

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜZGAR SANTRALLERİNDE OLUŞAN AŞIRI
GERİLİMLERİN TRANSFORMATÖRLER ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİ

OĞUZ HAN IŞIK

KOCAELİ 2022

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜZGAR SANTRALLERİNDE OLUŞAN AŞIRI
GERİLİMLERİN TRANSFORMATÖRLER ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİ

OĞUZ HAN IŞIK

Prof.Dr. Engin Özdemir
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Doç.Dr. Murat Ayaz
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Fatih Mehmet Nuroğlu
Jüri Üyesi, Karadeniz Teknik Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 13.06.2022

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmanın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılımı programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

☐ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☒ Bu tez çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler TÜBİTAK tarafından Yurtiçi Sanayiye Yönelik 2210-d Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında maddi desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Oğuz Han IŞIK

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisan üstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Oğuz Han ŞIK

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bilgisi ve tecrübesiyle destek olan danışman hocam Prof. Dr. Engin Özdemir'e, yurtiçi sanayiye yönelik 2210-d yüksek lisans burs programı ile beni destekleyen TÜBİTAK'a, yüksek lisans tez çalışması süresince beni destekleyen çalıştığım şirket SCHNEIDER ELECTRIC'e ayrıca yüksek lisans tez çalışmam için beni cesaretlendirip desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Haziran - 2022

Oğuz Han IŞIK



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
TABLolar DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1.GİRİŞ.....	1
2. RÜZGÂR ENERJİSİ.....	3
2.1. Rüzgâr Enerjisi Kaynağı ve Önemi	3
2.2. Rüzgâr Enerjisinin Tarihçesi, Türkiye’deki ve Dünya’daki Durumu.....	4
2.3. Rüzgâr Enerjisinin Çevresel Etkileri	9
2.6. Rüzgâr Türbinlerinin Bileşenleri	20
2.7. Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Jenaratör Tipleri	22
3. RÜZGÂR SANTRALLERİNİN GÜÇ KALİTESİNE ETKİLERİ.....	24
3.1. Rüzgâr Santrallerinin Elektrik Şebekesine Bağlantısı	25
3.2. Rüzgâr Santrallerinin Elektrik Şebekesine Bağlantı Kriterleri.....	28
3.3. Gerilim Kalitesine Etkileri.....	33
3.4. Rüzgâr Türbinlerinde Harmonik Etkisi	38
4. RÜZGÂR SANTRALİNDE GERİLİM DEĞİŞİMİN ETKİSİNİN ANALİZİ	40
4.1. Anahtarlama Aşırı Gerilimlerin Analizi	40
4.2. Üç Faz-Toprak Kısa Devre Arızasının Etkisinin İncelenmesi.....	42
4.3. Kesici 1’de Anahtarlamanın Etkisinin İncelenmesi.....	48
5. RÜZGÂR SANTRALLERİNİN TRANSFORMATÖRLERE ETKİSİ	53
5.1. Anahtarlama Aşırı Gerilimlerin Transformatörlere Etkisi ve Önlemler.....	53
5.2. Elektriksel Deşarj Etkisi	55
5.3. Harmonik Etkisi	56
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR.....	62
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	66

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	100 metrede yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı	6
Şekil 2.2.	Rüzgâr türbinlerinin Türkiye’deki dağılımı	7
Şekil 2.3.	Rüzgâr enerjisinin yıllara göre kurulu gücü	7
Şekil 2.4.	Toplam rüzgâr santrali kurulum kapasitelerinin tarihsel gelişimi.....	8
Şekil 2.5.	2030’a kadar gerçekleşmesi gereken yeni küresel rüzgâr kurulumları	8
Şekil 2.6.	2020 yılı itibari ile karasal rüzgâr kurulu gücünün ülkelere göre dağılımı.....	9
Şekil 2.7.	2020 yılı itibari ile deniz üstü rüzgâr kurulu gücünün ülkelere göre dağılımı.....	9
Şekil 2.8.	Yıllık tahmini kuş ölümleri ve nedenleri.....	13
Şekil 2.9.	Rüzgâr enerjisi elektrik üretim sistemi blok diyagramı	14
Şekil 2.10.	Rüzgâr türbinlerinin sınıflandırılması	16
Şekil 2.11.	Rüzgâr etkisine göre önden rüzgâr alan(a), arkadan alan(b).....	18
Şekil 2.12.	Kanat sayılarına göre rüzgâr türbinleri.....	18
Şekil 2.13.	Darrieus rüzgâr türbinleri	19
Şekil 2.14.	Savonius rüzgâr türbinleri	20
Şekil 2.15.	Eğik eksenli rüzgâr türbinleri	20
Şekil 2.16.	Rüzgâr türbin elemanları	21
Şekil 2.17.	Rüzgâr türbini oluşturan alt birimlerin maliyet dağılım grafiği	21
Şekil 2.18.	Rüzgar türbin jeneratörü tip 1	22
Şekil 2.19.	Rüzgar türbin jeneratörü tip 2	22
Şekil 2.20.	Rüzgar türbin jeneratörü tip 3	23
Şekil 2.21.	Rüzgar türbin jeneratörü tip 4	23
Şekil 3.1.	Örnek bir güç sistemi bağlantısı	25
Şekil 3.2.	Örnek rüzgar santralinin dağıtım şebekesine bağlantısı	26
Şekil 3.3.	Üç fazlı bir arıza sırasında şebeke kodlarının öngördüğü gerilim profilleri	30
Şekil 3.4.	Arıza durumunda rüzgâr santrallerinden beklenen devam edebilme yeteneği	31
Şekil 3.5.	Rüzgâr santrallerinden beklenen frekans tepkisi	33
Şekil 4.1.	ETAP’ta simulasyonu yapılan RES’e ait tek hat şeması.....	41
Şekil 4.2.	RT1’e bağlı TR1 transformatöründen elde edilen güç.....	43
Şekil 4.3.	RT1’e bağlı TR1 transformatöründen elde edilen akım.....	43
Şekil 4.4.	RT1’e bağlı TR1 transformatörün primerindeki değişim.....	44
Şekil 4.5.	RT1’e bağlı TR1 transformatörüne RT1’den aktarılan güç	44
Şekil 4.6.	RT1’e bağlı TR1 transformatörüne RT1’den aktarılan akım.....	45
Şekil 4.7.	RT1’e bağlı TR1 transformatörün sekonderindeki değişim.....	45
Şekil 4.8.	RT1 ‘de arıza anında gerçekleşen gerilim düşümü ve artışı	46
Şekil 4.9.	RT1 ‘de arıza anında gerçekleşen aktif güç dalgalanması	46
Şekil 4.10.	RT1 ‘de arıza anında oluşan akımın dalgalanması.....	47
Şekil 4.11.	RT1 ‘de oluşan arıza anında en yakın türbin RT2’nin gerilim değişimi	47
Şekil 4.12.	Kesici1’de oluşan anahtarlama ardından RT1 de oluşan gerilim karakteristiği	49
Şekil 4.13.	Kesici1’de oluşan anahtarlama ardından en yakın rüzgar türbini olan RT2’ de oluşan gerilim karakteristiği	49

Şekil 4.14. Kesici1’de oluşan anahtarlama ardından TR1 den elde edilen akıma etkisi.....	50
Şekil 4.15. Kesici1’de oluşan anahtarlama ardından TR1 den elde edilen güce etkisi.....	50
Şekil 4.16. Kesici1’de oluşan anahtarlama ardından RT1’e bağlı TR1 transformatörün primerindeki gerilim değişimi	51
Şekil 4.17. Anahtarlama anında RT1’e bağlı TR1 transformatörüne RT1’den aktarılan akım	51
Şekil 4.18. Anahtarlama anında RT1’e bağlı TR1 transformatörüne RT1’den aktarılan güç	52
Şekil 4.19. Kesici1’de oluşan anahtarlama ardından RT1’e bağlı TR1 transformatörün sekonderindeki gerilim değişimi.....	52
Şekil 5.1. Manyetik çekirdekli bir elemanın demir kayıpları	57



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Rüzgâr ve hidroelektrik santrallerinin kurulu güç ve enerji üretimine göre arazi kullanım oranları	10
Tablo 2.2. Rüzgar türbinlerinin gürültü seviyeleri ..	11
Tablo 2.3. Elektrik enerjisi üretiminde küresel ısınmaya ve asit yağmurlara neden olan NO _x , SO ₂ , CO ₂ emisyonları	11
Tablo 2.4. 1 kWh’lik elektrik enerjinin rüzgâr enerjisi üretimi sonucunda salınımı önlenen emisyonların miktarı	12
Tablo 2.5. Kanat uç hızı oranına göre rotor kanadı seçimi.....	17
Tablo 3.1. Türkiye şebeke yönetmeliğine göre üretim santrallerinin frekans limitleri	33
Tablo 4.1. Rüzgar santrali güç sistem parametreleri	40
Tablo 5.1. 2011 ve 2012 İçin rüzgar santrali transformatörlerinin ile şebeke transformatörlerinin toplam yanıcı gaz konsantrasyonlarının karşılaştırılması.....	56

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Türbin pervanelerinin taradığı alan, (m ²)
D	: Kanat boyu,(m)
Kf	: Gerilim kırpışması adım faktörü
ku(ψ k)	: Gerilim değişimi faktörü
P	: Hava yoğunluğu, (kg/m ³)
Pw	: Rüzgâr türbin gücü, (W)
Sk	: Kısa devre görünür güç, (MVA)
Sn	: Nominal görünür güç, (MVA)
V	: A'ya göre normal rüzgâr hızı, (m/s)
λ	: Rotor kanadı uç hızı, (m/s)
Ψ k	: Sistem empedans açısı, (°)

Kısaltmalar

d	: Ani Gerilim Düşümü
DERT	: Dikey Eksenli Rüzgar Türbini
KS	: Kanat Sayısı
kV	: Kilovolt
MVA	: Mega Volt Amper
N ₁₀	: 10 Dakika İçinde Anahtarlama İşlemi Sayısı
N ₁₂₀	: 2 Saat İçinde Anahtarlama İşlemi Sayısı
P	: Uzun Süreli Gerilim Kırpışması
Pst	: Kısa Süreli Gerilim Kırpışması
RES	: Rüzgar Enerji Santrali
RT1	: 1 Numaralı Rüzgar Türbini
RT2	: 2 Numaralı Rüzgar Türbini
REPA	: Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası
TR1	: 1 Numaralı Transformatör
YERT	: Yatay Eksenli Rüzgar Türbini

RÜZGÂR SANTRALLERİNDE OLUŞAN AŞIRI GERİLİMLERİN TRANSFORMATÖRLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

ÖZET

Günümüzde artan enerji ihtiyacı ve fosil yakıtların kullanımının yerine çevreyi kirletmeyen enerji kaynaklarına talebin artmasıyla birlikte rüzgâr enerjisinin kullanımı da artış göstermektedir. Türkiye’de 2012 yılında kurulu güç içerisinde rüzgâr enerjisinin payı %2,45 iken 2022 Mart ayı itibariyle %10,8 olmuştur. Dünya’da da benzer bir artış söz konusudur. Yakın gelecekte fosil kaynakların tükeneceği öngörülerek yenilenebilir enerji ve rüzgâr enerjisinin payı daha da artacağı tahmin edilmektedir. Kurulumu yapılan rüzgâr türbinlerinin güç kapasitesi ve türbin boyutları da gelişen teknoloji ve taleplerle birlikte artmaktadır.

Rüzgâr enerjisi tahmin edilmesi zor ve rüzgâr hızının da sürekli olarak değişmesinden kaynaklı olarak güç sistemine etkileri ve rüzgâr türbinlerine çeşitli etkileri olmaktadır. Rüzgâr türbininde meydana gelen arızalar, güç sistemi içerisinde rüzgar türbinlerinin payı arttıkça şebekeyi olumsuz etkilemekte ve arıza durumunda devam edebilme yeteneği, harmonik etkileri, gerilim dalgalanmaları kontrol altına alınabilmelidir.

Rüzgâr türbinlerinde çalışan transformatörler ise rüzgâr türbinlerinde gerçekleşen arızalardan en çok etkilenen ve elektrik üretiminde kesintiye sebep olan ana ekipmanlardan biridir. Transformatörler, rüzgâr türbinlerinde gerçekleşen aşırı gerilim ve gerilim düşümlerine uygun olarak tasarlanmadığı durumlarda arızalanabilmekte ve kullanım ömürleri azalabilmektedir.

Bu çalışmada örnek bir rüzgâr santralinde gerçekleşen 3 faz-toprak kısa devre arızası, rüzgâr türbin barasına bağlı olan kesicinin açma-kapama yapmasıyla sebebiyle oluşan aşırı gerilim ve gerilim düşümlerinin rüzgâr türbini ve transformatöre etkileri incelenmiş ve transformatörlerin bu etkilerden etkilenmemesi için alınması gereken önlemler açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aşırı Gerilim, Rüzgâr Enerjisi, Transformatör.

THE EFFECTS OF OVERVOLTAGE ON TRANSFORMERS IN WIND POWER PLANTS

ABSTRACT

Nowadays, the use of wind energy is increasing with the increasing energy need and the demand for energy sources that do not pollute the environment instead of the use of fossil fuels. While the share of wind energy in the installed power in Turkey was 2.45% in 2012, it became 10.8% as of March 2022. There is a similar increase in the world. Since fossil resources are predicted to be depleted in the near future, the share of renewable energy and wind energy is expected to increase further. With the developing technology and demands, the power capacity of the installed wind turbines is also increasing.

Wind energy impacts to electrical grid due to the changing of wind speed. As the percentage of wind power in the electrical grid increases, faults increase and some effects such as harmonic effects and overvoltages may occur in the electrical grid. Wind turbine transformers are effecting due to the all these effects especially overvoltages. If transformers are not designed in accordance with the overvoltage that occur in wind turbines, they may fail and their transformer's aging may be shortened.

In this thesis, the effects of overvoltage and voltage drops on the wind turbine and transformer due to a 3-phase-earth short-circuit fault in a sample wind power plant and the opening and closing of the circuit breaker connected to the wind turbine busbar were investigated and the precautions to be taken to prevent transformers from being affected by these effects are explained.

Keywords : Overvoltage, Wind Energy, Transformer.

1.GİRİŞ

Enerji ihtiyacı arttıkça yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi gün geçtikçe artmaktadır. Bu artışın nedeni, nüfus artışı ve teknolojinin getirdiği yeniliklerden kaynaklanmaktadır. Rüzgâr enerjisi, en çok ivmeye sahip enerji kaynaklarından biridir. Geçtiğimiz beş yılda %20’lik bir artış hızı yakalamıştır. Fosil kaynaklar sınırlı olduğundan ve zamanla tükeneceğinden dolayı artan talebi karşılayamamaktadır. Fosil kaynaklara olan bağımlılığın azalmasıyla, çevre kirliliğini azalacağı, elektrik enerjisi üretim maliyetini düşüreceği ve gaz emisyonuna sebep olmaması nedeniyle rüzgâr enerjisinin kullanımını önemli ölçüde artmaktadır.

Fosil kaynakların kullanıldığı elektrik santrallerinde planlanan üretim ile gerçekleşen üretim birbiriyle tutarlı olmaktadır. Fakat yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar enerjisinde tahmin ve planlanan elektrik enerjisi üretimi arasında önemli bir fark oluşmaktadır. Rüzgârın tahmininin zor olması veya rüzgâr hızının değişkenlik göstermesi, uzun süreli bakım planlamasının yapılmasında ve rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminde zorluklar ortaya çıkmaktadır. Rüzgâr santrallerinin verimli bir şekilde çalışması önemli bir konudur.

Rüzgâr santrallerinden elektrik enerjisi üretimi, şebekede dengesiz yüklenmeye neden olabilir ve şebekenin işletilmesini zorlaştırabilir. Rüzgâr santrallerinin herhangi bir elektrik şebekesine bağlanmasının güç kalitesine de, gerilimdeki değişiklikler, harmonikler, aşırı yüklenme, dengesiz yüklenme, gerilim düşüşleri ve gerilimdeki kırpışmalar gibi etkileri olmaktadır.

Üretilen elektrik enerjisinin kesintisiz olması, güç kalitesinde probleme sebep olmayacak şekilde iletilebildiğinde konutlarda kullanılmakta olan elektronik cihazlara ve elektrik ile çalışan makinelere, sanayide kullanılan endüstriyel ekipmanların zarar görmesini engelleyecektir.

Rüzgâr santrallerinde çalışan transformatörler, en pahalı ve en önemli ekipmanlarından biridir. Rüzgâr hızının değişimi ve bu değişimden kaynaklanan etkilerden dolayı dengesiz yüklenme, gerilim değişimleri, aşırı yüklenme, harmonikler gibi etkiler ortaya çıkmakta ve transformatörün kararlı olarak çalışmasına engel olabilmekte,

transformatörün izolasyonlarının ömrünün azalmasına, transformatörün arızalanmasına ve ısınmasına bu sebeple de devreden çıkıp rüzgâr santralinin elektrik enerjisi üretmez hale gelmesine neden olabilmektedir. Bu çalışmada rüzgâr santrallerinden elektrik enerjisinin şebekeye bağlanması nedeniyle transformatörler üzerindeki etkiler ve güç kalitesindeki bozulmalar incelenmektedir.



2. RÜZGÂR ENERJİSİ

2.1. Rüzgâr Enerjisi Kaynağı ve Önemi

Rüzgâr, güneş kaynaklı bir enerji türüdür. Güneş enerjisinin Dünya'ya ulaşmasıyla yeryüzünde oluşan sıcaklık farkı basınç değişimlerine neden olmaktadır. Basınç değişimleriyle birlikte rüzgâr enerjisi meydana gelmektedir. Rüzgâr enerjisinden verimli bir şekilde yararlanabilmek için rüzgâr potansiyeli doğru bir şekilde belirlenmelidir. Yeryüzüne gelen güneş enerjisinin tahmini olarak %2'si rüzgâr enerjisi olarak kullanılabilir.

Bu bağlamda, oluşan enerji rüzgâr hızının küpü ile orantılı olduğu için en önemli parametre rüzgâr hızıdır.

Dünya nüfusunun artması, teknolojik gelişmelerde ilerleme yaşanması ve yaşam standartlarının artmasıyla birlikte dünya çapında enerjiye olan ihtiyaç artmıştır. Öte yandan, artan ekonomik ve çevresel kaygılar, bu enerji talebini verimli sistemler ve temiz enerji kaynakları ile karşılama eğilimindedir.

Rüzgâr enerjisinin özellikleri, bölgesel coğrafi farklılıklar ve yeryüzünün heterojen şekilde ısınmasına sebep olarak, zamana ve bölgeye göre değişiklik gösterir. Rüzgâr enerjisi hız ve yön olarak iki farklı parametreye sahiptir. Rüzgâr hızı yükseklik ile doğru orantılı olarak artar ve rüzgâr enerjisinin gücü de hızının küpü ile doğru orantılı olarak değişir. Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretiminin ilk yatırım maliyetinin yüksek olması, kapasite faktörlerinin düşük olması ve rüzgâr enerjisine bağlı olarak değişken enerji üretimi gibi dezavantajları olmasına rağmen, rüzgâr enerjisi yenilenebilir ve temiz ve çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Tükenmez bir enerjidir, doğal kaynaklıdır ve ücretsiz bir enerji kaynağıdır. Gelişen teknolojiyle üretim maliyeti, günümüzde geleneksel santraller ile rekabet edebilmektedir. Bakım ve işletme maliyetleri düşüktür. Üretim teknolojisi karmaşık değildir ve işletimi kolaydır. Rüzgâr santralının kurulumu kısa bir sürede gerçekleşebilir.

Elektrik enerjisi, taşınması ve dağıtımı kolay, tüketim sonrası atık bırakmayan nihai bir enerji şeklidir. Bu özelliklerinden dolayı artan küresel enerji ihtiyacındaki payını en fazla artırması beklenen enerji türüdür. Yapılan çalışmalarda, önümüzdeki 25 yılda beklenen

küresel nihai enerji ihtiyacı artışının %70'inin elektrik enerjisi üzerinden gerçekleşmesinin beklendiğini gösteriyor(Uslu ve diğ., 2018).

Enerji tedariki konusundaki endişelerin yanı sıra, enerjinin sürdürülebilirliği, güvenilirliği ve kalitesi konusundaki hassasiyet de hiç olmadığı kadar yüksek olmaktadır. Bu durum elektrik enerjisi sistemlerinde de hissedilmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları, ekonomik ve çevresel avantajları nedeniyle diğer geleneksel enerji kaynaklarından ayrılmaktadır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elektrik enerjisi üretimine ilgi her geçen gün artmaktadır. Günümüzde bu tür tesislerin sayısı oldukça fazladır ve daha da artması beklenmektedir.

Rüzgâr türbinlerinden, elektrik enerjisi üretimi belirli rüzgâr hızı aralıklarında olabilmektedir. Rüzgâr türbinlerinin enerji üretimine başlamaları ve enerji üretimini durdurması belirli bir rüzgâr hızı aralıklarında olur. Yani rüzgâr türbinlerinin elektrik enerjisi üretimi başlangıç rüzgâr hızı ve kesme rüzgâr hızı arasında olmaktadır. Günümüz rüzgâr türbinlerinin başlangıç rüzgâr hızı 2-4 m/s, nominal hızları 10-15 m/s ve kesme rüzgâr hızı ise 25-35 m/s arasındadır. Rüzgâr türbinleri için belirlenmiş olan bir rüzgâr hızında, türbinden üretilen elektrik enerjisi gücü en yüksek güce ulaşır. Bu en yüksek güce nominal güç ve bu rüzgâr hızına nominal hız adı verilmektedir. Rüzgâr türbinlerinin hasar görmemesi için belirli bir rüzgâr hızından rüzgâr türbinleri devreden çıkmalıdır. Bu en yüksek rüzgâr hızına türbininin kesme rüzgâr hızı olarak adlandırılmaktadır.

2.2. Rüzgâr Enerjisinin Tarihçesi, Türkiye'deki ve Dünya'daki Durumu

2.2.1. Rüzgâr Enerjisinin Tarihçesi

Rüzgâr enerjisi ilk olarak, M.Ö 2800 yılında Orta Doğu'da kullanılmıştır. M.Ö 17. yy' da Mezopotamya'da, sulama amaçlı kullanılmıştır. Literatürde yine bu dönemlerde, Çin'de de tarım bölgelerinde sulama amaçlı kullanılmıştır.

Rüzgâr enerjisi tarih boyunca ve günümüzde karada kullanılmasının yanında denizde yelkenlinin, hareket edebilmesi için de kullanılmaktadır. Bilinen ilk yelkenli gemi M.Ö 4000'li yıllarında kullanılmıştır. Bu bilgiye göre, rüzgâr enerjisinin M.Ö 4000'li yıllardan itibaren kullanıldığını söyleyebiliriz.

Tarihte rüzgâr enerjisinden ilk kez Yunan mühendis Heron bahsetmiştir. Rüzgâr enerjisiyle çalışan bir su pompası icat etmiş ve ardından su pompasını kullanarak yel değirmenleri inşa edilmiştir.

Tarihte ilk yel değirmeni, ülkemiz sınırları içinde yer alan İskenderiye yapılmıştır. Yel değirmenleri, Avrupa'daki Sanayi Devrimi'nden önce, tarımsal ürünleri öğütmek, bu tarım ürünlerine su ulaştırmak gibi amaçlarla geliştirilmiş ve Sanayi Devrimi'ne kadar hızla yayılmış. Sanayi Devriminde buhar makinesi, odun ve kömür gibi yakıtlardan enerji üretilmeye başlanmasıyla, rüzgâr enerjileri yerini bu fosil yakıtlara bırakmaya başlamıştır.

Rüzgâr enerjisini mekanik enerjiye çeviren yel değirmenleri yanında günümüzde de, aerogeneratör olarak tanımlanabilen rüzgâr türbinleri sayesinde de rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. Rüzgâr türbini, rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren bir sistemdir.

Tarihte bilinen ilk rüzgâr türbinleri 1890'lı yılların başında Danimarka' da yapılmıştır. Rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi ise 1891 yılında, Paul la Cour isimli mühendis tarafından yine Danimarka' da yapılmıştır.

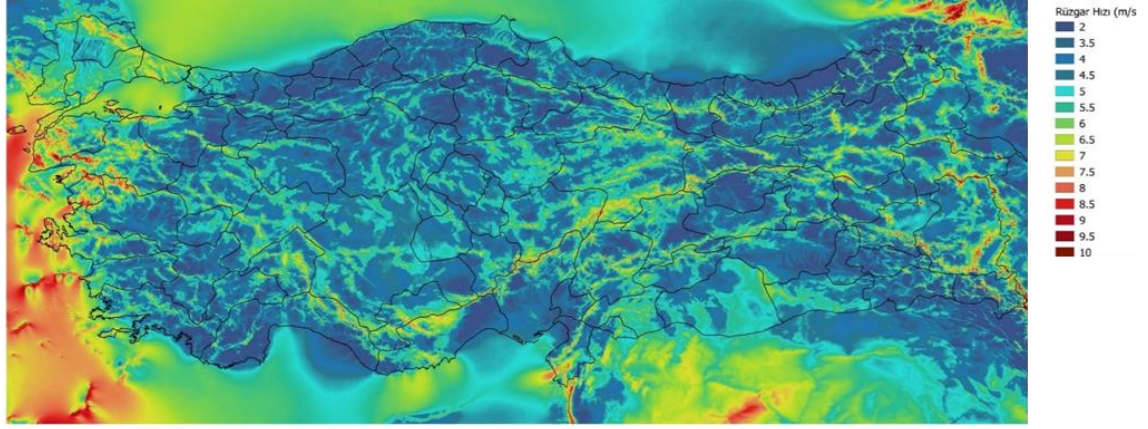
20. yüzyıl boyunca rüzgâr türbinlerindeki gelişmeler devam etmiştir ve 1960'lı yıllarda, iki kanatlı rüzgâr tribünleri geliştirilmiştir.

1980'li yıllara gelindiğinde ise farklı tiplerde rüzgâr türbinleri geliştirilmiştir. 1980'li yıllara kadar tek tip rüzgâr tribünü kullanılıyordu. Gelişen teknolojiyle düşey eksenli / yatak eksenli tribünleri ve 3 kanatlı türbinler üretilmeye başlanmıştır.

2.2.2. Rüzgâr Enerjisinin Türkiye'deki Durumu

2006 yılında hazırlanmış olan Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlasına(REPA-V1) göre Türkiye'de 50 metre rakımda ve 7,5 m/s hızının üzerindeki rüzgâr hızlarına sahip alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr santralı kurulabileceği kabul edilmektedir. Buna göre Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası(REPA) hazırlanmıştır. Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli 48.000 MW olarak belirlenmiştir.

Bu potansiyele karşılık gelen toplam alan Türkiye yüz ölçümünün %1,30'una denk gelmektedir.



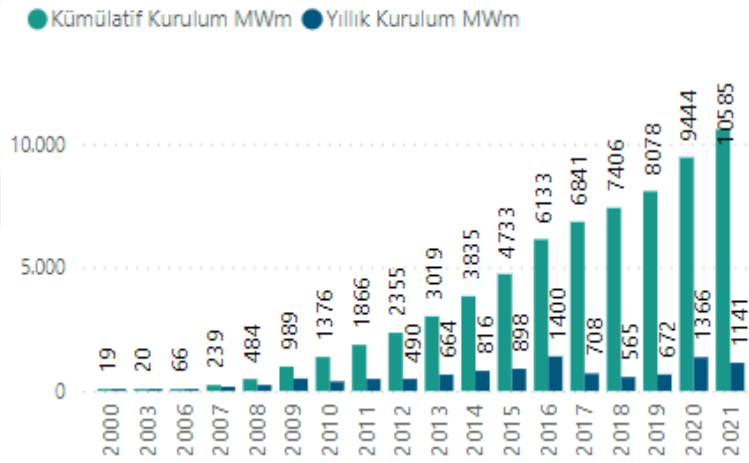
Şekil 2.1. 100 metrede yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı(URL-1, 2022)

Buna göre Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası, Avrupa Birliği finansmanı ve Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası'nın da desteğiyle Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından Mayıs 2020'de güncellenmiştir. Güncellenen Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası ile yer seviyesinden 30, 60, 100 ve 150 metre yükseklikler için rüzgâr kaynak bilgileri(rüzgâr hızı, Weibull-A ile Weibull-k parametreleri, sıcaklık, basınç ve hava yoğunluğu) ve 30 ve 100 metre yükseklikler için rüzgâr yönü verileri üretilmiş ve bu parametreler kullanılarak güç yoğunluğu, rüzgâr sınıfı ve 3 MW gücündeki bir rüzgâr türbini için kapasite faktörü ile yıllık enerji üretimi değerleri hesaplanmıştır. Şekil 2.1'de 100 metrede yıllık ortalama rüzgar hızı dağılımı görülebilmektedir. Bu güncelleme ile elde edilen rüzgâr kaynak bilgileri, gelişen rüzgâr türbini teknolojileri, günümüz yatırım maliyetleri ve değişen kullanılamaz alan kabulleri gibi faktörler dikkate alınarak Türkiye'de kurulabilecek rüzgâr elektrik santrallerinin toplam kapasitesinin geliştirilmesine devam edilmektedir(URL-1, 2022). Şekil 2.2'de Rüzgâr türbinlerinin Türkiye'deki dağılımı görülebilmektedir.

Aralık 2021 sonu itibariyle kurulu gücümüz içindeki rüzgâr enerjisi payı 10.585 MW olup, rüzgâr enerjisinin kurulu gücünün yıllar içerisindeki değişimi ve toplam elektrik enerjisi üretimi içerisindeki payı aşağıdaki şekil 2.3'de yer almaktadır.



Şekil 2.2. Rüzgâr türbinlerinin Türkiye’deki dağılımı(URL-1, 2022)

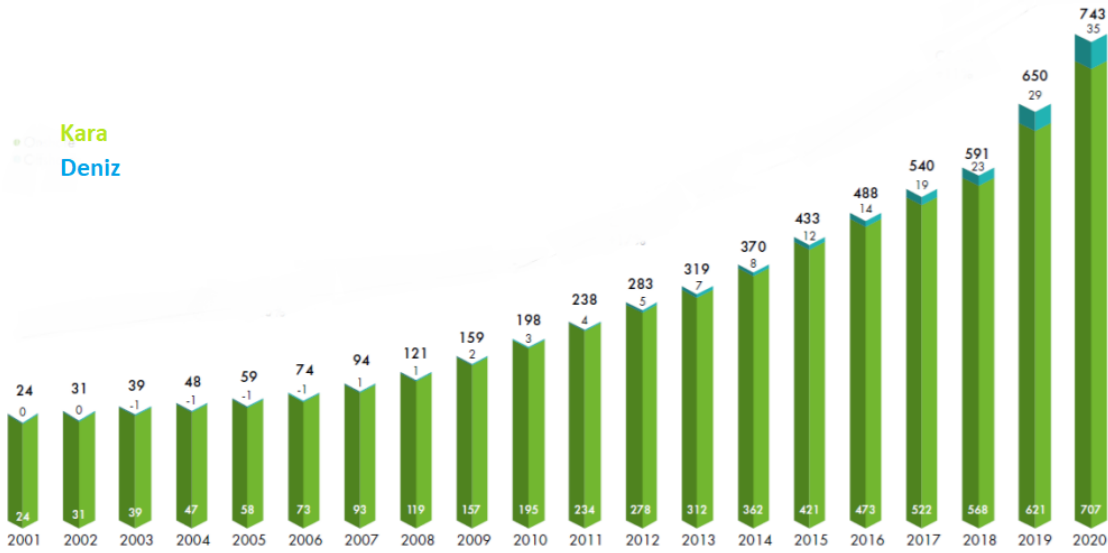


Şekil 2.3. Rüzgâr enerjisinin yıllara göre kurulu gücü(URL-1, 2022)

2.2.3. Rüzgâr Enerjisinin Dünya’daki Durumu

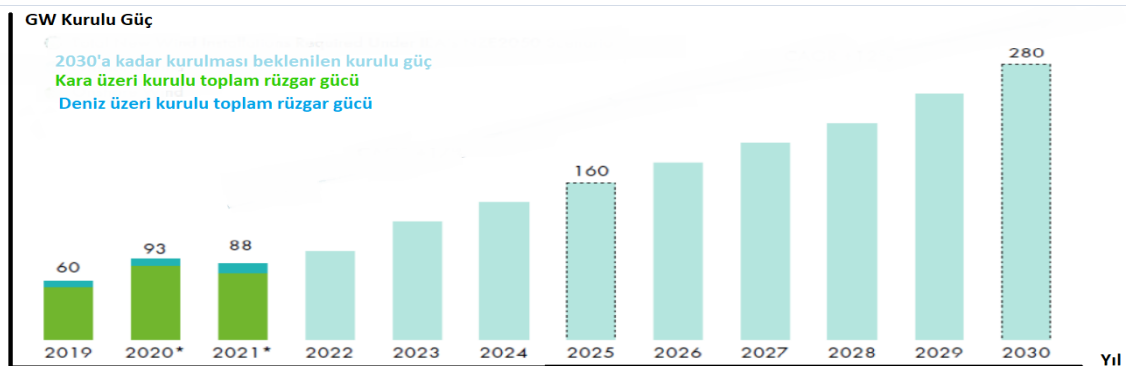
2020 yılında Dünyada rüzgâr enerjisi yıllık 53% oranda rekor seviyede büyümüştür. Pandemi’nin etkisinde geçen 2020 yılında tedarik zincirinde ve ham maddede ciddi problemler olmasına rağmen 93 GW’dan fazla rüzgâr enerjisi kurulumu gerçekleşmiştir. Bununla birlikte dünyada toplamda kümülatif rüzgâr enerjisi kapasitesi 743 GW’a çıkmıştır. Bu sayede 1.1 milyar ton CO₂ salınımının azaltılması sağlanmıştır. Karada kurulan rüzgâr kapasitesi 2019 yılına göre 59% artış göstermiş, Çin ve ABD bu kapasite

artışında en büyük pazar payına sahip olmuştur. Şekil 2.4'te Dünya'daki rüzgar santrallerinin son 20 yıldaki gelişimi görülebilmektedir.

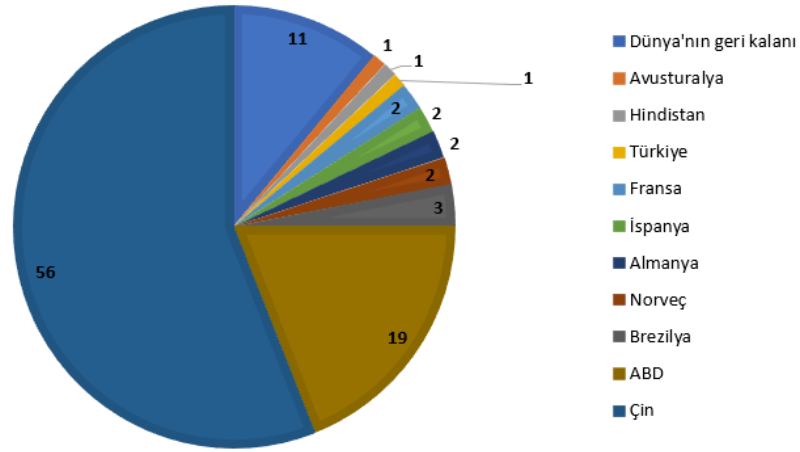


Şekil 2.4. Toplam rüzgâr santrali kurulum kapasitelerinin tarihsel gelişimi (URL-4, 2022)

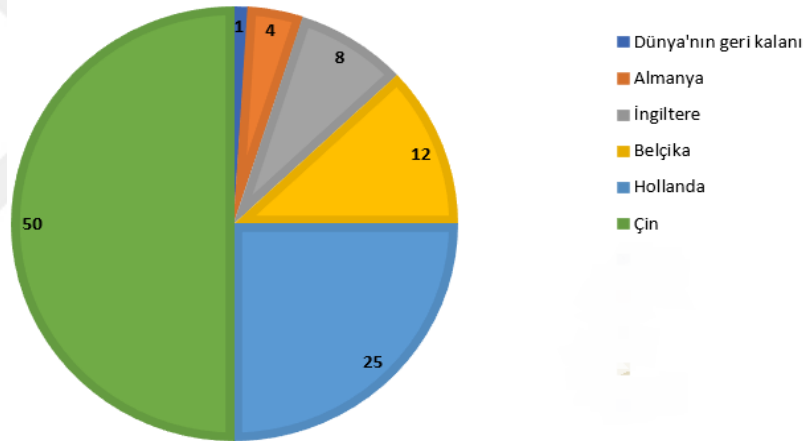
Dünyada rüzgâr enerjisi geçtiğimiz 10 yılda rüzgâr enerjisi potansiyeli yaklaşık olarak dört katına çıkmıştır. Özellikle Asya Pasifik, Kuzey Amerika ve Latin Amerika'daki kara kurulumlarında 74 GW yeni rüzgâr kapasitesi kurulmuştur ve 2019 yılına göre 76% artış sağlanmıştır. Avrupa'da sadece 0,6%'lık bir büyüme gerçeklemiştir. Orta Doğu ve Afrika'da 2019 yılıyla yaklaşık olarak aynı seviyede kalmıştır(URL-4, 2022). Şekil 2.5'te 2030 yılına kadar toplam kurulu gücün 280 GW olacağı öngörülmüştür.



Şekil 2.5. 2030'a kadar gerçekleşmesi gereken yeni küresel rüzgâr kurulumları(GW), (URL-4, 2022)



Şekil 2.6. 2020 yılı itibari ile karasal rüzgâr kurulu gücünün ülkelere göre dağılımı (URL-4, 2022)



Şekil 2.7. 2020 yılı itibari ile deniz üstü rüzgâr kurulu gücünün ülkelere göre dağılımı (URL-4, 2022)

Şekil 2.6'da ülkelere göre karaya kurulu rüzgâr gücü dağılımı, Şekil 2.7'de ülkelere göre deniz üzerine kurulu rüzgâr gücü görülmektedir. Karaya ve denize kurulu rüzgâr gücünde Çin'in açık ara önde olduğu görülmektedir.

2.3. Rüzgâr Enerjisinin Çevresel Etkileri

Rüzgâr türbinlerinin, herhangi bir emisyon etkisinin olmaması ve sera etkisine sahip olmamasından dolayı Dünyada rüzgâr enerjisi kullanımı hızlı bir artış göstermektedir. Ancak rüzgâr türbinleri de her ne kadar çevreci santraller olsa da çevreye etkileri olmaktadır.

Rüzgâr türbinlerinde oluşabilecek en önemli çevresel etkilerden biri gürültüdür. Gürültü etkisini en aza indirebilmek için, rüzgâr santralleri yerleşim bölgelerinden en uzak kısımlara veya yükselti farklılıklarının olduğu ve bu sayede gürültünün çok az hissedildiği bölgelere inşa edilmektedir. Günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte gürültü seviyeleri giderek düşmektedir. Yüksek hızla dönen rüzgâr türbin kanatları, kuş ölümlerine neden olabilmektedir. Ancak yürütülen çalışmalarda, bu kuş ölümlerinin ciddi boyutlarda olmadığı ortaya konulmuştur.

Rüzgâr türbinlerinin küresel ısınmaya ve asit yağmurlarına etkisi yoktur. CO, CO₂, NO_x emisyonlarına neden olmaz, insan sağlığına ve bitki örtüsüne de olumsuz etkisi olmamaktadır. Rüzgâr santrallerinin çevresel etkileri, gürültü, arazi kullanımı, habitata etkisi, elektromanyetik alana etkisi gibi etkiler olmaktadır.

2.3.1. Arazi Kullanımı

Rüzgâr santrallerinde rüzgâr türbinlerinin kurulduğu alan, toplam alanın %1-2'si kadardır. Geriye kalan alanlar tarım ve hayvancılıkta kullanılabilir. Rüzgâr santrallerinde birim kurulu güç başına ihtiyaç olan gerekli alan 0,1-0,2 km²/MW olarak değerlendirilebilir. Rüzgâr santrallerinin kaplandığı alan diğer santrallerle karşılaştırıldığında çok küçük alanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Tablo 2.1.'de görüldüğü üzere rüzgâr santrallerinin hidroelektrik santrallerine göre daha az alan kapladığı görülebilmektedir.

Tablo 2.1. Rüzgâr ve hidroelektrik santrallerinin kurulu güç ve enerji üretimine göre arazi kullanım oranları(Özkaya ve diğ., 2008)

Santral Türü	Kurulu Güce Göre Arazi Kullanım Oranı (km ² /GW)	Üretilen Enerjiye Göre Arazi Kullanım Oranı (km ² /GW)
Hidroelektrik Santrali	1600-900	0,75
Rüzgâr Santrali	47-160	0,12

2.3.2. Gürültü Etkisi

Rüzgâr santrallerinden kaynaklı gürültü en önemli problemlerden biridir. Rüzgâr santrallerinde gürültü iki sebepten dolayı oluşmaktadır. İlki santralin mekanik aksamından kaynaklı(dışlı sistemi, jeneratör, soğutma fanları..), ikincisi ise rüzgâr ve kanatların etkileşimiyle oluşan aerodinamik kaynaklı gürültüdür.

Tablo 2.2. Rüzgâr türbinlerinin gürültü seviyeleri(Özkaya ve diğ., 2008)

Rüzgâr Türbini Kurulu Gücü	200 m	250 m	300 m	500 m
600 kW	46,5(dB)	44,4(dB)	42,7(dB)	37,4(dB)
2 MW	47(dB)	44,9(dB)	43,2(dB)	37,9(dB)

600 kW ve 2 MW güç kapasiteli rüzgâr santrallerinden kaynaklı olarak oluşan gürültü seviyeleri Tablo 2.2’de görülebilmektedir. Tablo 2.2’e göre türbin güçleri birbirinden oldukça farklı olmasına rağmen aynı mesafelerde ölçülen gürültü seviyesi birbirine yakın olarak ölçülmüştür. Bunun sebebi rüzgâr teknolojisinde yaşanan gelişmelerdir.

2.3.3. Hava Kirliliğine Etkisi

Günümüzde yaygın olarak kullanılan fosil kaynaklara dayalı elektrik üretim santralleri zararlı gaz(CO₂, SO₂, NO_x) salınımlarına sebep olmaktadır. Tablo 2.3’te fosil kaynaklardan üretilen elektrik enerjisi sebebiyle ortaya çıkan CO₂, SO₂, NO_x gazlarının miktarı görülmektedir.

Tablo 2.3. Elektrik enerjisi üretiminde küresel ısınmaya ve asit yağmurlara neden olan NO_x, SO₂, CO₂ emisyonları(Karadeli, 2001)

Enerji Kaynağı Türü	CO₂(kg/1000 kWh)	SO₂(kg/1000 kWh)	NO_x (kg/1000 kWh)
Kömür	963	0,62	3,6
Doğal Gaz	608	0,0032	2,1
Petrol	890	5,58	1,6
Rüzgâr	0	0	0

Tablo 2.4 ’te görüleceği üzere rüzgâr enerjisi fosil kaynaklı santrallerin aksine zararlı gazları salımını yapmayan ve sera etkisine neden olmayan bir yenilenebilir enerji türüdür.

Bu sebeple ve Paris iklim anlaşmasının yükümlülüklerini de yerine getirebilmek amacıyla ülkeler rüzgâr enerjisine teşvik yapmakta ve yayınlamasını istemektedir. Tablo 2.4'te rüzgâr santralinde üretilen 1 kWh'lik elektrik enerjisinden salınan gazlar görülebilmektedir. 2025 yılına kadar toplam elektrik enerjisi üretiminin %10'u rüzgâr enerjisinden sağlandığında yılda 1,41 Gton CO₂, salınımının azalacağı öngörülmektedir.

Tablo 2.4. 1 kWh'lik elektrik enerjinin rüzgâr enerjisi üretimi sonucunda salımı önlenen emisyonların miktarı(Karadeli, 2001)

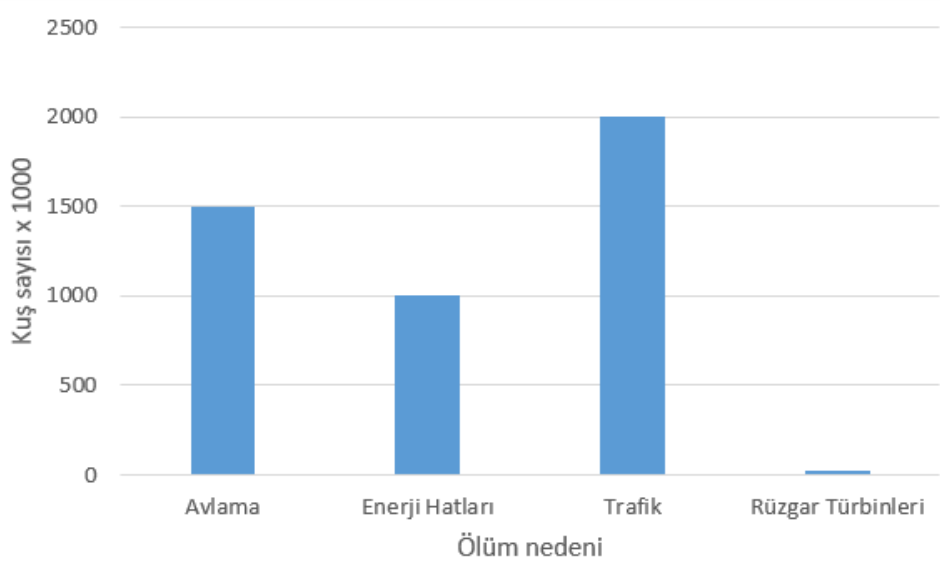
Emisyon tipi	Miktar
Kükürt dioksit (SO ₂)	7,1
Azot dioksitler (NO _x)	2,8
Karbon monoksit (CO)	0,9
Karbon dioksit (CO ₂)	0,7
Partikül madde (PM)	0,18

2.3.4. Habitata Etkisi

Bir canlının yaşam alanına habitat denilmektedir. Rüzgar türbinleri ise çalışması esnasında kuşların göç yolu üzerinde bulunduğu durumlarda kuş ölümlerine neden olabilmektedir.

Şekil 2.8'de görüleceği üzere rüzgâr türbinlerinden kaynaklı kuş ölümlerinin sayısı diğer nedenlerle oluşan kuş ölümlerinin sayısının yanında oldukça düşük kalmaktadır.

Göçmen kuşların birçoğu rüzgâr türbininden daha yüksekten uçmalarından dolayı, rüzgâr türbinleri birçok kuş türünün göçü esnasında önemli bir tehlike arz etmemektedir. Kuş ölümlerinin en aza indirilmesi için rüzgâr türbinleri, olabildiğince kuşların göç yollarından uzak bölgelere kurulmalıdır.



Şekil 2.8. Yıllık tahmini kuş ölümleri ve nedenleri(Özkaya ve diğ., 2008)

2.3.5. Elektromanyetik Alana Etkisi

Rüzgâr türbinlerinin kurulduğu bölgede radyo, televizyon, havacılık ve denizcilik haberleşmelerinde kullanılan frekanslara olumsuz etkileri olabilmektedir. Bu etkileşim, rüzgâr türbininin kanatlarının ve gövdesinin bu sinyalleri yansıtmasından kaynaklanmaktadır.

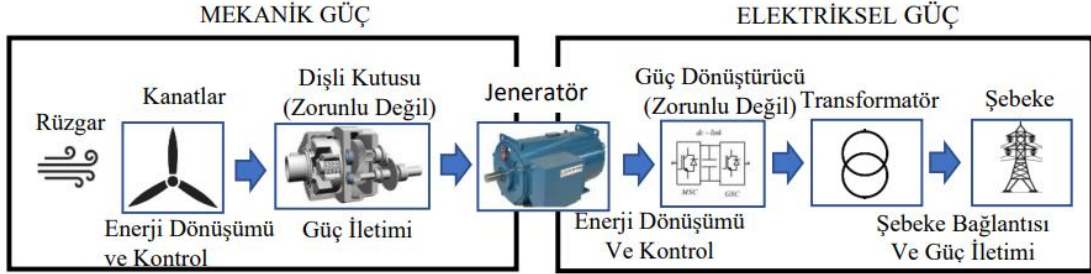
Rüzgâr türbinlerinin kanat büyüklüğü ve malzeme cinsi bu etkileşimi artırabilmektedir. Bu sinyaller ile rüzgâr türbinleri arasındaki en büyük etkileşim yüksek frekanslarda gerçekleşmektedir.

Rüzgâr türbinlerinin kanatlarının metal yerine kompozit veya fiberglas kaynaklı malzeme kullanılmasıyla bu etkileşim azaltılabilmektedir(Özkaya ve diğ., 2008).

2.4. Rüzgâr Enerjisi Üretim Sistemi

Rüzgâr santrallerinde elektrik enerjisi üretmek için, Şekil 2.9'da görülebileceği üzere kontrol cihazları, rüzgâr türbinleri, rüzgâr enerjisi kaynakları, izleme görüntüleme cihazları gibi bölümlerden oluşur. Rüzgâr türbini, havanın kinetik enerjisini türbin kanadının süpürme alanındaki kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürür. Dişli kutusu, rüzgâr türbini ile jeneratör arasında bağlantı kurmaya yarar. Oluşan mekanik enerji,

jeneratöre iletilir; jeneratör, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür(Uslu ve Kekezoğlu, 2018).



Şekil 2.9. Rüzgâr enerjisi elektrik üretim sistemi blok diyagramı

2.4.1. Rüzgâr Santralının Çıkış Gücünü Etkileyen Faktörler

Rüzgâr türbininden üretilen elektrik enerjisi rüzgâr hızına, hava yoğunluğuna ve ünitenin ana çalışma parametrelerine bağlıdır. Rüzgâr türbininin çıkış gücü rüzgâr hızıyla ilişkilidir ve rüzgâr hızının etkisi büyüktür.

2.4.2. Rüzgâr Hızının Rüzgâr Türbini Çıkışı Üzerindeki Etkisi:

Rüzgâr hızı, başlangıç rüzgâr hızı ile nominal rüzgâr hızı arasında olduğu zaman, rüzgâr türbininden elden edilen güç rüzgâr hızı ile doğru orantılıdır. Rüzgâr hızı, nominal rüzgâr hızı ile kesme rüzgâr hızı arasındayken, rüzgâr türbininden elde edilen güç nominal güce ulaşmaktadır. Rüzgâr hızı, başlangıç rüzgâr hızından düşük veya kesme rüzgâr hızından büyük olduğu zaman, rüzgâr türbininden elde edilen güç sıfır olmaktadır.

2.4.3. Türbülans Yoğunluğunun Rüzgâr Türbini Çıkışına Etkisi:

Türbülans şiddeti rüzgâr hızının değişimini etkileyen önemli bir faktördür. Türbülans şiddeti rüzgâr hızının standart sapmasının ortalama rüzgâr hızına oranı ile tanımlanmaktadır. Türbin pervanelerinden geçen rüzgârdan tam olarak yararlanılamamasının sebebi türbülanstır. Bu sebepten üretilen elektrik enerjisinde kayıplar olmaktadır. Rüzgâr hızına bağlı olarak türbülans yoğunluğu değişkenlik göstermektedir. Aslında elektrik üretmek için kullanılan rüzgâr enerjisinde önemli bir azalma ile sonuçlanır. Rüzgâr çiftliğinde türbülans yoğunluğu rüzgâr hızı ile değişir. Rüzgâr hızlarının değişken olması, türbülans yoğunluğunun değişkenliğine yol

açmaktadır. Bu durumda ise rüzgâr hızı daha büyük, türbülans yoğunluğu daha küçük olabilmektedir.

2.4.4. Rüzgâr Enerjisi Yoğunluğunun Rüzgâr Türbini Çıkışına Etkisi:

Rüzgâr türbinlerinden elektrik enerjisi üretimi rüzgâr enerjisi yoğunluğu tarafından etkilenmektedir. Aynı rüzgâr türbini için, aynı rüzgâr hızı olduğu durumda rüzgâr enerjisi yoğunluğunun düşük olduğu oranda yakalanan rüzgâr enerjisi ve rüzgâr türbininden elde edilen çıkış gücü de o kadar düşük olur. Rüzgâr enerjisi yoğunluğu bir bölgedeki meteorolojik koşullarda farklılık gösterebildiğinden dolayı rüzgâr türbin üreticileri rüzgâr türbinlerini tasarlarken rüzgâr enerjisi yoğunluğunun rüzgâr türbinlerinin çıkış gücü üzerindeki etkisini dikkate almamaktadır. Rüzgâr gücü, rüzgâr hızının küpüyle orantılı olarak değişmektedir.

- $P_w(\text{Watts}) = \text{Rüzgâr türbin gücü}$
- $\rho(\text{kg/m}^3) = \text{Hava yoğunluğu}(1,225\text{kg/m}^3 \text{ at } 15^\circ\text{C and } 1 \text{ atm})$
- $A(\text{m}^2) = \text{Türbin pervanelerinin taradığı alan}$
- $v(\text{m/s}) = A'ya göre normal rüzgâr hızı(1 \text{ m/s} = 2,237 \text{ mph})$

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.1)$$

Rüzgâr gücü rüzgârın geçtiği alanla(A) doğru orantılıdır.

Rüzgâr gücü kanat çapının karesi ile doğru orantılıdır.

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (2.2)$$

- $D = \text{Kanat Boyu}$

2.5..Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgâr türbinleri dönme eksenlerine, devirlerine, güçlerine, kanat sayılarına, rüzgâr etkisine, dişli özelliklerine ve kurulum konumlarına göre sınıflandırılmaktadırlar.

Temel olarak rüzgâr türbinleri yatay eksenli, düşey eksenli, eğik eksenli olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin sınıflandırılması Şekil 2.10’da görülebilmektedir.



Şekil 2.10. Rüzgâr türbinlerinin sınıflandırılması(Elibüyük ve Üçgül, 2014)

2.5.1. Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri(YERT)

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde dönme eksenini rüzgâr yönüne göre paralel, kanatlar ise rüzgâr yönüne göre dik olarak konumlandırılmaktadır. Bu türbin çeşidinde rotor hızı ile kanat sayısı ters orantılı olarak değişmektedir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin verimleri yaklaşık olarak 45% civarındadır ve yükseklikleri 20-30m arasında değişmekte ve çevredeki engellere göre güvenlik amaçlı olarak bu engellerden 10m yükseğe yerleştirilmektedir.

Bu türbin çeşitlerinde rotorların kanat sayıları kanat uç hızı oranına(λ) göre seçilmektedir ve Denklem 2.3'teki gibi hesaplanmakta ve Tablo 2.5'de kanat uç hızı oranına göre rotor kanadı seçimi görülebilmektedir.

$$KS : \frac{\text{Rüzgâr hızı}(v)}{\text{Rotor kanadı uç hızı}(\lambda)} \quad (2.3)$$

Tablo 2.5. kanat uç hızı oranına göre rotor kanadı seçimi(Elibüyük ve Üçgül, 2014)

$1 < \lambda < 5$	Çok Kanatlı Rotor
$6 < \lambda < 8$	Üç Kanatlı Rotor
$9 < \lambda < 15$	İki Kanatlı Rotor
$\lambda > 15$	Tek Kanatlı Rotor

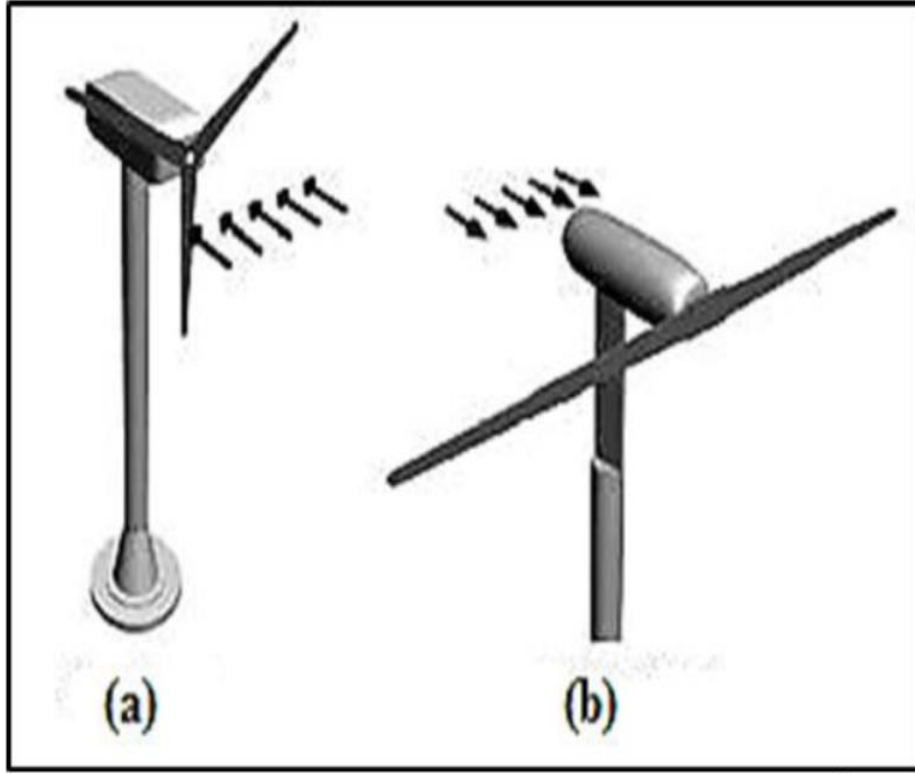
Bu türbin tipinde rüzgârın geliş yönüne göre rüzgârı önden alan ve rüzgârı arkadan alan türbin sistemleri olarak ikiye ayrılır. Rüzgârı arkadan alan türbinlerin rotorları kulenin arkasına konumlanır. Bu türbin çeşidinin rüzgârın geliş yönüne göre dönüş yapmak için sisteme ihtiyaç duymamalarıdır ve kanatlar esnek özelliğe sahiptir. Bu sayede bu türbin tipi hafif yapıda olur ve bu sayede kulenin yükü azalır. Ancak kanat kule hizasından geçerken ortaya çıkan güç dalgalanması bu türbin tipinde rüzgârı önden alan türbinlere göre daha çok zarar verir.

Rüzgârı önden alan türbinlerde uzun yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Rotor yönü rüzgâra doğru dönük olmaktadır. Bu türbin tipinin avantajı kulenin arkasında oluşan rüzgâr gölgeleme etkisine daha az maruz kalmaktadır. Kule yuvarlak veya düz olması durumunda kanatın kule hizasından geçişlerinde türbinin ürettiği güç daha az olmaktadır. Bu tipteki türbinler, rotoru rüzgâr yönüne döndürmek için bir döndürme mekanizmasına (yaw) sahiptir.

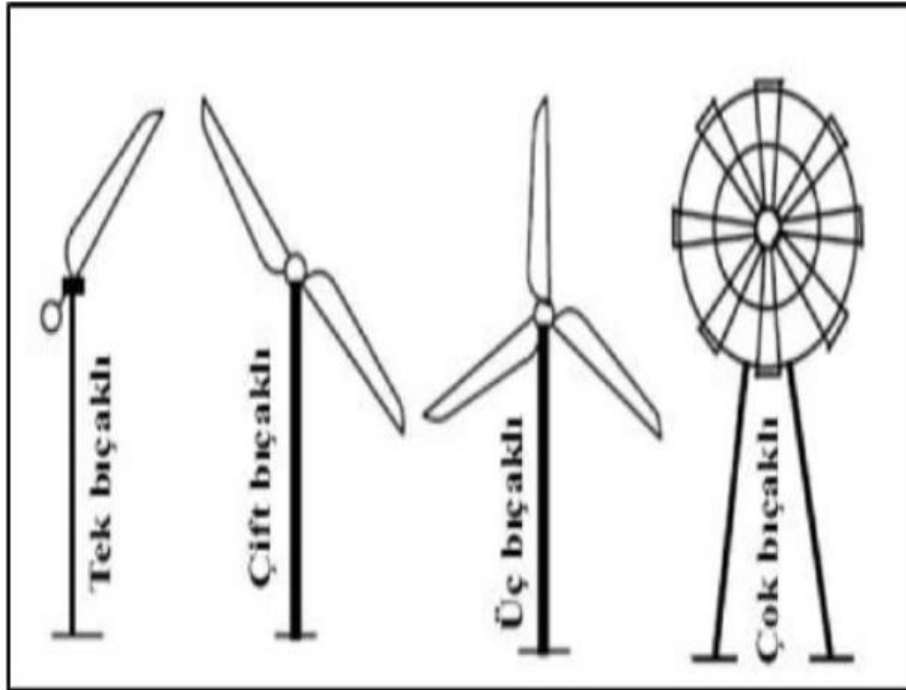
Tek kanatlı rüzgâr türbinleri kanat sayısına göre dönme hızının yüksek olması ve buna bağlı olarak türbin kütlesi ve rotorun dönme momentini azaltılabildiği için kullanılabilmektedir. Türbin maliyetinin üç kanatlı türbinlere göre az olması sebebiyle birçok ülkede 10-100m rotor çaplı rüzgâr türbinleri tasarlanıp kullanılmaktadır.

Günümüzde Dünyada en çok kullanılan üç kanatlı rüzgâr türbinidir. Üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde kanatların dönme momenti diğer türbin çeşitlerine göre en uygun şekildedir. Genellikle rüzgâr türbinlerinin ilk ortaya çıktığı zamanlarda su pompalanması amacıyla kullanılmışlardır. Su pompalanabilmesi için gerekli olan momentumun sağlanabilmesi amacıyla çok kanatlı tasarlanmışlardır(Elibüyük ve Üçgül, 2014).

Şekil 2.11’de Rüzgâr etkisine göre önden ve arkadan rüzgâr alan türbin tipleri ve Şekil 2.12’de kanat sayılarına göre rüzgâr türbinleri gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Rüzgâr etkisine göre önden rüzgâr alan(a), arkadan alan(b), (Elibüyük ve Üçgül, 2014)



Şekil 2.12. Kanat sayılarına göre rüzgâr türbinleri(Durdyev, 2010)

2.5.2. Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri(DERT)

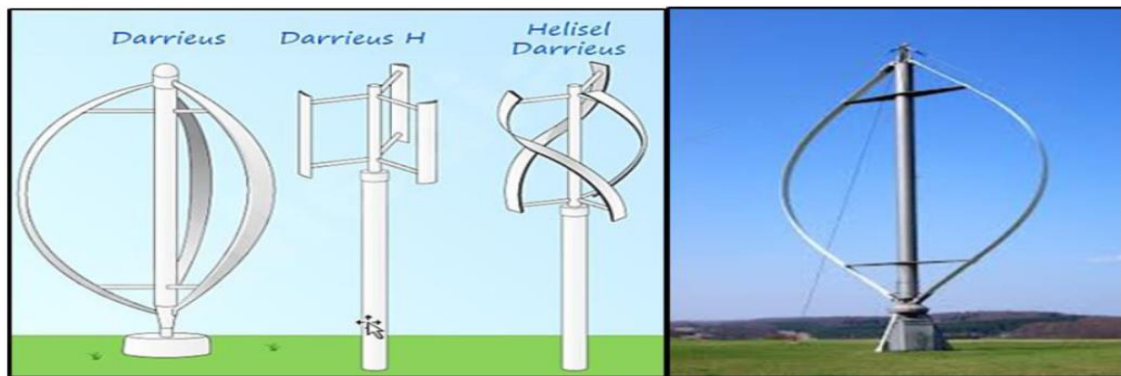
Bu tipteki rüzgâr türbinlerinde dönme eksenleri rüzgârın geldiği yöne dik ve düşey olarak tasarlanır. Kanatlar da rüzgâr yönüne göre düşeydir. Bu tipteki rüzgâr türbinlerinin verimleri düşüktür. Bu tipteki türbinlere ait jeneratör ve dişli kutusu yer seviyesine kurulabilir ve bu sayede bir kuleye ihtiyaç duymazlar. Bu sebepten dolayı düşük hızlarda çalıştırılabilirler. Bu türbinler düşük rüzgâr hızlarında su pompalamak amacıyla kullanılmaktadır.

Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinde Savonious, Darrieus, H-Darrieus tiplerinde rüzgâr türbinleri olarak üç çeşidi bulunmaktadır. Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'te bu türbin tipleri görülmektedir.

Savonious rüzgâr türbin tipi düşük rüzgâr hızlarında oldukça iyi başlangıç momentine sahiptir. Kurulum süresinin kısmen kısa ve maliyetinin uygun olması, rüzgâr yönüne bağımlı olmaması diğer düşey eksenli rüzgâr tiplerine göre avantajları bulunmaktadır. Bu tip rüzgâr türbinleri genellikle havalandırma, su pompalanması amacıyla kullanılmaktadır.

Darrieus rüzgâr türbinlerinin kanatları geometrik formda yapılmakta ve aerodinamik bir yapıda ve yüksek performanslıdır. Kanatları eğimli olarak tasarlandığı için kanatlarda çekme kuvveti minimum olmaktadır. Yüksek rüzgâr hızlarında çalışmaya uygundur ancak ilk hareket için başlangıç enerjisi sağlayacak bir motora ihtiyaç duymaktadırlar.

H-Darrieus rüzgâr türbinleri, Darrieus rüzgâr türbinine göre aerodinamik profili düz yapıda ve kanatlarına kanat açısı kontrol uygulanabilmektedir



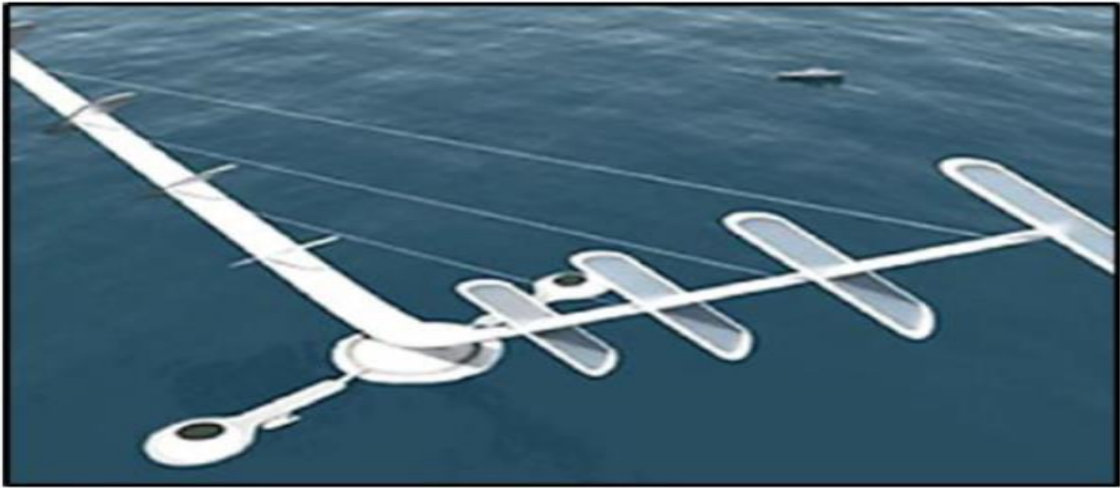
Şekil 2.13. Darrieus rüzgâr türbinleri(Elibüyük ve Üçgül, 2014)



Şekil 2.14. Savonius rüzgâr türbinleri (Elibüyük ve Üçgül, 2014)

2.5.3. Eğik Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Bu rüzgâr türbinlerinin dönme eksenini düşey ile rüzgâr yönünde belirli bir açıda olmaktadır. Eğik eksenli rüzgâr türbinlerinin kanatları ile dönme eksenleri arasında açı bulunmamaktadır. Şekil 2.15’te eğik eksenli rüzgar tipi örnek olarak görülmektedir.

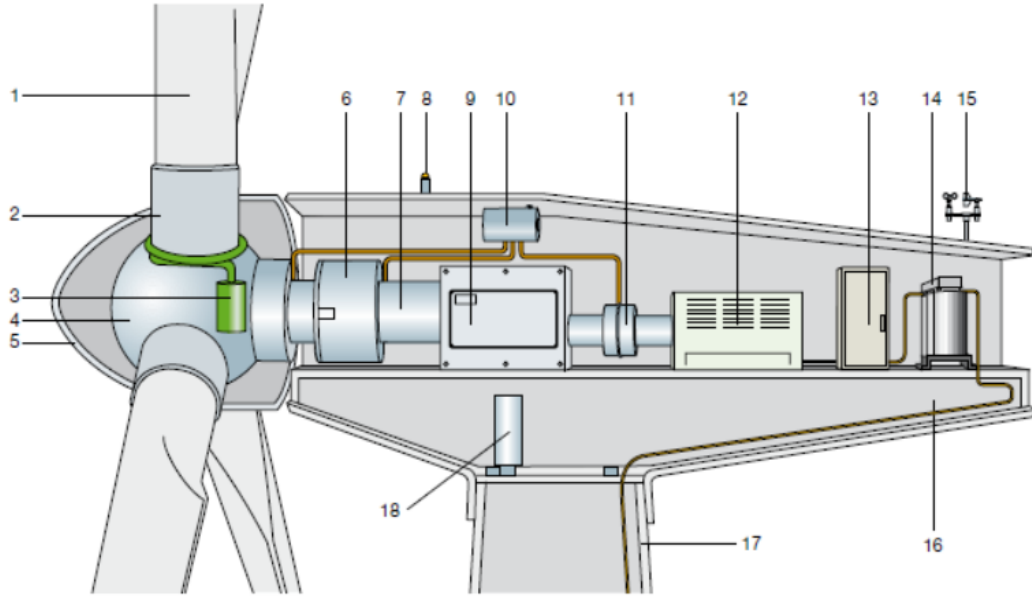


Şekil 2.15. Eğik eksenli rüzgâr türbinleri (Elibüyük ve Üçgül, 2014)

2.6. Rüzgâr Türbinlerinin Bileşenleri

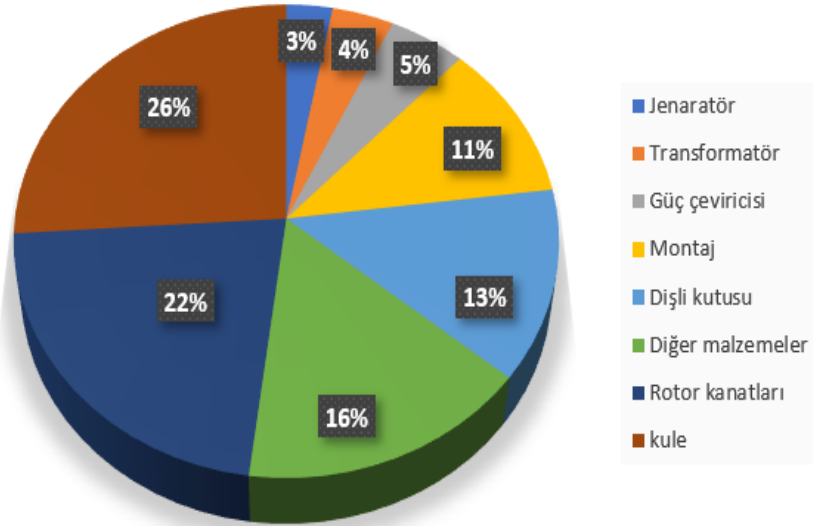
Rüzgârın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için rüzgâr türbininde hem elektriksel hem de mekanik olarak farklı bileşenler kullanılmaktadır. Bu bölümler Şekil 2.16’da açıklanmıştır. Transformatör ve çevirici gövdenin(nasel) içine ve kule tabanına yerleştirilebilmektedir. Gövde içine yerleştirildiğinde rotor ağırlığının dengelenmesine fayda sağlarken, tabanda konumlandırıldığında gövdenin boyut ve ağırlığında bir azalmaya olanak sağlar.

Rüzgâr santrallerindeki farklı bileşenlerin yüzdesel olarak etkileri aşağıdaki Şekil 2.17’de görülmektedir.



Şekil 2.16. Rüzgâr türbin elemanları(URL:3, 2022)

1-Kanat, 2-Kanat desteği, 3-Kanat açısı kontrol 4- Göbek, 5- Çevirici, 6-Ana destek, 7-Ana mil, 8- Hava yolu uyarı lambası, 9-dişli kutusu, 10-Mekanik frenler, 11- hidrolik soğutma cihazı, 12-jeneratör, 13- güç çevirici, kontrol, koruma ve bağlantı kesme panosu 14-transformatör, 15- anemometre, 16- Gövde çerçevesi, 17-Kule desteği, 18- Gövde açısı kontrol



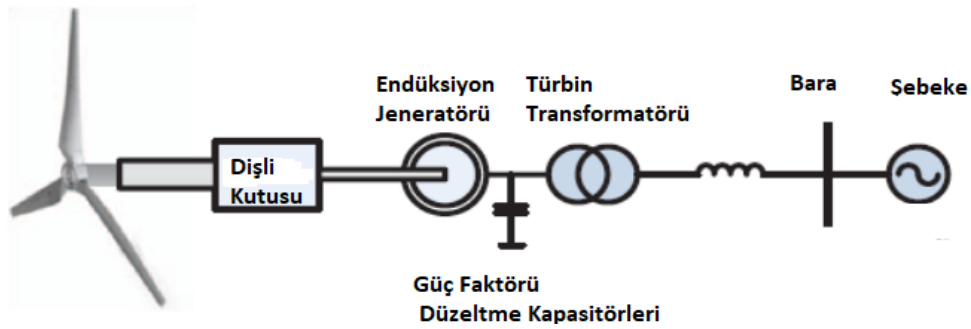
Şekil 2.17 Rüzgâr türbini oluşturan alt birimlerin maliyet dağılım grafiği(URL:3, 2022)

2.7. Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Jeneratör Tipleri

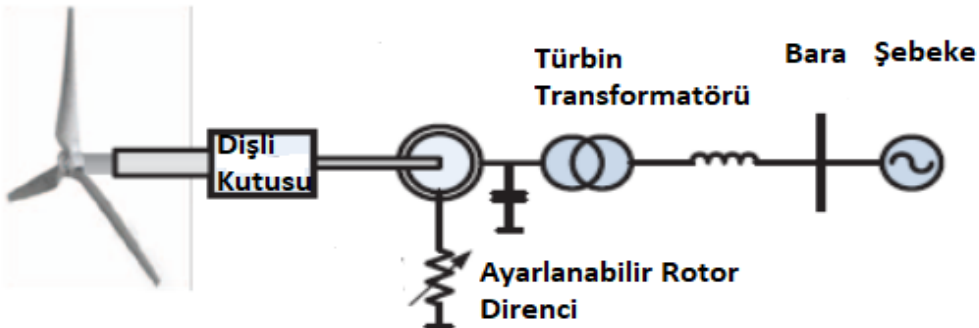
Rüzgar türbininde kullanılan jeneratörler, hem maliyetler hem de yetenekleri açısından güç elektroniği endüstrisinde kaydedilen ilerlemeyle bağlantılı olarak önemli ölçüde iyileşmiştir. Bu nedenle, modern şebeke gereksinimlerini karşılayan modern rüzgar türbinlerini uygun maliyetlerle inşa etmek mümkün olmaktadır.

Rüzgar santrallerinde 4 çeşit rüzgar türbin jeneratör türü kullanılmaktadır. Sabit hızlı rüzgar türbinlerinde tip 1 olarak asenkron veya endüksiyon jeneratörleri(sincap kafesli), ayarlanabilir rotor direncine sahip tip 2 olarak yuvarlak rotorlu endüksiyon jeneratörleri, değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılan tip 3 olarak çift beslemeli bir endüksiyon jeneratörü, değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılan tip 4 olarak tam güç dönüştürücü ile kullanılan jeneratörlerdir.

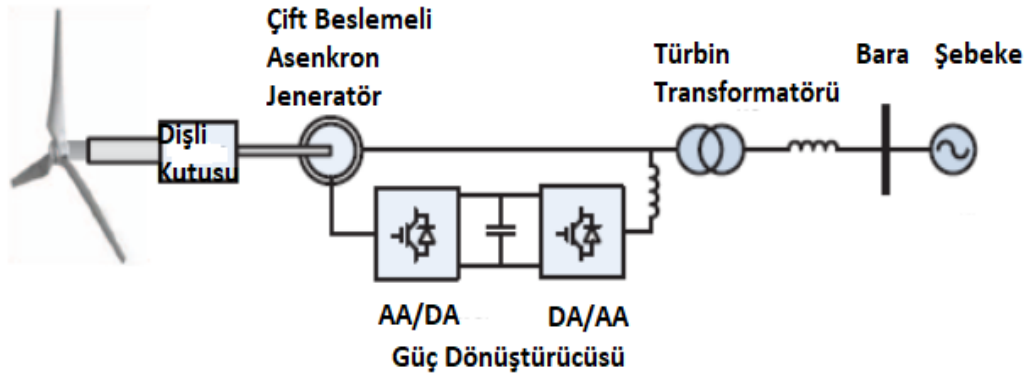
Tip 1 ve tip 2, pasif reaktif kompanzasyon gerektirir (örneğin, bir şönt kapasitör bankası ile). tip 3 ve tip 4 kendi reaktif güçlerini sağlayabilir ve kontrol bayrakları uygun şekilde ayarlanarak reaktif güç ayarlanabilir.



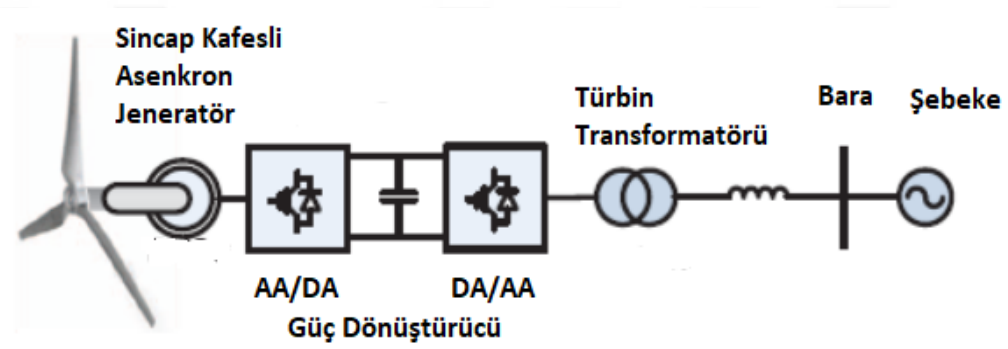
Şekil 2.18 Rüzgar türbin jeneratörü tip 1(Muljedi ve diğ., 2016)



Şekil 2.19 Rüzgar türbin jeneratörü tip 2(Muljedi ve diğ., 2016)



Şekil 2.20 Rüzgar türbin jeneratörü tip 3(Muljedi ve diğ., 2016)



Şekil 2.21 Rüzgar türbin jeneratörü tip 4(Muljedi ve diğ., 2016)

3. RÜZGÂR SANTRALLERİNİN GÜÇ KALİTESİNE ETKİLERİ

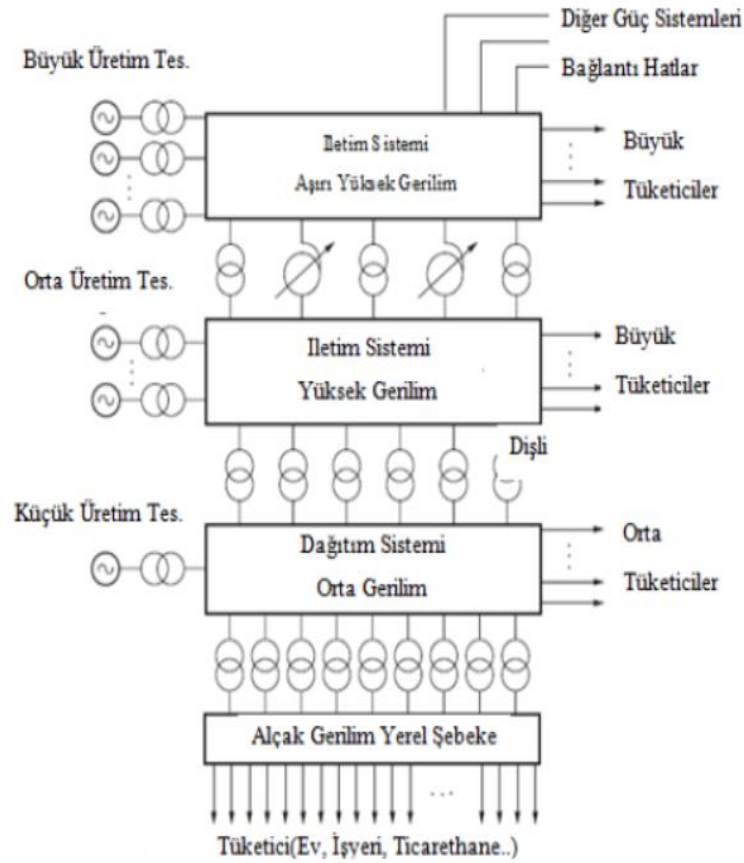
Elektrik şebekesi, bir ülkenin elektrik enerjisinin verimli bir şekilde işletilmesi için çok önemlidir. Elektrik şebekesi, zamanla oluşan değişken şartlara uyum sağlamalıdır. Rüzgâr santrallerinden aktarılan büyük güç iletimi, elektrik şebekesini besleyen ana kaynaklarındandır. Rüzgâr santrallerinin elektrik şebekesine bağlanması, aşılması gereken yeni teknik problemlere sebep olabilmektedir. Rüzgâr santralleriyle ilgili temel zorluk, gerilim, frekans gibi temel parametrelerden kaynaklanmaktadır. Rüzgâr santrallerinden elde edilen elektrik enerjisi güç çıkışı tahmin edilmesi zor ve değişkendir. Bundan dolayı, rüzgâr enerjisinin elektrik şebekesine bağlantısında, tahminin değişkenliği ve karmaşıklığı, gerilim regülasyonu eksikliği, frekans-güç ayarının olmaması ve gerilim düşüşlerine duyarlılık gibi sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca, elektrik şebekesinin uygun koşullar altında sürekliliğinin sağlanması için penetrasyon hızı belirli bir değeri aşmamalıdır. Enerji ve çevre politikalarının bir parçası olarak tasarlanan kesintili kaynaklardan olan rüzgâr santralinden üretilen elektrik enerjisinin aşamalı olarak elektrik şebekesine bağlantısı, yönetimi, planlaması ve işleyişi konusunda yeni sorunlar oluşabilmektedir. Özellikle, rüzgâr türbinlerinden elde edilen elektrik enerjisinde bir dalgalanma olabilmekte ve bu da tüketim çeşitliliğine eklenen elektrik şebekesinin işleyişinde yeni ihtiyaçlar ortaya çıkarmakta ve enerji piyasasındaki enerji alışverişini gerçekleştirme yolunda bir dalgalanma oluşturmaktadır.

Elektrik şebekesinde güç akışı trafo merkezinden uzaklaştıkça aktif güç akışı azalacak şekilde tek yönlüdür. Rüzgâr santralleri elektrik şebekesine bağlandığında, rüzgâr santrallerinden üretilen elektrik enerjisinin değişkenliğinden dolayı, elektrik şebekesine aktarılan güç akışında belirsizlik vardır ve bu da elektrik şebekesinin yük akış tahminini zorlaştırır. Elektrik şebekesinde akan akımın değişmesi sistem geriliminin uygun bir seviyeyi korumasını zorlaştırır ve trafoların kapasitesinin sınırlandırılmasına neden olabilir, böylece elektrik şebekesinin güvenilirliğini etkileyebilir. Rüzgâr kaynaklarının belirsizliği, rüzgâr santrallerinin çıkış gücünün dalgalanmasına neden olur. Özellikle rüzgâr hızı kısa sürede büyük ölçüde değiştiğinde, gerilim sapması, gerilim dalgalanması ve kırışması gibi etkilerle şebekenin güç kalitesini etkileyebilir, frekans dalgalanması, darbe akımı gibi etkiler oluşturabilir. Ayrıca rüzgâr enerjisi sistemi çok sayıda güç

elektroniği ekipmanı aracılığıyla elektrik şebekesine bağlıdır ve elektrik şebekesinde harmonik sorunlarına neden olabilir(Işık ve Özdemir, 2021).

3.1. Rüzgâr Santrallerinin Elektrik Şebekesine Bağlantısı

Elektrik şebekesi genel anlamda üretim, iletim ve dağıtım olmak üzere 3 farklı yapıda olmaktadır. Türkiye’de elektrik üretiminin çoğunluğu geleneksel(fosil yakıtlar) santrallerden sağlanmaktadır. İletim sisteminde ülkemizde 154 kV ve 380 kV gerilim seviyelerinde enerji iletimi yapılmaktadır. Dağıtım sistemleri ise 34,5 kV seviyesindedir. Genellikle güç akışı tek yönlü olan dağıtım sistemleri radyal ya da ring şebeke yapısında olmaktadır. Şekil 3.1’de örnek güç sisteminin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Örnek bir güç sistemi bağlantısı(Dumlu, 2015)

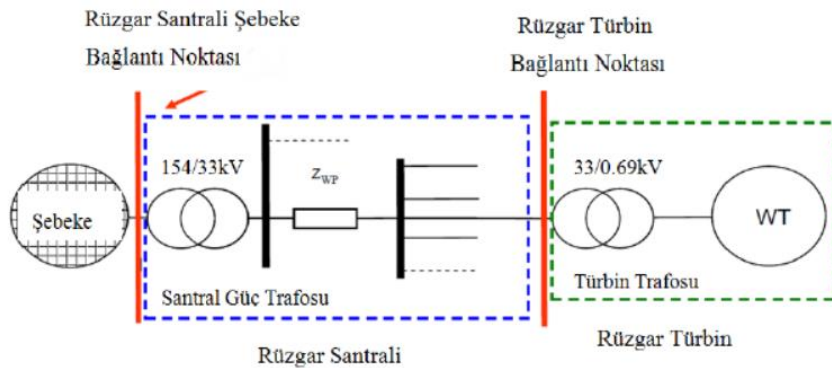
Dağıtım şebekesine bağlanacak olan rüzgâr santralleri diğer enerji santralleri gibi fakat ayrı bir iletim hattı ile dağıtım merkezine bağlanabilmektedir. Ancak sistemin

güvenliğinin korunabilmesi için dağıtım şebekesine direkt olarak bağlanmasına izin verilmemektedir.

Rüzgârlı gün bakımından zengin olan kıyı bölgelerinde trafo merkezlerinin güçleri 25-50 MW aralığında olmakta ve bölgedeki iletim şebekesinin radyal yapıda olması ve sistemin en küçük empedansı dikkate alındığında kısa devre güçleri 200-300 MW aralığında olmaktadır.

Rüzgâr santralleri iletim şebekesine bir trafo merkezi ile ya da iletim hattına girdi çıktı yapılarak bağlanmaktadır. Türkiye’de iletim şebekesinin gerilim seviyesi 154 kV ve 380 kV olması sebebiyle bu şebekeye bağlı trafo merkezlerinin kısa devre güçleri en az 300-400 MVA olmaktadır. Bundan dolayı büyük güçlü rüzgâr santralleri iletim şebekesine bağlanabilmektedir.

Rüzgâr santralleri iletim şebekesine 380 kV gerilim seviyesinden bağlanabilir. 380 kV seviyesindeki iletim şebekesinin kısa devre gücü 5000 MVA ve üzerinde olduğundan dolayı çok sayıda rüzgâr santrali bağlanabilmektedir(Dumlu, 2015).



Şekil 3.2. Örnek rüzgâr santralinin dağıtım şebekesine bağlantısı(Dumlu, 2015)

3.1.1. Bölgesel ve Şebeke Genelindeki Bozucu Etkileri

Değişken üretim yapma karakteristiklerinde dolayı rüzgâr santralleri fosil kaynak kullanan elektrik santrallerinden farklıdır. Rüzgâr santrallerinin kurulu gücü arttığında şebeke üzerindeki bozucu etkileri ve bunlara bağlı arızalar da artmaktadır. Bölgesel etkiler, diğer rüzgâr santrallerinden bağımsız olarak her bir santralin bağlı olduğu trafo merkezinde görülmektedir. Bölgesel bozucu etkiler, iletim hatlarında ve trafo merkezlerindeki gerilimlerde değişiklikler, koruma sistemleri, kısa devre arıza akımları

ve şalt tesislerinde değişiklikler, arz kalitesinde değişiklikler(harmonik ve gerilim kırışması) olarak özetlenebilir.

Arz kalitesi de kendi içinde harmonikler ve gerilim kırışması olarak ikiye ayrılmaktadır. Harmonikler, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılan elektronik güç çeviricilerinden kaynaklanmaktadır. Gerilim kırışması ise sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin, mekanik dalgalanmaları elektriksel çıktıya aynen yansıtmasının sonucunda oluşmaktadır. Şebekeye olan bozucu etkileri arasında; Sistem dinamiği ve kararlılık, reaktif güç kontrolü ve gerilim, frekans kontrolü ve geleneksel santrallarda sık sık yük alma/yük atma sorunları bulunduğu bildirilmektedir.

Rüzgâr santrallerinin sistem dinamiği ve kararlılığı üzerindeki bozucu etkileri, bu santrallerin türbinlerindeki jeneratör sistemlerinin, geleneksel santrallerdeki senkron jeneratörlerden farklı olmalarından kaynaklanmaktadır. Değişken hızlı türbinlerin elektronik güç çeviricileri, gerilim düşümüne bağlı aşırı akımlara çok duyarlı olduğundan, küçük bir gerilim düşümünde bile, bir bölgedeki rüzgâr santralleri topluca devre dışı kalabilmektedir. Bu durumda, elektrik şebekesinde çok önemli sorunlara yol açabilecek sistem kararlılığının korunması konusunda problemler meydana gelmektedir. Rüzgâr santrallerinin devre dışı olarak bağlantısının kesilmesi, ani gerilim düşmeleri ve arızalar gibi elektrik şebekesi üzerinde yaşanan şiddetli bozukluklar şebekeyi daha çok etkileyebilir.

Eğer rüzgâr santrali devre dışı kalırsa, bu önemli üretim kaybına yol açabilir. Bu durum, enerji dağıtım istasyonlarındaki aşırı yükü kaldırmak için, belirli bölgelerde kısa süreli elektrik kesintilerine, hatta daha kötü durumda sistemin çökmesine sebep olabilir. Bundan dolayı, bağlantı noktasındaki gerilim seviyesine bağlı olarak, şebeke operatörleri, rüzgâr santrallerinin hata taşıma yeteneğine sahip olmasına ihtiyaç duyabilirler. Böylece belirlenmiş olan ani gerilim düşmelerine karşı koyabilirler(Işık ve Özdemir, 2021).

Güç sistemleri içinde reaktif güç tüketen iletim hatları, transformatörler ve yükler gibi bazı elemanlar bulunmaktadır. Reaktif güç tüketiminin kompanze edilmesi ve şebekede güç iletiminin sağlanması için, elektrik santralleri ya da kondansatör grupları gibi diğer tip ekipmanlar tarafından kapasitif güç sağlanması gerekmektedir. Rüzgâr santralleri de diğer üretim tesisleri gibi bu kompanzasyona katılması gerekebilir.

Reaktif güç üretimi ve gerilim kontrolü üzerindeki etkileri rüzgâr türbinlerinin reaktif güç çıkışı kapasitesine bağlı olarak değişebilir. Bütün rüzgâr türbinleri, değişken reaktif güç çıkışı kapasitesine sahip değildir. Rüzgâr santrallerinin tesis edileceği yere göre değişebilir. Şebekeye uyumluluğuna bağlı olarak değişebilir ve rüzgâr türbinlerinin çıkış gerilimleri, göreceli olarak daha düşük olup, şebekenin genellikle zayıf olduğu uzak noktalarda kurulmaktadır(Altun, 2013).

3.2. Rüzgâr Santrallerinin Elektrik Şebekesine Bağlantı Kriterleri

Rüzgâr enerjisi kesintili bir enerji kaynağı olduğu için rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek şebekeye aktaran rüzgâr santralinden kesintili elektrik enerjisi elde edilmesi kaçınılmazdır. Kesintili yük çeken tesisler elektrik şebekesinde bazı olumsuzluklara neden olmaktadır. Bu sebeple, kesintili elektrik enerjisi üreten rüzgâr santrallerinin, elektrik şebekesine olumsuz etkilerini azaltıp kontrol altında tutmak için bazı kısıtlamalar uygulanmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin şebekeye olumsuz etkisi, şebekeye bağlantı noktasındaki kısa devre gücü ile doğrudan alakalıdır.

Ülkemizde, 2013 yılında yayınlanan elektrik piyasası şebeke yönetmeliğine göre TEİAŞ tarafından uygulanmakta olan, bağlantı noktasındaki minimum kısa devre gücünün (MVA), en fazla yüzde beşi kadar kurulu güçte rüzgâr santralinin bağlantısına izin verilmesi şartı yer almaktaydı ve bu elektriğin arz kalitesi için temel şart olarak vurgulanmıştır.

Ocak 2013'te çıkan yönetmeliğe göre bu konudaki sorumlu kuruluş TEİAŞ'ın gözetmenliğinde TS EN 61400 standardının uygulanacağı belirtilmiştir.

Rüzgâr enerjisi teknolojisi son yıllarda hızlı bir gelişme göstermektedir. Günümüzde kullanılan rüzgâr türbinlerinde elektrik enerjisi rüzgâr türbininde üretildikten sonra şebekeye aktarılmadan önce çeşitli kontrol mekanizmalarına tabi tutulur.

Rüzgâr türbinlerinin ilk devreye alımında çektiği kalkış akımı sınırlandırılır ve böylece şebekeye etkisi azaltılmış olunur. Rüzgâr hızının değişkenliğinden kaynaklı kesintili elektrik enerjisi üretimini sabit tutmak için türbinlerin kanat açıları değiştirilmektedir. Bazı rüzgâr türbinlerinde ani darbelerin etkisini azaltmak için üretim yapmaz türbin

pervanelerinin dönüş hızı artırılmaktadır. Bu sayede elektrik şebekesi korunmaya çalışılmaktadır.

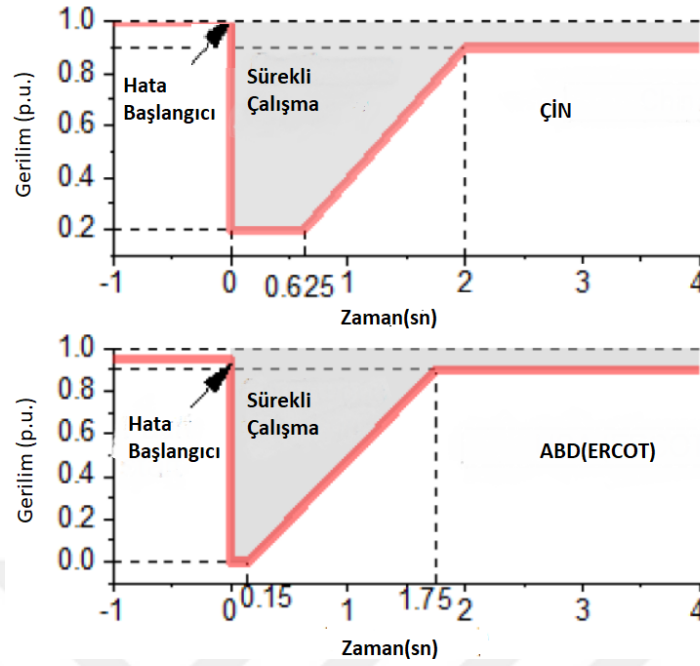
Elektrik şebekesindeki gerilimin kararlılığını korumak için türbinlerde üretilen elektrik enerjisinin gerilim seviyesi artırılıp azaltılmaktadır.

3.2.1. Arıza Durumunda Devam Edebilme Yeteneği ve Arıza Sonrası Sisteme Katkısı

İletim şebekesinde oluşan kısa devre gibi arızalardan sonra gerilim düşümü ve şebekede dengesizlikler oluşabilmektedir. Elektrik şebekesinin belirli bir bölgesinde meydana gelen arazılar şebeke için risk oluşturmaz. Ancak düşük gerilim durumunda çalışan bazı koruma cihazların devre dışı kalması sebebiyle jeneratörler devre dışı kalabilir ve sistem tamamen çökme tehlikesiyle karşı karşıya kalabilmektedir. Bu nedenle enerji üretim sistemleri, koruma cihazlarının arızalı parçaları izole edebilmesi ve kontrolörlerin şebekeyi yeniden dengeleyebilmesi için gerilim düşümünü belirli bir süre boyunca sürdürecektir. Rüzgâr türbinleri, şebekede kalmalarını ve beklenmedik arızalar sırasında gerilim düşümü boyunca çalışabilmelerini sağlayan kontrolörlerle tasarlanmıştır. Rüzgâr santrallerinin bu arıza veya gerilim düşümü sırasında belirli bir süre boyunca şebekeye bağlı kalabilmesi, arıza sırasında şebekeye reaktif güç sağlanması istenmektedir. Arıza giderildikten sonra da yönetmeliklere göre aktif güç belirlenen hız ile artırılması istenmektedir. Bu duruma arıza durumunda devam edebilme yeteneği(LVRT) denilmektedir.

Arıza durumlarında devam edebilme yetenekleri ülkelere, şebekelere ve bağlı bulundukları yönetmeliklere göre değişebilmektedir.

Şekil 3.3'te ABD ve Çin'e ait iletim sisteminde üç fazlı bir arıza meydana geldiğinde rüzgâr türbinlerinin çalışmaya devam edebilmesini sağlayan koşullar gösterilmiştir. Çin standardı, gerilim nominal değerin %20'sine düştüğünde ve ayrıca 2 saniye içinde



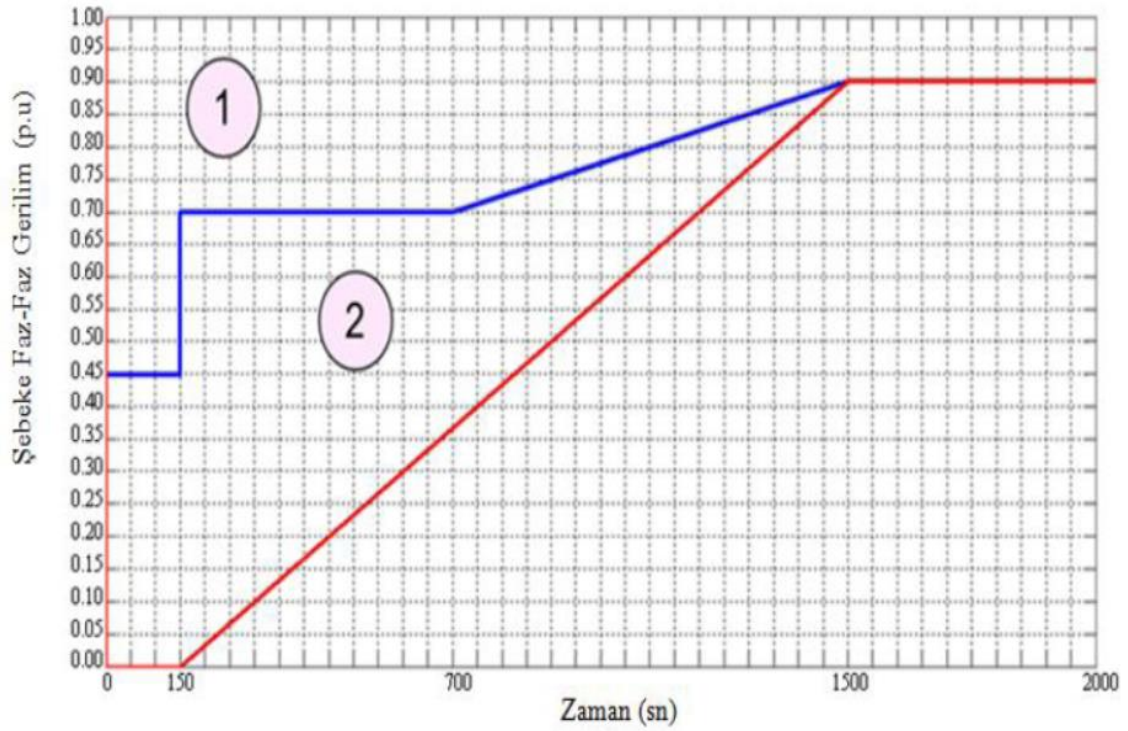
Şekil 3.3. Üç fazlı bir arıza sırasında şebeke kodlarının öngördüğü gerilim profilleri (Ahmed ve diğ., 2020)

nominal değerin %90'ına geri kazanım sürecinde rüzgâr türbinlerinin 625 milisaniye boyunca sürekli çalışmasını gerektirir. Aktif güçle ilgili olarak, bu durumda standart, arıza gidermeden sonra saniyede en az %10'luk bir geri kazanımı gerektirir.

Texas elektrik güvenlik konseyi(ERCOT) tarafından kabul edilen ABD standardı için bir iletim şebekesi arızaları nedeniyle gerilim sıfıra düştüğünde ve gerilimi geri kazanım sürecinde rüzgâr türbinlerinin 150 milisaniye devrede kalabilmesi ve 1,75 saniyede nominal değerinin %90'ına ulaşması gerekmektedir.

Türkiye için rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesislerinin şebeke bağlantı kriterleri 22/1/2003 tarihli ve 25001 sayılı Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliğinin EK-18'de açıklanmıştır. Bu kriterler iletim sistemine entegre olan rüzgâr santralleri ile kurulu gücü 10 MW ve üzerinde olan dağıtım sistemine entegre rüzgâr santralleri için geçerlidir.

Türkiye şebeke yönetmeliğine göre iletim sistemindeki bir noktada bir fazda veya tüm fazlarda arıza olduğu durumlarda şebeke gerilimi Şekil 3.4'de gösterilen 1 ve 2 numaralı bölgelerde kalmalıdır. Arıza durumunda faz-faz gerilimi 1 ve 2 numaralı bölgelerde olduğunda rüzgâr santralleri çalışmaya devam edebilmelidir.



Şekil 3.4. Arıza durumunda rüzgâr santrallerinden beklenen devam edebilme yeteneği (URL5, 2022)

2013 yılında yayınlanan elektrik piyasası şebeke yönetmeliğine göre, arıza sırasında gerilim düşümünün '1' numaralı bölgede kaldığı durumlarda, rüzgâr türbini aktif gücü, arıza temizlendikten hemen sonra saniyede anma gücünün en az %20'si oranında artırılarak, üretilebilecek maksimum aktif güç değerine ulaşması beklenmektedir. Gerilim düşümünün '2' numaralı bölgede kaldığı durumlarda ise, rüzgâr türbini aktif gücü, arıza temizlendikten hemen sonra saniyede anma gücünün en az %5'i oranında artırılarak, üretilebilecek maksimum aktif güç değerine ulaşması beklenmektedir.

3.2.2. Aktif Güç Kontrolü

Üretilen güç ile tüketilen güç arasında uyumsuzluk olduğunda frekansta sapmalar olabilmektedir. Frekansın kontrol edilebilirliğini sağlamak ve arıza oluştuğunda şebekenin kararlı hale getirilmesi için aktif güç kontrolü yapılmaktadır. Yani güç üretimi ve tüketiminin kontrolü ile frekans dengede tutulabilmektedir. Rüzgâr santrallerinin yoğun olarak bağlı olduğu bölgelerde şebekelerde aktif güç kontrolü sürekli olarak sağlanmalıdır. Aktif güç kontrolü ise rüzgâr türbinlerinin devreden çıkarılması yoluyla veya kanat açılarının değiştirilmesiyle yapılmaktadır.

İletim sistemine bağlı rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesislerinde Yönetmeliğin 61 inci maddesinde tanımlanan acil durumlarda aktif güç kontrolü yapılabilecektir. Rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisinin aktif güç çıkışı, gerektiğinde TEİAŞ tarafından gönderilecek sinyallerle, santralin o anki şartlarda emre amade gücünün %20-%100'ü arasında otomatik olarak kontrol edilebilir olmalıdır (URL5, 2022). Bu kapsamda;

a) Kurulu gücü 100 MW ve altında olan rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisleri için, yük alma hızı dakikada santral kurulu gücünün %5'ini geçmemelidir, yük atma hızı ise dakikada santral kurulu gücünün %5'inden az olmamalıdır(URL5, 2022).

b) Kurulu gücü 100 MW'ın üzerinde olan rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisleri için, yük alma hızı dakikada santral kurulu gücünün %4'ünü geçmemelidir, yük atma hızı ise dakikada santral kurulu gücünün %4'ünden az olmamalıdır(URL5, 2022).

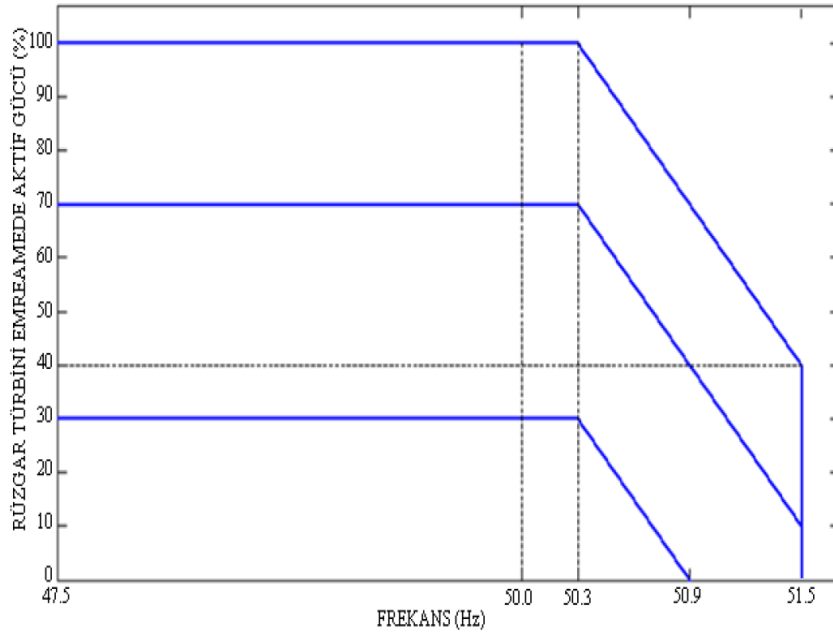
3.2.3. Frekans Tepkisi

Anlık enerji üretimi ve tüketiminin dengeli olduğu durumlara güç sistemlerinde frekans dengesi denilmektedir. Güç sistemlerinde enerji üretimi veya tüketimde yaşanan ani değişkenlikler frekansın dengesinin bozulmasına sebep olmaktadır. İlgili yönetmeliklere göre rüzgâr santrallerinin belirli aralıklarda çalışması gerekmektedir. Rüzgâr santrallerinde düşük frekanslarda jeneratörler devre dışı kalabilir, yüksek frekanslarda ise jeneratörlerde ısınmaya bağlı ömür azalmasında ve yalıtım sorunları çıkmasına sebep olabilir.

Ülkemizdeki şebeke yönetmeliğine göre; rüzgâr santralının bağlantı noktasındaki frekans değişimine göstermesi beklenen aktif güç tepkisi Şekil 3.5'de verilmiştir. Buna göre, sistem frekansı 47,5 Hz ile 50,3 Hz arasında olduğu sürece, çalışır durumdaki rüzgâr türbinlerinin hiç biri devre dışı kalmamalıdır. Frekansın 50,3 Hz'i aştığı durumda, kurulu gücünün Şekil 5.9'de belirtilen ilgili eğriyi takip etmesi ve 51,5 Hz frekans değerinde tamamen devre dışı kalması istenmektedir(URL5, 2022).

Tablo 3.1. Türkiye şebeke yönetmeliğine göre üretim santrallerinin frekans limitleri(URL5, 2022)

Frekans Aralığı	Minimum Süre
50,5 Hz - 51,5 Hz	1 saat
49 Hz - 50,5 Hz	Sürekli
48,5 Hz - 49 Hz	1 saat
48 Hz - 48,5 Hz	20 dakika
47,5 Hz - 48 Hz	10 dakika



Şekil 3.5. Rüzgâr santrallerinden beklenen frekans tepkisi(URL5, 2022)

3.3. Gerilim Kalitesine Etkileri

3.3.1. Ani Gerilim Düşümü

Ani gerilim düşümü nominal gerilimin 1% ile 90% arasındaki ani bir düşümün ardından 1 milisaniye ile 1 dakika arasında normale dönmesi olarak tanımlanır. Bir yıl içerisinde beklenen gerilim düşümü sayısı 10 ile 1000 arasında değişebilir. Nominal gerilimin 10% ile 15% arasındaki düşüşleri genellikle yüklerin değişmesinden kaynaklanırken daha büyük düşüşler arızalardan kaynaklanabilir.

Bir rüzgâr santrali devreye alınırken nominal gerilimde ani bir azalma meydana gelebilir ancak kısa bir süre sonra normale döner. Her rüzgâr santralinde gerilim değişim faktörü $ku(\psi_k)$ ve S_n nominal görünür güç, S_k ise kısa devre gücü ile tanımlanırsa ani gerilim düşümü (d) şu şekilde ifade edilebilir;

$$d = 100 \times ku(\psi_k) \times S_n / S_k \quad (3.1)$$

Bir rüzgâr santralinde tüm rüzgâr türbinlerinin aynı anda devreye alınması olası olmadığından burada rüzgâr türbin sayısı önemli değildir (Işık ve Özdemir, 2021).

3.3.2. Gerilim Değişimi

Birkaç dakikalık aralıklarla oluşan efektif gerilim değişikliklerine gerilim değişimi denilmektedir. Gerilim değişimleri yük ve üretim kapasitesinde gerçekleşen değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Rüzgâr türbinleri de rüzgâr hızı ve miktarına bağlı olarak üretim kapasitesinde oluşan değişikliklerden ötürü bu gerilim değişimlerine sebep olabilmektedir.

Yavaş gerilim düşümleri 10 dakikalık aralıklarla ölçülen ortalama değerler olarak ifade edilmektedir. Piyasada bulunan analiz programlarıyla mevcut yük durumları ve olası yük durumları dikkate alarak yavaş gerilim değişimleri analiz edilebilmektedir.

Şebeke bağlantısında 10 dakikalık aralıklarla ölçülen yavaş gerilim değişimleri haftanın 95% inde nominal gerilimin +/-10% içerisinde olması EN 50160'a göre beklenmektedir. Yalnızca düşük gerilim için, yavaş gerilim değişimleri her zaman $Un'un\% -15\% + 10'u$ aralığında olacaktır.

Santral kapasitesinin artması maksimum gerilimin artmasına neden olacağından dolayı, bu artışın üstesinden gelebilmek için rüzgâr türbininin güç faktörü ayarlanmalıdır. Güç faktöründe azalma sağlanabilirse maksimum gerilim azalır ve bu sayede daha fazla rüzgâr gücü sağlanabilir.

Minimum ve maksimum yük seviyeleri tahminlerindeki olası belirsizlikler güvenlik marjları oluşturabilir. Bununla birlikte rüzgâr türbinlerinin güç faktörünün ayarlanmasıyla olası bir yavaş gerilim değişimi kısıtlamasının önlenilebileceği önerisini değiştirmez.

Düşük güç faktörünü artan şebeke kayıplarına neden olabilmektedir. Bu durum, güç faktörü düzenlemesinin dikkatle kullanılması gerektiği ve alternatif seçeneklerin değerlendirilmesi gerektiği anlamına gelir. Alternatif seçeneklere örnekler; yeni hatların döşenmesiyle şebekenin güçlendirilmesi ve rüzgâr santralının gücünün gerilime bağlı olarak azaltılmasıdır. Şebeke kayıplarındaki artışı önemsiz bir düzeye düşürebilecek olan gerilime bağlı güç faktörü kontrolünü dikkate almak daha da önemlidir. Akıllı kontrol sistemleri, yüksek yük ve düşük rüzgâr koşullarında aşırı kompanzasyona izin verilmesi, şebeke kayıplarında net bir azalma sağlayabilir. Bunu değerlendirmek için, tekrarlanan yük akışı, yıl boyunca beklenen tüketim dağılımı ve rüzgâr enerjisi üretimi dikkate alınarak analizler yapılmalıdır.

3.3.3. Gerilim Kırışması(Flicker)

Rüzgâr hızına bağlı gerilimdeki hızlı değişkenlikler lambaların parlaklıklarında rahatsız edici seviyede kırışmalar meydana gelebilmektedir. IEC 61000-4-15 standardına göre titreşim ölçer ile bu kırışmalar ölçülebilmektedir. Uzun süreli kırışma şiddeti haftanın %95'i boyunca $P_{lt} \leq 1$ olacaktır(Dumlu, 2015). Kırışma şiddetinin etkisi öznel olduğu yani kişiden kişiye göre değişebildiğinden dolayı $P_{lt} = 1$ olduğunda da kırışma etkisinin yüksek olduğu kabul edilebilir.

Dağıtım şebekelerine bağlantı yapan kullanıcıların bağlantılarında $P_{lt} \leq 1$ koşulunu sağlamak için şebekeye bağlı kırışmaya sebep olabilecek her bir üretim tesisin sınırlı şekilde kırışmaya neden olmasına izin verilmektedir. IEC 61000-3-715 standardı bu sınırlama için kılavuz olarak kullanılmaktadır.

Rüzgâr türbinlerinin devreye almasında oluşan anahtarlama işlemleri veya sürekli çalışma sırasındaki çıkış gücündeki hızlı gerilim dalgalanmaları nedeniyle kırışmalar yaşanabilmektedir.

Tek bir rüzgâr türbininden veya rüzgâr çiftliğinden kaynaklı kırışma aşağıdaki formüllere göre değerlendirilebilir.

Hem anahtarlama işlemleri Denklem (3.2) ve (3.3) hem de sürekli çalışma Denklem (3.4) nedeniyle kırışma emisyonunu değerlendirmek için prosedürler verilmiştir;

$$P_{st} = \frac{18}{S_k} \times \left(\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{10,i} \cdot (k_{f,i} (\psi_k) \cdot S_{n,i})^{3,2} \right)^{0,31} \quad (3.2)$$

$$P_{lt} = \frac{8}{S_k} \times \left(\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{120,i} \cdot (k_{f,i} (\psi_k) \cdot S_{n,i})^{3,2} \right)^{0,31} \quad (3.3)$$

$$P_{st} = P_{lt} = \frac{1}{S_k} \times \left(\sum_{i=1}^{N_{wt}} (C_i (\psi_k, U_a) \cdot S_{n,i})^2 \right)^{0,5} \quad (3.4)$$

(3.4) numaralı denklemde $P_{st} = P_{lt}$ olmaktadır. Çünkü kısa süreli (10 dakika) koşulların uzun süreli (2 saat) olması muhtemeldir. Ayrıca (3.4) numaralı denklemde rüzgâr türbinleri arasındaki maksimum güç seviyesinin birbiriyle ilişkili olmadığı varsayılmıştır.

Ancak özel koşullarda, bir rüzgâr çiftliğindeki rüzgâr türbinleri senkronize olabilir ve bu da güç dalgalanmalarının çakışmasına neden olabilir.

3.3.4. Frekansa Etkisi

EN 50160'a standardı dikkate alındığında temel frekansın 10 saniyelik ortalama değeri bir yılın %99,5'ini kapsadığı süre boyunca +/-%1 olması gerekmektedir. Bu aralık da frekansın 49,5 ile 50,5 Hz aralığında olması anlamına gelmektedir. Yönetmeliklere göre rüzgâr türbininde elde edilen elektrik enerjisinin frekansı 50 Hz'i aştığında türbinin nominal gücü azaltılmalı ve bir süre sonra da devreden çıkarılmalıdır.

Şebekeye bağlı çalışan rüzgâr santrallerinde enterkonnekte şebekeye nispeten küçük bir güç katıldığı için frekans üzerinde önemli bir etki yapmaz. Rüzgâr türbinlerinin aralıklı güç üretimi diğer üretim birimleri ile dengelenir. Şebekeye bağlı olmayan izole sistemlerde rüzgâr gücünün etkisi oldukça önemlidir. Böyle bir sistemde dönme rezervi dizel jeneratör ile sağlandığından oldukça kısıtlıdır. Ani bir rüzgâr artışı veya düşüşü meydana geldiğinde frekans dalgalanmaları oluşur. Bu yüzden günümüzde çoğu güç sisteminde rüzgâr türbinlerinin frekans üzerindeki etkisi ihmal edilebilir olduğundan frekans ile ilgili çalışmalar izole sistemler dışında çok fazla yapılmamaktadır(Ackermann, 2005).

3.3.5. Rüzgâr Santrallerinde Oluşan Geçici Aşırı Gerilim

Güç sistemlerindeki aşırı gerilimler, sürekli çalışma aşırı gerilimi, geçici aşırı gerilim, yavaş ön aşırı gerilim(anahtarlama), hızlı ön aşırı gerilim(yıldırım) ve çok hızlı ön aşırı gerilim olmak üzere beş kategoride sınıflandırılabilir.

Geçici aşırı gerilimlere esas olarak havai enerji iletim hattı sistemlerindeki yıldırım neden olurken, anahtarlama işlemleri her zaman kablo sistemlerinde geçici aşırı gerilimlere neden olmaktadır.

Rüzgâr santrallerinde işletme gerilim seviyesi yüksektir. Rüzgâr santralleri yüksek gerilim seviyesinde çalıştığında, anahtarlamanın neden olduğu geçici aşırı gerilim daha yüksek olacaktır, bu da rüzgâr enerjisi sistemindeki ekipmanın güvenliği ve güvenilirliği için daha büyük risk getirir.

Bir RES'te meydana gelen geçici aşırı gerilimler, geçici aşırı gerilimler ile çok hızlı ön geçici aşırı gerilimler aralığında oluşabilmektedir. RES'in farklı yerleşimleri ve RES'te kullanılan belirli elektrik ekipmanları göz önüne alındığında, RES'te oluşan geçici aşırı gerilimler, geleneksel enerji santrallerinden farklıdır. Ek olarak, RES'lerde yaygın olarak kullanılan güç kabloları nedeniyle, bir RES'in dahili elektrik sistemi esasen bir kablolu ağ sistemidir. Rüzgâr enerjisinin rastgeleliği ve kesintili olması nedeniyle, RES'lerdeki devre kesiciler sık sık anahtarlanır ve bu da aşırı gerilimlerin anahtarlama olasılığını artırabilir. Bir kablo sistemine bağlı bir transformatör, bir havai hat sistemine bağlı olandan en az 10 kat daha dik bir geçici aşırı gerilime maruz kalır(Liu ve diğ., 2014).

Anahtarlama aşırı gerilimi, kaynağın faz açısı, hattın elektrik parametreleri(besleme kablosunun uzunluğu, enerji verilen fider sayısı) vb. gibi birçok faktörden etkilenir. Kaynak geriliminin genliği maksimum olduğunda devre kesici açılırsa(açma faz açısı 90 derece), anahtarlama aşırı gerilimi maksimum olmaktadır. RES'lerdeki geçici aşırı gerilim, elektriksel streslere ve güç ekipmanlarında arızalara, özellikle jeneratör terminallerinde bulunan yükseltici transformatörlerin yalıtım arızalarına neden olabilmektedir.

Geleneksel enerji santralleri ile karşılaştırıldığında, rüzgâr santralleri kendi karakteristik özelliklerinden dolayı geçici gerilimlere karşı daha savunmasızdır. Rüzgâr santrallerinde oluşan bu aşırı gerilimler transformatörlerin yalıtım arızalarına sebep olup ömürlerinin azalmasına katkıda bulunabilir. Rüzgâr santrallerinde oluşan geçici aşırı gerilimler vakumlu devre kesicilerinin anahtarlama işlemlerinden kaynaklanmaktadır. Rüzgâr santrallerinde enerjilendirilmemiş fiderlere bağlı devre kesicilerinin açmasıyla oluşan aşırı gerilim, enerjilendirilmiş fiderlere bağlı devre kesicilerin açmasıyla oluşan

devre kesicilerinden daha yüksek olmaktadır. Bu sebeple enerjilendirilmiş fiderlere bağı devre kesicilerin açmasıyla oluşa aşırı gerilimler transformatörleri daha çok etkilemektedir.

3.4. Rüzgâr Türbinlerinde Harmonik Etkisi

Rüzgâr enerjisi santrallerinin(RES) boyutlarının sürekli artması ve bunların küresel enerji şebekelerine entegrasyonu ile rüzgâr enerjisi üretiminin güç sistemi operasyonları üzerindeki etkilerinin daha derin bir şekilde anlaşılması gerekmektedir.

Bu sürekli büyüme, RES'lerin şebekeye başarılı entegrasyonu için kılavuzlar oluşturmaya yönelik yeni standartların ve şebeke kodlarının geliştirilmesine yol açmıştır. RES entegrasyonunun çeşitli teknik yönlerinden biri, rüzgâr türbinleri tarafından üretilen gücün kalitesini korumanın önemidir. Geleneksel santraller gibi, RES'lerin de güvenilirlik ve istikrarı sağlamak ve şebekeye bağlı son kullanıcılara iyi güç kalitesiyle(yani sabit gerilim ve frekans, minimum bozulma, düşük harmonik emisyon) enerji sağlaması gerekir. RES'ler ana şebekeye entegre edildiğinden, harmonik bozulma güç kalitesi ile ilgili sorunlardan biri olmuştur.

Rüzgâr türbini jeneratörleri Tip 1, Tip 2, Tip 3 ve Tip 4 olarak bilinen dört temel tipte sınıflandırılır. Tip 1 ve Tip 2 'ler, ani akımları ve gerilim düşüşlerini azaltmak için yumuşak yol vericiler kullanır, bu da büyüklük olarak düşük ve süre olarak kısa harmonik akımlar üretebilir.

Tip 3(çift beslemeli endüksiyon jeneratörü) ve Tip 4 'ler arka arkaya kontrollü güç elektroniği dönüştürücüleri ile donatılmıştır ve şebekeye harmonik üretebilirler.

RES'lerden gelen harmonik bozulma, önceden var olan harmonik ağ bozulması ile etkileşime girebilir ve ilgili harmonik frekanslardan bazıları bir rezonans noktasını uyarırsa çeşitli sorunlara neden olabilir.

Harmonik rezonansa, endüktif ve kapasitif elemanların etkileşimi neden olur. Bir RES içinde, birkaç eleman birbiriyle rezonansa girebilir(transformatörler, güç kabloları, kapasitör bankaları, vb.). Bir frekans(gerilim veya akım), kapasitif eleman reaktansına eşit bir endüktif eleman reaktansı yaşadığında, bir rezonans meydana gelir.

Harmonik aşırı gerilimler veya harmonik aşırı akımlar, sırasıyla paralel veya seri rezonans koşulları nedeniyle bir güç sisteminde görünebilir. Rüzgâr türbinlerinin harmonik emisyonu, endüstriyel tesisler veya yerleşim alanları gibi tipik harmonik kaynaklarda bulunan emisyondan farklıdır.

Harmonikler, akımların ve gerilimlerin sinüsoidal salınımlarıdır. Harmonikler akımların veya gerilimlerin sinüsoidal olmayan bir biçime sahip olması durumunda meydana gelir.

Harmoniklerden kaynaklı olmak üzere kapasitörlerin tahrip olmasına yol açabilecek dielektrik ve yalıtım malzemelerinin erken yaşlanması, ses frekansı dalgalanma kontrol sistemlerinin bozulması ve koruyucu cihazlarda olası arızalar, güç elektroniği ekipmanlarındaki işlevsel bozukluklar neden olabilir.

4. RÜZGÂR SANTRALİNDE GERİLİM DEĞİŞİMİN ETKİSİNİN ANALİZİ

Rüzgâr santrallerinde 3 faz-toprak kısa devre arızaları ve transformatörlerin önünde ve arkasında yer alan kesicilerin anlık arıza sebebiyle açma kapamasıyla oluşan aşırı gerilimlerin transformatörlere çeşitli etkileri oluşmaktadır. Yüksek lisans tez kapsamında ilgili tek hat şeması ve rüzgâr santralinde yer alan transformatör, şebeke, bara ve kablo bilgileri (Bayraktar, 2021) kaynağından alınarak ETAP programı yardımıyla analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında 3 ayrı daldan oluşan sistemde 35 MW kurulu güce sahip 10 adet rüzgar türbini, her rüzgâr türbinine bağlı 3,9 MVA gücünde 0,63/33 kV transformatör ve tüm rüzgar türbinlerinin bağlı olduğu ve şebekeye bağlı olan 50 MVA 33/154 kV ana transformatör bulunmaktadır. Bu tek hat şemasına ait veriler Tablo 4.1’de görülmektedir. Simulasyon yapılırken şekil 2.20’de gösterilmiş olan tip 3 çift beslemeli asenkron jeneratöre sahip rüzgar türbini referans alınmıştır ve çalışmada rüzgar hızının sabit olduğu öngörülmüştür.

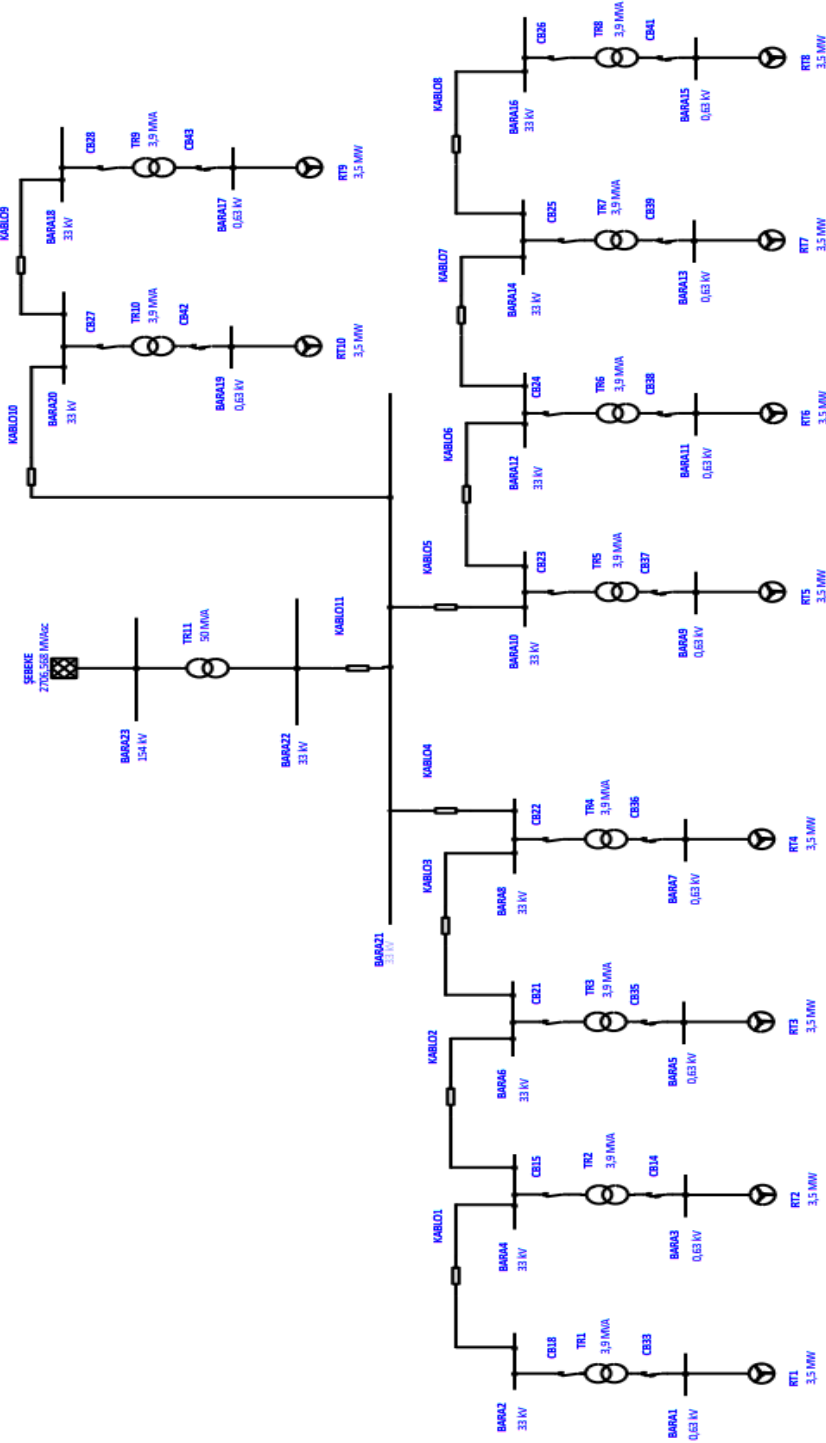
Tablo 4.1. Rüzgâr santrali güç sistem parametreleri

Parametre	Değer	Adet
Rüzgar Santrali Kurulu Gücü (MW)	35	1
Rüzgar Türbin Gücü (MW)	3,5	10
Türbinin Devreye Girdiği Rüzgar Hızı (m/s)	2,5	10
Türbinin Devreden Çıktığı Rüzgar Hızı (m/s)	28	10
Güç Transformatör Gücü (MVA)	50	1
Rüzgar Türbin Transformatör Gücü (MVA)	3,9	10
Rüzgar Türbin Transformatör Gerilimi (kV)	0,6/33	10

4.1. Anahtarlama Aşırı Gerilimlerin Analizi

Rüzgâr santrallerinde devre kesicilerde olan anahtarlama işlemleri transformatör sargılarının endüktansına ve kablo kapasitanslarına bağlan olarak geçici aşırı gerilimler oluşmaktadır. Tahmin edilmesi zor olan rüzgâr hızı sebebiyle rüzgâr santrallerinde bu tür olaylar belirsiz zamanlarda ve belirsiz sayılarda gerçekleşebilmektedir. Aşırı gerilimlerin

oluşabilmesinde bir diğer etken ise rüzgâr türbinlerinin bağlı olduğu baralarda 3 faz-toprak kısa devre arızalarının gerçekleşmesidir. Bu tür durumlarda da rüzgâr türbinine bağlı transformatörler ve rüzgâr türbinleri etkilenmektedir. Şekil 4.1’de ilgili tek hat şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.1. ETAP’ta simülasyonu yapılan RES’e ait tek hat şeması

4.2. Üç Faz-Toprak Kısa Devre Arızasının Etkisinin İncelenmesi

Tablo 4.1’de verilen veriler kullanılarak Şekil 4.2’de Bara 1’de 2.saniye’de 1 saniye boyunca rüzgar türbinleri tam yükte çalışırken ve ilgili bara devreden çıkarılmadan arıza temizlendikten sonra 3 faz-toprak kısa devre arızası gerçekleştiğinde transformatöre ve rüzgâr türbinlerine etkisi ETAP programı yardımıyla simülasyonu yapılmıştır. Arıza gerçekleşmeden önce tüm türbinler tam yükte çalışmaktadır. Arıza anında rüzgar çiftliğinde diğer güç ekipmanlarının ve türbinlerin arızasız olarak çalıştığı ve kesicilerin açmadığı duruma göre simulasyon yapılmıştır.

RT1’in bağlı olduğu bara 1’de 2.saniyede 1 saniye süreyle 3-faz kısa devre arızası olduğunda Şekil 4.6’da görüleceği üzere transformatörün sekonder kısmında çok yüksek kısa devre akımları oluştuğu, Şekil 4.5 ve Şekil 4.7’de görüleceği üzere transformatör geriliminin ve gücünün bu süre boyunca sıfıra kadar indiği gözlemlenmektedir.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te görüleceği üzere şebekeden kısa devre arızasının olduğu baraya kısa akımının aktığı ve buna bağlı transformatörün primerinde çok yüksek güçte kısa devre gücü oluştuğu gözlemlenmektedir. Buna bağlı olarak 4.4’te görülen primer sargılarında gerilimde düşüş gözlenmektedir.

Bara1’de kısa devre arızası gerçekleştiği için sistemdeki diğer trafolardan ve rüzgâr santrallerinden güç akışı olmakta ve TR1 trafosuna giren akım değeri artmakta olduğu gözlemlenmektedir. 3. saniyede arıza giderildikten sonra RT1’den TR1 trafosuna aktarılan güçte ve gerilimde salınım gerçekleşmektedir.

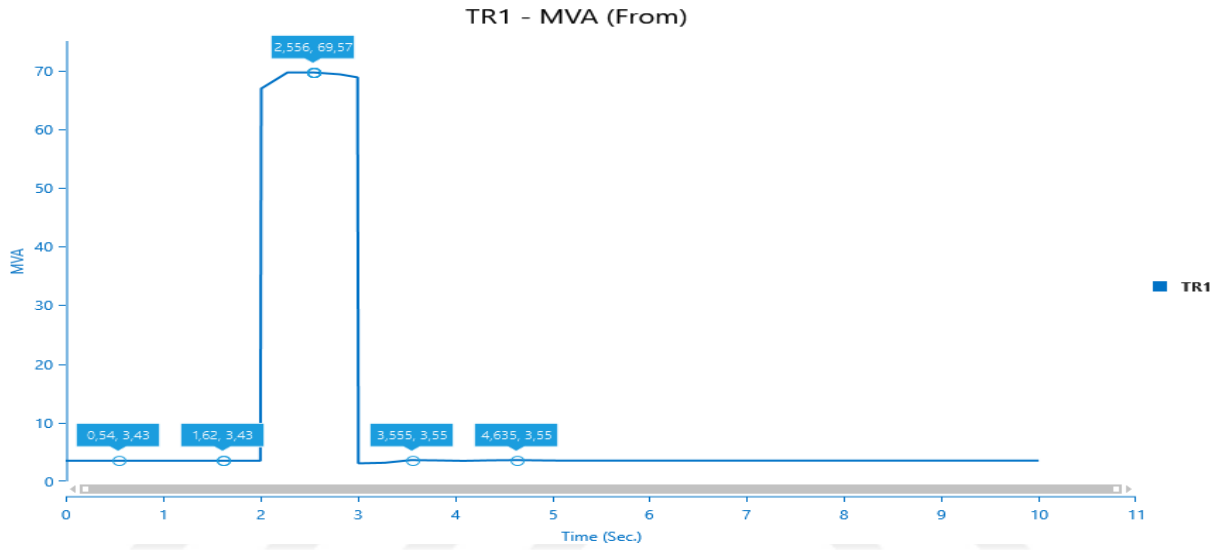
Şekil 4.8’de Arıza süresince RT1’de(2-3. Saniye arası) gerilim sıfıra kadar inmektedir. Arıza giderildikten sonra ise 3.sn ile 4.sn arasında gerilim, nominal rüzgar türbin geriliminin üzerine çıkıp 4. Saniyeye kadar salınım yaptığı ardından nominal gerilime indiği gözlemlenmektedir.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da görüleceği gibi arıza giderildikten sonra bir süre boyunca RT1’den elde edilen güç ve akımda salınım gerçekleşmektedir.

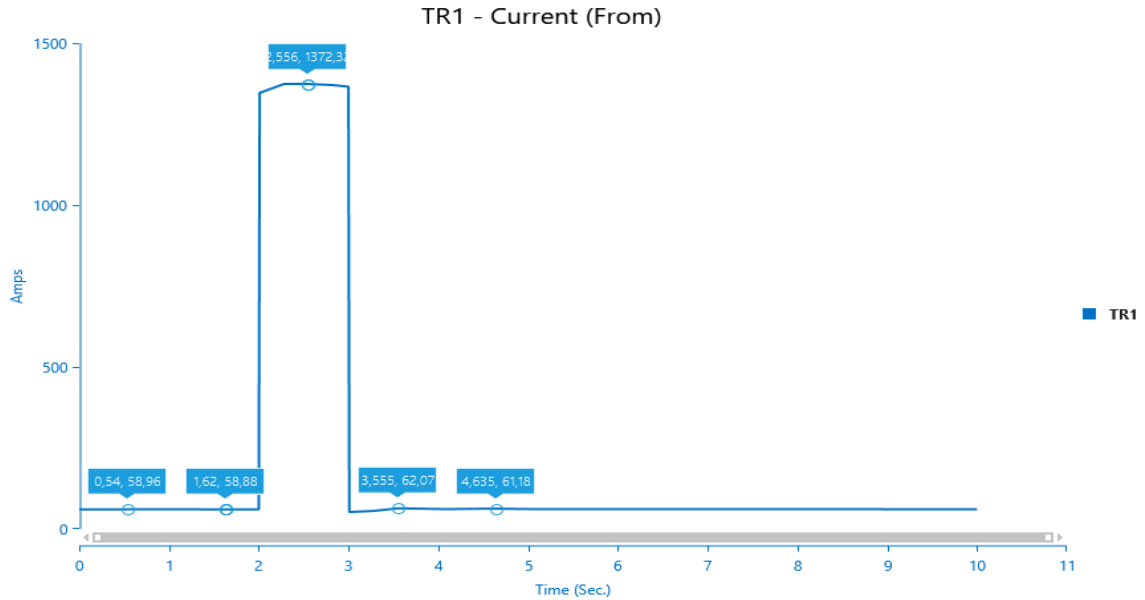
RT1’e en yakın türbin olan RT2’ de arıza anında gerilim ciddi şekilde düşüş göstermekte, arıza süresi boyunca kısmen sabit gerilimde devam etmekte ardından 3.saniyede arıza

giderildikten sonra RT2'nin gerilimi nominal gerilimin üzerine çıkacak şekilde tepe değerine ulaşır salınımlar yaparak sonunda nominal gerilimine döndüğü Şekil 4.11'de gözlemlenmiştir.

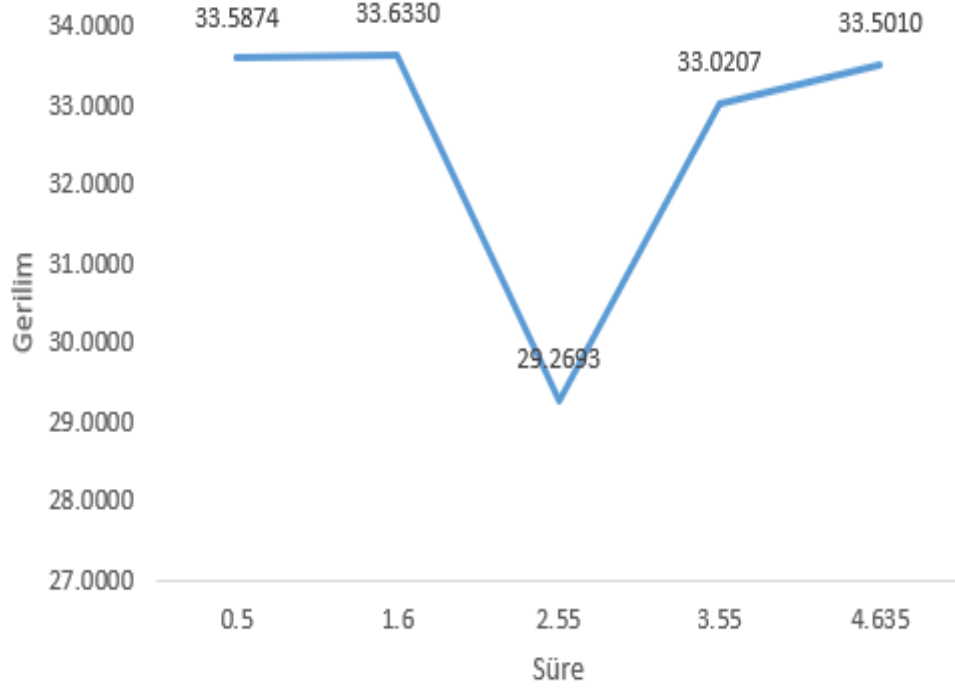
Buradan anlaşılacağı üzere bir rüzgâr çiftliğinde bir rüzgâr türbini barasında oluşan bir arızadan, rüzgâr çiftliğindeki diğer rüzgâr türbinleri ve transformatörleri mesafe ve kablo uzunluğuna göre etkilenmektedir.



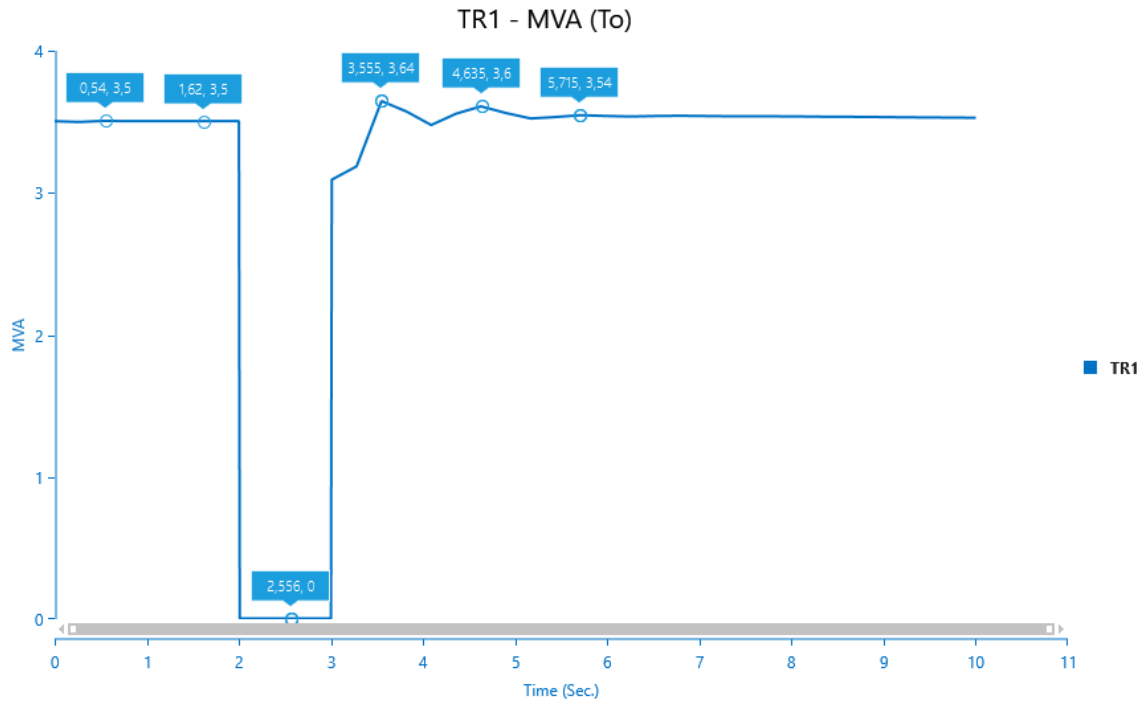
Şekil 4.2. RT1'e bağlı TR1 transformatöründen elde edilen güç



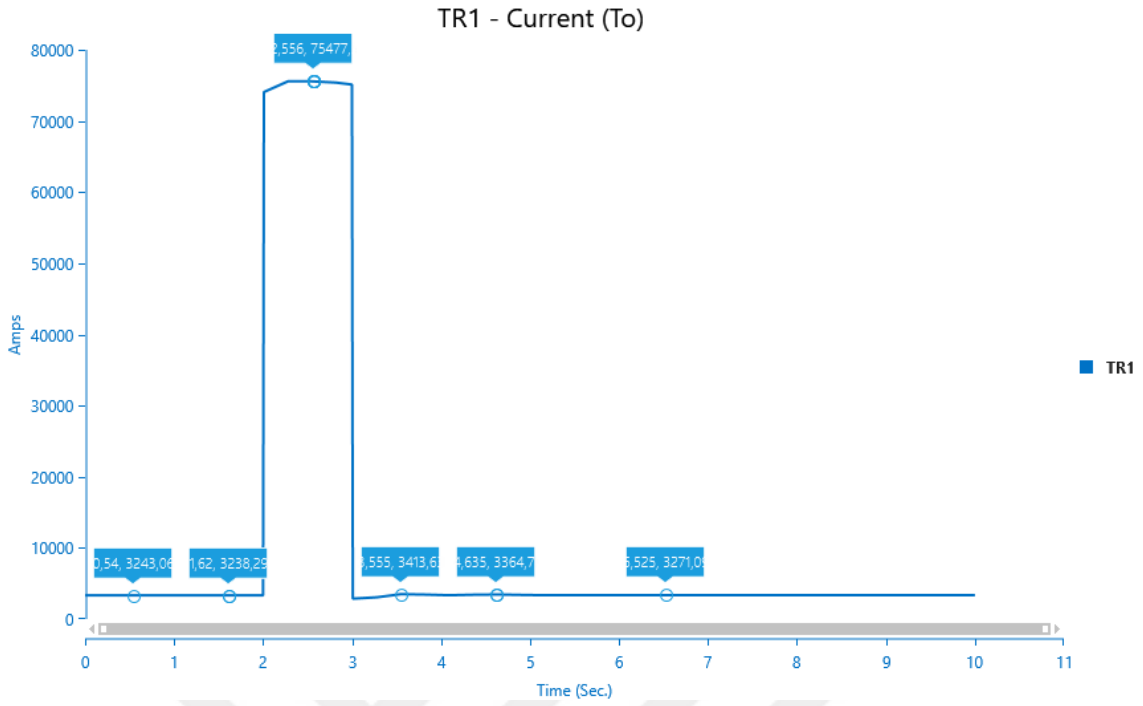
Şekil 4.3. RT1'e bağlı TR1 transformatöründen elde edilen akım



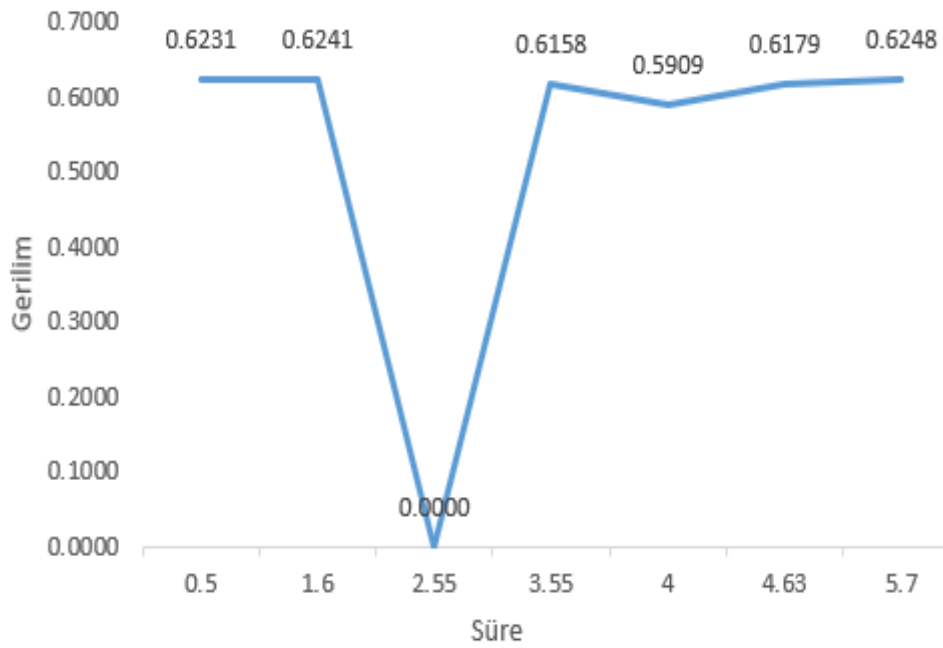
Şekil 4.4. RT1'e bağlı TR1 transformatörün primerindeki değişim



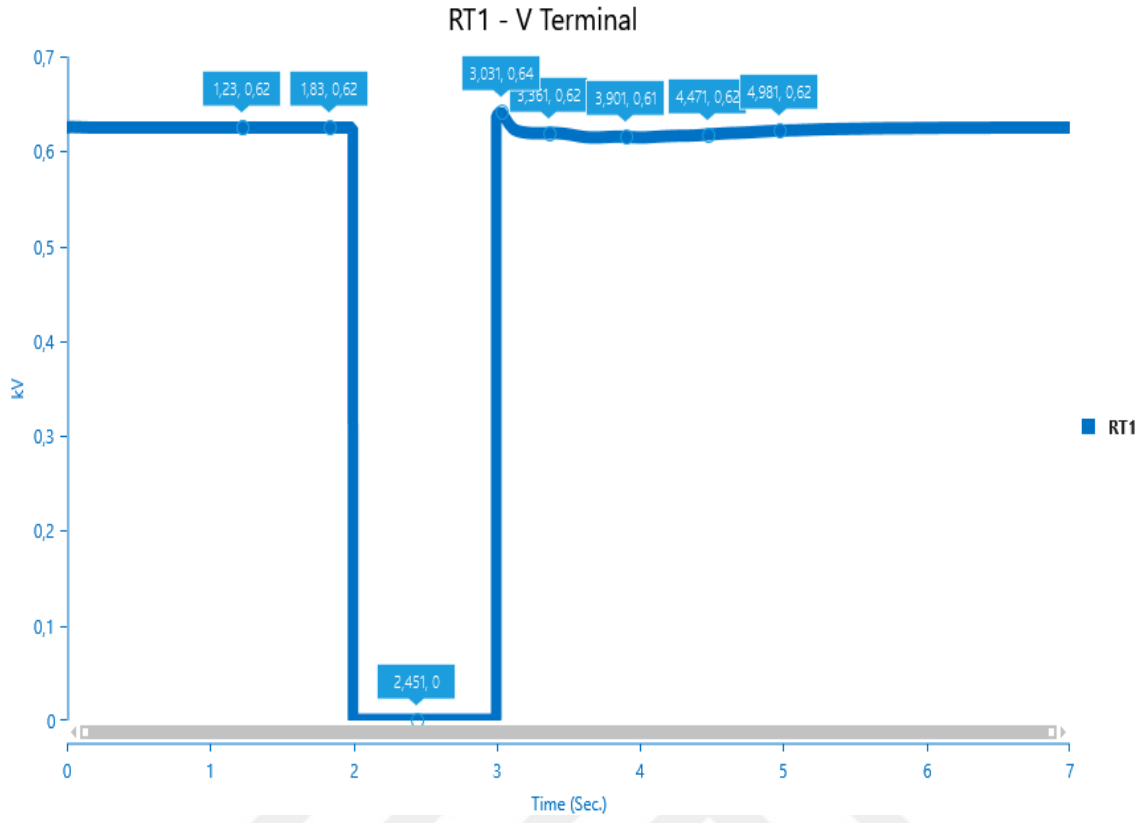
Şekil 4.5. RT1'e bağlı TR1 transformatörüne RT1'den aktarılan güç



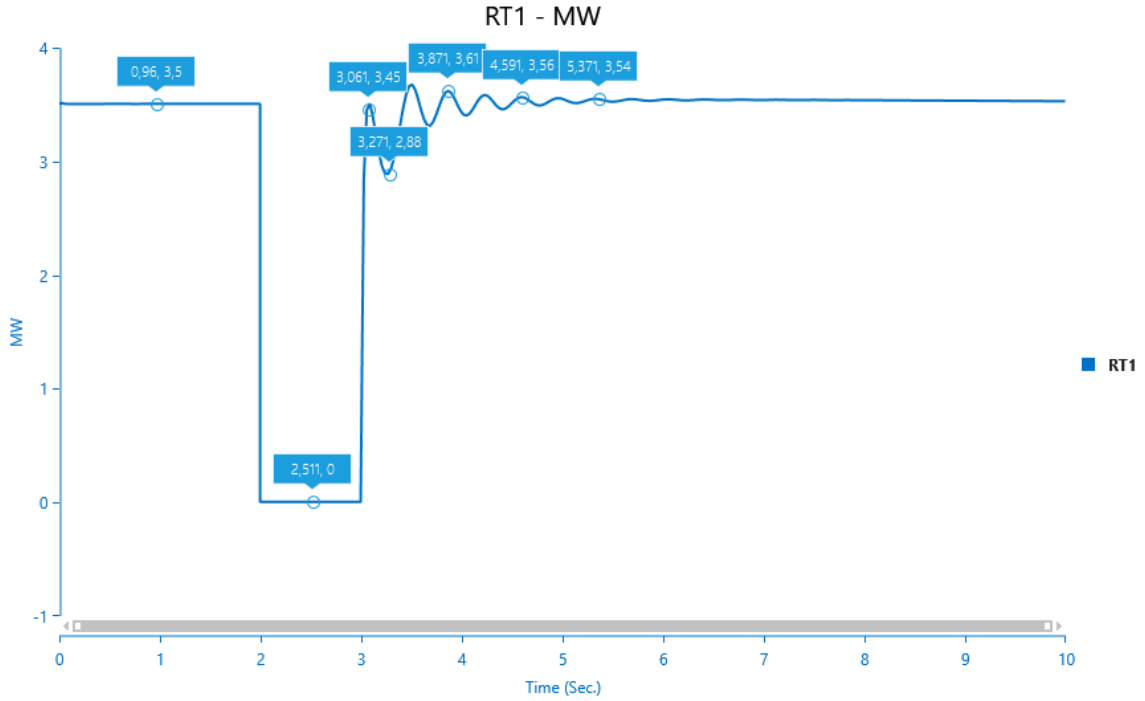
Şekil 4.6. RT1'e bağlı TR1 transformatörüne RT1'den aktarılan akım



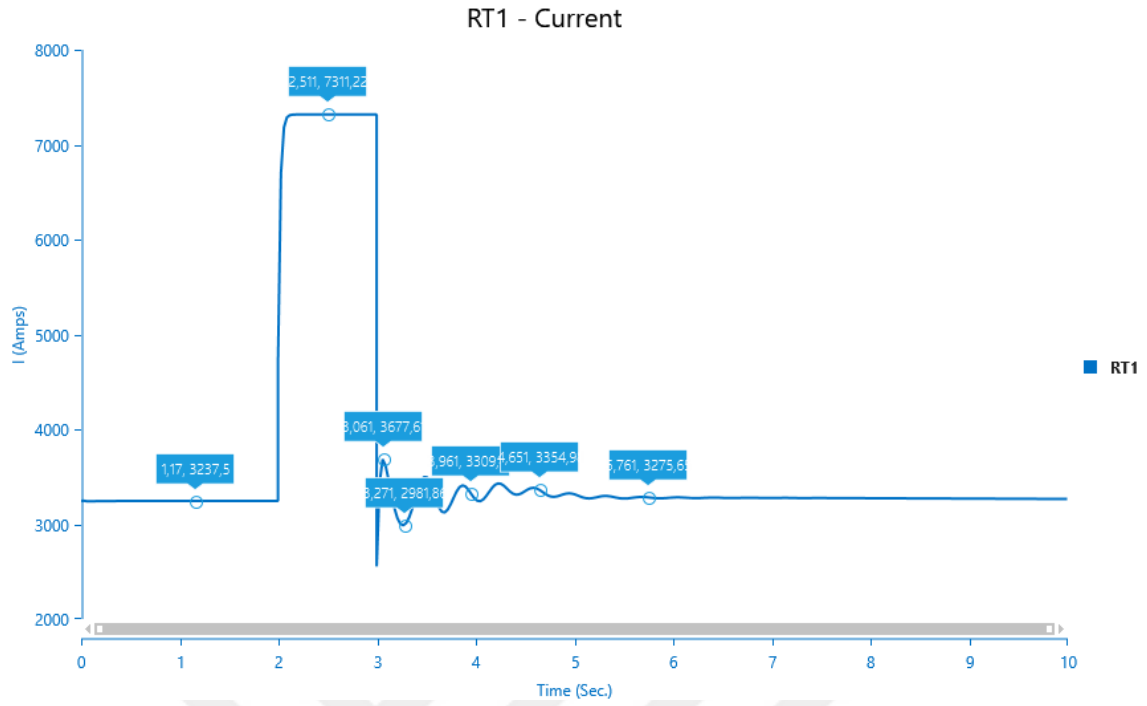
Şekil 4.7. RT1'e bağlı TR1 transformatörün sekonderindeki değişim



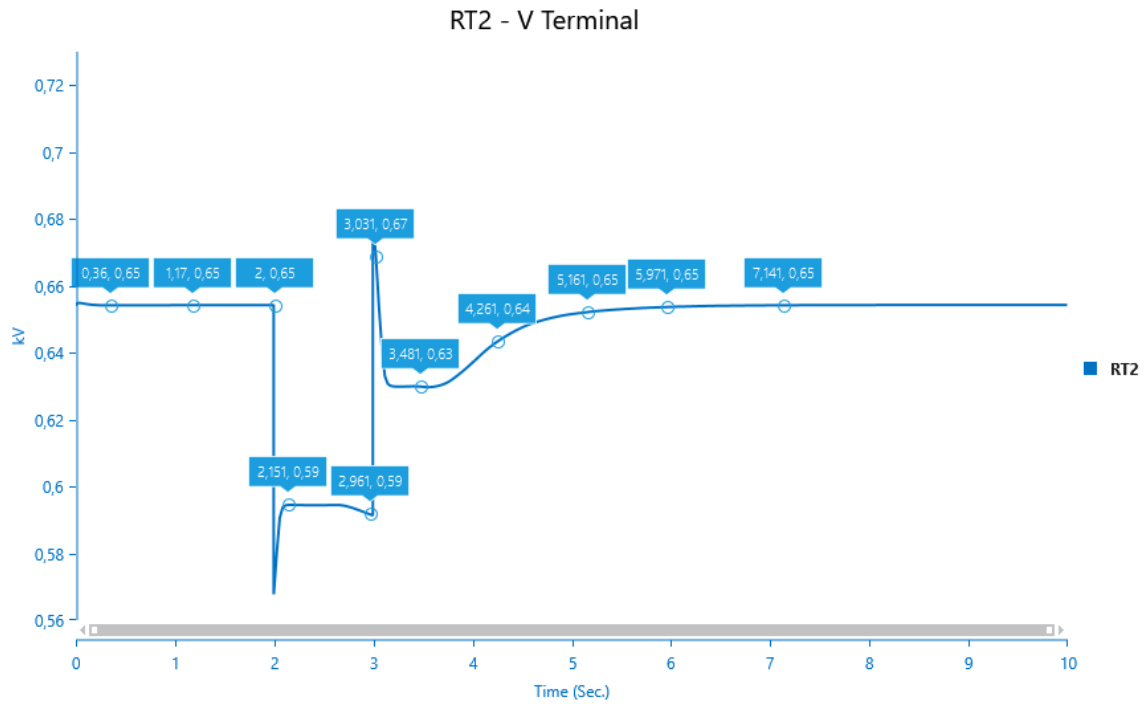
Şekil 4.8. RT1 'de arıza anında gerçekleşen gerilim düşümü ve artışı



Şekil 4.9. RT1 'de arıza anında gerçekleşen aktif güç dalgalanması



Şekil 4.10. RT1 'de arıza anında oluşan akımın dalgalanması



Şekil 4.11. RT1 'de oluşan arıza anında en yakın türbin RT2'nin gerilim değişimi

4.3. Kesici 1’de Anahtarlamanın Etkisinin İncelenmesi

Tablo 4.1’de verilen veriler kullanılarak Şekil 4.1’de kesici 1’de anahtarlama işlemi başlık 4.2’deki durumdan bağımsız olarak gerçekleştiğinde ve arıza temizlendikten sonra TR1 trafosu, RT1 ve RT2 rüzgâr türbinlerine olan etkileri ETAP programı yardımıyla analiz edilmiştir. Anahtarlama gerçekleşmeden önce tüm türbinler tam yükte çalışmaktadır. Anahtarlama anında rüzgar çiftliğinde diğer güç ekipmanlarının ve türbinlerin arızasız olarak çalıştığı ve kesicilerin açmadığı duruma göre simulasyon yapılmıştır.

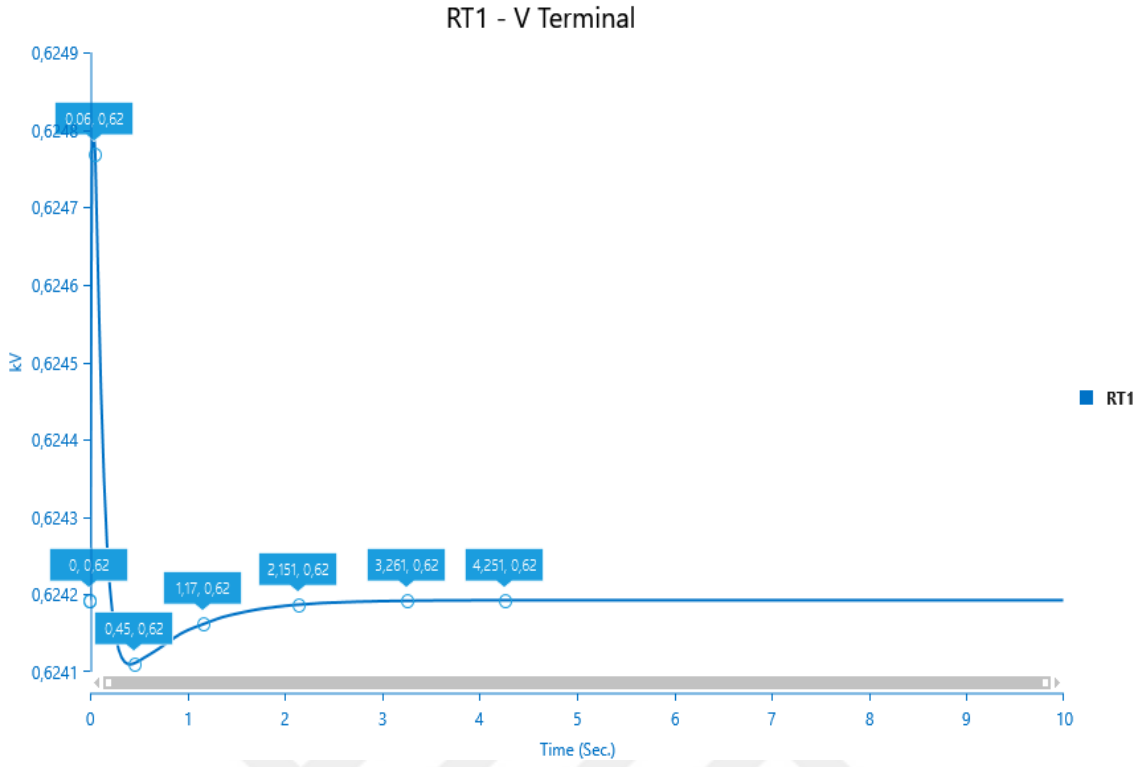
Anahtarlama işleminden önce RT1 rüzgâr türbininin çıkış gerilimi 0,62 kV seviyesinde sabit iken anahtarlama işlemi olduğunda anlık olarak rüzgâr türbininin Şekil 4.12 ‘de görüleceği üzere çıkış gerilimi 0,648 kV’a çıkmıştır. Ardından anahtarlama kapandığında ise ciddi bir düşüş yaşanıp 0,61 kV’a kadar düşüp ardından salınım yaparak 0,62 kV’a kadar tekrar yükselip stabil hale gelmiştir.

RT1’e en yakın konumdaki rüzgâr türbini olan RT2’de ise Şekilde 4.13’te görüleceği üzere benzer karakteristik izlenmiştir. Ancak RT2’nin RT1’deki anahtarlama olan mesafesinden kaynaklı olarak gerçekleşen salınım ve gerilim yükselmesi/düşüşleri daha azdır.

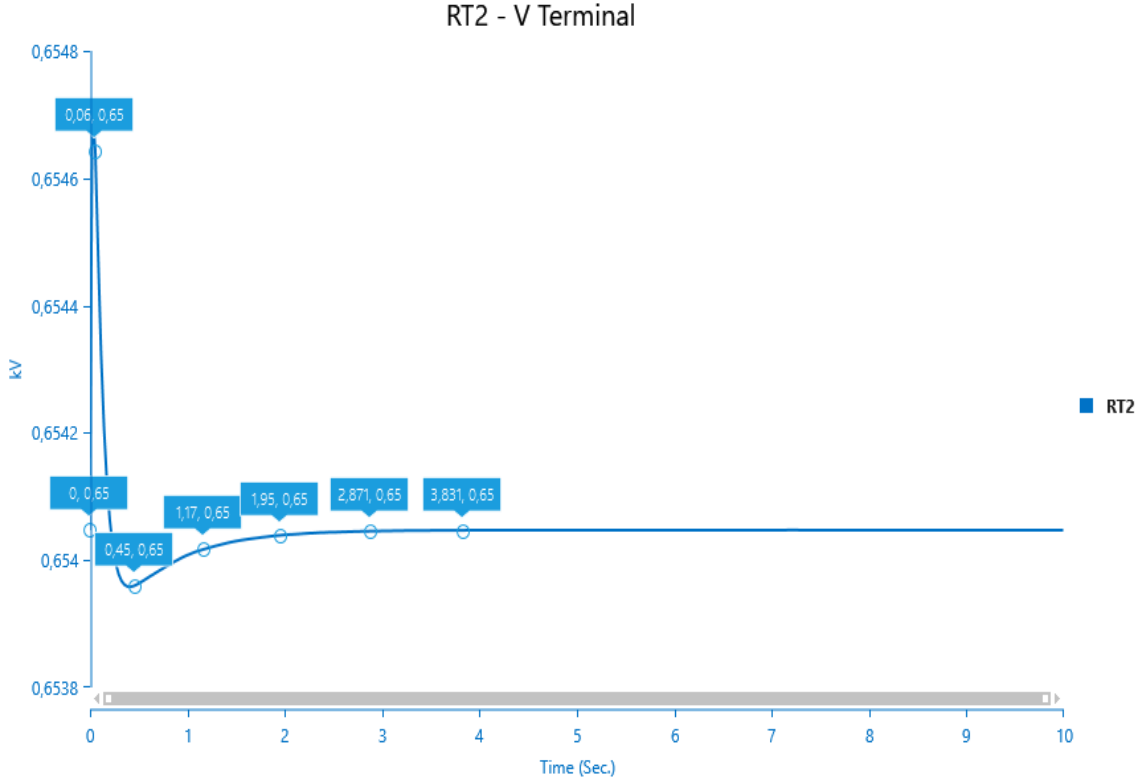
RT1 rüzgâr türbinine bağlı olan TR1 trafosundan şebekeye aktarılan güç ve akım karakteristikleri ve rüzgâr türbininden TR1 trafosuna aktarılan güç ve akım karakteristikleri Şekil 4.14, 4.15, 4.17 ve 4.18 ‘de görüleceği üzere benzer karakteristik izlenmiştir. Ancak TR1 trafosunun akım ve güç salınımları RT1’deki gerilim salınımindan daha uzun sürdüğü gözlenmiştir. Rüzgar türbin trafosunun anahtarlama anında primer ve sekonder sargısında anlık gerilim yükselmeleri gözlenmektedir.

Bu gerilim yükselmeleri sürekli olarak tekrarladığında, bu salınımların süresi trafonun ömrünün azalmasında ve izolasyon bozulmalarında ciddi etkindir.

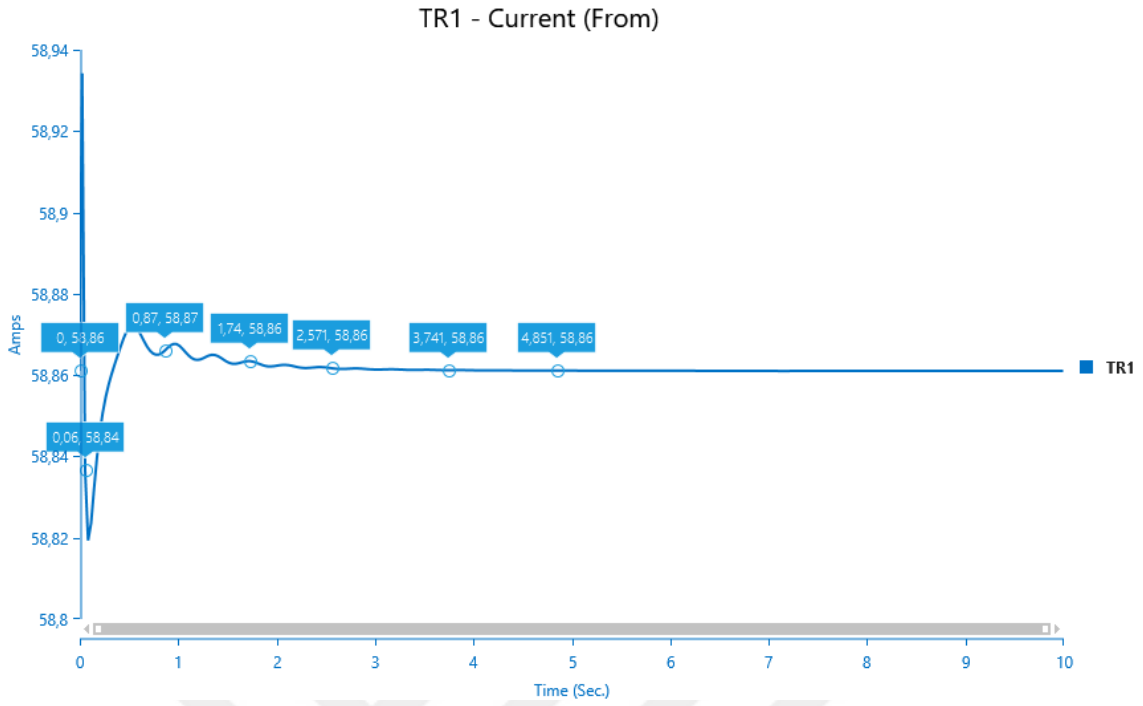
Şekil 4.16 ve Şekil 4.18’de görüleceği üzere anahtarlama anında TR1 primer ve sekonderinde ani gerilim yükselmeleri gerçekleşmekte ardından salınım yaparak nominal değere ulaşmaktadır.



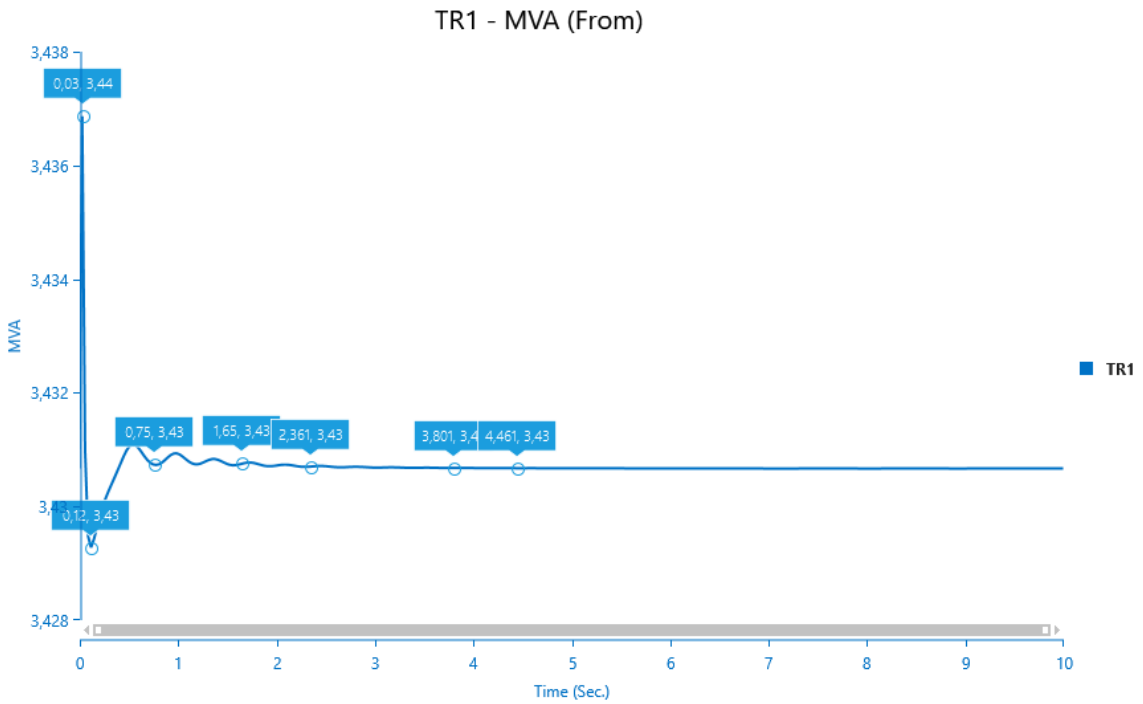
Şekil 4.12. Kesici1’de oluşan anahtarlama ardından RT1 de oluşan gerilim karakteristiği



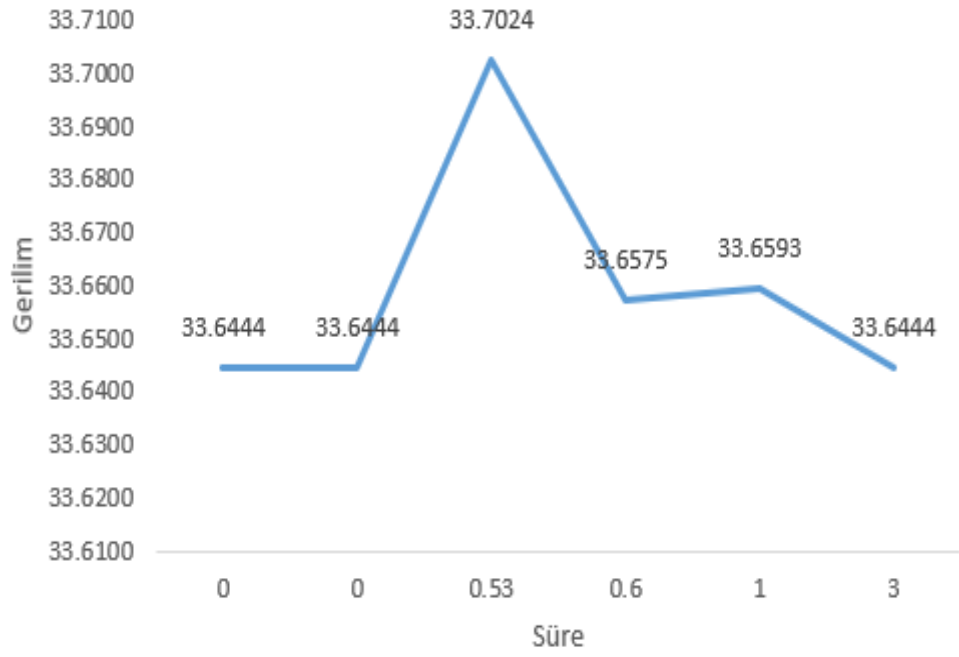
Şekil 4.13. Kesici1’de oluşan anahtarlama ardından en yakın rüzgâr türbini olan RT2’ de oluşan gerilim karakteristiği



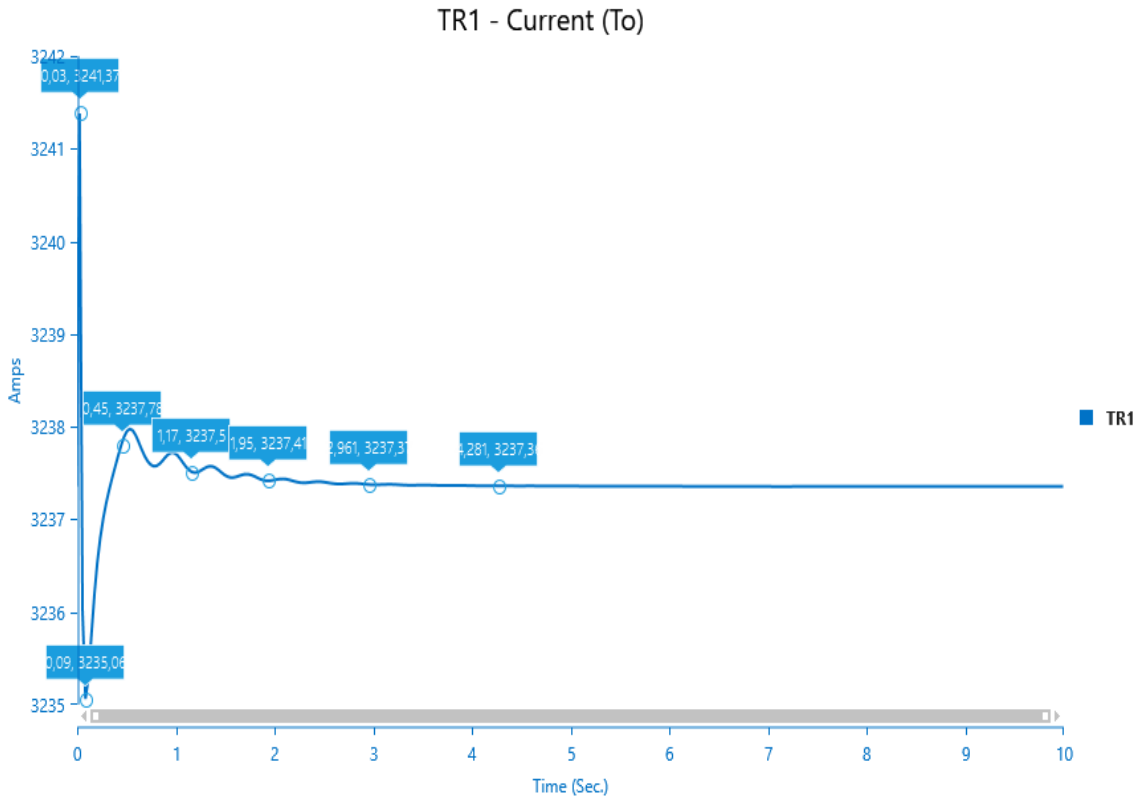
Şekil 4.14. Kesici1’de oluşan anahtarlama ardından TR1 den elde edilen akıma etkisi



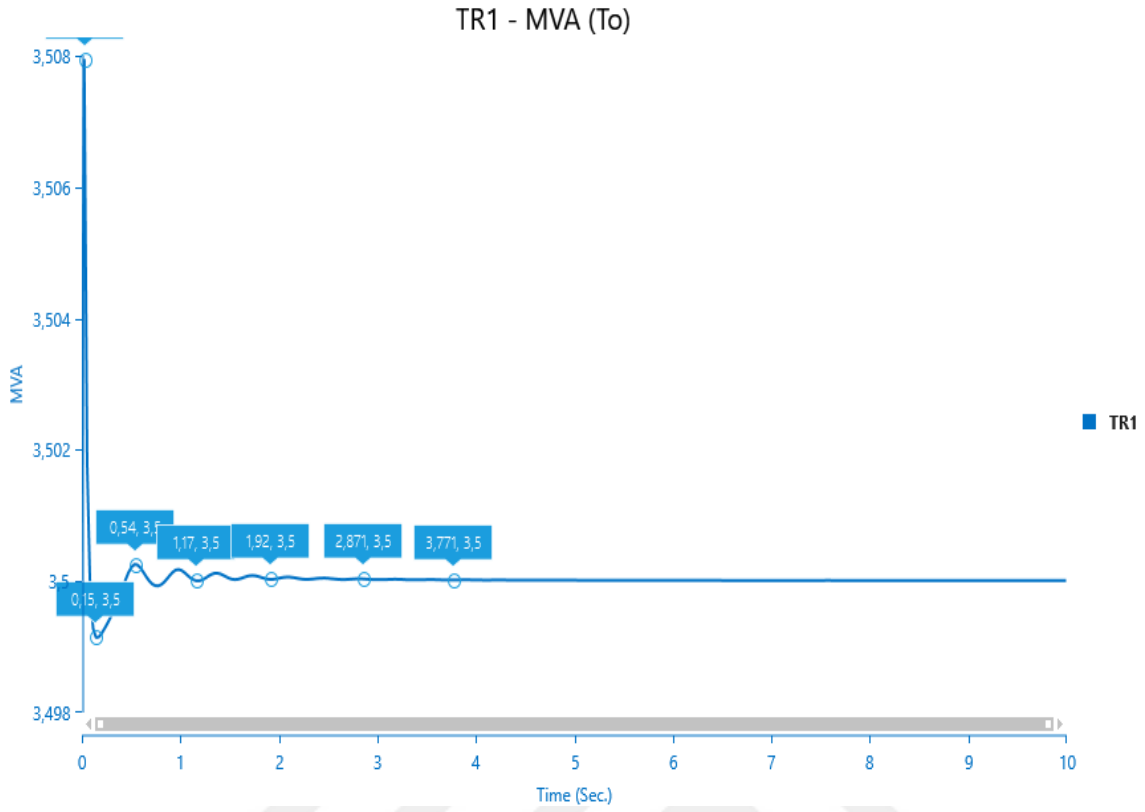
Şekil 4.15. Kesici1’de oluşan anahtarlama ardından TR1 den elde edilen güce etkisi



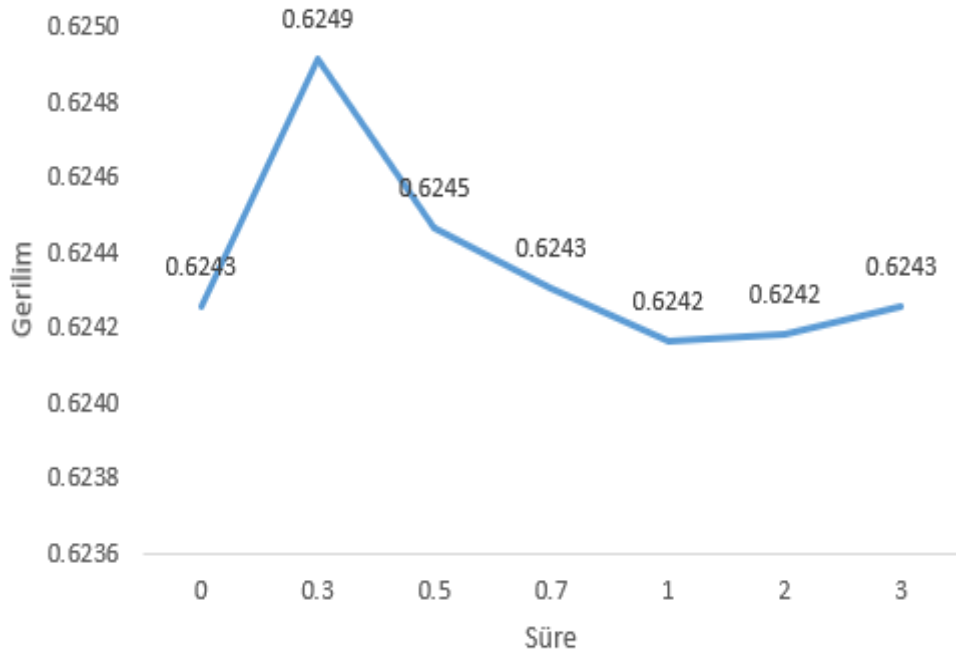
Şekil 4.16. Kesici1’de oluşan anahtarlama ardından RT1’e bağlı TR1 transformatörün primerindeki gerilim değişimi



Şekil 4.17. Anahtarlama anında RT1’e bağlı TR1 transformatörüne RT1’den aktarılan akım



Şekil 4.18. Anahtarlama anında RT1'e bağlı TR1 transformatörüne RT1'den aktarılan güç



Şekil 4.19. Kesicil'de oluşan anahtarlama ardından RT1'e bağlı TR1 transformatörün sekonderindeki gerilim değişimi

5. RÜZGÂR SANTRALLERİNİN TRANSFORMATÖRLERE ETKİSİ

Rüzgâr türbinleri, türbin jeneratörlerinden gelen alçak gerilim çıkışlarını orta gerilim seviyesine yükseltmek için transformatöre ihtiyaç duyarlar. Bu transformatörler, orta gerilim çıkışları daha sonra bölgedeki diğer rüzgâr türbinlerinin transformatörleri ile birlikte orta gerilimi, yüksek gerilim seviyesine çıkarmak ve elektrik şebekesine bağlanması amacıyla ana transformatöre bağlanırlar.

Bir rüzgâr türbininde kuru tip ve yağlı tip olmak üzere iki çeşit olarak gövde içerisinde veya kulenin tabanında kullanılabilirler. Son yıllarda yağlı tip ve büyük güçlü transformatörlerin gövde içerisinde kullanımı artmaktadır.

Kesici ve ayırıcılar ise her bir türbini gerektiğinde rüzgâr türbinini şebekeden izole edilmesini sağlamak için transformatörün girişi ve çıkışı tarafında kullanılmaktadır.

Rüzgâr hızlarının yıl boyunca ve gündüz/gece döngüsünde değiştiği bilinen bir gerçektir. Bazen rüzgâr hızı jeneratörün kesme hızının altına düşer veya üzerine çıkabilir. Bu durumda türbinin devre dışı bırakılması gerekir ve günün bazen birçok saatinde rüzgâr türbini devre dışı kalmak durumunda kalabilir veya sık sık çalışıp durması gerekebilir. Bu nedenle transformatör çok fazla termal döngüye maruz kalır ve yüklenme koşulları da değişkenlik gösterir. Bu sebeple yağlı tip transformatörlerde yağ içerisinde kabarcık oluşumu meydana gelebilir. Bu sebeple transformatörün izolasyonuna yaşlanmaya bağlı olarak kısmi deşarjlara ve kısa devreye neden olabilmektedir.

Transformatör yağında oluşan gaz kabarcıkları çözünmüş gaz analiz cihazlarıyla tespit edilebilir. Yağ içinde yüksek seviyelerde hidrokarbon gazlarının bulunması, sargılardaki izolasyonlarda ve yağda elektriksel ve termal arızaların bir sonucudur. Bu gazların kimyasal bileşenleri analiz edilirse, gaz türlerinin seviyeleri ve oranları, izolasyon bozulması ve transformatörün arızalanmasının nedenleri hakkında bilgi verebilir. Transformatör yağları içerisinde oluşabilen gaz türleri metan, etan, etilen, asetilen, karbon monoksit olarak özetlenebilir.

5.1. Anahtarlama Aşırı Gerilimlerin Transformatörlere Etkisi ve Önlemler

Rüzgâr hızındaki geniş değişimler ve buna bağlı olarak türbin tarafından üretilen güçteki

geniş dalgalanma nedeniyle türbin ünitesi kapatılabilir. Bu olay belirli bir günde, birden çok kez gerçekleşebilir.

Anahtarlama işlemi özellikle vakumlu devre kesiciler tarafından, transformatör sargılarının endüktansı ve kabloların kapasitansları ile bağlantılı olarak yüksek di/dt üreten akım kesme nedeniyle geçici aşırı gerilimlere neden olur.

IEC 60076-16/6.6.a 'ya göre Transformatör yıldırım darbesi(LI) (bkz. IEC 60076-3) veya temel yıldırım darbe seviyesi(BIL) (bkz. IEEE Std C57.12.80) göre belirlenir. Sistem çalışması aksini belirtmediği sürece, bir üst BIL seviyesi kullanılması tavsiye edilir.

Anahtarlama aşırı gerilimlerinden kaynaklanan gerilimin büyüklüğü, transformatörün darbe gerilim değerinden(BIL) düşük olmasına rağmen, bu tür olaylar, sargılarda büyük bir salınıma neden olarak izolasyonu yaşlandırabilir ve arızalara sebep olabilir.

Anahtarlama işleminden kaynaklı aşırı gerilim, yalıtım arızalarının önemli bir nedeni olarak kabul edilmektedir. Anahtarlama aşırı gerilimi, kaynağın faz açısı, hattın elektrik parametreleri (besleme kablosunun uzunluğu, çalışmakta olan fider sayısı) vb. gibi birçok faktörden etkilenir.

Bölüm 4.2'de incelendiği gibi rüzgâr santrallerinde transformatörlerin bağlı olduğu baralarda 3 faz -toprak kısa devre arızası olduğunda ve bölüm 4.3'teki gibi kesicilerde anahtarlama gerçekleştiğinde transformatörlerin primer ve sekonder taraflarındaki gerilimlerde anlık olarak yükselmeler ve düşüşler oluşmakta ve gerilim bir süre boyunca dalgalanmaktadır.

Transformatörler tasarlanırken nominal gerilimlerinde çalışabilecekleri şekilde tasarlanır ve buna göre test edilirler. Transformatör sargılarında gerilim seviyelerine göre izolasyon mesafeleri öngörülür. Bobinlerde kullanılan tellerin izolasyonları, bobinlerdeki her kat arasındaki izolasyon kalınlıkları da çalışacakları gerilimlere göre seçilir.

Sık sık transformatörün sargılarında bu şekilde ani ve çok yüksek gerilim yükselmeleri bobin içerisindeki ve tel izolasyonlarında bozulmalara yol açabilmekte ve transformatörün ömrünün azalmasına, kısmi deşarja ve fazlar arası gerilim atlamalarına sebep olabilmektedir.

Bu tarz arızaların önüne geçebilmek için transformatör sargılarındaki tel izolasyonları, bobin içindeki katlar arasındaki izolasyon kalınlıkları, bir üst darbe gerilim seviyesine uygun şekilde daha kalın seçilip, izolasyon ve kanallar, kanal + izolasyon + kanal + izolasyon şeklinde artırılıp kademelendirilebilir.

Bunlara ek olarak bobin başında ve sonunda yer alan ve alçak gerilim-yüksek gerilim bobinleri arasındaki yürüme yolunu oluşturmak için kullanılan kenar şeridi/kasnakların mesafesi, alçak gerilim yüksek gerilim bobinleri arasındaki mesafe, izolasyon kalınlıkları ve iki faz bobinleri arasındaki mesafe yaklaşık %15 artırılarak iki bobin arasında gerilim atlamasının, katlar arasında delinmenin ve kısmi deşarjın önüne geçilebilir.

Ayrıca transformatörde kademe değiştirilmesini sağlayan boşta/yükte kademe değiştiriciler bir üst gerilim seviyesine göre seçilmesinde fayda vardır. Ayrıca kullanılan izolatörlerin yürüme mesafesi de bir üst kademeden seçilebilir.

Sekonder sargılarında gerçekleşen gerilim yükselmelerinde boşta kayıplarda da artış gözlenmektedir. Eğer indüksiyon değeri çok yüksek seçilmesi veya gerilimin çok yükselmesi durumunda ise çekirdek doyuma girebilir. Bu sebeple rüzgâr türbininde çalışacak transformatörlerin indüksiyon değerlerini sınırlandırmakta fayda vardır.

5.2. Elektriksel Deşarj Etkisi

Kuzey Amerika'da tekrar eden bazı arızaların yol açtığı birkaç çalışma, rüzgâr türbinlerinde kullanılan yağlı transformatörlerde genel ve önemli düzeyde çözünmüş gaz bulunduğunu ortaya çıkarmıştır(Singh ve Blackburn, 2018).

Transformatör sargılarındaki hataların kaynağını tespit etmeye yarayan çözünmüş gaz analizi cihazıyla bu transformatörler test edilmiştir. Yapılan bu çalışmaya göre şebeke transformatörüyle rüzgâr türbin transformatörü karşılaştırıldığında önemli farklılıklar bulunmuş ve bu farklılıklar rüzgâr türbin transformatörlerinde farklı arızalardan kaynaklandığı anlaşılmıştır. Tablo 5.1'de transformatörlerin kullanım yerlerine göre oluşan gaz yoğunluklarının incelenmesi gösterilmiştir.

Tablo 5.1. 2011 ve 2012 için rüzgâr santrali transformatörlerinin ile şebeke transformatörlerinin toplam yanıcı gaz konsantrasyonlarının karşılaştırılması(Singh ve Blackburn, 2018)

Şebeke Transformatörü- 2011	Rüzgâr Türbin Transformatörü- 2011	Şebeke Transformatörü- 2012	Rüzgâr Türbin Transformatörü- 2012
<68 ppm	<2080 ppm	<82 ppm	<2550 ppm

Yağ içerisinde yüksek seviyelerde hidrokarbon gazlarının bulunması, transformatörün sargılarındaki ve çekirdeğindeki elektriksel ve termal arızaların bir sonucu olduğu anlaşılr. Bu gazların kimyasal bileşenleri analiz edilirse, gaz türlerinin seviyeleri ve oranları, izolasyon bozulması hakkında transformatörün erken arızalanması hakkında bilgi verebilir.

Çözünmüş gaz analiz cihazlarının maliyetleri bir dağıtım transformatörünün fiyatına göre yüksek olsa da rüzgâr türbininin sürdürülebilir şekilde çalışabilmesi için ve türbin, transformatör arızası nedeniyle devreden çıkacağında oluşacak kayıp göz önüne alındığında kullanılması faydalı olan bir cihazdır.

Elektriksel deşarj aktivitesi, artan elektrik alan geriliminin veya düşük dielektrik bozulma mukavemetinin kısmi bozulmaya neden olduğu kısmi dielektrik yalıtımı alanlarında meydana gelir. Bunun sonucunda metan ve asetilen(ve hidrojen) gibi hidrokarbon gazlarının gelişmesi olacaktır. Bu sebeple transformatörün sargılarındaki izolasyonlarında bu gaz kabarcıkları sebebiyle yaşlanma meydana gelebilmektedir.

Bu faktörlerden sonra rüzgâr türbininde gerçekleşecek aşırı gerilimler sebebiyle bu bölgedeki yalıtım daha fazla bozulmaya karşı daha hassas olacaktır.

5.3. Harmonik Etkisi

Rüzgâr enerjisinin son yıllarda artış göstermesiyle birlikte rüzgâr santralinde yer alan dönüştürücülerin yüksek anahtarlama frekanslarından ve santralde yer alan elektrik makinelerinden(jeneratör, transformatör ve reaktör) kaynaklanan doğrusal olmayan davranışları nedeniyle harmonikler oluşmaktadır. Harmonikler, 50 Hz'lik temel frekanstan sapan dalga biçimlerini içerir. Birçok rüzgâr enerjisi santralinde şebekeye 50

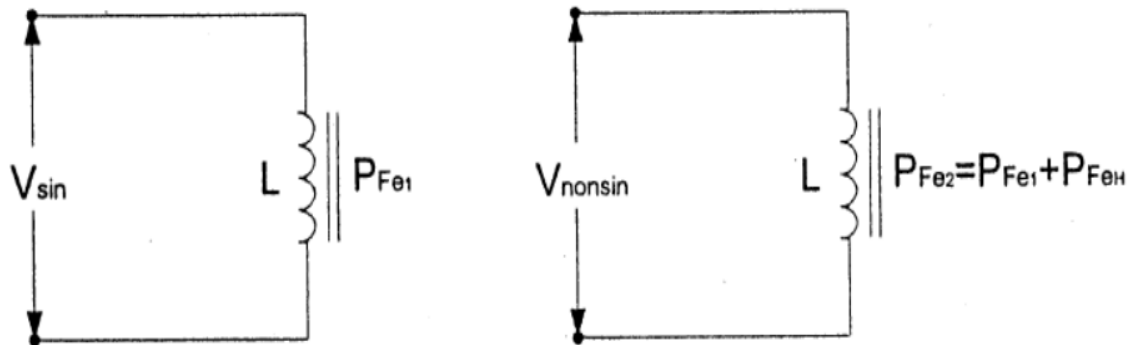
Hz frekansta güç aktarımı sağlamak için dönüştürücü kullanılır. Bu dönüştürücüler, rüzgâr türbin trafoları üzerinden şebekeye akan değişen seviyelerde harmonikler oluştururlar.

Harmonik kaynağı da olan transformatörler harmoniklerden akım harmonikleri ve gerilim harmonikleri olmak üzere iki farklı durumda etkilenirler.

Akım harmoniklerinden kaynaklanan bakır kayıpları ve kaçak akı kayıplarında artış gözlenir. Gerilim harmoniklerinden kaynaklı olarak ise demir kayıplarında artış oluşur. Bu artışlardan dolayı transformatörlerde ısınma ve gürültü artışı gerçekleşir.

Transformatörler bu harmoniklere uygun tasarlanmadığı durumlarda verimleri azalır, yalıtımın bozulmasına sebep olabilmektedir. Bu durumda ise transformatörlerin ömürlerinin azalması ve erken arızalanmasına yol açabilmektedir.

Ayrıca harmonikler transformatör endüktansı ile transformatöre bağlı bir yükün veya devre elemanının arasında rezonans meydana getirebilmektedir.



Şekil 5.1. Manyetik çekirdekli bir elemanın demir kayıpları

Transformatörde akım ve gerilim harmoniklerinden kaynaklanan kayıplar frekans değeri ile bağlantılıdır. Frekans arttıkça kayıplarda da artış olmaktadır. Yüksek mertebeli harmonikler oldukça frekans değeri de artacağından dolayı yüksek mertebeli harmonikler düşük mertebeli harmoniklere göre transformatöre etkileri daha fazla olmaktadır.

IEC 60076-16 /6.3 standardına son kullanıcı göre transformatöre verilen harmonik akımların büyüklüğünü ve frekansını değerlendirecektir. Toplam harmonik içeriğin anma akımının %5'inden az olduğu durumlarda ek bilgi gerekmemektedir. Toplam harmonik

içeriğın %5'ten fazla olduğu durumlarda, alıcı, transformatöre sağlanan tüm harmonik akımların büyüklüğünü ve frekanslarını belirtecektir. Üretici, IEC 61378-1 veya IEEE Std C57.110'da verilen veya alıcı ile üretici arasında kararlaştırılan yöntemi kullanarak bu akımların neden olduğu beyan gücündeki ek kayıpları hesaplayabilecektir (IEC 60076-16, 2018).

Harmoniklerin transformatörlere olan etkileri filtreler veya özel olarak tasarlanan K faktörlü transformatörler ile azaltılabilmektedir. K faktörlü transformatörler, diğier standart transformatörlerden temelde farklı değildirler. Bu tip transformatörlerde harmonik akımlardan kaynaklanan ısı artışına göre transformatör kazanının atabileceğı ısı miktarı artırılmakta ve harmoniklerin kayıplardan kaynaklı ısı artışı ve yalıtım arızalarının önüne geçilmiş olunur.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde teknoloji geliştikçe, Dünya'daki nüfus arttıkça elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç da artmaktadır. Nüfusun artmasıyla ters orantılı olarak Dünya'daki fosil kaynaklı yakıtlar da giderek azalmaktadır ve buna bağlı olarak küresel ısınma da artış göstermektedir. Bu küresel ısınmayı azaltmak, fosil kaynakların kullanımını azaltmak amacıyla Paris İklim Anlaşması gibi uluslararası anlaşmalar imzalanmaktadır. Ülkemizde bu anlaşmaya imza atmıştır. Bu bağlamda günümüzde de hala gelişimi süren elektrikli taşıt teknolojisinin büyük bir hızla hayatımızda yer almasıyla elektrik enerjisine ihtiyaç artacak ve daha fazla temiz, yenilenebilir elektrik enerjisine ihtiyaç duyacağımız yadsınamaz bir gerçektir.

Enerji artışlarıyla birlikte ülkeler kurulu güçlerini artırmaktadır. Türkiye'nin Nisan 2022 itibarıyla de elektrik kurulu gücü 100.000 MW'ı aşmıştır ve yenilenebilir enerjinin payı %54'tür. Bu artış içerisinde son 10 yılda özellikle rüzgâr ve güneş enerjisinin payı oldukça fazladır. Bu sebeple mevcutta kurulu olan santrallerdeki transformatörlerin ve yeni kurulacak olan rüzgâr santrallerinin güçleri artış göstermektedir.

Rüzgâr türbinlerindeki en pahalı ve enerji iletimi için en önemli eleman olan transformatörlerin ömrü, arızalanmadan çalışabilirliği devamlılık için kritik önemdedir. Bu çalışmada(Bayraktar, 2021) tez çalışmasında bahsedildiği gibi rüzgâr santralinde 2020 yılında devreye alınan 10 adet 3,5 MW gücünde dışarıdan uyartımlı rotoru sargılı senkron jeneratörün kullanıldığı, şebekeye 154 kV iletim seviyesinden bağlanan bir rüzgâr santralinin anaharlama ve 3 faz-toprak kısa devre arızasına karşı analizi ETAP programı yardımıyla yapılmıştır

Bu analizde görüldüğü üzere rüzgâr türbinlerine bağlı olan barada 3faz-toprak kısa devre arızası gerçekleştiğinde ve bağlı olan kesicide anahtarlama işlemi gerçekleştiğinde ilgili rüzgâr türbini ve yakınlıklarıyla ilişkili olarak diğer rüzgâr türbinlerini de etkilemektedir. Rüzgâr türbinine bağlı olan transformatörde primer ve sekonder kısımlarında gerilimlerinde ani çıkış ve düşüşler izlenmiştir. Ayrıca rüzgar santralinde bulunan diğer transformatörler de oluşan bu arızalardan benzer karakteristikte etkilendiği görülmüştür. Bu arızalar rüzgâr hızının sürekli değişmesiyle sık sık gerçekleşeceği öngörülerek önlemler alınması önerilmektedir.

Rüzgâr türbin trafosunun arızalanmadan ve ömrünün en az şekilde etkileneceği şekilde işletilmesi açısından kritik önemdedir. Rüzgâr santralini yapan firmalar/ülkeler yıl içerisinde bu tür olayların sayısını ve istatistiğini çıkarmaları, transformatörlerde gerçekleşen aşırı yüklenme, gerilim artış/düşüşlerini ilgili transformatör üreticilerine bildirmelerinin o santralde çalışacak olan transformatörler için bu şartlara daha dayanıklı transformatör tasarlayıp üretebilmeleri için faydalı olacaktır.

Yapılan simülasyonlarda gerilim yükselmeleri, darbe testinde uygulanan darbe gerilim seviyelerine ulaşmasa bile transformatörün çalışması süresince bobinlerin aşırı ve değişken gerilimlere maruz kalması izolasyonda strese sebep olup izolasyonun erken yaşlanmasına yol açabilmektedir.

Rüzgâr türbinlerinde çalışacak transformatörler tasarlanırken transformatör ömrünün azalmasının, arızaların oluşmasının önüne geçebilmek amacıyla izolasyon seviyelerine bağlı olan darbe gerilimleri bir üst gerilim seviyesine göre seçilip, transformatör tasarımının buna göre yapılmasında fayda vardır. Buna göre bobin katları arasındaki izolasyonlar, bobinlerin üst ve alt kısmında gerilim yürüme yolu için kullanılan kenar şeritleri, iki faz bobini arasındaki mesafe belirtilen bir üst darbe gerilim seviyesine göre yaklaşık olarak en az %15 oranında artırılıp soğutma çitası ve kağıt izolasyon ile kademelendirilebilir. Bu sayede kademelendirme yapılarak gerilim atlamalarının izolasyon bozulmasına karşı daha fazla direnç kazandırılabilir.

Yapılan bu izolasyon artışı, transformatör maliyetine ve yapılan tasarıma bağlı olarak yaklaşık %1 oranında etki edebilecek olmasına rağmen transformatör ömrünün uzatılmasına ciddi katkı sağlayacaktır.

Transformatörlerin primer gerilim seviyesi arttıkça maliyet etkisi ve artırılması gereken izolasyon miktarı da artış gösterecektir.

Kullanılacak olan yükte/boşta kademe değiştirici ve izolatörler de bir üst izolasyon seviyesinden seçilmesi durumunda ani gerilim değişimlerinden en az şekilde etkileneceği beklenebilir.

Gaz analiz cihazları kullanılarak aşırı gerilimler ve gerilim dalgalanmaları sebebiyle ortaya çıkan izolasyon malzemelerinden ve yağdan kaynaklı olan gazlar analiz edilerek

transformatörün izolasyon bozulması ve ömrü uzaktan izleme yöntemleriyle SCADA yardımıyla takip edilebilir. Gaz izleme cihazlarının maliyeti transformatör maliyetini artırsa da transformatör ömrünün ve izolasyon bozulmasının sağlıklı bir şekilde takip edilmesini sağlayacağı ve olası arızaların ve türbinin devre dışı kalmasını engelleyebileceği için kullanılmasında fayda vardır.

Bu sayede enerji üretimi kesintisiz olarak gerçekleştirilebilir ve işletme maliyetlerinden ciddi şekilde kazanç sağlanabilir.

Bu tez çalışmasından çıkan sonuçlarına ek olarak analiz programları yardımıyla kısa devre analizi, harmonik analizi ve dengesiz yüklenme analizi yapılması durumunda rüzgar türbinlerinde çalışan transformatörlerin daha uzun ömürlü ve arızalanmadan çalışması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Altun, T. (2013). Enerji İletim ve Dağıtım Sistemlerinde Rüzgar Enerji Santrallerinin Güç Akışına Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 0145390.
- Ackermann, T. (2005). *Güç Sistemlerinde Rüzgar*, Çeviri: Ç. Özsar. Ankara: EMO.
- Ahmed, S., Al-İsmail, F., Shafiullah, Md., Al-Sulaiman, F., El-Amin, İbrahim. (2020). Grid Integration Challenges of Wind Energy a Review, *IEEE*, 8(74), 10857 – 10878, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2964896
- Amita, A., Sinha A. (2018). Power Quality Comparison of Grid Connected Wind Energy System with Statcom and Upqc. *International Conference on Intelligent Circuits and Systems*. Phagwara, Hindistan, 19-20 Nisan 2018.
- Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (CENELEC). (2005). *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems*. EN 50160, Brüksel, Belçika.
- Bayraktar, T., (2021). Bir Rüzgar Santralının Elektrik Şebeke Yönetmeliğine Göre İncelenmesi ve Finansal Değerlendirilmesi. Lisans Bitirme Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, İstanbul.
- Benzohra, O., Echcharqaouy, S., Saifaoui. (2020). Integrating Wind Energy Into the Power Grid Impact and Solutions. *Science Direct*, 30(4), 987-992. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.363
- Cağlar, M., Canbaz M., (2002). *Türkiye 'de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli IV. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, İstanbul, 347-357.
- Durdyev, S., (2010). Rüzgar Enerjisinde Uygun Türbin Seçimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 291861.
- Döşoğlu, K., Arsoy, A. (2012). Rüzgâr Santralinde Geçici Durum Etkilerinin İncelenmesi, *Elektrik Mühendisleri Odası Dergisi* 43-47.
- Dumlu, Ferhat., (2015). Rüzgâr Santrallerinin Güç Sistemlerine Etkilerinin İncelenmesi Ve Şebekeye uyumluluk Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 363560.
- Degeneff, R. C., McNutt ,W.J., Neugebauer ,W., Panek, J., McCallum, M. E. (1982). Transformer Response to System Switching Voltages. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 101(6), 1457-1470. DOI: 10.1109/TPAS.1982.317193
- Elektrik Piyasası Şebekesine Dair yönetmelik (2013). *T.C. Resmi Gazete*.(28517 ,03.01.2013). (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı).

- Elibüyük, U., Üçgöl, İ. (2014), Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri, *Yekarum*, 2(3).
- Işık, O., Özdemir, E. Rüzgar Enerjisi Sistemlerinin Transformatörler ve Güç Kalitesine Etkileri, 7.Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi (IMASCON), Kocaeli, Türkiye, 10-11 Aralık 2021.
- Karadeli, S., (2001). *Rüzgar Enerjisi*, Temiz Enerji Vakfı Yayınları, Ankara, 1-38.
- Lee, J., Zhao F. (2021). Dünya Enerji Konseyi Türkiye 2021 Küresel Rüzgar Raporu, *Global Wind Energy Council*, 10,46,51,52.
- Liu, B., Tang, W., Chen, X.D. Wu, Q.H., Modeling of Transient Overvoltages in Wind Power Plants, 2014 *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Honkong, Çin. 7-10 Aralık 2014.
- Muljadi, E., Zhang, Y.C., Gevorgian, V., Kosterev, D. (2016). Understanding dynamic model validation of a wind turbine generator and a wind power plant, *IEEE Energy conversion Congress and Exposition*, Milwaukee, ABD, 16 Şubat, 2017. DOI: 10.1109/ECCE.2016.7855542
- Özkaya M. G., Variyenli H. İ., Ucar, S., (2008). Rüzgar Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretimi ve Kayseri İli İçin Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi, Cumhuriyet Üniversitesi *Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 29(1) 1-20.
- Rona, B., (2014). Rüzgar Santrallerinin Güç Sistemine Entegrasyonu ve Şebeke Yönetmeliğine Göre Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 354577.
- Singh, P., Blackburn, T. (2018). Dissolved Gas Analysis Results in Wind Turbine Transformers, *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Auckland, Yeni Zelanda, 27-30 Kasım 2018.
- Soloot, A., Høidalen, H., Gustavsen, B. (2015). Influence of the Winding Design of Wind Turbine Transformers for Resonant Overvoltage Vulnerability. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Overvoltage Vulnerability*, 22(2), 1250 – 1257. DOI: 10.1109/TDEI.2015.7076828
- Tande, J., (2003). Grid Integration of Wind Farms, *Wind Energy*, 6(3), 281-295. DOI:10.1002/we.91
- Uslu, A., Doğanşahin, K., Kekezoğlu, Bedri. (2018). *Power Quality on Wind Turbine Energy Output*, 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT), İstanbul, Türkiye, 25-27 Ekim 2018.
- URL-1: <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar/>, (Ziyaret Tarihi: 14 Mart 2022)

URL-2: http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_turbin.html (Ziyaret Tarihi: 10 Şubat 2022).

URL-3: <https://library.e.abb.com/public/92faf0c1913f5651c1257937002f88e8/1SDC007112G0201.pdf> (Ziyaret Tarihi: 30 Kasım 2021)

URL-4: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf> (Ziyaret Tarihi: 5 Nisan 2022)

URL-5: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/01/20130103-10.htm> (Ziyaret Tarihi: 12 Şubat 2022)

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu(IEC), (2001). *Wind Turbine Generator Systems—Part 21: Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines*. IEC 61400-21. Cenevre, İsviçre

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu(IEC), (2018). *Transformers for Wind Turbine Applications*, IEC 60076-16. Cenevre, İsviçre.

Xiaoming, W., Yuguang, X., Bo, G., Yuanjie, S., Fan, C. Analysis of Factors Affecting Wind Farm Output Power. *2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration* . Pekin, Çin, 20-22 Ekim 2018.

Zhang, T., Sun, L., Zhang, Y., Sun, P. (2014). Simulation of Switching Overvoltage of Step-Up Transformers in Wind Farms, *IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, Beijing, China, 25-27 Ekim, 2013.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Işık, O., Özdemir, E. Rüzgar Enerjisi Sistemlerinin Transformatörler ve Güç Kalitesine Etkileri, *7.Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi (IMASCON)*, Kocaeli, Türkiye, 10-11 Aralık 2021.



ÖZGEÇMİŞ

İlköğretim ve orta öğrenimini Balıkesir’de tamamladı. 2010 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden 2014 yılında Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. 2020-2022 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans öğrenimini tamamladı. 2014-2016 yılları arasında Best Trafo’da Elektrik Dizayn Mühendisi olarak görev yaptı. 2016 yılından beri Schneider Electric’te Elektrik Dizayn Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

