

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR SANTRALLERİNİN GÜÇ SİSTEMİNE ENTEGRASYONU
VE ŞEBEKE YÖNETMELİĞİNE GÖRE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Berk RONA

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

OCAK 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR SANTRALLERİNİN GÜÇ SİSTEMİNE ENTEGRASYONU
VE ŞEBEKE YÖNETMELİĞİNE GÖRE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Berk RONA
(301101008)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Önder GÜLER

OCAK 2014

İTÜ Enerji Enstitüsü'nün 301101008 numaralı yüksek lisans öğrencisi **Berk RONA** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“RÜZGAR SANTRALLERİNİN GÜÇ SİSTEMİNE ENTEGRASYONU VE ŞEBEKE YÖNETMELİĞİNE GÖRE ANALİZİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı: **Doç. Dr. Önder GÜLER**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç.Dr. Önder GÜLER**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Ramazan ÇAĞLAR

İstanbul Teknik Üniversitesi

Y.Doç.Dr. Burak BARUTÇU

İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **16 Aralık 2013**

Savunma Tarihi : **22 Ocak 2014**

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendiren, desteğini ve vaktini esirgemeyen ve her zaman beni motive eden hocam Sayın Doç. Dr. Önder GÜLER'e ve hayatımın her anında bana destek olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2013

Berk Rona
(Elektrik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. RÜZGAR SANTRALLERİ TEKNOLOJİLERİ.....	5
2.1 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması	6
2.1.1 Yatay eksenli ve dikey eksenli rüzgar türbinleri.....	6
2.1.2 Rüzgar üstü ve rüzgar altı rüzgar türbinleri	7
2.1.3 Rüzgar türbininin gücü	8
2.1.4 Doğrudan sürürlü ve dişli kutulu rüzgar türbinleri	9
2.1.5 Şebekeye bağlı ve şebekeden izole rüzgar türbinleri	10
2.1.6 Denizde ve karada kurulan rüzgar türbinleri.....	10
2.2 Rüzgar Türbininin Parçaları.....	10
2.2.1 Kanatlar.....	11
2.2.2 Eğim mekanizması	12
2.2.3 Rotor göbeği.....	12
2.2.4 Dişli kutusu	13
2.2.5 Jeneratör.....	13
2.2.6 Mekanik Fren	14
2.2.7 Yön saptırma (Yaw) mekanizması	14
2.2.8 Kule	14
2.3 Rüzgar Türbinlerinin Elektriksel Sistemleri	15
2.3.1 Sincap kafesli asenkron jeneratör.....	15
2.3.2 Çift beslemeli asenkron jeneratör.....	19
2.3.3 Sürekli mıknatıslı senkron jeneratör.....	20
2.4 Rüzgar Santrallerinin Güç Kontrolü.....	21
3. RÜZGAR SANTRALLERİNİN GÜÇ KALİTESİ ÜZERİNE ETKİLERİ ...	23
3.1 Güç Kalitesi Ölçümlerine İlişkin Standartlar.....	23
3.2 Güç Kalitesi Karakteristikleri	24
3.2.1 Anma değerler	25
3.2.2 Gerilim dalgalanmaları	25
3.2.2.1 Sürekli Çalışma	25
3.2.2.2 Anahtarlama işlemleri.....	26
3.2.3 Akım harmonikleri, ara harmonikler ve yüksek frekanslı bileşenler	27
3.2.4 Gerilim düşümüne tepki.....	27
3.2.5 Aktif güç	27
3.2.6 Reaktif güç	28
3.2.7 Şebeke koruması.....	28

3.2.8 Şebekeye geri bağlanma	28
3.3 Gerilim Kalitesi Üzerine Etkiler	28
3.3.1 Yavaş Gerilim Değişimleri	29
3.3.2 Fliker	31
3.3.2.1 Sürekli çalışma	32
3.3.2.2 Anahtarlama İşlemleri	33
3.3.3 Gerilim düşümü	34
3.3.4 Harmonik gerilim	35
3.4 Frekans Üzerine Etkiler	36
4. RÜZGAR SANTRALLERİNİN GÜÇ SİSTEMİ ÜZERİNE ETKİLERİ.....	37
4.1 Kısa Dönemli Etkiler	38
4.2 Uzun Dönemli Etkiler	40
4.3 Gerilim ve Frekans Kontrolü Üzerine Etkiler	41
5. GÜÇ SİSTEMİNİN RÜZGAR SANTRALLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ	45
5.1 Kesinti Etkileri	45
5.2 Frekans Etkileri	46
5.3 Gerilimin Etkileri	47
6. RÜZGAR SANTRALLERİNİN GÜÇ SİSTEMİNE BAĞLANTI	49
KRİTERLERİ	49
6.1 Arıza Sonrası Sisteme Katkı	49
6.2 Güç Kontrolü	50
7. TÜRKİYE'DEKİ ŞEBEKE YÖNETMELİĞİNE GÖRE ÖRNEK SİSTEM	53
İNCELEMESİ	53
7.1 Örnek Sistem Verileri	54
7.2 Yük Akış Analizi	56
7.3 Arıza Sonrası Sisteme Katkı	58
7.4 Reaktif Güç Kapasitesi	66
7.5 Reaktif Güç Desteği	69
7.6 Aktif Güç Kontrolü	71
7.7 Frekans Tepkisi	71
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	73
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	77

KISALTMALAR

CENELEC	: Elektroteknik Standardizasyonu Avrupa Komisyonu
DC	: Doğru Akım
DFIG	: Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör
EN	: Avrupa Standardı
FACTS	: Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri
GWEC	: Küresel Rüzgar Enerjisi Komisyonu
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IGBT	: Yalıtılmış Kapılı İki Kutuplu Transistör
LVRT	: Arıza Sonrası Sisteme Katkı
MEASNET	: Rüzgar Enerjisi Enstitüleri Ölçme Ağı
PCC	: Ortak Bağlantı Noktası
PMSG	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Jeneratör
RES	: Rüzgar Enerjisi Santrali
RMS	: Karekök Ortalama
STATCOM	: Statik Senkron Kompanzator
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TSR	: Kanat Uç Hız Oranı
TÜREB	: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 7.1 : Çeşitli çalışma koşullarına göre bara gerilimleri.....	57
Çizelge 7.2 : Analiz edilen arıza gerilimleri ve süreleri	58
Çizelge 7.3 : Üretilmesi veya tüketilmesi gereken maksimum reaktif güç	67
Çizelge 7.4 : 150 MW ve 300 MW kurulu güç için gerekli reaktif güç miktarları.....	68

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Dünya genelinde yıllara göre rüzgar gücü kapasitesi	2
Şekil 1.2 : Türkiye’de yıllara göre rüzgar gücü kapasitesi	2
Şekil 2.1 : (a) Dikey eksenli (b) yatay eksenli rüzgar türbini	7
Şekil 2.2 : (a) Rüzgar üstü (b) rüzgar altı rüzgar türbini	8
Şekil 2.3 : Rüzgar türbininin aktarım organı	9
Şekil 2.4 : Türbin içyapısı.....	11
Şekil 2.5 : (a) Hidrolik ve (b) elektrik motorlu eğim mekanizması	12
Şekil 2.6 : (a) Üçlü silindirik göbek (b) küresel göbek	13
Şekil 2.7 : Yıllara göre rüzgar türbinlerinin gelişimi	14
Şekil 2.8 : Danimarka konsepti rüzgar türbini	16
Şekil 2.9 : Sabit hızlı sincap kafesli asenkron jeneratörlü rüzgar türbini	17
Şekil 2.10 : Frekans çeviricili asenkron jeneratörlü rüzgar türbini	18
Şekil 2.11 : 2,3 MW Gücündeki rüzgar türbininin güç eğrisi.....	18
Şekil 2.12 : Çift beslemeli asenkron jeneratörlü rüzgar türbini	19
Şekil 2.13 : Sürekli mıknatıslı senkron jeneratörlü rüzgar türbini	20
Şekil 3.1 : Yük akışı analizinin sonucu	30
Şekil 4.1 : Rüzgar santrallerinin güç sistemi üzerine etkileri	38
Şekil 4.2 : Bir güç sisteminde frekans kontrolü için rezervlerin kullanımı	42
Şekil 5.1: Farklı frekanslarda (a) durma ve (b) eğim kontrollü için güç eğrileri.....	46
Şekil 6.1 : Rüzgar çitliği kontrol sisteminin genel yapısı	51
Şekil 7.1 : Trakya bölgesinin PSAT programında modellenen şeması	55
Şekil 7.2 : Arıza sonrası sisteme katkı koşulları	58
Şekil 7.3 : %0 Bağlı gerilim ve 150 ms arıza durumunda aktif & reaktif güç.....	59
Şekil 7.4 : %0 Bağlı gerilim ve 150 ms arıza durumunda bara gerilimi	59
Şekil 7.5 : %30 Bağlı gerilim ve 600 ms arıza durumunda aktif & reaktif güç.....	60
Şekil 7.6 : %30 Bağlı gerilim ve 600 ms arıza durumunda bara gerilimi	60
Şekil 7.7 : %50 Bağlı gerilim ve 900 ms arıza durumunda aktif & reaktif güç.....	61
Şekil 7.8 : %50 Bağlı gerilim ve 900 ms arıza durumunda bara gerilimi	61
Şekil 7.9 : %80 Bağlı gerilim ve 1350 ms arıza durumunda aktif & reaktif güç.....	62
Şekil 7.10 : %80 Bağlı gerilim ve 1350 ms arıza durumunda bara gerilimi	62
Şekil 7.11 : %90 Bağlı gerilim ve 1500 ms arıza durumunda aktif & reaktif güç.....	63
Şekil 7.12 : %90 Bağlı gerilim ve 1500 ms arıza durumunda bara gerilimi	63
Şekil 7.13 : %35 Bağlı gerilim ve 600 ms arıza durumunda bara gerilimi	64
Şekil 7.14 : Arıza durumunda jeneratörün hızı	65
Şekil 7.15 : Arıza durumunda aktif güç üretimi.....	65
Şekil 7.16 : Arıza durumunda reaktif güç üretimi.....	66
Şekil 7.17 : Rüzgar santrali reaktif güç kapasite eğrisi	67
Şekil 7.18 : Reaktif güç ayarına göre türbin uç gerilimi	69
Şekil 7.19 : Reaktif güç desteği eğrisi	69
Şekil 7.20 : Analiz edilen gerilim değişimi	70
Şekil 7.21 : Analiz sonucu reaktif güç desteği.....	71

Şekil 7.22 : Rüzgar türbini güç frekans eğrisi72

RÜZGAR SANTRALLERİNİN GÜÇ SİSTEMİNE ENTEGRASYONU VE ŞEBEKE YÖNETMELİĞİNE GÖRE ANALİZİ

ÖZET

Rüzgar enerjisinin güç sistemlerinde kullanımının küresel çapta artmasına paralel olarak Türkiye’de de son yıllarda rüzgardan elde edilen elektrik enerjisi oldukça artmıştır. 2005 yılında sadece 20 MW olan rüzgar gücü günümüzde 2689 MW ile tüm ihtiyacın %4,3’ünü karşılar hale gelmiştir. Büyük çoğunluğunu konvansiyonel santrallerin oluşturduğu güç sisteminde, kaynağı değişken olan rüzgar santrallerinin ilk zamanların aksine artık iletim sistemine bağlanmasıyla beraber gerilim dengesi konusu önemli hale gelmiştir. Teknolojideki gelişmeler rüzgar türbinlerinde frekans çeviricilerinin kullanımını arttırdığından modern rüzgar türbinlerinde değişken hız ile güç kontrolü vazgeçilmez bir özellik olmuştur. İlk zamanlarda dağıtım sistemine bağlanan rüzgar santralleri için sadece gerilim kalitesi bir önkoşul iken değişen yönetmelikler ile beraber rüzgar santrallerinin güç sisteminin dengesi konusunda katkı yapması beklenmektedir.

Rüzgar santrallerinin şebeke ile entegrasyonunda santralin bağlanacağı baranın kısa devre gücü ve şebeke empedans açısının yanında rüzgar türbini karakteristikleri de belirleyici bir unsurdur. IEC 61400-21 standardına göre rüzgar türbinlerinin güç kalitesi karakteristikleri ve güç sistemi ile olan etkileşimi incelenmektedir. Gerilim kalitesi bakımından yavaş gerilim değişimleri, fliker, gerilim düşümü ve harmonikler standartta belirtilen koşullara göre ölçülür ve değerlendirilir. Rüzgar santrallerinde aktif/reaktif güç kontrolü ve arıza anında sisteme katkı güç sisteminin dengesinin sağlanmasında önem teşkil etmektedir. Yeni şebeke yönetmeliklerine göre bir rüzgar santrali güç sistemine bağlanmadan önce gerekli analizler yapılarak istenilen şartlara ne ölçüde uyum sağladığı araştırılır.

Bu çalışmada bilgisayar ortamında Trakya bölgesinin iletim sistemi modellenerek sisteme entegre olacak bir rüzgar santralının şebeke yönetmeliğine göre uygunluğu araştırılmıştır. Yük akışı analizi, arıza sonrası sisteme katkı, reaktif güç kapasitesi, reaktif güç desteği, aktif güç kontrolü ve frekans tepkisi incelenip rüzgar santralının şebeke yönetmeliğindeki koşulları sağladığı görülmüştür. Ayrıca farklı rüzgar türbini tiplerinde ve farklı santral güçlerinde sonuçların nasıl değiştiği analiz edilip yönetmeliğin sağlanmadığı durumlarda çözüm önerileri sunulmuştur.

POWER SYSTEM INTEGRATION OF WIND FARMS AND ANALYSIS OF GRID CODE REQUIREMENTS

SUMMARY

The percentage of the common used electrical energy, produced by the wind turbines, has been increased globally and also in Turkey in the last years. It was only 20 MW in the year 2005 but nowadays wind energy is going to provide 4,3% of the whole demand with 2689 MW. The power system is consisting of mostly with the conventional power plants. The wind energy could not be connected initially together with national transmission system. To make possible a national connection with this variable sourced wind energy, now is the time to talk about the stability of voltage. The innovation of technology for the frequency converters has essential supported the power control with variable speed drives on the wind turbines. The only expectation was at the beginning the quality of the voltage. However, by changing the rules and standards the wind turbines are forced now to improve the stability of the power systems.

In the integration of wind farms with the power grid, wind turbine power quality characteristics is an important factor as well as short circuit power and phase angle of the grid. According to IEC 61400-21 standard, power quality characteristics of wind farms and the interaction with the power system were investigated. In respect to voltage quality, small voltage variations, flicker, voltage dips and voltage harmonics measurements and assessments were studied with regard to stated circumstances in the standard. In addition, active/reactive power control and low voltage ride through capability are very critical to ensure the power system stability. The existing grid codes demand that wind farms should contribute to power system control with frequency and voltage control to behave much as conventional power plants. Technical requirements about grid codes regarding the connection of wind farms to the power system have a crucial impact on designing the wind farm.

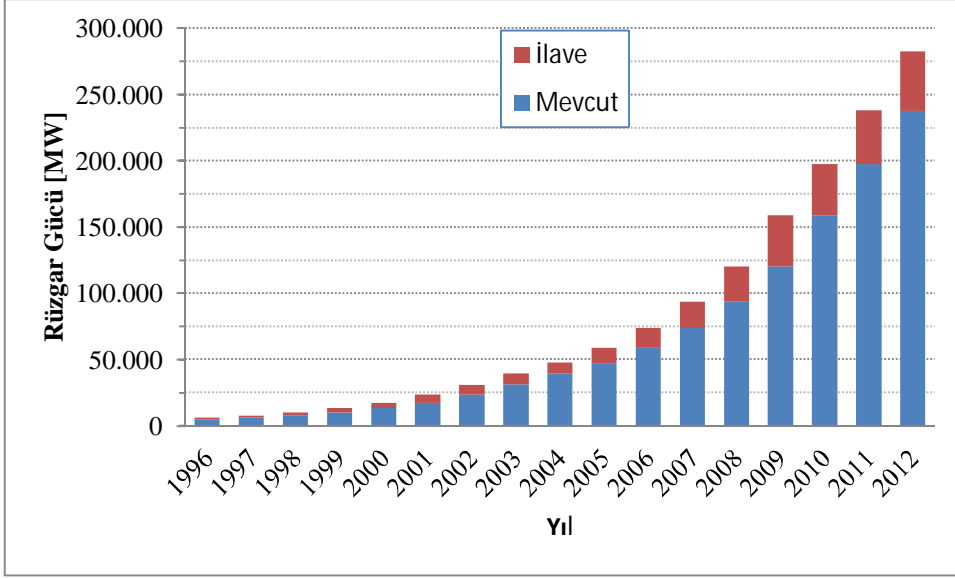
In this research, grid code compliance of under construction grid connected wind farm was studied by modeling the transmission system of Trakya region. Firstly, load flow analysis has been done and it was seen that voltage variations at the point of common coupling were within in the acceptable limits. However, if rated power of the plant has been increased, the usage factor of the transmission lines were changed substantially which are located near the PCC. Secondly, low voltage ride through capability analysis of present permanent magnet synchronous generators with full convertor showed that the wind farm consisted of PMSG is capable of grid code about LVRT. On the other hand, fixed speed SCIG can be suitable in case of using with a STATCOM or any other FACTS equipments. In steady-state analysis, reactive power capacity of wind farm was investigated with regard to grid code conditions. According to amount of active power generation, wind farm should be capable of absorbing or producing minimum reactive power amount that defined in the grid code. In the analyses it was seen that wind farm rated power, short circuit power and phase angle limited the reactive power capacity. The required active power control

and frequency response were explained in respect to grid code. For operation during grid voltage faults it becomes clear that grid codes prescribe that wind turbines must stay connected to the grid and should support the grid by generating reactive power to support and restore quickly the grid voltage after the fault. It is resulted that the analyzed wind farm is suitable with grid code. Furthermore, it was also analyzed how the results are affected in the event of different wind turbines and different wind farm capacity. Resolution advices were presented according to simulation results.

1. GİRİŞ

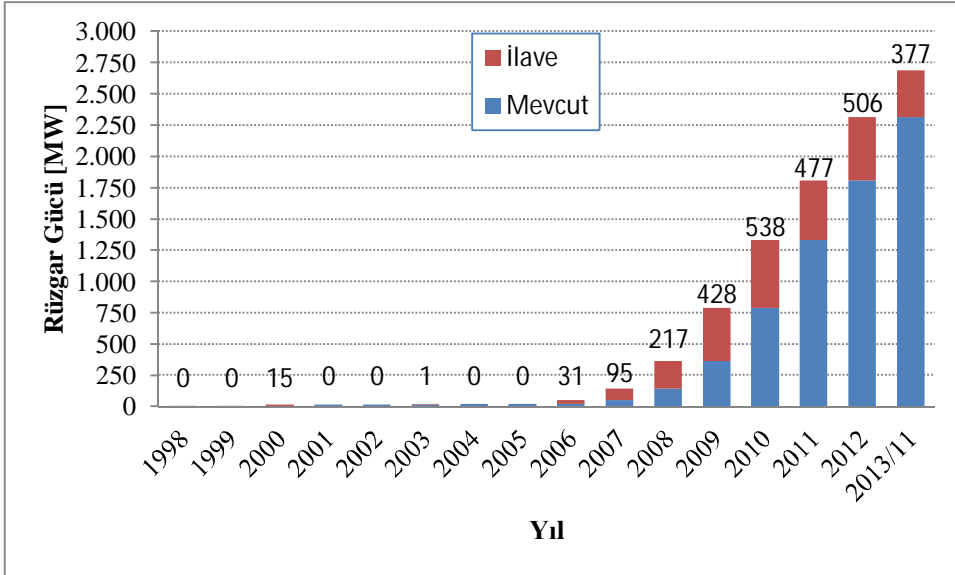
Rüzgar enerjisi tarihte üç bin yıldan uzun bir zamandır kullanılmaktadır. Yirminci yüzyılın başlarına kadar su pompalamak veya tahıl öğütmek gibi mekanik güç üretiminde kullanıldıysa da 1891 yılında Dane Poul La Cour'un elektrik üreten ilk rüzgar türbinini icat etmesiyle artık çoğunlukla elektrik enerjisi üretmek için kullanılmıştır. Fosil yakıt rezervlerinin giderek azalmasına karşın rüzgar enerjisi doğal, temiz, yenilenebilir ve sonsuz bir güç kaynağı olduğu için ve teknolojinin gelişmesiyle beraber rekabet gücünün artması sonucu rüzgar enerjisinin elektrik enerjisi üretimindeki kullanımını giderek artmıştır.

2012 yılı sonu itibarı ile dünya genelinde rüzgar santrallerinin toplam kurulu gücü 282 bin MW'dır. Şekil 1.1'de görüleceği üzere her geçen yıl eklenen kapasite miktarı ile bu değer artmaktadır. Bu santrallerin büyük çoğunluğu Avrupa, Asya ve Amerika kıtalarında yer almaktadır. Asya kıtasındaki rüzgar santrallerinin %96'sı Çin ve Hindistan'da bulunurken, Amerika kıtasında %84 ile Amerika en fazla rüzgar gücüne sahiptir. Avrupa kıtasında ise %29 ile Almanya ve %21 ile İspanya başı çekmektedir. Türkiye 2012 yılı sonunda 2312 MW rüzgar gücü ile Avrupa'da 11. sırada yer almaktadır [1].



Şekil 1.1 : Dünya genelinde yıllara göre rüzgar gücü kapasitesi [1].

Türkiye’deki rüzgar enerjisi gelişimine baktığımızda Şekil 1.2’de 2007 yılına kadar çok az miktarda rüzgar gücü kullanıldığı görülmektedir. Bu tarihten sonra rüzgar enerjisi kullanımı giderek artmıştır. 2013 yılının Kasım ayı itibarı ile 2689 MW kurulu rüzgar gücü bulunmaktadır. Bu gücün büyük çoğunluğu Ege (%41), Marmara (%37) ve Akdeniz (%16) bölgelerinde bulunmaktadır. İl bazında ise Balıkesir (%25), İzmir (%19) ve Manisa (%13) en çok rüzgar gücüne sahip şehirlerdir [2].



Şekil 1.2 : Türkiye’de yıllara göre rüzgar gücü kapasitesi [2].

Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de görüldüğü gibi hem dünya genelinde hem de Türkiye’de son yıllarda şebekeye bağlı rüzgar gücü giderek artmaktadır. Şebekedeki rüzgar gücü

oranının artması Şebeke dengesinin sağlanmasında birtakım problemler ortaya çıkarmaktadır. İlk zamanlarda orta ölçekli rüzgar santralleri dağıtım sistemine bağlanmaktaydı. Bu durumda rüzgar santrallerinin gerilim kalitesine olan etkileri incelenip bu doğrultuda çalışmalar yapılmaktaydı. Ancak son zamanlarda teknolojinin gelişmesiyle beraber rüzgar santrallerinin kurulu glerinin artmasıyla iletim sistemine bağlantılar gerçekleşmeye başlamıştır. İletim sistemindeki rüzgar gücünün artmasıyla rüzgar santrallerinin gerilim kalitesine olan etkilerinden çok güç sistemine olan etkileri ön plana çıkmıştır. Bu doğrultuda ilgili standartlar ve yönetmelikler değiştirilmiştir ve çoğu ülke rüzgar santrallerinin güç sistemine olan etkilerini sınırlamak ve Şebekeye katkı yapmasını sağlamak için Şebeke yönetmelikleri yayınlamıştır.

Bu alışma kapsamında rüzgar santrallerinin Şebeke ile entegrasyonu konusu üzerinde durulmuştur. Rüzgar santralleri teknolojileri, rüzgar santrallerinin güç kalitesi ve g sistemi üzerine etkileri, güç sisteminin rüzgar santrali üzerine etkileri ve rüzgar santrallerinin güç sistemine bağlantı kriterleri araştırılmıştır. Son bölümde Matlab programında Trakya bölgesi modellenip 2014 yılında devreye girecek bir rüzgar santrali için analizler yapılarak farklı santral güçlerinde ve farklı rüzgar türbini tiplerinde Şebekeye etkileri incelenmiş ve Şebeke yönetmeliği ile uyumu araştırılmıştır.

2. RÜZGAR SANTRALLERİ TEKNOLOJİLERİ

Bu bölümde ağırlıklı olarak büyük ölçekli, şebekeye bağlı çalışan rüzgar santralleri ile ilgili bilgi verilecektir. Büyük ölçekli rüzgar türbini gelişimi 30 m çap ve 100 kW kurulu güç ile 1930 yılında Crimea'da başlamıştır. Ancak ilk türbinlerin etkileyicisi 1941 yılında kurulan 53 m çap ve 1250 kW güce sahip olan Smith Putnam rüzgar türbinidir. Bu türbin iki kanatlı, eğim kontrollü olup modern türbinlerin birçok özelliğini taşımaktaydı. 1970'lerde petrol fiyatlarının üç katına çıkmasının sonucu sağlanan teşviklerle Amerika'da 97,5 m çap, 3 MW, İngiltere'de ise 60 m çap ve 3 MW büyüklüğünde yeni rüzgar türbinleri geliştirildiyse de bu prototipler ticari açıdan başarılı olamamıştır. 1990'ların ortasında daha büyük rüzgar türbinleri için sabit hız, durma kontrollü gibi basit yapılardan uzaklaşarak değişken hızlı çalışma, eğim kontrollü, gelişmiş malzemeler gibi daha ileri teknolojilere ihtiyaç olduğu anlaşılmıştır [3]. Günümüzde 1980'lerdeki büyük prototipler kullanılarak 127 metre rotor çapında 7,5 MW gücünde büyük rüzgar türbinleri üretilmektedir [4].

Günümüzde kurulan modern rüzgar santralleri üç kanatlı, rüzgar üstü ve şebekeye bir frekans çeviricisi yardımıyla bağlanan rüzgar türbinlerinden oluşmaktadır. Kanat sayısını düşürmenin anlamı rotor diskinden rüzgar enerjisini alması için rotorun daha yüksek bir açısız hızda dönme durumunda kalmasıdır. Daha yüksek rotor hızı dişli kutusundaki çevirme oranını düşürmesine rağmen, aerodinamik gürültüyü ve sürüklenme kuvveti kayıplarını arttırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı ve görsel açıdan da daha güzel olduğu için modern rüzgar türbinlerinde üç kanatlı rotorlar kullanılmaktadır [3].

Rüzgar türbinlerinde hem asenkron hem senkron jeneratörler kullanılabilir. Asenkron jeneratörlerin daha yaygın olmasının sebebi kulelerin gölge etkisiyle daha iyi başa çıkabilme yeteneğinden kaynaklanır. Kulelerin gölge etkisi rotor tarafından üretilen mekanik torkta büyük titreşimlere sebep olur. Senkron jeneratörler bu titreşimleri sönmüleyemezken asenkron jeneratörler daha iyi bir sönmüleme yapar. Bu sebepten dolayı senkron jeneratörlerin şebeke ile bağlantısının bir frekans çevirici vasıtasıyla yapılması tercih edilir. Böylece mekanik yükler azalır, geçici tork

kontrolü kolaylaştır ve rotorun geniş bir rüzgar hızı aralığında maksimum verimde çalışması sağlanır. Frekans çeviricilerin dezavantajı ise yüksek maliyeti ve güç elektroniği cihazlarındaki kayıplardır. Günümüzde çoğu rüzgar türbininde hem senkron hem asenkron jeneratörler frekans çeviricileri ile kullanılarak türbinlerin değişken hızda çalışması sağlanır. Ayrıca çıkış gücü kontrol edildiğinden şebeke yönetmeliklerindeki şartların sağlanması kolaylaştır [3].

2.1 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgar türbinleri türbin jeneratör düzenine, türbin rotoruna göre hava akımı yoluna, türbin gücüne, jeneratör sürme yoluna, enerji sağlama moduna ve türbinin inşa yerine göre altı ayrı sınıfta incelenebilir.

2.1.1 Yatay eksenli ve dikey eksenli rüzgar türbinleri

Rotor kanatlarının dönme eksenlerinin düzeni Şekil 2.1’de gözüktüğü gibi yatay eksenli ve dikey eksenli olarak ikiye ayrılır. Günümüzdeki ticari rüzgar türbinlerinin çoğunun kanatların dönme eksenini rüzgar akışına paralel olan yatay eksenli türbinlerdir. Bu tip türbinlerin avantajı türbin verimliliğinin ve güç yoğunluğunun yüksek olmasının yanında devreye girme hızının ve birim çıkış gücü başına maliyetin düşük olmasıdır. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin kanatları yere dik olan dikey ekseninde döner. Dikey eksenli türbinlerin en önemli avantajı türbinin rüzgarı her yönden alabilmesi ve herhangi bir yön saptırma kontrolüne ihtiyaç duymamasıdır. Jeneratör, dişli kutusu ve diğer ana parçalar zemin üzerinde olacağından kule tasarımı ve yapısı basitleşir. Böylece türbin maliyeti düşer. Ancak dikey eksenli rüzgar türbinleri başlangıç sırasında kanatları döndürmek için harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duyar. Rüzgar türbininin eksenini sadece zemin üzerindeki tek bir uçtan desteklediğinden, maksimum yüksekliği kısıtlıdır. Düşük rüzgar gücü verimi nedeniyle günümüzde dikey eksenli rüzgar türbinlerinin kullanımı oldukça düşüktür [5].

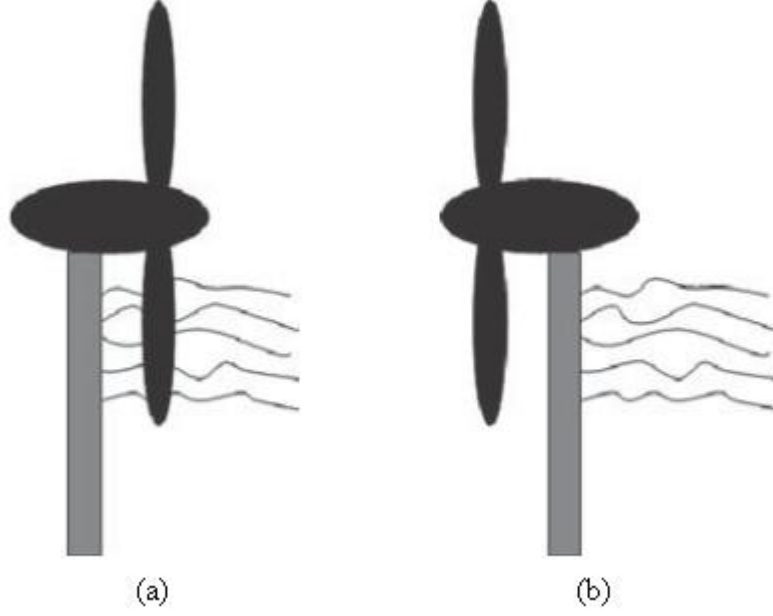


Şekil 2.1 : (a) Dikey eksenli (b) yatay eksenli rüzgar türbini [6].

2.1.2 Rüzgar üstü ve rüzgar altı rüzgar türbinleri

Rüzgar akış yönüne göre rotorun yapısına bağlı olarak, yatay eksenli rüzgar türbinleri rüzgar üstü (upwind) ve rüzgar altı (downwind) rüzgar türbinleri olarak sınıflandırılabilirler. Bugün kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerinin büyük bir çoğunluğu rotor ile rüzgarın yüz yüze geldiği rüzgar üstü tiptedir. Rüzgar üstü tasarımların en büyük avantajı rüzgar kanatlara çarptıktan sonra kule ve naselden geçtiğinden dolayı akış alanındaki bozulmalardan etkilenmemesidir. Ancak karmaşık bir yön saptırma (yaw) mekanizmasına ihtiyaç duyarlar. Bu sistemin eklenmesiyle rüzgar türbini daha düzgün çalışır ve daha fazla güç verir.

Rüzgar altı tasarımda rüzgar önce nasele ve kuleye sonra ise kanatlara çarpar. Bu yapıda kanatların kuleye çarpma ihtimali olmadığından kanatlar daha esnek yapılabilir. Ancak kule ve naselden geçtikten sonra bozulan akışın etkisinden dolayı elde edilen çıkış gücü Şekil 2.2’de gösterildiği üzere oldukça dalgalı olur. Buna ek olarak dengesiz akış daha çok aerodinamik kayıplara neden olabilir, türbindeki yorulmayı arttırabilir ve daha çok gürültüye sebep verebilir [5].



Şekil 2.2 : (a) Rüzgar üstü (b) rüzgar altı rüzgar türbini [5].

2.1.3 Rüzgar türbininin gücü

Rüzgar türbinleri nominal güç kapasitelerine göre birkaç gruba ayrılabilir. Bunlar mikro, küçük, orta, büyük ve çok büyük rüzgar türbinleridir.

Mikro türbinlerin detaylı bir tanımı olmadığından birkaç kW'ın altında bir güce sahip olan türbinler mikro türbinler olarak adlandırılır. Mikro türbinler özellikle elektrik şebekesinin olmadığı yerlerde kullanılır. Sokak aydınlatmalarında, su pompalarında ve gelişmekte olan ülkelerde uzak bölgelerdeki konutlarda kullanılabilir. Düşük başlangıç rüzgar hızlarından dolayı dünyanın birçok yerinde kullanılabilirler.

Küçük türbinler genelde 100 kW'ın altındaki türbinler olarak kabul edilir. Küçük rüzgar türbinleri yaygın olarak konutlarda, çiftliklerde ve kırsal alanlardaki su pompalama istasyonu, telefon santrali gibi diğer uzak uygulama alanlarında kullanılır. Dağıtılmış küçük rüzgar türbinleri iletim hattı kapasitesi ihtiyacını arttırmaktan kaçınan bölgelerde elektrik teminini arttırabilir.

En yaygın rüzgar türbinleri 100 kW ile 1 MW arasında olan orta büyüklükteki rüzgar türbinleridir. Bu tip türbinler hem şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız olarak kullanılabilir.

1 MW'dan 10 MW'a kadar olan rüzgar türbinleri büyük rüzgar türbinleri olarak sınıflandırılabilir. Son yıllarda büyük rüzgar türbinleri uluslararası rüzgar gücü

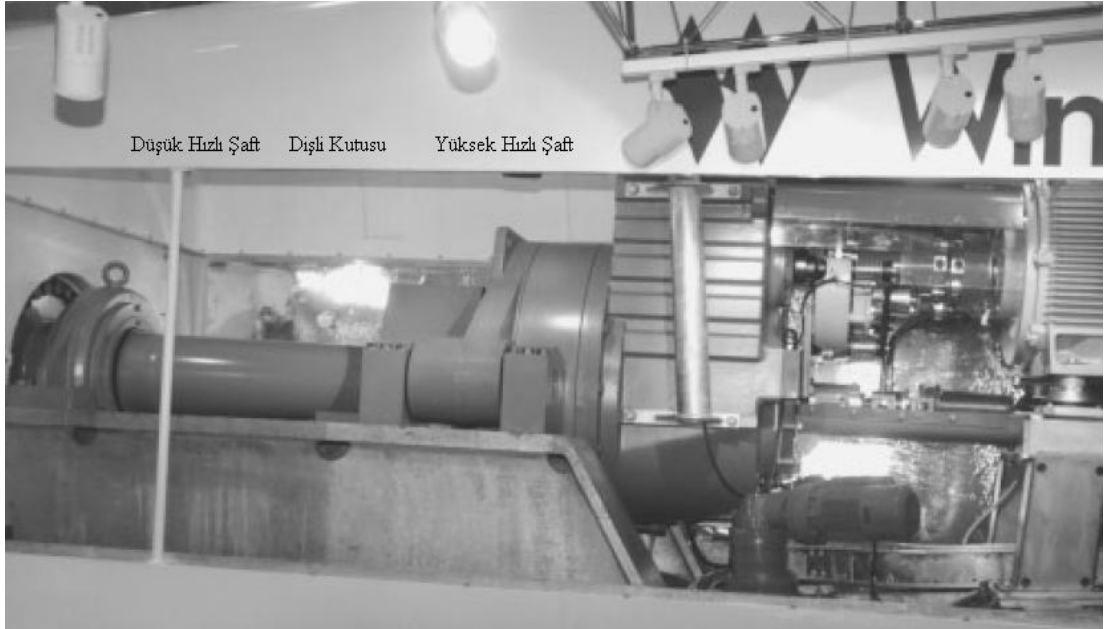
pazarında başı çekmektedir. Birçok rüzgar çiftliği özellikle denizde kurulanlar MW mertebesinde güce sahip büyük rüzgar türbinleridir.

Çok büyük rüzgar türbinleri ise 10 MW'dan büyük türbinler olarak anılır ve halen araştırma geliştirme aşamasındadır [5].

2.1.4 Doğrudan sürürlü ve dişli kutulu rüzgar türbinleri

Jeneratör sistemindeki aktarım organlarına göre rüzgar türbini doğrudan sürürlü veya dişli kutulu olarak ikiye ayrılabilir. Dişli kutusuna sahip bir rüzgar türbininin aktarım organı Şekil 2.3'de gösterilmiştir. Jeneratör rotorunun dönme hızını arttırarak daha yüksek bir güç çıkışı elde etmek için dişli kutulu rüzgar türbininde genellikle çok aşamalı bir dişli bulunur. Bu dişli kutusu kanat rotorunun bağlı olduğu düşük hızlı şafttaki dönme hızını alıp jeneratör rotorunun bağlı olduğu yüksek hızlı şafta iletir. Dişli sistemin avantajı düşük maliyeti, küçük boyutu ve ağırlığıdır. Ancak rüzgar türbininin güvenilirliğini azaltırken gürültüsünü ve mekanik kayıplarını da arttırır.

Dişli kutusu olmadığında ise jeneratör şaftı direk olarak kanat rotoruna bağlanır. Bu nedenle, doğrudan sürürlü sistemin enerji verimliliği, güvenilirliği ve tasarım sadeliği daha yüksektir [5].



Şekil 2.3 : Rüzgar türbininin aktarım organı [6].

2.1.5 Şebekeye bağlı ve şebekeden izole rüzgar türbinleri

Rüzgar türbinleri hem şebekeye bağlı hem de şebekeden izole uygulamalarda kullanılabilir. Orta boy türbinlerin birçoğu ve büyük boy türbinlerin ise hemen hemen hepsi şebekeye bağlı uygulamalarda kullanılır. Şebekeye bağlı uygulamanın en büyük avantajı enerji depolama sorununun olmamasıdır.

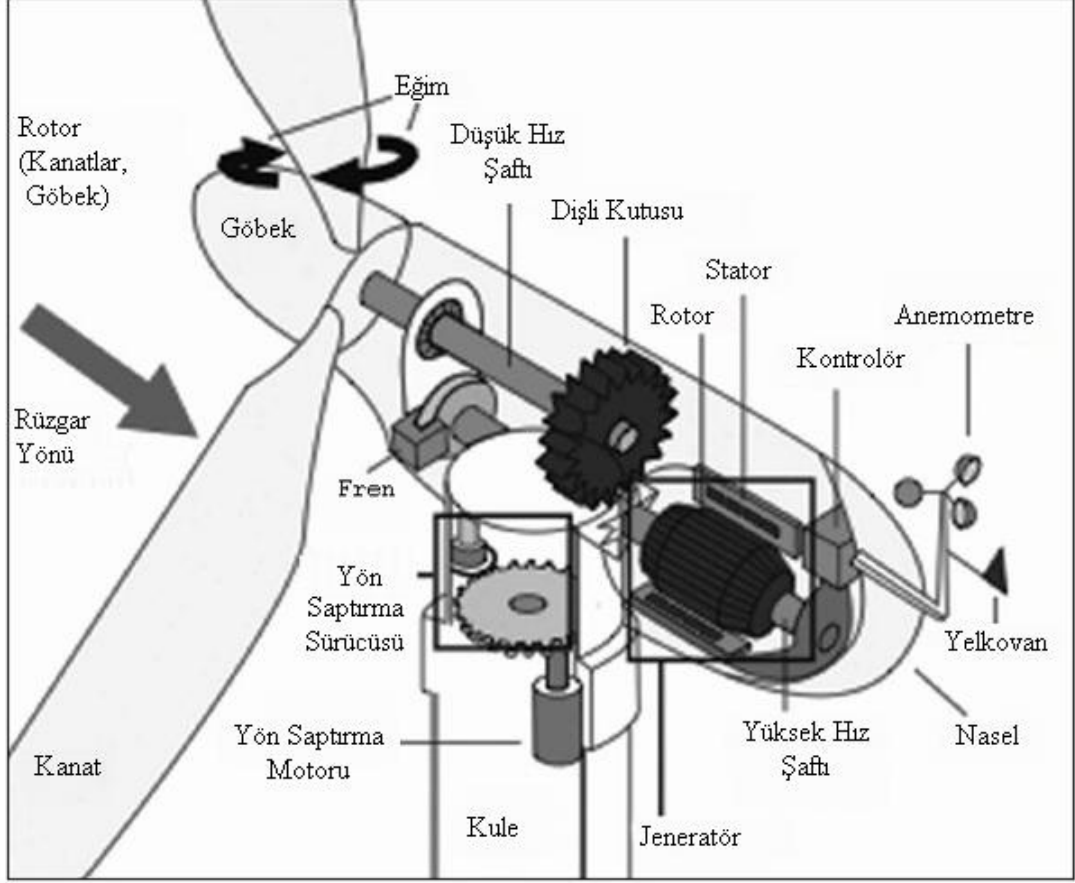
Küçük rüzgar türbinlerinin çoğunluğu ise şebekeden izole kullanılır. Rüzgar gücünün kesintili olmasından dolayı şebekeden izole rüzgar türbinlerinin ürettiği güç kısa zaman aralıklarında önemli miktarlarda değişiklik gösterebilir. Bu yüzden batarya, dizel jeneratör ve fotovoltaik sistemler ile birlikte kullanılarak sistemin güvenilirliği arttırılır [5].

2.1.6 Denizde ve karada kurulan rüzgar türbinleri

Karada kurulan rüzgar türbinlerinin düşük temel masrafı, şebeke ile daha kolay entegrasyonu, kule inşası ve türbin montajın düşük maliyeti ve bakım-işletim için kolay erişim gibi birçok avantajı vardır. Denizde kurulanlar ise daha iyi bir rüzgar kaynağına sahip olmasından dolayı daha yüksek güç üretirler ve karada kurulanlarla kıyaslandığında senelik çalışma saatleri daha yüksektir. Ayrıca çevresel kısıtlamalar daha önemsizdir. Örnek olarak denizde kurulan bir türbinin gürültüsü artık bir problem değildir [5].

2.2 Rüzgar Türbininin Parçaları

Günümüzde şebekeye bağlı rüzgar santrallerinde kullanılan bir rüzgar türbininin genel olarak içyapısı Şekil 2.4'deki gibidir. Aşağıdaki resimde yatay eksenli, rüzgar üstü, dişli kutulu, eğim mekanizması ile güç kontrolü yapılan türbin parçaları gösterilmektedir.



Şekil 2.4 : Türbin içyapısı [7].

2.2.1 Kanatlar

Başarılı bir kanat tasarımı aşağıdaki koşulları sağlamalıdır.

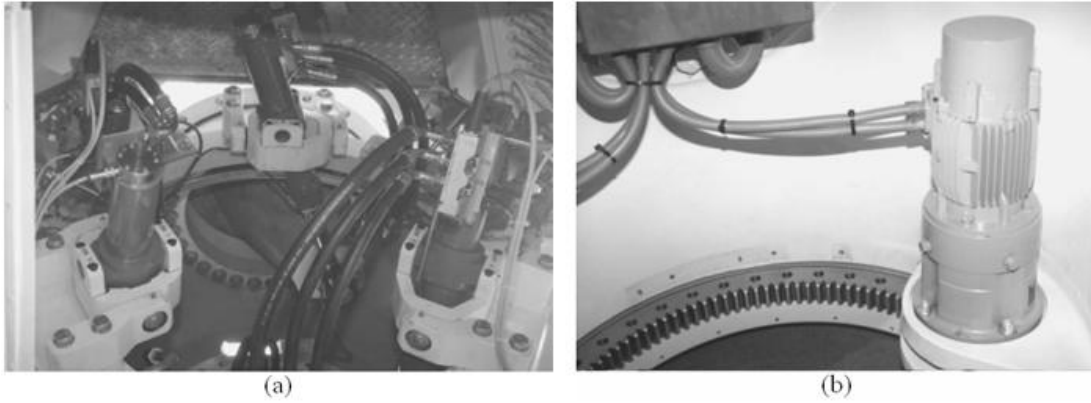
- Belirtilen rüzgar hızı dağılımı için maksimum yıllık enerji eldesi
- Maksimum çıkış gücünü sınırlama (durma kontrollü türbinlerde)
- Aşırı yüklere ve yorulmaya karşı dayanıklı olma
- Kule kanat çarpışmasını önlemek için uç bükülmeleri kısıtlama
- Rezonansı engelleme
- Minimum ağırlık ve maliyet

Kanatların tasarımı iki aşamadan oluşur. Yukarıdaki ilk iki maddeyi kapsayan aerodinamik tasarım ve yapısal tasarım. Aerodinamik tasarımda amaç kanat profili, genişliği, kıvrımları ve kalınlığı ile kanatların dış yüzeyinin optimal geometride seçilmesidir. Yapısal tasarım ise kanatların malzeme seçimi ve yapısal bir kesit veya kanat ana kirişine karar verilmesidir. Kanat kalınlığı, yapısal olarak verimli olması

gereken bir ana kirişe uyum sağlayacak kadar geniş olması gerektiğinden bu iki aşama arasında kaçınılmaz bir etkileşim vardır. Kanat tasarımı rüzgar türbinin kontrol yönteminin durma kontrollü veya eğim kontrollü olmasına göre farklılık gösterir. Kanatlarda kullanılan malzeme ile ilgili olarak birkaç farklı seçenek mevcuttur. Yapısal özellik bakımından en iyisi karbon-fiber bileşimi olmasına rağmen yüksek maliyetinden dolayı en çok kullanılan malzeme değildir. Kanat malzemesi olarak en popülerleri sırasıyla cam/poliyester, cam/epoksi ve odun/epoksidir [6]. Günümüzde fiber katkılı epoksiden yapılmış kanatlar tercih edilmeye başlanmıştır.

2.2.2 Eğim mekanizması

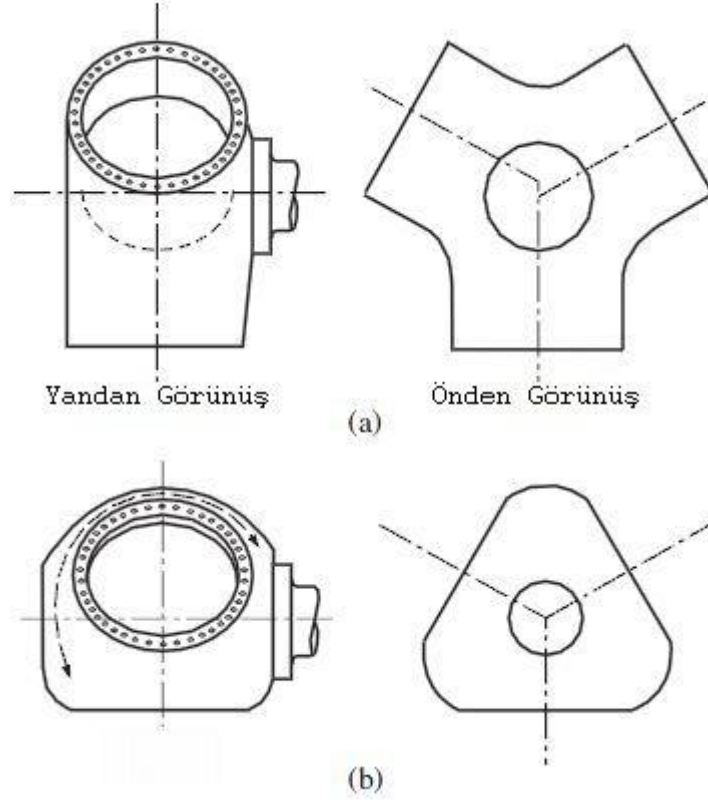
Eğim (pitch) kontrollü Şekil 2.5’de gösterildiği gibi türbinlerde her kanadın merkeze bağlandığı yerde kanatlara kendi ekseninde dönme imkanı veren eğim mekanizması bulunur. Türbinin ürettiği güç çok yüksek veya çok düşük olduğunda kanatlar rüzgara göre çevrilerek istenilen çıkış gücüne ulaşmada kolaylık sağlanır. Güç kontrolünün dışında başlama ve acil durdurmalarda kullanılır. Yüksek hızlarda eğim mekanizması ne kadar hassas çalışırsa, rüzgar hızındaki küçük değişimler çıkış gücünde o kadar az dalgalanma üretir [6].



Şekil 2.5 : (a) Hidrolik ve (b) elektrik motorlu eğim mekanizması [6].

2.2.3 Rotor göbeği

Rotor göbeği çoğunlukla küreye benzer grafit demirden meydana gelir. Şekil 2.6’da gösterildiği gibi üçlü silindirik veya küresel yapıda olacak şekilde imal edilebilirler [6]. Bir flanş bağlantısı ile ana şafta takılır. Yapı içinde kanat diplerinin ve mil yatağı aralığının bakımı sırasında rahat bir çalışma ortamı sağlanabilmesi için göbek genelde iki kişinin sığabileceği yeterli genişlikte yapılır.



Şekil 2.6 : (a) Üçlü silindirik göbek (b) küresel göbek [6].

2.2.4 Dişli kutusu

Dişli kutusu şaftta montelidir ve ana şaft torku çekme diski vasıtasıyla dişli kutusuna iletilir. Sıcaklık, yağ basıncı ve titreşim seviye göstergeleri gibi sensörlerle donatılır. Dişli kutusunun görevi rotor hızını jeneratör için uygun olan bir hıza yükseltmektir. Yağlama tipi ve paralel şaft kademesi sayısına göre verimi %95 ila %98 arasında değişir [6].

2.2.5 Jeneratör

Jeneratörün kutup sayısı ve şebeke frekansı jeneratörün hızını, jeneratör hızı da bir dişli kutusuna ihtiyaç olup olmadığını belirler. Ticari sebeplerden dolayı rüzgar türbinlerinde kullanılan jeneratörlerin çıkış gerilimleri çoğunlukla 690 V'dur. Bu durum büyük jeneratörlerde yüksek başlangıç akımına sebep olduğundan trafonun naselde olması tercih edilebilir. Jeneratör tipleri rüzgar türbininin sabit hızlı veya değişken hızlı olmasına göre farklılık gösterir. Sabit hızlı rüzgar türbinlerinde asenkron jeneratörler tercih edilirken, değişken hızlı rüzgar türbinlerinde hem senkron hem asenkron jeneratörler kullanılabilir [6].

2.2.6 Mekanik Fren

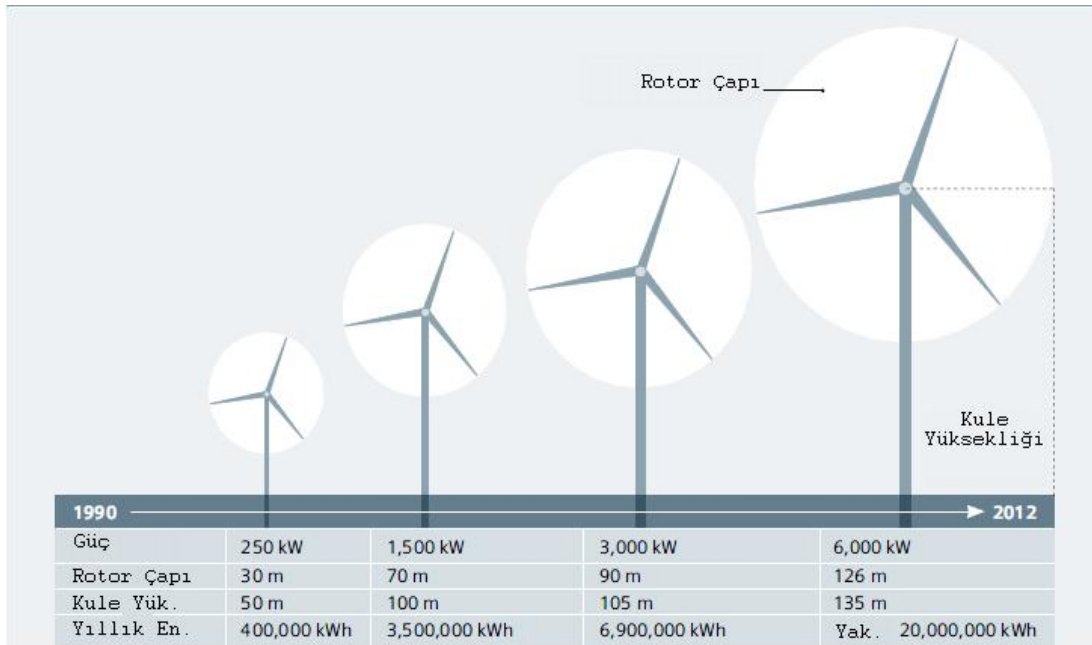
Türbinin frenleme çalışma mantığına göre mekanik frenin çeşitli görevleri olabilir. En temel görevi herhangi bir bakım sırasında kullanılmak üzere park frenidir. Bunun dışında yüksek rüzgar hızlarında herhangi bir zarar gelmesini önlemek için, bazı durumlarda düşük rüzgar hızlarında veya acil durumlarda rotoru durdurmak için kullanılır [6].

2.2.7 Yön saptırma (Yaw) mekanizması

Yön saptırma mekanizması kulenin üzerindeki döner rulmanlar vasıtasıyla nasele döndürerek türbinin rüzgar ile yüzleşmesini veya tam tersi şekilde türbinin durması istenen durumlarda rüzgarın kanatları döndüremeyecek duruma gelmesini sağlar. Genellikle nasele monte edilmiş elektrik veya hidrolik motorlar içerir [6].

2.2.8 Kule

Rüzgar türbinlerinin kuleleri büyük çoğunlukla çelikten imal edilir. 1990'larda 250 kW türbinin kule yüksekliği 50 m iken günümüzde 6000 kW türbinin yüksekliği 135 m civarındadır [8]. Gelişen rüzgar türbini teknolojisi ile birlikte kule yükseklikleri Şekil 2.7'deki gibi artmıştır.



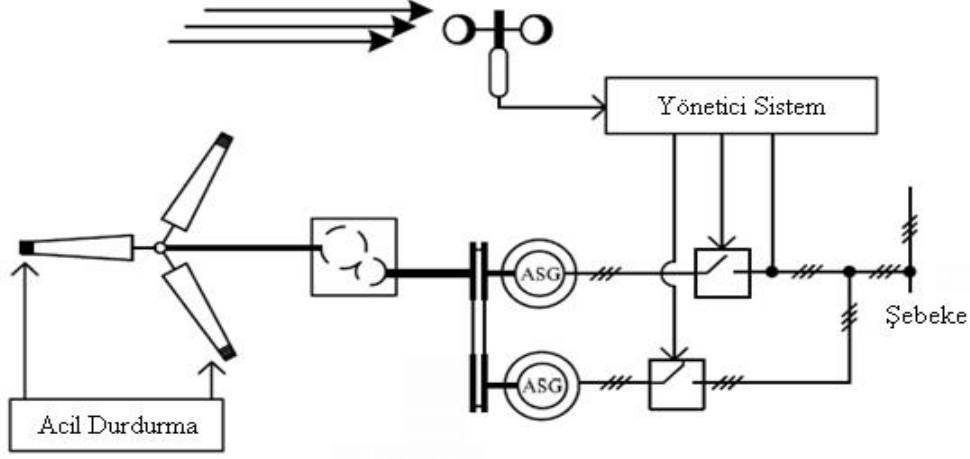
Şekil 2.7 : Yıllara göre rüzgar türbinlerinin gelişimi [8].

2.3 Rüzgar Türbinlerinin Elektriksel Sistemleri

Günümüzde büyük ölçekli rüzgar türbinleri için asenkron ve senkron jeneratörler kullanılmaktadır. Asenkron jeneratörler hem sabit hem değişken hızlı sistemlerde kullanılabilirken, senkron jeneratörler genellikle frekans çeviricileri yardımıyla sadece değişken hızlı sistemlerde kullanılırlar. Temel olarak üç çeşit asenkron jeneratör rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadır. Bunlar sincap kafesli, rotor direnci değiştirilerek kayma kontrolü yapılan bilezikli ve çift beslemeli asenkron jeneratörlerdir. Sincap kafesli asenkron makine şebekeye doğrudan bağlanıp sabit bir hızda ya da tam ölçekli güç elektroniği sistemleri ile değişken hızda çalıştırılabilir. Kayma kontrollü bilezikli jeneratör genelde şebekeye doğrudan bağlanırken kayma kontrolü çalışma hızını belli bir aralıkta değiştirme imkanı verir. Çift beslemeli asenkron jeneratör güç elektroniği çeviricilerinin boyutuna bağlı olarak %30 civarında bir hız aralığı sağlar. Ticari amaçla kullanılan MW mertebesindeki rüzgar türbinlerinde çoğunlukla çift beslemeli asenkron jeneratör, şebekeye frekans çeviricisi ile bağlanan sincap kafesli asenkron jeneratör ve sürekli miktatsız senkron jeneratör kullanılır.

2.3.1 Sincap kafesli asenkron jeneratör

1980'lerde "Danimarka Konsepti" olarak bilinen Şekil 2.8'de gösterilen şebekeye direk bağlı sincap kafesli asenkron jeneratörler rüzgar türbini pazarının tek hakimiydi. Bu yapıdaki türbinler 30 ila 450 kW arasında, bir küçük ve bir büyük asenkron jeneratöre sahiptir. Rüzgar hızı yeteri kadar yükseldiğinde küçük olan asenkron makine şebekeye bağlanır. Önce motor modunda ivmelenir ve senkron hıza ulaştığında otomatik olarak jeneratör moduna geçer. Rüzgar hızı artmaya devam ederse küçük jeneratör devre dışı kalırken büyük olan jeneratör devreye girer. Bu jeneratör 25 m/s rüzgar hızına kadar çalışmaya devam eder. Güç kontrolü olarak durma kontrolü kullanılır. Durma kontrolünde kanatlar sabit bir açıda göbeğe cıvatalanır. Rüzgar hızı belli bir seviyeyi aştığında rotor aerodinamiğinin tasarımı rotorun durmasına neden olur. Diğer kontrol yöntemlerine göre daha az güç dalgalanmasına sebep olur ancak düşük hızlarda az verimlidir. Diğer türbinlere göre ucuz fiyatından, basit yapısından ve sağlamlığından ötürü çok popüler olmuştur [9].



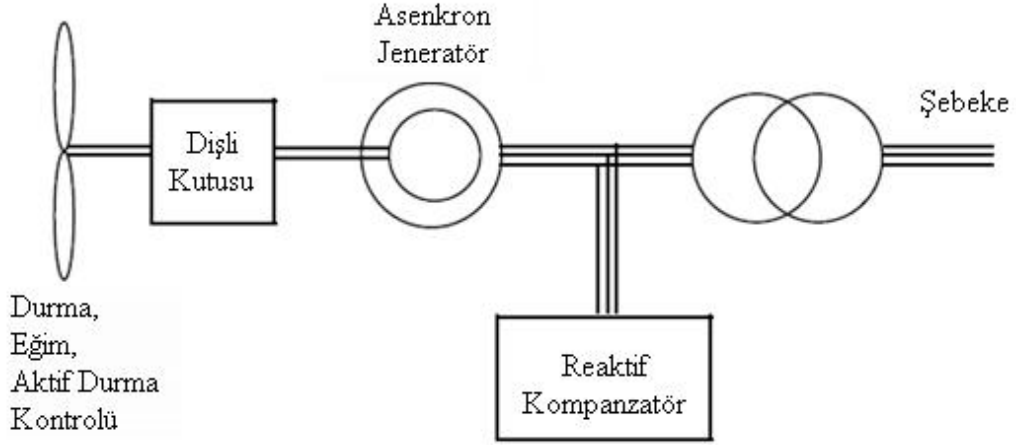
Şekil 2.8 : Danimarka konsepti rüzgar türbini [9].

Daha sonralarında durma kontrolü yerine eğim kontrolü kullanılmaya başlanmıştır. Bu kontrolde güç çıkışı çok yüksek ya da çok düşük hale geldiğinde kanatlar rüzgara göre çevrilebilir. Genel olarak, bu kontrol tipinin avantajları iyi güç kontrolü, desteklenmiş başlatma ve acil durdurmadır. Elektriksel bakış açısından, iyi güç kontrolü, yüksek rüzgar hızlarında güç çıkışının ortalama değerinin jeneratörün beyan gücüne yakın tutulduğu anlamına gelmektedir. Bazı dezavantajları, eğim mekanizmasından kaynaklanan ilave karmaşıklık ve yüksek rüzgar hızlarındaki daha yüksek güç dalgalanmalarıdır. Boralardan ve eğim mekanizmasının sınırlı hızından dolayı anlık güç, gücün ortalama beyan değeri civarında salınım yapacaktır.

Son zamanlarda ise sabit hızlı asenkron jeneratörlü rüzgar türbinlerinde aktif durma kontrolü yaygınlaşmıştır. Temel olarak durma kontrollü sistemin tüm güç kalite karakteristiklerini sağlamaktadır. Kanatların göbeğe esnek kuplajı acil durdurmaları ve başlatmayı kolaylaştırır. Eğim mekanizması ve kontrolü yüksek maliyetlere neden olmaktadır.

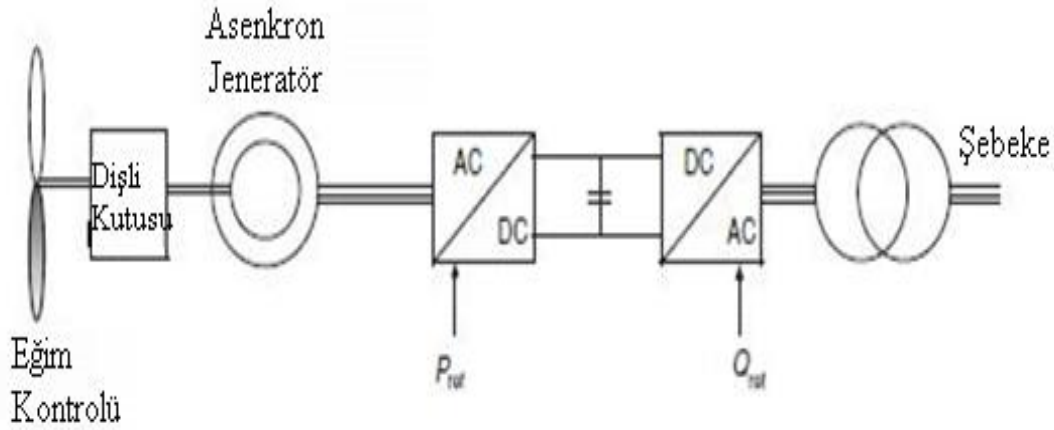
Bu sistemde, kanadın durdurulması kanatlara eğim verilerek aktif olarak kontrol edilir. Düşük rüzgar hızlarında, maksimum verim sağlamak için, kanatlara eğim kontrollü bir rüzgar türbinine benzer bir şekilde eğim verilir. Yüksek rüzgar hızlarında, kanatlar eğim kontrollü bir türbininkine göre zıt yöne hafifçe eğimlendirilerek daha ani bir durmaya girer. Aktif durma kontrollü rüzgar türbini, eğim kontrollü rüzgar türbinindeki gibi yüksek güç dalgalanmaları olmaksızın daha yumuşak bir sınırlı güç sağlar. Bu kontrol tipi hava yoğunluğundaki değişimleri kompanze edebilme avantajına sahiptir. Eğim mekanizmasıyla kombinasyon, acil

durumların gerçekleştirilmesini ve rüzgar türbininin başlatılmasını kolaylaştırır [10]. Günümüzde şebekeye direk bağlanan asenkron jeneratörlü rüzgar türbinlerinin genel yapısı Şekil 2.9'daki gibidir.



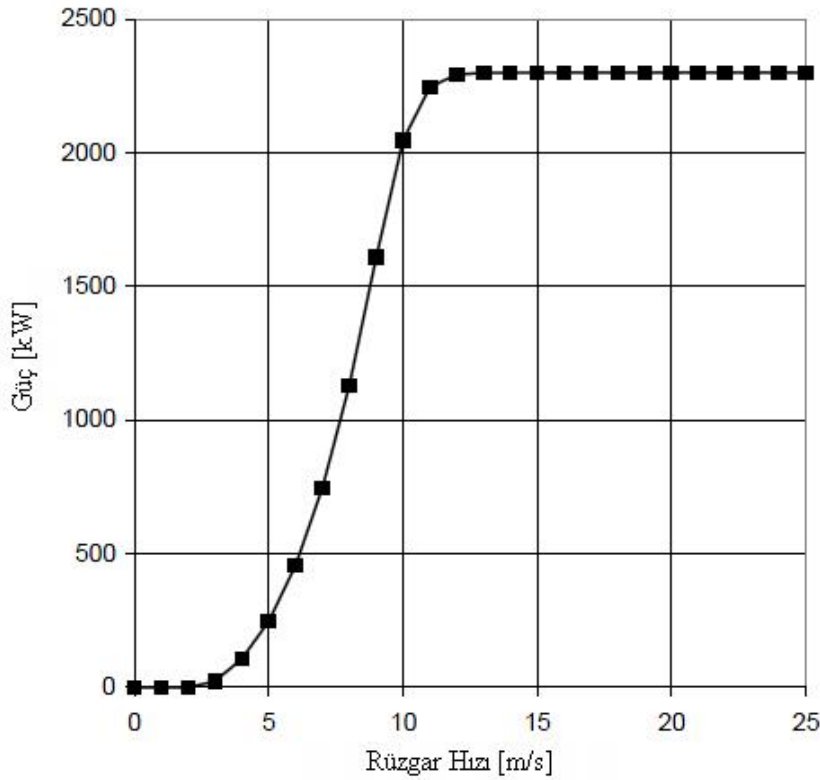
Şekil 2.9 : Sabit hızlı sincap kafesli asenkron jeneratörlü rüzgar türbini [10].

Güç elektroniğindeki teknolojinin gelişmesiyle beraber frekans çeviricilerinin rüzgar türbinlerindeki kullanımı artmıştır. Son zamanlarda, Şekil 2.10'da gösterilen, şebekeye bir frekans çeviricisi üzerinden bağlı sincap kafesli asenkron jeneratörler çift beslemeli asenkron jeneratörlere (DFIG) göre tercih edilir olmuştur. Bunun sebeplerinden bazıları şunlardır. DFIG'in reaktif güç performansı yeterli olmayabilir, kontrol edilebilirliği yaklaşık %30 olduğundan kontrol imkanı kısıtlıdır ve kısa devre katkısı nispeten yüksektir. Tam ölçekli frekans çeviricili asenkron jeneratörün ise ayar aralığı çok geniştir, kararlı halde daha iyi bir reaktif güç profili vardır, kısa devre akım sınırlamasına sahiptir, daha az kompanzasyon ihtiyacı vardır, mevcut şebeke yönetmeliğine ve ileride oluşabilecek revizyonlara daha uyumludur.



Şekil 2.10 : Frekans çeviricili asenkron jeneratörlü rüzgar türbini [10].

2,3 MW güce sahip bir rüzgar türbininin genel olarak güç eğrisi Şekil 2.11'deki gibidir. Burada rüzgar türbininin devreye girmesi için gerekli rüzgar hızı 4 m/s'dir. Optimal güç üretimi 12-13 m/s rüzgar hızında yapılır. Eğim mekanizması yardımıyla 13-25 m/s arası türbinin çıkış gücü sabit tutulur ve rüzgar hızı 25 m/s'ye ulaştığında rüzgar türbini devreden çıkar.

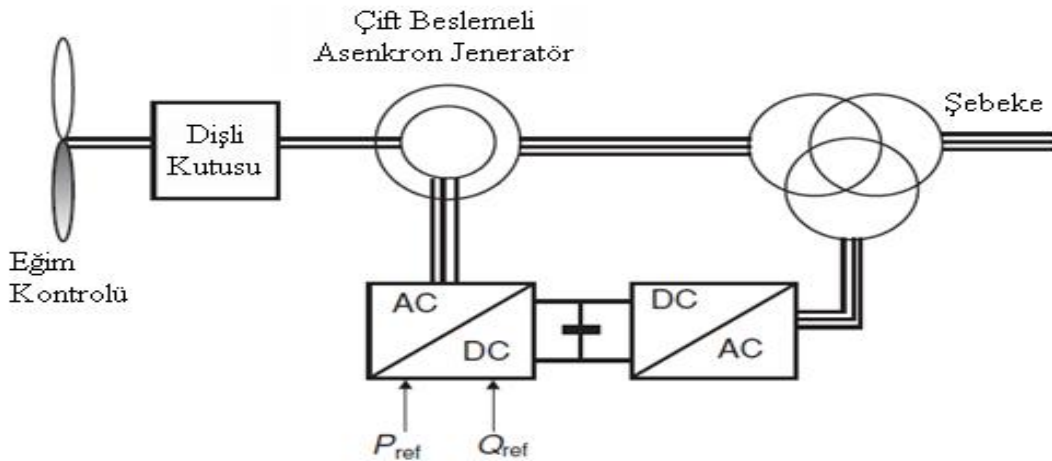


Şekil 2.11 : 2,3 MW Gücündeki rüzgar türbininin güç eğrisi.

2.3.2 Çift beslemeli asenkron jeneratör

Rotoru sargılı asenkron jeneratörlerin bir çeşidi olan çift beslemeli asenkron jeneratör (DFIG) rüzgar enerjisi endüstrisinde yaygın olarak kullanılan jeneratörlerden biridir. Günümüzde bu jeneratörler rüzgar sistemleri için en uygun jeneratörlerden biri olarak kabul edilmiştir. DFIG'in rotor devresi değişken hızda çalışmaya imkan veren güç elektroniği devreleri ile kontrol edilir. Stator sargıları şebekeye bir güç transformatörü üzerinden doğrudan bağlanırken, rotor sargıları frekans çeviricileri, harmonik filtreler ve bir transformatör üzerinden bağlanır.

Şekil 2.12'de yapısı gösterilen DFIG'lerin güçleri birkaç kW'tan birkaç MW'a kadar çıkabilir. Bu tip jeneratörde stator tarafında güç sadece şebeke tarafına akarken, rotor tarafında ise iki yönlü akış olabilir. Eğer jeneratör senkron üstü çalışırsa elektriksel güç şebekeye verilir, eğer senkron altı çalışırsa elektriksel güç şebekeden rotora verilir. Senkron hızın %30 altı veya üstünde bir hız, nominal gücün %30'unda bir güç çeviricisi kullanılarak elde edilebilir. Rotora bağlanan frekans çeviricisinin gücü tam gücün yaklaşık %30'u kadardır. Bunun sonucunda tam ölçekli frekans çeviricili bir sistemle karşılaştırıldığında harmonik filtre ve frekans çeviricisi maliyeti daha düşüktür ve sabit hızlı rüzgar jeneratörüne göre düşük rüzgar hızlarında daha fazla güç elde edilir.



Şekil 2.12 : Çift beslemeli asenkron jeneratörlü rüzgar türbini [10].

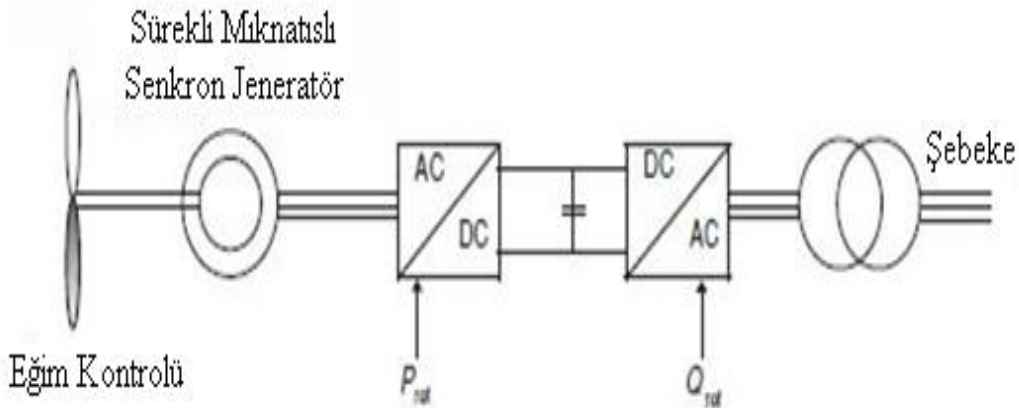
Daha düşük güçlü frekans çeviricileri daha az güç kaybına neden olduğu için verimliliği daha yüksektir. Reaktif güç üretim ve tüketim kabiliyeti sayesinde

kompanzasyon ünitesi ihtiyacı ortadan kalkar. Bu özellikleri ile çift beslemeli asenkron jeneratör rüzgar piyasasında önemli bir yere gelmiştir.

DFIG'in iki çalışma modu vardır. Rotor senkron hızın üzerinde bir hızda dönüyorsa bu süper senkron olarak adlandırılır ve kayma değeri negatiftir. Hem stator hem rotor şebekeye güç verir. İkinci modda ise jeneratör senkron hızın altında çalışır. Alt-senkron modda stator sargılarından hem şebekeye hem de rotor sargılarına güç akışı olur. Stator sargılarından elde edilen toplam güç süper senkron modda en düşük hızda üretilen gücü aşamaz [11].

2.3.3 Sürekli mıknatıslı senkron jeneratör

Rüzgar türbinlerinde yaygın olarak kullanılan bir diğer jeneratör tipi de Şekil 2.13'de gösterilen sürekli mıknatıslı senkron jeneratördür (PMSG). Bu tip rüzgar türbini elektriksel olarak PMSG ve tam ölçekli bir frekans çeviricisinden, mekanik olarak da dişli kutusuz aktarma organından ve eğim kontrolü mekanizmasından oluşur.



Şekil 2.13 : Sürekli mıknatıslı senkron jeneratörlü rüzgar türbini [10].

Böyle bir rüzgar türbini yapısında aerodinamik rotor jeneratöre direk olarak dişli kutusu olmadan bağlanır. Senkron jeneratör de şebekeye jeneratörün hızını ve yük akışını kontrol eden bir frekans çeviricisi üzerinden bağlanır. Sürekli mıknatıslar rotora monte edilmiştir ve sabit bir uyarım sağlar. Jeneratör stator sargıları üzerinden, değişken jeneratör frekansını sabit şebeke frekansına çeviren tam ölçekli frekans çeviricisini besler [12].

Senkron jeneratörün uyarması rotorundaki mıknatıslar vasıtasıyla sağlandığından uyarım için herhangi bir enerji kaynağı kullanılmaz. Dolayısıyla verimi ve güç

faktörü asenkron jeneratöre göre daha yüksektir. Ancak sürekli mıknatıslar jeneratörün maliyetini arttırır [10].

2.4 Rüzgar Santrallerinin Güç Kontrolü

Rüzgar enerjisi üretimi rüzgar hızına ve rotor hızına bağlıdır. Çıkış gücünü maksimum yapmak için rotor hızının optimum olduğu bir değer vardır. Bu yüzden rüzgar türbininin kontrol edilmesindeki amaç rotor hızını ayarlayarak güç üretimini sürekli olarak maksimum güç noktasına yakın bir değerde tutmaktır. Ancak çıkış gücü ile rüzgar hızı arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Kontrol mekanizması maksimum enerji kazanımını elde etmek için rüzgar türbini tarafından üretilen enerji miktarını yakalayacak kabiliyette olmalıdır.

Rüzgar türbininin enerji üretimini arttırmak için gerekli kontrol yöntemleri rotor hızını orantısal olarak rüzgar hızına göre değiştirmek ve kanat açılarını rüzgar yönünde ayarlayarak gücü sabit tutmaktır. Sabit hızlı türbinlere göre değişken hızlı türbinlerde enerji kazanımı ortalama %10-17 daha fazladır. Ancak bu değer hava koşullarına bağlı olarak %30-40 civarına çıkabileceği gibi %2-6 değerlerine de düşebilir. Kontrol mekanizmasının amacı sabit hızlı türbinlerde en iyi rotor hızını belirlemek iken değişken hızlı türbinlerde en iyi kanat uç hız oranını (TSR, λ) belirlemektir. Burada ρ hava yoğunluğu, A süpürme alanı, v rüzgar hızı, C_p verim, β eğim açısı, R kanat uzunluğu, Ω rotorun açısal hızı ve $R \cdot \Omega$ rotor uç hızıdır.

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.1)$$

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v} \quad (2.2)$$

Sabit hızlı çalışmada türbinin dönüş hızı sabittir ve TSR (Tip Speed Ratio) rüzgar hızı ile birlikte değişir. Çıkış gücü durma (stall) prensibine göre kısıtlanır. Rüzgar hızı nominal değer üzerine çıktığında güç katsayısı düşer. Bir rotor sabit hızlı olduğunda yıllık enerji üretimi rüzgar hızına ve dişli kutusunun oranına bağlıdır. Düşük hızlı bir türbin seçildiğinde çıkış gücü en yüksek değerine düşük hızda ulaştığı gibi yüksek hızlı bir türbin seçildiğinde çıkış gücü en yüksek değerine yüksek rüzgar hızında ulaşır.

Değişken hızlı çalışmada rüzgar türbininin kontrol sistemi en yüksek verimi elde etmek için sürekli olarak rotor hızını düzenler. Maksimum enerji kazanımını

sağlamak için gerekli optimum çalışma, değişen rüzgar hızı ile birlikte türbin hızını değiştirerek TSR'yi sabit tutmaktır. Rüzgar hızı nominal hızdan düşük olduğunda rotor hızı maksimum güç noktasına getirilir ve o değerde tutulur. Rüzgar hızı nominal değeri aştığında ise çıkış gücü kanatların açıları değiştirilerek düşürülür ve nominal değerde sabit tutulur [13].

3. RÜZGAR SANTRALLERİNİN GÜÇ KALİTESİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Rüzgar türbinlerinde güç kalitesi terimi türbinin elektriksel üretim sistemindeki elektriksel performansını tanımlar. Şebekeye bağlı çalışan rüzgar santralleri şebekenin güç kalitesini etkileyebilmektedir. Güç kalitesi ile ilgili olarak şebekeye bağlı rüzgar türbinlerinin temel etkileri yakın çevredeki gerilim değişimleri ve harmoniklerdir. Bulunduğu ülkedeki ilgili kurumun şartlarını yerine getirmek için rüzgar santralının güç kalitesine olan etkileri önceden analiz edilmelidir. Bu analizin sonucuna göre ihtiyaç halinde gerekli iyileştirmeler yapılmalıdır ve sistem bu etkiler göz önünde bulundurularak tasarlanmalıdır. Bu analizin yapılması için rüzgar türbininin elektriksel karakteristikleri bilinmelidir [10].

3.1 Güç Kalitesi Ölçümlerine İlişkin Standartlar

Rüzgar türbinlerinin güç kalite karakteristiklerinin güvenilir dokümanlarla denetlenebilmesi ve bunun sürekliliğinin sağlanabilmesi için Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) 1996 yılında çalışmalara başladı ve 2001 yılında IEC 61400-21 [14] standardını çıkardı. Şebeke Bağlantılı Rüzgar Türbinlerinin Güç Kalite Karakteristiklerinin Ölçümü ve Değerlendirilmesi adlı bu standardın 2008 yılında ikinci versiyonu yayınlandı. İkinci versiyonunun yayınlanmasının sebebi, ilk versiyonu yayımlandığında rüzgar türbinleri dağıtım şebekesine bağlanıp ve güç kalitesine olan etkilerin araştırılmasına karşın daha sonraları rüzgar çiftliklerinin iletim şebekesine bağlanmaya başlaması ve güç sistemi üzerine olan etkilerinin ön plana çıkmasıdır. Sonuç olarak günümüzdeki rüzgar türbinleri aktif ve reaktif gücü hem geçici durumda hem de kararlı halde kontrol edebilmektedir. Güç sönümleme ihtiyaçları ile başa çıkabilirler ve hata anında çalışmaya devam etme yeteneğine sahiptirler [15].

Birçok rüzgar türbini üreticisi firma bu standarda göre türbinin elektriksel karakteristiklerini açıklamaktadır. IEC dışında MEASNET (Measuring Network of Wind Energy Institutes) ve FGW (Fördergesellschaft Windenergie e.V.) standartları da güç kalitesi ölçümlerinde kullanılmaktadır.

IEC 61400-21 standardından önce bir rüzgar türbininin güç kalite karakteristiklerinin belirlenmesine ilişkin bir prosedür yoktu. Şebekeye bağlanacak rüzgar santralının kapasitesinin belirlenmesi için 25'lik kısa devre oranı veya maksimum %1 gerilim artışı gibi basitleştirilmiş kurallar kullanılmaktaydı. Bu basitleştirilmiş kurallar şebekenin güçlendirilmesini gerektirip maliyeti arttırdığından rüzgar santrallerinin gelişimini büyük oranda sınırlandırmıştır. IEC 61400-21 standardı kullanılmaya başlanınca daha büyük güçteki santrallerinin şebekeye sorunsuzca bağlanabildiği görülmüştür.

IEC 61400-21 rüzgar türbinlerinde güç kalitesini ölçmek için kullanılan en önemli standarttır. Bu standartta rüzgar türbinlerinin güç kalite karakteristiklerinin belirlenmesi ile ilgili prosedürler, fliker, harmonik gibi karakteristiklerin nasıl ölçülmesi gerektiğini ve hangi ölçüm yöntemlerinin kullanılması gerektiğini tanımlanmaktadır. Bu ölçümler sonucu elde edilen veriler rüzgar çiftliğinin şebeke bağlantısının değerlendirilmesinde bir temel oluşturur. Ölçmenin dışında IEC 61400-21 değerlendirmeyi yapan kuruma bu konuda tavsiyeler de vermektedir.

MEASNET, rüzgar enerjisi enstitülerinin ölçme ağıdır. Hedefi üyeleri tarafından ölçme sonuçlarının ortak olarak tanınmasını ve kararlaştırılmasını sağlamak için gerekli standartları ortaya koymaktır. 2000 yılında çıkardığı Güç Kalitesi Ölçme Prosedürü IEC 61400-21 şartlarına uygundur ancak harmonik akımlarla ilgili daha kapsamlı ölçümler yapılması gerektiğini belirtir. IEC 61400-21 standardına 2008 yılında yapılan güncellemeden sonra aralarındaki fark azalmıştır.

FGW standardı ise Almanya'da rüzgar türbinlerinin güç kalitesini ölçmek için kullanılır. En son 2002 yılında güncellenen bu standart ilke olarak IEC 61400-21'e benzerdir ancak bu iki standardın ölçme yöntemleri arasında bazı farklılıklar vardır ve birbirleri arasında karşılaştırılabilir değildir [10].

3.2 Güç Kalitesi Karakteristikleri

IEC 61400-21'e göre güç kalitesi karakteristikleri rüzgar türbininin anma değerlerinden, gerilim kalitesinden, gerilim düşümüne tepkisinden, güç kontrolünden, şebeke korumasından ve şebekeye geri bağlanmasından oluşur.

3.2.1 Anma değerler

- Anma güç (P_n): Rüzgar türbininin tasarlandığı normal çalışma koşulları altındaki maksimum sürekli çıkış gücüdür.
- Anma görünür güç (S_n): Rüzgar türbininin anma güç, anma gerilim ve frekansta çalıştığı durumdaki görünür güçtür.
- Anma gerilim (U_n): Rüzgar türbininin anma güç, anma akım ve frekansta çalıştığı durumdaki gerilimdir.
- Anma akımı (I_n): Rüzgar türbininin anma güç, anma gerilim ve frekansta çalıştığı durumdaki akımıdır [14].

3.2.2 Gerilim dalgalanmaları

Rüzgar türbininin sebep olduğu gerilim dalgalanmaları (flikler ve gerilim değişimleri) sürekli çalışmada ve anahtarlama işlemlerinde olmak üzere iki şekilde betimlenebilir [14].

3.2.2.1 Sürekli Çalışma

Rüzgar türbininin sürekli çalışmadaki flikler katsayısı, $c(\psi_k, v_a)$ %99'luk olarak yıllık ortalama rüzgar hızı (6 m/s, 7,5 m/s, 8,5 m/s, 10 m/s) ve şebeke empedans faz açısının belirtilen değerleri için (30° , 50° , 70° , 85°) verilmelidir. Bu değerler elde edilirken rüzgar türbini reaktif güç sıfıra en yakın değerde çalıştırılmalıdır, mümkünse reaktif ayar noktası kontrolü $Q=0$ 'a ayarlanmalıdır.

Test ölçümlerinin yapıldığı yerde rüzgar türbininin dışında şebekedeki yükler de gerilim dalgalanmasına sebep olabilir. Ölçümler esnasında sadece rüzgar türbininin etkileri incelenmek istendiğinden başka herhangi bir kaynağın gerilim dalgalanması üretmediği yapay şebekenin kullanıldığı bir yöntem uygulanır.

Kırpışma katsayısı denklem 3.1 ile ifade edilir. Burada $P_{st, fic}$ rüzgar türbininden gelen yapay şebekedeki flikler yayını, $S_{k, fic}$ yapay şebekenin görünür kısa devre gücü, S_n rüzgar türbininin anma görünür gücüdür [14].

$$c(\psi_k) = P_{st, fic} \times \frac{S_{k, fic}}{S_n} \quad (3.1)$$

3.2.2.2 Anahtarlama işlemleri

Karakteristikler aşağıdaki üç durum için belirtilir.

- Rüzgar türbininin başlangıç rüzgar hızında başlatılması
- Rüzgar türbininin anma rüzgar hızında başlatılması
- Birden çok jeneratöre sahip veya çok sargılı jeneratörler için jeneratörler arası anahtarlama

Bu değerler elde edilirken rüzgar türbini reaktif gücü sıfıra en yakın değerde çalıştırılmalıdır, mümkünse reaktif ayar noktası kontrolü $Q=0$ 'a ayarlanmalıdır.

Bu üç farklı anahtarlama işlemi için 10 dakikalık bir periyotta (N_{10m}) ve 2 saatlik bir periyotta (N_{120m}) anahtarlama işlemlerinin maksimum sayısı belirlenir. Bu değerler üretici firma tarafından da verilebilir ancak aşağıdaki kırpışma adım faktörü ve gerilim değişim faktörü ölçülüp hesaplanmalıdır.

Bir rüzgar türbininin tek bir anahtarlama işleminden dolayı kırpışma yayınının normalize bir ölçüsü olan kırpışma adım faktörü denklem 3.2 ile belirtilir. Burada T_p anahtarlama işleminden dolayı oluşan gerilim dalgalanmasının süresi, $P_{st, fic}$ rüzgar türbininden gelen yapay şebekedeki fliker yayını, $S_{k, fic}$ yapay şebekenin görünür kısa devre gücü, S_n rüzgar türbininin anma görünür gücüdür. Bu değer belirli şebeke empedans faz açıları için (30° , 50° , 70° , 85°) ve yukarıdaki anahtarlama işlemleri için belirlenir.

$$k_f(\psi_k) = \frac{1}{130} \times P_{st, fic} \times \frac{S_{k, fic}}{S_n} \times T_p^{0,31} \quad (3.2)$$

Bir rüzgar türbininin tek bir anahtarlama işleminden dolayı oluşan gerilim değişiminin normalize bir ölçüsü olan gerilim değişim faktörü denklem 3.3 ile belirtilir. Burada $U_{fic, max}$ ve $U_{fic, min}$ anahtarlama kaynağından kaynaklanan faz-nötr arası minimum ve maksimum RMS gerilim değerleridir. Bu değer belirli şebeke empedans faz açıları için (30° , 50° , 70° , 85°) ve yukarıdaki anahtarlama işlemleri için belirlenir [14].

$$k_u(\psi_k) = \sqrt{3} \times \frac{U_{fic, max} - U_{fic, min}}{U_n} \times \frac{S_{k, fic}}{S_n} \quad (3.3)$$

3.2.3 Akım harmonikleri, ara harmonikler ve yüksek frekanslı bileşenler

Sürekli çalışma bireysel akım bileşenlerinin değerleri (akım harmonikleri, ara harmonikler ve yüksek frekanslı bileşenler) ve toplam harmonik akım bozulumu rüzgar türbininin anma gücünün %0, 10, 20, ... , 100 'ünde çalışması durumunda anma akımına oranı olarak verilir.

Bireysel harmonik akımı bileşenleri temel şebeke frekansının 50 katına kadar 10 dakikalık ortalama veri olarak belirtilir ve toplam harmonik akım bozulumu buradaki değerleri ile denklem 3.4'deki gibi hesaplanır. Ara harmonik bileşenleri 2 kHz'e kadar ve yüksek frekanslı akım bileşenleri 2 ila 9 kHz arasında belirtilir [14].

$$THC = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_n} \times 100 \quad (3.4)$$

3.2.4 Gerilim düşümüne tepki

Şebeke hatalarından dolayı meydana gelen gerilim düşümüne karşı rüzgar türbininin verdiği tepkilerden oluşan değerlerdir. $0,1 P_n - 0,3 P_n$ arası ve $0,9 P_n -$ üzeri olmak üzere iki durum için yapılır. Simetrik üç faz gerilim düşümü ve iki faz gerilim düşümü ile %90, %50 ve %20 gerilim düşümünün kombinasyonu olarak altı koşul için incelenir [14].

3.2.5 Aktif güç

Rüzgar türbininin ölçülen maksimum aktif gücü 0,2 saniyelik $P_{0,2}$, 60 saniyelik P_{60} ve 600 saniyelik P_{600} ortalama değer olarak verilir. Bu değerler röle koruma ayarlarında da kullanılır.

Yük alma/yük atma hız sınırı için uygulanan rampa değer kısıtlaması kontrol modunda çalıştırılan rüzgar türbinlerinde 0'dan dakikada %10 aktif çıkış gücü olacak şekilde 10 dakika boyunca elde edilen değerler belirtilir.

Ayar noktası kontrol modunda çalıştırılan rüzgar türbinlerinde ayar noktası sırsıyla %100, 80, 60, 40 ve 20'ye ayarlanarak her bir güçte iki dakika çalıştırılmak üzere elde edilen değerler belirtilir [14].

3.2.6 Reaktif güç

Rüzgar türbininin reaktif gücü, anma gücün %10, 20, ... 100'ü için 1 dakikalık ortalamaları olarak belirtilir. Şebekeye doğrudan bağlı asenkron jeneratörler reaktif güç tükettiğinden kapasitörler ile kompanze edilir. Frekans çeviricisi ile bağlanan jeneratörlerde reaktif güç sıfır olarak ayarlanabileceği gibi ihtiyaçlara göre şebekeye reaktif güç verebilir veya şebekeden alabilir [14].

3.2.7 Şebeke koruması

Rüzgar türbininin şebeke koruma sistemi test edilip, ayarlanan şebekeden ayrılma seviyesi ve süresi ve gerçekte olan değerler düşük/yüksek gerilim ve düşük/yüksek frekans için belirtilir. Şebekeden ayrılma seviyesi rüzgar türbininin şebekeden ayrılmasına neden olan frekans veya gerilimdir. Ayrılma süresi ise düşük/yüksek gerilim veya frekansın başlangıcından itibaren ayrılma gerçekleşene kadar geçen süredir [14].

3.2.8 Şebekeye geri bağlanma

1 saniye, 1 dakika ve 10 dakika süresindeki şebeke hatasından dolayı rüzgar türbininin şebekeden ayrılmasından sonra tekrar geri bağlanması süresi test sonuçları ile belirlenir [14].

3.3 Gerilim Kalitesi Üzerine Etkiler

Gerilim idealde sabit frekans ve genlikte tam sinüs dalgası şeklinde olmalıdır. Ancak güç sistemlerinde şebekeye bağlı cihazlar gerilimin ideal halinden sapmasına neden olur. Gerilimin frekansının sapmasında üretim ile tüketim arasındaki dengesizlik etkili olurken, gerilimin büyüklüğünde ise hat kayıpları sapsulara yol açar. Birbirine bağlantılı büyük enterkonnekte sistemlerdeki frekans sapsuları izole sistemlerden nispeten daha azdır. Bunun sebebi büyük sistemlerde daha az talep değişiminin olması ve yedek üretim kapasitesinin daha fazla olmasıdır. Gerilim genliğindeki sapsular şebekenin nispi gücüne bağlıdır. Genelde güç sistemlerinde dağıtım şebekeleri iletim şebekelerine göre daha zayıftır ve dağıtım şebekelerinde daha büyük gerilim sapsuları meydana gelir.

Gerilim kalitesi fiziksel karakteristikler ve elektriksel özellikler olarak ifade edilebilir. Genelde gerilim, frekans ve kesintiler cinsinden tanımlanır. Gerilimin

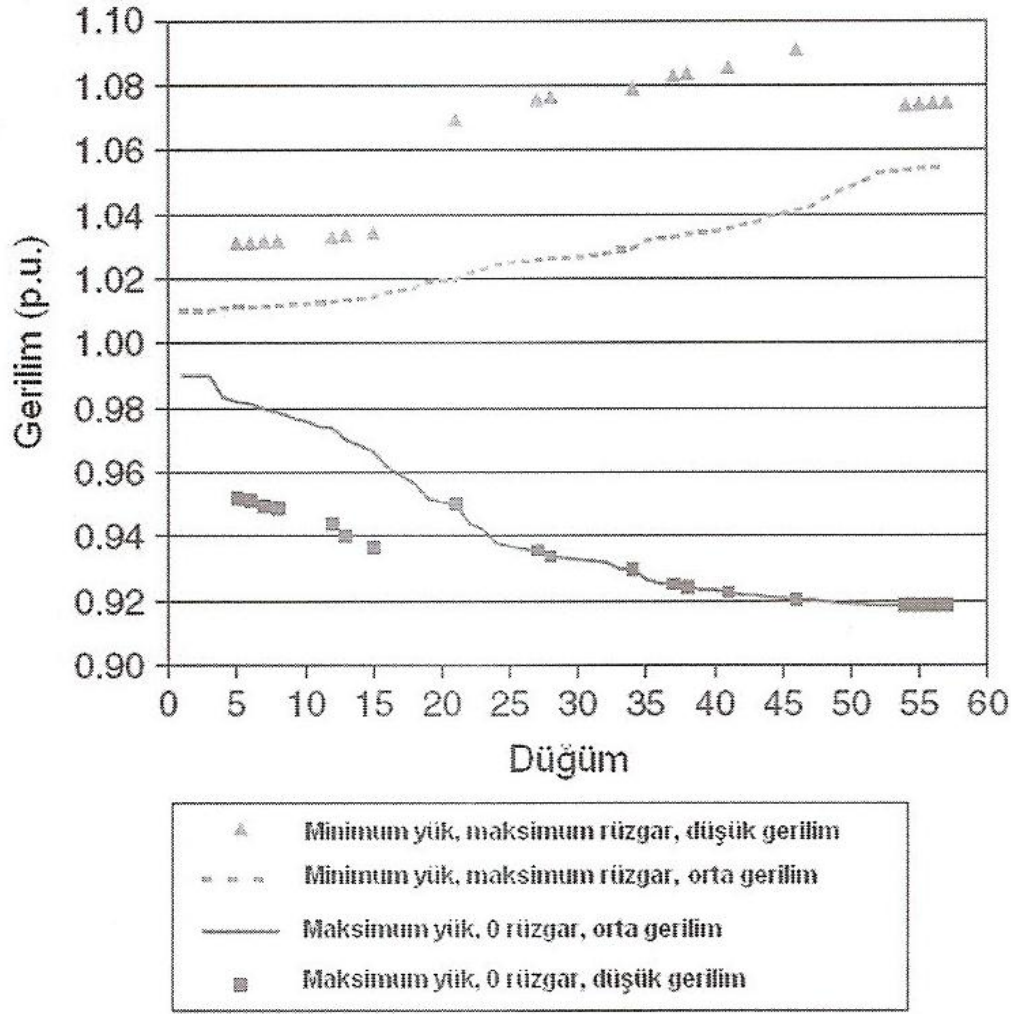
kalitesi ulusal ve uluslararası standartlarda belirtilen koşullara uygun olmalıdır. Avrupa'daki gerilim kalitesi koşulları CENELEC (Comité Européen de Normalisation Électrotechnique) standardı olan EN 50160'da belirtilmektedir.

3.3.1 Yavaş Gerilim Değişimleri

Gerilim değişimleri çoğu zaman birkaç dakika gibi kısa zaman aralıklarında gerilimin efektif (RMS, Root Mean Square) değerindeki değişiklikler olarak tanımlanabilir. Güç sistemindeki gerilim değişikliklerinin temelinde yükte ve üretimde meydana gelen değişiklikler yatar. Tüm rüzgar türbin tipleri gerilim değişimine sebep olabilir.

Yavaş gerilim değişimleri, 10 dakikalık ortalama değerler olarak ifade edilen gerilim büyüklükleridir. Bu değişimleri değerlendirmek için yük akışı analizleri gerçekleştirilebilir. Genel olarak, yavaş gerilim değişimlerinin değerlendirilmesinde tüm olası yük durumu dahil edilmelidir. Bu, genelde yazılım programları yardımıyla yük analizinin hazırlanmasıyla yapılır.

Küçük ölçekli bir rüzgar çiftliğinin analiz sonuçları Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Bu rüzgar çiftliği uzak uçtaki 54-58 düğümlerine bir orta gerilim dağıtım şebekesi üzerinden bağlıdır ve bu dağıtım şebekesi üzerinden tüketiciler beslenmektedir. Diğer düğümler üzerinden de tüketiciler beslenmektedir. Minimum yük ve maksimum rüzgar gücündeki alçak gerilim için gösterilen gerilim, alçak gerilim transformatöründen hemen sonraki düğümü belirtirken, maksimum yükteki alçak gerilim için gösterilen gerilim alçak gerilim hattının uzak ucundadır ve bu uzak ucunda hiç rüzgar gücü bulunmamaktadır. Orta ve alçak gerilimdeki birim başına (p.u.) gerilimler arasındaki fark, alçak gerilim transformatörlerinin varsayılan kademe değiştirici konumu ve alçak gerilim hatlarındaki gerilim düşümünün bir sonucudur.



Şekil 3.1 : Yük akışı analizinin sonucu [10].

EN 50160'a göre, tüketici girişlerindeki 10 dakikalık ortalamalar halinde ölçülen yavaş gerilim değişimleri, bir haftanın %95'lik zaman zarfında nominal gerilimin \pm %10'u dahilinde olmalıdır. Buna ek olarak, yalnızca alçak gerilim için, yavaş gerilim değişimleri nominal gerilimin -%15 ila %10'u arasında olmalıdır. Bu koşullara göre Şekil 3.1'deki örnek sistem bu standarda uygundur. Ancak yavaş gerilim değişimleri rüzgar çiftliğinin kapasitesinin artırılması üzerinde bir sınırlama getirebilir çünkü kapasite artırımı maksimum geriliminin artmasına neden olmaktadır. Ancak, rüzgar türbinlerinin güç faktörleri ayarlanarak bu sınırlamanın üstesinden kolaylıkla gelinebilir. Güç faktörünün birim değerden 0,98 indüktife düşürülmesi maksimum gerilimi %1,5 azaltır ve daha fazla rüzgar türbininin bağlanabilmesi için yer sağlar.

Minimum ve maksimum yük seviyesi tahminlerindeki olası belirsizlikler mutlaka bir güvenlik payı gerektirir. Yine de rüzgar türbinlerinin güç faktörünün ayarlanmasıyla, olası bir yavaş gerilim değişimi sınırlamasının giderilebildiği gerçeğini değiştirmez.

Güç faktörünü düşürmek ilave şebeke kayıplarına neden olabilir. Bu yüzden, güç faktörü düzenlemesi dikkatlice kullanılmalıdır ve alternatif seçeneklerin değerlendirilmesi de gerekir. Alternatif seçeneklere örnek olarak, yeni hatların kurulumu ile şebeke güçlendirilmesi ve rüzgar çiftliğinin gücünün gerilimden bağımsız olarak düşürülmesi verilebilir. Şebeke kayıplarının artışı engelleyebilen, gerilime bağlı güç faktörü kontrolünün değerlendirilmesi de söz konusudur. Mantıklı bir kontrol yöntemiyle bu sağlanabileceği gibi şebeke kayıplarında net bir azalma sağlamak için yüksek yük ve düşük rüzgar şartlarında aşırı kompanzasyona izin vererek de kayıplar azaltılabilir. Bu seçenekleri değerlendirmek için yıllık rüzgar gücü üretimi ve muhtemel harcama tahminleri doğru bir şekilde hesap edilerek yük akış analizleri gerçekleştirilmelidir [10].

3.3.2 Fliker

Fliker (kırpışma) genelde yükteki hızlı değişimlerden veya sistemde yapılan anahtarlama işlemlerinden kaynaklanan hızlı gerilim değişimleridir. EN 50160'a göre, hızlı bir gerilim değişimi belirli şartlar dışında nominal gerilimin %5'inin altında olmalıdır. Sadece bazı belirli şartlar altında günde birkaç defa nominal gerilimin %10'una kadar bir değişim meydana gelebilir. Flikerin röleleri hatalı trip ettirme, güç elektroniği devrelerini hatalı çalıştırma gibi etkilerinin yanı sıra insan sağlığı üzerinde de etkileri vardır.

IEC 61000-4-15'e göre fliker, girişinde gerilim değerlerini alıp çıkışında fliker şiddetini veren bir flikermetre yardımıyla ölçülebilir. Ancak ölçülen bu değer rüzgar türbininin etkileri haricinde şebekeye bağlı olan diğer fliker kaynaklarını da kapsayacağı için sonuçlar hatalı olabilir. Sadece rüzgar türbinlerinin etkisini ölçmek için rüzgar türbinini şebekeden ayırmak maliyetli bir çözüm olduğundan IEC 61400-21 standardında belirtilen ölçüm yöntemleri esas alınarak gerekli ölçümler yapılabilir.

Fliker şiddeti kısa ve uzun dönem olmak üzere iki şekilde hesaplanabilir. Kısa dönemli fliker şiddeti P_{st} , 10 dakikalık periyotlarda ölçülür. Uzun dönemli fliker şiddeti P_{lt} ise denklem 3.5'deki gibi iki saatlik bir periyotta P_{st} değerlerinin bir dizisinden hesaplanarak bulunur.

$$P_{lt} = \left[\sum_{i=1}^{12} \left(\frac{P_{st,i}^3}{12} \right) \right]^{1/3} \quad (3.5)$$

EN 50160'a göre uzun dönemli fliker şiddetinin bir hafta içerisinde ölçülen değerlerinin %95'i 1'e eşit veya 1'den küçük olmalıdır. Flikerden etkilenme insandan insana değişebilir bu yüzden bazı insanlar $P_{lt} = 1$ ile rahatsız olabilirken bazı insanların flikerden etkilenme durumu 1'den büyük değerler olabilir.

Son tüketiciye sağlanan elektrik enerjisinde $P_{lt} \leq 1$ değerini sağlamak için şebekeye bağlanan ve fliker üreten her bir kaynağın katkılarının belirli değerler altında olması gerekir. Rüzgar santrallerinin şebekeye bağlandığı noktadaki kısa dönemli ve uzun dönemli fliker yayınımları (E_{Pst} , E_{Plt}) belirli sınırlar dahilinde olmalıdır.

Rüzgar türbinlerinin fliker yayınımları ilk çalışma anındaki gibi anahtarlama işlemleri ve sürekli çalışma koşulları için ayrı ayrı incelenir. IEC 61400-21'de anahtarlama işlemlerinden ve sürekli çalışmadan kaynaklanan flikerin değerlendirilmesi için gerekli yöntemler verilmiştir [10].

3.3.2.1 Sürekli çalışma

Rüzgar türbininin sürekli çalışma sırasında ürettiği fliker güç dalgalanmaları nedeniyle oluşur. Bu güç dalgalanmalarının ana sebepleri rüzgar hızındaki değişimler, kule gölge etkisi ve dişli kutusu gibi rüzgar türbininin mekanik özellikleridir. Eğim kontrollü türbinlerde eğim mekanizmasının bant genişliğinin sınırlı olmasından dolayı kule gölge etkisine ilave güç dalgalanmaları oluşur. Eğim mekanizmasının etkileri değişken hızlı türbinlerde şebekeye aktarılmaz. Genellikle türbinlerin nominal çalışmadaki rüzgar hızı olan 12 m/s'den durma hızı 25 m/s'ye kadar olan rüzgar hızlarında eğim mekanizması rüzgar türbinini nominal güçte tutmaya çalışır. Bu çalışmada kanatların eğimlendirilmesi anlık güçte dalgalanmalara yol açar. Bu yüzden sabit hızlı türbinlerde eğim kontrolü durma kontrole göre daha fazla flikere neden olur.

Sürekli çalışma esnasında meydana gelen fliker yayınımları her bir rüzgar türbininin fliker kırpışma katsayısı $c(\psi_k, v_a)$ ile değerlendirilir. Tek bir rüzgar türbinine ait fliker yayınımları kırpışma katsayısının S_n/S_k ile çarpımı sonucu bulunurken, tüm rüzgar çiftliğine ait fliker yayınımları aşağıdaki denklem ile bulunur.

$$P_{lt} = P_{st} = \frac{1}{S_k} \left[\sum_{i=1}^{N_{wt}} (c_i(\psi_k, v_a) \times S_{n,i})^2 \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

Burada N_{wt} toplam rüzgar türbini sayısıdır ve $P_{lt} = P_{st}$ olmasının sebebi sürekli çalışmada kısa dönemdeki şartların uzun dönemde de aynı olmasıdır.

Fliker yayını bir rüzgar santralindeki rüzgar türbini sayısında sınırlayıcı bir faktör olabilir. Hesaplanan fliker yayını belli bir sınır değer altında kalması gerektiğinden rüzgar türbinin tipleri seçilirken fliker katsayısına dikkat edilmelidir. Örnek olarak, sabit hızlı durma kontrollü rüzgar türbininin fliker katsayısı sabit hızlı eğim kontrollü türbinden daha düşük olduğu gibi değişken hızlı türbinlerden daha yüksektir [10].

3.3.2.2 Anahtarlama İşlemleri

Anahtarlama işlemleri rüzgar türbininin başlatılması ve kapatılmasıdır. Jeneratör sargıları arasındaki anahtarlama veya iki jeneratör arasındaki anahtarlama da güç üretiminde değişikliğe neden olabilir ancak günümüz rüzgar türbinlerinde bu çeşit anahtarlama yapan jeneratörler kullanılmamaktadır.

Anahtarlama işlemlerinden oluşan kırpışma yayını değerlendirilirken kırpışma adım faktörü kullanılır. Kırpışma adım faktörü $k_f(\psi_k)$ tek bir rüzgar türbininin en kötü durumdaki anahtarlama işleminin sebep olduğu kırpışma yayını bir ölçüsüdür. En kötü etkiye sahip anahtarlama işlemi genelde başlatma işlemidir. Buna ek olarak rüzgar türbininin 10 dakikalık N_{10} ve 2 saatlik N_{120} periyotlar için maksimum başlatma sayısı bilinmelidir. Kısa ve uzun dönemdeki fliker yayını denklemler 3.7 ve 3.8 ile hesaplanır.

$$P_{st} = \frac{18}{S_k} \left[\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{10} (k_{f,i}(\psi_k) \times S_{n,i})^{3,2} \right]^{0,31} \quad (3.7)$$

$$P_{lt} = \frac{8}{S_k} \left[\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{120} (k_{f,i}(\psi_k) \times S_{n,i})^{3,2} \right]^{0,31} \quad (3.8)$$

P_{st} ve P_{lt} değerlerinin sınır değerleri aşması durumunda başlatmalardan kaynaklanan fliker yayını rüzgar çiftliğinde bir sınırlayıcı olabilir. Bu sınırlama daha küçük

adım faktörlü bir rüzgar türbini (eğim kontrollü veya değişken hızlı gibi) seçilerek veya rüzgar türbinlerinin başlatılmasıyla ilgili kontrol sistemi kullanılarak aşılabilir.

Başlatma işlemi değişken hızlı türbinlerde sabit hızlı türbinlere göre daha yumuşak olur. Sabit hızlı türbinlerde başlatma işleminde rüzgar türbini önce jeneratörü mıknatıslayabilmek için reaktif güç harcar. Çekilen akımı sınırlamak için bir yumuşak yol verici 2-3 saniye boyunca çalışır. Daha sonra gereken reaktif güç, kapasitörlerin devreye alınmasıyla sağlanmış olur. Böylece reaktif güç tüketimi sıfıra düşer ve gerilim seviyesi normale gelir. Daha sonra aktif güç üretimi ile gerilim seviyesi yükselmeye başlar. Değişken hızlı türbinlerde ise frekans çeviricisi yardımıyla güç faktörü sabit tutularak yumuşak bir kalkış sağlanır.

Rüzgar hızının çok yüksek olması durumunda mekanik yükleri önlemek için, çok düşük olması durumunda ise şebekeden güç çekilmesini önlemek için rüzgar türbini otomatik olarak kapatılır. Düşük rüzgar hızlarında aktif güç hemen hemen sıfıra yakın olduğundan durma nispeten yumuşak olacağından gerilim üzerindeki etkisi de az olur. Rüzgar hızı çok yüksek ise türbin anma gücünde üretim yaptığından durdurulması durumunda gerilimin üzerinde etkisi olur. Sabit hızlı türbinlerde önce kapasitör gurubu açılır ve frenleme işlemi ile türbin hızı azaltılır. Güç akışı tersine döndüğünde jeneratörün şebeke ile bağlantısı kesilir. Değişken hızlı türbinlerde ise birkaç saniye içinde üretilen güç sıfıra düşer ve daha yumuşak bir durma işlemi gerçekleşir [10].

3.3.3 Gerilim düşümü

Gerilim düşümü (çukuru) EN 50160'a göre nominal gerilimin %1 ila %90 arasındaki bir değere düşüp 1 milisaniye ila 1 dakika arasında tekrar düzelmesi olarak adlandırılır. Bir yıl içerisinde beklenen gerilim düşümü sayısı bine kadar çıkabilir. %10 ila %15 arasındaki gerilim düşümleri genelde anahtarlama işlemlerinden kaynaklanırken daha büyük ölçekteki gerilim düşümleri arıza nedeniyle meydana gelebilir.

Bir rüzgar türbini devreye girdiğinde birkaç saniye sonra düzelen gerilimde ani bir azalma meydana gelir. Rüzgar türbininin gerilim düşümü aşağıdaki denklem ile değerlendirilebilir. Burada $k_u(\psi_k)$ gerilim değişim faktörüdür. Denklemden rüzgar türbini sayısının bulunmamasının nedeni rüzgar türbinlerinin aynı anda çalıştırılmasını mümkün olmadığı içindir. Bu yüzden, başlatmalardan dolayı

meydana gelen gerilim düşümlerinin rüzgar çiftliğindeki rüzgar türbini sayısı üzerinde kısıtlayıcı bir etkisi yoktur [10].

$$d = 100 \times k_u(\psi_k) \times \frac{S_n}{S_k} \quad (3.9)$$

Gerilim düşümünün diğer bir sebebi şebekede bir hata meydana gelmesidir. Hata akımı ve trafo merkezine olan uzaklık ile orantılı olarak hat boyunca bir gerilim düşümü meydana gelir. Rüzgar çiftlikleri genelde şebekenin uç noktalarına bağlandığından trafo merkezlerinden uzakta bulunur ve empedans değerinin yüksek olması gerilim düşümünü artırır. Trafo merkezindeki gerilim düzenleyicisi rüzgar çiftliğinin bağlı olduğu baradaki gerilimi yükseltmeyebileceğinden rüzgar çiftliklerinin gerilim kontrolüne katkı sağlaması istenir [3].

Gerilim düşümleri rüzgar türbinlerinin şebekeye bağlanmasındaki önemli sorunlardan biridir. Herhangi bir hata durumunda rüzgar çiftliğinin devreden ayrılması şebeke ve tüketiciler açısından ciddi bir tehlike oluşturabilir. Bu sebepten Türkiye’de de Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği’nin Ek-18 maddesinde hata durumunda rüzgar santralının devrede kalma koşullarını sağlaması istenir.

3.3.4 Harmonik gerilim

Harmonik gerilim lineer olmayan yüklerin gerilimin dalga biçimini bozmasıyla oluşur. Bunun sonucunda nötr iletkeninden beklenenden fazla akım aktığı için iletkenin ısınması, trafoların elektriksel dağılımının bozulması, elektronik ekipmanların ve haberleşme sistemlerinin bozulması, duyarlı yüklerin hatalı açması gibi durumlar meydana gelebilir. Gerilim dalga şeklini bozan en önemli lineer olmayan yükler güç elektroniği ekipmanları, ark fırınları, ark kaynakları, flüoresan ve cıvalı lambalar olarak gösterilebilir. Bozulan dalga biçimi Fourier transformunun uygulanmasıyla frekanslara ayrılır. Temel frekansın katlarında olanlara harmonik denirken diğerlerine ara harmonik denir. 50 Hz’in tamsayı katı olan h’nin harmonik dereceyi gösterdiği harmonik gerilimler (U_h) nispi büyüklükleri ile ayrı ayrı değerlendirilebilir.

$$u_h = \frac{U_h}{U_n} \quad (3.10)$$

EN 50160'a göre, her bir u_h 'in 10 dakikalık ortalama efektif değerleri bir haftanın %95'inde standartta verilen sınır değerleri aşmamalıdır. Buna ek olarak, gerilimin toplam harmonik bozulumu en fazla (THD) %8 olmalıdır.

$$THD = \left[\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2 \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

Sabit hızlı asenkron jeneratörlü rüzgar türbinlerinde herhangi bir frekans çeviricisi bulunmaz. Sadece rüzgar türbinini başlatma anında devrede olan bir yumuşak yol verici kullanılır ancak kısa süreli olduğu için bu tip rüzgar türbinlerinin genel anlamda harmonik üretmediği kabul edilir.

Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde ise günümüz teknolojisinde tristör tabanlı yerine transistör tabanlı frekans çeviricileri (IGBT, Insulated Gate Bipolar Transistor) kullanıldığından anahtarlama frekansları 3kHz'in üzerindedir. Sonuç olarak günümüzde kullanılan rüzgar türbinleri için harmonik gerilimin etkisi ihmal edilebilir ve rüzgar çiftliği kurulumunda bir sınırlama getirmez [10].

3.4 Frekans Üzerine Etkiler

EN 50160'a göre temel frekansın 10 saniyelik ortalama değeri bir yılın %99,5'ini kapsayan süre zarfında \pm %1 sınırlarında olmalıdır ki bu da 49,5 ile 50,5 Hz aralığını gösterir. Bunun dışında maksimum frekans değeri 52 Hz ve minimum frekans değeri de 47 Hz'dir. şebeke yönetmeliğine göre rüzgar türbini 50 Hz'i aştığında nominal gücünü düşürmelidir bir süre sonra ise devreden çıkmalıdır.

şebekeye bağlı çalışan rüzgar santrallerinde enterkonnekte şebekeye nispeten küçük bir güç katıldığı için frekans üzerine önemli bir etki yapmaz. Rüzgar türbinlerinin aralıklı güç üretimi diğer üretim birimleri ile dengelenir. şebekeye bağlı olmayan özerk (izole) sistemlerde rüzgar gücünün etkisi oldukça önemlidir. Böyle bir sistemde dönme rezervi dizel jeneratör ile sağlandığından oldukça kısıtlıdır. Ani bir rüzgar artışı veya düşüşü meydana geldiğinde frekans dalgalanmaları oluşur. Bu yüzden günümüzde çoğu güç sisteminde rüzgar türbinlerinin frekans üzerindeki etkisi ihmal edilebilir olduğundan frekans ile ilgili çalışmalar izole sistemler dışında çok fazla yapılmamaktadır [10].

4. RÜZGAR SANTRALLERİNİN GÜÇ SİSTEMİ ÜZERİNE ETKİLERİ

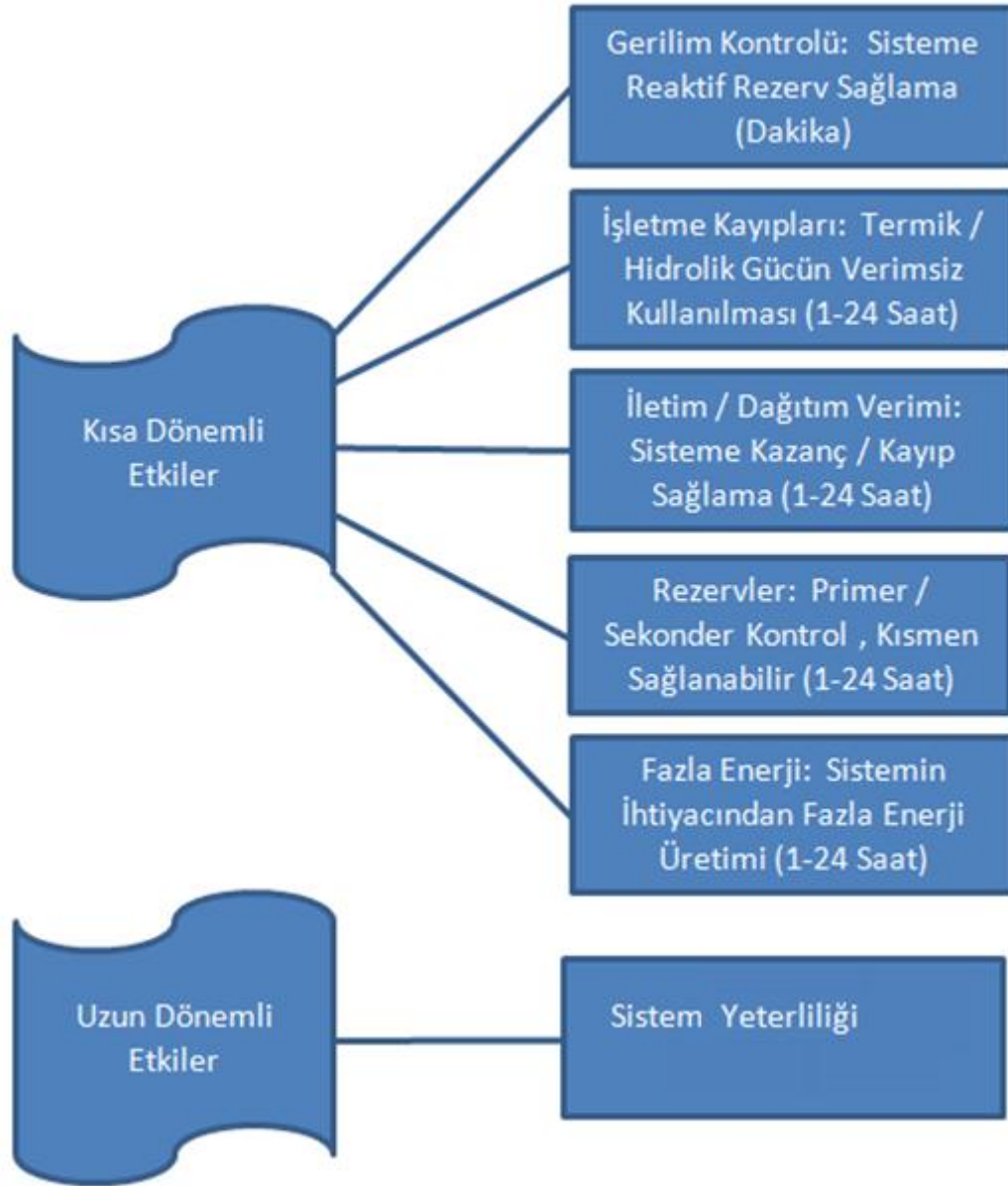
Rüzgar santrallerinin güç sistemi üzerine etkileri şebekenin yapısal esnekliğine, büyüklüğüne ve şebekedeki rüzgar gücü oranına bağlıdır.

Rüzgar enerjisinin şebeke üzerine etkileri incelenirken tek bir rüzgar santralinden ziyade daha geniş bir alan dikkate alınır. İncelenecek etki çeşidine bağlı olarak güç sisteminin ilgili bölgesine bakılır. Gerilim kontrolü için sadece rüzgar santralının yakınındaki bölgeler dikkate alınır. Gerilimdeki bozulmaları düzeltmek için şebekedeki reaktif rezervin rüzgar santraline yakın bir bölgede olması gerekir. Frekanstaki bozulmaların düzeltilmesi için ise güç rezervinin rüzgar santraline yakınlığına bakılmaksızın sistemin herhangi bir yerinde bulunması yeterlidir.

Değişken bir kaynağa sahip olan rüzgar gücünü incelerken güç sistemi bir bütün olarak ele alınmalıdır ve tüm enerji kaynakları ve tüketiciler bu sisteme dahil edilmelidir.

Bir güç sistemi incelenirken detaylı rüzgar verilerine ihtiyaç duyulur. Bu rüzgar verileri farklı zamanlarda bir kaç yılı kapsayacak şekilde, karada veya denizde ihtiyaca yönelik ölçümler olmalıdır.

Rüzgar santrallerinin güç sistemine etkileri Şekil 4.1’de görüleceği gibi kısa dönemli etkiler ve uzun dönemli etkiler olarak iki ayrı sınıfta incelenebilir [10].



Şekil 4.1 : Rüzgar santrallerinin güç sistemi üzerine etkileri.

4.1 Kısa Dönemli Etkiler

Kısa dönemde (birkaç dakikadan birkaç saate kadar) sistemi denge tutabilmek için gerekli ek ihtiyaçlar ve maliyetler temel olarak rüzgardan üretilen güçteki dalgalanmalardan kaynaklanmaktadır. Önümüzdeki 2 saat ile 40 saat arası meydana gelebilecek dalgalanmaların bir kısmı tahmin edilebilir. Rüzgar gücündeki değişimler diğer santrallerin üretim planlamasını ve iletim hatlarındaki kapasite kullanım planlamasını değiştirir. Bu durum rüzgar gücüne bağlı olarak sisteme zarar verebileceği gibi yarar da sağlayabilir. Dalgalanmaların diğer bir kısmı ise tahmin edilemez veya yanlış tahmin edilir. Bu kısım rezerv miktarı ile örtüşmelidir.

Rezervler üzerindeki etkiler incelenirken bir kontrol bölgesi temelinde çalışmalar yapılmalıdır. Burada önemli olan tek bir rüzgar çiftliğinin başka bir santral ile kompanze edilmesinden ziyade tüm sistem güvenilirliğinin rüzgar çiftliği bağlantısından önce ve sonra aynı kalmasıdır. Rüzgar dalgalanmaları için kullanılan veriler analiz için önemlidir. Sistemdeki rüzgar gücü arttıkça dalgalanmaların artmaması gerekir.

Güç sistemi bozunumlar ve yük takibi için rezervlere ihtiyaç duyar. Bozunum rezervinin miktarı genel olarak sistemdeki en büyük üretim biriminin devre dışı kalma ihtimaline göre seçilir. Rüzgar çiftlikleri geleneksel santrallere göre çok sayıda küçük jeneratörler içerdiği için bozunum rezervini arttırmaya gerek yoktur. Rüzgar gücünde saat ve dakika bazındaki değişimler frekans kontrolü için kullanılan rezervleri etkiler.

Rüzgarın tahminine ilişkin araçlar sistemin şebekeye entegrasyonunda önemli bir rol oynar. Sistem operatörü yük salınımlarına ek olarak rüzgardaki tahmin edilemeyen değişimlere de hazırlıklı olmak adına rezerv miktarını arttırmalıdır. Rüzgar tahmininin doğruluğu alınan riski azaltır. Doğru bir tahmin sistem operatörüne rüzgar gücü kapasitesini hesaplamasını sağladığı gibi sistem güvenilirliğini tehlikeye atmadan maliyetleri düşürür.

Daha fazla rezerv ihtiyacının miktarı yük değişimleri, tahmin hataları ile birlikte saatlik ve yarım saatlik rüzgar gücü değişimlerine bakılarak belirlenir. Rüzgar gücünün ilave rezerv ihtiyacı ve bunun maliyetleri sistem modellemesi ile veya analitik yöntemler ile tahmin edilebilir.

Rezerv üzerindeki etkiler dışında diğer kısa dönemli etkiler güç sisteminin işletilmesi ile ilgilidir. Bunlar üretim, iletim veya dağıtımdaki kayıplar ve kullanılan yakıt miktarı ve karbondioksit gazı gibi salınımlar üzerindeki etkilerdir. Frekans çeviricisine sahip rüzgar türbinleri şebeke için reaktif rezerv olma yeteneğine sahiptir ve böylece gerilim kontrolüne katkı sağlarlar. Bu konu Bölüm 4.3'de anlatılacaktır.

Rüzgar santralleri kurulduğu yerin yüke olan mesafesine bağlı olarak iletim ve dağıtım kayıplarını arttırabilir veya azaltabilir. Ancak büyük ölçekli rüzgar santralleri bölgeler arası iletim doluluğunu arttırabileceğinden, iletim kayıplarını veya iletimdeki arıza sayılarını arttırması muhtemeldir.

Rüzgar gücünde yüksek miktarlarda kesintiler olması konvansiyonel santrallerde kayıplara neden olabilir. Termik ve hidrolik santrallerin başlama, durdurma, düşük yükte çalışma gibi optimum çalışmanın altında işletilmesi sistemin verimini düşürür. Devre girme süreleri uzun olan santrallerin işletilmesi rüzgar santrallerindeki kesintili üretimle birleşince oldukça karmaşık bir durum ortaya çıkmaktadır. Rüzgar gücünün doğru tahmin edilmesi bu sorunun çözülmesine yardımcı olsa da çıkış rüzgar gücündeki büyük değişimler konvansiyonel santrallerin daha düşük verimde çalışmasına sebep olabilir. Mevcut sistemde bulunan termik veya hidrolik ünitelere olan etki benzetim programları ile tahmin edilebilir. Sistemdeki rüzgar gücü oranının düşük olması durumunda bu etkiler ihmal edilebilir veya düşük seviyededir.

Yeterli rezerv miktarı ve dinamik kontroller sağlanırken, rüzgar santralının ürettiği enerji talep edilen enerji miktarını aşarsa rüzgar santralının ürettiği güç düşürülebilir. Bu önlemin alınması işletme stratejisine bağlıdır.

Rüzgar enerjisi pratikte CO₂ üretmeyen yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. CO₂ salınımı, rüzgar türbini üretimi ve inşası sırasında kWh başına 10 g CO₂ mertebesindedir. Rüzgar santralleri mevcut santraller yerine kullanılırsa üretim ve yakıt tipine bağlı olarak CO₂ salınımı azalır. Termik santrallerdeki CO₂ salınımı kWh başına 800-900 g civarında iken doğalgaz santrallerinde bu rakam 400-600 g arasındadır [10].

4.2 Uzun Dönemli Etkiler

Rüzgar enerjisi üretiminin yapısı gereği kesintili olması güç sistemini işleten kurumlar ve sistem operatörleri için zorluklar çıkarmaktadır. Elektrik enerjisinin tüketicilere minimum hata ile sunulması gerektiğinden herhangi bir hatanın ekonomik, sosyal ve politik etkileri yüksektir.

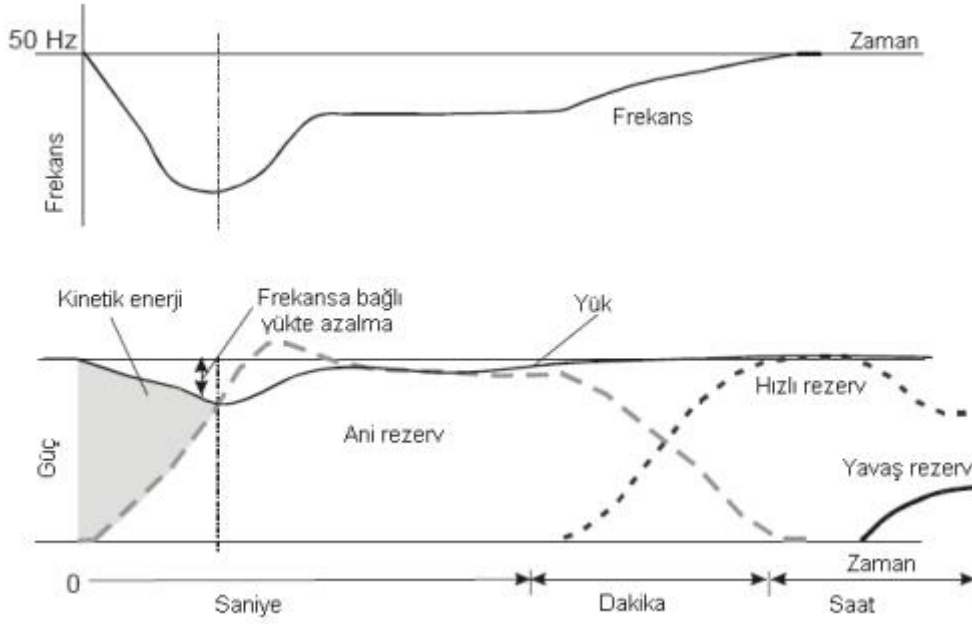
Sistemin yeterliliği için üretimin planlanması genellikle indeks tahminine göre yapılır. Bir elektrik sistemi için enerji kesintisi büyük bir problem olduğundan düşük risklerde bile azami dikkat gösterilir. Güvenilir bir sistemin karşılığı genelde 10 ila 50 yıl arsında sadece bir büyük sistem çökmesinin gerçekleşmesidir.

Bir rüzgar santralının mevcut konvansiyonel santral ile yer değiştirmesinin mümkün olup olmadığı araştırmak için puant yük durumunda rüzgar enerjisi üretimini bilmek önemlidir. Bunun için de birkaç yıllık rüzgar verisi gereklidir [10].

4.3 Gerilim ve Frekans Kontrolü Üzerine Etkiler

Bir güç sisteminin frekansı üretim ve tüketim arasındaki ilişkiye bağlı olarak nominal değerinden sapabilir. Türkiye’de 50 Hz olan nominal frekans, üretime karşı yükler ve kayıplar olarak bir denge halindedir. Elektrik enerjisi tüketimi üretimden fazlaysa frekans 50 Hz’in altına düşer. Aynı şekilde üretim tüketimden fazlaysa frekans 50 Hz’in üzerine çıkar. Frekansın anma değerinden sapma oranı tüketim ile üretim arasındaki dengeye bağlıdır. Türkiye’de Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği’ne göre izin verilen frekans aralığı 49,8-50,2 Hz’dir. Sistem frekansını bu aralıkta tutmak için Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) temel frekans kontrolü yapar. Frekansta sapmalar meydana geldiğinde temel frekans kontrolü otomatik olarak devreye girip sınır değerleri aşmaması sağlanır.

Güç sisteminde üretimde bir kayıp olursa veya büyük güçlü bir yük devreye girerse üretim ile tüketim arasındaki denge bozulacağı için rezervler bulundurulur. Şekil 4.2’de görüleceği gibi 3 çeşit rezerv bulunmaktadır. Bunlar temel (primer, bozulma, anlık) rezerv, ikincil (sekonder, hızlı) ve üçüncül (uzun-dönemli, yavaş) rezervdir. Temel rezerv frekanstaki ani bir değişiklikten sonra 30 saniye içinde sisteme bağlanan aktif ve reaktif güçtür. Aynı zamanda yük atma da temel rezerv dahilindedir. İkincil rezerv 10 ila 15 dakika içinde sisteme bağlanabilen aktif ve reaktif güçtür. Temel rezervin yerine geçip sapmanın devam etmesi halinde üçüncül rezerve kadar devrede kalır. İkincil rezerv çoğunlukla devreye girmesi hızlı olan doğal gaz ve hidrolik santrallerden ve yük atmadan oluşur. Bu rezervin boyutlandırılması sistemdeki en büyük güç üretim biriminin genelde 1,5 katı olarak yapılır.



Şekil 4.2 : Bir güç sisteminde frekans kontrolü için rezervlerin kullanımı [10].

Güç sistemine bağlanan rüzgar türbinleri en büyük üretim kapasitesine sahip üretim biriminden daha küçük olacağı için bozunum rezervine katkısı yoktur. Ancak rüzgar gücünün güç sistemindeki oranı arttıkça ani değişen yükler ve rüzgar salınımlarından dolayı ilave rezervler gerektirir. Analitik yöntemlere göre bu ilave rezerv ihtiyacı hesaplanır. Örnek olarak güç sisteminde %10'luk bir rüzgar gücü için rüzgar santralının kurulu gücünün %2 ila %8'i arasında bir ilave rezerv şartı vardır.

Güç sistemlerinde üretim ile tüketim arasındaki hatların, kabloların ve transformatörlerin kapasitans, direnç ve indüktansından dolayı gerilim kontrolü gereklidir. Gerilim seviyesi üretilen ve tüketilen reaktif gücün dengede tutulmasıyla teknik ve ekonomik şartlar doğrultusunda ayarlanır. Gerilim kontrolünün amacı düşük ve yüksek gerilimleri önlemek ve şebeke kayıplarını en aza indirerek sistemi kararlı halde tutmaktır. Gerilim değeri frekansın aksine lokal bir büyüklük olduğu için sistemdeki herhangi bir noktadan değil ihtiyaç duyulan barada yapılır. Gerilim kontrolü iletim şebekeleri ve dağıtım şebekeleri için farklı yöntemlerle yapılır. Bunun sebebi iletim ve dağıtım şebekelerinin farklı karakteristiklere sahip olmasıdır.

İletim şebekelerinin direnci düşük, indüktif reaktansı yüksektir. Dolayısıyla R/X oranı düşüktür. Gerilim kontrolü çoğunlukla büyük güçlü santraller ile yapılır. Bunun sebebi sayılarının nispeten az olması nedeniyle TEİAŞ gibi kurumların kolayca erişilmesi ve geniş bir aralıkta yükleme kapasitesine sahip olduğundan reaktif güç

sağlayabilme esnekliğidir. Büyük güç santrallerinin dışında az miktarda da olsa FACTS (Flexible AC Transmission System) cihazları olarak adlandırılan kontrol edilebilir reaktif güç kaynakları kullanılır.

Dağıtım şebekelerinde ise çok daha yüksek bir R/X oranı vardır. Bu nedenle bara gerilimlerinde reaktif gücün etkisi daha az belirgindir. Dağıtım şebekesine bağlı jeneratörler reaktif güç çıkışını her zaman değiştiremediğinden gerilim kontrolü olarak temelde transformatörlerin kademe değiştiricileri kullanılır. Ancak transformatörün kademesinin değiştirilmesi tüm gerilim profilini arttırıp azalttığından lokal bir çözümden uzaktır. Bunun dışında şönt reaktör ve kapasitör gibi reaktif güç üreten veya harcayan cihazlar gerilim kontrolüne daha iyi bir katkıda bulunurlar. Dağıtım şebekeleri, iletim şebekelerine göre gerilim kontrolü için daha az seçenek sunmaktadır.

İletim ve dağıtım şebekelerinde gerilim kontrol yöntemleri farklı olduğu için rüzgar türbinlerinin gerilim kontrolüne etkisi de ikiye ayrılarak incelenmelidir.

İletim şebekelerinde hem kısa vadede hem uzun vadede FACTS cihazlarının dışında gerilim kontrolü büyük oranda büyük ölçekli güç santrallerindeki senkron jeneratörler tarafından yapılmaktadır. Rüzgar santralleri gibi yeni kaynakların sisteme bağlanmasıyla konvansiyonel santrallerin gerilim kontrolüne olan katkısı düşmüştür ve özel gerilim kontrol cihazlarının kullanımı artmıştır. İletim sistemine bağlanmaya yetecek büyüklükteki rüzgar santralleri genelde uzak bölgelerde olduğundan ve gerilim lokal bir büyüklük olduğundan geleneksel yöntem olan konvansiyonel santraller ile gerilim kontrolü zorlaşır. Bu nedenle rüzgar santrallerinin gerilim kontrolüne katkı yapması istenir. Rüzgar santrallerinin konvansiyonel santraller kadar katkıda bulunmasının bir garantisi olmadığı için ilave cihazlar kullanılabilir.

Rüzgar santrallerinin dağıtım şebekesine bağlanması durumunda sisteme çok sayıda küçük miktarda jeneratör bağlanmış olur. Bu jeneratörlerin çıkış güçleri yüke bağlı olmadığından güç akışını etkilemektedir. Konvansiyonel sistemdeki minimum ve maksimum yük arasındaki sınır, rüzgar santrallerinde yerini minimum üretim maksimum yük ile maksimum üretim minimum yük arasına bırakır. Gerilim kontrolünü iyileştirmek için transformatörlere ilave kademe değiştiricileri eklenir veya ilave şönt kapasitör, reaktör kullanılır [10].

5. GÜÇ SİSTEMİNİN RÜZGAR SANTRALLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Rüzgar türbinlerindeki teknolojinin gelişmesiyle beraber büyük ölçekli rüzgar santrallerinin kullanımı son yıllarda oldukça artmıştır. Ancak büyük rüzgar türbinlerinin uzun dönemli işletme ve bakım işlerinde tecrübe eksikliği vardır. Bu yüzden kurulan rüzgar santrallerinin hata ve bakım kayıtlarını analiz ederek mevcut rüzgar türbinlerinin durumunu değerlendirmek önemlidir. Rüzgar türbinin kurulacağı alanda uzun zamanlı rüzgar durumu ve en az bir yıl boyunca sürekli olarak rüzgar hızı ve yönü araştırması yapılır. Bu verilerden yıllık rüzgar gücü kazancı hesaplanarak rüzgar çiftliğinin tasarımı şekillendirilir. Ancak çoğunlukla bu incelemeler rüzgar santralleri kurulduktan sonra sonlandırılır veya çok düşük bir seviyeye indirilir.

Rüzgar çiftliklerinin zayıf şebekelere bağlanması rüzgar türbinlerinin performansını etkiler. Şebekedeki kesintiler, frekans değişimleri, gerilim dengesizlikleri ve kararlı hal gerilimi rüzgar türbininin performansını etkileyen sebepler arasındadır [10].

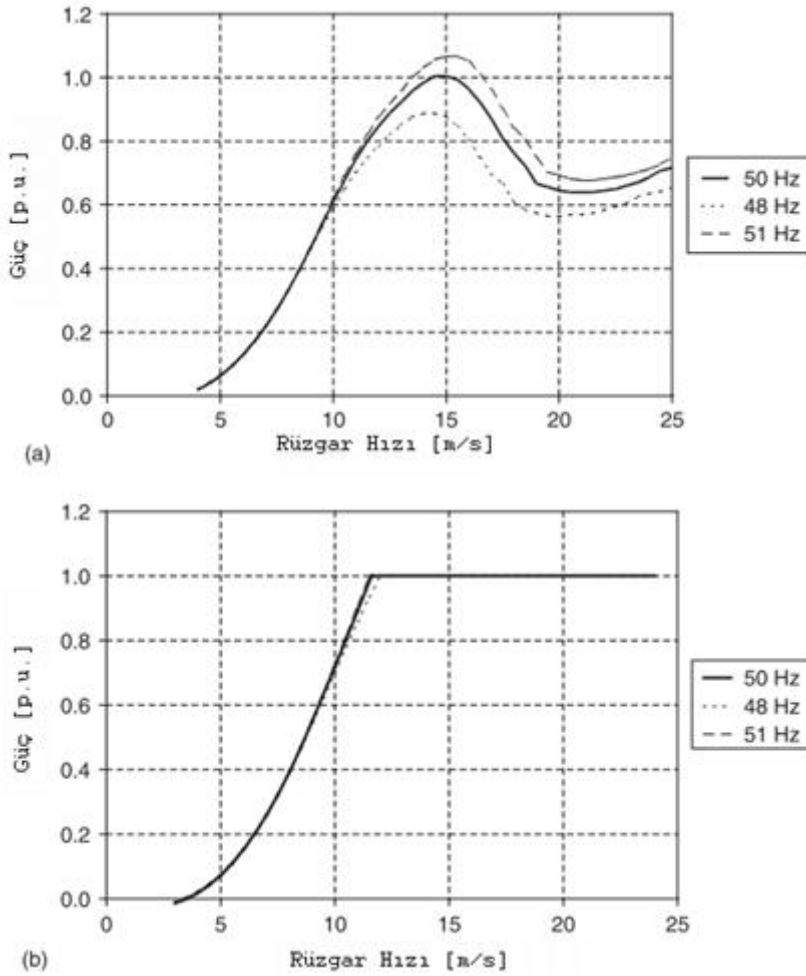
5.1 Kesinti Etkileri

Son yıllarda dağıtım şebekelerinde kısa devreden veya gerilim dalgalanmalarından dolayı rüzgar türbinlerinin devreden ayrılma sayısı artış göstermiştir. Kesintilerin büyük çoğunluğu şebeke hatalarından kaynaklanmaktadır, özellikle kesintiden birkaç saat sonra şebekeye tekrar kendiliğinden bağlanma sırasında senkronizasyon problemi arızaya neden olur. Rüzgar türbinlerinin şebeke hatalarına tepkisi üretim kaybının dışında tamir masrafları ve değişen ekipman masraflarıdır. Türbin kontrol sistemlerindeki elektronik aksamalar şebeke hatalarından meydana gelen gerilim dalgalanmalarına karşı oldukça hassastır. Bu cihazlar şebekeye tekrar bağlantının gerçekleşmesiyle çoğunlukla arızalanır. Bu da rüzgar türbininin saatlerce durmasına sebep olabilir [16].

Rüzgar türbinin sistemden ayrılması durumunda jeneratör ilk olarak ivmelenir ve daha sonra mekanik frenler türbini durdurur. Bu da mekanik sistemin, özellikle aktarma organının, çalışma ömrünü azaltır [10].

5.2 Frekans Etkileri

Şebekedeki frekans değişimleri kullanılan jeneratör güç kontrolü tipine göre rüzgar türbinini etkileyebilir. Frekans değişimleri şebekeye doğrudan bağlanan türbinlerde rotor hızını değiştireceğinden durma kontrollü rüzgar türbinlerinin performansını değiştirir.



Şekil 5.1 : Farklı frekanslarda (a) durma ve (b) eğim kontrollü güç eğrileri [10].

Şekil 5.1'de durma ve eğim kontrollü rüzgar türbinlerinin frekans değişimine tepkisinin karşılaştırılması verilmiştir. Rüzgar hızı 10 m/s'yi geçtikten sonra nominal frekans olan 50 Hz'den sapmalar güç çıkışında değişimlere sebep olur. Durma kontrollü tipte 48 Hz ile 51 Hz arasında güç çıkışında %20 fark olduğu görülmektedir. Frekansın yükselmesinin sonucu olarak rotor hızı da yükselecektir. Bir süre sonra jeneratör aşırı ısınacağı için rüzgar türbini açabilir ve kesinti meydana gelebilir.

Eğim kontrollü tipte ise kanat açıları değiştirilerek rotor hızı düşürülebilir. Dolayısıyla frekans değişimlerinin etkilerinin bu tip için ihmal edilebileceği Şekil 5.1’de görülmektedir.

Şebekeye doğrudan bağlı olmayıp frekans çeviricisine sahip olan rüzgar türbinlerinde ise şebeke frekansı ile rotor hızı birbirinden bağımsız olduğu için şebekedeki frekans değişimlerinden bu tip türbinler etkilenmez [10].

5.3 Gerilimin Etkileri

Şebekeye bağlı rüzgar türbinlerinin sayısının artmasıyla beraber birçok şebeke yönetmeliği içeriklerini düzenleyerek rüzgar türbinlerinin şebekeye katkıda bulunmasını amaçladı. Gerilim düşümünde çalışmayı sürdürme özelliği de rüzgar türbinlerinin şebekeye bağlanmasında en önemli gerekliliklerden biri oldu. Şebekede meydana gelen gerilim düşümü (çökmesi) rüzgar türbininin güç kalitesini ve mekanik performansını etkileyebilir.

Gerilim düşümü rüzgar türbininin mekanik parçalarında salınımlara neden olur. Bu mekanik titreşimler rüzgar türbininin tipine bağlı olarak gerilimde salınımlara sebep olur. Bu salınımlar geçici düşük gerilim kriterini ihlal edebilir ve rüzgar santralini devreden ayırabilir.

Gerilim düşümünün mekanik salınımlarda etkisi özellikle kulede gözüktür. Sistem kısa devre gücü, şebeke empedans açısı, kule sönmüleme oranı ve rüzgar hızı gibi farklı koşullarda gerilim düşümünün rüzgar türbinine olan etkileri değişmektedir.

Gerilim düşümü rotor ve stator akımında ve rotor geriliminde geçici salınımlara neden olur. Eğer gerilim düşümü boyutu koruma devrelerini açtıracak kadar kuvvetli değilse rüzgar türbininin kontrol devresi koşulları düzeltmek için çalışır. Akım ve gerilimdeki bu geçici değişimler jeneratörün aktif ve reaktif gücünde önemli değişikliklere sebep olur. Jeneratör torku azaldığından dönüş hızı artar ve eğim kontrolü devreye girerek rüzgar türbinini sabit hızda tutmaya çalışır.

Gerilim düşümünün kule titreşimlerindeki etkisi şebeke kısa devre gücüne göre değişir. Kısa devre gücü yüksek güçlü bir şebekeye bağlı ise zayıf bir şebekeye göre daha az etkilenecektir. Farklı şebekede empedans açıları, X/R oranının artmasıyla kulede meydana gelen salınımlar da artış gösterir.

Kule titreşimlerindeki en önemli parametrelerden biri de kulenin mekanik sönümlenme oranıdır. Mekanik sönümlenme oranı ne kadar yüksek ise gerilim düşümü durumunda kulede titreşim de o kadar az olur.

Son olarak düşük rüzgar hızı düşük mekanik kuvvetler ürettiğinden gerilim düşümünün kule ve kanatlara olan mekanik etkisi düşük rüzgar hızında daha az olur [17].

6. RÜZGAR SANTRALLERİNİN GÜÇ SİSTEMİNE BAĞLANTI KRİTERLERİ

Büyük ölçekli rüzgar türbinlerinin şebekeye bağlantısı güç sisteminin dengesini etkiler. Son yıllarda güç sistemindeki rüzgar gücü oranının artması güç sisteminin dinamik davranışında ciddi değişimlere sebep vermektedir. Bu sebeple birçok ülkedeki güç sistemi operatörleri şebeke yönetmeliklerini değiştirmekte ve ihtiyaca yönelik hale getirmektedir. Türkiye’de de Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği son olarak Ocak 2013’de Ek-18 maddesiyle 10 MW ve üzeri kurulu güce sahip rüzgar santralleri için sahip olması gereken davranışları ifade eden bir yönetmelik yayınlamıştır. Bu yönetmelik ile ilgili detaylı bilgi ve yönetmeliğe göre analizlerin gerçekleştirilmesi Bölüm 7’de verilmiştir. Şebeke yönetmelikleri genel olarak rüzgar santrallerinin arıza sonrası sisteme katkı ve güç kontrolü konusunda sahip olması gereken özellikleri belirtir.

6.1 Arıza Sonrası Sisteme Katkı

Rüzgar türbinlerinin arıza sonrası sisteme katkı gereksinimi şebekede meydana gelen bir arızadan dolayı rüzgar gücündeki üretim kaybından kaçınmak içindir. 2000’li yıllardan önce herhangi bir şebeke arızası durumunda arıza giderildiğinde yüksek hücum akımlarından kaçınmak için rüzgar türbinlerinden sadece şebekeden ayrılması beklenirdi. Ancak yıllar geçtikçe rüzgar gücü oranının güç sisteminde artmasından dolayı rüzgar santralının şebekeden ayrılması gerilim ve frekans kontrol problemleri yüzünden sistemin çökmesine sebep olabilir.

Arıza sonrası sisteme katkı özelliği tamamen rüzgar türbininin şebeke hatası sırasında şebekeye bağlı kalmasını sağlayan kontrolör tasarımı ile ilgilidir. Arıza sonrası sisteme katkı talebi aynı zamanda şebeke hatasından sonra gerilimin nasıl düzeltileceğini belirler.

Arıza sonrası sisteme katkı özelliği rüzgar türbininin teknolojisine bağlıdır. Eski teknolojiye sahip rüzgar türbinleri böyle bir yeteneği olmadığı için en küçük arızalarda bile o zamanki şebeke yönetmeliklerine göre şebekeden ayrılırdı. Modern

rüzgar türbinleri bir frekans çeviricisi koruma sistemine sahip ise arıza sırasında ve arızadan sonra şebekeye bağlı kalmaya devam edebilirler. Ayrıca şebeke desteği için uygun kontrol donanımına sahip iseler, güç sistemini destekleyebilir ve çevredeki eski teknolojiye sahip diğer rüzgar türbinlerinin davranışlarını iyileştirebilirler.

Şebeke yönetmelikleri ülkeden ülkeye değişiklik gösterebilir. Danimarka, İrlanda gibi ülkelerde iletim ve dağıtım sistemi için ayrı yönergeler bulunurken bazı ülkelerin yönetmelikleri sadece iletim sistemi için geçerlidir. Gerilim düşümü miktarı ve arızanın giderilme süresi de bu farklılıklar içinde yer alır [18].

6.2 Güç Kontrolü

Şebeke yönetmeliklerinde istenen bir diğer özellik de rüzgar santrallerinin güç kontrolü yeteneğine sahip olmasıdır. Güç kontrolü özelliğinin anlamı rüzgar türbinlerinin kısa veya uzun vadede aktif ve reaktif güç düzenlemesi ve şebekede gerilim ve frekans kontrolü yapabilmesidir.

Büyük ölçekli rüzgar santrallerinin kontrol sistemleri aşağıdaki üç özelliğe sahip olmalıdır; birincil ve ikinci kontrol yapabilen aktif güç / frekans kontrolü, gerilim düzenlemesi ve reaktif güç desteği yapabilen reaktif güç / gerilim kontrolü ve bazı şebeke hatalarında sistemden ayrılmamayı sağlayan dinamik denge özelliği.

Modern rüzgar çiftlikleri aşağıdaki farklı çalışma yöntemleri gibi gelişmiş şebeke desteğini sağlamalıdır.

Denge kontrolü: Rüzgar çiftliğinin üretimi azalan veya artan şekilde sabit adımlarla ayarlanabilir. Böylece aktif gücün üretilmesi ve tüketilmesi dengelenmiş olur.

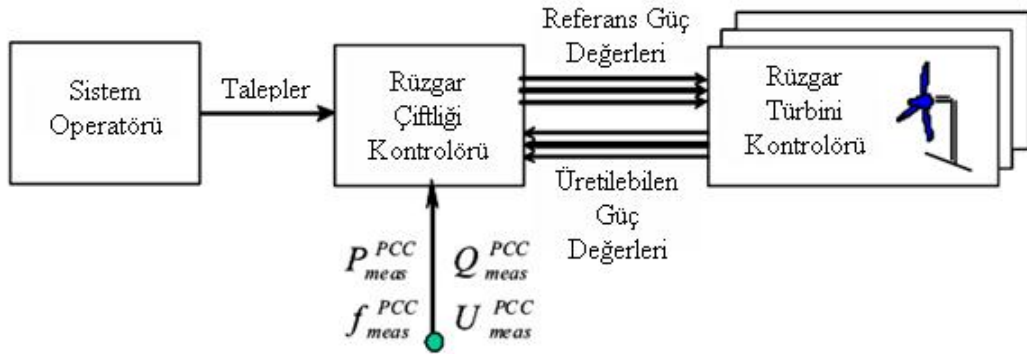
Fark kontrolü: Sabit bir rezerv miktarı bırakarak rüzgar çiftliğini üretebileceği güç miktarının altında çalıştırılabilir. Bu özellik ile frekans kontrolüne yardımcı olunur. Frekansın azalması durumunda rezerv bırakılan kısım harcanarak maksimum üretime çıkılabilir ve frekans tekrar artırılabilir. Ayrıca rüzgar hızındaki büyük değişimlerinden meydana gelen güç dalgalanmalarını da azaltır.

Güç eğim sınırlaması: Rüzgar çiftliğinin güç üretiminin ne kadar hızlı artırılıp azaltılacağını belirler.

Otomatik frekans kontrolü: Ortak bağlantı noktasında ölçülen frekanstaki değişimleri kompanze etmek için rüzgar çiftliği daha az veya daha çok aktif güç üretebilir.

Reaktif güç kontrolü: Rüzgar çiftliği üretilen veya tüketilen reaktif güç miktarını belirlenen sabit bir değerde tutabilir.

Otomatik gerilim kontrolü: Rüzgar çiftliği otomatik olarak reaktif güç üreterek veya tüketerek ortak bağlantı noktasındaki gerilimi kontrol edebilir.



Şekil 6.1 : Rüzgar çiftliği kontrol sisteminin genel yapısı [18].

Rüzgar çiftliği kontrolörü, Şekil 6.1'de görüleceği üzere, her bir rüzgar türbininin sahip olduğu kendi kontrolörüne referans güç değerlerini göndererek bütün santralin güç üretimini kontrol eder. Bu referans değerler güç sisteminin taleplerine, ortak bağlantı noktasındaki ölçümlere ve rüzgar türbininden gelen üretebileceği maksimum güç bilgisine göre belirlenir [18].

7. TÜRKİYE'DEKİ ŞEBEKE YÖNETMELİĞİNE GÖRE ÖRNEK SİSTEM İNCELEMESİ

Rüzgar santrallerinin teknolojisinin gelişmesiyle beraber şebekeye bağlanan kurulu güçler de artmıştır. İlk zamanlarda çoğunlukla dağıtım sistemine bağlanan rüzgar santralleri artık büyük oranda iletim sistemine bağlanmaktadır. Rüzgar santrallerinin iletim sistemine bağlanmasıyla beraber şebeke ile etkileşimleri incelenirken gerilim kalitesine olan etkiden çok güç sistemine olan etkileri ön plana çıkmıştır. Buna göre ilgili standartlarda değişiklikler yapılmıştır.

Çoğunlukla iyi rüzgar potansiyeline sahip bölgeler yerleşim yerlerinden uzaktır ve buraya kurulacak rüzgar santrali uzun iletim hatlarından dolayı şebekenin zayıf kaldığı noktalarda sisteme bağlanır. Büyük güçlü bir santralin zayıf noktadan sisteme bağlanması kararlı hal gerilimini etkileyebilir. Sistem güvenliğini ve dengesini sağlamak için birçok ülke yeni bir bağlantı için gerekli ihtiyaçları tanımlayan şebeke yönetmelikleri yayınlamıştır.

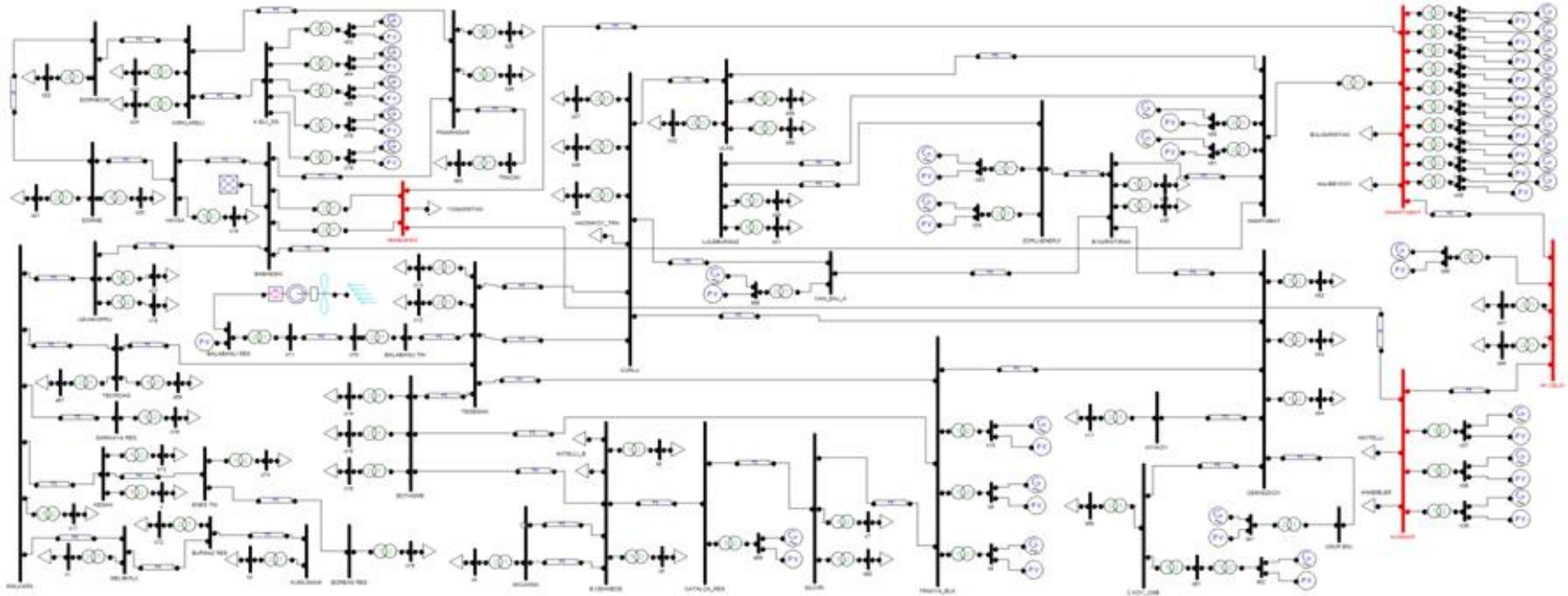
Türkiye'de şebekeye bağlanacak rüzgar santralleri, en son 2013 yılının Ocak ayında revize edilen, Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği'nin Ek-18 bölümüne uyumlu olmalıdır. Bu yönetmeliğe göre iletim sistemine bağlanacak tüm rüzgar santralleri ve dağıtım sistemine bağlanacak 10 MW ve üzeri kurulu güce sahip rüzgar santralleri güç sisteminin dengesinin korunması bakımından belli sınırlar dahilinde çalışmalı ve şebekeye destek olmalıdırlar.

Rüzgar santralının yönetmelikteki koşulları sağlaması rüzgar türbini karakteristiklerinin yanı sıra bağlanacağı baranın (PCC) kısa devre gücüne ve şebeke empedans faz açısına bağlıdır. Şebeke yönetmeliği sadece tek bir rüzgar türbini ile değil ortak bağlantı noktasındaki durum ile ilgilenir. Bu sebepten dolayı her bir rüzgar santrali projesi için yönetmeliğe uyum denetlenmelidir. Bu yönetmelikte rüzgar santralinden beklenen davranışlar arıza sonrası sisteme katkı, aktif güç kontrolü, frekans tepkisi, reaktif güç kapasitesi ve reaktif güç desteğini kapsar.

Bu bölümde örnek bir sistem üzerinde Matlab Simulink üzerinden çalışan Power System Analysis Toolbox (PSAT) programı [19] ile yük akış analizi ve dinamik analizler yapılarak farklı kurulu güçler ve farklı rüzgar türbini tipleri için şebeke yönetmeliğine göre uygunluk incelenecektir.

7.1 Örnek Sistem Verileri

Örnek sistem olarak TEİAŞ'ın belirlediği Trakya bölgesine ait 11 numaralı şema kullanılmıştır [20]. Yük, bara, transformatör, iletim hattı ve jeneratör bilgileri ilgili TEİAŞ dokümanlarından alınmıştır. Sistemde 4'ü 380 kV, 36'sı 154 kV olmak üzere 40 bara mevcuttur. Bu sistemde temel olarak 2014 yılı sonunda devreye alınması planlanan 50 MW kurulu güce sahip Balabanlı Rüzgar Santrali incelenmiştir. Balabanlı Rüzgar Santrali 22 adet 2,3 MW rüzgar türbininden oluşmaktadır. Rüzgar türbinleri tam ölçekli frekans çeviricisine sahiptir. Her bir türbine ait 2,6 MVA gücündeki transformatör ile 690 V olan türbin çıkış gerilimi 34,5 kV'a yükseltilir. Trafo çıkışları 7, 8 ve 7'li olacak şekilde serilenip üç radyal kol ile ana dağıtım barasına bağlanır. Ana dağıtım barasından sonra gerilim 62,5 MVA'lık ana güç transformatörü ile 154 kV'a yükseltilerek 10 km uzaklıkta bulunan Tegesan barasına tek devre 1292 MCM karakteristikli enerji iletim hattı ile sisteme entegre edilir. Analiz için modellenen Trakya bölgesi Şekil 7.1'de verilmektedir.



Şekil 7.1 : Trakya bölgesinin PSAT programında modellenen şeması.

7.2 Yük Akış Analizi

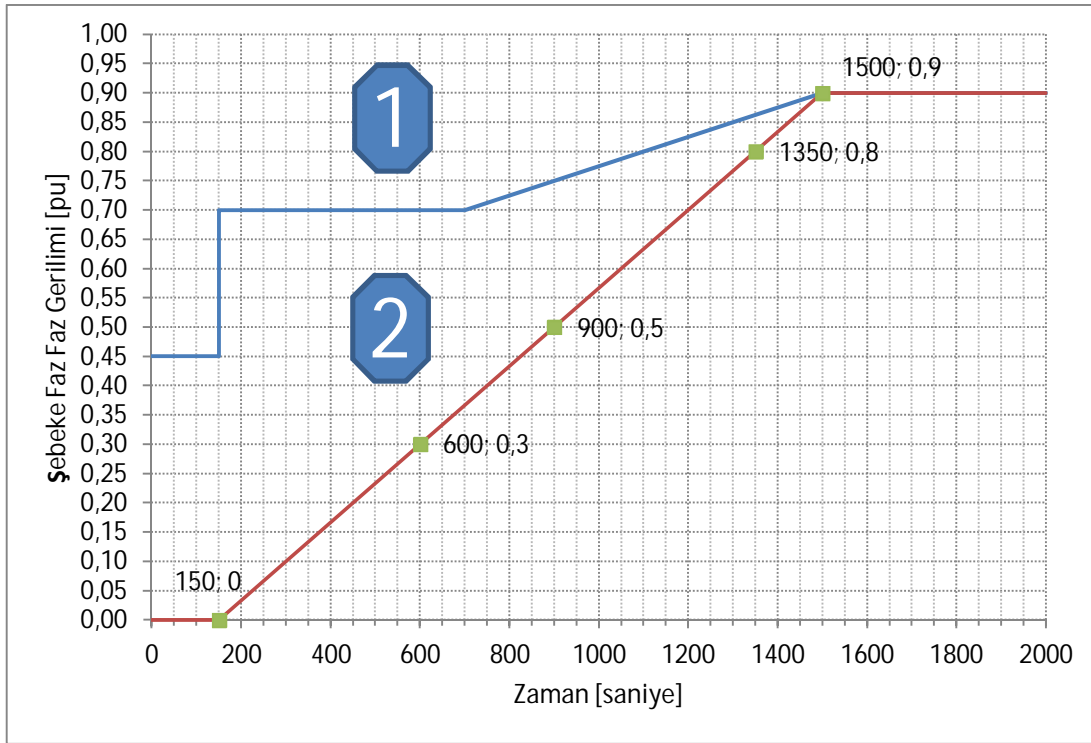
Yük akış analizi yapılırken Newton-Raphson yöntemi kullanılmıştır. Yük analizi sonuçları TEİAş'ın referans değerleri ile uyumludur. Analiz sonuçlarına göre rüzgar santrali devreye girmeden önceki ve girdikten sonra birim gc faktörü modunda ve %30, %50, %80 ve %100 aktif gcteki çalışma koşullarına göre ve iletim sistemi kuvvetlendirilerek santral gücünün 150 MW'a ve 300 MW'a çıkarılması durumunda sistemdeki bara gerilimleri izelge 7.1'deki gibidir. Çizelgede görüleceği üzere rüzgar santralinin devreye girmesiyle tam gcte üretim yapıncaya kadar bağlı bulunduğu Tegesan barasında ve elektriksel olarak bu baraya yakın olan diğer baralarda bir miktar gerilim artışı gözlemlenmektedir. Gerilim değeri lokal bir büyüklük olduğu için gerilim ile ilgili etki en çok bağlı bulunduğu baraya iletilirken baradan uzaklařtıķa etki azalır ve kaybolur. Bu analizde birim gc faktöründe çalışıldığından şebeke ile herhangi bir reaktif gc alışverişi olmadığı için rüzgar santralinin devre girmesiyle Tegesan, Çorlu, Ulaş baralarında ihmal edilebilir derecede bir gerilim artışı meydana geldi. Santral gücünün artması durumunda ise iletim hatlarındaki yüklenme oranları ve yük akış yönleri değişmiştir. Malkara barası, rüzgar santralinin bağlı olduğu Tegesan barasından beslenmeye başlamıştır. Malkara barasında ve bu baradan beslenen Tekirdağ, Sarıkaya RES, Keşan, Enes, Gelibolu, Burgaz RES, Kumlımanı ve Boreas RES baralarında %0,7 civarı gerilim düşümü gözlenmiştir. Bara gerilimleri sınır değerler olan %95 ve %105 aralığında kalmıştır.

Çizelge 7.1 : Çeşitli çalışma koşullarına göre bara gerilimleri.

Bara Adı	P %0 [kV]	P %30 [kV]	P %50 [kV]	P %80 [kV]	P %100 [kV]	150 MW [kV]	300 MW [kV]
4BABAESKI	407,5	407,5	407,5	407,5	407,5	407,5	407,3
4HAMITABAT	408,1	408,1	408,1	408,1	408,1	408,1	408,0
4K.CELIK	404,2	404,3	404,3	404,3	404,3	404,2	404,1
4UNIMAR	404,2	404,2	404,2	404,2	404,2	404,2	404,1
AKCANS A	154,5	154,5	154,6	154,6	154,6	154,5	154,4
B.CEKMECE	154,5	154,5	154,6	154,6	154,6	154,5	154,4
B.KARISTIRAN	157,6	157,7	157,7	157,7	157,7	157,7	157,4
BABAESKI	158,8	158,8	158,8	158,8	158,8	158,8	158,8
BOREAS RES	151,0	151,1	151,1	151,1	151,1	150,9	150,1
BOTASME	157,9	158,1	158,1	158,1	158,1	158,1	157,9
BURGAZ RES	150,9	151,0	151,1	151,0	151,0	150,8	150,0
C.KOY_OSB	155,7	155,8	155,8	155,9	155,9	155,9	155,8
CAN_ENJ_A	162,6	162,7	162,7	162,7	162,7	162,7	162,4
CATALCA_RES	154,8	154,9	154,9	154,9	154,9	154,9	154,8
CERKEZKOY	155,1	155,2	155,3	155,3	155,3	155,3	155,2
CORLU	155,3	155,5	155,5	155,5	155,6	155,5	155,2
EDIRNE	154,9	154,9	154,9	154,9	154,9	154,9	154,9
EDIRNECİM	155,6	155,6	155,6	155,6	155,6	155,6	155,6
ENES TM	150,9	151,0	151,1	151,0	151,0	150,8	150,1
GELIBOLU	150,9	151,0	151,0	151,0	151,0	150,8	150,0
HAMITABAT	161,4	161,5	161,5	161,5	161,5	161,5	161,4
HAVSA	156,3	156,3	156,3	156,3	156,3	156,3	156,3
K.ELI_DG	159,0	159,0	159,0	159,0	159,0	159,0	159,0
KESAN	150,9	151,0	151,0	151,0	151,0	150,7	150,0
KIRKLARELI	158,1	158,1	158,1	158,1	158,1	158,1	158,1
KIYIKOY	155,0	155,1	155,1	155,2	155,2	155,2	155,1
KUMLIMANI	150,7	150,8	150,8	150,8	150,8	150,6	149,8
LULEBURGAZ	160,4	160,5	160,5	160,5	160,5	160,5	160,4
MALKARA	151,9	152,0	152,1	152,0	152,0	151,8	151,1
PINARHISAR	157,9	157,9	157,9	157,9	157,9	157,9	157,9
SARIKAYA RES	151,9	152,1	152,1	152,1	152,0	151,8	151,1
SILIVRI	155,1	155,2	155,2	155,2	155,2	155,2	155,1
TEGESAN	156,1	156,3	156,4	156,4	156,5	156,4	156,2
TEKIRDAG	154,2	154,4	154,4	154,4	154,5	154,3	153,7
TRACİM	157,8	157,8	157,8	157,8	157,8	157,8	157,8
TRAKYA_ELK	158,1	158,2	158,2	158,2	158,2	158,2	158,1
UGUR ENJ	155,1	155,3	155,3	155,3	155,3	155,3	155,2
ULAS	156,0	156,1	156,1	156,2	156,3	156,2	155,9
UZUNKOPRU	154,1	154,2	154,2	154,3	154,3	154,4	154,3
ZORLUENERJİ	157,7	157,8	157,8	157,8	157,8	157,8	157,5

7.3 Arıza Sonrası Sisteme Katkı

Rüzgar santralının sisteme bağlantı noktasının geriliminin herhangi bir arızadan dolayı düşmesi durumunda rüzgar santrali yönetmeliğe göre Şekil 7.2’de belirtilen sınırlar dahilinde sisteme bağlı kalmalıdır. Şekle göre gerilim 1 numaralı bölgede ise arıza esnasında düşen aktif güç arıza sonrasında saniyede nominal gücün %20’si olacak şekilde artış göstermelidir. Eğer gerilim düşümü 2 numaralı bölgede ise aktif güç saniyede %5 olacak şekilde artış göstermelidir. Eğer arıza iki numaralı bölgenin altında kalıyorsa rüzgar santralının güç sistemine bağlı kalması beklenmez.



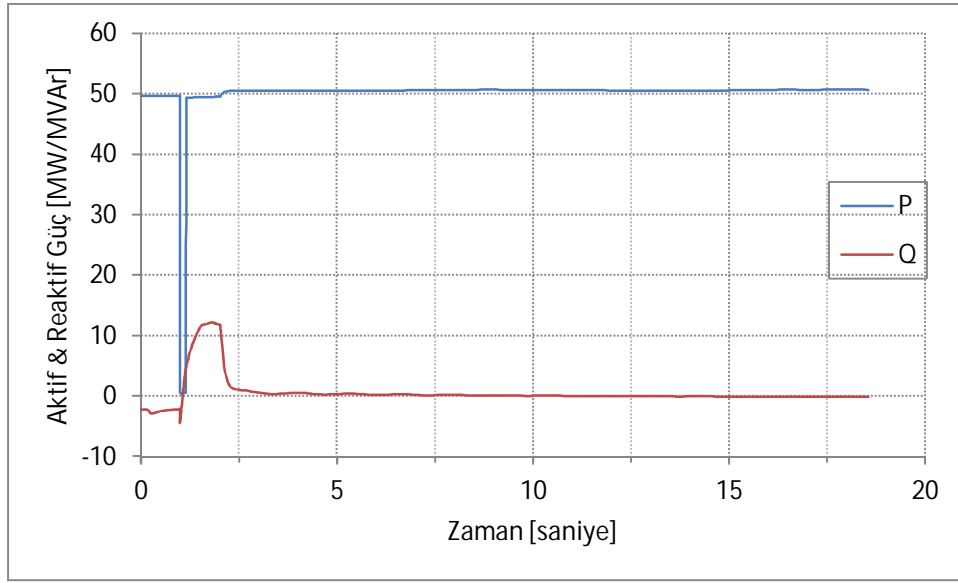
Şekil 7.2 : Arıza sonrası sisteme katkı koşulları.

Örnek sistem incelemesinde rüzgar santralının bağlı bulunduğu barada Çizelge 7.2’deki arıza koşulları incelenmiştir. Analiz edilen bu koşullar şebeke yönetmeliğindeki şemada yeşil noktalar olarak işaretlenmiştir. Analiz edilen noktalar seçilirken muhtemel en büyük tepkiyi görmek için uç noktalar tercih edilmiştir.

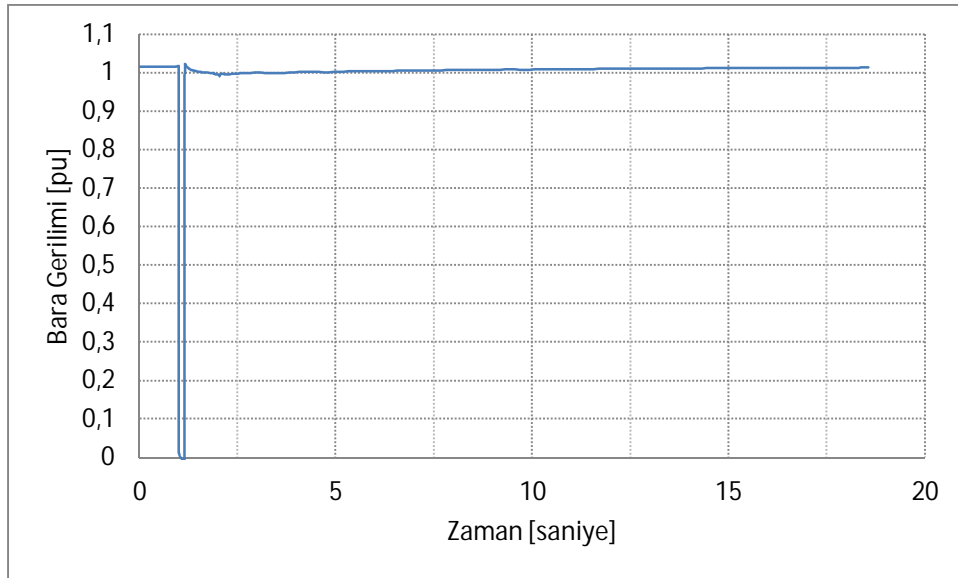
Çizelge 7.2 : Analiz edilen arıza gerilimleri ve süreleri.

Bağlı Gerilim	0%	30%	50%	80%	90%
Arıza Süresi	150 ms	600 ms	900 ms	1350 ms	1500 ms

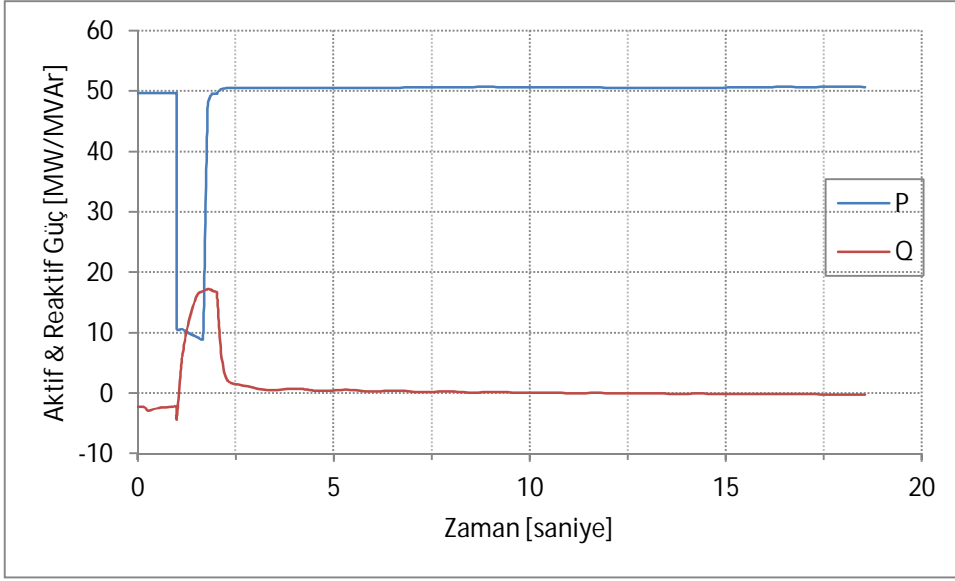
Analiz sonuçları Şekil 7.3 - 7.12'de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre incelenen tam ölçekli frekans çeviricili rüzgar türbinleri şebekede meydana gelen arızalarda sisteme bağlı kaldığında arıza sonrası aktif güç ve reaktif güç çıkışlarının sönümlenmesiyle sistemi dengede tutmuştur. Arıza durumunda düşen gerilim miktarına bağlı olarak üretilen aktif güçte azalma olur. Reaktif güç üretimi ise düşen gerilimi arttırmak için artar. Arızanın sonlanmasıyla aktif güç ve reaktif güç üretimi istenilen sürelerde ilk durumuna geri döner. Böylece rüzgar santrali devrede kalarak herhangi bir üretim kaybı olmadan güç sisteminin dengesi korunmuş olur.



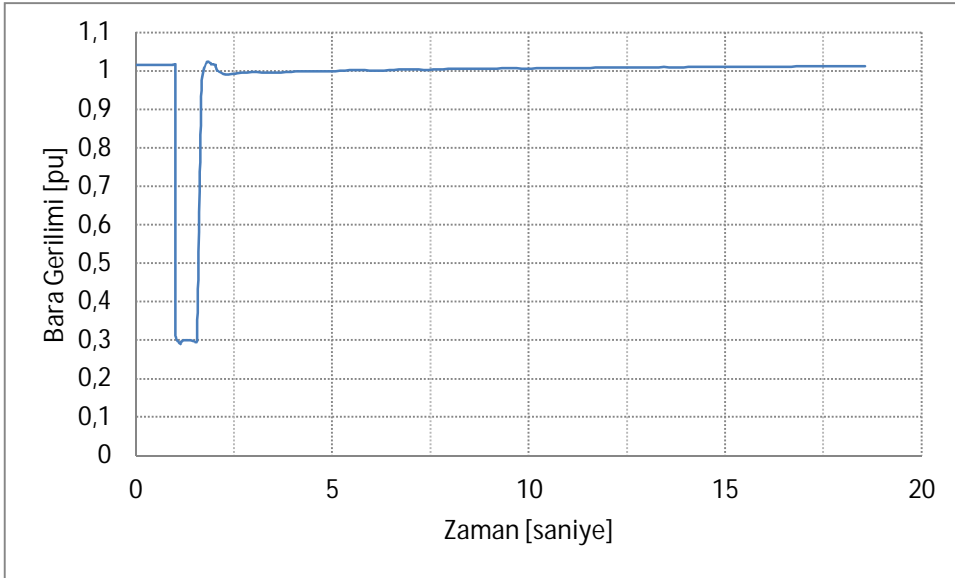
Şekil 7.3 : %0 Bağlı gerilim ve 150 ms arıza durumunda aktif & reaktif güç.



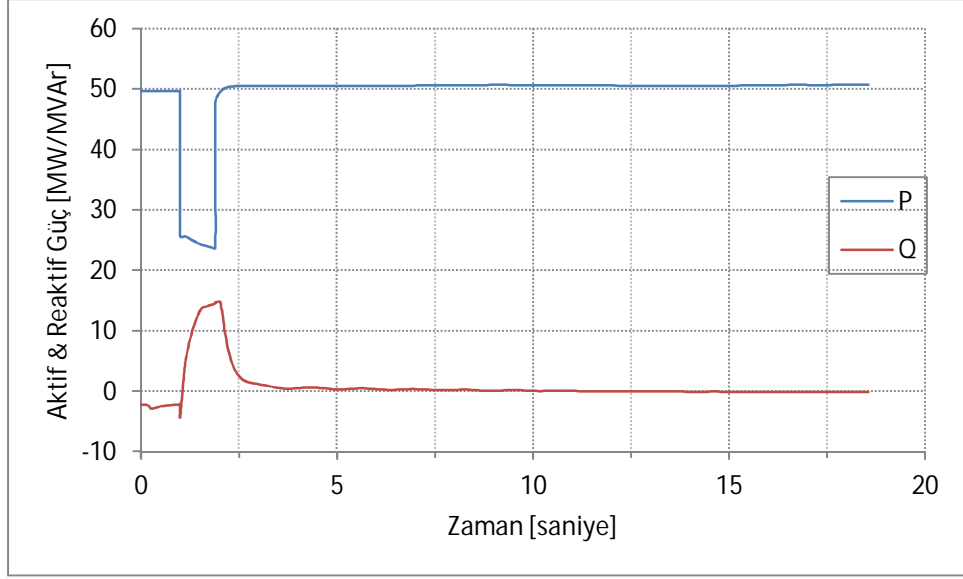
Şekil 7.4 : %0 Bağlı gerilim ve 150 ms arıza durumunda bara gerilimi.



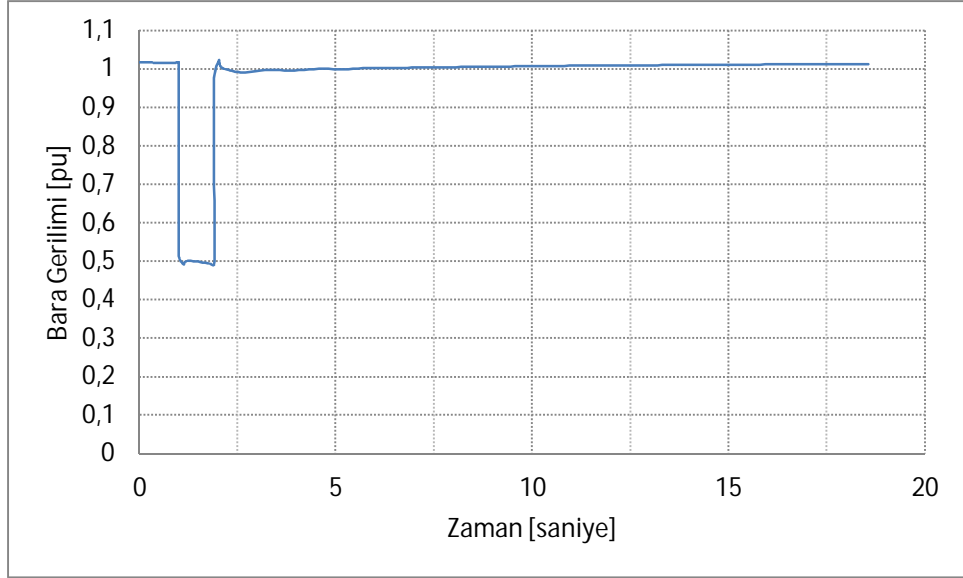
Şekil 7.5 : %30 Bağlı gerilim ve 600 ms arıza durumunda aktif & reaktif güç.



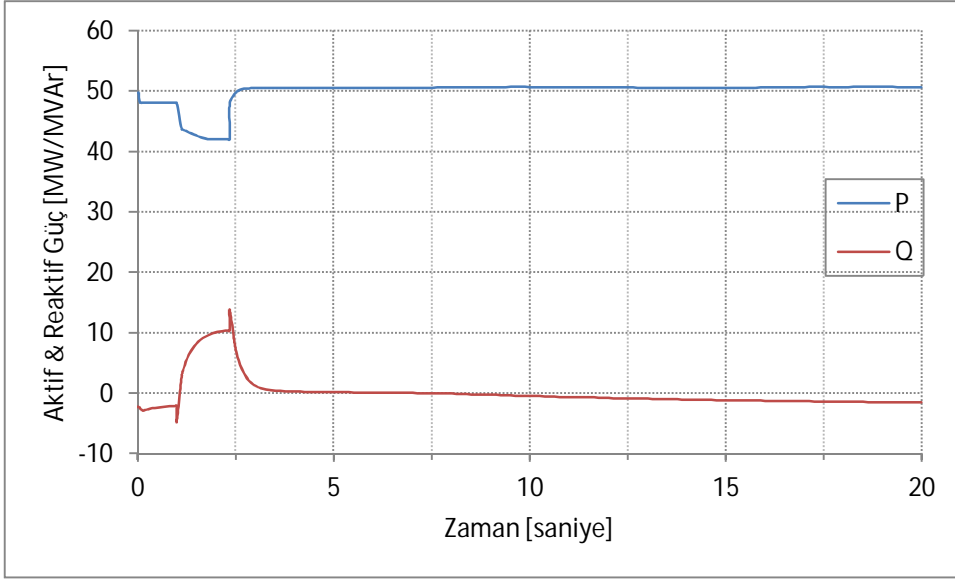
Şekil 7.6 : %30 Bağlı gerilim ve 600 ms arıza durumunda bara gerilimi.



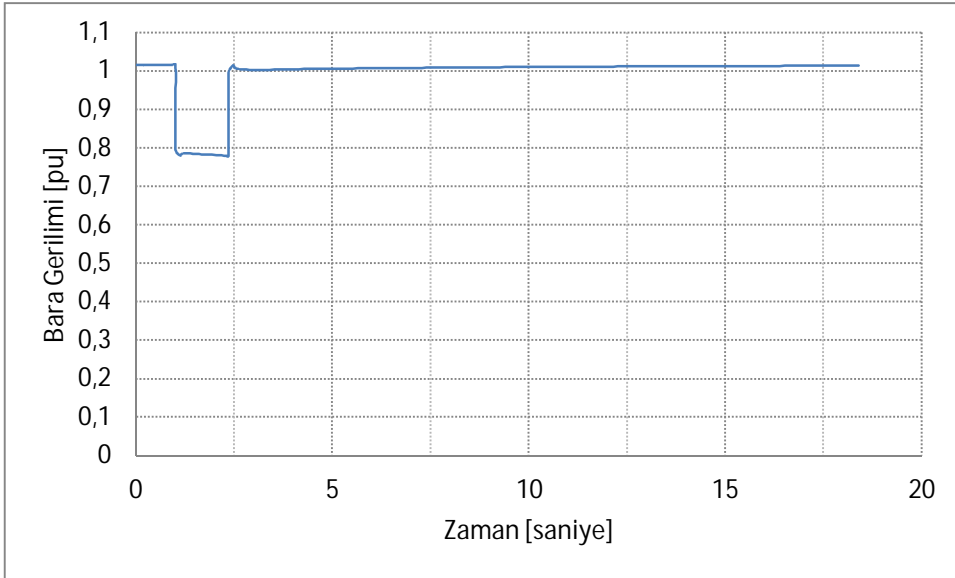
Şekil 7.7 : %50 Bağlı gerilim ve 900 ms arıza durumunda aktif & reaktif güç.



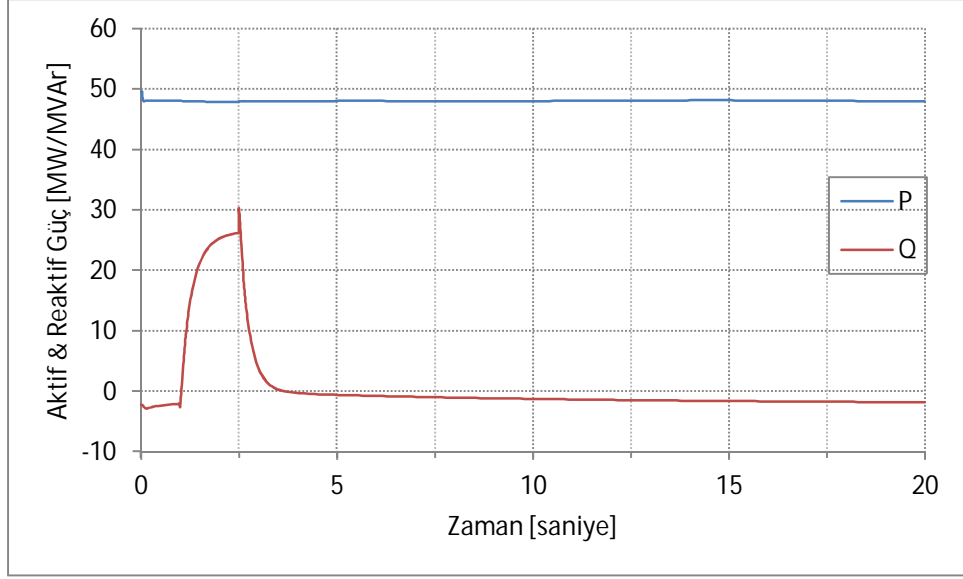
Şekil 7.8 : %50 Bağlı gerilim ve 900 ms arıza durumunda bara gerilimi.



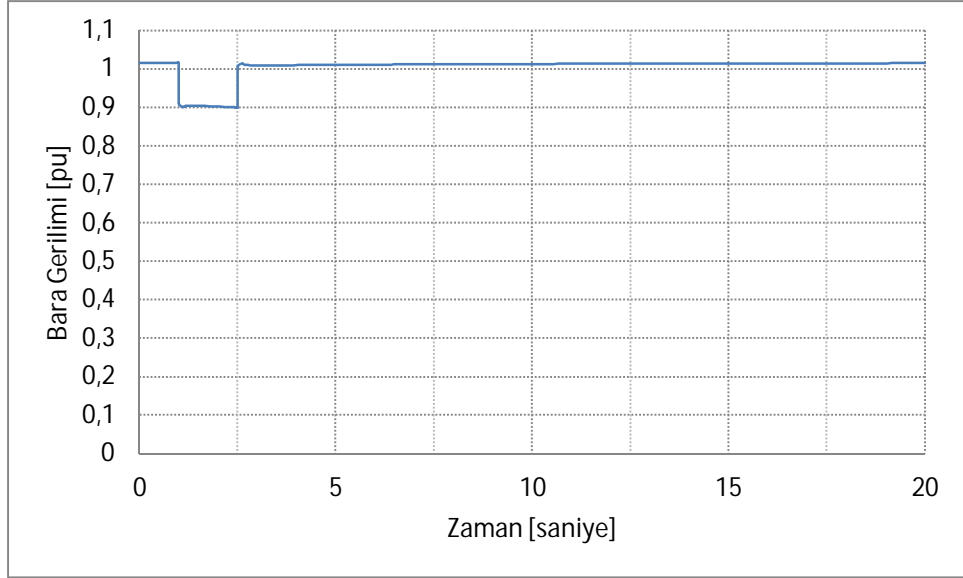
Şekil 7.9 : %80 Bağlı gerilim ve 1350 ms arıza durumunda aktif & reaktif güç.



Şekil 7.10 : %80 Bağlı gerilim ve 1350 ms arıza durumunda bara gerilimi.



Şekil 7.11 : %90 Bağlı gerilim ve 1500 ms arıza durumunda aktif & reaktif güç.

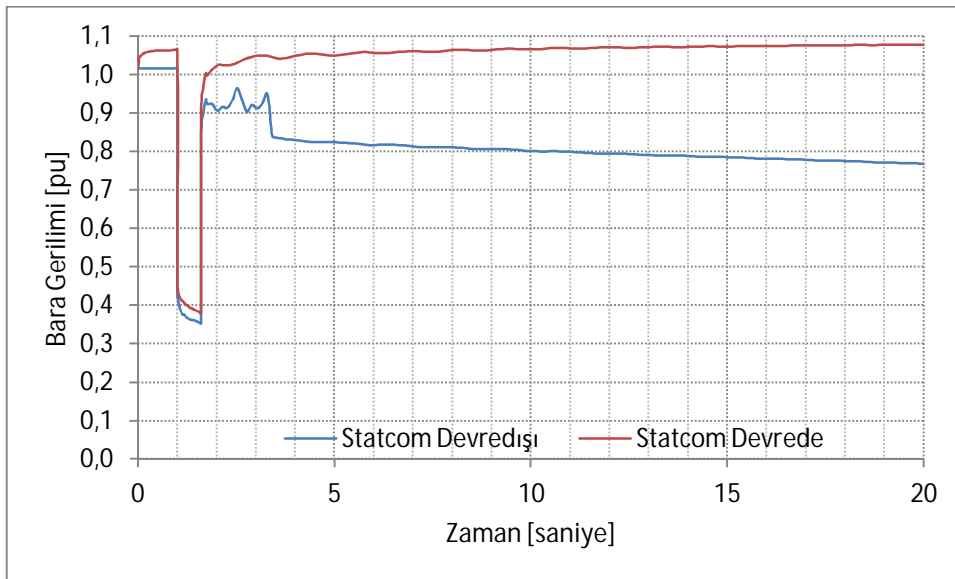


Şekil 7.12 : %90 Bağlı gerilim ve 1500 ms arıza durumunda bara gerilimi.

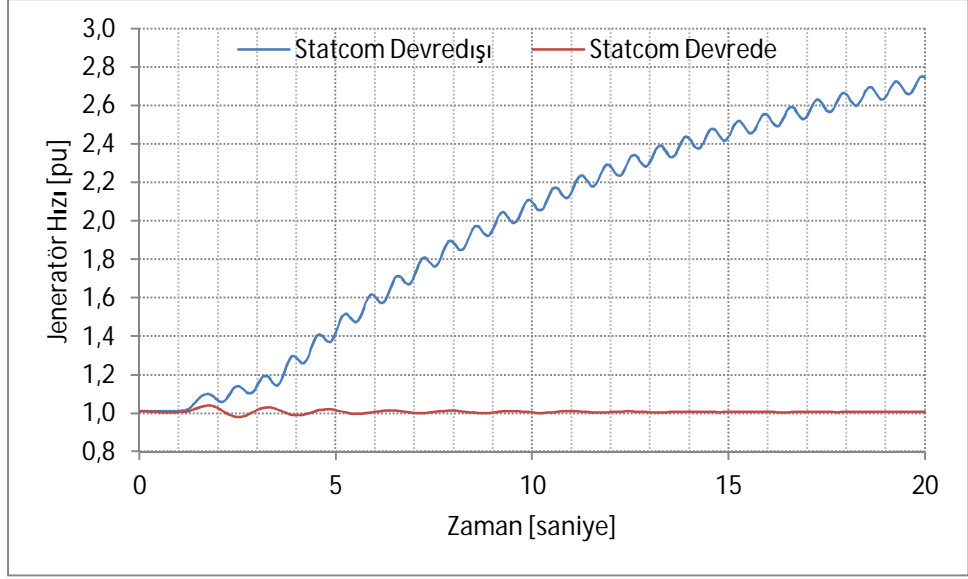
Çift beslemeli asenkron jeneratörlerin arıza esnasında devam edebilmesi için ilave ekipman ve yazılımlara ihtiyaç duyulur. Arıza esnasında rotor tarafındaki frekans çeviricisine DC hattan yüksek gerilim gelmemesi için rezistif metal (crowbar) yöntemi ile koruma yapılır [21]. Sabit hızlı rüzgar türbinleri de ek ekipmanlara ihtiyaç duyar. Hata durumunda rotor hızının artması ve türbinin dengesiz duruma gelmesini önlemek için reaktif güç desteği ve aktif durma kontrolü çözümler arasındadır [22]. Sabit hızlı rüzgar türbininin arıza esnasında devam edebilmesinin bir başka yolu da tam ölçekli bir frekans çeviricisine sahip bir rüzgar türbini ile ortak

çalıştırılmasıdır [23]. Her iki türbin için de ortak bağlantı noktasına (PCC) bir FACTS cihazı bağlamak arıza durumunda dengeyi sağlamaya yardımcı olur.

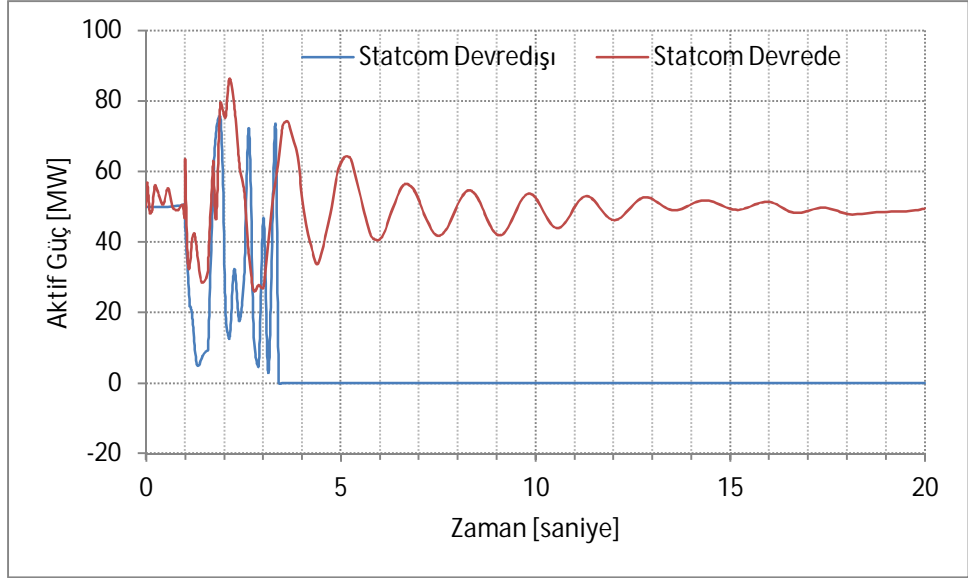
İnceleme yapılan santralin sabit hızlı rüzgar türbinlerinden oluşması durumunda arıza esnasında sisteme katkı koşullarını sağlayıp sağlayamadığını araştırmak için analizler yapıldı. Rüzgar santralının şebekeye bağlandığı noktada Şekil 7.13'deki gibi 600 ms boyunca bağlı gerilimin %35'e düşmesi durumunda şebeke yönetmeliğine göre bu santralin şebekeye bağlı kalması gerekiyor. Ancak sabit hızlı türbinlerin böyle bir özelliği olmadığı için rotor hızı Şekil 7.14'deki gibi hızlı bir şekilde ivmeleniyor ve rüzgar türbini dengesiz duruma geliyor. Bu durum literatürde rotor hızı dengesizliği olarak adlandırılır. Böyle bir şebeke arızası yaşanması durumunda jeneratörün aşırı hız röleleri rüzgar türbinini devreden ayırır. Jeneratörün ürettiği aktif güç değişimi Şekil 7.15'de ve reaktif güç değişimi Şekil 7.16'de verilmiştir. Burada 1'inci saniyede başlayıp 600 ms süren arızadan sonra rüzgar santrali 3.4'üncü saniyede şebekeden ayrılmıştır. Rüzgar santralının şebekeden ayrılmasıyla bara gerilimi Şekil 7.13'de görüldüğü gibi üretim kaybından dolayı %80'lere düşüyor. Sabit hızlı rüzgar türbinlerinin şebeke yönetmeliğini sağlaması için sisteme STATCOM (Static Synchronous Compensator) eklenmesi durumunda analizler tekrar edilip aynı şekillere eklenmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi STATCOM olması durumunda arızadan sonra rotor hızındaki ve aktif & reaktif güç üretimindeki dalgalanma sönümlenip rüzgar santralının şebekeye bağlı kalması sağlanmıştır.



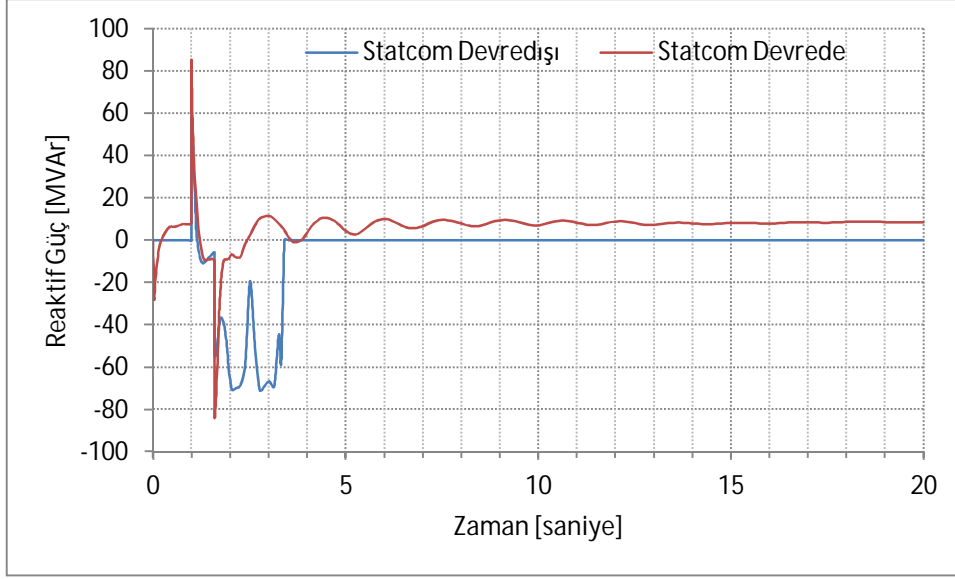
Şekil 7.13 : %35 Bağlı gerilim ve 600 ms arıza durumunda bara gerilimi.



Şekil 7.14 : Arıza durumunda jeneratörün hızı.



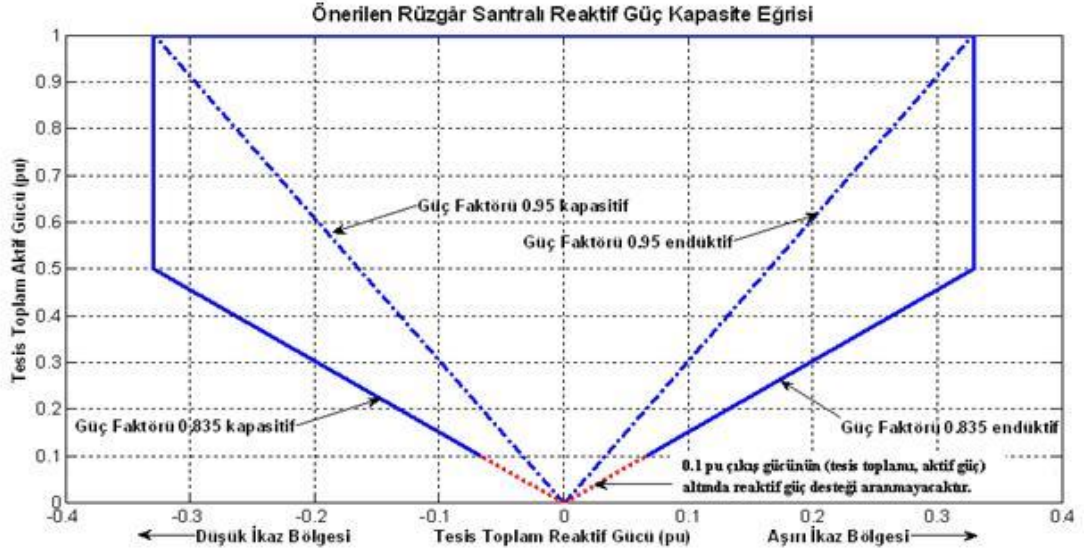
Şekil 7.15 : Arıza durumunda aktif güç üretimi.



Şekil 7.16 : Arıza durumunda reaktif güç üretimi.

7.4 Reaktif Güç Kapasitesi

Şebeke yönetmeliğine göre rüzgar santralleri Şekil 7.17’de gösterilen sınırlar dahilinde reaktif güç kapasitesine sahip olmalıdır. Buna göre rüzgar santrali tam güçte üretim yaparken (1pu) 0,95 endüktif ve 0,95 kapasitif güç faktörü aralığında çalışabilmelidir. Bunun anlamı kurulu gücün 0,33 katı reaktif enerji şebekeye verebilmeli veya tüketebilmelidir. Santral %100 ile %50 kapasite arasında çalışırken aynı şekilde 0,33 kat reaktif gücü üretebilmeli veya tüketebilmelidir. %50 ile %10 arasında ise güç faktörü 0,835 kapasitif ve 0,835 endüktif arasında çalışabilmelidir. Aktif güç çıkışı %10’dan düşük seviyelere inmiş ise reaktif güç desteği aranmaz.



Şekil 7.17 : Rüzgar santrali reaktif güç kapasite eğrisi [24].

Örnek sistemde incelediğimiz rüzgar türbini tam ölçekli bir frekans çevirisine sahip olduğu için şebeke tarafı çeviricisi ile reaktif güç ayarlaması yapılabilmektedir. Rüzgar santralının ortak bağlantı noktasındaki ölçümlerin yukarıdaki grafiğe uygunluğunu kontrol etmek için santralin ürettiği aktif güç %10 adımlarla %100 ile %10 değerleri arasında incelenir. Bu durumda istenilen reaktif güç desteği sağlanırken rüzgar türbini uç geriliminin çalışma koşulları içinde kalıp kalmadığına bakılır. Genellikle rüzgar türbinleri nominal gerilimlerinin %90-%110 aralığında çalışabilmektedir. Yönetmeliğe göre 50 MW kurulu güce sahip Balabanlı Rüzgar Santrali için Çizelge 7.3'deki reaktif güç değerleri sağlanabilmelidir.

Çizelge 7.3 : Üretilmesi veya tüketilmesi gereken maksimum reaktif güç.

Aktif Güç	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Reaktif Güç [MVar]	3,29	6,59	9,88	13,18	16,47	16,43	16,43	16,43	16,43	16,43

Yukarıdaki tabloya göre istenilen aktif güç ve reaktif güç değerleri analiz edilince Şekil 7.18'deki sonuçlar elde edilmiştir. Rüzgar türbinleri düşük uyarımda çalıştırılırsa şebekeden reaktif güç çekecektir ve yönetmelikte istenilen değerler tüketildiğinde rüzgar türbininin gerilimi düşecektir. Analiz sonuçlarına göre en düşük gerilim 670,5 V'dur. Tam tersi olarak rüzgar türbinleri aşırı uyarımda çalıştırılırsa şebekeye reaktif güç verecektir ve uç gerilimi yükseldiği gibi ortak bağlantı noktasındaki gerilim de yükselecektir. Analiz sonuçlarına göre istenilen en yüksek reaktif güç üretiminde türbin gerilimi 744,8 V'a yükselmektedir. Rüzgar türbinleri \pm

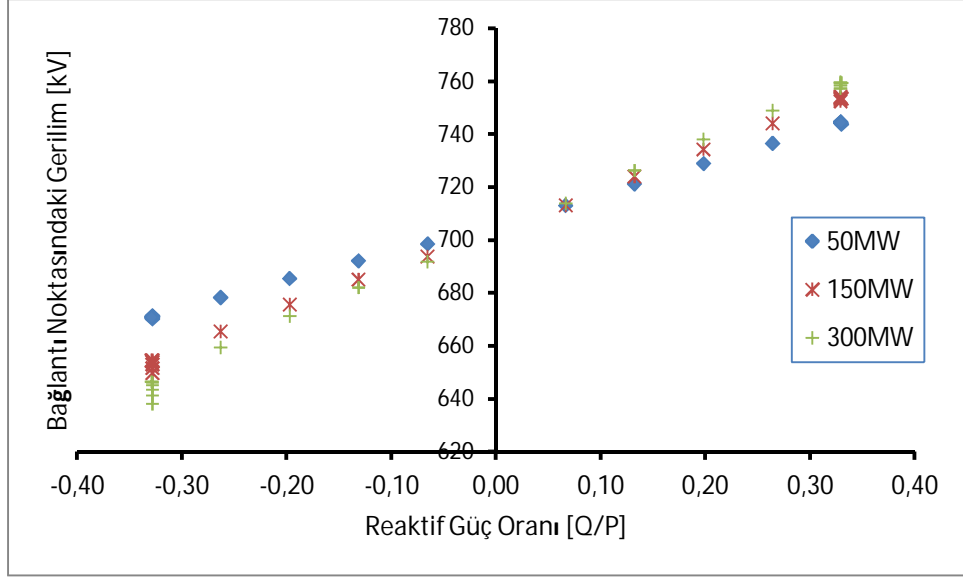
%10'da çalışabildiğinden (minimum 621 V, maksimum 759 V) her iki durumda da türbin gerilimleri sınırlar dahilinde kalmıştır.

Daha sonra aynı çalışma santralin gerçekteki kurulu gücü olan 50 MW yerine 150 MW ve 300 MW olması durumunda Çizelge 7.4'de sağlanması gereken reaktif güç değerleri incelenip analiz sonuçları aynı şekle aktarılmıştır. Buna göre santral gücü arttıkça şebeke yönetmeliğindeki değerleri sağlarken türbin uç gerilimleri daha çok sapmaktadır. 150 MW güç için 753,9 V ile 649,9 V arasında değişirken, 300 MW güç için 759,8 V ile 638,3 V arasında değişmektedir. Rüzgar türbininin nominal gerilimi olan 690 V'un \pm %10 aralığında çalışabileceği düşünülürse 300MW santralin gücü yönetmeliği sağlarken sınır değerlerde çalışmaktadır. Bu bakımdan bu baraya bağlanan rüzgar santrali için reaktif güç kapasitesi yönünden maksimum 300 MW kurulu güç sınırlayıcı bir faktördür.

Çizelge 7.4 : 150 MW ve 300 MW kurulu güç için gerekli reaktif güç miktarları.

Aktif Güç	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Reaktif Güç [150 MW]	9,88	19,77	29,65	39,54	49,42	49,30	49,30	49,30	49,30	49,30
Reaktif Güç [300 MW]	19,77	39,54	59,31	79,08	98,85	98,61	98,61	98,61	98,61	98,61

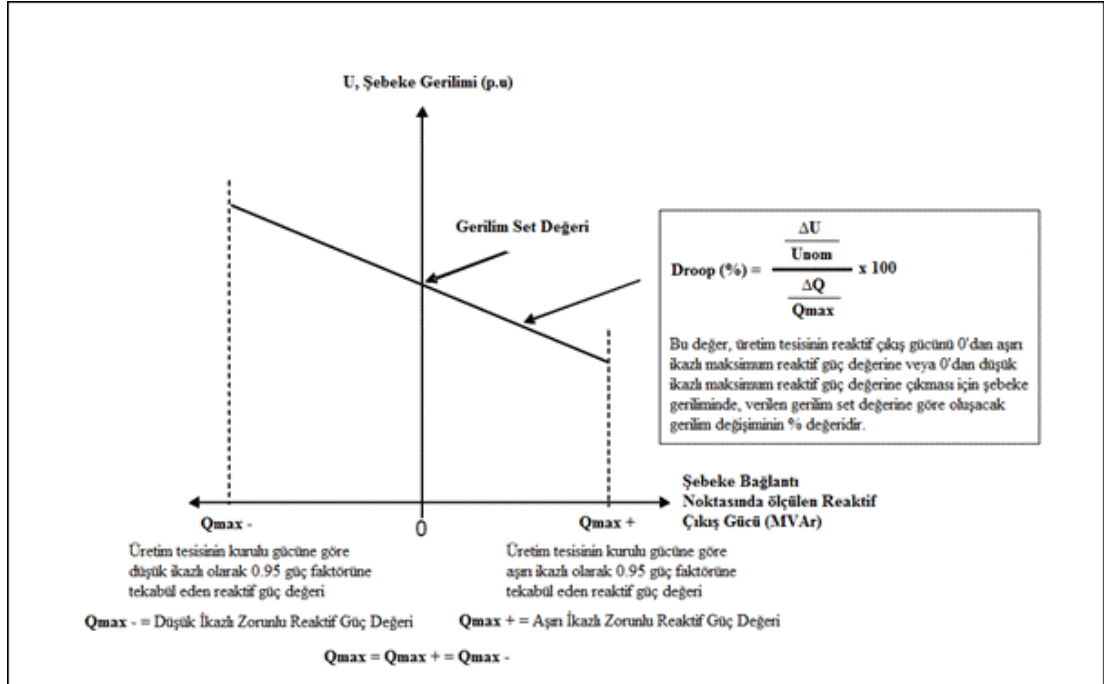
Farklı rüzgar türbini tipleri için reaktif güç kapasitesi incelendiğinde çift beslemeli asenkron jeneratörlü türbinler genelde \pm %30 civarında reaktif güç alışverişi yapılabildiğinden benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sabit hızlı rüzgar türbinlerinde ise reaktif güç ayarı yapılamadığından yardımcı ekipman kullanmak gereklidir.



Şekil 7.18 : Reaktif güç ayarına göre türbin uç gerilimi.

7.5 Reaktif Güç Desteği

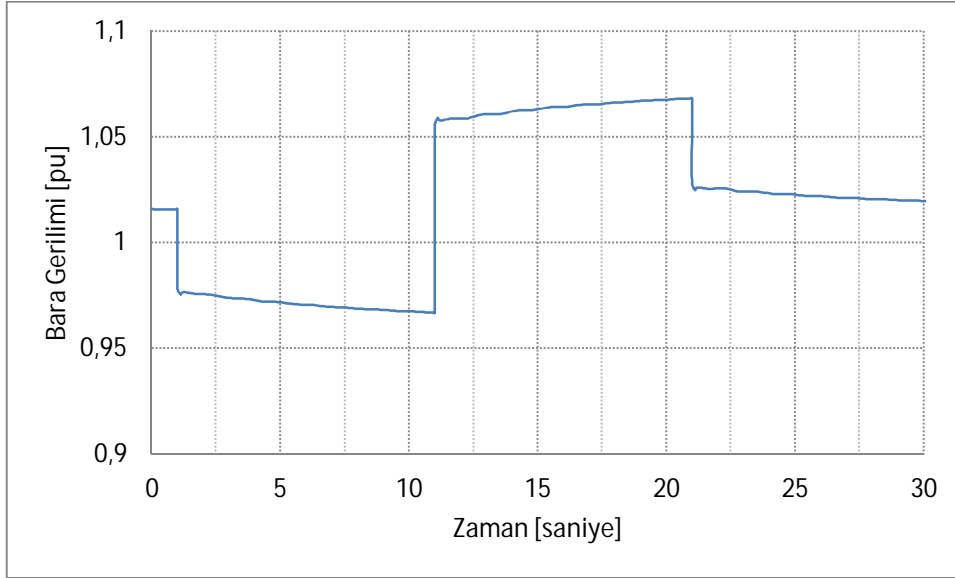
Yönetmeliğe göre rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisleri, bağlantı noktası geriliminin 0,9 pu ve 1,1 pu değerleri arasında tanımlanan işletme koşullarındaki gerilim değişimlerine Şekil 7.19'un koşullarında katkı vermelidir. TEİAŞ tarafından verilen gerilim set değerine göre reaktif güç üretimi veya tüketimi yapılır.



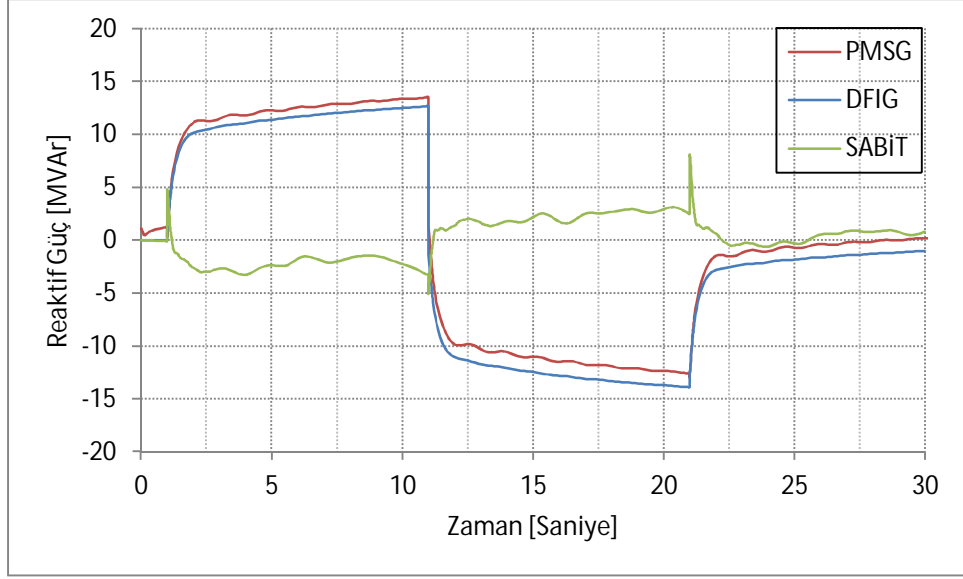
Şekil 7.19 : Reaktif güç desteği eğrisi [24].

Bu koşullar doğrultusunda örnek sistemde Şekil 7.20’de verilen %5’lik bir gerilim değişimi için rüzgar santralının reaktif güç tepkisi incelenmiştir. Şekil 7.21’de görüleceği üzere gerilim azaldığına sisteme hızlıca %30 civarında reaktif güç desteği verilir. Tam tersi olarak gerilim yükselmesi durumunda sistemden yaklaşık %30 reaktif güç çekilir. Burada üretilen ve tüketilen reaktif güç değerleri Bölüm 7.3’de gösterilen santralin sahip olması gereken minimum reaktif güç kapasitesi $\pm 16,4$ MVar’a uygun çıkmıştır.

Farklı santral güçleri için bu analiz tekrarlandığında aynı sonuçlara ulaşılmıştır. Burada sağlanan reaktif güç desteği gerilim düşümünün boyutu ile ilgili olduğundan kurulu güç arttığında yine aynı grafik elde edilmiştir. Farklı rüzgar türbini tipine göre analiz yapıldığında şekildeki gibi farklılıklar meydana geldi. Frekans çeviricili reaktif güç üretme kabiliyetine sahip rüzgar türbinleri (DFIG ve PMSG) üretim sınırları dahilindeki gerilim değişimi için benzer tepkiler vermektedir. Sabit hızlı rüzgar türbininin ise böyle bir kabiliyeti olmadığı için herhangi bir reaktif güç desteği sağlayamadığından yardımcı ekipmanlar kullanılmalıdır.



Şekil 7.20 : Analiz edilen gerilim değişimi.



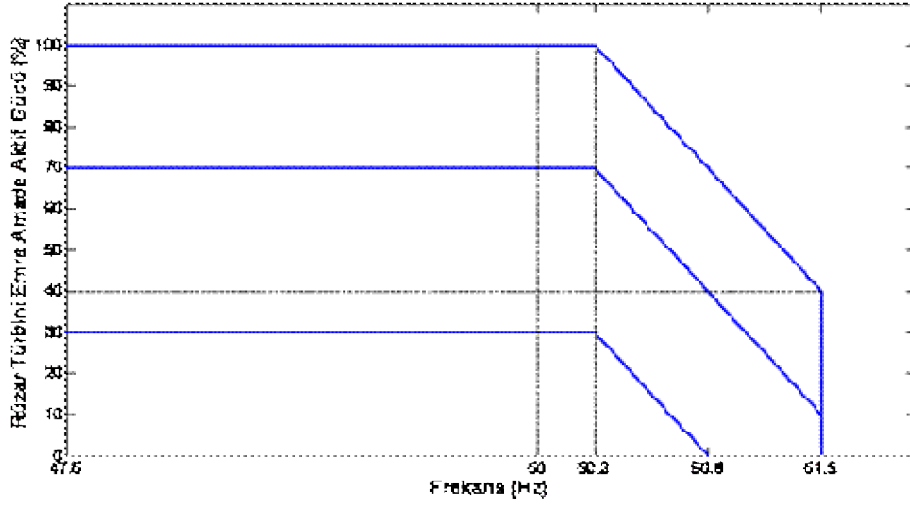
Şekil 7.21 : Analiz sonucu reaktif güç desteği.

7.6 Aktif Güç Kontrolü

İletim sistemine bağlı olan rüzgar santrallerinden aktif güç kontrolü yapması beklenir. Buna göre TEİAŞ tarafından gönderilen sinyaller ile rüzgar santralleri kurulu gücün %20 ile %100'ü arasındaki bir değerde üretim yapar. Frekans dengesini korumak için kurulu gücü 100 MW ve altında olan santraller dakikada en fazla %5 yük almalı veya atmalıdırlar. 100 MW'ın üzerinde olan santraller ise dakikada en fazla %4 yük almalı veya atmalıdırlar.

7.7 Frekans Tepkisi

Rüzgar santralleri diğer santraller gibi 49,8-50,2 Hz çalışma aralığını sağlamalıdırlar. Buna ek olarak 50,2 Hz'den yüksek şebeke frekanslarında sisteme ilave rüzgar türbini girmemelidir. Şekil 7.22'de belirtildiği üzere 47,5-50,3 Hz aralığında kurulu gücün tamamını üretilmeli, 50,3 Hz'den sonra yük atılmalı ve 51,5 Hz'den sonra rüzgar türbini tamamen devreden çıkmalıdır.



Şekil 7.22 : Rüzgar türbini güç frekans eğrisi [24].

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Teknolojideki gelişmelere paralel olarak günümüzde 135 metre kule yüksekliğinde, 126 metre rotor çapında ve 6 MW gücünde rüzgar türbinlerinin üretilebilmesiyle bir rüzgar türbininden yılda 20 milyon kWh enerji elde edilebilir hale gelmiştir. Bu gelişmenin sonucu olarak şebekeye bağlı çalışan rüzgar santrallerinin kurulu güçleri artmıştır. Güç sisteminde rüzgar gücü oranının artması şebeke üzerinde bir takım etkilere neden olmaktadır. Eskiden dağıtım sistemlerine bağlanan rüzgar santralleri üretim gücünün artmasıyla artık çoğunlukla iletim sistemlerine entegre olmaktadır. Dağıtım sistemine bağlı rüzgar santrallerinin şebekeye etkileri incelenirken gerilim kalitesi üzerine olan etkiler incelenmekteydi. Rüzgar santrallerinin iletim sistemine dahil olmasıyla güç sisteminin dengesinin korunması ön plana çıkmıştır.

Günümüz rüzgar türbinleri değişken hızlı ve transistör tabanlı frekans çeviricili olduğu için fliker ve harmonik gibi gerilim kalitesine olan etkiler azalmıştır. Ayrıca hem geçici hem kararlı durumda aktif ve reaktif güç kontrolü yapabilme yeteneğine sahiptirler. Mevcut standartlar bu koşullara göre düzeltilmiştir ve ülkeler iletim ve dağıtım sistemine bağlanacak rüzgar santrallerinin güç sistemine katkıda bulunması için şebeke yönetmelikleri çıkarmıştır. Rüzgar santralleri kurulmadan önce güç sistemi ile entegrasyonu incelenerek şebeke yönetmeliğine uygunluk analizi yapılmaktadır.

Bu çalışmada Trakya bölgesinde kurulacak olan Balabanlı Rüzgar Santrali Matlab programında incelenmiştir. İlk olarak yük akış analizi yapıp santralin tam güçte çalışmaya kadar ki bara gerilimleri incelenmiş ve \pm %5 sınır değerlerini aşmadığı görülmüştür. Santral gücünün arttırılması sonucunda çevre baralardaki yük akış yönleri değiştiği için iletim hatlarının yüklenme oranlarının kurulacak santral gücüne göre kontrol edilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

Şebeke yönetmeliğinde arıza durumunda rüzgar santrallerinin belli koşullarda sisteme bağlı kalması istenmektedir. Yapılan analizde tam ölçekli frekans çevirisine sahip olan sürekli mıknatıslı senkron jeneratörün (PMSG) ile santralin istenilen koşullarda sisteme bağlı kaldığı görülmüştür. Çift beslemeli asenkron jeneratörler

(DFIG) tam ölçekli frekans çeviricisine sahip olmadığı için reaktif güç performansı daha düşüktür ve yönetmeliği sağlamak için ek yazılım ve donanımlara ihtiyaç duymaktadırlar. Sabit hızlı rüzgar türbinleri ise yapılan analizlerde arıza esnasında şebekeden ayrılmıştır ancak bir STATCOM yardımıyla reaktif güç kontrolü sağlanıp şebekeye bağlı kalabildiği gözlemlenmiştir.

Yönetmeliğin bir diğer koşulu olan reaktif güç kapasitesinin incelenmesi için analizler yapılmıştır. Yönetmelikte istenilen kurulu gücün %33'ü kadar reaktif güç üretme veya tüketme şartı doğrultusunda rüzgar türbinlerinin çalışma sınırları içinde kalabildiği görülmüştür. Farklı santral güçlerinde analiz yapıldığında, santral gücünün 300 MW olması durumunda rüzgar türbinlerinin uç geriliminin maksimum değere geldiği için reaktif güç kapasitesi bakımından sınır değere ulaşıldığı anlaşılmıştır. Tam ölçekli olmayan rüzgar türbinlerinde ise şebeke yönetmeliğinin sağlanması için ilave ekipman kullanılması gerekmektedir.

Dinamik analizde reaktif güç desteği için rüzgar santralının 10'ar saniye boyunca %5 gerilim düşümü ve %5 gerilim artışına olan tepkisi incelenmiştir. PMSG ve DFIG'in yönetmelikte istenilen tepkiyi istenilen süre içinde verirken sabit hızlı rüzgar türbininin ise böyle bir yeteneği olmadığı için reaktif güç desteği veremediği görülmüştür. Yönetmeliği sağlamak için bu tip türbinler FACTS cihazları gibi ilave ekipmanlar ile donatılmalıdır.

Bu çalışmanın devamı olarak, ileride şebeke yönetmeliğinin mevcut santrallere uygulanma ihtimaline karşın şebeke yönetmeliğini sağlamakta zorlanan çift beslemeli ve sabit hızlı asenkron jeneratörlü mevcut santraller için gerekli reaktif güç kontrolünü sağlayabilecek uygun çözümler araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Global Wind Statistics.** (2013). Global Wind Energy Council (GWEC), Belgium.
- [2] **Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu.** (2013). Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB).
- [3] **Fox, B.,** et al. (2007). Wind Power Integration, IET Power and Energy Seris 50, London.
- [4] **Url-1** <<http://www.windpowermonthly.com/article/1138562/close---e126-worlds-biggest-turbine>>, alındığı tarih: 26.01.2014.
- [5] **Tong, W.** (2010). Wind Power Generation and Wind Turbine Design, WIT Press, Boston.
- [6] **Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E.** (2001). Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- [7] **Nelson, V.** (2009). Wind Energy, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton.
- [8] **Siemens AG.** (2012). Safety and Protection for Wind Turbines, Germany.
- [9] **Gasch, R., Twele, J.** (2012). Wind Power Plants, Springer, Berlin.
- [10] **Ackermann, T.** (2005). Güç Sistemlerinde Rüzgar, Çeviri: Ç. Özşar, 2009, EMO, Ankara.
- [11] **Mohd Zin, A.,** et al. (2013). Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [12] **Hansen, A.D., Michalke, G.** (2008). Multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbines' grid support capability in uninterrupted operation during grid faults, IET Renewable Power Generation.
- [13] **Kongnam, C., Nuchprayoon, S.** (2010). A Particle Swarm Optimization for Wind Energy Control Problem, Renewable Energy, Elsevier.
- [14] **IEC** (International Electrotechnical Commission). (2008). Measurement and Assesment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines, IEC 61400-21, IEC.
- [15] **Tande, J.O., Estanqueiro, A.I., Lopes, A.P.** (2007). Assesment of Power Quality Characteristics of Wind Farms.
- [16] **Abderrazzaq, M.H., Aloquili, O.** (2008). Evauating the Impact of Electrical Grid Connection on the Wind Turbine Performance for Hofa Wind Farm Scheme in Jordan, Energy Conversion and Management.
- [17] **Fadaeinedjad, R., Moschopoulos, G., Moallem, M.** (2007). Voltage Sag Impact on Wind Turbine Tower Vibration.

- [18] **Hansen, A.D., Cutululis, N.A., Sorensen, P., Iov, F.** (2006). Grid Integration Impacts on Wind Turbine Design and Development.
- [19] **Milano, F.** (2013). Power System Analysis Toolbox (PSAT), Versiyon 2.1.8.
- [20] **TEİAŞ.** (2012). Puant (Yaz) Yük Şartlarında Yük Akışı, Üç Faz ve Faz Toprak Kısa Devre Etüdü. TEİAŞ Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı.
- [21] **Wessels, C., Fuchs, F.W.** LVRT of DFIG Wind Turbines.
- [22] **Kanabar, M., Khaparde, S.** Rotor Speed Stability Analysis of a Constant Speed Wind Turbine Generator.
- [23] **Truong, T.H., Ro, K.S.** Improvement of LVRT Characteristic of SCIG Wind Turbine System by Incorporating PMSG.
- [24] **TEİAŞ.** (2013). Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği, Ek 18.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Berk RONA
Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 30.06.1988
Adres: Ataşehir/İstanbul
E-Posta: berk_rona@hotmail.com
Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği