

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

**RÜZGÂR SANTRALLERİNİN ŞEBEKE BAĞLANTI  
KRİTERLERİNİN İNCELENMESİ**

**MUHAMMED EMİN HACİBEKİROĞLU**

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

**DANIŞMAN  
YRD. DOÇ. DR. BEDRİ KEKEZOĞLU**

**İSTANBUL, 2015**

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

**RÜZGÂR SANTRALLERİNİN ŞEBEKE BAĞLANTI**  
**KRİTERLERİNİN İNCELENMESİ**

(Kabul yazısı yazılacak)

**Tez Danışmanı**

Yrd. Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Yrd. Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Evren İŞEN  
Kırlareli Üniversitesi

Bu tez, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2015-04-02-YL01 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

## ÖNSÖZ

---

Yüksek lisans eğitiminin son demlerinde beni akademik çalışmaya tekrar ısındıran, teşvik eden, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, güven veren çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Lisans eğitimi boyunca beni akademik çalışma yapmaya teşvik eden, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen Halit BEKİROĞLU abime; değerli dostlarım Halil İbrahim SAYGI, Emrehan YAVŞAN'a ve tüm değerli dostlarıma, anneme ve babama çok teşekkür ederim.

Her zaman sabır ile yanımda olan başka ufuklar açmaya çalışan eşime çok teşekkür ederim.

Mayıs, 2015

Muhammed Emin HACİBEKİROĞLU

## İÇİNDEKİLER

---

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ .....	x
ÖZET .....	xi
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	2
1.2 Özgün Değeri.....	6
1.3 Amaç.....	6
BÖLÜM 2	
RÜZGÂR ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ .....	7
BÖLÜM 3	
RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN ŞEBEKE BAĞLANTI KRİTERLERİ .....	15
3.1 Reaktif Güç Kontrolü .....	16
3.2 Frekans.....	18
3.3 Gerilim Aralığı .....	20
3.4 Aktif Güç Kontrolü.....	21
3.5 Rüzgâr Santrallerinin Arıza Sonrası Sisteme Katkısı .....	22
BÖLÜM 4	
UYGULAMA .....	25

## BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER .....	47
KAYNAKLAR .....	50
ÖZGEÇMİŞ .....	53

## SİMGE LİSTESİ

---

MW	Mega Watt
GW	Giga Watt
CO2	Karbondioksit
Ft	Fit
Hz	Herz

## KISALTMA LİSTESİ

---

TSO	İletim Sistemi Operatörleri
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
OPEC	Petrol İhraç Eden Ülkeler Birliği
PSASP	Güç Sistem Analizi Yazılım Paketi
DFIG	Çift Beslemeli Asenkron Generatör
FRT	Arıza Boyunca Çalışma



## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Toplam kurulu rüzgâr gücü kapasitesi.....	8
Şekil 2.2 Ülkelere göre kurulu rüzgâr güç kapasiteleri.....	9
Şekil 2.3 Türkiye’de yıllara ait toplam kurulu rüzgar güç gelişimi.....	10
Şekil 2.4 Türkiye’de işletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre yüzdesel dağılımı.....	10
Şekil 2.5 1.3 MW gücündeki rüzgâr türbininin içyapısı .....	12
Şekil 2.6 Yatay eksenli rüzgâr türbini .....	12
Şekil 2.7 Eğik eksenli rüzgâr türbini.....	13
Şekil 3.1 Rüzgâr santrallerinin reaktif güç eğrileri.....	17
Şekil 3.2 Frekans bağlı olarak aktif güç değişimi.....	21
Şekil 3.3 Rüzgâr santrallerinin arıza sonrası iletimde kalma süreleri.....	23
Şekil 4.1 Tek hat diyagramı.....	25
Şekil 4.2 DİgSilent modeli.....	26
Şekil 4.3 Frame Wind-Turbine blok diyagramı.....	30
Şekil 4.4 Blade angel control blok diyagramı.....	30
Şekil 4.5 Shaft model blok diyagramı.....	31
Şekil 4.6 Turbine model blok diyagramı.....	31
Şekil 4.7 Rüzgar santrallerinin arıza sonrası sisteme katkısı.....	32
Şekil 4.8 1.Durum kısa devre arızasında gerilim değişiklikleri.....	33
Şekil 4.9 2.Durum kısa devre arızasında gerilim değişiklikleri.....	34
Şekil 4.10 1.durum kısa devre arızasında generatör hızları.....	35
Şekil 4.11 2. Durum kısa devre arızasında generatör hızları.....	35
Şekil 4.12 Kısa devre arızasında gerilim değişiklikleri.....	36
Şekil 4.13 Arıza öncesinde aktif güç değişimleri.....	37
Şekil 4.14 2. Durum arıza esnasında 20MW’lık rüzgar santralinin aktif güç değişimi.....	38
Şekil 4.15 2. Durum arıza esnasında 40MW’lık rüzgar santralinin aktif güç değişimi.....	38
Şekil 4.16 Sistemde rüzgar türbini bulunmaması durumunda reaktif güç değişimi.....	39
Şekil 4.17 Sistemde 20MW’lık rüzgar santrali bulunması durumunda reaktif güç değişimi.....	39
Şekil 4.18 Rüzgâr santrali reaktif güç kapasite eğrisi.....	40
Şekil 4.19 Gerilim 0.85 p.u. iken rüzgâr santralin sisteme katkısı.....	41
Şekil 4.20 Gerilim 0.9 p.u. iken rüzgâr santralin sisteme katkısı.....	42
Şekil 4.21 Trafonun toplam aktif güç değişimi.....	45
Şekil 4.22 Trafonun toplam reaktif güç değişimi.....	46

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

	Sayfa
Çizelge 3.1 Ülkelere ait frekans değişimi generatör çalışma süreleri.....	19
Çizelge 3.2 İzin verilen gerilim aralıkları.....	20
Çizelge 4.1 Test sistemine ait generatör verileri.....	27
Çizelge 4.2 Test sistemine ait bara verileri.....	28
Çizelge 4.3 Rüzgâr türbini karakteristikleri.....	29
Çizelge 4.4 Generatör karakteristikleri.....	29
Çizelge 4.5 Minimum gerilime bağlı güç faktörü değişimleri.....	43
Çizelge 4.6 Maksimum gerilime bağlı güç faktörü değişimleri.....	43
Çizelge 4.7 Minimum gerilime bağlı güç faktörü değişimleri.....	44
Çizelge 4.8 Maksimum gerilime bağlı güç faktörü değişimleri.....	45

## RÜZGÂR SANTRALLERİNİN ŞEBEKE BAĞLANTI KRİTERLERİNİN İNCELENMESİ

Muhammed Emin HACİBEKİROĞLU

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU

Dünya nüfusunun, kentleşmenin ve sosyal hayattaki refah düzeyinin artması, sanayileşmenin hızlı bir gelişme göstermesi ve yeni teknolojilerin kullanıma sunduğu cihazların çeşitlenmesi gibi faktörler enerji kullanımını arttırmış ve buna bağlı olarak enerji sektörünü günümüzün en önemli sektörlerinden biri haline getirmiştir.

Günümüz şartlarında enerji üretiminde yoğun bir şekilde kullanılan fosil yakıtların çevreye zarar veren bileşenler üretmesi, yüksek maliyetli ve hızla tükenmekte olan kaynaklar olması gerçeği, insanları alternatif kaynaklar arayışı içine itmiş ve gelişen teknoloji ile beraber rüzgâr, güneş, su, jeotermal ve biyolojik kaynakları içeren yenilenebilir enerji kaynaklarına odaklanılmasına neden olmuştur. Bu kaynakları kullanan elektrik üretim tesisleri içerisinde rüzgâr enerjisi santralleri, düşük potansiyel riskler taşımaları, kurulum sürelerinin kısa oluşu ve yatırım maliyetlerinin diğer alternatiflere göre düşük olması sebebiyle dünya genelinde tercih edilmektedir. Rüzgâr enerjisinin kullanımının artışı ile birlikte rüzgâr türbinlerinin güç sistemleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi de önemli bir sorumluluk haline gelmiştir.

Gerçekleştirilen tez çalışmasında öncelikle ülkemizde rüzgâr türbinlerinin şebeke bağlantılarında dikkate alınması gereken kriterler irdelenmiş ve dünya üzerinde rüzgâr türbinlerinin şebeke bağlantılarında uygulanan kriterler ile karşılaştırılmıştır. Bunun

yanında örnek bir test sistemi üzerinde ÷lkemize ait Şebeke bağlantı kriterlerinin türbinlere uygunluğu analiz edilmiştir. IEEE 14 Baralı test sistemi DIgSilent PowerFactor yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Bu sistem üzerine yeni bir rüzgâr santralinin eklenmesi durumu incelenmiş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** DIgSILENT, Rüzgâr enerjisi, Şebeke bağlantı kriterleri

**INVESTIGATION OF WIND POWER PLANTS OF GRID  
CONNECTIONS CRITERIA**

Muhammed Emin HACIBEKİROĞLU

Department of Electrical Engineering  
MSc. Thesis

Adviser: Ass. Prof. Bedri KEKEZOĞLU

Factors such as; rapid increase of the world population, urbanization and accordingly the level of prosperity in social life, ultimate development of industrialization and diversification of gadgets which have been created by new technologies, have raised the energy usage thus energy sector has become one of the most important sector nowadays.

Under contemporary circumstances, fossil fuels which have been used intensively for producing energy have created components which are harmful for the environment. Moreover, their high cost and depletion of resources have triggered people for searching new sources. Thus, with the development of new technologies, (scientists) have focused on renewable energy sources which are based on wind, sunlight, water, geothermal and bio energy. Among the power plants which have used renewable sources, wind power plants have been preferred all around the world due to lower potential risk, shorter construction time and lower investment costs than other alternatives. With the increase of the usage of wind energy, it has become an important responsibility to analyze the effects of wind turbines on power systems.

In this thesis, primarily the criterions in Turkey which have to be considered at the grid connections of wind turbines have been demonstrated and have been compared with the criterions in the World. Moreover, the grid connection criterions in Turkey have been analyzed on a sample test system. IEEE 14 Busbar Test System has been modelled with DIgSilent PowerFactor software. Moreover, the state of adding a new wind plant to the same system has been studied and obtained results have been presented.

**Key Words:** DIgSILENT, Wind Energy, Network Connection Criterions

### GİRİŞ

Günümüz Dünyasının temel enerji kaynakları olan fosil yakıtlarının tükenmeye yüz tutmaları ve çevresel etkileri enerji üretiminde yeni yöntemlerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Bu amaç doğrultusunda sürekliliği bulunan ve çevre dostu olan enerji kaynaklarının kullanımına hız verilmiş ve yenilenebilir enerji kaynağı kavramı sıklıkla kullanılır duruma gelmiştir.

Rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, hidroelektrik enerji, jeotermal enerji vb. yenilenebilir enerji kaynakları temiz, sürekli, ucuz ve çevreci elektrik sunmaktadır. Bilimsel araştırmalar güneş ve rüzgâr enerjisinin en temiz ve birim maliyet fiyatı en uygun elektrik enerjisi sunduğunu göstermektedir.

Diğer enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında rüzgâr enerjisi ucuz, tamamen çevreci ve bakım-onarım maliyetleri en düşük olan enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Yayınlanan verilere göre dünyanın elektrik enerjisinin üretiminde rüzgâr santrallerinin payı yaklaşık olarak %0,1'dir. Bilimsel araştırmalar 2020 yılında dünyanın elektrik enerjisinin yaklaşık olarak %10'nun rüzgar türbinlerinden üretileceğini öngörmektedir.

Rüzgâr türbinlerinin en önemli avantajları aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır:

- ✓ Rüzgâr santralleri elektrik şebekelerinin mevcut olmadığı üretim ve şehir merkezlerinden uzak bölgelerde elektrik enerjisi üretimine uygundur.
- ✓ Rüzgâr türbinlerini işletmeye almak ve kullanmak üç ay gibi kısa bir sürede mümkün olabilmektedir.
- ✓ Rüzgâr türbinleri sık sık bakım masrafları veya bakım personeli istihdamını gerektirmezler.

- ✓ Karbon emisyonunda bulunmazlar. Çevreci enerji üretim sistemleridir.
- ✓ Birim enerji maliyetleri konvansiyonel sistem ile rekabet edebilecek durumdadır.
- ✓ Teknolojik yapıya uygun sistemlerdir.

Rüzgâr santralleri avantajlarının yanında önemli dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Bunların başında enerji üretiminin rüzgar rejimine bağlı olması gelmektedir. Bu nedenle rüzgar türbinlerinden sürekli nominal güç çıkışı elde edilememektedir. Bunun yanında rüzgar türbinlerinin teorik verimi maksimum 0,59 oranında olabilmekte, başka bir deyişle rüzgar potansiyelinde 0,59 oranından daha az yararlanılabilmektedir. Ayrıca türbinde meydana gelen gürültü rahatsız edici en önemli faktördür. Ani bir rüzgâr gürültüsü probleminden kurtulmak için rüzgâr santrallerinin yerleşim bölgelerinden, okullardan, ticari binalardan uzak yerlere kurulması gerekmektedir. Bunun dışında yerden yüksekliği 350 ft'den az olan rüzgâr türbinlerinin kanatlarının özellikle göçmen kuşların uçuşlarında tehlike oluşturduğu bilinmektedir.

Rüzgâr türbinlerinin kurulum maliyetleri yer seçimine, kule yüksekliğine ve çıkış gücüne bağlı olarak değişmektedir. Türbin maliyetleri gelişen teknoloji ile azalmaktadır. Bunun yanında türbin gücündeki artış da santral çıkışında elde edilecek birim enerji maliyetinin azalmasına yol açmakta, başka bir deyişle türbin maliyeti gücü ile doğrusal orantılı olarak artmamaktadır.

Rüzgar türbinlerinin optimum verimle çalışabilmesi için benzersiz kurulum özelliklerine sahip olmalıdır. Bu kurulum sınırlamaları dezavantaj olarak görülmemelidir. Rüzgâr türbin kurulumcuları ve tasarımcıları rüzgâr türbininin yerini ve orada oluşan rüzgâr şartlarını iyi gözden geçirmelidirler. Bu tasarımcılar rüzgar türbinlerinin optimum parametrelerde, güvenilir ve verimli çalışabilmesi için rotor çapına, türbinler arası mesafeye, türbin yüksekliklerine ve kule yapısına dikkat etmelidirler [1].

### **1.1 Literatür Özeti**

Bu tez kapsamında yapılacak çalışmalar ile ilgili literatürde gerçekleştirilmiş başlıca bilimsel çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.



LIPNICKI ve JARZYNA (2012) yaptıkları çalışmada rüzgâr santrallerinin şebeke grid – code’lerini aktif güç, reaktif güç ve arıza sonrası sisteme katkısı bakımından incelemiştir. Belirtilen standartlar arasında Polonya, Almanya, Danimarka ve bazı hususlarda İngiltere ve Norveç’ten bahsedilmiştir. Polonya grid – code’leri referans alınarak ülkeler arasındaki farklılıklar incelenmiştir [2].

CHRISTIANSEN ve JOHNSEN (2006) tarafından yapılan çalışma rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlantı gerekliliklerini içermektedir. Kanada, Danimarka, İrlanda, Almanya, İskoçya ve İngiltere’ye ait şebeke grid – code’leri statik analiz ve dinamik analiz açısından karşılaştırılıp analiz edilmiştir. Statik analiz kısmında yük akışı üzerinde durulmuştur. Dinamik analiz kısmında arıza sonrası rüzgâr türbinlerinin iletimde kalma özellikleri incelenmiştir [3].

ZHAO, ZHU, JIANG, QIAN, ZHANG ve ZHAO [2013] çalışmalarında rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlanmasında en çok kullanılan DIGSILENT ve PSASP yazılım programları kullanılmıştır. Bu iki yazılım programlarının simülasyonlarının karşılaştırılması belirlenen bir güç sistemi için incelenmiştir. Simülasyon sonuçları DİGSİLENT ve PSASP yazılım programlarının eşdeğer olduğunu göstermiştir [4].

ARMENAKIS (2012) çalışmasında rüzgar santrallerinin şebekeye uyumluluk analizini Kıbrıs’ta lokal bir yerde kurulu bulunan rüzgar santrallerinin sisteme alınmasını DIGSILENT yazılım programıyla aracılığıyla gerçekleştirmiştir. Bahsedilen sistemde enerji akışı, frekans değişimi, arıza durumu, statik-dinamik gerilim stabilizesi, aktif güç ve reaktif güç değişimleri farklı senaryolar uygulanarak incelenmiştir [5].

HASSEN, JAUCH, SORENSEN, LOV ve BLAABJERG (2003) tarafından yapılan çalışma rüzgâr türbinlerinin modellenmesini hem bu sistemde kullanılan cihazların hem de sistemin modellenmesini içermektedir. Bu çalışmada şebekeye bağlı olan rüzgâr türbinlerinin elektriksel bileşenleri generatörler, transformatörler ve konverterlerin DIGSILENT kullanılarak nasıl modelleneceği gösterilmiştir. Ardından asenkron generatör ve çift beslemeli generatör modelleri kullanılarak rüzgâr santrallerinin güç kalitesi, kontrol stratejileri DIGSILENT yazılım programı aracılığıyla incelenmiştir [6].

SANNA USKI - JOUTSENVUO ve SISU NISKANEN (2013) çalışmalarında sabit hızlı rüzgar türbini, çift beslemeli rüzgar türbini ve güç dönüştürücüleri gibi türbin çeşitleri kendi

aralarında bazı farklılıkları olan PSS/E, DIgSILENT ve PSCAD yazılım programları kullanılarak güç sistemleri incelenmiştir [7-8].

SOURKOUNIS, TOUROU (2012) çalışmalarında bazı Avrupa ülkelerinde rüzgar enerjisinin şebekeye entegre edilmesinde gerekli olan şebeke grid – codelerinin ana kriterlerini ve rüzgar enerjisinin güç sistemlerine olan etkilerini incelemiştir. Bu ülkelerin şebeke grid – codelerinin gereksinimleri analiz edilip karşılaştırılmış ve farklı rüzgâr türbin modellerinin bu gereklilikleri karşılayabilmesi incelenmiştir. Arıza boyunca alçak gerilimde çalışma, rüzgâr türbinlerinin dinamik performansının en önemli gerekliliklerinden biridir. Şebeke arızalarının neden olduğu gerilim düşümlerinde rüzgâr türbinlerinin davranışları simülasyonlar yapılarak belirtilmiştir. Arıza boyunca rüzgâr türbinlerinin alçak gerilimde çalışma performansları geliştirilmiştir [9].

MACHADO ve ARIAS (2006) tezinde ABD, İsveç, Danimarka, Almanya, Yeni Zelanda, Güney Afrika ve Hindistan ülkelerinde farklı şebeke grid – codelerinin araştırılmasını içermektedir. Sonuç olarak bir şebeke grid – codenin içermesi gereken optimal gereklilikler sunulmuştur [10].

GOMES, MARTINS, ZANI, CESAR, SARDINHA ve SERGIO (2009) çalışmalarında son yıllarda Brezilyada elektrik dağıtım şebekesinde rüzgâr enerjisinin katkısının artması gösterilmiş ve dünyadaki bazı ülkeler ile karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca Gerilim veya frekans düşümlerinde güç sistemlerinin daha güvenli nasıl çalışacağı yönünde bazı öneriler sunulmuştur. Brezilya güç sistemlerinin şebeke grid - codelerinin minimum gerekliliklerinden bahsedilmiştir [11].

TSILI ve PAPATHANASSIOU (2008) çalışmalarında yüksek gerilim iletim sistemlerine rüzgâr santrallerinin bağlanmasında gerekli olan teknik düzenlemelerden bahsedilmiştir. Ayrıca aktif ve reaktif güç düzenlemeleri, gerilim - frekans çalışma aralıkları ve şebeke arızaları boyunca rüzgâr santrallerinin performansları incelenmiştir. Şebeke grid – codelere uyumluluğunun gerçekleştirilebilmesi için rüzgâr türbin üreticilerinin çözüm önerileri sunulmuştur [12].

SMITH (2010) çalışmasında Danimarka'da üretilen elektriğin %20'si rüzgâr enerjisinden elde edilirken bu oranın % 50'lere çıkarılması durumunda böyle bir artışın sürdürülebilir olup olmadığını incelemektedir [13].

JAUCH, MATEVOSYAN, ACKERMANN, BOLIK (2005) çalışmalarında rüzgâr santrallerinin güç sistemlerine bağlanmasında gerekli olan düzenlemeler Danimarka, İsviçre, Almanya, İskoçya ve İrlanda ülkeleri için incelenmiştir. Bu incelemeler ülkeler arasında rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlanmasındaki düzenlemelerin önemli ölçüde farklı olduğunu göstermiştir. Bu da her ülkenin güç sisteminin kendine has özellikleri olduğunu ispatlamıştır. Genellikle termik santralleri için oluşturulan grid –code lerin rüzgâr santralleri için tekrar gözden geçirilmesi gerektiğini tekrar gözler önüne sermiştir [14].

ALTIN, GÖKSU, TEODORESCU, RODRIGUEZ, JENSEN, HELLE (2010) çalışmalarında rüzgar santrallerinin şebekeye enerji verilmesindeki payı artarken güç sistemlerinin stabilitesi ve güvenilirliğinin sürdürülmesi için ülkeler tarafından yayınlanan grid – code'lerin tekrar tekrar yenilenmesi gerektiği belirtilmiştir. Buna bağlı olarak ülkelerin grid – codeleri karşılaştırılıp analiz edilmiştir. Rüzgar enerjisinin katkısını daha da artırmak için farklı grid – codeler harmanlanıp optimal grid – code belirtilmiştir [15].

GASHI, KABASHI, KABASHI, AHMETAJ, VELIU (2012) çalışmalarında Kosova güç sisteminin şebeke grid - code gerekliliklerini modellenen rüzgar enerjisi projesini PSS/E yazılım programı ile simülasyon yaparak incelemiştir. Bu simülasyonda reaktif güç yeteneği, frekans aralığı ve arıza sonrası rüzgâr santrallerinin katkısı (FRT) incelenmiştir. Daha sonra grid – codeler senkron generatörler için oluşturulmuşken rüzgar enerjisinin şebekeye katkısının artmasıyla yeni grid – codelerin oluşturulması gerektiği belirtilmiştir [16].

SINGH ve SINGH (2005) çalışmalarında rüzgâr enerjisi sektörünün gelişmesi ve güç sistemlerinin kontrolünün artmasıyla rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlanmasının önemli bir konu olduğu vurgulandıktan sonra bu konu ile alakalı farklı ülkelere ait bazı yaklaşımlar denenerek rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlanmasında karşılaşılan zorluklar analiz edilmiştir [17].

WANG, CHEN, YU, FOLEY, ZHU, LI ve YU (2015) çalışmalarında rüzgâr enerjisinin güç sistemlerindeki payının büyük olduğu ülkelerden biri olan Çin’de herhangi bir arıza anında rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlanma durumlarının esnekliği incelenmiştir. Digsilent yazılım programı ile yapılan simülasyonlar sonucunda elde verilerde yapılan çalışmaların rüzgâr enerjisindeki kayıpları azalttığı gibi rüzgâr santrallerinin arıza sonrası sisteme katkısını arttırdığı sonucuna da ulaşılmıştır [18].

MAINA ve SAULO (2015) çalışmalarında rüzgâr enerjisinin üretilmesinde kullanılan generatör çeşitleri termik ve hidroelektrik santrallerinde kullanılan generatörlerden farklı olduğu belirtildikten sonra rüzgâr enerjisinin karmaşık yapısının aynı zamanda generatör çıkışından elde edilen enerjinin kontrol edilmesini de zorlaştırdığı gözönüne alınarak güç sistemlerinde yüksek hızlı rüzgâr türbinlerinin kullanılmasının dağıtım şebekelerine olan etkileri incelenmiştir [19].

MEEGAHAPOLA, LITTLER ve PERERA (2013) çalışmalarında modern elektrik şebekelerinde iletilen enerjinin artmasından dolayı reaktif gücün öneminin arttığı belirtildikten sonra dinamik çalışma şartları ve geçici arızalar boyunca şebeke geriliminin profiline DFIG generatörlü rüzgâr santrallerinin etkisi incelenmiştir [20].

## **1.2 Özgün Değeri**

İlk olarak ülkemizdeki şebeke bağlantı kriterleri irdelenmiş ve dünya üzerinde kullanılan farklı bağlantı kriterleri ile kıyaslanmıştır. Bunun yanında söz konusu kriterlerin analiz edilebilmesi amacıyla DlgSilent PowerFactory yazılımı yardımıyla oluşturulan test sistemi üzerinde mevcut tüm kriterler oluşturulan senaryolar dahilinde incelenmiştir. Böylece daha sonra gerçekleştirilecek çalışmalar için temel oluşturulması amaçlanmaktadır.

## **1.3 Amaç**

Gerçekleştirilecek bu tez kapsamında rüzgar türbinlerinin şebeke bağlantılarında karşılaşılan problemler ortaya konulacaktır. Bu kapsamda ülkemizde mevcut bulunan bağlantı kriterleri dünya üzerindeki eş değerleri ile kıyaslanacak ve farklılıklar irdelenecektir. Böylece ülkemizdeki şebeke bağlantı kriterlerinin olgunlaştırılması hedeflenmektedir.

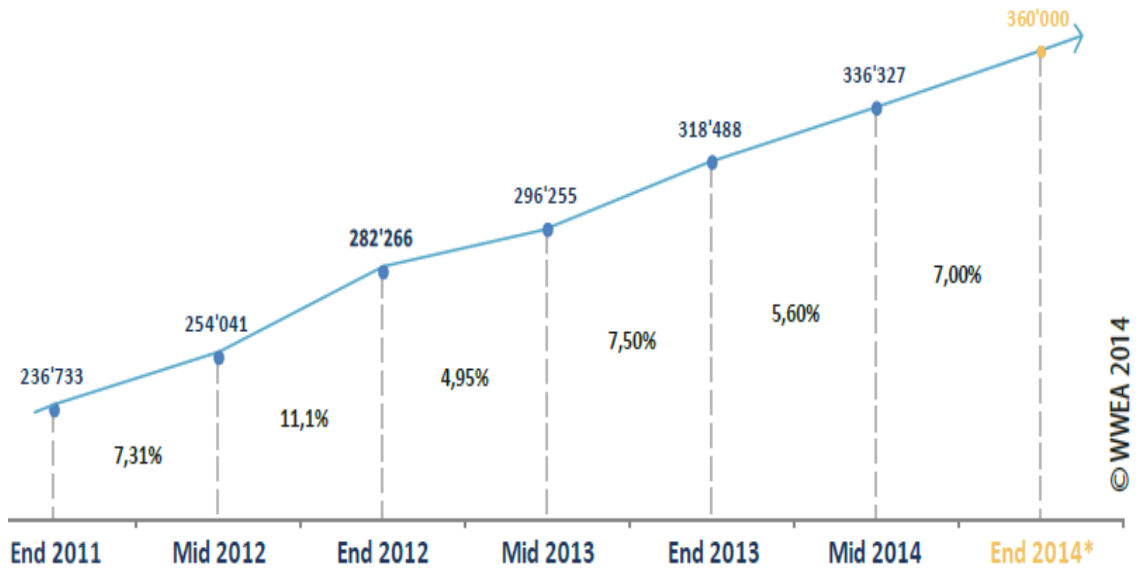
### RÜZGÂR ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ

Gelişen teknolojiye bağlı olarak insanların elektrik enerjisine olan ihtiyaçları da her geçen gün artmaktadır. Elektrik enerjisi üretiminde kullanılan mevcut fosil kaynakların sınırlı olması, giderek azalmaları ve gelecekte tükenecek olmaları nedeniyle bir yandan elektrik enerjisi tasarruf çalışmaları sürdürülürken diğer taraftan da yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak elektrik enerjisi üretilmesi hususunda çalışmalar büyük bir hızla devam etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretiminde kullanılması için yapılan çalışmalar, enerji konusunda dışa olan bağımlılığı da azaltmasından dolayı, ülkelerin geleceği için büyük bir öneme sahiptir. Bu kapsamda yürütülen çalışmaların başında rüzgâr potansiyellerinin kullanılmasıyla elektrik enerjisi üretilmesi gelmektedir.

Rüzgâr enerjisi yerli, dışa bağımlı olmayan, doğal ve tükenmeyen, gelecekte de aynı oranda temin edilebilecek, asit yağmurlarına ve atmosferik ısınmaya yol açmayan, CO<sub>2</sub> emisyonu olmayan, doğal bitki örtüsü ve insan sağlığına olumsuz etkisi bulunmayan, fosil yakıt tasarrufu sağlayan, radyoaktif etkisi olmayan, teknolojik gelişimi hızlı bir enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca kısa sürede devreye alınabilmekte ve kısa sürede devreden çıkarılabilmektedir. Bunun yanısıra istihdam olanağına sahiptir ve fiyat artma riski yoktur [21-22].

Rüzgâr enerjisi pazarındaki olumlu gelişmelerle beraber rüzgâr enerjisinin ekonomik avantajları, diğer enerji kaynaklarına nazaran rekabetsiz büyük bir artışı gerçekleştirmiştir.

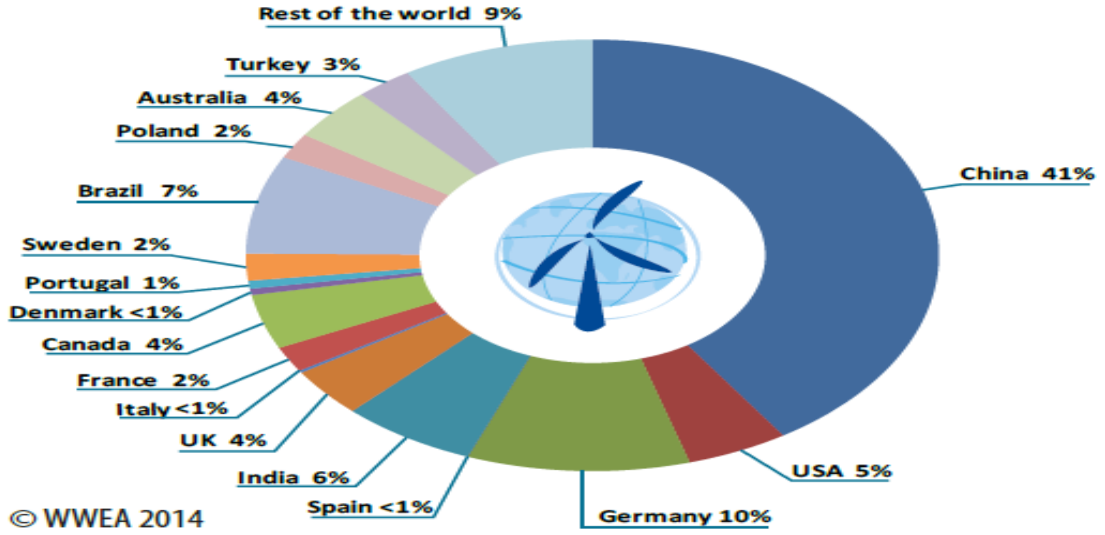
Dünyanın kurulu rüzgâr gücü kapasitesi 2014 yılının ilk altı ayında eklenen 17.613 MW'lık güç ile toplam 336.327 GW'a ulaşmıştır. 2012 ve 2013 yıllarındaki artışlar ise sırasıyla 16.4 GW ve 13.9 GW olduğu gözönüne alınırsa bu artışın oldukça büyük olduğu gözlemlenmektedir [23].



Şekil 2. 1 Toplam kurulu rüzgâr gücü kapasitesi

Şekil 2.1' de yıllara göre dünyadaki kurulu rüzgâr gücünün kümülatif toplamı gösterilmektedir. Toplam kurulu gücü başlıca 121 GW ile Avrupa, 116 GW ile Asya ve 71 GW ile Kuzey Amerika oluşturmaktadır. 2020 yılına gelindiğinde dünyadaki toplam enerji üretiminin % 12'sinin rüzgâr enerjisinden karşılanması beklenmektedir.

Şekil 2.2'de ülkelerin rüzgâr enerjisi kullanım oranları gösterilmiştir [24].

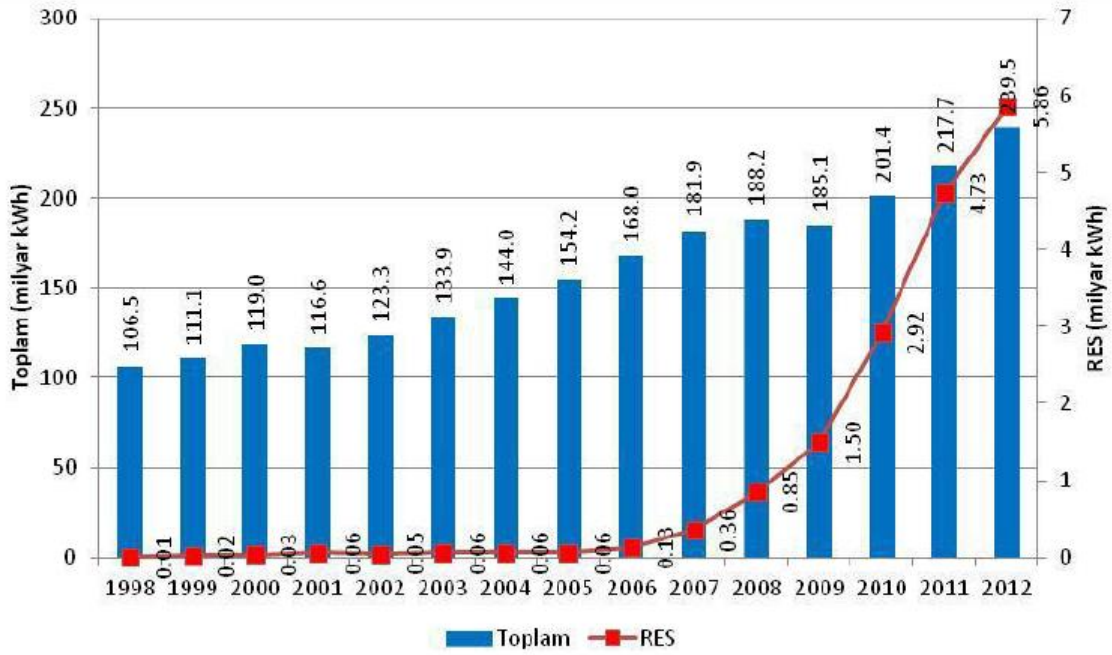


Şekil 2. 2 Ülkelere göre kurulu rüzgâr güç kapasiteleri

Buna göre Çin, ABD, Almanya, İspanya ve Hindistan dünyanın toplam kurulu rüzgâr gücü kapasitesinin yaklaşık olarak %72'sine sahiptirler. Çin rüzgâr gücü kapasitesinde 7,1 GW'lık büyük bir artış sağlayarak 2014 Temmuz itibari ile toplam kurulu rüzgâr güç kapasitesini 98 GW'a çıkarmıştır. Almanya'da ise bakılacak olursa ilk yarıyıl içerisinde 1,8 GW'lık kapasite artışına rağmen yenilenebilir enerji yasalarındaki katı kurallardan dolayı önümüzdeki yıllarda bu artışın azalacağı beklenmektedir [24].

Ülkemizde rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında sahip olduğu potansiyel ile gelişime en açık enerji üretim kaynağıdır. Türkiye 48 GW'lık (38 GW kara ve 10 GW deniz) rüzgâr potansiyeli ile birçok Avrupa ülkesinden daha yüksek bir potansiyele sahip olmasına rağmen rüzgâr kurulu gücümüz bu ülkelerin çok gerisinde kalmaktadır.

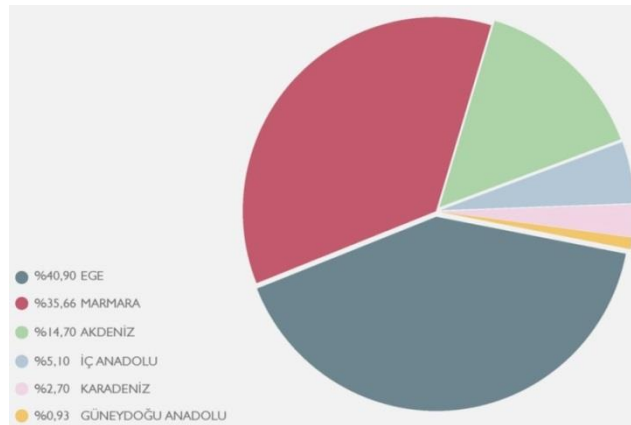
Şekil 2.3' de ülkemizin yıllara göre toplam kurulu rüzgâr gücü gelişimi grafiği verilmiştir [25].



Şekil 2.3 Türkiye’de yıllara ait toplam kurulu rüzgâr güç gelişimi

İlk olarak 1998 yıllarında yapımına başlanan rüzgâr santrallerinin kurulu gücü çok düşük seviyelerde iken 2000’li yıllara gelindiğinde bu tablo ciddi bir artış göstermesine rağmen beklenen seviyede olmamıştır. Son yıllarda yenilenebilir enerji konusundaki yasalarla toplam kurulu rüzgâr gücü önemli bir artış gösterip Ağustos 2012 itibariyle, Türkiye rüzgâr enerjisi kurulu gücü 57.072 MW ve toplam kurulu güç içindeki payı %2,4 olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 2.4’de ülkemizdeki toplam rüzgar kurulu gücünün bölgelere göre dağılımları gösterilmiştir [25].



Şekil 2.4 Türkiye’de işletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre yüzdesel dağılımı



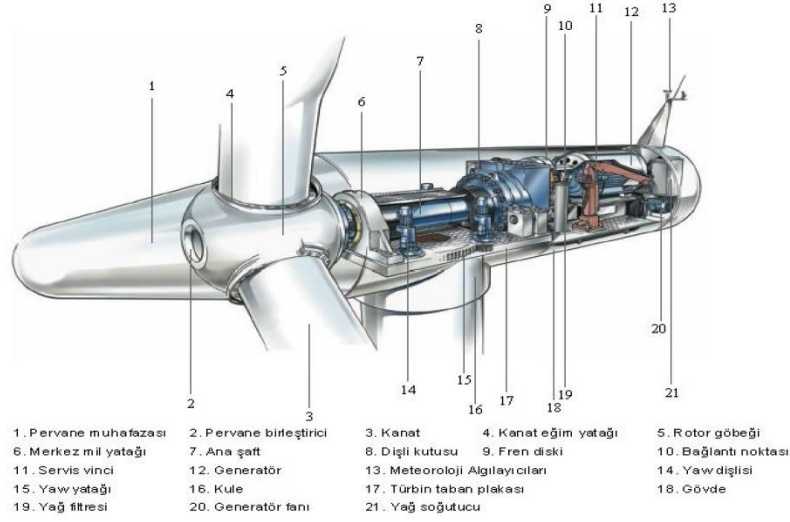
Türkiye’de bulunan rüzgâr santrallerinin büyük bir çoğunluğu şekilden de görüleceği üzere Ege ve Marmara bölgelerinde toplanmıştır. İşletmede olan rüzgâr santralleri yüzdelere bakıldığında yaklaşık olarak %40 civarı ile Ege bölgesi birinci sıradayken Güneydoğu Anadolu bölgesi yaklaşık olarak %1 ile son sıradadır [25].

Yukarıdaki istatistiksel bilgilerden de anlaşılacağı üzere şebekeye bağlı rüzgâr enerji sistemlerinde ciddi bir artışın olduğu aşikârdır. Bu artışla beraberinde enerji sistemlerinde de etkilere yolaçmaktadır. Rüzgar enerjisini etkin kullanan ülkeler iletim sistemine bağlı büyük güçlü rüzgâr santrallerinin şebeke bağlantısına ait özel kriterler tanımlamışlardır. Bu durum rüzgâr enerji sistemlerinin şebeke üzerindeki bozucu etkilerini azalttığı gibi türbin teknolojisinin gelişimi açısından da önemli katkılar sağlamıştır.

Güç sisteminin herhangi bir noktasında meydana gelebilecek arıza bir ya da daha fazla fazda gerilim düşümünün yaşanması sonucunu doğurabilmektedir. Söz konusu gerilim düşümü şebekenin arızayı temizle yeteneğine bağlı olarak belirli bir zaman periyodu dahilinde görülür. Büyük güçlü rüzgâr türbinlerinin şebeke bağlantılarında sistem üzerinde oluşabilecek arıza durumlarının karakteristiklerinin analiz edilmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir.

## **2.1 Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması**

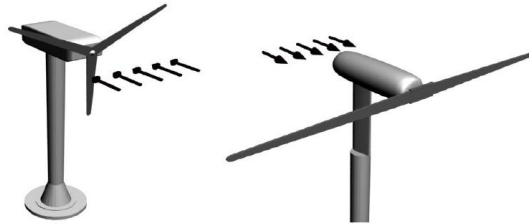
Rüzgâr türbinlerinin genel bir tanımı yapılacak olursa; rüzgâr türbinleri rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da bu mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemler olarak açıklanabilir. Bir rüzgâr türbini genel olarak kule, generatör, rotor göbeği, hız dönüştürücüleri(dişli kutusu), yaw yatağı, elektrik-elektronik elemanlar ve pervaneden oluşur. Rüzgârın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Rotor milinin devir hareketi hızlandırılarak gövdedeki generatöre aktarılır. Generatörden elde edilen bu elektrik enerjisi iletim ve dağıtım hatları ile gerekli yerlere ulaştırılır. Aşağıdaki şekilde örnek bir rüzgâr türbininin içyapısı gösterilmiştir.



Şekil 2. 5 1.3MW gücündeki rüzgâr türbininin içyapısı

Rüzgâr türbinleri rotor dönüş eksenlerine göre yatay eksenli ve düşey eksenli olmak üzere 2 gruba ayrılırlar. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan rüzgâr türbinleri yatay eksenli rüzgâr türbinleridir.

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde; dönme eksenini rüzgâr yönüne paralel, kanatlar rüzgâr yönüne dik olarak tasarlanmıştır. Generatör ve dişli kutusu kule üzerine yerleştirildiği için türbinin daha yukarılara kaldırılması maliyetlidir. Buna karşın diğer türbin çeşitlerine göre verimi daha yüksektir. Aşağıdaki şekilde yatay eksenli rüzgâr türbinleri görülmektedir. En fazla kullanılan rüzgâr türbin çeşididir.



Şekil 2. 6 Yatay eksenli rüzgâr türbini

Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde, dönme eksenleri rüzgâr yönüne dik ve düşey olan bu türbinlerin kanatları da düşeydedir. İlk harekete başlamaları motor yardımıyla sağlanır ve bu işlem güvenilir değildir. Bu türbinlerin generatör ve vites kutusu toprak seviyesinde kurulabildiğinden kuleye gerek duymazlar. Bu yüzden düşük rüzgâr hızlarında çalıştılarından dolayı 'Yaw' mekanizmasına ihtiyaçları yoktur. Verimleri

düşük olup elde edilen enerji toprak seviyesinde üretildiği için iletilmesi daha kolaydır. Aşağıdaki şekilde düşey eksenli rüzgâr türbinleri uygulamaları görülmektedir [26].



Şekil 2. 7 Düşey eksenli rüzgâr türbini

## 2.2 Rüzgâr Türbinlerinde Güç

Bir rüzgar türbinine ait güç çıkışı türbin girişinde rüzgarın sahip olduğu kinetik enerji ile doğrudan orantılıdır. Temel olarak türbin üzerinde rüzgar kinetik enerjisinin bir kısmı absorbe edilir ve mekanik enerjiye dönüştürülür.  $v$  hızı ile hareket eden kütlesi  $m$  olan havaya ait kinetik enerji ifadesi Eşitlik 2.1’de gösterilmiştir.

$$E_{kinetik} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

Güç birim zamanda elde edilen enerji olarak tanımlanmaktadır. Buna göre türbin kanatlarının süpürdüğü alan dahilinde bulunan rüzgara ait güç Eşitlik 2.2 ile ifade edilebilmektedir.

$$P_w = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.2)$$

Burada  $P_w$  rüzgâr gücü,  $A$  süpürme alanı,  $v$  rüzgar hızını ve  $\rho$   $kg/m^3$  cinsinden hava yoğunluğunu göstermektedir. Türbin girişindeki rüzgar gücü belirli bir oranda mekanik gücü çevrilebilmektedir. Bu oran güç katsayısı olarak adlandırılır. Teorik olarak güç katsayısı 0,59 değeri olan Betz limitini aşmamaktadır. Buna göre bir rüzgar türbinine ait mekanik güç Eşitlik 2.3 ile elde edilmektedir.

$$P_w = \frac{1}{2}\rho Av^3 C_p \quad (2.3)$$

Rüzgâr enerjisi, rüzgâr hızının küpü ile orantılı olduğundan dolayı rüzgâr hızının en küçük artışının bile ekonomik etkisi önemli olabilmektedir. Daha yükseklere çıktıkça havanın sürtünmesi de rüzgâr hızında etkili olduğu için yeryüzünün rüzgâr hızının yüksekliğe bağlı değişimi;

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \left(\frac{H}{H_0}\right)^a \quad (2.4)$$

formülü ile elde edilir.

Rüzgâr enerjisi rüzgâr hızının küpü ile orantılı olarak değiştiğinden dolayı yukarıda belirtilen formül;

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{1/2\sigma Av^3}{1/2\sigma Av_0^3}\right) = \left(\frac{v}{v_0}\right)^3 = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{3a} \quad (2.5)$$

yüksekliğe bağlı olarak bu şekilde de gösterilebilir [27].

### RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN ŞEBEKE BAĞLANTI KRİTERLERİ

Elektrik üretiminde kullanılan ekipmanların farklılığı ve üretimdeki rekabetin artması ile generatörlerin şebekeye bağlanması için gerekli teknik düzenlemelerin yapılması zorunlu hale getirmiştir. Bu düzenlemeler güç sistemlerinin ekonomik, güvenli ve kesintisiz çalışmasını sağlamaktadır. Genellikle Şebeke Bağlantı Kriterleri (Grid-Code) olarak bilinen bu düzenlemeler teknik yasaların önemli bir parçasını oluşturur [28].

Özellikle son on yıl içerisinde, ülkelerdeki rüzgâr santrallerinin sayısının ve enerji kapasitesinin artmasıyla birlikte söz konusu düzenlemelere de hız verilmiştir [29].

Rüzgâr santrallerinden enerji elde ederken şebeke performansının güvenilir olması için iletim sistemi operatörleri (TSO) kendi şebeke bağlantı kriterlerini yeniden düzenlemek zorundadırlar. Çünkü rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlanması bazı özel düzenlemeleri gerektirmektedir. Bu düzenlemeler ülkeler arasında farklılık göstermekte ve genellikle ülkelerin rüzgâr enerjisi kapasitesinin yanı sıra bölgesel veya ulusal güç ağına bağlı olarak değişmektedir.

Rüzgâr enerji üretim sistemlerinin şebeke üzerinde kullanımının artması ile birlikte, sistem üzerinde frekans regülasyonu-kontrolü, reaktif güç ve gerilim kontrolü gibi şebeke verilerinin kontrolünün de rüzgâr santralleri tarafından yapılması gerekmektedir [30]. Şebeke bağlantı kriterleri belirlenirken bu durumda göz önüne alınmaktadır.

Aşağıda sırası ile ülkemizdeki şebeke bağlantı kriterleri sunulmuş ve benzerleri ile kıyaslanmıştır.

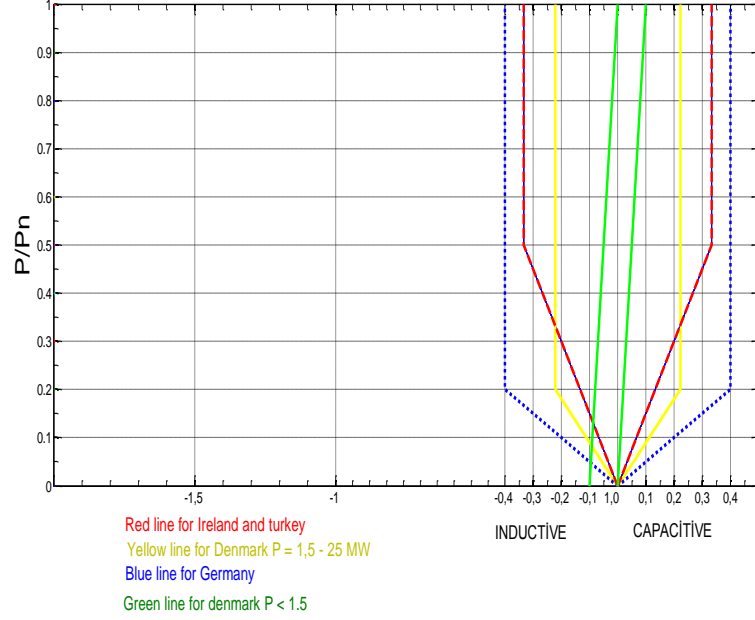
### **3.1 Reaktif Güç Kontrolü**

Şebekelerde rüzgâr enerjisinin katkısının artmasından dolayı rüzgâr santrallerinin şebekede reaktif güç değişimini de sağlaması gerekmektedir. Rüzgâr santrallerinin enerji üretimi yanında reaktif güç kontrolü taleplerini de yerine getirebilmesi istenmektedir. Güç sistemlerinde reaktif güç üretimi kararlı gerilimin oluşmasına yardımcı olur. Bir güç sisteminde gerilim seviyesinin belirli sınır değerler içerisinde hareket etmesi istenmektedir. Çünkü tüketiciler ve onların kullandığı elektriksel aygıtların belirli gerilim seviyeleri arasında çalışabilecek şekilde tasarlanmışlardır. Güç sistemlerinde konvansiyonel santrallerin gerilim regülasyonuna yaptıkları katkının aynısı rüzgâr santrallerinden de beklenmektedir. Rüzgâr santrallerinin gerilim seviyelerini kontrol edebilmeleri için reaktif gücü üretebilme veya absorbe edebilme yeteneklerine sahip olmalıdır. Gerilim seviyesinde meydana gelen herhangi bir artışta şebekeden reaktif gücü absorbe edebilmeli ve gerilim seviyesinin düşümünde ise reaktif gücü sisteme enjekte edebilmelidir. Yani rüzgâr santralleri gerilimde meydana gelen herhangi bir dalgalanmada reaktif gücü kontrol edebilme yeteneğine sahip olmalıdır.

Reaktif güç kontrolü her şebekenin karakteristiği ile alakalıdır. Çünkü gerilim seviyesinin reaktif güce etkisi o şebekenin empadansı ve kısa devre kapasitesine bağlıdır. Bundan dolayı rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlantı noktasında gerilim, güç faktörü ve reaktif güç değerleri için belirli sınır değerlerinin tanımlanması istenmektedir. Rüzgâr santrallerinin uzak bölgelere kurulması ve buna bağlı olarak reaktif gücün uzak bölgelere taşınması güç kayıplarına yol açtığından dolayı reaktif güç kontrolü önemli bir konudur [31].

Reaktif güç çok uzun mesafelere iletilmemelidir. Bundan dolayı şebekenin reaktif güç ihtiyacı bölgesel yerlerde kurulan reaktif güç kompanzasyonu aygıtlarından sağlanmalıdır.

Yukarıda da belirtilenlerin bir sonucu olarak rüzgâr santrallerinin şebeke operatörleri tarafından belirlenen sınır değerler içerisinde çalışabilme yeteneğine sahip olmalıdırlar. Şekil 3.1’de Türkiye, Almanya, İrlanda ve Danimarka’ya ait sınır değerler gösterilmiştir.



Şekil 3. 1 Rüzgâr santrallerinin reaktif güç eğrileri

Türkiye, İrlanda, Danimarka ve Almanya’da şebekeye bağlı olan generatör ünitelerinin yukarıdaki şekil 3.1’ de gösterilen reaktif güç gerekliliklerini karşılayabilmelidir.

Yukarıda bahsedilen şebeke bağlantı kriterleri nominal reaktif güç üretim seviyesinin altında da şebeke ile reaktif güç değişimine ihtiyaç duyarlar. Üretilen aktif güce karşılık rüzgâr santrallerinin verebileceği reaktif güç sınır değerleri şekil 3.1’ de görülmektedir. Tüm bu güç değerleri, rüzgar santrallerinin nominal aktif güç değerleri olan  $P_n$  baz alınarak çizilmiştir.

Türbinlere ait reaktif güce bağlı çalışma aralıkları santralin ürettiği gücün nominal gücüne oranına bağlı olarak tanımlanmaktadır. Buna göre Danimarka en katı koşullara sahiptir. Bu kriter göz önüne alındığında Almanyanın en esnek koşullara sahip olduğu görülmektedir.

### 3.2 Frekans

Güç sistemlerinde gücün üretilmesi ve yükün tüketilmesi arasındaki dengenin göstergesi frekanstır. Üretim ve tüketim arasındaki dengenin bozulması hem şebekenin nominal frekansının değerinden sapmasına yol açar hem de daha önceden şebekede tanımlanmış frekans aralığını ihlal eder. Bu ihlal etme olayı basit gibi görünse de şebekenin stabilizesini ve buna bağlı olarak güç sisteminin güvenliğini tehdit edebilir.

Yükte ani bir artış olması durumunda oluşan gerilimin frekansı azalır. Frekansın tekrar nominal değerine ulaştığı ana kadar primer kontrolün sağladığı güç üretimi artar. Frekans düşmesi generatör ünitelerinde beklenmedik güç kayıplarının oluşmasına neden olabilirler. Diğer taraftan frekans artışı yükte ani bir düşmeye veya generatörlerde beklenmedik artışa yol açabilir.

Rüzgâr santralleri normal çalışma durumlarında şebeke bağlantı kriterlerinin belirtilen gerilim ve frekans sınır değerleri içerisinde sürekli olarak çalışabilme yeteneğine sahip olmalıdırlar. Bununla beraber rüzgâr santralleri normal çalışma sınır değerlerinin dışındaki belirtilen sürelerde de iletimde kalmalıdırlar. Rüzgâr santrallerinin daha geniş frekans değerleri için iletimde kalma yeteneği herhangi bir anormal durum boyunca sistemin iletimde kalmasını sağlamak ve ayrıca şebeke frekansının hızlı bir şekilde iyileşmesini sağlamaktadır.

Güç sistemlerinde kullanılan generatörler sabit frekans aralığı içerisinde çalışabilecek şekilde dizayn edilirler. Şebekelerin bağlantı kriterleri hem frekans aralığını belirler ve hem de frekans değişimlerine bağlı olarak kaç dakika iletimde kalmaları gerektiğini tanımlar. Aşağıdaki çizelgede ülkelere ait frekans değişimlerine bağlı olarak rüzgâr santrallerinin iletimde kalma süreleri gösterilmiştir.



Çizelge 3. 1 Ülkelere ait frekans değişimi generatör çalışma süreleri

ÜLKE	Frekans limiti(Hz)	Maksimum süre
Türkiye	$51,5 \text{ Hz} \leq f \leq 52,5 \text{ Hz}$	10 dakika
	$50,5 \text{ Hz} \leq f < 51,5 \text{ Hz}$	1 saat
	$49 \text{ Hz} \leq f < 50,5 \text{ Hz}$	Sürekli
	$48,5 \text{ Hz} \leq f < 49 \text{ Hz}$	1 saat
	$48 \text{ Hz} \leq f < 48,5 \text{ Hz}$	20 dakika
	$47,5 \text{ Hz} \leq f < 48 \text{ Hz}$	10 dakika
Almanya	$49 \text{ Hz} < f < 50,5 \text{ Hz}$	Sürekli
	$48,5 \text{ Hz} < f < 51,5 \text{ Hz}$	30 dakika
	$47,5 \text{ Hz} < f < 51,5 \text{ Hz}$	10 dakika
	$46,5 \text{ Hz} < f < 51,5 \text{ Hz}$	10 saniye
İrlanda	$49 \text{ Hz} < f < 50,5 \text{ Hz}$	Sürekli
	$48,5 \text{ Hz} < f < 51,5 \text{ Hz}$	60 dakika
	$47,5 \text{ Hz} < f < 51,5 \text{ Hz}$	20 saniye
Danimarka	$48,5 \text{ Hz} < f < 51 \text{ Hz}$	Sürekli
	$48 \text{ Hz} < f < 51 \text{ Hz}$	25 dakika
	$47,5 \text{ Hz} < f < 52 \text{ Hz}$	5 dakika
	$47 \text{ Hz} < f < 52 \text{ Hz}$	10 saniye

Yukarıdaki çizelgeden de görüleceği üzere Türkiye, Almanya, İrlanda ve Danimarka'nın bağlantı kriterleri farklı olup buna göre frekans aralıklarının da farklı olması gerekmektedir. Fakat 47,5 Hz ile 52,5 Hz arasında rüzgâr santralleri dört ülkede de devamlı olarak çalışabilmektedirler.

### 3.3 Gerilim Aralığı

Güç sistemlerinde gerilim regülasyonu reaktif gücün kontrolü ile doğrudan ilişkilidir. Son yıllarda geliştirilen grid-code'lerde konvansiyonel santrallerin yaptığı gibi rüzgar santrallerinin de güç sisteminin gerilimine karşılık olarak reaktif güç kontrol yeteneğini sağlamalıdır.

Rüzgâr santralleri belirlenen gerilim değerleri ve gerilim oranları içerisinde çalışabilmelidir. Gerilim oranları ülkeden ülkeye farklılık gösterip iletim sisteminin gerilim seviyesine bağlıdır. Aşağıdaki çizelgede rüzgâr türbinlerinin çalışabilecekleri gerilim aralıkları ülkelere göre gösterilmiştir.

Çizelge 3. 2 İzin verilen gerilim aralıkları

ÜLKE	GERİLİM ARALIĞI
Türkiye	66 Kv ≤ - % 10 den + % 10 154 Kv -% 9 den + % 11 400 Kv -% 15 den + % 5
Danimarka	132 Kv - % 5 den + % 10 150 Kv -% 3 den + % 13 400 Kv -% 10 den + % 5
İrlanda	110 Kv - % 10 den + % 12 220 Kv -% 9 den + % 12 400 Kv -% 13 den + % 8
Almanya	110 Kv - % 13 den + % 12 220 Kv -% 13 den + % 12 400 Kv -% 8 den + % 10

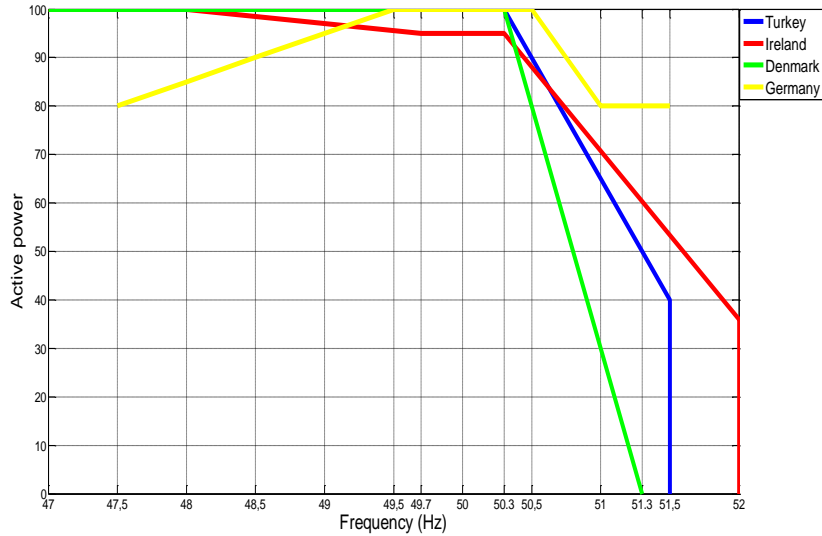
Yukarıdaki tabloda da görüleceği üzere Danimarka'daki sistem operatörleri (TSO) rüzgar santrallerinin çalışmasına nominal gerilimin büyüklüğüne bakarak - % 10 ile + % 13 arasında gerilim değişimine izin verilmektedir. Aynı şekilde İrlanda ve Almanya' da müsaade edilen gerilim değişimlerine bakılacak olursa her iki ülkede de bu değerlerin - % 13 – + % 12 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Benzer şekilde ülkemize bakılacak olursa bu değerlerin - % 15 ile + % 11 arasında değiştiği görülmektedir.

### 3.4 Aktif Güç Kontrolü

Aktif güç kontrolü, rüzgâr santrallerinin kendi aktif güç çıkışlarını belirli bir seviyede ve oranda kontrol edebilme yeteneğidir. Bu gerekliliklerin amacı sistemin kararlı bir frekansın oluşmasını sağlamak, iletim hatlarının aşırı yüklenmesini engellemek ve şebekeye bağlı rüzgâr santrallerinin dinamik etkilerini minimum seviyeye indirmektir (olağanüstü rüzgâr koşullarında).

Rüzgâr türbinlerinin kendi aktif güç çıkışlarını kontrol edebilme yeteneği arıza boyunca geçici kararlı hal rejimi için de önemlidir. Eğer arıza oluşur oluşmaz güç etkili bir biçimde kontrol edilebilirse türbinin aşırı hızlanması engellenebilir. Şebeke gerilimin tekrar kararlı hale dönüşmesine yardım eden arıza temizlendikten sonra generatörlerin tekrar mıknatıslanmasını sağlayan reaktif güce olan ihtiyaç azdır. Genellikle düşük gerilim seviyelerinde geçici olarak aktif gücün üretilmesi azaltılır. Bu azaltma işlemi konverterlerin nominal akımlarını aşmaksızın reaktif gücün artmasına yol açar. Arızadan sonra nominal aktif güç üretimine hızlı bir geri dönüş, şebekenin güç dengesini ve şebeke kararlılığını sağlamada önemlidir.

Aşağıdaki grafikte ülkelere ait rüzgâr santrallerinin aktif güç çıkışının frekansa bağlı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3. 2 Frekans bağlı olarak aktif güç değişimi

Şekilden de görüleceği üzere Türkiye rüzgâr türbinlerinin aktif güç frekans eğrisine bakıldığında 47,5 – 50,3 Hz aralığında rüzgâr santralleri istenen gücünün tamamını üretebilecek durumdadır. Frekansın 50,3 Hz'in üzerine çıkması durumunda rüzgâr santralleri % 4'lük hız düşümü sağlayıp 51,5 Hz' de ise tamamen devre dışı olmak zorundadır. Benzer şekilde Danimarka'ya ait eğriye bakıldığında 47 – 50,3 Hz aralığında nominal gücün tamamını üretebilecek durumda iken 51,3 Hz' de ise rüzgar santralleri tamamen devre dışı olmak zorundadırlar.

İrlanda'ya ait aktif güç frekans eğrisine bakıldığında 47 – 48 Hz frekans aralığında nominal gücün tamamını üretebilecek seviyede iken yaklaşık olarak %5'lik bir hız düşümü sağlayıp 49,7 - 50,3 Hz aralığında nominal gücün yaklaşık olarak %95'ini üretebilecek seviyede iken 52 Hz' de tamamen devre dışı olmak zorundadırlar. Son olarak yukarıda yapılan analizler Almanya için yapılırsa; 49,5 - 50,5 Hz aralığında nominal gücün tamamını üretebilecek seviyede iken 51,5 Hz' de tamamen devre dışı olmak zorundadırlar.

Yukarıda yapılan analizlerden de görüleceği üzere rüzgâr santrallerinin çalışabileceği en geniş frekans aralığına sahip ülke İrlanda'dır. Ayrıca üretilebilecek maksimum güç miktarının en fazla olduğu ülke Almanya'dır.

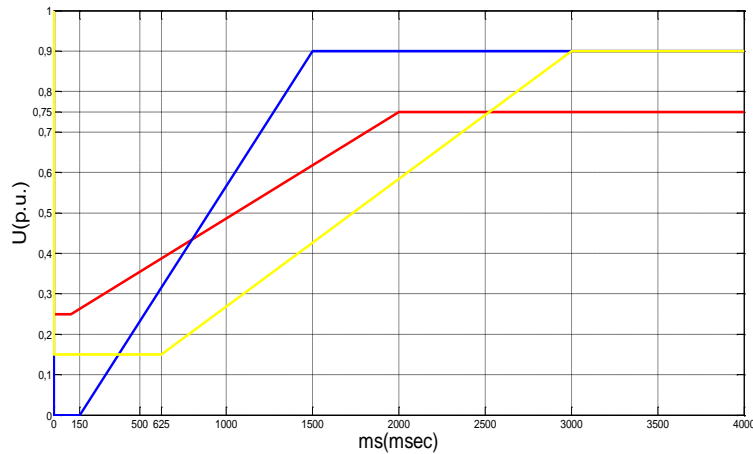
### **3.5 Rüzgâr Santrallerinin Arıza Sonrası Sisteme Katkısı**

Şebeke bağlantı kriterlerinde son zamanlarda yer alan alçak gerilimde çalışma ve arıza sonrası rüzgâr santrallerinin şebekeye katkısı rüzgâr santrallerinin çalışmasında en önemli gerekliliklerdir. Özellikle enerji üretiminde rüzgâr santrallerinin katkısının büyük olduğu bölgelerde güç sistemlerinin kararlı ve güvenli çalışması için alçak gerilimde çalışma yeteneği oldukça önemlidir. Şebekelerde meydana gelen arızalar çok büyük gerilim düşümlerine neden olabilir ve bunun sonucu olarak bazı generatör ünitelerinin devre dışı olmasına yol açabilmektedirler. Böyle durumlarda rüzgâr santrallerinin şebekeyi beslemesi şebekede meydana gelebilecek gerilim çökmelerini engelleyebilir.

Bağlantı kriterleri rüzgâr santralleri ile ilgili ilk düzenlemeler yapılmaya başlandığı yıllarda şebeke arızaları ve alçak gerilimlerde rüzgâr santrallerinin şebekeden ayrılmasına izin verilmesine karşın, şebekede rüzgâr santrallerinin katkısının büyük

olduğu bölgelerde, rüzgâr santrallerinin şebekeden ayrılması çok büyük gerilim düşümlerine ve hatta gerilim çökmesine neden olacağı için günümüzde bu uygulamalara izin verilmemektedir. Ayrıca generatörlerin şebekeden ayrılmalarının sonucu olarak ilave güç kayıpları enerji üretimi ve tüketimi arasındaki dengenin daha da bozulmasına neden olabilmektedir. Buna bağlı olarak frekans düşmeleri görülebilmektedir. Başka bir deyişle rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlantı noktalarında gerilim düşmesine yol açan böyle durumlarda rüzgâr santralleri şebekeye bağlı kalmalıdır [32].

Son yıllarda oluşturulan bağlantı kriterlerinde rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlı kalmasını, arıza boyunca ve arıza sonrasında şebekeyi desteklemesi beklenmektedir. Aşağıdaki şekilde gösterilen FRT (Fault Ride Through) gerilim zaman grafiğinde gösterildiği gibi rüzgâr santralleri nominal gerilimin belirlenen yüzde aralıklarında gerilim düşmelerine karşı direnmelidir. Rüzgâr santrallerine eğrinin yukarı sınırlarında şebekeden ayrılmasına izin verilmemektedir. Eğrinin aşağı sınırlarında rüzgâr türbinlerinin şebekeye katkısı önemsenmemektedir. Bu eğriler içerisindeki hareketi kesiciler sağlamaktadır.



Şekil 3.3 Rüzgâr santrallerinin arıza sonrası iletimde kalma süreleri

Yukarıdaki şekilde verilen grafikte Türkiye, Danimarka, Almanya ve İrlanda'ya ait şebekelerde meydana gelen arıza durumlarında rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlı kalma süreleri gösterilmiştir.

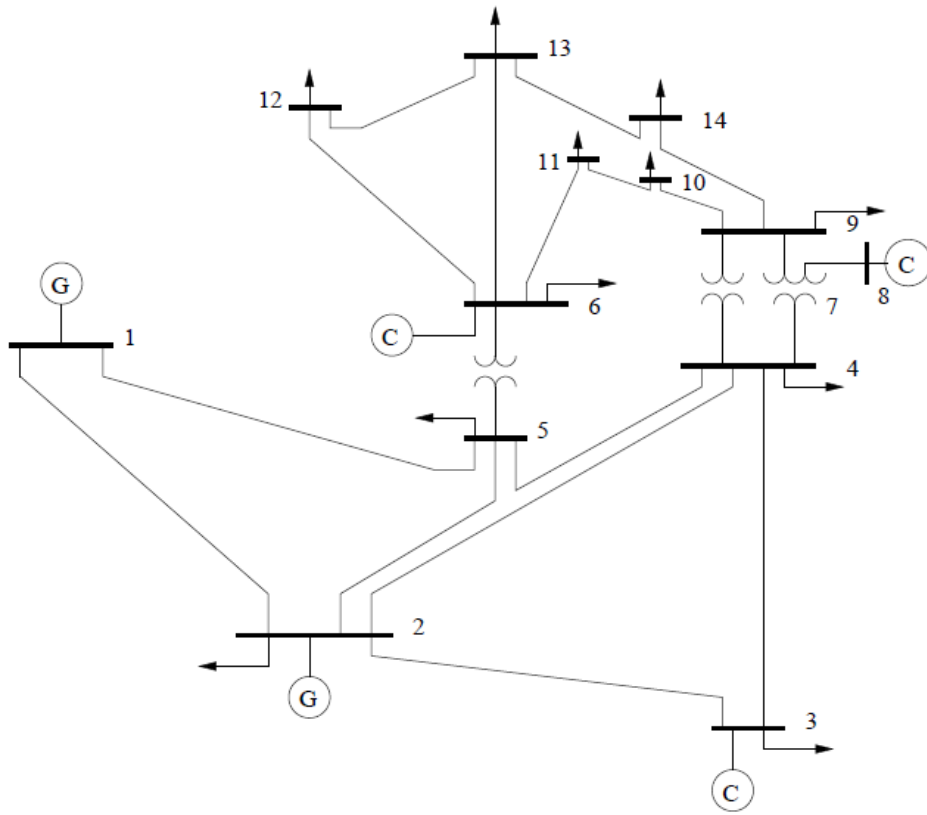
Grafikten de görüleceği üzere İrlanda en uzun FRT ( Fault Ride Through ) zamanına sahiptir. Arıza sonrası gerilimin düzelmeye başlamadan önceki maksimum zamanı İrlanda Grid – Code'lerinde 625 ms'dir. Bu değer Almanya ve Türkiye'de 150 ms iken Danimarka'da 100 ms'dir.

Arıza sonrası gerilimin tekrar belli bir seviyeye ulaşma süresi Danimarka'da 2000 ms, İrlanda'da 3000 ms olup Almanya ve ülkemizde bu süre 1500 ms'dir. Verilen bu sürelerden sonra gerilim Türkiye, Almanya ve İrlanda'da nominal gerilimin % 90'nına Danimarka'da ise %75'ine ulaşmalıdır.

Yukarıdaki verilerden İrlanda grid – code'leri FRT ( Fault Ride Through ) bakımından diğer ülkelere göre en büyük süreye sahip olduğu sonucuna ulaşılabilir.

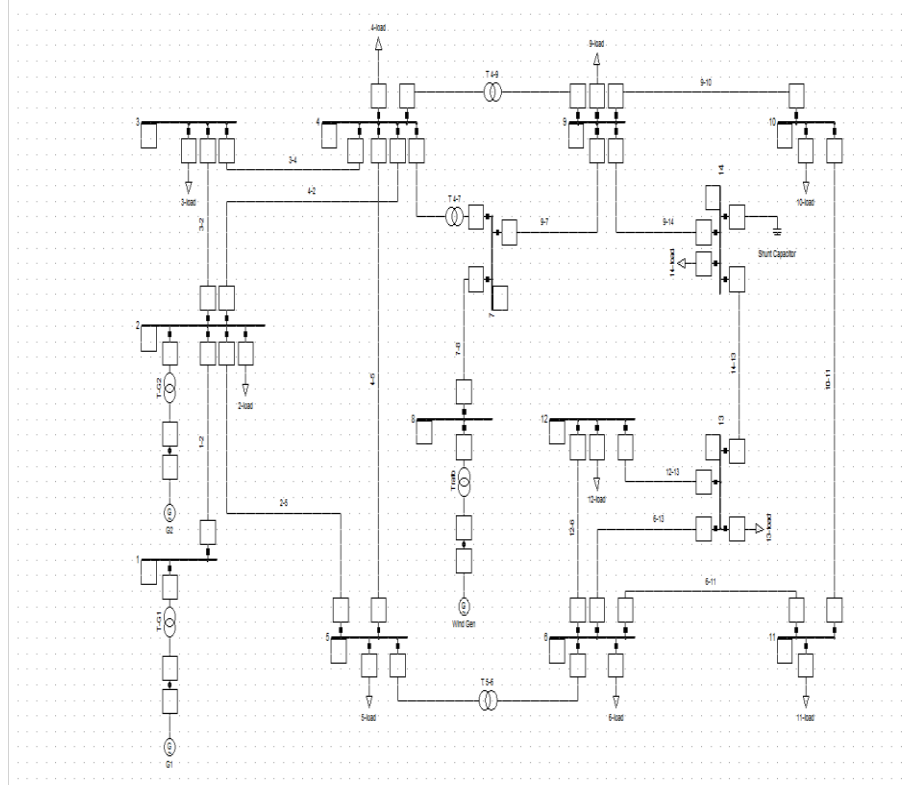
**UYGULAMA**

Rüzgâr türbinlerinin şebekede kullanımının artması ile birlikte, söz konusu sistemlerin şebekeye etkilerini azaltmak amacıyla şebeke bağlantı kriterleri ortaya konulmuştur. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında ülkemize ait şebeke bağlantı kriterleri, ele alınan test sistemi üzerine analiz edilmiş ve sonuçlar ortaya konulmuştur. Bu amaç doğrultusunda IEEE-14 baralı test sistemi DigSilent PowerFactor yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Modellenen sisteme ait tek hat diyagramı Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 1 Tek hat diyagramı

İncelenen sistem üzerinde 2 adet üretim barası bulunmaktadır. Sistem üzerindeki baralarda 66 kV, 10,5 kV ve 0.96 kV'luk gerilim seviyeleri kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen uygulamada 20 MV'lık kurulu gücü bulunan bir rüzgar santrali 8 nolu 66'luk baraya bağlanmıştır. İncelenen sisteme ait DigSilent modeli Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 2 DigSilent modeli

Sistem üzerinde kullanılan generatörlerin nominal gerilimleri 0.96 kV olup 10.5 kV'luk baralara 0.96 / 10.5 kV dönüştürme oranına sahip yükseltici trafolar yardımıyla bağlanmışlardır. Baralar arasında kullanılan orta gerilim kablolarının boyutlandırılmasında gerek generatörlerin tam yükünü taşıyabilecek özellikte olmasına gerekse de kısa devre arıza akımlarını taşıyabilecek özellikte olmasına dikkat edilmiştir.

Ele alınan sistem üzerinde kullanılan yüklere ait karakteristik değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.



Çizelge 4. 1 Test sistemine ait generatör verileri

Bara No	P Üretilen(p.u.)	Q Üretilen(p.u.)	P Yük(p.u.)	Q Yük(p.u.)
1	2.324	0.00	0.00	0.00
2	0.3996	0.4273	0.2170	0.1270
3	0.00	0.00	0.9420	0.1900
4	0.00	0.00	0.4780	0.0390
5	0.00	0.00	0.0760	0.0160
6	0.00	0.00	0.1120	0.0750
7	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.2950	0.1660
10	0.00	0.00	0.0900	0.0580
11	0.00	0.00	0.0350	0.0180
12	0.00	0.00	0.0610	0.0160
13	0.00	0.00	0.1350	0.0580
14	0.00	0.00	0.1490	0.0500

Çizelge 4.1'den de görüleceği üzere 1 nolu baraya 232.4 MW gücüne sahip G1 generatörü bağlanmıştır. 2 nolu baraya ise 58.508 MVA gücüne sahip G2 generatörü bağlanmıştır. Diğer baralarda herhangi bir üretim merkezi bulunmamaktadır.

Benzer şekilde analiz çalışmasına konu olan sistem üzerinde kullanılan iletim hatlarının karakteristik değerleri aşağıdaki Çizelge 4.2' de verilmiştir.

Çizelge 4. 2 Test sistemine ait bara verileri

Baradan	Baraya	Direnç(p.u.)	Reaktans(p.u.)
1	2	0.01938	0.05917
1	5	0.05403	0.22304
2	3	0.04699	0.19797
2	4	0.05811	0.17632
2	5	0.05695	0.17388
3	4	0.06701	0.17103
4	5	0.01335	0.04211
4	7	0.00	0.20912
4	9	0.00	0.55618
5	6	0.00	0.25202
6	11	0.09498	0.1989
6	12	0.12291	0.25581
6	13	0.06615	0.13027
7	8	0.00	0.17615
7	9	0.00	0.11001
9	10	0.03181	0.08450
9	14	0.12711	0.27038
10	11	0.08205	0.19207
12	13	0.22092	0.19988
13	14	0.17093	0.34802

Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında test sistemi üzerinde 8 nolu baraya rüzgar santrali bağlanması durumu incelenmiş ve iki farklı santral gücü için bağlantı kriterleri analiz edilmiştir. Bu amaçla ilk olarak 8 nolu baraya 20 MW'lık kurulu güce sahip rüzgar santrali bağlanması durumu daha sonra ise 40 MW'lık kurulu güce sahip rüzgar santrali bağlanması durumu göz önüne alınmıştır. Oluşturulan rüzgar santrali üzerinde 2 MW'lık çift beslemeli asenkron generatör (DFIG) rüzgâr türbinleri kullanılmıştır. Digsilent'te tasarlanan rüzgâr türbinin genel karakteristikleri Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 3 Rüzgâr türbini karakteristikleri

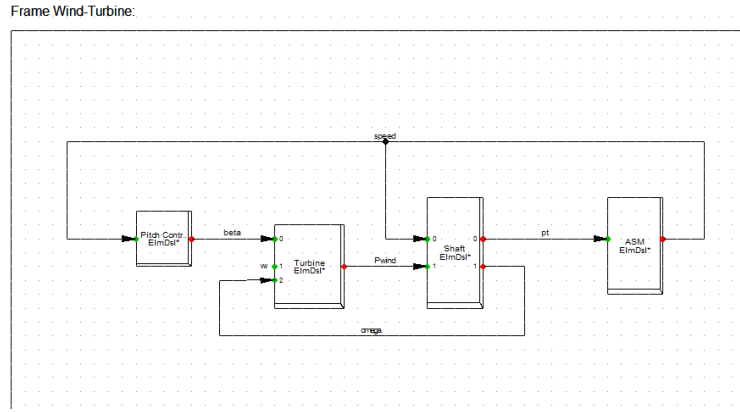
Rüzgâr Türbin Karakteristikleri	Değer
Rotor Çapı	70 m
Nominal Güç	2 MW

Çizelge 4. 4 Generatör karakteristikleri

Generatör Karakteristikleri	Değeri
Kutup Sayısı	2
Nominal Güç	2.4 MVA
Nominal Gerilim	960 V
Frekans	50 Hz

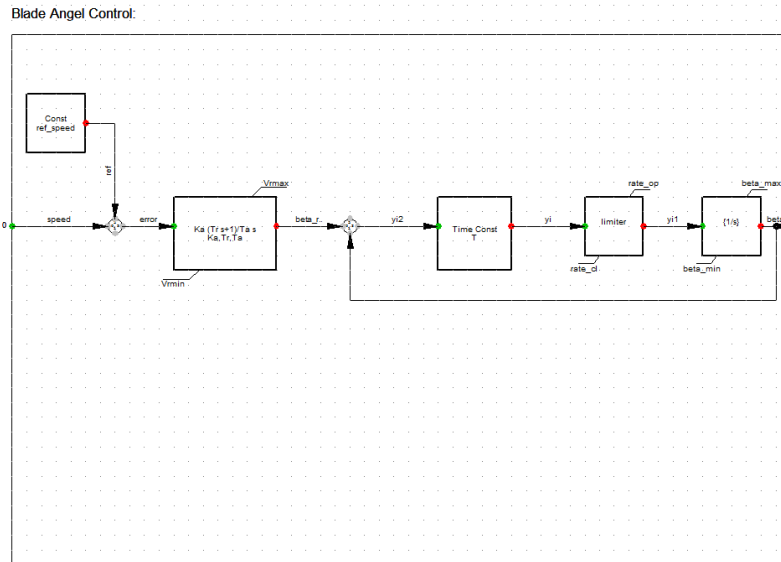
Buna göre her bir türbinin kanat uzunluğu 35 m olup türbinlerin nominal çıkış gerilimi 960 V'tur. Modelleme çalışmalarında rüzgar türbinleri yükseltici transformatörleri yardımı ile şebekeye bağlanmışlardır.

Tez çalışmasında kullanılan rüzgâr türbinine ait DigSilent modeli sırası ile Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



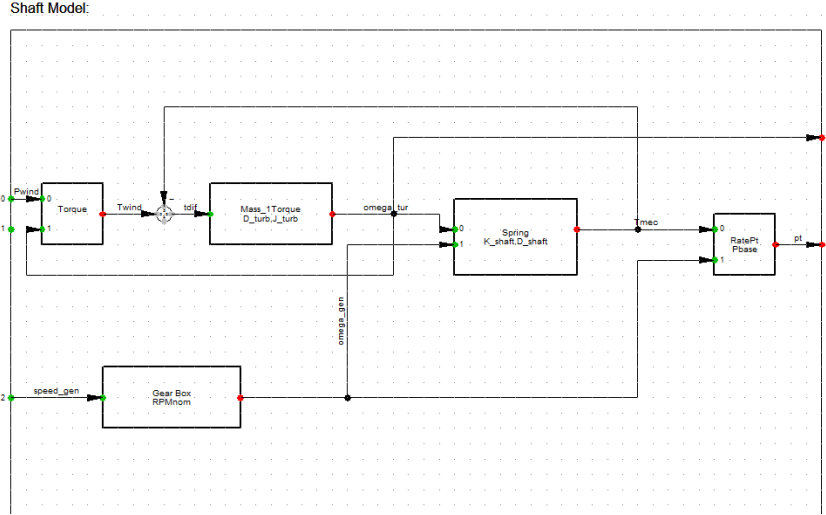
Şekil 4. 3 Frame Wind-Turbine Blok Diyagramı

Digsilent üzerinde blok diyagramları ile sinyal akışları arasındaki bağlantıları kurabilmek için Wind Turbine Frame blok diyagramından faydalanılmaktadır. Wind Turbine Frame blok diyagramı Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



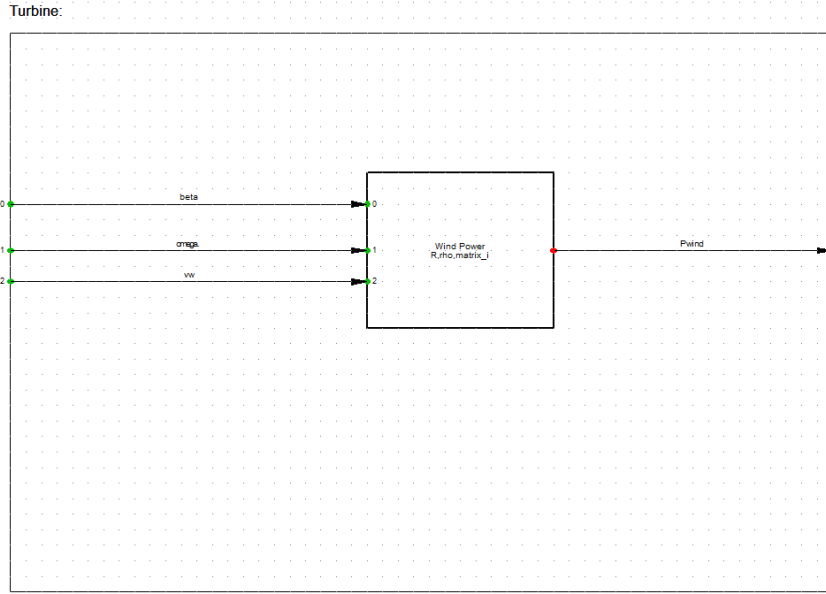
Şekil 4. 4 Blade Angel Control Blok Diyagramı

Şekil 4.4'de kullanılan rüzgar türbineni ait kanat açısı kontrol blok diyagramı sunulmuştur. Temel olarak bir rüzgar türbininde kanat açısı kontrolü ile rüzgar türbinin verimi maksimum değerde tutulmakta, ayrıca türbin bileşenlerinin aşırı rüzgar hızlarına karşı mekanik korunmaları sağlamaktadır. Bu sistem üzerinde  $K_a$  kanat açısı kontrolör kazancı olup 100 olarak belirlenmiştir.  $T_r$  mekanik zaman sabiti olup 5 ve  $T_a$  kanat açısı kontrolör zaman sabiti olup 1 değerindedir.  $ref\_speed$  referans hız olup 1 p.u. olarak alınmıştır.  $T$  servo zaman sabiti olup 0,5,  $beta\_min$ ; minimum kanat açısı ve  $beta\_max$  maksimum kanat açısı olup sırası ile 0 ve 70 değerine sahiptir.



Şekil 4. 5 Shaft Model Blok Diyagramı

Şekil 4.5 ile gösterilen shaft model blok diyagramı rüzgar türbin rotoru ile generatör rotoru arasındaki bağlantıyı ifade etmektedir. Burada  $P_{base}$  türbin generatörünün nominal gücünü ifade etmektedir ve yapılan çalışmada 2 MW değerindedir. Sırası ile  $D_{turb}$  türbin sönümlemesini,  $K_{shaft}$  shaft dayanıklılığını ve  $D_{shaft}$  bükülme sönümlemesini göstermekte olup değerleri sırası ile 0,  $10^8$  ve 0'dır.  $RPM_{nom}$  ise nominal türbin hızı olup 18,75 değerine sahiptir.



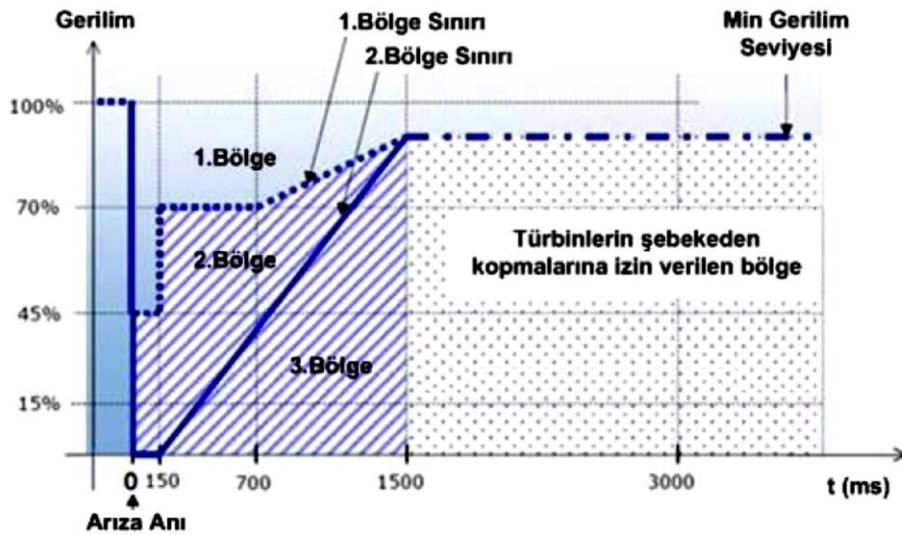
Şekil 4. 6 Turbine Model Blok Diyagramı

Geliştirilen DigSilent modeli üzerinde kullanılan türbine ait karakteristik değerler Turbine Model Blok Diyagramı ile modellenmektedir. Çalışmada kullanılan Turbine Model Blok Diyagramı Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Model içerisinde R rotor yarıçapı olup 35m, rho

hava yoğunluğu olup  $1.225 \text{ kg/m}^3$  olarak kullanılmıştır. Türbin güç katsayısı 0.3 olarak alınmıştır.

#### 4.1. Rüzgâr Santralinin Arıza Sisteme Katkısı

Güç sistemleri her ne kadar kararlı koşullarda işletilmek istense de süreç içerisinde bozucu etkilerle karşılaşabilmektedir. Şebekelerde meydana gelen arızalar sistem üzerinde büyük gerilim düşümlerine yol açabildikleri gibi bazı generatör ünitelerinin devre dışı olmasına da neden olabilmektedirler. Sistemin normal işletme koşullarında çalışmasına devam edebilmesi açısından üretim ünitelerinin arıza karşısındaki davranışları oldukça önemli rol üstlenmektedir. Rüzgar türbinlerini içeren şebekelerde de bozucu etki sonrasında belirli kriterler dahilinde santralin şebekeyi destekler yönde davranış sergilenmesi beklenmektedir. Arıza durumunda rüzgar türbinlerinin göstermeleri gereken davranışlar bağlantı kriterlerinde tanımlanmaktadır. Buna göre arıza sonrası rüzgar santralinin sisteme katkısı ile ilgili sınır değerler Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



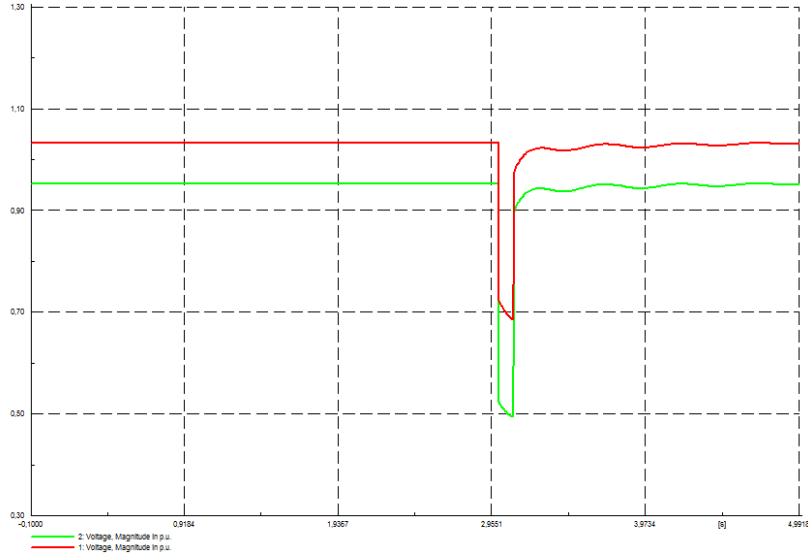
Şekil 4. 7 Rüzgâr Santrallerinin Arıza Sonrası Sisteme Katkısı

Şekil 4.7'den görüleceği üzere rüzgar santrallerinin arıza durumunda şebekeye bağlı kalıp kalmaması ile ilgili olarak 3 çalışma bölgesi tanımlanmaktadır [33]. Tanımlanan 1

ve 2 nolu bölgelerde rüzgar santrallerinin şebekeye bağlı kalmaları istenilmektedir. Buna karşın 3 numaralı bölgede ise santralin şebekeden ayrılmasına izin verilmektedir. Arıza anında sistem üzerindeki gerilim düşümünün 150 ms sürede sıfır değerine düşüşüne izin verilmektedir. 1 nolu bölgede bu değer 0,45 pu değerine kadar düşmektedir. 3 nolu bölgedeki arızaların temizlenme süresi oldukça uzundur ve sistemin kararlı çalışma durumuna dönmesi zaman almaktadır.

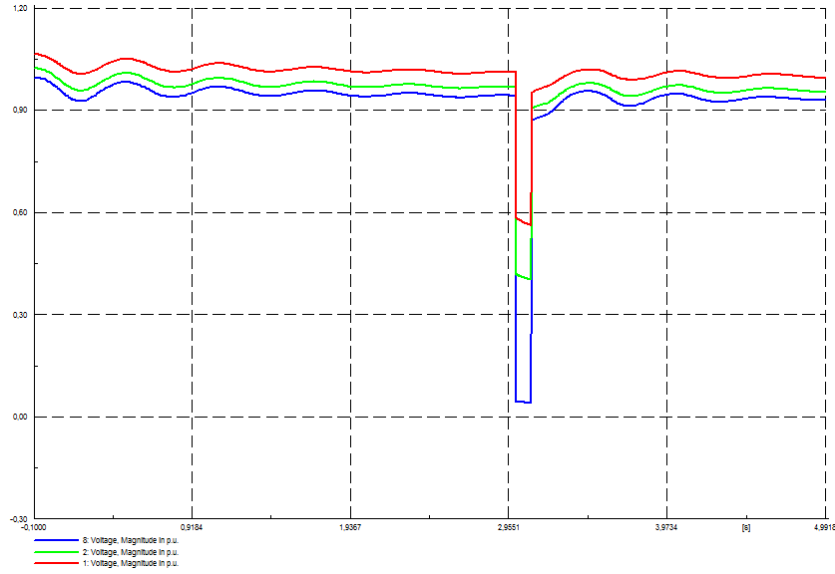
Gerçekleştirilen çalışmada rüzgâr santrallerinin şebeke bağlantı kriterlerini incelenmek amacıyla modellenen sistem üzerinde bulunan 7 nolu barada 3. saniyede 3 fazlı simetrik kısa devre meydana getirilmiş ve arızanın 100 ms içerisinde temizlenmesi durumu göz önüne alınmıştır. Söz konusu senaryo için 20 MW ve 40 MW'lık rüzgar santralleri ayrı ayrı incelenmiş olup elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.

Buna göre 8 nolu baraya rüzgâr santrali bağlanmaması durumunda sistem üzerinde arıza meydana gelmesi durumunda üretim birimlerinin bağlı olduğu baralardaki gerilim değişimleri Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 8 1.Durum Kısa Devre Arızasında Gerilim Değişiklikleri

Şekilden de görüleceği üzere arıza noktasına yakın olan generatörün gerilim seviyesindeki düşüş miktarı daha fazla olmaktadır. Buna karşın arızanın ortadan kaldırılmasından sonra her iki genetörde normal çalışma koşullarına geri dönmektedir.

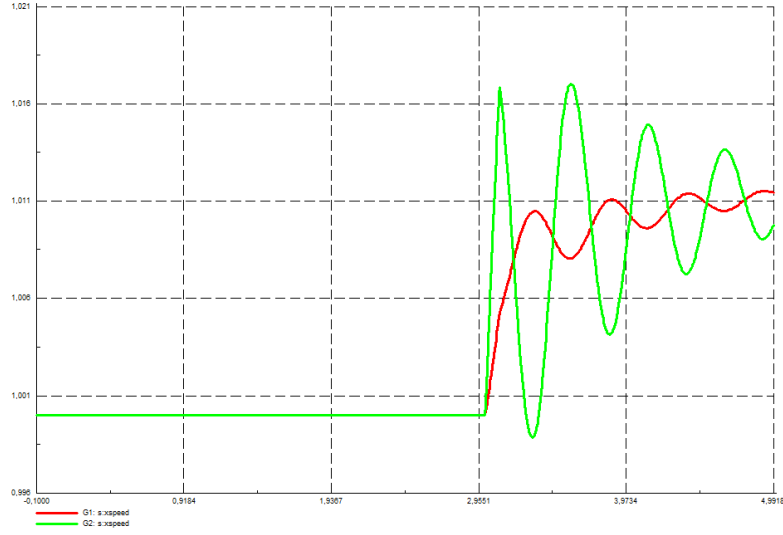


Şekil 4. 9 2.Durum kısa devre arızasında gerilim değişiklikleri

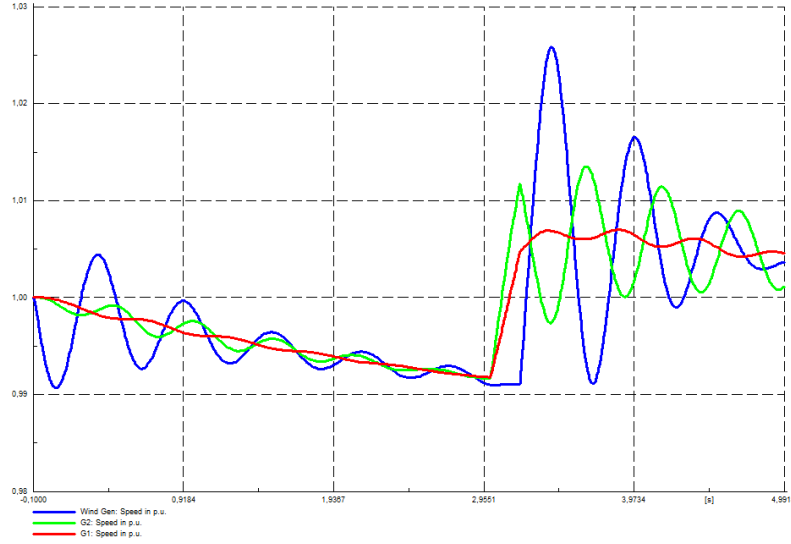
Şekil 4.9 ise rüzgar santralının devrede olması durumunda meydana gelen arıza sonrası üretim baralarındaki değişimler gösterilmiştir. Rüzgar türbinin bağlı bulunduğu bara arıza noktasına en yakın üretim barasıdır. Şekil dikkatle incelendiğinden arıza sonrası gerilim seviyesi en düşük olan baranın da 8 nolu bara olduğu görülmektedir. Sistem rüzgar santralının bağlanması durumunda diğer üretim baralarındaki gerilim düşümü miktarlarında gözle görülür azalmalar meydana gelmektedir. Arızanın giderilmesinin ardından tüm üretim birimleri şebekeye bağlı kalmaktadır. Buna göre söz konusu arıza için rüzgar santralının çalışma karakteristiğinin Şekil 4.7’de gösterilen grafiğin 2 nolu bölgesinde kalması gerekmektedir. Başka bir deyişle rüzgar santrali bu arıza durumunda şebekeye destek vermeye devam etmelidir. Yapılan analiz sonucunda da arıza sonrasında santralin sisteme bağlı kalmaya devam ettiği görülmektedir. Buna göre 8 nolu baraya bağlanan 20 MW’lık rüzgar santrali bu bağlantı kriterini yerine getirmektedir.

Sırası ile Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de rüzgar türbinin bağlı olmadığı ve bağlı olduğu durumlar için arıza öncesi ve sonrası generatör hızları gösterilmiştir.





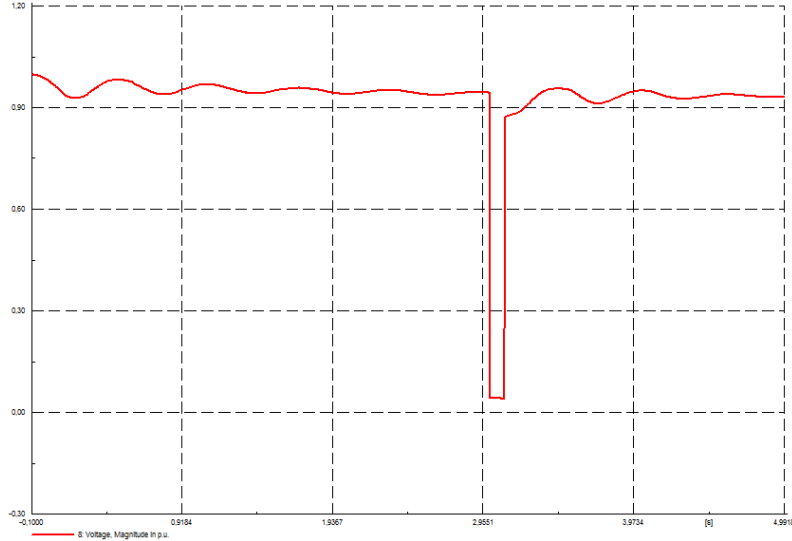
Şekil 4. 10 1.durum kısa devre arızasında generatör hızları



Şekil 4. 11 2. Durum kısa devre arızasında generatör hızları

Her iki şekilde dikkatle incelendiğinden generatör devir sayılarının 0,9 pu değerinin altına hiç düşmediği görülmektedir. Başka bir deyişle tüm üretim birimleri devrede kalmaktadır. 100 ms'lik arıza temizlendikten sonra sistem nominal çalışma koşullarının karşılanabilmesi amacıyla generatörlerin hızları artmaktadır. Arıza temizlendikten sonra generatörlerin rotorlarının ataletlerinden dolayı büyük salınımlar olmaktadır ancak bu salınımlar, arızadan sonraki ilk 2 sn içerisinde azalarak normal çalışma koşullarına dönmektedir.

Sisteme bağlanacak rüzgar santral gücünün 20 MW yerine 40 MW olması durumunda göz önüne alınan arıza senaryosu karşısında santral barasındaki gerilim değerini değişimi Şekil 4.12’da gösterilmiştir.



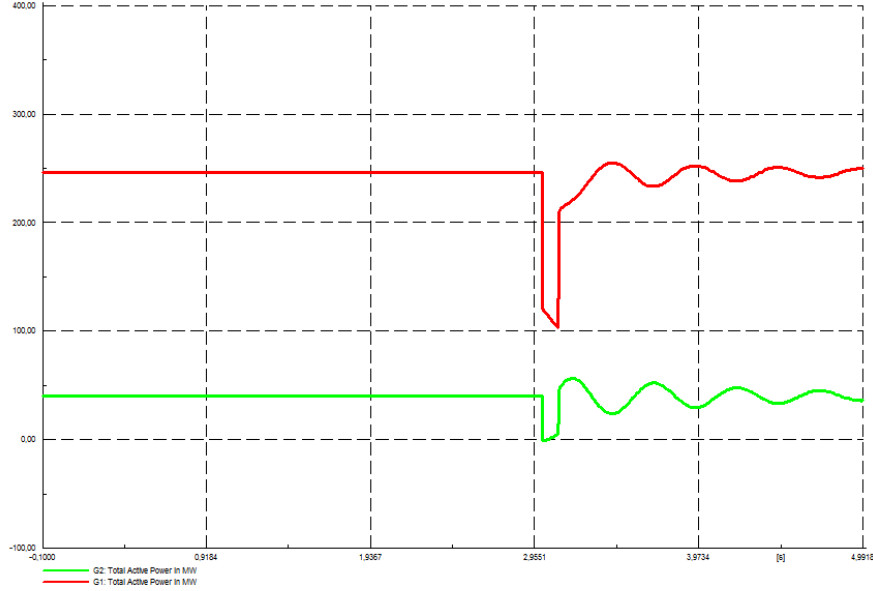
Şekil 4. 12 Kısa devre arızasında gerilim değişiklikleri

Şekil 4.12 incelendiğinde sistem üzerinde bulunan 8 nolu baraya bağlı rüzgar gücünün 2 katına çıkması durumunda arıza anında gerilim değerinin yine 0,45 pu değerinin altına indiği ve söz konusu çalışma karakteristiğinin 2 nolu bölgeye ait olduğu görülmektedir. Sistem üzerinde meydana gelen arızanın temizlenmesi durumunda rüzgar türbinini bağlı olduğu baranın gerilimi nominal çalışma şartlarına geri dönmektedir. Başka bir deyişle bu durumda da rüzgar türbini şebekeye bağlı kalmakta ve bu şebeke bağlantı kısıtını karşılamaktadır.

Ülkemize ait bağlantı kriterleri gerilim değişimi açısından incelendiğinde 66kV ve altındaki gerilim seviyesine sahip şebekelerde gerilim  $\pm 10$  bandı içerisindeki değişimi durumunda rüzgar türbinlerinin üretimde olmaları istenilmektedir. Şekil 4.9 ve Şekil 4.12 incelendiğinde arıza öncesinde ve arızanın giderilmesinden sonra rüzgar türbinlerinin gerilim seviyelerinin 0,9pu’nun altına düşmediği ve türbinlerin sürekli şebekeye bağlı buldukları görülmektedir. Buna göre ele alınan sistemin 8 nolu barasına bağlanacak olan rüzgar santrali, gerilim değişimi açısından şebeke bağlantı kriterlerini sağlamaktadır.

## 4.2. Aktif Güç Değişimi

Rüzgar türbinlerinin şebeke bağlantısında dikkate alınması gereken kriterlerden biri de aktif güç değişiminin kontrolü ve sınır değerler dahilinde türbinin çalışmasına devam edebilme yeteneğidir.

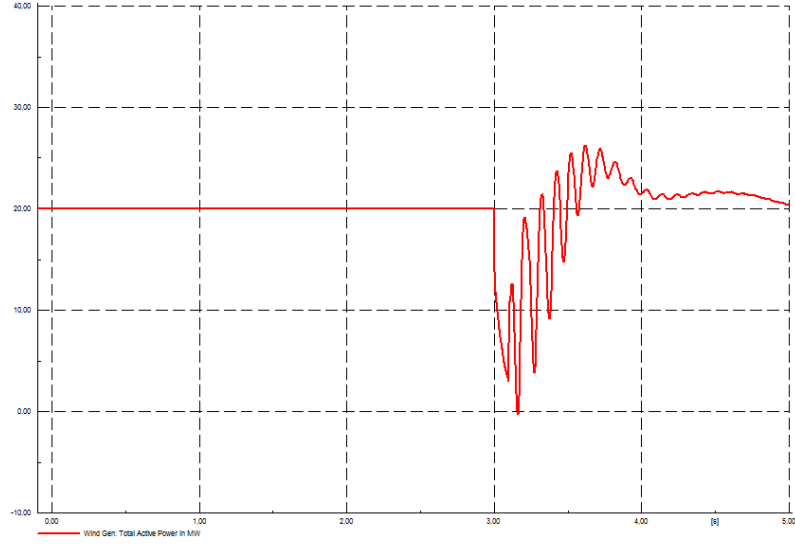


Şekil 4. 13 Arıza öncesinde aktif güç değişimleri

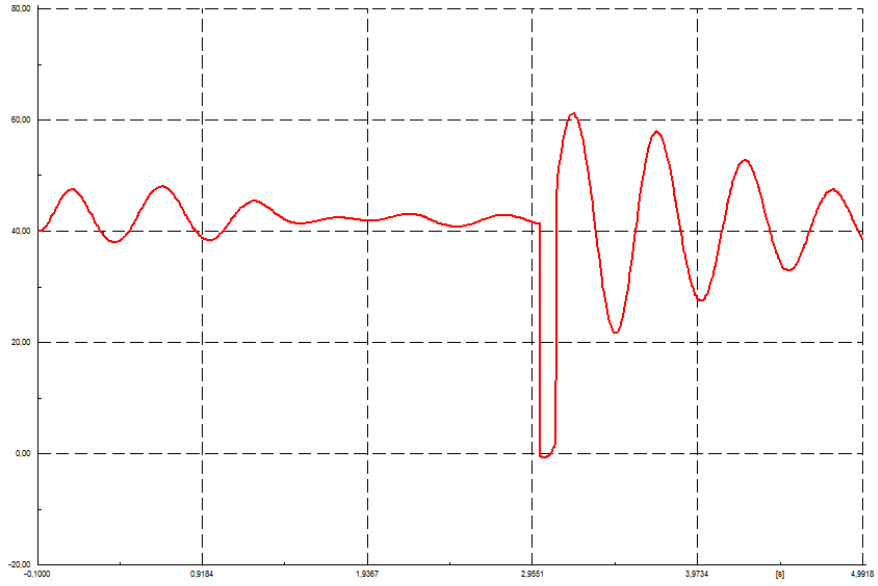
Şekil 4.13’de sistem üzerinde rüzgar türbini bulunmaması durumunda üretim birimlerindeki güç değişimleri gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi arıza ile birlikte düşen güç değerleri arızanın giderilmesi ile birlikte belirli bir salınma sonucunda nominal değerlerine oturmaktadır.

Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’te sırası ile 20 MW’lık rüzgar santralının 8 nolu baraya bağlı olması ve 40 MW’lık rüzgar santralının sisteme bağlı olması durumlarında rüzgar türbinlerine ait güç değişimleri gösterilmiştir.

Şekil 4.14’ten görüldüğü üzere arıza öncesinde rüzgar santrali nominal gücünde çalıştığı görülmektedir. Arıza sonrasında ise santralin güç çıkışında önemli azalmalar ve dalgalanmalar görülmektedir. Buna karşın arızanın sistem üzerinden kaldırılmasının ardından santral çıkış gücü hızla yükselmekte ve yine nominal gücüne oturmaktadır.



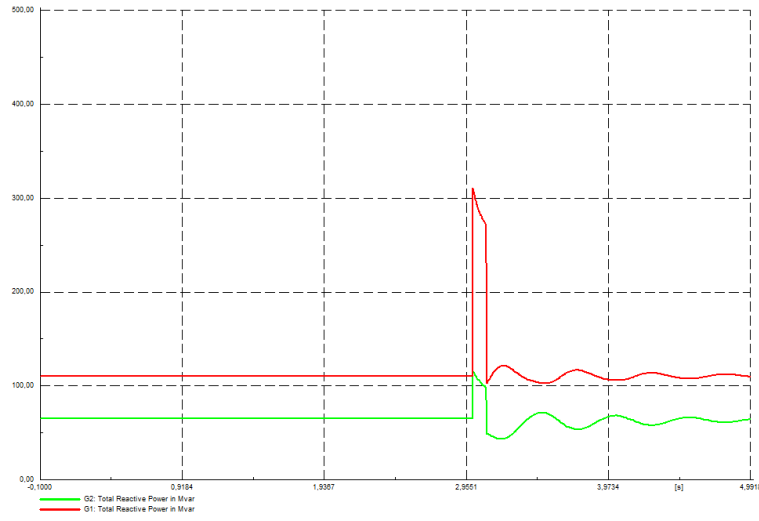
Şekil 4. 14 2. Durum arıza esnasında 20MW'lık rüzgar santralının aktif güç değişimi  
20MW'lık rüzgar santraline benzer şekilde sisteme 40MW'lık bir rüzgar santralının bağlanması durumunda da aktif güç değerinin arıza sonrasında nominal değerine ulaştığı gözlemlenmiştir.



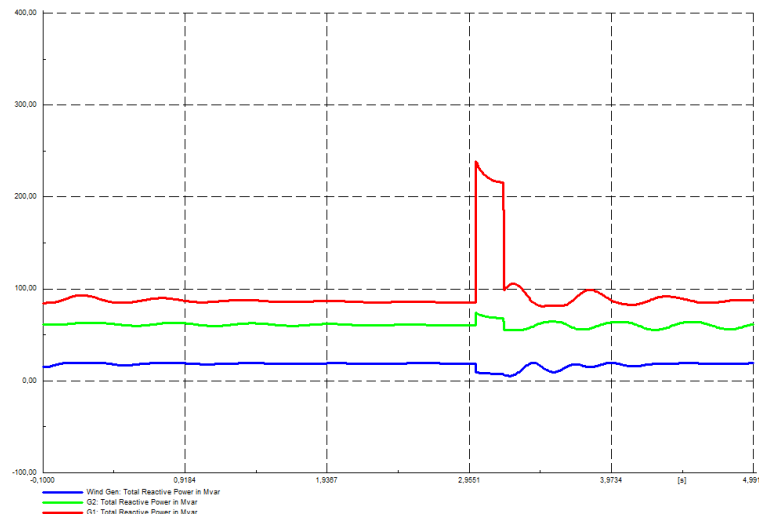
Şekil 4. 15 2. Durum arıza esnasında 40MW'lık rüzgar santralının aktif güç değişimi

### 4.3. Reaktif Güç Değişimi

Rüzgar türbinlerinin şebeke bağlantısında analiz edilmesi gereken parametrelerden biri de reaktif güç değişimidir. Çalışma kapsamında ele alınan test sistemi üzerinde yapılan analizler göz önüne alındığında arıza sonrasında generator hızlarında bir artışın olacağı Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de görülmektedir. Generatör hızındaki bu artış, generatörün reaktif güç talebinin arttığını göstermektedir. Sistem üzerindeki reaktif güç dengesi stabilize gerilimin oluşmasına yardımcı olmaktadır. Generatörün hızındaki salınımlar aktif ve reaktif güç salınımlarını ve buna bağlı olarak şebeke geriliminde salınımlar meydana getirmektedir.



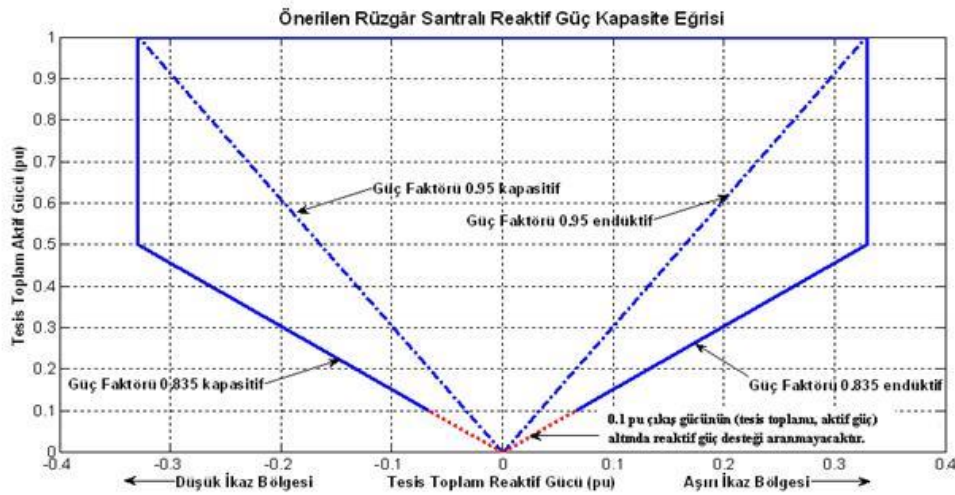
Şekil 4. 16 Sistemde Rüzgar türbini bulunmaması durumunda reaktif güç değişimi



Şekil 4. 17 Sistemde 20MW'lık rüzgar santrali bulunması durumunda reaktif güç değişimi

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de sırası ile sistemde rüzgar türbininin bulunması ve bulunmaması durumları için üretim birimlerinin reaktif güç değişimleri gösterilmiştir. Her iki şekil dikkatle incelendiğinde, konvansiyonel üretim sistemlerinin arıza anında reaktif güç ihtiyaçlarında artış meydana geldiği gözlenmektedir. Buna karşın arıza süresince rüzgar türbininin şebekeyi reaktif güç bakımından beslediği görülmektedir. Başka bir deyişle yönetmeliklerde belirtilen ‘rüzgâr santrali şebekeye bağlandıktan sonra reaktif güç değişimini sağlarlar’ hipotezi doğrulanmaktadır.

Şebekeye bağlı çalışan rüzgar türbinleri için ülkemizde uygulanmakta olan reaktif güç kapasite eğrisi Şekil 4.18’de gösterilmiştir ve şebeke bağlantılı rüzgar santrallerinin bu eğri dahilinde çalışmaları gerekmektedir.



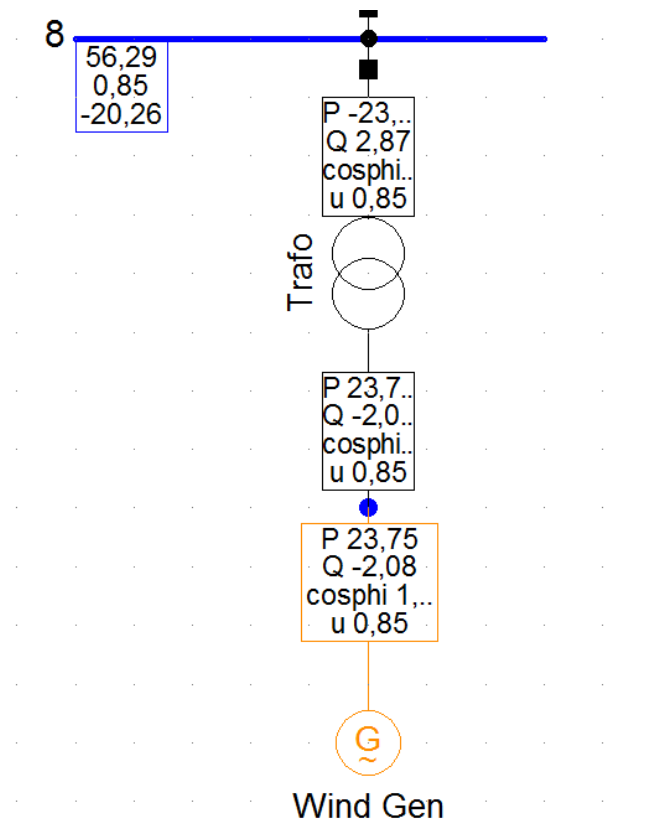
Şekil 4. 18 Rüzgâr santrali reaktif güç kapasite eğrisi

Rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlantı noktasında (Point of Connection) Şekil 4.18’de gösterilen aralıklara uyarak şebekeye bağlanmalıdır. Buna göre rüzgâr santrali kurulu güçte üretim yaparken 0.95 endüktif ve 0.95 kapasitif güç faktöründe aralığında çalışabilmektedir. Başka bir deyişle kurulu gücün %33’üne kadar reaktif güç şebekeye ilave edebilmeli veya şebekeden reaktif güç çekebilmelidir. Rüzgâr santralinin gücü %50’yi geçtikten sonra ise santral 0,835 endüktif – 0,835 kapasitif güç faktörü aralığında çalışabilmektedir. Aktif güç çıkışı %10 oranının altına düşerse reaktif güç desteği aranmamaktadır.

Rüzgâr santrallerinin şebekeye sağlayacağı reaktif güç desteği veya şebekeden çekeceği reaktif güç miktarı, rüzgâr santralının şebekeye bağlantı noktasındaki gerilim seviyesi

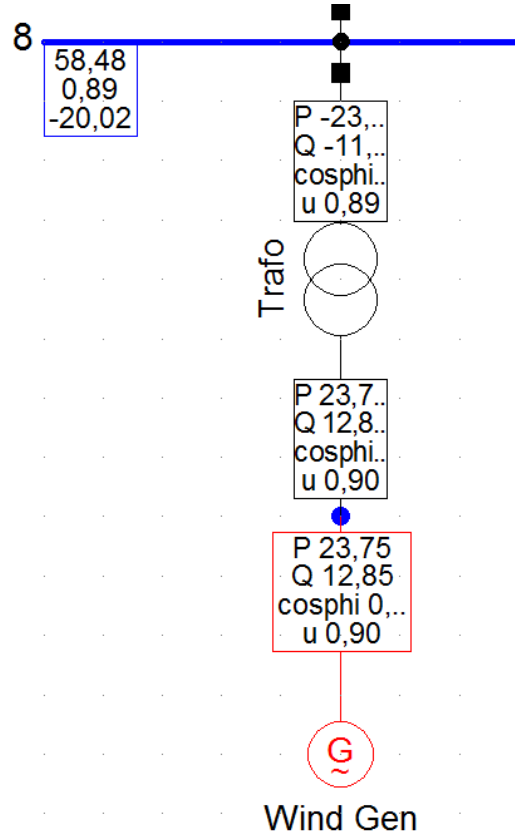
ile doğrudan ilişkilidir. Rüzgâr türbinlerinin gerilimleri yüksek iken sistemden çekebileceği maksimum reaktif gücü çekmeli ve gerilimleri düşük iken maksimum reaktif güç desteğini sisteme verebilmelidirler.

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında ele alınan test sistemi üzerinde kullanılan rüzgâr santralinin nominal gücünde çalışması durumunda farklı gerilim seviyelerindeki reaktif güç değerleri oluşturulan model üzerinde sırası ile 0,85 pu gerilim değeri için Şekil 4.19'da ve 0,9 pu gerilim değeri için Şekil 4.20'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 19 Gerilim 0.85 p.u. iken rüzgâr santralin sisteme katkısı

Buna göre rüzgar santralinin bağlı bulunduğu baranın geriliminin 0,85 pu olması durumunda reaktif güç değeri 2,08 MVar olarak tespit edilmiştir. Şekil 2.20'den görüleceği üzere rüzgar santralinin bağlı bulunduğu baranın geriliminin 0,9 pu olması durumunda reaktif güç değeri 12,85 MVar'dır.



Şekil 4. 20 Gerilim 0.9 p.u. iken rüzgâr santralin sisteme katkısı

Gerçekleştirilen analiz çalışmalarında ele alınan sistem üzerine bulunan rüzgar santralinin farklı çıkış güçleri için Şekil 4.18’de verilen eğriyi sağlayıp sağlamadığı irdelenmiştir. Bu amaçla ilk olarak rüzgar türbinleri bağlantı kriterlerinden biri olan rüzgar santralının bağlantı noktasındaki nominal gerilimin %90 - %110 aralığında çalışabilmeli koşulu göz önüne alınmıştır. Buna göre dikkate alınan 20 MW kurulu gücüne sahip rüzgâr santralının çalışma gerilim aralığı minimum 864 V ve maksimum 1156 V olarak tespit edilmiştir. Rüzgâr türbinleri düşük uyarımda çalıştırıldıkları zaman şebekeden çekeceği reaktif güç miktarı veya yüksek uyarımda çalıştırıldıkları zaman şebekeye vereceği reaktif güç miktarı rüzgâr santralının şebekeye bağlantı noktasındaki (PCC) gerilim değerine bağlı olarak değişmektedir. Buna göre şebeke bağlantı noktasındaki gerilim değerinin 864 V olması durumunda rüzgâr santralının reaktif güç değeri farklı çıkış gücü değerleri ne göre Çizelge 4.5’te gösterilmiştir.



Çizelge 4. 5 Minimum gerilime bağlı güç faktörü değişimleri

<b>Kurulu Güç Yüzdesi</b>	<b>Aktif Güç</b>	<b>Reaktif Güç</b>	<b>Cosφ</b>
%90	18 MW	5.23	0.960
%70	14 MW	4.42	0.953
%30	6 MW	3.02	0.893
%20	4 MW	2.27	0.869

Buna göre incelenen rüzgâr santralının kurulu gücünün %10 ile %50 arasında 0.835 güç faktörü sınır değerini karşılayacağı yukarıdaki çizelgeden görülmektedir. Yine benzer şekilde kurulu güç değerinin %50 ile % 100'ü arasında 0.95 güç faktörü sınır değerini karşıladığı için yönetmelik açısından uygundur.

Benzer şekilde rüzgâr santralının şebeke bağlantı noktasındaki geriliminin 1156 V olması durumunda rüzgâr santralının reaktif güç değeri farklı çıkış gücü değerleri ne göre Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4. 6 Maksimum gerilime bağlı güç faktörü değişimleri

<b>Kurulu Güç Yüzdesi</b>	<b>Aktif Güç</b>	<b>Reaktif Güç</b>	<b>Cosφ</b>
%90	18 MW	5.34	0.958
%70	14 MW	4.48	0.952
%30	6 MW	2.96	0.896
%20	4 MW	2.21	0.875

Çizelge 4.6 incelendiğinde tüm yüklenme durumları için ele alınan rüzgâr santrali tarafından sınır değerlerin karşılandığı görülmektedir.

Yapılan tez çalışması kapsamında 8 nolu baraya bağlanan rüzgâr santralinin kurulu gücünün 40 MW olması durumu ayrıca irdelenmiştir. Yine santralin bağlandığı baradaki gerilim aralığının minimum 864 V ve maksimum 1156 V olması durumları ayrı ayrı analiz edilmiştir. Buna göre şebeke bağlantı noktasındaki gerilim değerinin 864 V olması durumunda rüzgâr santralinin reaktif güç değeri farklı çıkış gücü değerleri ne göre Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 7 Minimum gerilime bağlı güç faktörü değişimleri

<b>Kurulu Güç Yüzdesi</b>	<b>Aktif Güç</b>	<b>Reaktif Güç</b>	<b>Cosφ</b>
%90	36 MW	14.12	0.930
%70	28 MW	9.56	0.946
%30	12 MW	8.12	0.828
%20	8 MW	5.56	0.821

Rüzgâr santralının kurulu gücünün %10 ile %50 arasında 0.835 endüktif ve 0.835 kapasitif güç faktörü sınır değerlerini karşılayamadığı yukarıdaki çizelgeden görülmektedir. Aynı şekilde kurulu güç değeri %50 ile % 100 arasında 0.95 güç faktörü sınır değerini karşıladığı için yönetmelik açısından uygun olmamaktadır.

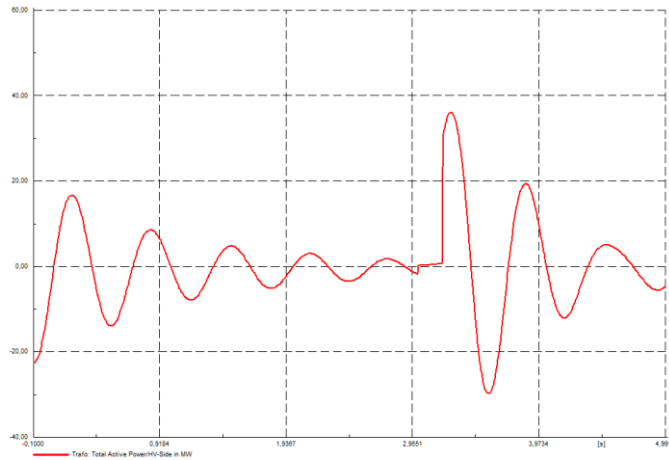
Benzer şekilde rüzgâr santralının şebeke bağlantı noktasındaki geriliminin 1156 V olması durumunda rüzgâr santralının reaktif güç değeri farklı çıkış gücü değerleri ne göre Çizelge 4.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 8 Maksimum gerilime bağlı güç faktörü değişimleri

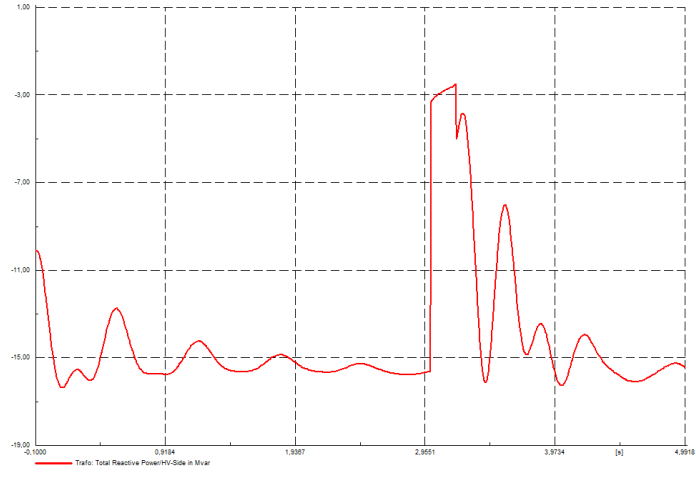
Kurulu Güç Yüzdesi	Aktif Güç	Reaktif Güç	Cosφ
%90	36 MW	14.26	0.929
%70	28 MW	9.72	0.944
%30	12 MW	8.16	0.826
%20	8 MW	5.42	0.827

Çizelge 4.8 incelendiğinde 40MW'lık rüzgâr santralının yönetmelikte belirlenen sınır değerleri karşılayamadığı görülmektedir. Başka bir deyişle 40 MW rüzgar santralının şebeke bağlantısı reaktif güç değeri bakımından yönetmeliğe uygun değildir.

Şekil 4.21 ve şekil 4.21'de 8 nolu baraya bağlanan rüzgâr santralının şebekeye entegrasyonunu sağlayan trafonun toplam reaktif güç ve toplam aktif güç değişimleri gösterilmiştir. Trafoya ait aktif güç değişimi grafiğine bakılacak olursa arıza esnasında aktif güç değişimi sıfır olup arıza temizlendiği andan itibaren şebekeye aktif güç vermektedir. Trafoya ait reaktif güç değişimi grafiğine bakılacak olursa grafikten de görüleceği üzere arıza esnasında trafonun şebekeye reaktif güç desteği verdiği görülmektedir.



Şekil 4. 21 Trafonun toplam aktif güç değişimi



Şekil 4. 22 Trafonun toplam reaktif güç değişimi

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüz şartlarında enerji üretiminde yoğun bir şekilde kullanılan fosil yakıtların çevreye zarar veren bileşenler üretmesi, yüksek maliyetli ve hızla tükenmekte olan kaynaklar olması gerçeği insanları alternatif enerji kaynaklar arayışı içine itmiş ve gelişen teknoloji ile birlikte rüzgâr, güneş ışığı, su, jeotermal ve biyolojik süreçleri içeren yenilenebilir enerji kaynaklarına odaklanılmasına neden olmuştur. Bu kaynakları kullanan elektrik üretim tesisleri içerisinde rüzgâr enerjisi santralleri düşük potansiyel riskler taşımaları, kurulum süreçlerinin kısa oluşu ve yatırım maliyetlerinin diğer alternatiflere göre düşük olması sebebi ile dünya genelinde tercih edilmektedir. Rüzgâr enerjisinin diğer enerji kaynaklarına göre daha avantajlı olması sebebi ile şebekeye bağlı rüzgâr enerji sistemlerinde ciddi bir artış gerçekleşmiştir. Bu artışla beraber birçok ülke iletim sistemine bağlı büyük güçlü rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlantısına ait özel kısıtlar tanımlayarak bunlar ile ilgili yasal düzenlemeler yapmıştır.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında ilk aşamasında ülkemizde bulunan şebeke bağlantı kriterleri incelenmiştir. İlk olarak mevcut yasal kısıtlar ortaya konulmuş, ardından dünya üzerindeki benzerleri ile kıyaslanmıştır. Buna göre,

- Reaktif güç kontrolü bakımından Danimarka'nın en katı koşullara sahip olduğu görülmüştür. Bu kriter göz önüne alındığında Almanya'nın en esnek koşullara sahip olduğu görülmektedir.
- Frekans değişimi göz önüne alındığında Türkiye, Almanya, İrlanda ve Danimarka'nın bağlantı kriterleri farklı olduğu gözlenmiştir. Fakat 47,5 Hz ile

52,5 Hz arasında rüzgâr santralleri dört ülkede de devamlı olarak çalışabilmektedirler.

- Gerilim değişimi açısından Danimarka’da rüzgar santrallerinin çalışmasına nominal gerilimin - % 10 ile + % 13 arasında izin verilmektedir. Aynı şekilde İrlanda ve Almanya’ da için - % 13 – + % 12 aralığında rüzgar santrallerinin çalışması gerekmektedir. Ülkemize bakılacak olursa bu değerlerin - % 15 ile + % 11 arasında değiştiği görülmektedir.
- Frekans açısından, rüzgâr santrallerinin çalışabileceği en geniş frekans aralığına sahip ülke İrlanda’dır. Ayrıca üretilebilecek maksimum güç miktarının en fazla olduğu ülke Almanya’dır.
- İrlanda grid – code’leri FRT ( Fault Ride Through ) bakımından en büyük süreye sahip olan ülkedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ele alınan örnek bir sisteme bağlanacak bir rüzgar santralinin ülkemiz bağlantı kriterlerini sağlayıp sağlamadığı araştırılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak IEEE-14 baralık test sistemi örnek sistem olarak ele alınmış ve DigSilent yazılım kullanılarak modellenmiştir. Geliştirilen model kullanılarak 8 nolu baraya rüzgar santrali bağlanması durumu analiz edilmiştir. Söz konusu rüzgar santrali için iki farklı güç değeri göz önüne alınmış ve 20 MW ile 40 MW’lık santral kurulu güçleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Gerçeklenen model üzerinde 3. sn’de 100 ms’lik 3 fazlı simetrik bir kısa devre meydana getirilmiş ve elde edilen sonuçlar limit değerler ile karşılaştırılmıştır. Buna göre;

- Hem 20 MW’lık hem de 40 MW’lık santrallerin arızanın giderilmesi sonrasında işletimde kaldığı ve bu açıdan şebeke bağlantı kriterlerinin sağlandığı,
- Analizi gerçekleştirilen her iki santralinde çalışma geriliminin  $\pm 10$ ’luk bandında işletmede kalarak gerilim kısıtlarını sağladığı,
- Aktif güç değişimi bakımından incelenen her iki santralin de arıza sonrasında nominal güç değerine geri döndüğü ve işletimde olduğu,

- Reaktif güç kapasitesi bakımından 20 MW kurulu güce sahip santralin mevcut limitleri sağladığı, buna karşın 40 MW'lık kurulu güce sahip santralin ise reaktif güç kısıtlarını sağlayamadığı,

görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda ele alınan 14 baralı sistem üzerindeki 8 nolu baraya 20 MW kurulu güce sahip olan bir rüzgar santrali şebeke bağlantı kriterlerini sağlayarak bağlanabilmektedir. Buna karşın aynı baraya 40 MW kurulu gücündeki bir rüzgar santralinin bağlanması uygun olmamaktadır.

Gerçekleştirilen çalışma ile şebeke üzerinde kullanılacak olan rüzgar santralinin kapasitesi büyüdükçe sistem üzerinde oluşacak olan etkinin de büyüyeceği görülmüştür. Yapılacak olan planlamalarda da bu durum göz önüne alınmalı ve türbinin bağlanacağı bara üzerindeki etkileri mutlaka analize edilmelidir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Jha, A.R., (2011). Wind Turbine Technology, London.
- [2] Lipnick, P., Jarzyna, W., (2012). "Analysis of Grid Codes Requirements and Some Remarks to Their Implementation for Wind Power Plants", VII Lubuska Conference Naukowo – Techninal – i – MITEL.
- [3] Willi, C., and David, J., (2006). "Analysis of Requirements In Selected Grid Codes", Qrsted DTU, Section of Electric Power Engineering, Technical University of Denmark (DTU).
- [4] Dawei, Z., Lingzhi, Z., Dajun, J., Minhui, Q., Liang, Z., and Lei, Z., (2013). "Modeling Comparison on Control System of Synchronous Generator between DigSILENT Power Factory and PSASP", International Journal of Computer and Electrical Engineering.
- [5] Armenakis, A., (2012). "Grid Code Compliance Test for Small Wind Farms Connected to the Distribution Grid in Cyprus, 8th Mediterranean Conference on Power Generation", Transmission, Distribution and Energy Conversion MEDPOWER 1-3 October 2012, Cagliari, Italy.
- [6] Hassen, D., Jauch, C., Sorensen, P., Lov, F., Blaabjerg, F., (2003). "Dynamic Wind Turbine Models in Power System Simulation Tool DIGSILENT", Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- [7] Sanna, U.J., and Sisu, N., (2013). "Wind Turbine Models – Model Development and Verification Measurements", Research Report, VTT – R - 02333 – 2013.
- [8] Fagan, E., Grimes, S., McArdle, J., Smith, P. and Stronge, M., (2005). "Grid code provisions for wind generators in Ireland", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 3:1241-1247, 20-21 Aug 2005, San Fransisco.
- [9] Sourkounis, C. and Tourou, P., (2013). "Hindawi Publishing Corporation Conference Papers in Energy Volume 2013."
- [10] Machado, I. and Arias, I., (2006). "Grid Codes Comparison", Master Thesis, Department of Electric Power Engineering Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- [11] Gomes, P., Martins, A., Zani, Cesar R., Sardinha, Sergio L. A., (2009). "Connection Requirements and Grid Codes for Distributed Generation", IEEE Integration of Wide-



- Scale Renewable Resources Into The Power Delivery System, 29th-31st July 2009, Calgary, Canada.
- [12] Tsili, M. and Papathanassiou, S., (2008). "A Review of Grid Code Technical Requirements for Wind Farms", IET Renewable Power Generation, 2:271-273, 31 July 2008, Denmark.
- [13] Andrew, S., (2010). "Quantifying Exports and Minimizing Curtailment: From 20% to 50% Wind Penetration in Denmark", BIEE 2010.
- [14] Clemens, J., Julija, M., Thomas, A. and Sigrid, B., (2005). International Comparison of Requirements for Connection of Wind Turbines to Power Systems, WIND ENERGY 8: 295–306, June 2007.
- [15] Müfit Altın, Ömer Göksu, Remus Teodorescu, Pedro Rodriguez, Birgitte-Bak Jensen, Lars Helle, (2010). "Overview of Recent Grid Codes for Wind Power Integration", 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2010.
- [16] Gashi, A., Kabashi, G., Kabashi, S., Ahmetaj, S. and Veliu, V., (2012). "Simulation the Wind Grid Code Requirements for Wind Farms Connection in Kosovo Transmission Grid", Energy and Power Engineering, 4:482-495.
- [17] Bharat, S. and Singh, S.N., (2009). "Wind Power Interconnection into The Power System: A Review of Grid Code Requirements", The Electricity Journal, 1:253-275, June 2009.
- [18] Wang, S., Chen, N., Yu, D., Foley, A., Zhu, L., Li, K. and Yu, L., (2015). "Flexible Fault Ride Through Strategy for Wind Farm Clusters in Power Systems with High Wind Power Penetration", Energy Conversion and Management, 2:239-248.
- [19] Maina, A. and Saulo, M.J., (2014). "The Impacts of Distributed Generation Using High Speed Wind Turbines on Power system Transient Stability", International Journal of Energy and Power Engineering, December 2014.
- [20] Meegahapola, L., Littler, T. and Perera, S., (2013). "Capability Curve Based Enhanced Reactive Power Control Strategy for Stability Enhancement and network Voltage Mangement", International Journal of Electrical Power Energy Systems 52:96-106.
- [21] U.S. Department of Interior, Wind Energy Development Programmatic Environmental Impact Statement, <http://windeis.anl.gov/documents>, 25 Nisan 2013.
- [22] The European Commission Website on Energy Research, <http://www.europa.ee.int>, 5 Mayıs 2015.
- [23] World Wind Energy Association, World Wind Energy Report 2011, [http://www.wwindea.org/webimages/World\\_Wind\\_Energy\\_Report\\_2014.pdf](http://www.wwindea.org/webimages/World_Wind_Energy_Report_2014.pdf), June 2014.
- [24] Global Wind Energy Council, Global Wind Report: Annual Market Update 2011, [http://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual\\_report\\_2011\\_2011\\_](http://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual_report_2011_2011_), March 2012.
- [25] Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Rüzgâr Enerjisi Atlası, <http://www.eie.gov.tr/YEKrepa/REPA>, Mart 2008.
- [26] Consult, A.J., (2001). Wind Turbine Technology Offshore, Dukes Avenue, London, W42AF.

- [27] Kekezoğlu, B., (2013). Yeni Bir Rüzgâr Enerji Üretim Sisteminin Optimal Tasarımı, Gerçeklenmesi ve Performans İyileştirmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [28-29] Lipnick, P., Jarzyna, W., (2012). “Analysis of Grid Codes Requirements and Some Remarks to Their Implementation for Wind Power Plants”, VII Lubuska Conference Naukowo – Techninal – i – MITEL.
- [30] Fagan, E., Grimes, S., McArdle, J., Smith, P. and Stronge, M., (2005). “Grid Code Provisions for Wind Generators in Ireland”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 3:65-76, 20-21 Aug 2005, San Fransisco.
- [31] Riouch, T. and Bachtır, R.E., (2012). “New Control Strategy to Reduce The Fluctuations of The DC Bus of A Wind Turbine Using The DFIG”, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 4:98-106.
- [32] Erlich, I., Winter, W. and Dittrich, A., (2006). “Advanced Grid Requirements for The Integration of Wind Turbines into The German Transmission System”, Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting (PES’06), June 2006.
- [33] Koç, E. ve Güven, A.N., (2011). “Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin Modellenmesi ve Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yeteneklerinin İncelenmesi”, EMO Bilimsel Dergi, 1:15-27, Haziran 2011.

## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Muhammed Emin HACİBEKİROĞLU  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 13.02.1988 - ELAZIĞ  
**Yabancı Dili** : İNGİLİZCE  
**E-posta** : m\_emin\_hbo@hotmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik Tesisleri	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lise	Fen	Hulusi Sayın Lisesi	2006

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2015-Devam Ediyor	EPDK	Enerji Uzman Yardımcısı
2012-2014	Necmettin Erbakan Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

## **YAYINLARI**

### **Bildiri**

M. E. Hacıbekiroğlu, B. Kekezoğlu, 'Assessment of Wind Turbine Grid Connection Requirements in Turkey', Proc. of The Second Intl. Conf. On Advances in Mechanical and Automation Engineering- MAE 2015, doi: 10.15224/ 978-1-63248-045-3-45

### **Proje**

1. "Rüzgar Santrallerinin Şebeke Bağlantı Kriterlerinin İncelenmesi", YTÜ BAPK, Proje No: 2015-04-02-YL01, 26.01.2015 -26.01.2016