr türbinleri üzerinde daha etkin bir kontrolü sağlayan Pitch kontrol mekanizması kullanılmaktadır.

3.3.1. Stall kontrol mekanizması

Stall olayı, akışın kanat profilinin negatif basınç bölgesini aniden terk ederken meydana gelen bir durumdur.Rotor kanatlarının uygun tasarımı ile rüzgâr hızı belirli bir değerin üstüne çıksa dahi (örneğin 25 m/s) türbin hızı sabit kalmasını sağlayan kontrol mekanizmasına stall kontrol denir.

3.3.2. Pitch kontrol mekanizması

Pitch kontrol olayı, jeneratörden girdi işareti bekleyen aktif bir sistemdir. Pitch kontrollü rüzgâr türbinlerinde bulunan elektronik aksama bağlı hız kontrol sistemi, saniyede birkaç kez güç çıkışını kontrol eder. Güç çıkışı normalden çok yüksekse, hız kontrol sistemi pervane Pitch mekanizmasına sinyal göndererek durumu bildirir. Gelen bu sinyalden sonra pervane kanatları da yönünü rüzgârın estiği yönden hafifçe çevirerek güç kontrolü yapar [18]. Şekil 3.15'te örnek Pitch(kanat) açısı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Pitch (kanat) açısı

Kanat açısı (β) kanat ile rüzgâr hız vektörü arasındaki açı değeridir. β =0 ise kanat, rüzgâr hızından tam verimde etkilenir. Yani kanat yüzey vektörü ile rüzgâr çizgisel hız vektörü çakışık vaziyettedir. Bu durumda rüzgâr türbini rüzgârdan maksimum güç üretir.

Rüzgâr hızı anma rüzgâr hızına eşit değerde ise ya da bu değerden daha küçükse β kanat açısı (pitch angle) sıfır değerinde olacaktır. Böylelikle maksimum verimlilikte mekanik ve elektriksel güç elde edilir. Rüzgâr hızının anma değerinden yüksek bir değere çıkması durumunda β açısı sıfır değerinde kalmaya devam ederse çıkış gücü anma güç değerini aşar. Üstelik uzun süren bu durum sistemin mekanik aksamında zorlanmalara sebep olur.

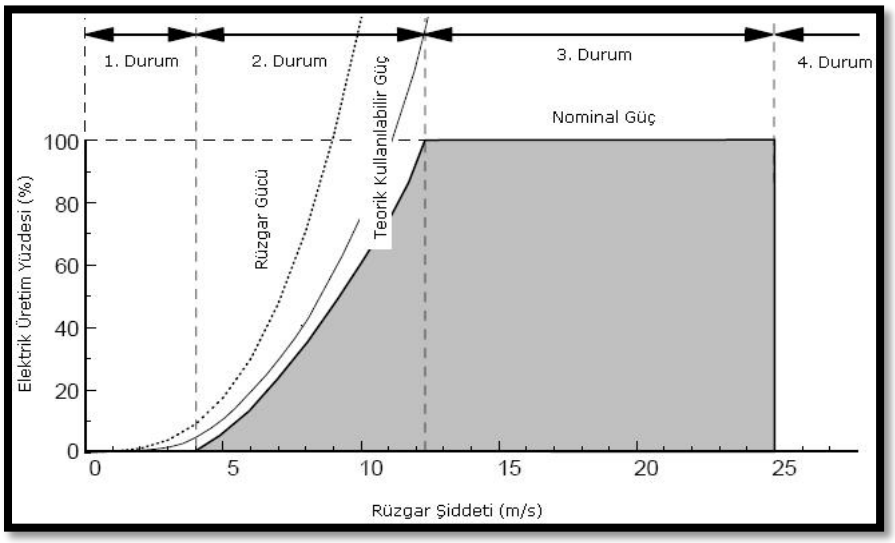
β açısı farklı rüzgâr hızları için değişmekte ve bu değişimin belirlenmesi bir kontrol sistemi (pitch angle control) vasıtasıyla olmaktadır.

3.4. Rüzgâr Türbininin Güç Eğrisi

Bir türbinin güç eğrisi ortalaması ile üretebileceği güç hesaplanabilir. Güç eğrisi ortalama gücün ortalama rüzgâr şiddetine bağlılığını gösterir. Böylece 4 durum teşekkül eder. Bu 4 durum çizelge 3'te gösterilmiştir. Birinci durum; ortalama rüzgâr şiddeti başlama (cut-in) hızından düşükse elektrik üretilmez. Türbin enerji üretmeden hareketsiz kalır. İkinci

durum; ortalama rüzgâr şiddeti başlama hızından fazla ise sistem elektrik üretmeye başlar. Ancak türbinin üreteceği maksimum elektrik için gerekli hız sistem tarafından ayarlanmaya çalışır. Üçüncü durum; ortalama rüzgâr şiddeti en uygun elektrik üretilecek şiddeti yani nominal şiddeti geçerse türbin içindeki fren sistemi vb. araçlarla palaların dönüş hızı en uygun hıza düşürülür. Dördüncü durum; ortalama rüzgâr şiddeti türbinin tasarlandığı en yüksek (cut-off) hızı aşarsa sistem mutlaka kapatılmalıdır aksi takdirde türbinde hasarlar meydana gelir. Bu durumda enerji üretilemez.

Çizelge 3.1. Rüzgâr Türbini güç eğrisi



3.5. Rüzgâr Türbini Ömrü

Günümüzde 20-25 yıldan daha fazla çalışan türbin olmadığı için kesin bir ömür verilmemekle birlikte, beklenen türbin ömrünün 25-30 yıl olabileceği düşünülmektedir. Dünyada bugün için yaklaşık 30 000 türbin çalıştığı bilinmektedir. Rüzgâr türbinlerinin kanatları cam elyaflı (fiberglass) polyester malzemeden, nadiren de tahtadan yapılmaktadır. Kuleler ise; çelik boru şeklinde, kafes tipi veya betondan üretilmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan rüzgâr türbinleri yaklaşık 3-5 m/s de çalışmaya başlar. Maksimum güce yaklaşık 15 m/s ‘de ulaşır ve yaklaşık 25 m/s ‘ye ulaştığı zaman çalışmayı durdurur. Kanatlar dakikada yaklaşık 15-50 kez döner, ancak değişken kanat hızlı türbin çeşitlerinin sayısı giderek artmaktadır. Türbinlerdeki 20 yıllık tasarım ömrü üreteçler tarafından belirlenmektedir. Ancak gerçek ömür hem türbin kapasitesine hem de yerel hava olaylarına bağlıdır. Örneğin, sitedeki(rüzgâr çiftliğinin bulunduğu yer) türbülans miktarı gerçek ömrü önemli oranda belirleyen değişkendir.

3.6. Rüzgâr Türbinlerinin Bakımı

Modern rüzgâr türbinleri 20 yıllık ömürlerinde 120 000 saat çalışacak şekilde tasarlanırlar. Bu süre, bir otomobilin 4000-6000 saatlik çalışma aralığından çok daha fazladır. Pratikteki deneyimler, yeni türbinlerde bakım maliyetlerinin de azaldığını göstermektedir. Danimarka'da 1975'den beri kullanılan 4400 türbin üzerinde yapılan çalışmalar, yeni üretim türbinlerin bakım ve onarım maliyetlerinin, eski üretim türbinlerin bakım ve onarım maliyetlerinden oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Eski Danimarka türbinlerinin yıllık bakım maliyetleri, türbin yatırım maliyetinin %3'ü dolayındadır. Yeni üretim türbinlerde ise bu oran, yatırım maliyetlerinin %1,5-2,0'si dolayındadır. Tek türbinin bakım maliyeti, bir rüzgâr parkındaki türbinlerin ortalama bakım maliyetinden daha pahalı olmaktadır. Bazı rüzgâr türbini parçaları bozulmaya ve değiştirilmeye, diğer parçalardan daha çok maruz kalırlar. Bu, özellikle rotor kanatları ve vites kutusunda görülür. Özellikle kanatlar, vites kutusu ve üreteç, türbin fiyatının % 15-20 arasında değişen kısmını oluşturmaktadır.

3.7. Rüzgâr Türbinin Güvenliği

Büyük modern rüzgâr türbinlerinde normal olarak konik çelik boru şeklinde kuleler kullanılır. Bu kulelerin kafes kulelere göre en büyük üstünlüğü, daha güvenli olması ve rüzgâr türbininin bakım ve onarımının personel tarafından daha rahat ve güvenli yapılmasını sağlamasıdır. Kusuru ise, maliyetinin yüksek olmasıdır. Kafes tipi kulelerin en büyük kusurları, rüzgâr çiftliğine daha az uygun olması ve bakım onarım sırasında yanına ulaşılabilirliğin zor olmasıdır. Bakım, onarım ve servis için güvenlik açısından bazı sakıncalar içermektedir. Kule yüksekliğinde, türbinleri kurarken ve bakım-onarım çalışması yaparken tehlikeli sonuçlar doğurabilir. Fakat yeni rüzgâr türbinlerinde personelin düşmemesi için inerken ve çıkarken her türlü güvenlik önlemi alınmıştır. Bakım anında makinelerin tamamen durdurulması gerekmektedir. Kritik parçaların bozulması durumunda veya şebekeden ayrılma durumunda, rotorun ve türbinin durması gerekmektedir. Bu durma olmazsa, rotor çok kısa sürede hızlanmaya başlayacaktır. İşte bu durumlarda aşırı hızlanma koruması olmalıdır. Yeni modern türbinlerde bu önlem vardır.

3.8. Rüzgâr Türbinlerinin Gelişiminde Ulaşılan Düzey

Ucuz petrol döneminde güncellik kazanamayan rüzgâr enerjisi, 1974-1978 yapay petrol bunalımlarının ardından, artan uygulamalar ve teknolojik aşamalarla gündeme girmiştir. Artık geçmişteki rüzgâr jeneratörleri yerine, modern ve çağdaş rüzgâr enerjisi çevrim sistemleri (WECS) üzerinde durulmaya başlanmıştır. Az sayıda tüketiciyi besleyecek tekil makineler yerine, birden çok türbin içeren rüzgâr çiftlikleri ile elektrik şebekelerinin beslenmesi amaç olmuştur. Rüzgâr türbinlerinin ve teknolojisinin geliştirilmesine, 1980′li yıllarda Uluslararası Enerji Ajansı koordinatörlüğünde yürütülen Ar-Ge çalışmalarının büyük etkisi olmuştur.

Günümüzün büyük güçlü rüzgâr santrallerin elektrik şebekesine bağlı ve birden fazla türbin içeren rüzgâr çiftlikleri biçimindedir. Rüzgâr santralinin ana yapı elemanı, aerojeneratör de denilen rüzgâr türbinidir. Bir rüzgâr türbini, çevredeki engellerin rüzgârı kesemeyeceği yükseklikte bir kule, bunun üzerine yerleştirilmiş bir gövde (ya da tekne) ve rotordan oluşur. Rotorlarının konumlarına (şaft eksenlerine) göre türbinler, yatay eksenli veya düşey eksenli olurlar. Elektrik üretim amaçlı modern rüzgâr türbinlerinin çoğunluğu yatay eksenlidir. Yatay eksenli türbinler, rüzgârın kuleyi yalamadan rotora çarpması durumunda ileri ya da üst rüzgârlı (up-wind), önce kuleye dokunup sonra çarka gelmesi koşulunda geri ya da alt rüzgârlı (down-wind) türbin adını alırlar. Açıklanan makinede rüzgâr enerjisi, Betz teoremi uyarınca maksimum %59,3 teorik verimle mekanik enerjiye çevrilebilir.

Yapılan sistem analizlerinde, rüzgâr enerjisi gelişiminde 60-100 m çapındaki sistemler (1-3MW) optimum büyüklük olarak tesbit edilmiştir. 1981′de ABD'de tesis edilen sistemler ortalama 50 kW'lık makinelerden sonra, makine başına ortalama olarak 1987′de 110 kW, 1997 yılında ise 750 kW ve günümüzde 6000kW'a yükselmiştir. Bu trend, büyük boyutlu türbinlere doğru kararlılıkla devam etmektedir. Bugünlerde ticari ortama girmiş makinelerin 500-750 kW arasında olanları en düşük fiyattan elektrik enerjisi üretebilmektedir.

Rotor bir göbek (hub) ile şafta bağlıdır. Rüzgârın kinetik enerjisi rotor tarafından mekanik enerjiye çevrilir ve şaftın dönüş hareketi gövde içerisindeki aktarım sistemine, oradan jeneratöre aktarılır. Aktarım sistemi, jeneratör ve yardımcı üniteler gövde içerisinde yer

alır. Rüzgâr türbinleri nispeten düşük rüzgâr hızlarında çalışırlar. Dişli kutusu devir sayısını yükseltir. Bu nedenle, senkron jeneratörde ihtiyaç duyulan devir sayısı dişli kutusu çıkış milinde temin edilir. Dişli kutularının aktarım oranı 1/20 ile 1/60 arasında olup, helisel dişli kutularının yanı sıra güneş-planet dişli sistemli aktarım kutuları görülmektedir. Dişli kutusu bulunmayan türbinler de yapılmış olup, bunlarda değişken hızlı direkt devinimli özel senkron jeneratörler vardır. Türbinlerin tanıtılan üniteleri dışında; hidrolik devinimli mekanik ve aerodinamik frenleme düzenleri, yönlendirme için elektrik motorlu yay mekanizmaları, mikroişlemcili logic kontrol-kumanda ve bilgisayarlı monitör sistemleri bulunmaktadır. Sistemlerin şebekeye bağlantısı soft starter ve konvertörle yapılmakta, şebeke bağlantı gerilimi 380-690 V, bağlantı frekansı 40-80 Hz olmaktadır.

Elektrik üretiminde kullanılan yatay eksenli türbinler; yüksek hızlı, düşük ilk hareket momentli, az kanatlı propeller türbinler, difüzörlü türbinler ve tornado türbinler olarak üçe ayrılır. Düşey eksenli türbinlerin ise Darrieus türbinleri, Darrieus-Savonius kombinasyonu türbinler ve Musgrove türbinler olmak üzere belli başlı üç tipi vardır. Propeller rotorların verimleri %45 iken, Darrieus rotorlarda verim %32′ye düşmektedir. Yaygın olan propeller türbinler, hız karakteristiğine göre değişken hızlı ve sabit hızlı olarak da ayrılırlar. Değişken hızlı türbinler daha çok kullanılır. “The World Directory of Renewable Energy” içerisinde yer alan rüzgâr türbini üreticisi 8 büyük firmadan alınan verilere göre, bugün için dünya piyasasında bulunan ve santral kurmak için kullanılabilecek rüzgâr türbinlerinin güçleri 110 kW ile 650 kW arasında değişmektedir. 250-750 kW arası türbinler yaygın biçimde bulunmaktadır.

Tümü yatay eksenli propeller tip türbinler olup, rotor kanat sayıları bir ile üç arasında değişmektedir. Yaklaşık %93′ü üç kanatlı, geriye kalan %7’si iki kanatlıdır. Genellikle üst rüzgârlı (up-wind) tip türbinlerdir. Rotor çaplan 8-65 m, rotor süpürme alanları 255-3320 m^2, rotor dönü hızlan 28-60 rpm arasındadır. Çalışmaya başlangıç rüzgâr hızı 3-4 m/s kadar olup, nominal güçlerini 14 m/s rüzgâr hızlarında üretmektedirler. Çalışmanın durdurulması (frenleme) rüzgâr hızı 20-28 m/s arasındadır. Rotorlann zarar görebileceği rüzgâr hızı 50 ve 70 m/s den büyüktür. Rüzgâr hızına göre rotor güç ayan için kanat açıları değişebilir aktif (stall) düzen kullanılmaktadır. Kanatlar polyester ile kuvvetlendirilmiş fiberglass veya epoksi ile güçlendirilmiş fiber karbondan yapılmakta ve çelik omurga ile desteklenmektedir. Rotor hub(göbek)’a direkt bağlanmakta, şaftın $2\text{-}8^0$ arasında bir eğimi olmaktadır. Hub(göbek) yüksekliği 30 ile 70 m kadardır. Mekanik frenleri disk fren iken,

aerodinamik frenleri aktif negatif kanat ayan olmaktadır. Makinelerin teknolojisi itibari ile emre amadelikleri %98-99 civarındadır.

Gürültü önlemek için türbin gövdeleri ses izolasyonludur. Kafes veya boru biçiminde olmak üzere iki temel kule tipi vardır. Boru biçiminde olan kuleler genelde daha hoş görünümlüdür. Kuleler çelik kafes, çelik konik boru, çelik silindir, beton konik boru ya da silindir biçiminde yapılmaktadır. Kafes kulelerin dışındaki konstrüksiyonlar iki ya da üç parçalıdır. Kafes kule ucuzdur ancak görüntü kirliliği nedeni ile hemen hemen terk edilmiştir. Rotor 3-26 ton, gövde 10-56 ton ve kule ağırlığı 12-88 ton arasında değişmektedir. Türbinler için hesaplanan çalışma ömrü 20 yıl kadardır. Bu ömrün 30 yıl olduğu savlanılmakla birlikte, konu test ve inceleme aşamasındadır. Türbin gücü, rüzgâr hızının, süpürme alanının ve güç faktörünün fonksiyonudur. Rüzgâr hızı yükseklikle arttığından, aynı çaplı bir rüzgâr rotorunun daha yüksek kuleye yerleştirilmesi ile elde olunabilecek güç artmakta ise de, kule ağırlığının ve maliyetin artması bir sınır koymaktadır. Türbinden bir yıl boyunca üretilebilecek enerji ise yıllık ortalama rüzgâr hızına ve frekansına bağlıdır.

Rüzgâr enerjisi için bir diğer uygulama alanı küçük güçlerde olmak üzere otoprodüktör elektrik üretimi ve mekanik enerji ile su pompajıdır. Küçük güçlü rüzgâr jeneratörleri birkaç yüz W ile birkaç kW arasında güce sahiptirler. Elektrik şebekesinden bağımsız olarak çalıştırılan bu makinelerde akülü depolama sistemleri bulunur. Bunlar küçük ve uzak yerler için güvenilir güç üretirler. Bu sistemler diğer enerji çevrim sistemleri (fotovoltaik veya dizel jeneratörler) ile entegre biçimde kullanılabilmektedir. Deniz fenerleri ve telekomünikasyon alanında tipik uygulama örnekleri vardır.

1990 yılında dünya çapında bir milyonun üzerinde rüzgâr su pompaj sisteminin işletilmekte olduğu tahmin edilmektedir. Halen bir yılda tesis edilen rüzgâr pompaj sistemleri tahminen 10 binin üzerindedir. Rüzgâr mekanik su pompajında, temelde klasik çok kanatlı çarklar kullanılmaktadır. Bu makineler düşük rüzgâr hızında çalışabilen, yüksek ilk hareket momenti sağlayabilen ve su pompası ile bağlantılı olarak çalışan ünitelerdir. Rüzgârla su pompajı konusunda geliştirilmiş bulunan mekanik sistemlerden elde edilen suyun maliyetleri, rüzgâr hızına ve talep edilen pompaj yüksekliğine bağlı olarak değiştiğinden elde edilen suyun maliyeti m^3 başına maliyet yerine mekanik eşdeğer enerji maliyeti olarak verilmektedir. Bu değer 3 m/s rüzgâr hızı için 3 $/kWh civarındadır,

yapılabilecek iyileştirmeler ile bu rakamın 0,8 $/kWh'a düşürülebileceği tahmin edilmektedir.

4. RÜZGÂR SANTRALLERİNİN ŞEBEKE BAĞLANTILARI VE GÜÇ KALİTESİ

4.1. Literatür Taraması

H. Li'nin çalışmasına göre şebekeye bağlı rüzgâr türbinlerinin güç kalitesi incelenmiştir. Bu çalışmada şebekenin güç kalitesini önemli ölçüde etkileyen, ortak bağlantı noktasındaki "flicker"(dalgalanma)'ların oluşmasına sebep olan nedenler aerodinamik ve mekanik etkiler de hesaba katılarak Matlab Simulink ortamında modellenmiştir. Yapılan çalışma sonucu gerilim dalgalanmalarının ağırlıklı olarak şebeke gücü olduğu görülmüştür. Aynı zamanda türbinin çalışma noktası ve generatörün Q-P karakteristiğinin en küçük dalgalanma(flicker) salınımını belirlemede önemi olduğu görülmüştür [19].

Alejandro JURADO, Mario BRUGNONI'nin çalışmalarına göre sincap kafesli asenkron motorlardan oluşmuş bir rüzgâr türbini tarlasına bağlı bir şebekenin 3 fazlı kısa devre hata akımına maruz kaldığında, geçici kararlılık sınırları incelenmiştir. Asenkron motorun terminallerinde gerilim düşümünü önlemek için reaktif güç enjekte yöntemi uygulanmıştır. ATP/EMTP programı yardımıyla yapılan simülasyon çalışmasında örnek bir şebeke üzerinde oluşturulan kısa devre durumunda geçici rejimler simule edilmiş ve şebekenin çeşitli noktalarına kapasitör bankaları bağlanarak reaktif kompanzasyonun kararlılık üzerindeki etkileri incelenmiştir [20].

Maryam Bahramipanah ve Zagros Shahooei'ın çalışmasına göre farklı generatör tipleri geçici rejim stabilitesi yönünden incelenmiştir. 3 tip generatör incelenmiştir. Bunlar:
- Sincap Kafesli Asenkron generatör
- Çift Beslemeli Bilezikli Asenkron Generatör
- Doğrudan Tahrikli (Direct Drive) Senkron Generatör

Yapılan çalışma sonucunda şu bulgulara ulaşılmıştır;
1- Sabit hızlı güç sistemlerinde (Asenkron Generatörlü sistem) hem gerilim hem de geçici rejimlerdeki stabiliteler iyi gibi görünse de Bilezikli Asenkron Generatör kadar iyi değildir. Aynı zamanda bilezikli asenkron generatörün arıza durumunda reaktif kompanzasyon gibi davranması arızalarda kısa devre akımını sınırlaması bakımından etkilidir.

2- Sistemin optimum çalışma noktasına yaklaştıkça stabilitesinin arttığı gözlenmiştir.
3- Sisteme reaktif güç kompanzasyonu olarak FACT cihazlarının kullanılmasının stabiliteyi arttırdığı görülmüştür.
4- Rüzgâr türbinleri ile birlikte enerji depolama sistemlerinin de birlikte kullanılmasının sistem stabilitesini arttırdığı görülmüştür [21].

Emmanouil Loukarakis çalışmasına göre güç sistemlerine entegre çalışan rüzgâr santrallerinin şebekeye olan etkilerinin monte-carlo yöntemi ile olasılık ve istatistik temelli bir incelemesi yapılmıştır. Rüzgâr santrallerinin mevcut şebekelere entegre ve ortak çalışması sonucunda, şebekeye olan olumsuz etkilerinden söz edilebilir. Bu geçici rejim etkilerinden dolayı bazı klasik cihazların devre dışı kalma durumları ile karşı karşıya kaldığı görülmektedir. Bu sebeple şebekelere entegre edilecek rüzgâr santralleri için değişik senaryolar çalışılmaktadır.

Şebeke entegrasyon oranları %14,8 ve %30,5 olan iki model simule edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre şebekeye entegrasyon oranının şebekenin stabilitesine ciddi etkileri görülmemiştir. Aynı zamanda geliştirilen modelin herhangi bir şebekeye uygulanıp bu şebekenin rüzgâr entegrasyon oranı etkileri incelenebilmektedir.

[6] no'lu referans'da 37 baralı bir radyal şebekye en zayıf bara'dan bağlanan bir rüzgâr türbininin şebekeye olan etkileri güç akış analizi ile incelenmiştir. Sistemde rüzgâr santrali PQ generatörü olarak modellenmiştir. Şebekeye rüzgâr gücü girdisinin aktif güç kaybı, gerilim düşümü ve yükleme parametreleri açısından şebekeye etkileri incelenmiştir. Aynı zamanda bağlı bulunan kapasitör bankalarının da değişimi incelenmiştir. Çalışma PSAT Matlab paketi ile yapılmıştır.

Çalışma'da şu sonuçlara ulaşılmıştır;
Uygun rüzgâr enerjisi girdi oranı ile,
- Radyal şebekenin tüm baralarının gerilim profilleri iyileşebilir.
- Aktif güç düşümü düşer ve bu da şebekenin toplam verimini yükseltir.
- Maksimum yüklenme noktası yükselir ve bu da şebekenin gerilim stabilitesini iyileştirir.
- Sistem baralarının sürekli rejim gerilim seviyelerini daha da iyileştirmek ve maksimum yüklenme kapasitesinin arttırmak için paralel kapasitör bankaları gereklidir [22].

Raj K.'nın çalışmasına göre Jamaika Adası'nda yerleşik bulunan bir rüzgâr türbini şebekesinin yıldırım darbesi altındaki geçici rejim darbeleri incelenmiştir. Çalışmada 69 kV şebeke EMTP/ATP simülasyon ortamında oluşturulmuş ve baralara uygulanan gerilim darbesi altında sistemde yükselen gerilimler incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda 350 kV'luk yıldırım darbesi uygulandığında sistemde 2MV luk 1msn lik darbe gerilimlerinin oluştuğu görülmüştür. Bu durumda sistemde aşırı gerilim koruyucuların kullanımının kaçınılmaz olduğu görülmektedir [23].

Hussein Abdelhalim, Amro M. Farid, Ambrose A. Adegbege, Luis Rouco, Kamal Youcef-Toumi çalışmalarına göre yüksek rüzgâr enerjisi girdi oranlı şebekelerde, türbin ayarlayıcı-düzenleyici sistemlerin, küçük sinyal stabilitesi üzerindeki etkileri simulayon ortamında incelenmiştir. Senkron generatörlü 14 baralı bir sistem modellenip, sistem %50 rüzgâr gücü oranı ile analiz edilmiştir. Bu çalışma sonucunda, yeni kontrol sistemleri ile şebekeye kontrollü olarak rüzgâr enerjisi ekleyip çıkartmanın, tüm sistemin küçük sinyal stabilitesini iyileştirdiği görülmüştür [24].

Li Lin; Huilong Zhao; Tao Lan; Qian Wang; Jie Zeng çalışmalarına göre Bilezikli Asenkron motorlu rüzgâr türbini ile Senkron gerenarörlü rüzgâr türbini karşılaştırmalı analizleri yapılıp şebeke stabilitesi açısından incelenmiştir. İki generatör aynı şebekeye bağlanarak incelenmiş ve Cigre B4-34 sistemi ile incelenmiştir.
Şu sonuçlar elde edilmiştir;

1- Arızanın oluştuğu noktanın yerinin, şebekenin geçici rejim stabilitesine etkisi, şebekede bir rüzgâr türbini olup olmamasından daha etkilidir.
2- Sistemde rüzgâr gücü girdisi arttıkça ve şebekenin kontrolü rüzgâr türbinine geçtikçe stabilitenin arttığı, tersi durumda azaldığı görülmüştür.
3- Senkron generatör ile Bilezikli asenkron motorun hangisinin şebeke stabilitesi açısından iyi olduğu, daha ileri araştırmalar gerektirmektedir [25].

István Erlich,Tobias Neumann Fekadu çalışmalarına göre rüzgâr türbinlerinin Sıfır Dizi Akımlarının kontrolünün arıza akımları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarında baralarda oluşan kısa devre durumları ve pozitif ve negatif sıralı akım bileşenler incelenmiştir. Sistemde oluşan faz-faz kısa devre arızalarında, sisteme negatif sıralı akım enjekte etmenin, sistemin kısa devre akım değerini, nominal yük akımına kadar düşürdüğü görülmüştür. Hatta yüksüz durumlarda sıfıra kadar düştüğü

görülmüştür. Ancak bu durum klasik koruma cihazlarının arızayı algılamasını ve müdahale etmesini güçleştirmektedir. Bu durumu engellemek için önerilen sistem ile negatif sıralı akım bileşeninin sisteme enjekte edilmesinin belirli bir seviyede kontrol edilerek, koruma elemanlarının arızayı algılaması ancak arıza akımının da çok yüksek olmaması şeklinde bir optimum çalışma noktası ayarlanması sağlanmıştır. Bir başka önemli durum da, negatif bileşen akımı sisteme enjekte edildikçe sistemin pozitif bileşenlerini kontrol etmek zorlaşmaktadır. İlgili kontrol sisteminde bu durum da incelenmiştir [26].

B. Kekezoglu, A. Durusu çalışmalarına göre Türkiye'de Marmara Bölgesi'ne bulunan bir şebeke NEPLAN ile modellenip sistem normal hali ve 60 MW rüzgâr türbini eklenerek ayrı ayrı simule edilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Çalışma sonucunda Şebekeye rüzgâr türbini bağlandığında bara geriliminin yükseldiği ancak izin verilen ölçüler dahilinde kaldığı görülmüştür. Diğer taraftan ise sisteme 60 MW üzerinde bir güçte bir türbin bağlanması durumunda veya 60 MW türbinin daha düşük kısa devre gücü olan bir şebekeye bağlanması durumunda bara gerilim yükselmesinin izin verilen sınırlar dışına çıkacağı görülmüştür. Çalışma göstermiştir ki, bir şebekeye rüzgâr türbini bağlanacak ise, bara gerilim yükselmeleri açısından da sistemin mutlaka incelenmesi gerekmektedir [27].

Wei Qiao çalışmasına göre bilezikli asenkron generatörlü rüzgâr türbininin şebekeye olan etkileri, İngiltere'de bulunan 10 makineli 39 baralı bir sistem üzerinde incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, Bilezikli Asenkron motorun PWM sürücüler ile dürülüp doğru bir şekilde kontrolü sağlandığında şebeke arızalarının üstesinden gelebildiği görülmüştür. Bu bağlamda konvansiyonel senkron generatör ile birlikte kullanıldığında, elektronik sürücüler ile sürülen rotoru sargılı asenkron generatörün açısal stabilite konusunda aralarında bir problem yaratmadığı görülmüştür. PSCAD/EMTDC ile yapılan analizlerde şebekeye rüzgâr türbini eklenmesi ile daha iyi geçici rejim stabiltesi elde edildiği görülmüştür [28].

H. Nikkhajoei çalışmasına göre asenkron generatörlü rüzgâr türbinleri için DC baralı gerilim kaynakları yerine (AC-DC- AC) doğrudan AC-AC dönüşümü yapan Matris Dönüştürücükullanmanın, güç kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu dönüştürücüsekron hız ayarını yumuşak bir şekilde yapabildiğinden, generatör çalışma modunda rüzgâr türbinin değişken hızlarını daha yumuşak bir şekilde takip etme konusunda oldukça başarılıdır. Böylelikle rüzgâr hız değişimleri fazla olsa da yüksek güç

kalitesi almak mümkündür. Mevcut Uzay Vektör PWM kontrol sisteminin matris dönüştürücü için uygun olmamasından ötürü çalışmada farklı bir kontrol tekniği önerilmiştir. Sistemin dinamik modelleri oluşturulmuş ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır [29].

Maciej Mroz çalışmasına göre Polonya'nın yüksek gerilim şebekesine rüzgâr Türbinlerinin etkileri incelenmiştir. Çalışmada, her biri bir IGBT sürücü ile sürülen bilezikli asenkron generatörlerin bulunduğu, 15 adet pitch kontrollü V 80 – 2 MW rüzgâr türbininden oluşan, 30 MW gücündeki Zagorze rüzgâr Tarlası'nda ölçümler yapılmıştır. Sistem gerilimi 110 kV dur. Yapılan ölçüm çalışmalarında sisteme rüzgâr enerjisi enjekte edildiğindeki etkiler incelenmiştir. Yapılan ölçümlerden şu sonuçlar elde edilmiştir;

- Sistemin yüksek reaktif enerji çektiği görülmüştür. Bu durumda rüzgâr türbin sisteminin ekonomisinin, kullanılan kompanzasyon sistemine bağlı olduğu görülmüştür.
- Tüm ölçüm süresi boyunca gerilim değerlerinin izin verilen seviyeleri geçmediği görülmüştür.
- Özellikle 5. harmoniklerde ciddi değerler görülmüştür. Sistemdeki harmonik bozulmaların küçük bir kısmının rüzgâr türbininden kaynaklandığı görülmüştür.
- Sistemde ciddi voltaj dalgalanmaları görülmemiştir.
- Tüm ölçümler rüzgâr türbininin şebeke sistemine olumsuz etkilerinin olmadığını göstermiştir [30].

H. J. Su, H. Y. Huang, ve G. W. Chang çalışmalarına göre matlab Simulink yardımı ile, sabit hızlı rüzgâr (11 m/sn) ve Gaus dağılımı ile modellenen rüzgâr hızları altında iki olay ile rüzgâr türbini modelleri incelenmiştir. Gerilim değişiminin sabit hızlı rüzgâr'da Gaus dağılımına göre daha az olduğu görülmüştür [31].

Saeid Ghaderi çalışmasına göre hibrid rüzgâr türbininin fuzzy ile pitch açısal kontrolü çalışılmıştır. Güç kalitesini artırmak adına hem gerilimin hem de frekansın kontrol edildiği hibrit bir sistem oluşturulmuştur. Oluşturulan sistemde pervanelere bağlı bir asenkron generatör ve buna paralel bağlı bir senkron generatör Matlab Simulink ile modellenmiştir. Senkron generatör Gerilim düzenleyici olarak kullanılmıştır. Sistem hızı ve frekansı da asenkron generatör üzerinden kontrol edilmektedir. Tüm sistem için Fuzzy Konrol sistemi oluşturulmuştur. Yapılan simuasyonlar sonucunda sistemin yüksek güç kalitesi sağladığı görülmüştür [32].

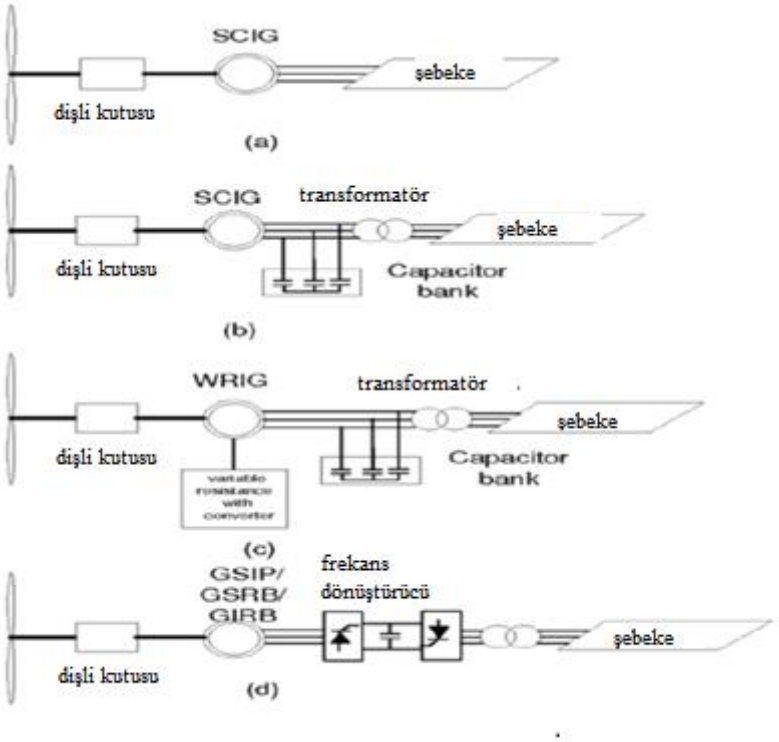
Mauna REKIK çalışmasına göre rüzgâr türbinleri güç kalitesinin artırımında aktif filtrelerin kullanımı incelenmiştir. Ortak bağlantı noktasın uygulanan bir aktif filtre sistemi Matlab Simulink ortamında modellenip simülasyonlar yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, harmonik bozulmalardaki iyileşmeler ve THD değerlerindeki iyileşmeler grafiksel olarak elde edilmiştir [33].

4.2. Rüzgâr Enerjisi ile Şebeke Entegrasyonunda Teknik Problemler

Rüzgâr türbinin şebeke entegrasyonunda birçok problem ile karşılaşılır. Rüzgâr Türbinin enterkonnekte sistemine bağlantısındaki zorlukları farklı başlıklar altında incelenebilir. Bu konuyu beş alt başlıkta incelenebilir.

- Geçici zaman Kararlılığı
- Voltaj kontrolü
- Frekans Kontrolü
- Kısa Devre Akımları
- Güç Kalitesi Sorunları

Güç sistem ağının entegrasyona etkisi de önemli bir konudur. Şekil 4.1‘de tipik rüzgâr türbini bağlantıları verilmiştir.



a. SCIG = Sincap kafesli asenkron jeneratör

b. WRIG = Sargılı rotor endüksiyon jeneratörü

c. PMSG = Sabit mıknatıslı sekron jeneratör

d. WRSG = Sargılı rotor sekron jeneratör

Şekil 4.1. Tipik rüzgâr türbini bağlantıları

4.2.1. Geçici zaman kararlılığı

Genel olarak jeneratörler için yük girişinde voltaj ve frekans dalgalanmaları en aza indirgenmek istenir. Mekanik yapının ve elektrik gücü arasındaki dengesizlikten dolayı hata (Voltaj düşümü) artabilir. Ağ üzerindeki reaktif güç çekilere hata düzeltilebilir. Eğer yeteri kadar reaktif güç karşılanmazsa voltaj düşümü devam eder. Senkron jeneratör uyarmasında ile reaktif güç çıkışı arttırılır böylece voltaj istenilen değerlere çıkartılır.

4.2.2. Voltaj kontrolü

Güç sistemlerinde ±5% , ±7% düğüm voltaj dalgaları göz ardı edilebilir. Sekron jeneratörlerde ve diğer kompanzasyon sistemlerini düğüm voltajı düşümünü reaktif gücü

çekerek regüle edilebilir. Buna rağmen indüksiyon jeneratörler reaktif gücü çeker ve reaktif güç akışını kontrole gerek yoktur.

Değişken hızlı jeneratörlerde bağlantı noktasında voltaj kontrolü yapmak çok mümkün değildir. Çünkü rüzgâr türbinleri genel olarak kapasitiftir.

4.2.3. Frekans kontrolü

Büyük şebekelerde jeneratör frekansının istenildiğinde ±0.1% değerinde frekans kontrolü sağlanır. Senkron jeneratörlerde ya da asenkron jeneratörlerde maksimum güç eğrisi için frekans cevabı operasyonlar ile değiştirilebilir. Bu nedenle belirtilen aralıkta frekans kontrolü rüzgâr türbinleri için yapılabilir.

4.2.4. Kısa devre akımları

İndüksiyon rüzgâr jeneratörlerinde kısa devre akımı anlık görülen bir hatadır. Voltaj değişimlerinin artmasıyla bağlantı kopma seviyeleri artar.

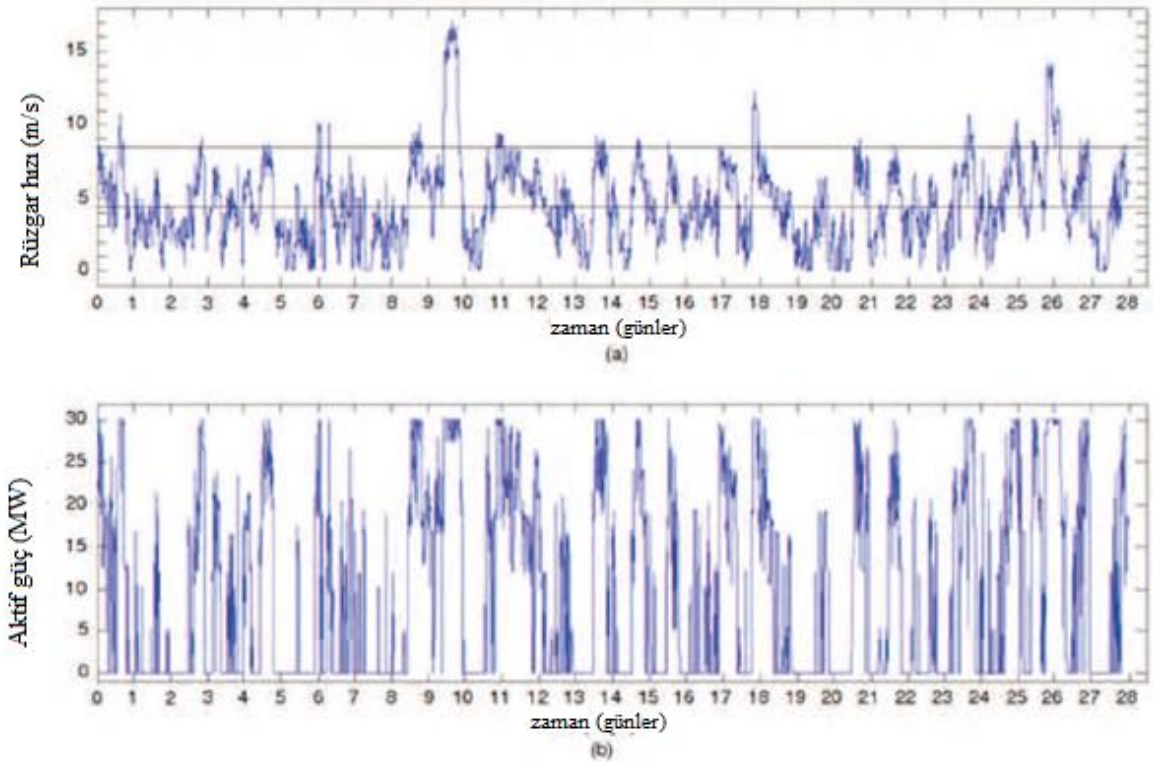
4.2.5. Güç kalitesi sorunları

Voltaj harmonik değişimleri ve titreşimler rüzgâr güç jeneratörlerinin kalite etkilerinin temelinin oluşturur. Harmonikler güç sistemlerinde oluşmaktadır. Değişken hızlı türbinleri güç elektroniği devrelerinden oluştuğundan dezavantajlıdır. Voltaj dalgalanmaları sabit hız türbinlerinde güç jeneratörlerinin kararsızlığından oluşur.

4.2.6. Aktif güç

Aktif güç üretimi ve kanat hızı (Şubat 2008, 28 gün)arasındaki ilişki gerçek değerler rüzgâr türbinin için kullanılarak Zacatecas, Meksika bölgesinde gerçekleştirilmiştir. 10 dakika içerinde 4032 nokta kullanılmıştır. Çizelge 4.1‘de üst grafikte rüzgâr hızı, alt grafikte aktif güç değeri 10 dakikada bir alınarak işlenmiştir.

Çizelge 4.1. a) Rüzgâr hızı b) Aktif güç grafikleri.



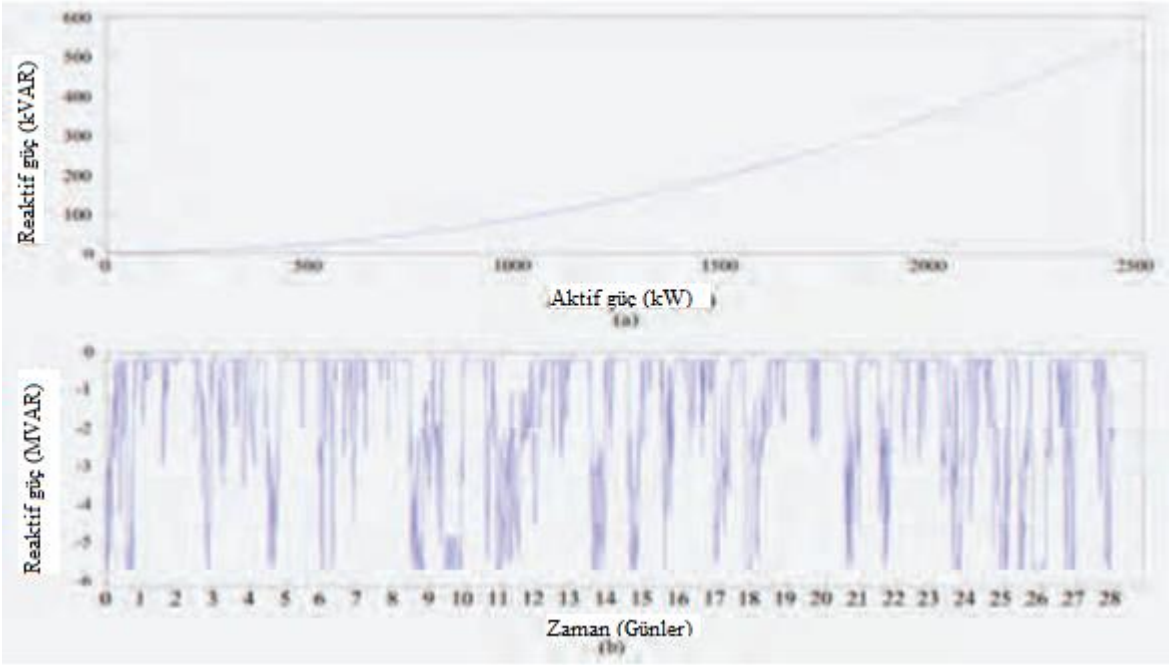
4.2.7. Reaktif güç

Reaktif güç indüksiyon makinası ve Boucherot methodu uygulanarak kararlı durum modeli kullanarak hesaplanabilir.

$$Q = \frac{V^2(X_c - X_m)}{X_c X_m} + \frac{X\left(V^2 - 2RP\right) - X[\left(V^2 - 2RP\right)^2 - 4P^2\left(R^2 + X^2\right)]^{\frac{1}{2}}}{2R^2 + 2X^2} \quad (4.1)$$

Burada V voltaj, P aktif güç, *X* stator toplam reaktansı ve rotor reaktansı, *Xc* kapasitör reaktansı, *Xm* manyetizma reaktansı, and *R* stator ve rotor toplam direnci. Çizelge 4.2' de aktif güç üretimi ve reaktif güç arasındaki ilişki belirtilmiştir. Rüzgâr türbini Zacatecas, México'da bir aylık (Şubat,2008) değerleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.2. a) aktif güç üretimi ve reaktif güç grafiği b) reaktif güç ve zaman grafiği



4.3. Rüzgâr Türbinlerinin Güç Kalitesi Karakteristikleri ve Ölçümleri

Şebekeye bağlı sistemlerde rüzgâr enerjisi girdisi, güç kalitesine önemli oranda etkimektedir. Rüzgâr türbinlerine ait güç kalitesi parametrelerinin ölçümleri IEC 61400-21 standardında belirtilmiştir. Testler mümkün olduğunca sahadan bağımsız olmalıdır ki yapılan ölçüm sonuçları başka sahalar için de uygun bir şekilde kullanılabilsin.

Test sonuçlarının geçerliliği test koşullarının doğru uygulanmasına bağlıdır. Rüzgâr türbini doğrudan orta gerilim şebekesine bağlanmalı elektriksel karakteristiklerin ölçümü türbin terminallerinden yapılmalıdır. Türbinin etiket değerlerinin verilmesi mutlaka gereklidir ve etikette türbinin aktif gücü Pn, görünür gücü Sn, nominal faz arası gerilimi Un, ve nominal akımı In, bilgileri yer almalıdır. Aynı zamanda terminallerin lokasyonu ve ölçümler ile ilgili diğer gerekli parametreler de mutlaka belirtilmelidir.

Standarda göre rüzgâr türbini güç kalitesi ölçümlerini riske atacak yedi parametre vardır: Gerilim salınımları, harmonikler ve iç harmonikler, gerilim düşümleri, aktif güç, reaktif güç, şebeke koruması ve yeniden bağlanma zamanı.

4.3.1. Akım harmonikleri iç harmonikler ve yüksek frekans cevapları

Gerilim ve akım harmonikleri genelde kendini tüketici şebekesinde gösterir. Lineer olmayan ve elektronik yükler, doğrultucular ve eviriciler harmonik bileşen yaratan bazı tüketici kaynaklarıdır. Harmoniklerin yarattığı etkiler arasında, aşırı ısınma, koruma elemanlarında hatalı operasyonlar, ekipman arızaları ve haberleşme ekipmanlarında girişimler bulunmaktadır. Standart, rüzgâr türbinlerinin sürekli rejimde çalışması ve reaktif güç tüketiminin sıfıra yakın olması için harmonik, iç harmonik ve yüksek frekans cevaplarını değerlendirmek için farklı prosedürleri özellikle tanımlar. Bunun anlamı, eğer uygulanabilirse reaktif kontrol noktası sıfıra ayarlanmalıdır.

Her bir akım harmoniği iç harmoniği, yüksek frekans cevabı ve toplam harmonik bozulma (THC) değerleri In in yüzde (%) değeri olarak verilmeli, aynı zamanda rüzgâr türbininin yüklenme oranı % olarak Pn in %si şeklinde verilmeli. Akımın harmonik bileşenleri, temel frekans olan 50 Hz'in 50 katına kadar olan frekans değerleri için RMS şeklinde verilmeli. THC şu formüle göre hesaplanmalı

$$THC = \sum_{h=2}^{50} i_{sg,h}^2 . 100 \tag{4.2}$$

$$i_{sg,h} = \frac{I_{sg,h}}{I_n} \tag{4.3}$$

Isg,h burada h derecesinden harmoniklerin alt sırasını ifade etmektedir. Akım iç harmonikleri bileşenleri, IEC 61000-4-7 Ek A'ya göre, 2 kHz seviyesine kadar mutlaka alt RMS grupları olarak ifade edilmelidir. Daha yüksek frekans grupları, 2 – 9 kHz seviyeleri arasında Ek B'ye göre alt RMS grupları olarak ifade edilmeli. Her %10 'luk güç birimi için en azından 10 zaman serili anlık akım ölçümü yapılmalıdır (üç test ve üç faz). Her 10 zaman serisi için, 10 adet her frekans bandı için minimum ortalama ve 10 adet maksimum ortalama raporlanmalıdır.

4.3.2. IEC 61000-4-7 'ye göre alt kategorili harmonik, iç harmonik ve yüksek frekans akım bileşeni ölçümü

Harmonik akım içeriğinin ölçülmesi fs örnekleme oranındaki elde edilen ayrık bir sinyal için tanımlanmıştır. Ölçümle ilgili en basit araç Tw süreli bir sinyal penceresine Ayrık Fourier Dönüşümünün (DFT) uygulanmasıdır.

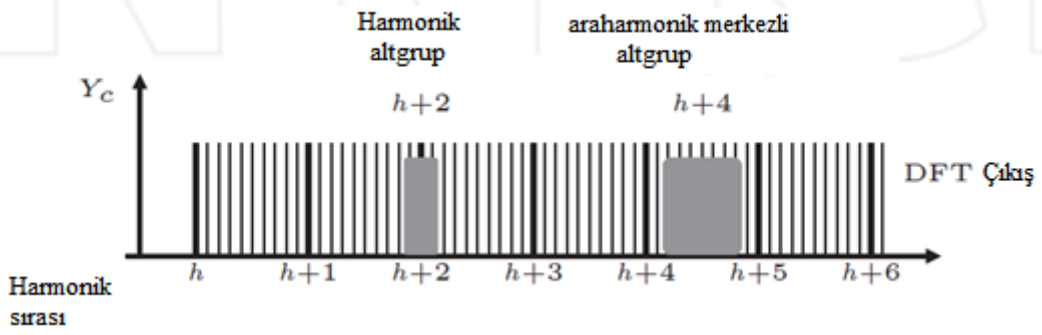
Standart 50 Hz sistemler için 10 saykıl, 60 Hz sistemler için 12 saykıl sürelik bir karesel (rectengular) pencere önerir(örneğin yaklaşık 0,2 sn). Tam olarak bu ölçüler için spektral sızıntının, spektral çözünürlüğü 5 Hz ve katları olan spektral komponentler üzerinde bir etkisi yoktur. Bu hedefe ulaşmak için Faz Kilitli Döngü Sistemi anlamında, temel frekansa kilitli örnekleme frekansları kullanılması gereklidir.

Son olarak ise 9 kHZ'e kadar olan spektral bileşenleri ölçebilmek için 18 kHz'in üzerinde örnekleme oranları kullanmak gereklidir.

Alt kategorili harmonik, iç harmonik ve yüksek frekans akım bileşenlerinin hesaplanması

Her pencereye DFT uygulanması ile fs/2 'ye kadar olan DC bileşenleri ile 5 Hz çözünürlükte, Ck spektral bileşenleri elde edilir. Çizelge 4.3'de alt harmonik grupları ve alt iç harmoniklerin gruplandırıldığı görülmektedir.

Çizelge 4.3. Alt harmonik grupları ve alt iç harmonik'lerin gruplandırılması



Bileşenlerin değerleri aşağıdaki formül ile DFT'deki farklı bileşenlerin gruplandırılması ile elde edilebilir.

$$I_{sg,h}^2 = \sum_{i=-1}^{1} c_{k+i}^2 \tag{4.4}$$

$$I_{isg,h}^2 = \sum_{i=2}^{p} c_{k+i}^2 \tag{4.5}$$

Burada k: DFT tarafından sağlanan, h. harmonik bileşen ile ilgili (50 Hz için k=10.h , 60

Hz için k=12.h) olan spektral seviyeyi ifade etmektedir. P değeri 50 Hz için 8, 60 Hz için 10 olmalıdır.

Yüksek frekans komponentlerinin değerleri 2 ile 9 kHz arasında 200 Hz bandlarla DFT içindeki spektral seviyelerin gruplanması ile elde edilir. k indeksi kullanılarak b= 2100, 2300 …8900 Hz bandlarındaki yüksek frekans bileşenleri I_b şöyledir:

$$I_b^2 = \sum_{i=1-p}^{p} c_{k+i}^2 \tag{4.6}$$

P değeri 50 Hz sistemler için 20, 60 Hz sistemler için 25 olmalıdır.

Prosesi yumuşatma

Her bir 0,2 sn'lik pencere için yukarıdaki denklemler bize Isg,h, Iisg,h ve Ib 'yi verir. (10 minimum zaman serisi için her bir h ve b değerine karşılık toplamda 3000 değer eder). Pencereler arasında kesintili geçişleri önlemek için, her bir h ve b değerinden elde edilen akım alt grupları bu 3000 değer zaman sabiti 1,5 s olan birinci alçak geçirgen filtre uygulanarak yumuşatılır. Bu filtre örnekleme frekansı 5 S/s olarak tasarlanmalıdır çünkü, I değerleri her bir 0,2 sn için uygundur. Dahası, filtre çıkışında doğru bir şekilde 3000 değer elde edebilmek için filtre transienti ile ilgili olarak ilk 50 değeri elimine etmek gereklidir.

4.3.3. Gerilim düşümü cevapları

IEC 61400 -21'in ana hedeflerinden birisi de klasik santraller gibi kontrollü ve kaliteli elektrik enerjisi üretimi sağlayabilmeleri adına, rüzgâr enerji üretim sistemlerinde kullanılmak üzere bir metodoloji sağlamaktır. Dahası, esas ana odak noktalarından birisi de, bu türlü yenilenebilir enerji kaynakları, şebekelere bağlandığında, şebekelerde oluşacak durumlar ile baş edebilmesidir. Elektrik şebekesinde gerilim düşümleri, rüzgâr türbinlerinin spesifik bir problemidir. Gerilim düşümleri, şebekede oluşan hatalar sonucunda oluşan gerilim çökmeleridir. Bu olay genelde rastgeledir ve büyüklüğü ve süresi ile karakterize edilir. Geçmiş tecrübeler, rüzgâr türbinlerinin şebekede oluşan hatalardan sonra şebekeye bağlı kalması konusunda şüphelere sebep olmaktadır. Bu standard, gerilim çökmelerinde rüzgâr türbinlerini, şebekenin stabilizesine aktif olarak uyum göstermesini

kontrol etmeye çalışır ve bu amaçla özel bir test tanımlanmıştır.

Bu test, türbinin şebekeye bağlı olmadığı durum için tanımlanmıştır. Böylece şebekenin gerilim şekline bir etkisi olmayacaktır. Test, rüzgâr türbininin gerilim düşümüne verdiği cevabı onaylar. Türbin aktif güce göre iki durumda çalıştırılır. %10 Pn ve %30 Pn arasında ve %90 Pn in üzerinde olacak şekilde altı adet gerilim düşümü, büyüklüğü ve süresi ile tanımlanır. Çizelge 4.4'te Türbinin aktif güce test serilerinin gösterilmiştir.

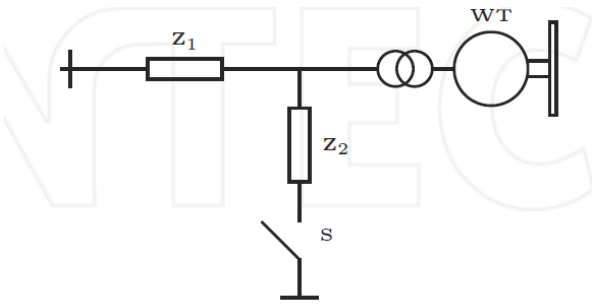
Çizelge 4.4. Türbinin aktif güce test serileri

Olay	Faz-faz gerilim büyüklüğü	Pozitif gerilim bileşeninin büyüklüğü	Süre (s)
VD1[1]	0.90 ± 0.05	0.90 ± 0.05	0.5 ± 0.02
VD2[1]	0.50 ± 0.05	0.50 ± 0.05	0.5 ± 0.02
VD3[1]	0.20 ± 0.05	0.20 ± 0.05	0.2 ± 0.02
VD4[2]	0.90 ± 0.05	0.95 ± 0.05	0.5 ± 0.02
VD5[2]	0.50 ± 0.05	0.75 ± 0.05	0.5 ± 0.02
VD6[2]	0.20 ± 0.05	0.60 ± 0.05	0.2 ± 0.02

[1] Simetrik üç faz gerilim düşümü

[2] iki faz gerilim düşümü

Bu test serileri, ölçüm prosedürlerinde, kısa zaman dilimi içerisinde, gerilim düşümü etkileri geçinceye kadar, rüzgâr türbininin terminallerindeki aktif güç, reaktif güç, akım ve gerilim değerlerinin zaman serileri elde edilmesinde kullanılır. Test düzeneğinde gerilim düşümü empedans üzerinden iki veya üç fazı toprağa bağlayarak veya birbirine bağlayarak, bir yükseltici trafo ile oluşturulur. Şekil 4.2'de ölçüm düzeneği için kullanılan test düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Ölçüm için kullanılan test düzeneği

Gerilim düşümü s anahtarının kapatılmasıyla oluşturulur. Kapatıldığında Z_2 üzerindeki değerler detaylı bir biçimde okunur. Z_2, türbin bağlı değilken oluşan gerilimlerin standartta olması gereken değerlere göre ayarlanır. Z_1 in görevi kısa devre durumunda üst şebekedeki etkileri minimize etmektir. Z_1 in değeri üst şebekenin kısa devreden etkilenmeyeceği ancak testte ölçülmek istenen değerleri de bozmayacağı bir değere ayarlanır.

4.3.4. Aktif ve reaktif güç

Standart, rüzgâr Türbininin aktif ve reaktif güç yetenekleri bakımından da incelemek ister. İnceleme farklı farklı testlerle yapılır. Bazıları sadece rüzgârın hızına yöneliktir. Bazıları da hem rüzgâr hızına hem de türbin regülasyon sistemine yöneliktir.

Aktif güç

Aktif güçlerin incelenmesi için 3 tip test vardır. Öncelikle maksimum güç, her 1m/s rüzgâr hızı ile 15 m/sn rüzgâr hızları arasındaki, 10 dak. seri içerecek şekilde en az 5 zaman serisinden ölçülür. Ölçülen güç değerleri 0,2 sn'lik ve 60 sn lik ortalama datalara dönüştürülür.

- P0.2 10 dk'lık kayıt süresi boyunca 0,2 sn'lik pencerelerdeki en yüksek değer olarak kaydedilir
- P60 10 dk'lık kayıt süresi boyunca 0,2 sn'lik pencerelerde en yüksek 60 sn'lik değer olarak ortalama olarak hesaplanır.
- P600 10 dk'lık kayıt süresi boyunca 0,2 sn'lik pencerelerde en yüksek 600 sn'lik değer olarak ortalama olarak hesaplanır.

Diğer taraftan, rüzgâr türbininin aktif güç çalışma noktası ayar kontrolü modunda ve rampa oranı limit kontrol modunda çalışabilme yeteneği test edilmelidir. Her iki test için de sonuçlar, 0,2 sn ortalama verilerden hesaplanan aktif güç, rüzgâr hızı ve kullanıma hazır aktif güç, şeklinde olmalıdır. Kullanıma hazır aktif güç, rüzgâr türbininin kontrol sisteminden elde edilmelidir.

Reaktif güç

Reaktif gücün değerlendirilmesi için iki tip test söz konusudur. İlk test, rüzgâr türbininin hem endüktif güç hem de kapasitif güç için kabiliyetini ölçer. Her iki durum için de ölçümler birer dakikalık 30 zaman serisi boyunca %10 'luk artımlar halinde 0-100% güç değerleri için toplanan aktif ve reaktif güç değerleri ele alınır.

Diğer taraftan, ayar değerine göre reaktif güç kontrolü d mutlaka ölçülmelidir. Bunun için iki durum göz önüne alınır. Ayar noktası sıfıra ayarlanmışken ki reaktif güç ve reaktif gücün basamaklı değişimi halindeki ölçümü. İlki için durum, maksimum reaktif güç için olan ölçüm ile aynıdır. İkinci durum için ise toplam 6 dakikalık ölçüm alınır. 2'şer dakikalık periyotlarda sıfırdan başlayıp maksimum endüktif ve maksimum kapasitif güçler için ölçüm alınır.

Sonuçlar, 0,2 sn'lik pencereler içinde reaktif güç ve reaktif güç set değerleri şeklinde kaydedilir.

4.3.5. Gerilim dalgalanmaları (Flicker)

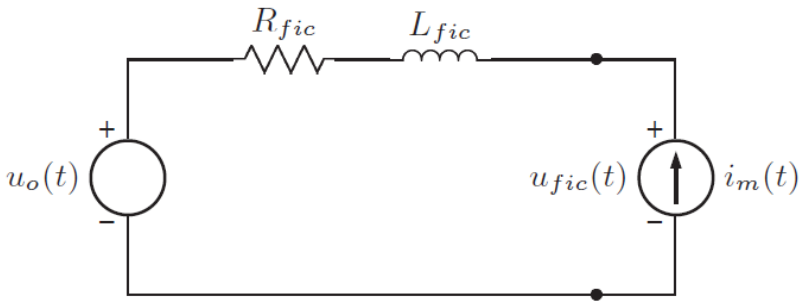
Aydınlatma sistemlerinde kendisini gözle görülür şekilde belli eden, gerilim kaynağına bağlı ışık şiddetindeki dalgalanmalar "flicker" olarak bilinir. Işıktaki bu dalgalardan, insanın rahatsızlığı sübjektif bir durum olduğundan "flicker" olayının hassas ölçümü zor bir olaydır. IEC 61000-4-15 bu konu ile ilgili yapısal ve fonksiyonelliği detaylı bir biçimde tarif edilen bir "flicker meter" diye adlandırılan bir ölçüm cihazı tarif eder. Bu ölçüm gerilim dalgalanması ile insanın rahatsız olma durumuna bağlı kısa zamanlı Pst ve uzun zamanlı Plt indikatörleri tanımlar. Pst kısa zamanlı (pratikte 10 dakika) şiddeti tanımlar ve rahatsızlık derecesi P_{st}=1 olarak ayarlanır. Plt uzun dönemli rahatsızlık şiddetini ifade eder (iki saat) ve başarılı Pst değerlerinden elde edilir.
Şebekedeki kaynak makinesi, ark ocağı veya elektrikli kazanlar gibi dalgalı yükler, şebekede endüklenen bu bozumun temel kaynağıdır.

Standart, rüzgâr türbinlerinin şebekeye olan bozucu etkilerini net analiz edebilmek için birbirinden bağımsız ölçümler tanımlar.

Sürekli rejimde çalışma

Rüzgâr türbininin yol alma ve durma zamanı haricindeki çalışma rejimi olarak tanımlanır. Standart, istatistiksel bir değerlendirme prosesi tanımlar. Bu proseste dalgalanma katsayıları tanımlanır. Bu katsayılar, sürekli rejim boyunca yapılan ölçümlerdeki gerilim ve akım zaman serilerinden hesaplanır.

Bu özelleştirme, normalize edilmiş dalgalanma emisyonu için spesifik bir test prosedürü sağlar. 10 dk boyunca faz-nötr gerilimi ve hat akımı için 15 adet ölçüm alınır. Bu ölçümler her 1 mt/sn lik rüzgâr hızları için yapılır. Her bir zaman serisi ve her bir şebeke empedansı için IEC 61000-4-15 ‘de verilen Şekil 4.3’teki devre şemasına göre 30°, 50°, ve 70° empedans değerleri için ölçümler yapılır. Flicker metre’ye standart’a göre hesaplanan “fictious(hayali)” gerilimi değeri input olarak girilir. Böylelikle flicker metre’den flicker emisyonları P_{st} katsayısı ile elde edilir.



Şekil 4.3. IEC 61000-4-15’de verilen ölçümler için kullanılan devre şeması

Anahtarlama rejimleri

Standart, yol alma zamanında veya generatörler arası geçiş zamanları için anahtarlama rejimlerini tanımlamıştır. Rüzgâr türbininin yol alması veya durması gibi manevralar süresince elde edilmesi gereken dört farklı parametre tanımlanmıştır.

- 2 saatlik zaman dilimi boyunca 10’ar dakikalık zaman dilimleri içerisindeki açma kapama adetleri.
- N10m ve N120m katsayıları
- Dalgalanma basamak faktörü
- Gerilim değişim faktörü

Standart bu katsayıların hesaplanması için yapılacak ölçümleri tanımlar. Anahtarlama zamanlarının geçici rejim durumlarını içine alabilecek kadar zaman uzunluklarında 15 adet Faz-Nötr gerilimi ve hat akımı ölçümü yapılır.

5. RÜZGÂR SANTRALİ MATLAB SİMULASYONU VE PSS-E PROGRAMINDA UYGULAMASI

5.1. Rüzgâr Santralinin Matlab Simulink Programında Simulasyonu

Burada Matlab Simulink programında örnek bir çalışma yapılmıştır. Gerçekleştirmiş olduğumuz bu çalışmada rüzgâr türbini ve yaptığı üretimin bir tüketim merkezine bağlanması simule edilmiştir. Bu simülasyon üç farklı durum için çalıştırılmıştır.

İlk durum simülasyonunda, sürekli değişebilen bir parametre olan rüzgâr hızı baz alınarak yapılmış, rüzgâr türbini üç farklı rüzgâr hızında çalıştırılmış ve rüzgâr türbininin sisteme verdiği güç, akım ve gerilimdeki değişimler gözlenmiştir.

İkinci durum simülasyonunda, rüzgâr türbininin pitch açısı değiştirilmiş, rüzgâr türbini ilk durumda kullanılan üç farklı rüzgâr hızında çalıştırılmış ve rüzgâr türbininin sisteme verdiği güç, akım ve gerilimdeki değişimler gözlenmiştir.

Üçüncü durum simülasyonunda, pitch açısının üç farklı değeri için simülasyon yapılmış, rüzgâr türbininin güç çıkışının değişimi gözlenmiştir. Simülasyon sonuçları ayrı ayrı incelenmiş birbirleriyle karşılaştırılmıştır.
Sonuç olarak;

İlk yapılan simülasyonda rüzgâr hızındaki değişimlerle rüzgâr türbinlerinin çıkış parametrelerinin sürekli değişkenlik göstereceği simüle edilmiştir. Bu simülasyonda rüzgâr hızı değişimlerinin, rüzgâr türbininde sürekli bir gerilim ve akım kontrolü gerektiğinin gösterilmesi amaçlanmıştır.

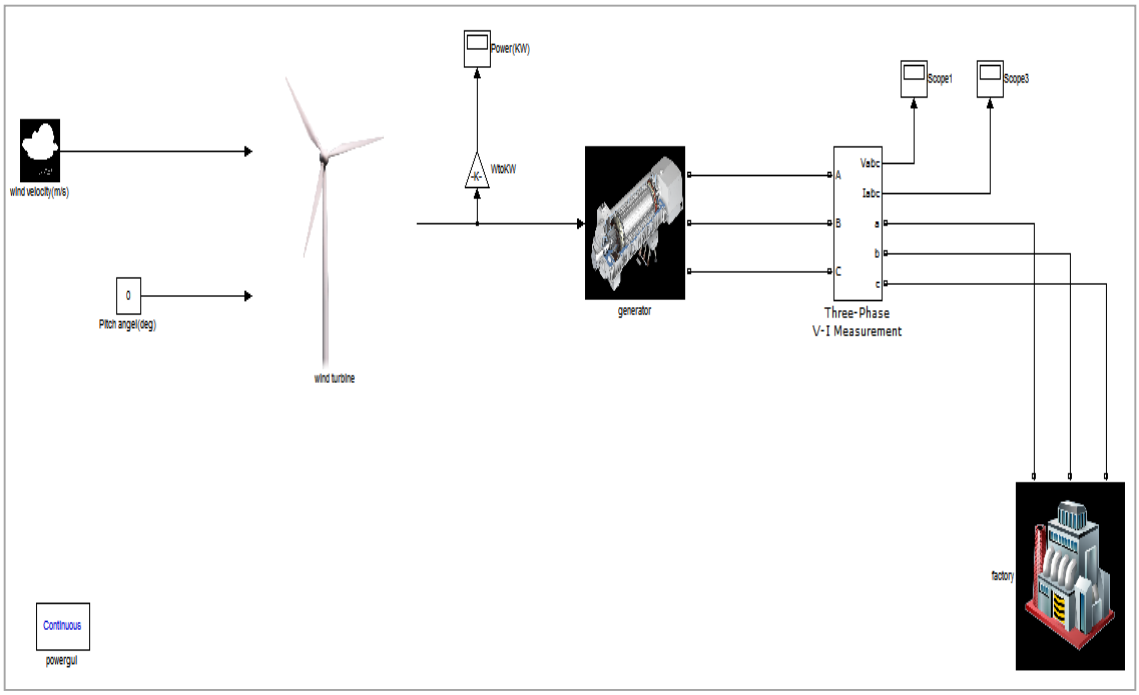
İkinci yapılan simülasyonda, ilk durumdaki pitch açısı değiştirilerek bu açının değişimiyle farklı rüzgâr hızlarında rüzgâr türbinlerinin çıkış parametrelerinin sürekli değişkenlik göstereceğinin simüle edilmesi ve farklı pitch açısının aynı rüzgâr hızlarında ürettiği sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Üçüncü yapılan simülasyonda, rüzgâr türbininin güç çıkışının pitch açısıyla ayarlanabileceği simüle edilmiştir. Bu simülasyonda rüzgâr türbininin güç kontrolünün

pitch açısıyla da yapılabileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır.

Simulasyonda mask metodu kullanılmıştır. Mask metodunda Simulinkde kullandığımız bloklar alt sistemler olarak birleştirilmiş ve yeni simge olarak tek parça haline getirilmiştir. Modelimizde rüzgâr kaynağı, pitch açısı, rüzgâr türbini ve generatoru, akım ve gerilim ölçümü ve tüketim merkezi olarak da seri ve paralel yüklerden oluşan bir fabrika kullanılmıştır.

Şekil 5.1’ de simülasyonda kullanılan Matlab modeli görülmektedir.

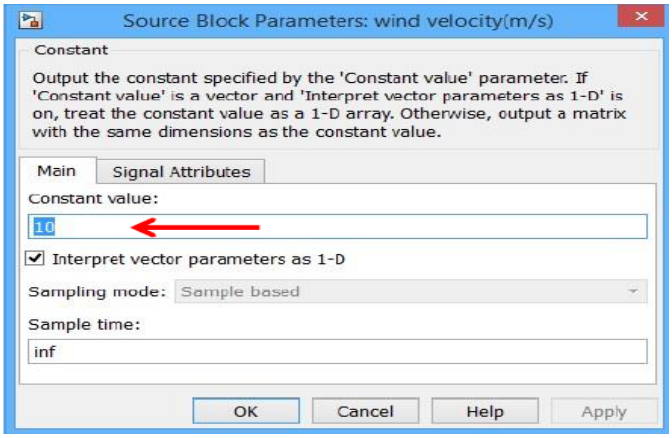


Şekil 5.1. Rüzgâr santralinin enerji üretimi Matlab simülasyon modeli

5.1.1. Simulasyondaki parametre giriş sayfaları

Rüzgâr kaynağı (wind velocity)(m/s)

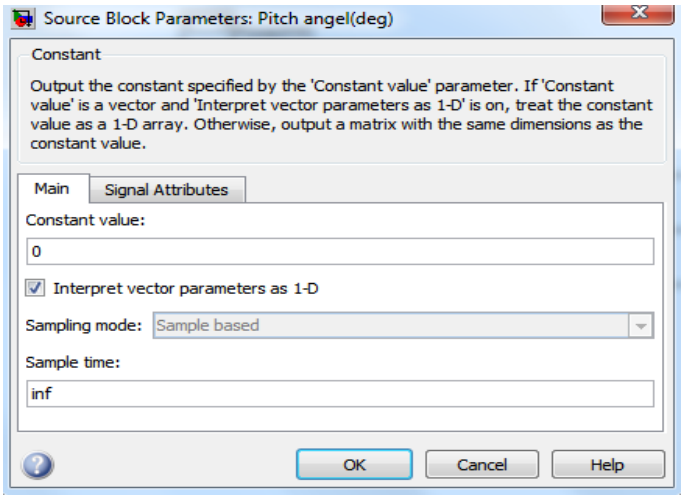
Bu blokta rüzgâr hızını m/s olarak belirlenir. Yapılan simülasyon modelinde rüzgâr hızı 8 m/s, 9 m/s ve 10 m/s olarak alınmıştır.



Şekil 5.2. Rüzgâr kaynağı parametreleri

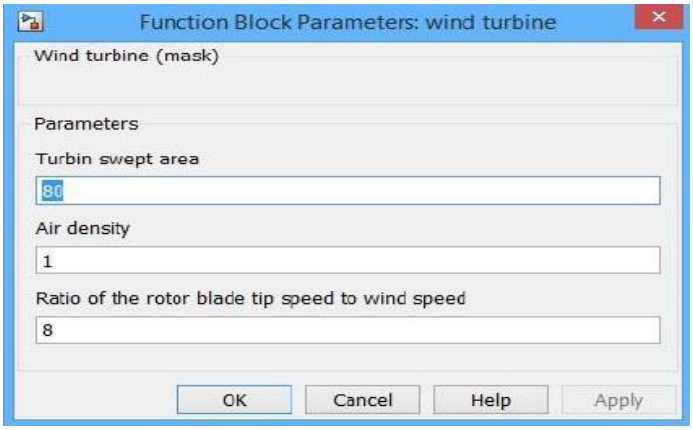
Pitch açısı parametre sayfası

Bu açı değiştirilerek türbin çıkışındaki güç değeri kontrol edilebilir. Yapılan simülasyon modelinde pitch açısı 0, -30 ve -45 olarak alınmıştır.



Şekil 5.3. Pitch açısı parametre sayfası

Rüzgâr türbini parametre sayfası



Şekil 5.4. Rüzgâr türbin parametreleri

Türbin swept area (türbin süpürme tarama alanı):

$$A = \pi R^2 \tag{5.1}$$

R : türbin kanat yarıçapı (m^2)

Ratio of the rotor blade tip speed to wind speed (rotor kanat ucu hızının rüzgâr hızına oranı)

A: Hava kütlesinin taradığı yüzey alanı (m^2)

Rüzgâr türbini tarafından üretilen enerji aşağıdaki formulle hesaplanır;

$$P_{wind} = 0.5\, c_p\, p_{air}\, A\, V_{wind}^3 \tag{5.2}$$

V: Çizgisel hız (m/s)

p: Air density (hava yoğunluğu): Kg/m^3

c_p türbinin performans katsayısı, aşağıdaki formulle hesaplanır;

Rüzgârdan elde edilebilecek maksimum güç; C_p katsayısı oranınca gerçek güç değerine dönüştürülür. C_p güç katsayısı aşağıdaki denklem ile açıklanabilir:

$$C_p = 0.5176\left(\frac{116}{\alpha} - 0.4\beta - 5\right)e^{-\frac{21}{\alpha}} + 0.00068\lambda \tag{5.3}$$

Burada:

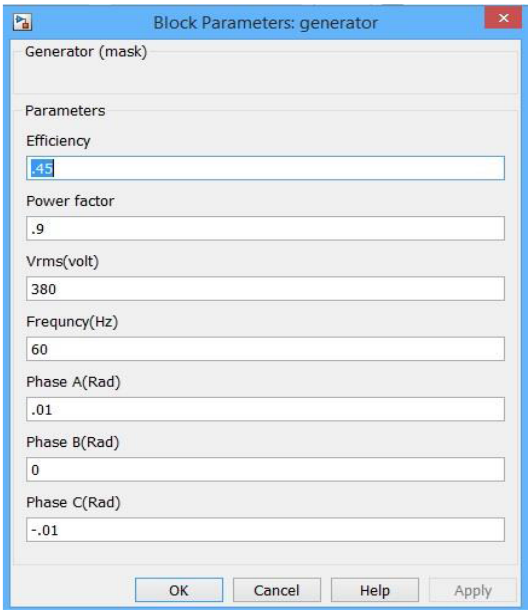
$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \tag{5.4}$$

β= Çizgisel rüzgâr hız vektörü ile kanat yüzey vektörü arasındaki açı değeri.

λ= Rüzgâr türbininin tip hız oran değeri

Generator

Bu blokta türbin tarafından 3 fazlı elektrik enerjisi üretimi gerçekleştiriliyor.



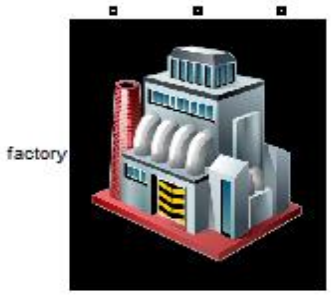
Şekil 5.5. Generator parametre sayfası

Gerilim ve akım ölçümleri

Bu iki blokta sistemin gerilim(scope1) ve akım(scope2) ölçümleri gerçekleştirilmektedir.

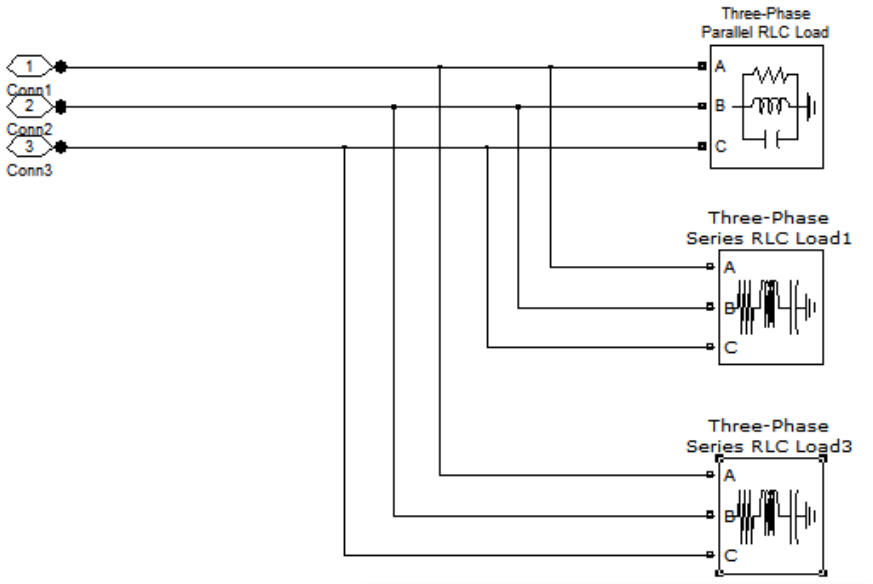
Tüketim merkezi (Fabrika)

Simulasyonda kullanılan tüketim merkezi olarak bir fabrika kullanılmıştır.



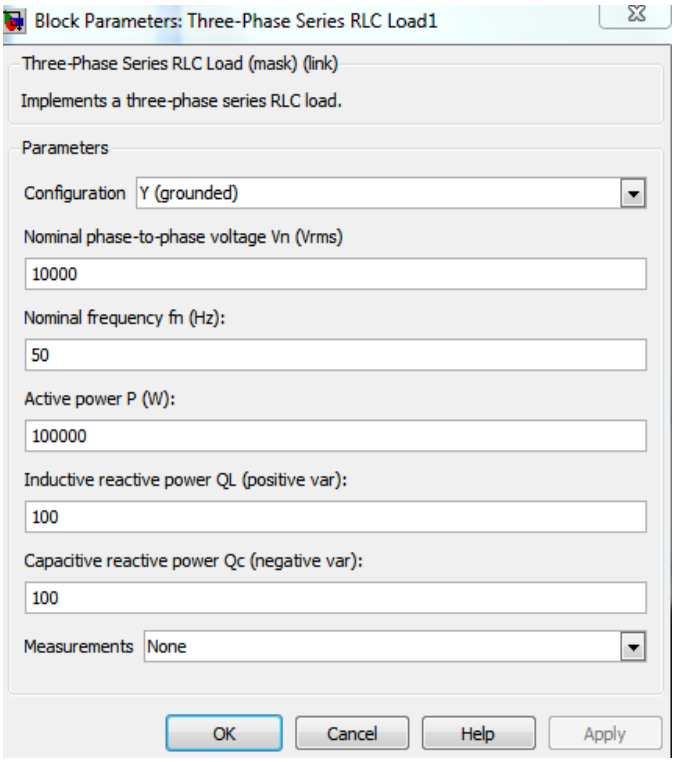
Şekil 5.6. Tüketim merkezi (Fabrika)

Tüketim merkezinin iç yapısı aşağıdaki gibi iki adet seri bir adet paralel yüklerden oluşmaktadır. Şekil 5.7'de tüketim merkezinin (Fabrika) iç yapısı gösterilmiştir.

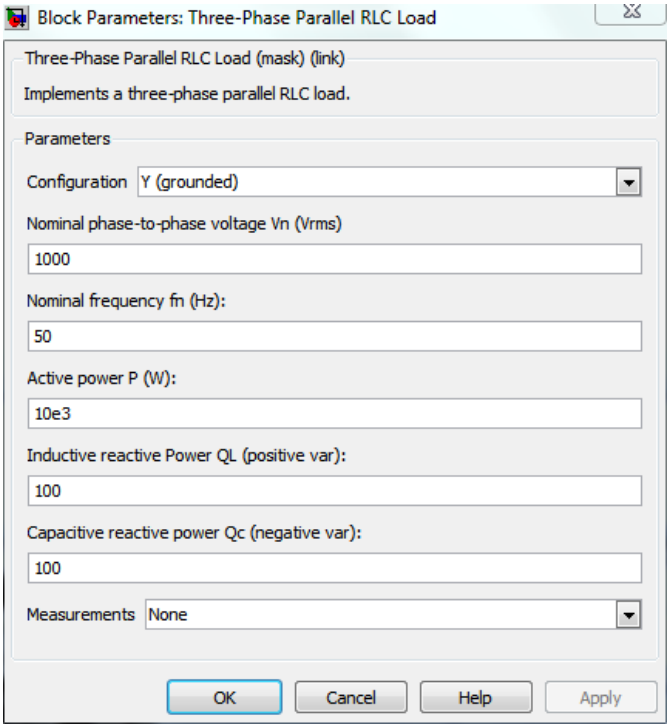


Şekil 5.7. Tüketim merkezi iç yapısı (Fabrika)

Şekil 5.8 ve şekil 5.9'da paralel ve seri yüklerin parametre ayar sayfaları gösterilmiştir.



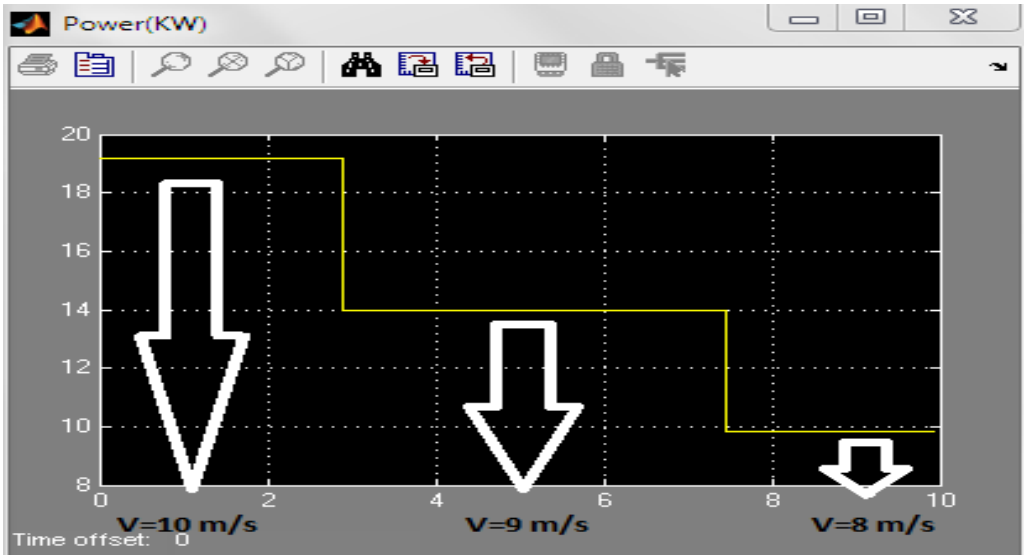
Şekil 5.8. Tüketim merkezi (Seri yük)



Şekil 5.9. Tüketim merkezi (Paralel yük)

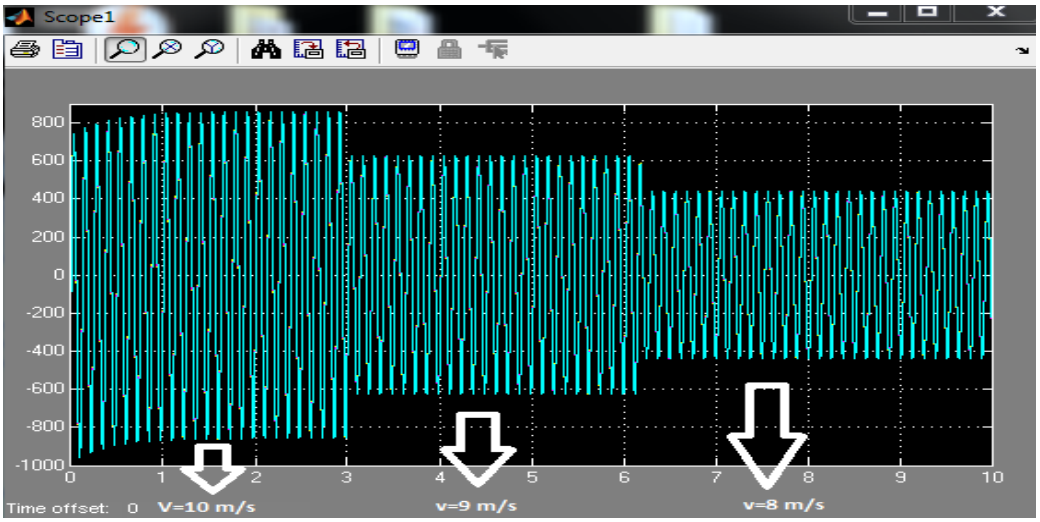
5.1.2. Simülasyon modelinin pitch açısı 0^0 ve $V_{Rüzgâr}$= 8, 9, 10 m/s' de çalıştırılması

İlk durum için yapılan simülasyonda, pitch açısı 0^0 yapılmış, model üç farklı rüzgâr hızı için çalıştırılmış ve her bir rüzgâr hızı parametresi için farklı sonuçlar üretmiştir. Şekil 5.10'da $V_{Rüzgâr}$= 10, 9 ve 8 m/s iken rüzgâr türbininin yaptığı üretim miktarı gösterilmiştir.

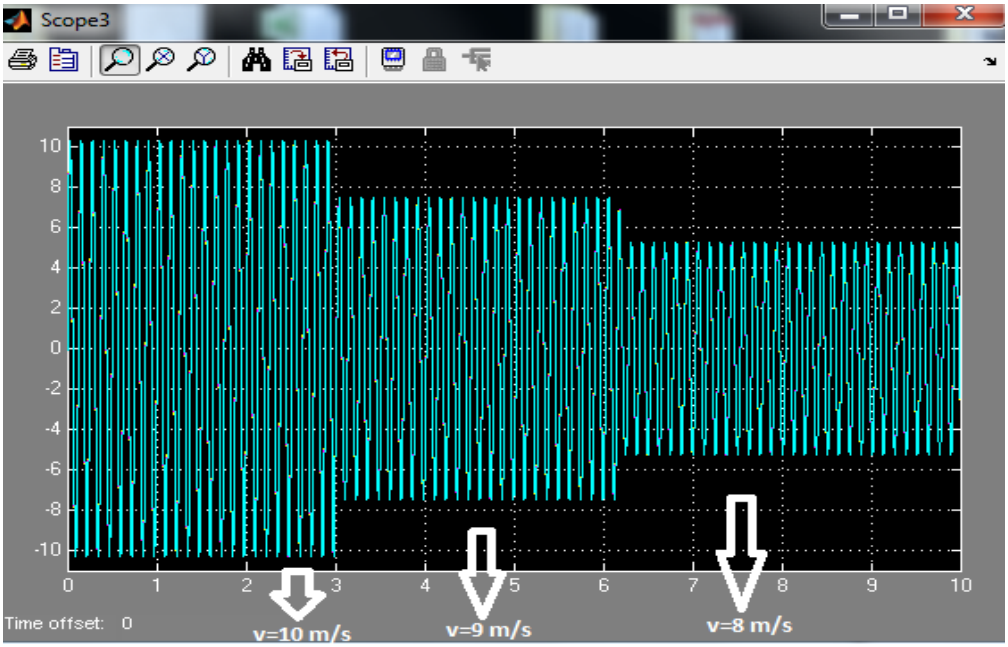


Şekil 5.10. Rüzgâr hızları =10 m/s, 9 m/s ve 8 m/s iken rüzgâr türbininin güç değişimleri

Şekil 5.11'de $V_{Rüzgâr}$=8- 9-10 m/s iken generator çıkışında ölçülen gerilim değerleri gösterilmiştir. Rüzgâr hızı azaldıkça gerilim değeri de azalmıştır.



Şekil 5.11. Rüzgâr hızları =10 m/s, 9 m/s ve 8 m/s iken rüzgâr türbininin gerilim değişimleri



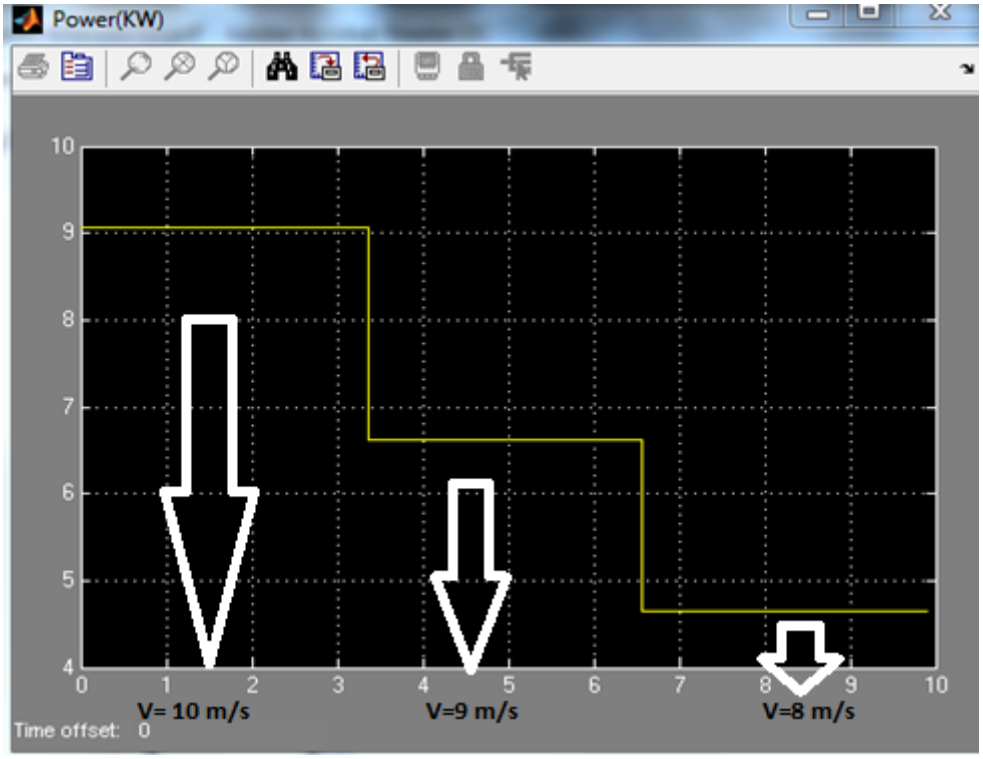
Şekil 5.12. Rüzgâr hızları =10 m/s, 9 m/s ve 8 m/s iken rüzgâr türbininin akım değişimleri

Bu sonuçlara göre;

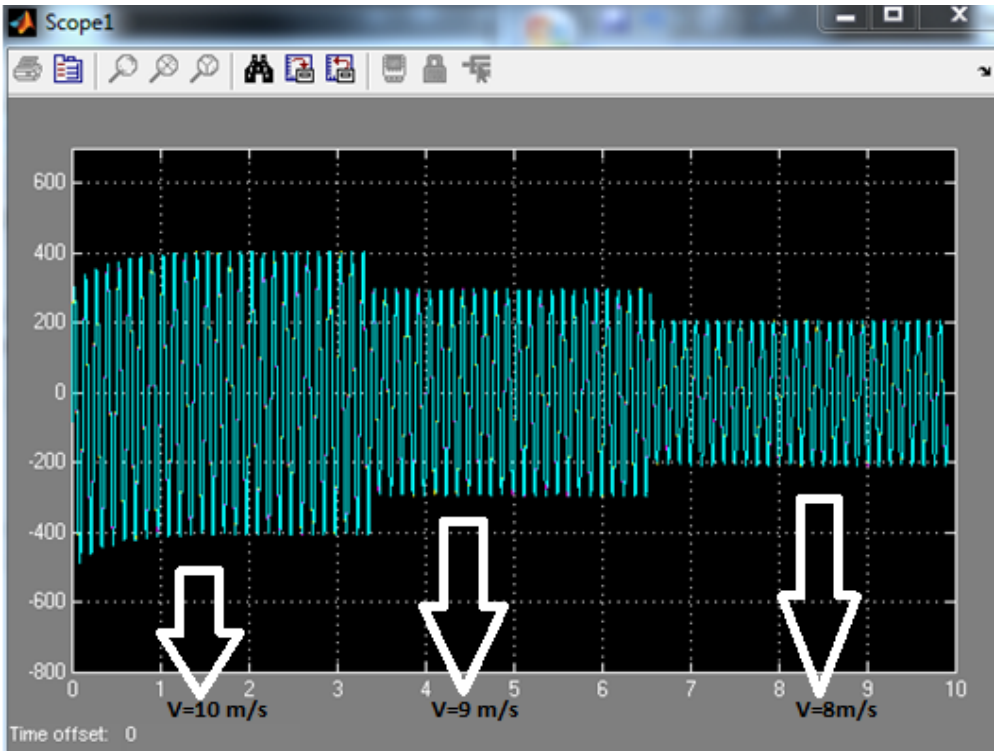
- Rüzgâr hızı 8 m/s olarak yapılan ölçümlerde, rüzgâr türbinin üretimi yaklaşık 9,8 kW, çıkış gerilimi 400 volt ve çıkış akımı 5 amper olarak,
- Rüzgâr hızı 9 m/s olarak yapılan ölçümlerde, rüzgâr türbinin üretimi yaklaşık 13,9 kW, çıkış gerilimi 600 volt ve çıkış akımı 7 amper olarak,
- Rüzgâr hızı 10 m/s olarak yapılan ölçümlerde, rüzgâr türbinin üretimi yaklaşık 19,2 kW, çıkış gerilimi 800 volt ve çıkış akımı 10 amper olarak, gözlenmiştir.

5.1.3. Simülasyon modelinin pitch açısı -45^0 ve $V_{Rüzgâr}$= 8, 9, 10 m/s de çalıştırılması

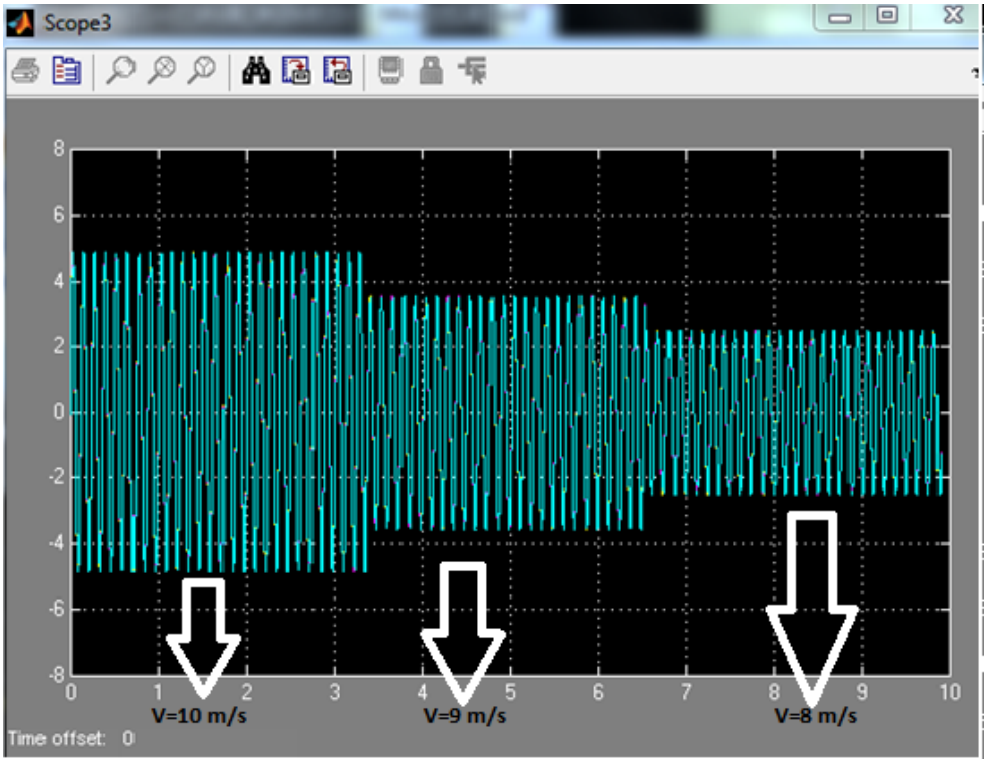
İkinci durum simülasyonunda, pitch açısı -45^0 olarak değiştirilmiş model üç farklı rüzgâr hızı için çalıştırılmış ve her bir rüzgâr hızı parametresi için farklı sonuçlar üretmiştir.



Şekil 5.13. Rüzgâr hızları =10 m/s, 9 m/s ve 8 m/s iken rüzgâr türbininin güç değişimleri



Şekil 5.14. Rüzgâr hızları 10 m/s , 9 m/s ve 8 m/s iken rüzgâr türbininin gerilim değişimleri



Şekil 5.15. Rüzgâr hızları 10 m/s, 9 m/s ve 8 m/s iken rüzgâr türbininin akım değişimleri

Bu sonuçlara göre;

- Rüzgâr hızı 8 m/s olarak yapılan ölçümlerde, rüzgâr türbinin üretimi yaklaşık 4,6 kW, çıkış gerilimi 200 volt ve çıkış akımı 2,5 amper olarak,
- Rüzgâr hızı 9 m/s olarak yapılan ölçümlerde, rüzgâr türbinin üretimi yaklaşık 6,6 kW, çıkış gerilimi 300 volt ve çıkış akımı 3,5 amper olarak,
- Rüzgâr hızı 10 m/s olarak yapılan ölçümlerde, rüzgâr türbinin üretimi yaklaşık 9 kW, çıkış gerilimi 400 volt ve çıkış akımı 5 amper olarak, gözlenmiştir.

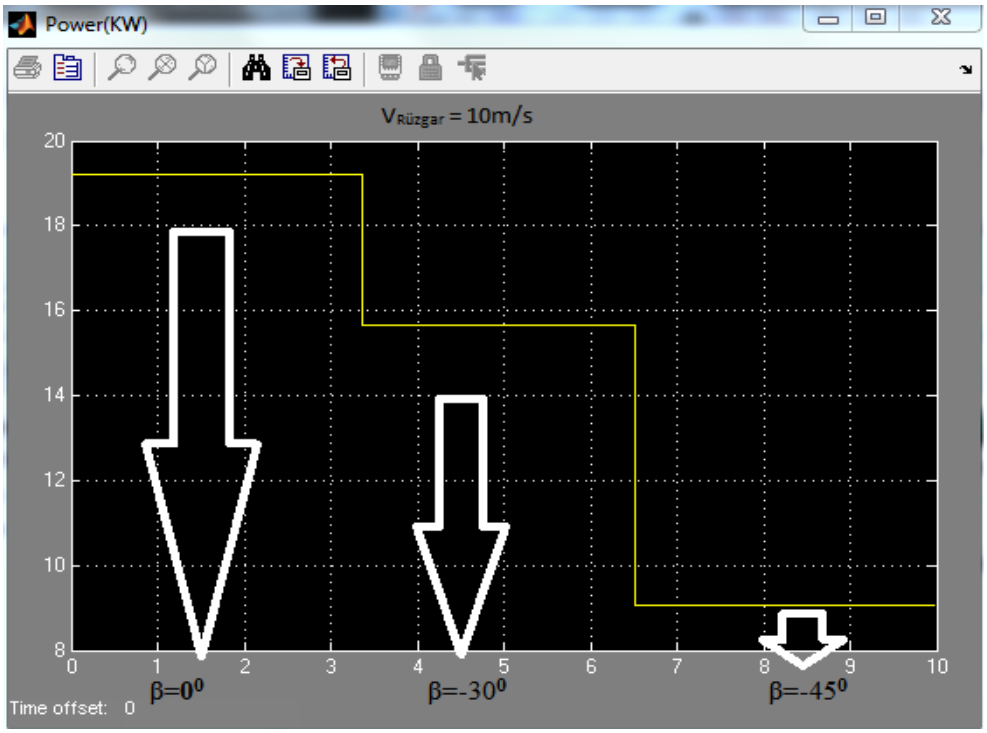
Çizelge 5.1. 0^0 ve -45^0'lik Pitch açılarında farklı rüzgâr hızları için güç, gerilim ve akım değerleri

	$V_{Rüzgâr}$= 8m/s			$V_{Rüzgâr}$ = 9m/s			$V_{Rüzgâr}$ = 10m/s		
Pitch Açısı	P(kW)	V(Volt)	I(Amper)	P(kW)	V(Volt)	I(Amper)	P(kW)	V(Volt)	I(Amper)
0^0	9,8	400	5	13,9	600	7	19,2	800	10
-45^0	4,6	200	2,5	6,6	300	3,5	9	400	5

Çizelge 5.1'de yapılan karşılaştırmada, kanat açısını 0^0 ve -45^0 olması durumu karşılaştırılarak, 0^0 derecelik açıda türbin kanadının rüzgâr hızından tam verimde

etkilendiğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Yapılan güç ölçümleri rüzgâr türbininin çıkış gücünden, gerilim ve akım ölçümleri tüketim merkezinden alınmıştır. Çizelge 5.1'de rüzgâr hızı artıkça güç, gerilim ve akım parametrelerinde artış gözlenmiş ve bu değerler kanat açısı değişimiyle bir miktar azalma göstermiştir.

5.1.4. Simülasyon modelinin $V_{Rüzgâr}$= 10 m/s'de, pitch açısı 0^0, -30^0 ve -45^0 iken çalıştırılması



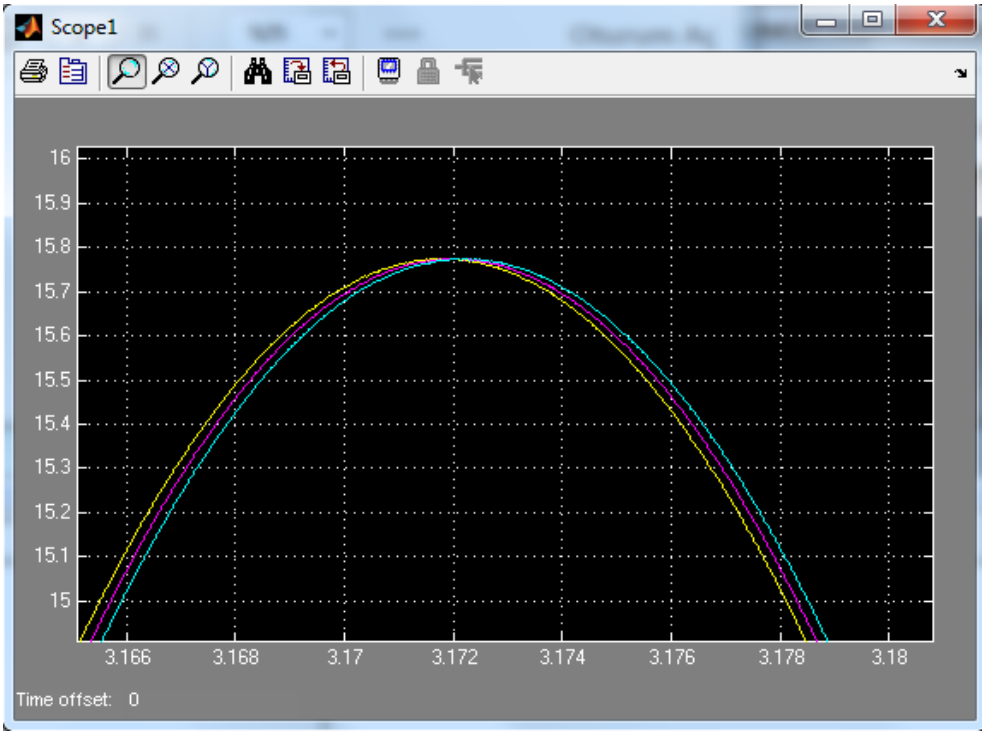
Şekil 5.16. Pitch açısı 0, -30 ve -45 iken rüzgâr türbininin güç değişimleri

Rüzgâr türbinlerinde β (pitch açısı) açısı farklı rüzgâr hızları için değişmekte ve bu değişimin belirlenmesi bir kontrol sistemi (pitch angle control) vasıtasıyla olmaktadır. Şekil 5.18'de sabit rüzgâr hızında farklı açılar uygulayarak rüzgâr türbini çıkış gücü değişiminin Pitch açısını değiştirilerek yapılabileceği gösterilmiştir.

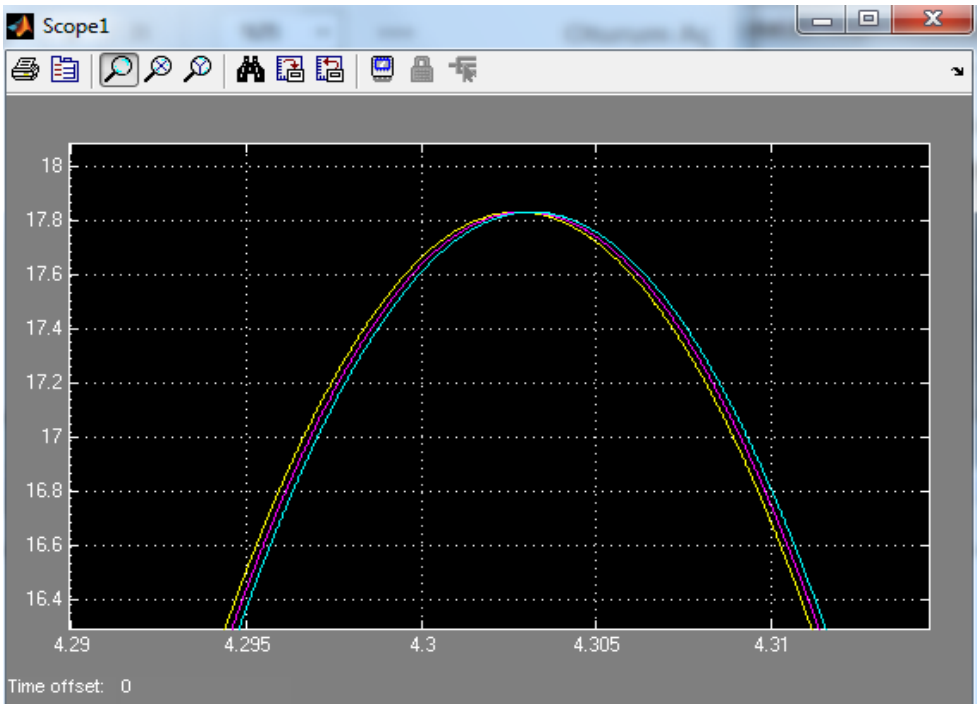
Matlab simülasyon programıyla en son yaptığımız çalışmada, gerçek bir rüzgâr üretim türbininin üretim parametreleri simülasyona girilerek gerçek sistem ile simülasyon arasındaki hata oranı ölçülmüştür.

Gerçek rüzgâr türbin verileri Fırat Üniversitesinde yapılan " Lokal Bir Rüzgâr Santrali Tasarımı" adlı tez çalışmasının rüzgâr santrali verilerinden alınmıştır (Türkmen, 2005:65).

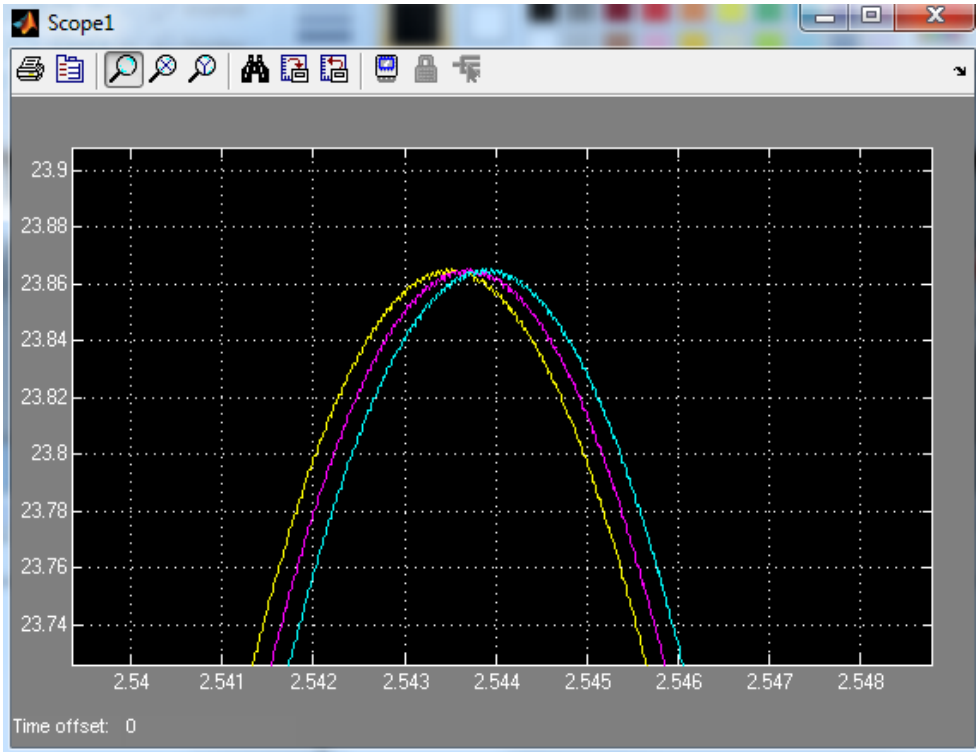
Burada yapılan çalışmada üç farklı rüzgâr hızında asekron generator boşta iken çıkış gerilimleri ölçülmüştür.



Şekil 5.17. Rüzgâr hızı 3,26 m/s iken simülasyonda ölçülen gerilim değeri



Şekil 5.18. Rüzgâr hızı 3,68 m/s iken simülasyonda ölçülen gerilim değeri



Şekil 5.19. Rüzgâr hızı 4,917 m/s iken simülasyonda ölçülen gerilim değeri

Aynı rüzgâr hızları matlab simülasyonuna girilerek çalıştırılmıştır. Çizelge 5.2'de bu iki durumun karşılaştırılması yapılmıştır.

Çizelge 5.2. Rüzgâr türbinindeki gerilim değişiminin üç farklı rüzgâr hızı için gerçek sistem ve simülasyon modelinde karşılaştırılması

Rüzgâr Hızı (m/sn)	Üretilen Gerilim (Gerçek Değer) (V)	Üretilen Gerilim (Simülasyon) (V)	Fark	Hata Oranı (%)
3,26	15,20	15,8	0,60	3,95
3,68	17,16	17,8	0,64	3,73
4,92	22,93	23,88	0,95	4,14

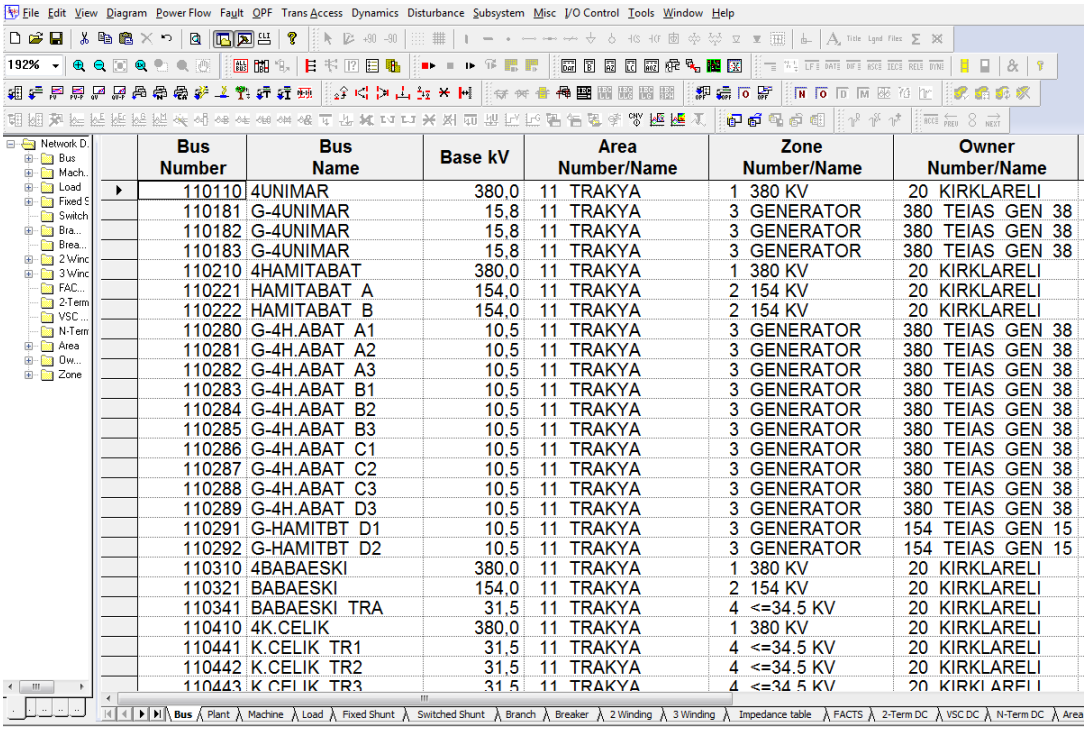
Çizelge 5.2'de yapılan simüslasyonun doğruluk oranı gösterilmiş ve gerçek bir sistemden alınan örneğin verileri simülasyon modeline girilmiştir. Sonuçta simülasyon modelinden alınan ölçüm sonuçlarının gerçek sistemden alınan gerilim değerleriyle arasında yaklaşık %4 hata oranı olduğu görülmüştür.

5.2. Rüzgâr Santrallerinin Türkiye Elektrik Sistemine Etkilerinin PSS/E Programında İncelenmesi

5.2.1. PSS/E programı ve ekranları

PSS/E güç sistem analizi yapabilen bir yük akış programıdır. PSS/E programı kullanılarak yük akışları izlenebilir üretim tüketim miktarları değiştirilerek sistemdeki akışların yönü ve büyüklüğü analiz edilebilir. PSS/E ile güç akışı, kararlılık, kısa devre ve geçici durum analizleri, güç akış diyagramları, kararlılık analizi ve kısa devre analizi yapılabilir.

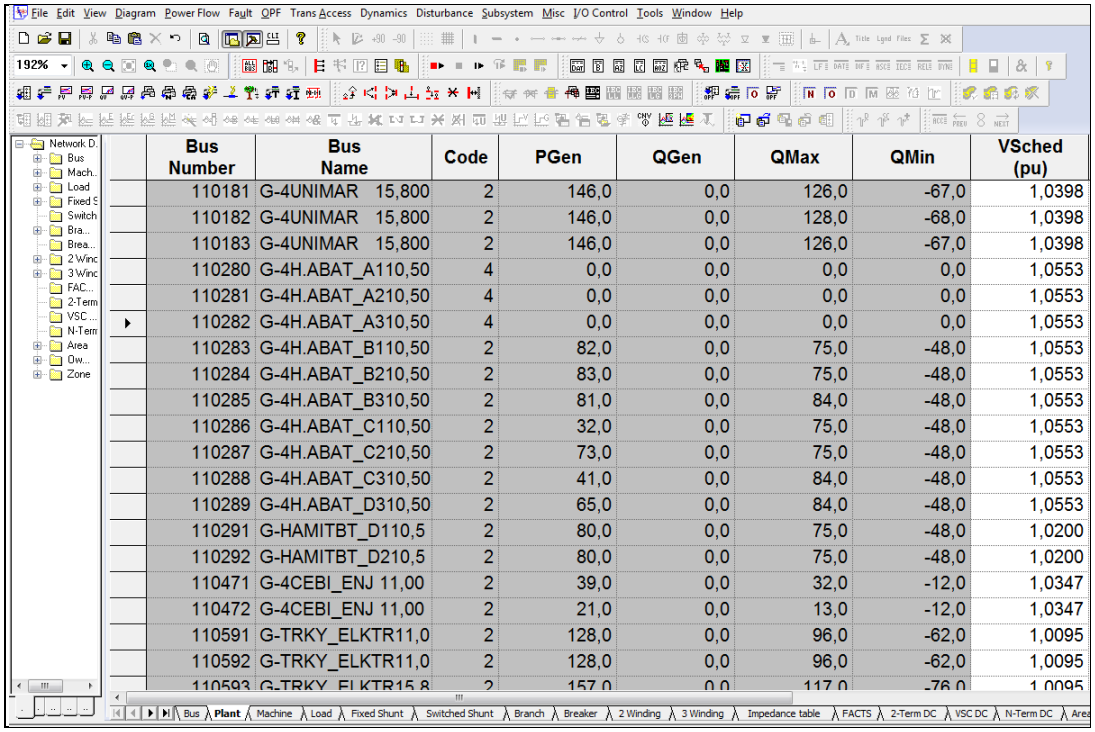
Aşağıda PSS/E den alınmış data sayfaları gösterilmiştir. Programda alt kısımda bus (bara) seçeneği seçili olduğu için Türkiye enterkonnekte sisteminde mevcut tüm trafo merkezleri ve baraları işlenmiş durumdadır.



Bus Number	Bus Name	Base kV	Area Number/Name	Zone Number/Name	Owner Number/Name
110110	4UNIMAR	380,0	11 TRAKYA	1 380 KV	20 KIRKLARELI
110181	G-4UNIMAR	15,8	11 TRAKYA	3 GENERATOR	380 TEIAS GEN 38
110182	G-4UNIMAR	15,8	11 TRAKYA	3 GENERATOR	380 TEIAS GEN 38
110183	G-4UNIMAR	15,8	11 TRAKYA	3 GENERATOR	380 TEIAS GEN 38
110210	4HAMITABAT	380,0	11 TRAKYA	1 380 KV	20 KIRKLARELI
110221	HAMITABAT A	154,0	11 TRAKYA	2 154 KV	20 KIRKLARELI
110222	HAMITABAT B	154,0	11 TRAKYA	2 154 KV	20 KIRKLARELI
110280	G-4H.ABAT A1	10,5	11 TRAKYA	3 GENERATOR	380 TEIAS GEN 38
110281	G-4H.ABAT A2	10,5	11 TRAKYA	3 GENERATOR	380 TEIAS GEN 38
110282	G-4H.ABAT A3	10,5	11 TRAKYA	3 GENERATOR	380 TEIAS GEN 38
110283	G-4H.ABAT B1	10,5	11 TRAKYA	3 GENERATOR	380 TEIAS GEN 38
110284	G-4H.ABAT B2	10,5	11 TRAKYA	3 GENERATOR	380 TEIAS GEN 38
110285	G-4H.ABAT B3	10,5	11 TRAKYA	3 GENERATOR	380 TEIAS GEN 38
110286	G-4H.ABAT C1	10,5	11 TRAKYA	3 GENERATOR	380 TEIAS GEN 38
110287	G-4H.ABAT C2	10,5	11 TRAKYA	3 GENERATOR	380 TEIAS GEN 38
110288	G-4H.ABAT C3	10,5	11 TRAKYA	3 GENERATOR	380 TEIAS GEN 38
110289	G-4H.ABAT D3	10,5	11 TRAKYA	3 GENERATOR	380 TEIAS GEN 38
110291	G-HAMITBT D1	10,5	11 TRAKYA	3 GENERATOR	154 TEIAS GEN 15
110292	G-HAMITBT D2	10,5	11 TRAKYA	3 GENERATOR	154 TEIAS GEN 15
110310	4BABAESKI	380,0	11 TRAKYA	1 380 KV	20 KIRKLARELI
110321	BABAESKI	154,0	11 TRAKYA	2 154 KV	20 KIRKLARELI
110341	BABAESKI TRA	31,5	11 TRAKYA	4 <=34.5 KV	20 KIRKLARELI
110410	4K.CELIK	380,0	11 TRAKYA	1 380 KV	20 KIRKLARELI
110441	K.CELIK TR1	31,5	11 TRAKYA	4 <=34.5 KV	20 KIRKLARELI
110442	K.CELIK TR2	31,5	11 TRAKYA	4 <=34.5 KV	20 KIRKLARELI
110443	K.CELIK TR3	31,5	11 TRAKYA	4 <=34.5 KV	20 KIRKLARELI

Şekil 5.20. PSS/E programında bara data ekranı

Şekil 5.20' de ilk sütundaki bus number baralara özel verilen bara kod numaralarıdır. İkinci sütundaki bus name, bara isimlerini göstermekte, Base kV baranın gerilim seviyesini, Area number/name banın bağlı olduğu bölge yük tevzi merkezi ismini, Zone number/name bağlı olduğu bölge kodu ve ismini, Owner number/name baranın sahibi olan firma ismini göstermektedir.



	Bus Number	Bus Name	Code	PGen	QGen	QMax	QMin	VSched (pu)
	110181	G-4UNIMAR 15,800	2	146,0	0,0	126,0	-67,0	1,0398
	110182	G-4UNIMAR 15,800	2	146,0	0,0	128,0	-68,0	1,0398
	110183	G-4UNIMAR 15,800	2	146,0	0,0	126,0	-67,0	1,0398
	110280	G-4H.ABAT_A110,50	4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0553
	110281	G-4H.ABAT_A210,50	4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0553
▶	110282	G-4H.ABAT_A310,50	4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0553
	110283	G-4H.ABAT_B110,50	2	82,0	0,0	75,0	-48,0	1,0553
	110284	G-4H.ABAT_B210,50	2	83,0	0,0	75,0	-48,0	1,0553
	110285	G-4H.ABAT_B310,50	2	81,0	0,0	84,0	-48,0	1,0553
	110286	G-4H.ABAT_C110,50	2	32,0	0,0	75,0	-48,0	1,0553
	110287	G-4H.ABAT_C210,50	2	73,0	0,0	75,0	-48,0	1,0553
	110288	G-4H.ABAT_C310,50	2	41,0	0,0	84,0	-48,0	1,0553
	110289	G-4H.ABAT_D310,50	2	65,0	0,0	84,0	-48,0	1,0553
	110291	G-HAMITBT_D110,5	2	80,0	0,0	75,0	-48,0	1,0200
	110292	G-HAMITBT_D210,5	2	80,0	0,0	75,0	-48,0	1,0200
	110471	G-4CEBI_ENJ 11,00	2	39,0	0,0	32,0	-12,0	1,0347
	110472	G-4CEBI_ENJ 11,00	2	21,0	0,0	13,0	-12,0	1,0347
	110591	G-TRKY_ELKTR11,0	2	128,0	0,0	96,0	-62,0	1,0095
	110592	G-TRKY_ELKTR11,0	2	128,0	0,0	96,0	-62,0	1,0095
	110593	G-TRKY_ELKTR15,8	2	157,0	0,0	117,0	-76,0	1,0095

Şekil 5.21. Sistemde modellenen üretim tesisleri ekranı

Şekil 5.21' de üretim verilerimizi görmek için alt sekmedeki plant (üretim tesisi) kısmını kullanırız. Burada üretim tesisinin maksimum ve minimum üretim kapasitesi, reaktif gücü gösterilmiş, VSched sütununda ise baralardaki gerilimlerin pu cinsinden değerleri gösterilmiştir.

Bus Number	Bus Name	Id	A	Area Name	Zone	Zone	Co	In Se	G-	B-Shunt (Mvar)
612711	4KAY-4BAG	1	1	ORTAKARA	5	SA	1	☐	0	-73,30
832111	4KIZ-4BAT_	1	3	GUNEYDO	5	SA	1	☐	0	-73,30
220011	4BUR4BAND	1	2	KUZEYBATI	5	SA	1	☑	0	-80,00
231111	4OSM_4KUR	1	3	KUZEYBATI	5	SA	1	☑	0	-80,00
330411	4YEN_4GER	1	3	BATIANAD	5	SA	1	☐	0	-80,00
620211	4TIR_4OMV	1	2	ORTAKARA	5	SA	1	☐	0	-80,00
620611	4CAR_4KAY	1	2	ORTAKARA	5	SA	1	☑	0	-80,00
810210	4KANGAL	1	1	GUNEYDO	1	380	1	☐	0	-80,00
830611	4KAR-4HIL_	1	3	GUNEYDO	5	SA	1	☐	0	-80,00
612712	4KAY-4KUR	1	1	ORTAKARA	5	SA	1	☐	0	-97,00
713910	4VAN_II 3	1	1	DOGUANA	1	380	1	☐	0	-97,00
810610	4ELBISTAN_	1	1	GUNEYDO	1	380	1	☐	0	-97,70
910011	4ADA-4SEY	1	1	DOGUAKD	5	SA	1	☐	0	-97,70
410211	4GOL_4KAY	1	1	ORTAANAD	5	SA	1	☑	0	-100,00
410212	4GOL_4KAY	1	1	ORTAANAD	5	SA	1	☑	0	-100,00
410312	4SIN-ELBB_	1	1	ORTAANAD	5	SA	1	☐	0	-100,00
220510	4SEYITOME	1	2	KUZEYBATI	1	380	1	☑	0	-120,00
420513	4KON_4YES	1	2	ORTAANAD	5	SA	1	☐	0	-120,00
710011	4ERZ_4OZL	1	1	DOGUANA	5	SA	1	☑	0	-120,00
610411	4ALT-4CAR_	1	1	ORTAKARA	5	SA	1	☑	0	-122,00
710012	4ERZ_4AGR	1	1	DOGUANA	5	SA	1	☑	0	-122,00
710013	4ERZ_4DER	1	1	DOGUANA	5	SA	1	☑	0	-146,00
810312	4KEB_4KAY	1	1	GUNEYDO	5	SA	1	☑	0	-146,50
810313	4KEB_4KAY	1	1	GUNEYDO	5	SA	1	☑	0	-146,50
810511	4DEC_4KAY	1	1	GUNEYDO	5	SA	1	☐	0	-146,50
810611	4ELBA_SIN_	1	1	GUNEYDO	5	SA	1	☑	0	-146,50
810711	4ELBB_SIN_	1	1	GUNEYDO	5	SA	1	☑	0	-146,50
215310	4MALTEPE	1	1	KUZEYBATI	1	380	1	☐	0	-160,00
612311	4KUR-4BOY	1	1	ORTAKARA	5	SA	1	☑	0	-180,00
410311	4SIN-ELBA_	1	1	ORTAANAD	5	SA	1	☐	0	-183,00
410411	4TEM_ADA1	1	1	ORTAANAD	5	SA	1	☐	0	-183,00

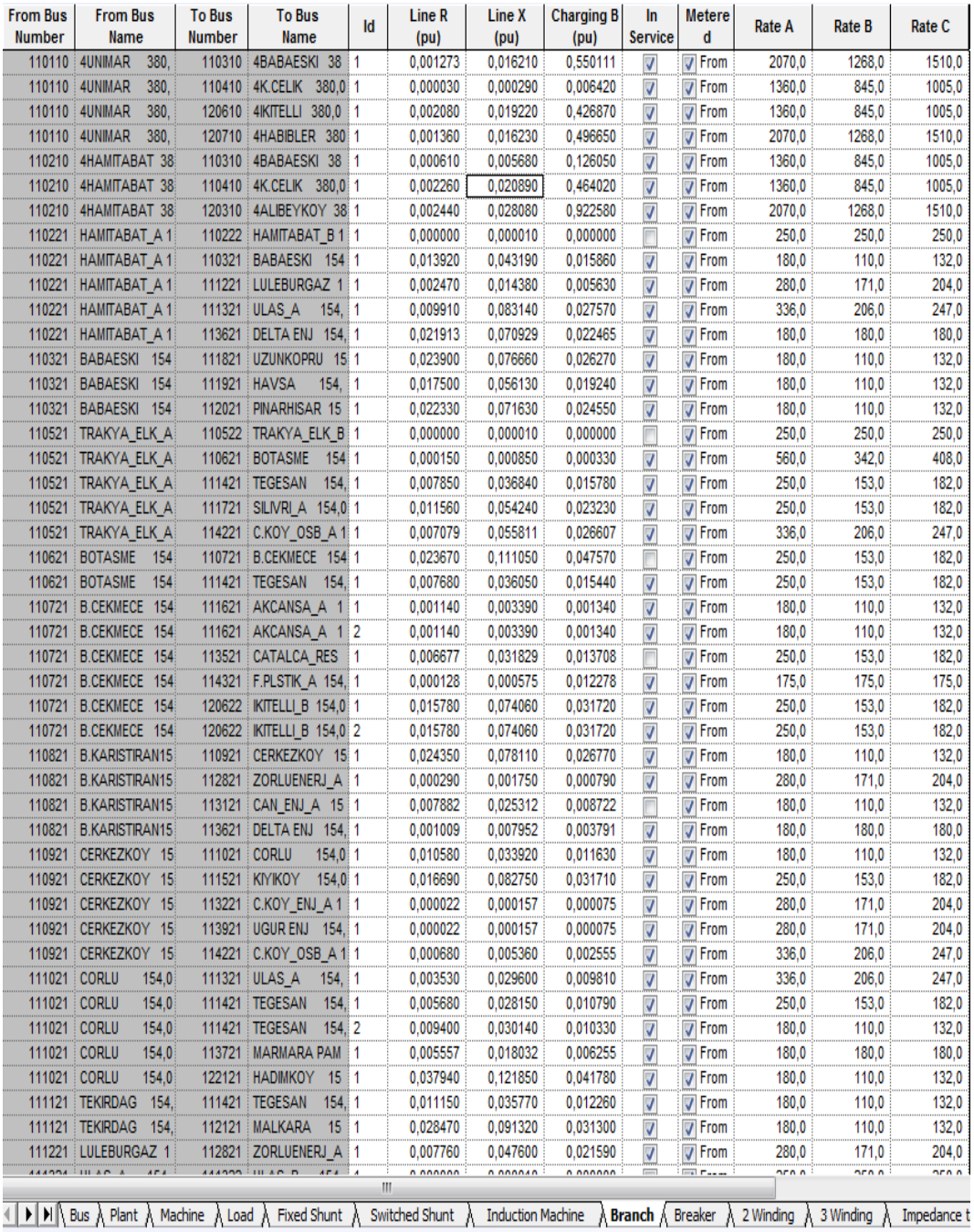
Plant | Machine | Load | **Fixed Shunt** | Switched Shunt | Induction Machine | Branch | Bı

Şekil 5.22. Sistemdeki reaktörler ve kapasitörlerin ekranı

Şekil 5.22'de PSS/E programındaki Fixed Shunt veritabanı görünmektedir. Bu sekmede iletim sistemindeki reaktörler ve kapasitör modellenmiştir. Tablodaki baralar sistemdeki güçlerine göre sıralanmışlardır.

Gerilim düşümüne çözüm olarak ise sisteme kapasitör ilavesi yapılır ve gerilimin normal değerlere çekilmesi sağlanır. Gerilimde düşüşün aksi olarak bir barada gerilimin artması durumunda ise sisteme reaktör konuşması ihtiyacı doğar. Gerilimde yükselme eğilimi baradaki üretimin tüketimden fazla olması durumunda ortaya çıkar.

En sağ sütundaki veriler MVAR cinsinden gücü belirtir. Bu veri değerinin eksi olması sistemde reaktör olarak çalıştığı gösterir. Herhangi bir işaret yoksa pozitif olduğu ve o barada kompansatör bulunduğunu belirtir.



From Bus Number	From Bus Name	To Bus Number	To Bus Name	Id	Line R (pu)	Line X (pu)	Charging B (pu)	In Service	Metered	Rate A	Rate B	Rate C
110110	4UNIMAR 380,	110310	4BABAESKI 38	1	0,001273	0,016210	0,550111	☑	From	2070,0	1268,0	1510,0
110110	4UNIMAR 380,	110410	4K.CELIK 380,0	1	0,000030	0,000290	0,006420	☑	From	1360,0	845,0	1005,0
110110	4UNIMAR 380,	120610	4IKITELLI 380,0	1	0,002080	0,019220	0,426870	☑	From	1360,0	845,0	1005,0
110110	4UNIMAR 380,	120710	4HABIBLER 380	1	0,001360	0,016230	0,496650	☑	From	2070,0	1268,0	1510,0
110210	4HAMITABAT 38	110310	4BABAESKI 38	1	0,000610	0,005680	0,126050	☑	From	1360,0	845,0	1005,0
110210	4HAMITABAT 38	110410	4K.CELIK 380,0	1	0,002260	0,020890	0,464020	☑	From	1360,0	845,0	1005,0
110210	4HAMITABAT 38	120310	4ALIBEYKOY 38	1	0,002440	0,028080	0,922580	☑	From	2070,0	1268,0	1510,0
110221	HAMITABAT_A 1	110222	HAMITABAT_B 1	1	0,000000	0,000010	0,000000	☐	From	250,0	250,0	250,0
110221	HAMITABAT_A 1	110321	BABAESKI 154	1	0,013920	0,043190	0,015860	☑	From	180,0	110,0	132,0
110221	HAMITABAT_A 1	111221	LULEBURGAZ 1	1	0,002470	0,014380	0,005630	☑	From	280,0	171,0	204,0
110221	HAMITABAT_A 1	111321	ULAS_A 154,	1	0,009910	0,083140	0,027570	☑	From	336,0	206,0	247,0
110221	HAMITABAT_A 1	113621	DELTA ENJ 154,	1	0,021913	0,070929	0,022465	☑	From	180,0	180,0	180,0
110321	BABAESKI 154	111821	UZUNKOPRU 15	1	0,023900	0,076660	0,026270	☑	From	180,0	110,0	132,0
110321	BABAESKI 154	111921	HAVSA 154,	1	0,017500	0,056130	0,019240	☑	From	180,0	110,0	132,0
110321	BABAESKI 154	112021	PINARHISAR 15	1	0,022330	0,071630	0,024550	☑	From	180,0	110,0	132,0
110521	TRAKYA_ELK_A	110522	TRAKYA_ELK_B	1	0,000000	0,000010	0,000000	☐	From	250,0	250,0	250,0
110521	TRAKYA_ELK_A	110621	BOTASME 154	1	0,000150	0,000850	0,000330	☑	From	560,0	342,0	408,0
110521	TRAKYA_ELK_A	111421	TEGESAN 154,	1	0,007850	0,036840	0,015780	☑	From	250,0	153,0	182,0
110521	TRAKYA_ELK_A	111721	SILIVRI_A 154,0	1	0,011560	0,054240	0,023230	☑	From	250,0	153,0	182,0
110521	TRAKYA_ELK_A	114221	C.KOY_OSB_A 1	1	0,007079	0,055811	0,026607	☑	From	336,0	206,0	247,0
110621	BOTASME 154	110721	B.CEKMECE 154	1	0,023670	0,111050	0,047570	☐	From	250,0	153,0	182,0
110621	BOTASME 154	111421	TEGESAN 154,	1	0,007680	0,036050	0,015440	☑	From	250,0	153,0	182,0
110721	B.CEKMECE 154	111621	AKCANSA_A 1	1	0,001140	0,003390	0,001340	☑	From	180,0	110,0	132,0
110721	B.CEKMECE 154	111621	AKCANSA_A 1	2	0,001140	0,003390	0,001340	☑	From	180,0	110,0	132,0
110721	B.CEKMECE 154	113521	CATALCA_RES	1	0,006677	0,031829	0,013708	☐	From	250,0	153,0	182,0
110721	B.CEKMECE 154	114321	F.PLSTIK_A 154,	1	0,000128	0,000575	0,012278	☑	From	175,0	175,0	175,0
110721	B.CEKMECE 154	120622	IKITELLI_B 154,0	1	0,015780	0,074060	0,031720	☑	From	250,0	153,0	182,0
110721	B.CEKMECE 154	120622	IKITELLI_B 154,0	2	0,015780	0,074060	0,031720	☑	From	250,0	153,0	182,0
110821	B.KARISTIRAN15	110921	CERKEZKOY 15	1	0,024350	0,078110	0,026770	☑	From	180,0	110,0	132,0
110821	B.KARISTIRAN15	112821	ZORLUENERJ_A	1	0,000290	0,001750	0,000790	☑	From	280,0	171,0	204,0
110821	B.KARISTIRAN15	113121	CAN_ENJ_A 15	1	0,007882	0,025312	0,008722	☐	From	180,0	110,0	132,0
110821	B.KARISTIRAN15	113621	DELTA ENJ 154,	1	0,001009	0,007952	0,003791	☑	From	180,0	180,0	180,0
110921	CERKEZKOY 15	111021	CORLU 154,0	1	0,010580	0,033920	0,011630	☑	From	180,0	110,0	132,0
110921	CERKEZKOY 15	111521	KIYIKOY 154,0	1	0,016690	0,082750	0,031710	☑	From	250,0	153,0	182,0
110921	CERKEZKOY 15	113221	C.KOY_ENJ_A 1	1	0,000022	0,000157	0,000075	☑	From	280,0	171,0	204,0
110921	CERKEZKOY 15	113921	UGUR ENJ 154,	1	0,000022	0,000157	0,000075	☑	From	280,0	171,0	204,0
110921	CERKEZKOY 15	114221	C.KOY_OSB_A 1	1	0,000680	0,005360	0,002555	☑	From	336,0	206,0	247,0
111021	CORLU 154,0	111321	ULAS_A 154,	1	0,003530	0,029600	0,009810	☑	From	336,0	206,0	247,0
111021	CORLU 154,0	111421	TEGESAN 154,	1	0,005680	0,028150	0,010790	☑	From	250,0	153,0	182,0
111021	CORLU 154,0	111421	TEGESAN 154,	2	0,009400	0,030140	0,010330	☑	From	180,0	110,0	132,0
111021	CORLU 154,0	113721	MARMARA PAM	1	0,005557	0,018032	0,006255	☑	From	180,0	180,0	180,0
111021	CORLU 154,0	122121	HADIMKOY 15	1	0,037940	0,121850	0,041780	☑	From	180,0	110,0	132,0
111121	TEKIRDAG 154,	111421	TEGESAN 154,	1	0,011150	0,035770	0,012260	☑	From	180,0	110,0	132,0
111121	TEKIRDAG 154,	112121	MALKARA 15	1	0,028470	0,091320	0,031300	☑	From	180,0	110,0	132,0
111221	LULEBURGAZ 1	112821	ZORLUENERJ_A	1	0,007760	0,047600	0,021590	☑	From	280,0	171,0	204,0

Şekil 5.23. PSS/E programında iletim hatlarının modellendiği ekran

Şekil 5.23.'de yer alan branch sekmesinde ise iletim hatlarının karakteristik özellikleri modellenir. Hattın direnç ve empedans bilgileri, farklı mevsimlerdeki akım taşıma kapasiteleri bu ekrana görülür. Line R ve Line X sütunları iletim hattının direnç ve empedans karakteristiğini belirtir. Rate A, Rate B ve Rate C sütunlarında sırasıyla kış, bahar ve yaz aylarında hattın akım taşıma kapasitesini belirtir.

From Bus Number	From Bus Name	To Bus Number	To Bus Name	Id	Name	In Service	Metered	Winding 1 Side	Controlled Bus	Controlled Side	Tap Positions
110110	4UNIMAR 380,	110181	G-4UNIMAR 15,	1	S-4UNIMAR_TR	☑	☑ From	☑ From	110110	☑ Tapped	17
110110	4UNIMAR 380,	110182	G-4UNIMAR 15,	1	S-4UNIMAR_TR	☑	☑ From	☑ From	110110	☑ Tapped	17
110110	4UNIMAR 380,	110183	G-4UNIMAR 15,	1	S-4UNIMAR_TR	☑	☑ From	☑ From	110110	☑ Tapped	17
110210	4HAMITABAT 38	110221	HAMITABAT_A 1	1	A-HAMITABAT_	☑	☐ From	☐ From	110221	☑ Tapped	33
110210	4HAMITABAT 38	110221	HAMITABAT_A 1	2	A-HAMITABAT_	☑	☐ From	☐ From	110221	☑ Tapped	33
110210	4HAMITABAT 38	110280	G-4H.ABAT_A11	1	S-4HAMITABAT	☐	☑ From	☑ From	110210	☑ Tapped	5
110210	4HAMITABAT 38	110281	G-4H.ABAT_A21	1	S-4HAMITABAT	☐	☑ From	☑ From	110210	☑ Tapped	5
110210	4HAMITABAT 38	110282	G-4H.ABAT_A31	1	S-4HAMITABAT	☐	☑ From	☑ From	110210	☑ Tapped	5
110210	4HAMITABAT 38	110283	G-4H.ABAT_B11	1	S-4HAMITABAT	☑	☑ From	☑ From	110210	☑ Tapped	5
110210	4HAMITABAT 38	110284	G-4H.ABAT_B21	1	S-4HAMITABAT	☑	☑ From	☑ From	110210	☑ Tapped	5
110210	4HAMITABAT 38	110285	G-4H.ABAT_B31	1	S-4HAMITABAT	☑	☑ From	☑ From	110210	☑ Tapped	5
110210	4HAMITABAT 38	110286	G-4H.ABAT_C11	1	S-4HAMITABAT	☑	☑ From	☑ From	110210	☑ Tapped	5
110210	4HAMITABAT 38	110287	G-4H.ABAT_C21	1	S-4HAMITABAT	☑	☑ From	☑ From	110210	☑ Tapped	5
110210	4HAMITABAT 38	110288	G-4H.ABAT_C31	1	S-4HAMITABAT	☑	☑ From	☑ From	110210	☑ Tapped	5
110210	4HAMITABAT 38	110289	G-4H.ABAT_D31	1	S-4HAMITABAT	☑	☑ From	☑ From	110210	☑ Tapped	5
110221	HAMITABAT_A 1	110291	G-HAMITBT_D11	1	S-HAMITABAT_	☑	☑ From	☑ From	110221	☑ Tapped	5
110221	HAMITABAT_A 1	110292	G-HAMITBT_D21	1	S-HAMITABAT_	☑	☑ From	☑ From	110221	☑ Tapped	5
110310	4BABAESKI 38	110321	BABAESKI 154	1	A-BABAESKI_O	☑	☐ From	☐ From	110321	☑ Tapped	17
110310	4BABAESKI 38	110321	BABAESKI 154	2	A-BABAESKI_O	☑	☐ From	☐ From	110321	☑ Tapped	17
110321	BABAESKI 154	110341	BABAESKI_TRA	1	B-BABAESKI_T	☑	☐ From	☐ From	110341	☑ Tapped	27
110410	4K.CELIK 380,	110441	K.CELIK_TR1 31	1	A-KAPTANCELI	☑	☐ From	☐ From	110441	☑ Tapped	27
110410	4K.CELIK 380,	110442	K.CELIK_TR2 31	1	A-KAPTANCELI	☑	☐ From	☐ From	110442	☑ Tapped	27
110410	4K.CELIK 380,	110443	K.CELIK_TR3 31	1	A-KAPTANCELI	☑	☐ From	☐ From	110443	☑ Tapped	27
110442	K.CELIK_TR2 31	110471	G-4CEBI_ENJ 11	1	S-4CEBI_ENJ_	☑	☑ From	☑ From	110442	☑ Tapped	5
110442	K.CELIK_TR2 31	110472	G-4CEBI_ENJ 11	1	S-4CEBI_ENJ_	☑	☑ From	☑ From	110442	☑ Tapped	5
110521	TRAKYA_ELK_A	110591	G-TRKY_ELKTR	1	S-TRAKYA_ELK	☑	☑ From	☑ From	110521	☑ Tapped	17
110521	TRAKYA_ELK_A	110592	G-TRKY_ELKTR	1	S-TRAKYA_ELK	☑	☑ From	☑ From	110521	☑ Tapped	17
110521	TRAKYA_ELK_A	110593	G-TRKY_ELKTR	1	S-TRAKYA_ELK	☑	☑ From	☑ From	110521	☑ Tapped	17
110621	BOTASME 15	110641	BOTASME_TRC	1	B-BOTAS_TRC	☑	☐ From	☐ From	110641	☑ Tapped	27
110621	BOTASME 15	110651	BOTASME_TRA	1	B-BOTAS_TRA	☑	☐ From	☐ From	110651	☑ Tapped	27
110621	BOTASME 15	110652	BOTASME_TRB	1	B-BOTAS_TRB	☑	☐ From	☐ From	110652	☑ Tapped	27
110721	B.CEKMECE 15	110742	B.CEKMCE_TRA	1	B-B.CEKMECE_	☑	☐ From	☐ From	110742	☑ Tapped	27
110721	B.CEKMECE 15	110743	B.CEKMCE_TRB	1	B-B.CEKMECE_	☑	☐ From	☐ From	110743	☑ Tapped	27
110821	B.KARISTIRAN15	110841	B.KARSTI_TR13	1	B-B.KARISTIR	☑	☐ From	☐ From	110841	☑ Tapped	27
110821	B.KARISTIRAN15	110842	B.KARSTI_TR23	1	B-B.KARISTIR	☑	☐ From	☐ From	110842	☑ Tapped	27
110842	B.KARSTI_TR23	110861	G-SAHINLER 11	1	S-SAHINLER_G	☐	☑ From	☑ From	110842	☑ Tapped	33
110842	B.KARSTI_TR23	110862	G-SAHINLER 11	1	S-SAHINLER_G	☐	☑ From	☑ From	110842	☑ Tapped	33
110842	B.KARSTI_TR23	110863	G-SAHINLER 11	1	S-SAHINLER_G	☐	☑ From	☑ From	110842	☑ Tapped	33

Bus | Plant | Machine | Load | Fixed Shunt | Switched Shunt | Induction Machine | Branch | Breaker | **2 Winding** | 3 Winding | Impedance table | FACTS | 2-Term DC

Şekil 5.24. Sistemde yer alan trafolarla ilgili veriler.

Şekil 5.24.'de trafonun hangi iki barayı bağladığı, serviste olup olmadığı hangi baradan kontrol edildiği gibi bilgilere ulaşılabilir. Bunun yanında trafonun birinci sargısının gerilim bilgisi, trafonun ikinci sargısının gerilim bilgisi, trafonun sargı direnci bilgisi ve trafonun kendi iç yapısındaki direnç bilgileri pu değeri cinsinden bu sayfada görülebilir.

5.2.2. PSS/E programıyla yapılan çalışma

PSS-E programında yapılan bu çalışmada 2014 yılının yaz mevsimi maksimum tüketimin oluştuğu 14.08.2014 günü saat 14:30'daki Türkiye Elektrik Sisteminin yük akışları, santral üretimleri ve trafo tüketimleri ile o andaki iletim hatlarının bağlantı durumları alınmıştır. Burada Türkiye Elektrik Sisteminin gerçek verileri kullanılarak PSS-E programında örnek

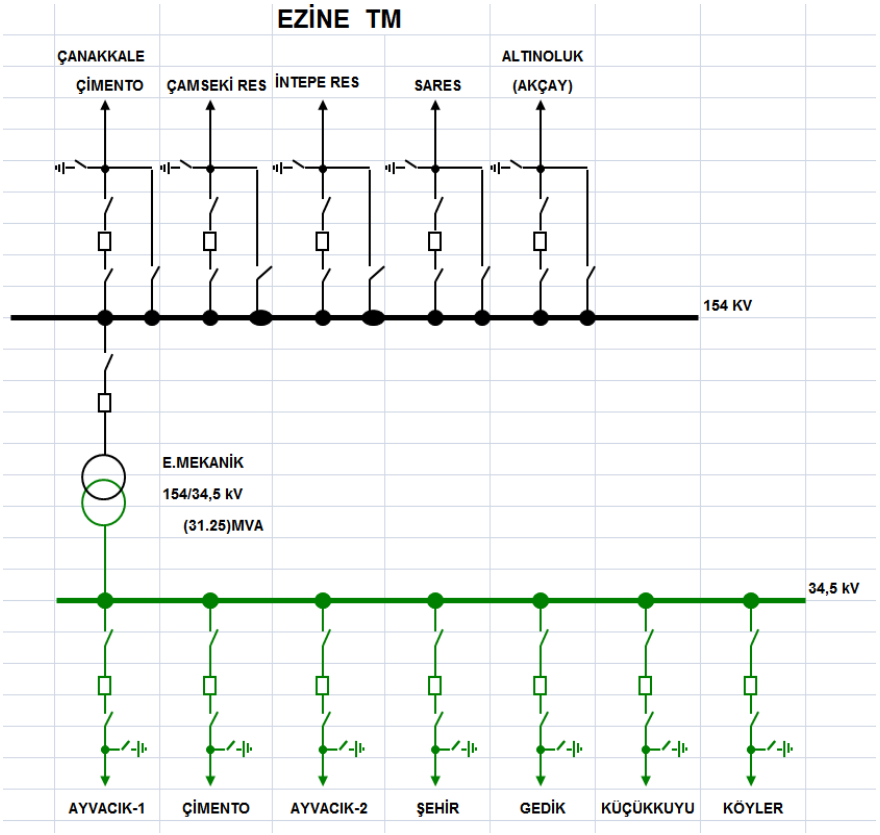
bir çalışma yapılmıştır. Gerçekleştirmiş olduğumuz bu çalışmada yoğun rüzgâr santraline sahip olması nedeniyle Çanakkale ve Balıkesir illerindeki 154 kV'luk bara sistemine bağlı rüzgâr santralleri seçilmiştir. Çalışmada yakın konumlarda bulunan santrallerin elektrik sistemindeki bara gerilimi üzerindeki etkisini gösterebilmek için aynı baraya 154 kV'luk iletim hattıyla bağlı farklı uzaklıklardaki üç santral seçilmiştir. Çanakkale ve Balıkesir illerinde seçilen rüzgâr santrallerinin ikisi Çanakkale ilimizde, diğer diğeri de Balıkesir ilimizde bulunmaktadır. Bu santraller ve kurulu güçleri Çizelge 5.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Rüzgâr santralleri ve kullanılan generatör tipleri

Rüzgâr Santrali Kurulu Bölge	Santral Kurulu Gücü (MW)	Türbinin Üretici Firması ve Modeli	Rüzgâr Türbininde Kullanılan Generator Tipi	Türbin Adet ve Kapasitesi
İNTEPE-ÇANAKKALE	30,4	Enercon	Sürekli Mıknatıslı Senkron Generator	38 adet 800 kW
ÇAMSEKİ-BALIKESİR	20,8	Enercon	Sürekli Mıknatıslı Senkron Generator	10 adet 2000 kW ve 1 adet 800 kW
SARES-ÇANAKKALE	24,5	GE	Çift Beslemeli Asenkron Generator	9 adet 2750 kW

Bu santrallerin hepsi 154 kV Ezine barasına bağlıdır. İntepe santrali 30 km, Çamseki santrali 21 km ve Sares santrali 9 km'lik iletim hattıyla 154 kV Ezine trafo merkezinin barasına bağlıdır.

Bir trafo merkezindeki gerilimde yükselme eğilimi baradaki üretimin tüketimden fazla olması durumunda ortaya çıkar. Çalışma yaptığımız Ezine trafo merkezindeki tüketim miktarı baradaki üretim miktarından az olduğu için bu baralarda da gerilim yükselme yönünde eğilim göstermektedir.



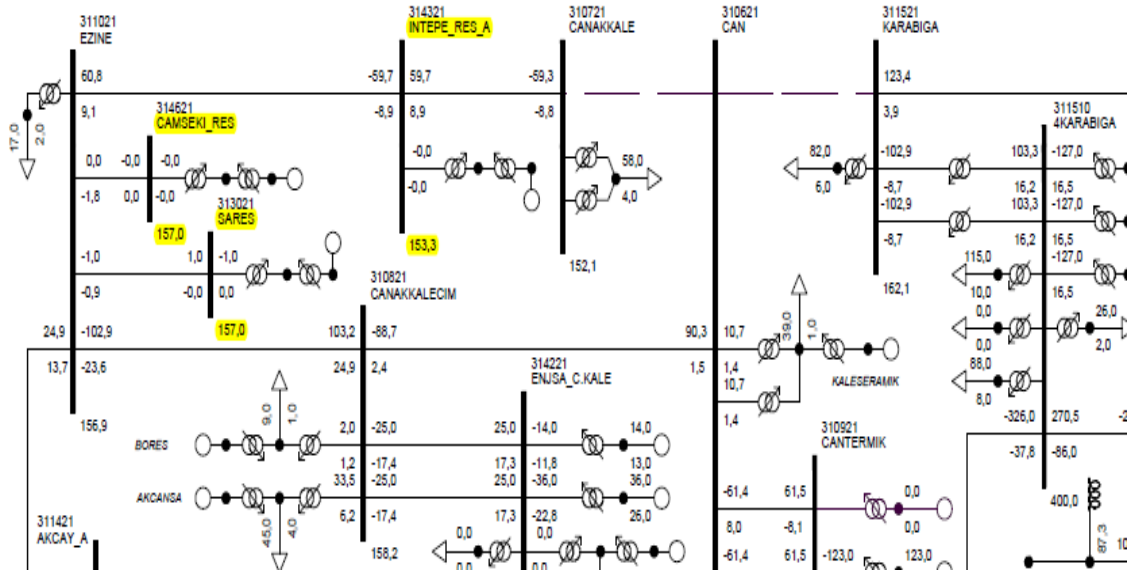
Şekil 5.25. Ezine trafo merkezinin tek hat şema gösterimi

Şekil 5.25'de Ezine 154 kV trafo merkezinin tek hat şeması gösterilmiştir. Ezine ilçesinde 2014 yılı ağustos ayı içerindeki tüketim en fazla olduğu 14:30'da 17 MW tüketim gerçekleştiği görülmektedir. 17 MW tüketim olan bir ilçede sadece Ezine barasına bağlı rüzgâr santrallerinde toplam 67 MW üretim mevcuttur ki bu da bölgedeki tüm baralarda gerilimin yükselmesine neden olur. Ezine ilçesinde santrallerin ürettiği enerjinin çok az bir bölümü kullanılır bu nedenle bölgede üretim fazlası oluşacak ve bu fazla üretimin başka bölgelere aktarılma ihtiyacı doğacaktır. Bu barada üretim tüketimden çok daha fazla olması gerilimin yükselmesine sebep olur.

Bu çalışmada seçilen rüzgâr santrallerinin çalışarak maksimum üretim yapması ve üretim yapmamaları durumları Ezine trafo merkezinin üç farklı yük durumu için(ilk çalışma anındaki yükü (17 MW), maksimum yüklenmesi(30 MW) ve minimum yüklenmesi (6 MW)) için ayrı ayrı çalıştırılıp bağlı oldukları baralarda meydana getirdikleri gerilim değişimlerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Ezine trafo merkezinde tüketimin 17 MW olması durumu;

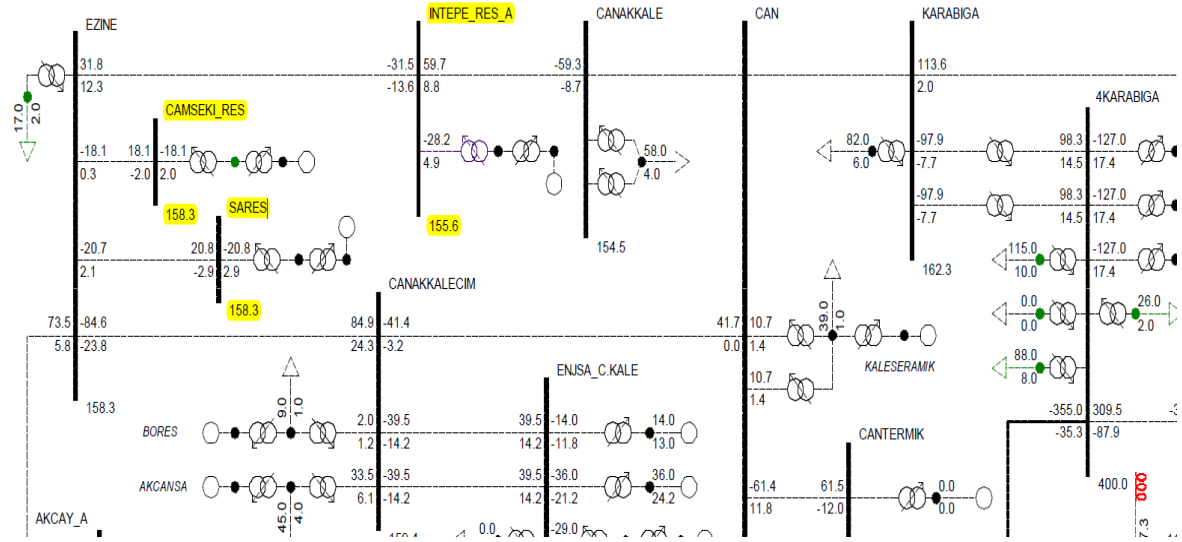
Örnek olarak aldığımız İntepe, Çamseki ve Sares rüzgâr santrallerinin bulundukları bölgenin hiç rüzgâr almadığı durumdaki elektrik sistemine etkileri gösterilmek istenmiş ve üretimleri durdurularak hiç üretim yaptırılmamıştır. Örnek olarak aldığımız rüzgâr santrallerinin minimum üretim durumu için elektrik sisteminde bağlı bulundukları baralardaki gerilimleri ve hatlardaki aktif ve reaktif güç akışları şekil 5.23'de gösterilmiştir.



Şekil 5.26. Ezine TM tüketimi 17 MW iken rüzgâr santrallerinin üretim yapmaması durumu

Şekil 5.26'de görüldüğü gibi Çamseki, Sares ve İntepe rüzgâr santralleri 154 kV'luk bara gerilimine sahip Ezine trafo merkezine direk bağlanmışlardır. İlk durumda Çamseki ve Sares santrallerinde bara gerilimleri 157 kV, İntepe rüzgâr santrali bara gerilimi 153,3 kV iken Ezine trafo merkezinin bara gerilimi 156,9 kV'tur.

İkinci durumda örnek olarak aldığımız İntepe, Çamseki ve Sares rüzgâr santrallerinin bulundukları bölgenin yoğun rüzgâr aldığı durumdaki elektrik sistemine etkileri gösterilmek istenmiş ve maksimum kapasitede çalıştırarak üretim yaptırılmıştır. Örnek olarak aldığımız rüzgâr santrallerinin maksimum üretim durumu için elektrik sisteminde bağlı bulundukları baralardaki gerilimleri ve hatlardaki aktif ve reaktif güç akışları şekil 5.27'de gösterilmiştir.

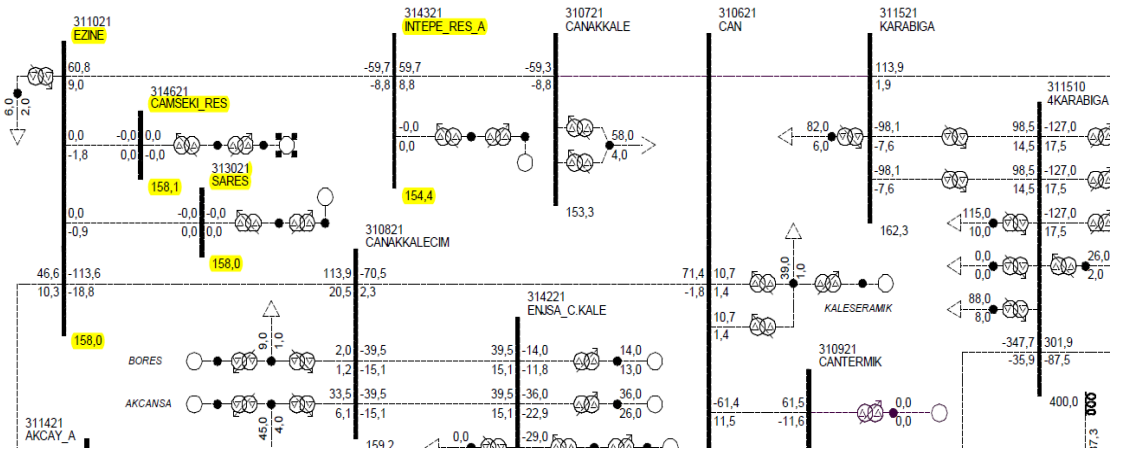


Şekil 5.27. Ezine TM tüketimi 17 MW iken rüzgâr santrallerinin maksimum (tam kapasitede) çalışma durumu

Şekil 5.27'de görüldüğü rüzgâr santrallerinin maksimum üretim yapmaları durumunda Çamseki ve Sares santralinde bara gerilimleri 158,3 kV'ta, İntepe rüzgâr santralinde bara gerilimi 155,6 kV'a çıkar. Ezine trafo merkezinin bara gerilimi 158,3 kV olur.

Ezine trafo merkezinde tüketimin 6 MW olması durumu;

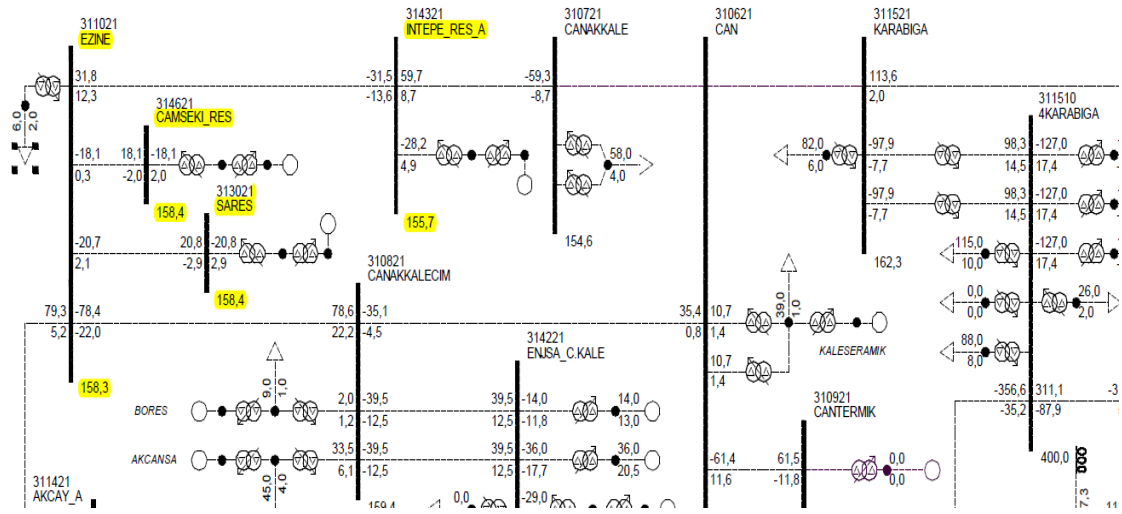
Örnek olarak aldığımız İntepe, Çamseki ve Sares rüzgâr santrallerinin bulundukları bölgenin hiç rüzgâr almadığı durumdaki elektrik sistemine etkileri gösterilmek istenmiş ve üretimleri durdurularak hiç üretim yaptırılmamıştır. Örnek olarak aldığımız rüzgâr santrallerinin minimum üretim durumu için elektrik sisteminde bağlı bulundukları baralardaki gerilimleri ve hatlardaki aktif ve reaktif güç akışları şekil 5.25'de gösterilmiştir.



Şekil 5.28. Ezine TM tüketimi 6 MW iken rüzgâr santrallerinin üretim yapmaması durumu

Şekil 5.28'de görüldüğü gibi Çamseki, Sares ve İntepe rüzgâr santralleri 154 kV'luk bara gerilimine sahip Ezine trafo merkezi barasına bağlanmışlardır. İlk durumda Çamseki santralinde bara gerilimi 158,1 kV, Sares santralinde bara gerilim 158 kV ve İntepe rüzgâr santrali bara gerilimi 154,4 kV'tur. Ezine trafo merkezi bara gerilimi 158 kV'tur.

İkinci durumda örnek olarak aldığımız İntepe, Çamseki ve Sares rüzgâr santrallerinin bulundukları bölgenin yoğun rüzgâr aldığı durumdaki elektrik sistemine etkileri gösterilmek istenmiş ve maksimum kapasitede çalıştırarak üretim yaptırılmıştır. Örnek olarak aldığımız rüzgâr santrallerinin maksimum üretim durumu için elektrik sisteminde bağlı bulundukları baralardaki gerilimleri ve hatlardaki aktif ve reaktif güç akışları Şekil 5.29'de gösterilmiştir.

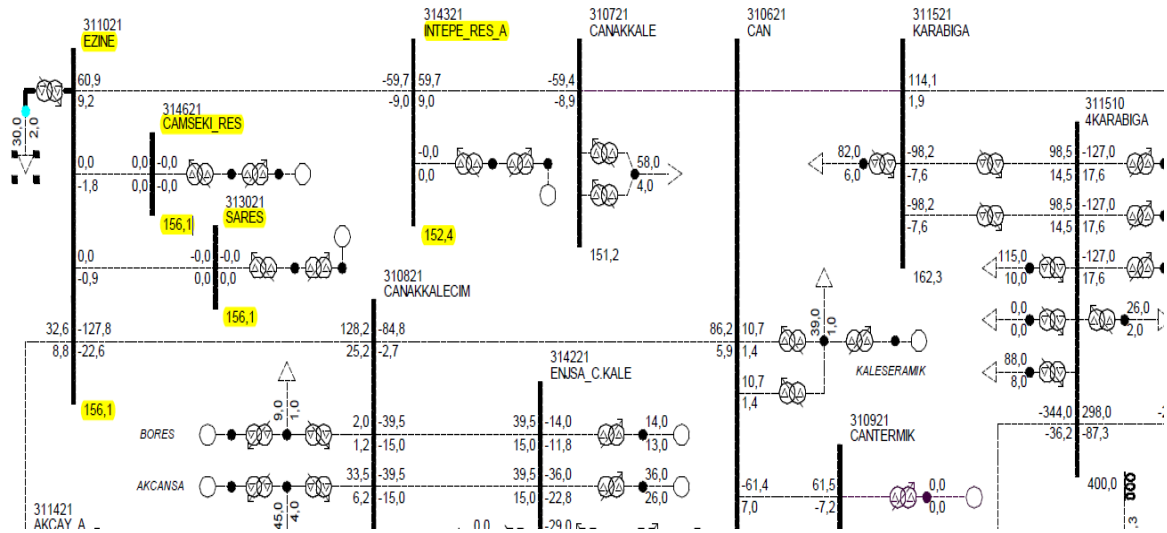


Şekil 5.29. Ezine TM tüketimi 6 MW iken rüzgâr santrallerinin maksimum (tam kapasitede) çalışma durumu

Şekil 5.29'de görüldüğü gibi Çamseki ve Sares rüzgâr santralleri bara gerilimleri 158,4 kV'ta, İntepe santralinin bara gerilimi 155,4 kV'ta çıkar. Ezine trafo merkezinin bara gerilimi 158,3 kV olur.

Ezine trafo merkezinde tüketimin 30 MW olması durumu;

Örnek olarak aldığımız İntepe, Çamseki ve Sares rüzgâr santrallerinin bulundukları bölgenin hiç rüzgâr almadığı durumdaki elektrik sistemine etkileri gösterilmek istenmiş ve üretimleri durdurularak hiç üretim yaptırılmamıştır. Örnek olarak aldığımız rüzgâr santrallerinin minimum üretim durumu için elektrik sisteminde bağlı bulundukları baralardaki gerilimleri ve hatlardaki aktif ve reaktif güç akışları şekil 5.30'de gösterilmiştir.

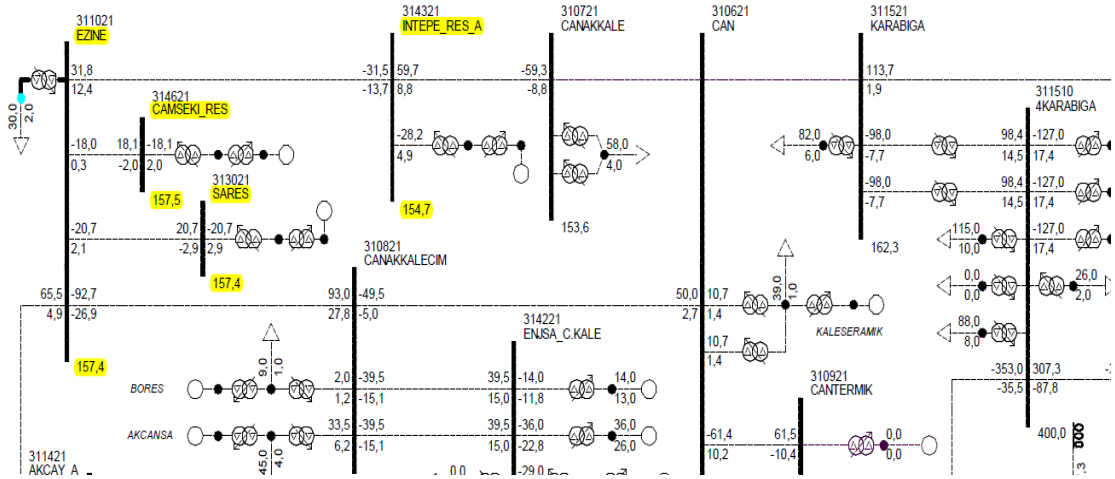


Şekil 5.30. Ezine TM tüketimi 30 MW iken rüzgâr santrallerinin üretim yapmaması durumu

Şekil 5.30'da görüldüğü gibi Çamseki, Sares ve İntepe rüzgâr santralleri 154 kV'luk bara gerilimine sahip Ezine trafo merkezi barasına bağlanmışlardır. İlk durumda Ezine trafo merkezi bara gerilimi156,1 kV, Çamseki santralinde bara gerilimi 156,1 kV, Sares santralinde bara gerilim 156,1 kV ve İntepe rüzgâr santrali bara gerilimi 152,4 kV'tur.

İkinci durumda örnek olarak aldığımız İntepe, Çamseki ve Sares rüzgâr santrallerinin bulundukları bölgenin yoğun rüzgâr aldığı durumdaki elektrik sistemine etkileri gösterilmek istenmiş ve maksimum kapasitede çalıştırarak üretim yaptırılmıştır. Örnek olarak aldığımız rüzgâr santrallerinin maksimum üretim durumu için elektrik sisteminde

bağlı bulundukları baralardaki gerilimleri ve hatlardaki aktif ve reaktif güç akışları Şekil 5.31'de gösterilmiştir.



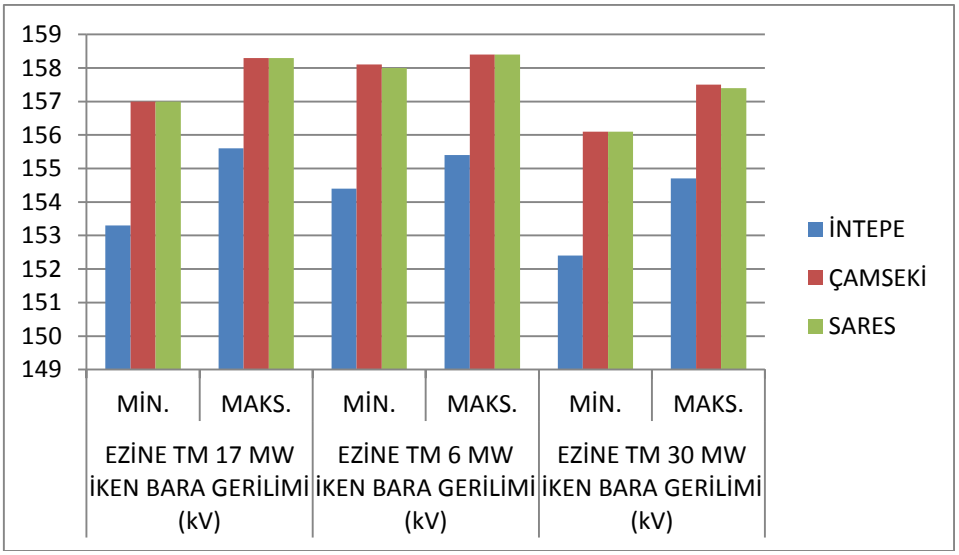
Şekil 5.31. Ezine TM tüketimi 30 MW iken rüzgâr santrallerinin maksimum (tam kapasitede) çalışma durumu

Şekil 5.31'de görüldüğü gibi Çamseki 157,5 kV, Sares 157,4 kV ve İntepe rüzgâr santrali bara gerilimi 154,7 kV'ta çıkar. Ezine trafo merkezinin bara gerilimi 157,4 kV olur.

Çizelge 5.2. Rüzgâr santrallerinin minimum ve maksimum üretim yapmaları durumunda gerilim değişimlerinin karşılaştırılması

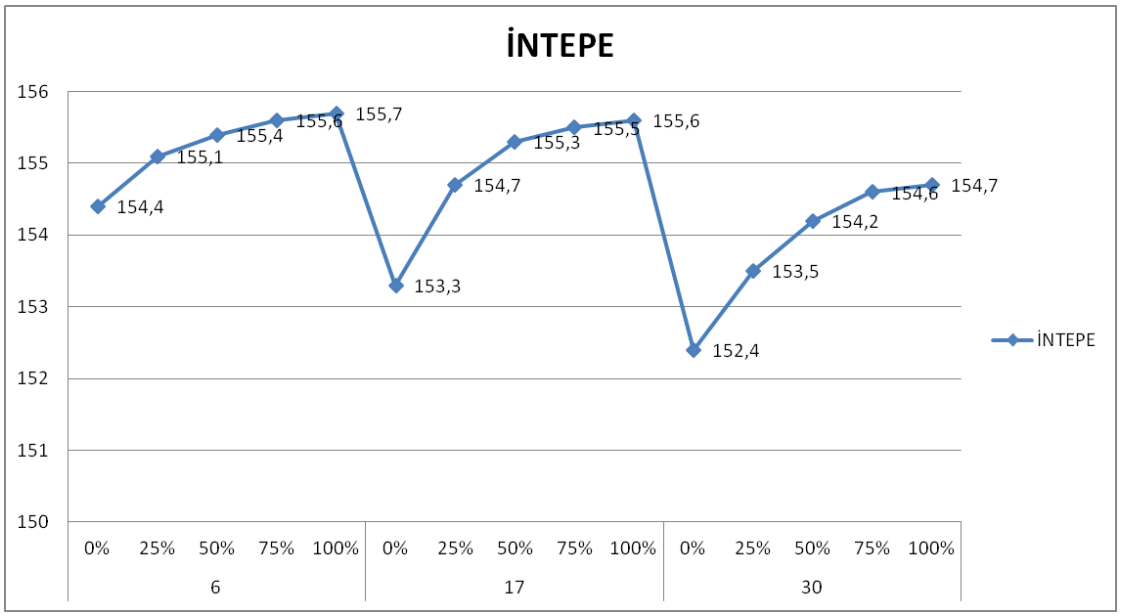
	YAPILAN ÜRETİM (MW)		EZİNE TM 17 MW İKEN BARA GERİLİMİ (kV)		EZİNE TM 6 MW İKEN BARA GERİLİMİ (kV)		EZİNE TM 30 MW İKEN BARA GERİLİMİ (kV)	
Santral adı	MİN.	MAKS.	MİN.	MAKS.	MİN.	MAKS.	MİN.	MAKS.
İNTEPE	0	28,2	153,3	155,6	154,4	155,4	152,4	154,7
ÇAMSEKİ	0	18,1	157	158,3	158,1	158,4	156,1	157,5
SARES	0	20,8	157	158,3	158	158,4	156,1	157,4
EZİNE	-	-	156,9	158,3	158	158,3	156,1	157,4

Çizelge 5.4'te örnek olarak aldığımız rüzgâr santrallerinin yaptığımız iki farklı çalışma modu için karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 5.32'de bu karşılaştırma grafik olarak gösterilmiştir.

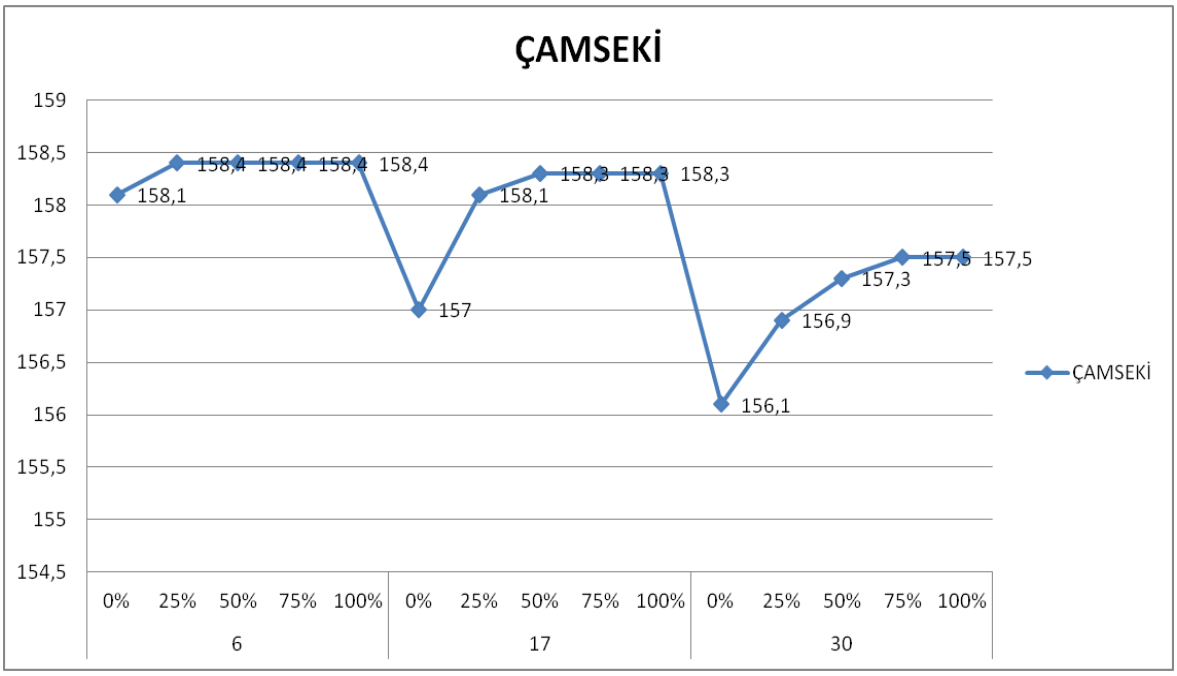


Şekil 5.32. Rüzgâr santrallerinin minimum ve maksimum üretim yapmaları durumunda gerilim değişimlerinin karşılaştırılması

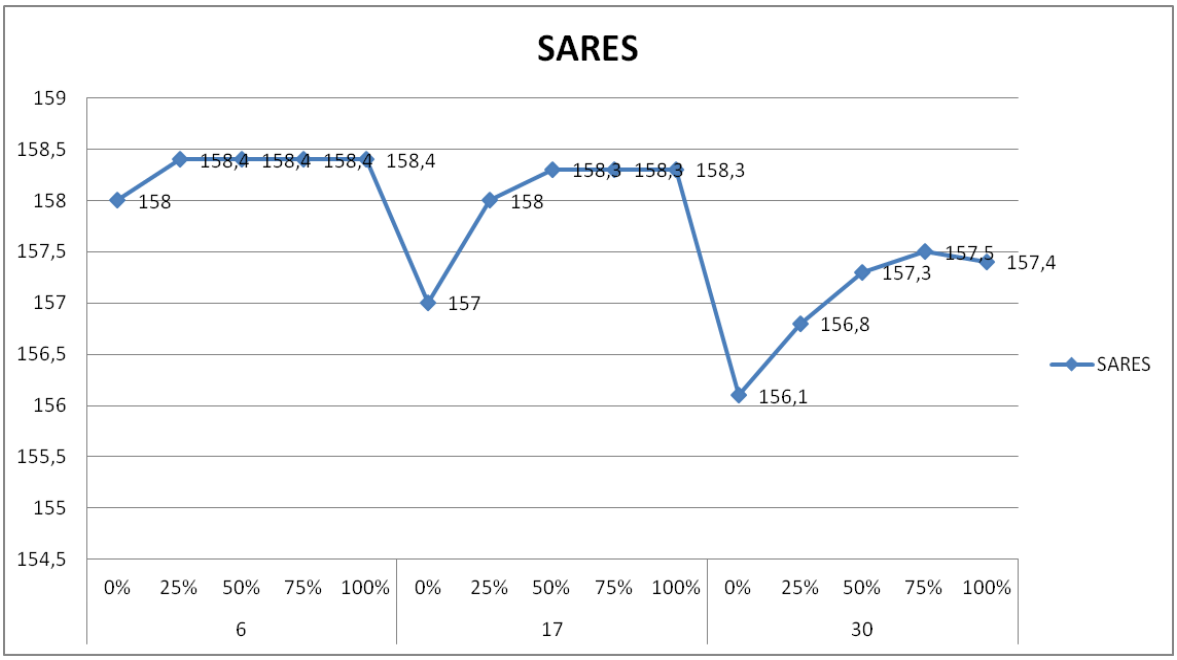
Son çalışmamızda Ezine barasına bağlı rüzgâr santralleri üretim yapmaması durumu (%0), %25, %50, %75 ve maksimum (%100) güçlerde çalıştırılması durumlarını, Ezine trafo merkezinde minimum(6 MW), maksimum(30) ve çalışmanın yapıldığı 2014 yılı ağustos ayı saat 14:30' daki (17 MW) tüketim olduğu zamandaki santrallerin bara gerilim değişimleri her bir santral için ayrı ayrı grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.33. Ezine TM'nin üç farklı tüketim değeri (6, 17 ve 30 MW) için İntepe santraline farklı yüzdelerde üretim yapılması durumunda bara gerilim değişimi



Şekil 5.34. Ezine TM'nin üç farklı tüketim değeri (6, 17 ve 30 MW) için Çamseki santraline farklı yüzdelerde üretim yapılması durumunda bara gerilim değişimi



Şekil 5.35. Ezine TM'nin üç farklı tüketim değeri (6, 17 ve 30 MW) için Sares santraline farklı yüzdelerde üretim yapılması durumunda bara gerilim değişimi

Simülasyon ve gerçek sistem üzerinde, elektrik sisteminde rüzgâr santrallerinin meydana getirdiği gerilim bozulmaları gösterilmiştir.

Simülasyon ile yapılan çalışma ve gerçek sistem üzerinde PSS-E programıyla yapılan analiz karşılaştırdığımızda rüzgâr santrallerinin değişken rüzgâr hızlarında ve bulundukları bölgedeki belirsiz rüzgâr rejiminden dolayı kararsız üretim yaptıkları iki durum içinde gözlemlenmiştir. Bu kararsızlık rüzgâr santrallerinin bağlı bulundukları baralarda sürekli değişken kararsız bir gerilim oluşmasına sebep olmaktadır.

Ezine barasına bağlı rüzgâr santrallerinin maksimum üretim yapması, üretim yapmaması ve % 25, %50, %75 kapasitede üretim yapması durumları için sonuçlar incelenmiştir. Ezine TM'de minimum tüketim durumunda Sares ve Çamseki santrallerinde gerilim 158 kV, İntepe'de 155,7 kV olmakta iken, Ezine TM'de tüketimin maksimum değer olan 30 MW'ta çıkması durumunda Sares 157,4 kV, Çamseki 157,5 kV ve İntepe'de 154,7 kV olmaktadır.

Yapılan son çalışmadan hem üretim merkezlerinin bağlı olduğu hem de tüketim merkezi barası olan Ezine TM'de üretim ve tüketim arasındaki fark ne kadar düşük olursa baralardaki gerilim artışı o kadar düşük olduğu görülmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde dünya nüfusunun sürekli artmasıyla tüm dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında bir artış görülmektedir. Özellikle yaşanan enerji krizleri ve fosil yakıtların sürekli azalması, tüm dünyayı alternatif enerji kaynakları arayışına yöneltmiştir. Daha fazla elektrik enerjisi tüketebilmek için, daha fazla üretmek gerekir ve daha fazla üretebilmek içinde, enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır.

Elektrik enerjisi ihtiyacının büyük bir kısmının karşılandığı fosil enerji kaynaklarının ömürlerinin sınırlı olması ve dolayısıyla hızla tükenmesinin yanı sıra, sera gazı emisyonunu arttırarak, küresel ısınmanın başlıca sorumlusu olarak görülmeleri, insanoğlunu yenilenebilir alternatif temiz enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının doğada bol miktarda bulunmaları, bedava ve çevre dostu olmaları onları daha da cazip hale getirmiştir.

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisi ele alınmıştır. Rüzgâr enerjisi, dünya üzerinde birçok alanda enerji temininde önemli bir rol oynamaktadır. Geçtiğimiz son on yıl içinde rüzgâr türbini teknolojileri büyük bir gelişme göstermiştir. Bu gelişmeleri büyük ölçekli türbin dizaynları takip etmektedir. Bu gelişme ve ilerlemelerle maliyetler azalmış, rüzgâr enerjisi teknolojisi fosil yakıtlarla rekabet edebilecek duruma gelmiştir.

Rüzgâr enerjisinin dünya genelinde büyük bir potansiyele sahip olmasının yanında, şebekeye bağlı rüzgâr santrallerinin kullanımı sırasında elektrik sistemindeki etkilenmeler ciddi olumsuzlukları da beraberinde getirmektedir. Rüzgâr santrallerinin toplam kurulu gücü arttıkça sistem üzerindeki bozucu etkiler ve bunların sebep olacağı tehlikelerde artar. Bu yüzden, rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlanma oranlarına bazı kısıtlamalar getirilmiştir. Bu orana göre, gelişmekte olan ülkelerde, bağlantı noktasının minimum kısa devre gücünün en çok %5'i kadar, gelişmiş ülkelerde ise % 2-3'ü kadar kurulu güçte rüzgâr santrali bağlantısına izin verilmesi koşulu vardır. Ülkemizde de bu oran %5'tir ve bu elektriğin arz kalitesi koşulu olarak vurgulanmıştır.

Bu çalışmada, rüzgâr santralinin elektrik sisteminde meydana getireceği gerilim değişimlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda göz önüne alınan, rüzgâr santrali için üç fazlı bir örnek tüketici üzerinde gerçekleştirilen, rüzgâr santralinin farklı güçlerde enerji verme durumları için, akım ve gerilim değişimleri incelenmiştir. Rüzgâr hızı sabit olmayıp sürekli değişebilen, değişik hava koşullarına göre azalıp artabilen bir bileşendir. Bu durumda rüzgârın bir bölgede farklı hızlarda esmesi durumu simule edilerek farklı rüzgâr hızlarına göre elde edilen veriler kıyaslanmış çıktıları incelenmiştir. Farklı rüzgâr hızlarında ve rüzgâr santrali şebekeyle bağlı iken elde edilen güç, gerilim ve akım değerlerinin değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Bu durumda şebekeye bağlı rüzgâr santralinin bağlantı noktasında sürekli bir güç, gerilim ve akım salınımı yaşanacaktır. Simülasyon çalışmasına gerçek bir rüzgâr üretim biriminin verileri girilerek gerçek sistemle simülasyon arasındaki ölçüm farkı gösterilerek simülasyonun doruluk oranı tespit edilmiştir. Aynı zamanda gerçek iletim sistemi üzerinde PSS/E programıyla yapılan çalışmada rüzgâr santrallerinin bağlı oldukları baralarda meydana getirdiği gerilim bozulmaları incelenmiştir. Rüzgâr santrallerinin paralel bağlanacağı dağıtım sistemlerinde uygun sistem yapısı, küçük değerli gerilim ve akım salınımlarının kararlı bir hal alması durumu için önemli olabileceğini göstermektedir.

Rüzgâr elektrik santrallerinin projelendirilmesinde öncelikle santralin kurulacağı bölgeye ait rüzgâr potansiyelinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Rüzgârın yönü ve şiddetinin yanı sıra sürekliliği de üretilen elektrik enerjisinin kaliteli ve güvenilir olması açısından dikkat edilmesi gereken hususlardan biridir. Rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlandığı noktalarda kapasite artırılmalı gerekirse yeni bir hat çekilmeli, ayrıca iletim ve dağıtım sistemine olan olumsuz etkiler en aza indirilmelidir.

Gelişen rüzgâr türbini teknolojisinin kullanımı teşvik edilmeli, zorunlu frekans ve gerilim kontrolü uygulamaları yönetmeliklerle belirlenerek yeni kurulan rüzgâr türbinlerinin bu kontrollere katılabilecek yeterlilikte olmaları zorunlu hale getirilmelidir. Aynı zamanda rüzgâr santrallerinin elektrik piyasasına katılımları zorunlu hale getirilerek, santrallerin doğru üretim tahmini yapmaları sağlanmalıdır.

Rüzgâr enerjisi teknolojileri alanında üniversitelerimizde verilen eğitim yeterli değildir. Bu konuda mühendislik eğitimi veren okullarda rüzgâr enerjisi ile ilgili derslerin sayısı artırılmalı, uygulamalar geniş ölçekte yapılmalıdır.

Rüzgâr enerjisi konusu disiplinler arası bir çalışma olduğundan bölümler arası işbirliği kurulmalı, projeler birlikte gerçekleştirilmelidir.

Sonuç olarak, uygun bölgelere rüzgâr santralleri kurularak mevcut şebekenin yükü hafifletilebilir, dışa bağımlılık azaltılabilir, enerji arzı artırılarak ülke ekonomisine katkıda bulunabilinir.

Güç sistemi çalışmasının genel hedefi tüketicilere kabul edilebilir bir gerilim sağlamak, üretimi ve tüketimi sürekli olarak dengelemektir. Rüzgâr türbinlerine yakın tüketiciler ile ilgili problemleri önlemek için daha güçlü bir şebeke tasarlanması ve etkili gerilim kontrol cihazları kullanılması gerekmektedir. Rüzgâr gücünün bozucu etkilerinin azaltılması şebekede kontrol edilebilir transformatör, şönt kapasitör ve şönt reaktör kullanılmasıyla mümkün olacaktır. Rüzgâr gücü kurulumlarına güç sistemi kontrol özellikleri sağlamak ve güç sistemi stabilitesi üzerindeki etkisini iyileştirmek için güç elektroniği cihazları kullanılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Özerdem, B. (2003). Türkiye'de rüzgâr enerjisi uygulamalarının gelişimi ve geleceği. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 526, 1-10.

2. Özgür, M.A. (2002). *Kütahya'da seçilen bir konumda rüzgâr verileriyle elektrik enerjisi üretim potansiyelinin bulunması*, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, 1-72.

3. Övet, L.(2002). *Türkiye'de rüzgâr enerjisi potansiyeli ve kullanım alanları*, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-105.

4. Luis, J. Sánchez de Tembleque. (2004). Costs of wind power integration into electricity grids Spain. *Spanish National Energy Commision IEA,* Paris, 1-8.

5. Öztürel, N., Zilan R., Ecevit, A. (2001). *Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynakları için izlenmesi gereken strateji, planlama politikaları ve bunların sosyal ve siyasi etkileri*. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, İzmir.

6. Stout, B.A., Myers, C.A., Hurand, A., Faidley, LW. (1979). Energy for World Agriculture. Food and Agriculture Organization of The United Nations. FAO Agriculture Rome Series, 7.

7. Gültutan, S. (2013). Rüzgâr Enerjisi ve Gaziantep Koşullarında (500 kW Altı) Evsel İhtiyaçları Giderecek Rüzgâr Türbin Tasarımı. *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 83, 55.

8. Engin, Ş.N. (2011, 23-24 Aralık). *Tübitak Marmara araştırma merkezi enerji enstitüsü rüzgâr enerjisi çalışmaları ve milres projesi.* Rüzgâr Sempozyumu ve Sergisi, İzmir.

9. Devlet Planlama Teşkilatı (DPT). (2001). 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı. *Elektrik Enerjisi Özel İhtisas Komisyonu Paporu*, Ankara.

10. Altaş, M., Özkan, H.F., Çelebi, E. (2003, 24-27 Eylül). Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi. *2002 Enerji İstatistikleri*, 1-182.

11. Wijk, A.J.M. van, Coelingh, J.P. (1993). Wind Power Potential in the OECD Countries. Netherlands: Utrecht, 1-35.

12. Çalışkan, M. (2011, 27 Mayıs). *Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli ve mevcut yatırımlar.* Rüzgâr Enerjisi ve Santralleri Seminerinde sunuldu, İstanbul.

13. Albostan, A., Eren, L., Çekiç Y. (2008). Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi. *Mühendislik Fakültesi Bahçeşehir Üniversitesi*, 1-4.

14. Gelberi, H. (2003). *Rüzgâr Türbinlerinin Dağıtım Şebekelerine Bağlanması ve Dinamik Simülasyonu,* Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 8-50.

15. Demirtaş, M. (2008). *Güneş Ve Rüzgâr Enerjisi Kullanılarak Şebeke ile Paralel Çalışabilen Hibrit Enerji Santrali Tasarımı Ve Uygulaması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 48-54.

16. Elibüyük, U., Üçgül, İ. (2014). Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri Ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi YEKARUM e-DERGİ*, 3, 1-13.

17. Güney, İ., Noğay, S., Taşkın, S. (2001, 12-13 Ekim). *Rüzgâr Türbinlerinde Kontrol ve Güvenlik Sistemleri*. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, Kayseri.

18. Güven, H.R., Özarslan, M. İ. (2004) Rüzgâr Türbinleri ile Enerji Elde Edilmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (1), 118-122.

19. Li, H., Chen, Z. (2007, 5-8 November). *Transient Stability Analysis of Wind Turbines with Induction Generators Considering Blades and Shaft Flexibility.* Paper presented at the 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). Taipei, Taiwan.

20. Jurado, A., Brugnoni, M. (2009, 8-11 June). *The Effect of fixed speed wind turbines models on transient stability of power system.* Paper presented at the 20th International Conference on Electricity Distribution, Prague.

21. Bahramipanah, M., Afsharnia, S., Shahooei, Z. (2010, 21-24 March). *A Survey on the effect of different kinds of wind turbines on power system stability*. Paper presented at the 1st International Nuclear and Renewable Energy Conference (INREC10), Amman.

22. Loukarakis, E. (2010). Probabilistic Evaluation of Wind Turbine Effects on Power System Transient Behavior. *Electric Power Quality and Supply Reliability,*93-98.

23. Malcolm, N., Aggarwal, R.K. (2012, 4-7 September). *Transient Overvoltage Study of an Island Wind Farm*. Paper presented at the 47th İnternational Universities Power Engineering Conference (UPEC).

24. Abdelhalim, H., Farid, A.M., Adegbege, A.A., Rouco, L., Youcef-Toumi, K. (2013). Small-Signal Stability Effects of Turbine Governors on Power Systems with High Penetrations of Integrated Wind Power. *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), IEEE PES*, 1-6.

25. Lin, L., Zhao, H., Lan, T., Wang, Q., Zeng, J. (2013). Transient stability mechanism of DFIG wind farm and grid-connected power system. *PowerTech (POWERTECH), IEEE Grenoble,* 1-9.

26. Erlich, I., E., Schegner, P. (2013). *Wind Turbine Negative Sequence Current Control and its Effect on Power System Protection*. Power and Energy Society General Meeting, 1-5.

27. Erduman, A., Kılıçkıran, H.C., Kekezoglu, B., Durusu, A., Tanrıöven, M. (2013, 2-4 October). *Wind Turbine Effects on Power System Voltage Fluctuations*. Paper presented at the 3th İnternational Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, Istanbul.

28. Qiao, W., Harley, R.G. (2008). Effect of Grid-Connected DFIG Wind Turbines on Power System Transient Stability. *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE,* 1-7.

29. Nikkhajoei, H., Lasseter, R.H. (2008). Power Quality Enhancement of a Wind-Turbine Generator Under Variable Wind Speeds Using Matrix Converter. *Power Electronics Specialists Conference,* PESC 2008. IEEE, 1755-1761.

30. Mroz, M. (2005, 6-9 June). *The influence of wind turbines on power quality in the hv network in Poland.* Paper presented at the 18th İnternational Conference on Electricity Distribution, Turin.

31. Su, H.J., Huang, H.Y., Chang, G. W. (2010). Power Quality Assessment of Wind Turbines by Matlab/Simulink. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC),*1-5.

32. Ghaderi, S., Vasegh, N., Ghandehari, R. (2013, October). *Fuzzy Pitch Angle Control of Wind Hybrid Turbine To Power Quality Improvement*. Paper presented at International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT), Sarajevo.

33. Rekik, M., Krichen, L. (2014). *Active power filter based on wind turbine for electric power system quality improvement.* Electric Power and Energy Conference (EPEC), 1-6.

34. Koç, E. (2010). *Modeling and Investigation of Fault Ride Through Capability of Variable Speed Wind Turbines*, Yüksek Lisans Tezi, METU Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 16-24, 28-31.

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ŞAHİN, Onur
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 30.09.1981, Sakarya
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (505) 403 98 56
Faks : 0 (312) 484 20 14
e-mail : onursahin111@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/Elektrik Elektronik Müh.	2015
Lisans	Yıldız Teknik Üniversitesi/ Elektrik Mühendisliği	2005
2.Lisans	Anadolu Üniversitesi/ İşletme	2009
Lise	Sakarya Arifiye Anadolu Öğretmen Lisesi	1999

İş Deneyimi

Yıl	Çalıştığı Yer	Görev
2005-Halen	TEİAŞ	Teknik Şef

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

-

Hobiler

Yüzme, Voleybol oynamak, Kitap okuma, Doğa gezileri



GAZİ GELECEKTİR..