T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORTA GERİLİM DAĞITIM ŞEBEKESİNE BAĞLANAN RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN ETKİLERİ

KEMAL EMRE ÇANKIRI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Erdin GÖKALP

Temmuz, 2019

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORTA GERİLİM DAĞITIM ŞEBEKESİNE BAĞLANAN RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN ETKİLERİ

Kemal Emre ÇANKIRI tarafından hazırlanan tez çalışması 10/07 2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Erdin GÖKALP

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Erdin GÖKALP, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Recep YUMURTACI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR, Üye
Gelişim Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Erdin GÖKALP sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Orta Gerilim Dağıtım Şebekesine Bağlanan Rüzgâr Türbinlerinin Etkileri" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Kemal Emre ÇANKIRI

İmza

Aileme

ve

sevgili eşime

TEŞEKKÜR

Geleceğin teknolojileri arasında yerini alacağına inandığım rüzgâr türbinleri, lise öğrencilik yıllarımdan bu yana ilgimi çekmektedir. Rüzgâr türbinleri, enerji sektöründe teknolojinin son yeniliklerini görebileceğim alanların başında gelmektedir. Pek çok yatırım çeken bu sektöre karşı kayıtsız kalamadım ve sektörün içine dahil olabilmek adına rüzgâr enerjisi ile alakalı bir konu seçmiş oldum. Ülkelerin, yani bizlerin; yenilenebilir enerjiyi hayatımızın her alanına isteyerek veya mecbur kalarak dahil edeceğimiz günler yaklaşmaktadır. Enerjide çağı yakalayabilmemiz, ülkemizde var olan potansiyeli açığa çıkarmamız büyük bir gerekliliktir. Bu bakımdan literatürümüzün yenilenebilir enerji alanındaki çalışmalarla zenginleşmesi önem arz etmektedir.

Böyle bir çalışmanın başlatılmasında öncü olan, beni kabul eden ve sene boyunca her daim yardımcı olma odaklı beraber iletişimde bulunduğum danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Erdin GÖKALP'e teşekkürlerimi tüm samimiyetimle sunarım. Bununla birlikte tez çalışmamda ilerlememi sağlayan ve bilgisini sakınmayan değerli hocam Arş. Gör. S. Mirza TERCAN ve Yük. Elk. Müh. Mehmet Tan TURAN'a oldukça müteşekkirim.

Son olarak, maddi desteklerinin yanında manevi destekleriyle de arkamda duran kıymetli aile büyüklerim, hakları ödenmez anne-babam, değerli eşim ve teselli sebebim kardeşim sizlere her zaman minnettarım. Tez çalışmam boyunca dost ve akrabalardan yardımlarını eksik etmeyen herkese teşekkürlerimi sunuyorum.

Kemal Emre ÇANKIRI

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ VII
KISALTMA LİSTESİ VIII
ŞEKİL LİSTESİ IX
TABLO LİSTESİ X
ÖZET XI
ABSTRACT XIII
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
2.1 Tezin Amacı 6
3.1 Hipotez 7
2 TÜRKİYE'DE ve DÜNYA'DA RÜZGÂR ENERJİSİ 8
2.1 Rüzgâr Enerjisinin Küresel Enerjideki Yeri ve Geleceği 8
2.1.1 Modern Rüzgâr Türbinleri 14
2.1.2 Rüzgâr Enerjisi 15
2.2 Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi 17
2.2.2 Rüzgâr Enerjisinin Şebekeye Olan Etkileri 22
3 TEMEL ŞEBEKE ANALİZLERİ 23
3.1 Kısa Devre Analizi 23
3.1.1 ANSI/IEEE C37.010.1999 ve Kısa Devre Hesabı 24
3.1.2 IEC 60909 Normu Kısa Devre Analizi 26
3.2 Yük Akışı Analizi 29
3.2.1 Gauss-Siedel Metodu 30
3.2.2 Newton-Raphson Metodu 30
3.2.3 Fast-Decoupled Metodu 31
3.2.4 Bara Tipleri 31
4 SİMÜLASYON ve METODOLOJİ 34
4.1 Şebeke Modellerinin İncelenmesi 34
4.1.1 IEEE 14 Baralı Test Sistemi 36
4.2 Rüzgâr Enerji Santralinin Şebekeye Entegresi 38

4.2.1 Sistem Bileşenleri 43
4.2.2 Rüzgâr Türbini Verileri 45
4.3 Birinci Şebeke Modeli Test Sonuçları 47
4.4 İkinci Şebeke Modeli Test Sonuçları 49
4.4.1 Yük Akışı Analizi 50
4.4.2 Kısa Devre Analizi 50
5 SONUÇ ve ÖNERİLER 52
Kaynakça 54
Tezden Üretilmiş Yayınlar 58

SİMGE LİSTESİ

A	Akım
Cp	Güç Faktörü
Isc	Kısa devre akımı
P	Aktif Güç
Q	Reaktif Güç
r	Hava yoğunluğu
U	Rüzgâr Hızı

KISALTMA LİSTESİ

ANSI	American National Standarts Institute
CB	Cicuit Braker
ÇBİG	Çift Beslemeli İndüksiyon Generatörü
DC	Direct Current
DTU	Tecnical University of Denmark
ETAP	Electrical Transient Analysis Program
FACTS	Flexible Alternative Current Transmission Systems
GWEC	Global Wind Energy Council
IEC	International Electrotecnical Commission
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
OSB	Organize Sanayi Barası
REPA	Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası
RES	Rüzgâr Enerji Santrali
RT	Rüzgâr Türbini
SKİG	Sincap Kafesli İndüksiyon Generatörü
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş
WTG	Wind Turbine Generator

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 96-08 Dünya geneli rüzgar enerjisi kapasitesi 9

Şekil 2.2 2008-2018 Dünya geneli rüzgâr enerjisi kapasitesi 9

Şekil 2.3 Dünyada kurulu offshore RES gücü..... 10

Şekil 2.4 2050 yılına kadar öngörülen rüzgar enerjisi üretimi 11

Şekil 2.5 Referans durum (Ref) ve Remap 2030 durumu (IRENA) için 2030'da ülkelere göre rüzgar enerjisi kurulu güç ve üretim kapasiteleri 13

Şekil 2.6 Rüzgar enerjisi frekans spektrumu 15

Şekil 2.7 Türkiye'deki RES'lerin kümülatif kurulumu 18

Şekil 2.8 İşletmede olan RES'lerin bölgelere göre dağılımı 18

Şekil 2.9 İşletmede olan RES'lerin MW cinsinden illere göre dağılımı 19

Şekil 2.10 İnşa halindeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı 20

Şekil 2.11 50 m için rüzgar enerjisi potansiyel atlası 21

Şekil 2.12 100 m için rüzgar enerjisi potansiyel atlası 21

Şekil 3.1 Arıza durumundaki "eşdeğer kaynak" 27

Şekil 4.1 Türbin, santral kontrol ve şebeke modelleri arasındaki arayüz..... 34

Şekil 4.2 IEEE 14 baralı test sistemi 37

Şekil 4.3 l. Şebeke modeli için WTG1 rüzgar türbini tek hat şeması..... 39

Şekil 4.4 l. Şebeke modeli için WTG2-WTG3 rüzgar türbini tek hat şeması 39

Şekil 4.5 l. Şebeke modeli için WTG4 - WTG5 – WTG6 rüzgar türbini tek hat şeması.. 40

Şekil 4.6 l. Şebeke modeli için WTG7 - WTG8–WTG9 - WTG10 rüzgar türbini tek hat şeması 40

Şekil 4.7 2. Şebeke modeli OSB tek hat şeması..... 42

Şekil 4.8 Rüzgar türbini güç eğrisi grafiği 47

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 IEEE 14 baralı test sistemi yükleri 37
Tablo 4.2 1. Şebeke modeli devre kesici anahtarlama konumları..... 41
Tablo 4.3 2. Şebeke modeli devre kesisi anahtarlama konumları..... 42
Tablo 4.4 1. Şebeke modeli ortalama rüzgar hızları ve türbin bağlantı baraları..... 43
Tablo 4.5 1. Şebeke modeli kablı ve havai hat parametreleri 44
Tablo 4.6 2. Şebeke modeli OSB yük parametreleri..... 45
Tablo 4.7 2. Şebeke modeli 3 fazlı kablo ve iletim hattı parametreleri 45
Tablo 4.8 Rüzgar türbini parametreleri..... 45
Tablo 4.9 Rüzgar türbinlerinin üretim gücü..... 48
Tablo 4.10 Gen_1 üretim güçleri 48
Tablo 4.11 Baraların gerilim oranları..... 49
Tablo 4.12 Yük akışı analizi sonuçları..... 50
Tablo 4.13 2. Şebeke modeli kısa devre parametreleri 51
Tablo 4.14 S1 ve S2 senaryolarının kısa devre akımları..... 51

ÖZET

Orta Gerilim Dağıtım Şebekesine Bağlanan Rüzgâr Türbinlerinin Etkileri

Kemal Emre ÇANKIRI

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Erdin GÖKALP

Yenilenebilir enerji yatırımları, ülkemizde ve dünyada her geçen gün artış göstermektedir. Enerji endüstrisi, yenilenebilir enerji kaynaklarının geleneksel enerji sistemi bağlantısına doğru ilerlemektedir. Ülkelerin enerji ve iklim politikası hedeflerindeki öncelik, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonudur. Böylece, artan talep gücü karşılamaya yardımcı olmanın yanında, kullanılan fosil yakıtların olumsuz etkilerinden de korunacaktır. Bu durum, mevcut şebeke altyapısını ve sistem işletmesini etkileyecektir. Farklı yenilenebilir kaynaklardan, Rüzgâr Enerji Santrali (RES)'in dağıtım sistemlerine bağlantısı, Rüzgâr Türbini (RT) cihazlarındaki - sistemlerindeki teknolojik gelişmeler ve devlet politikalarındaki teşvikler sayesinde hızla artmaktadır. Bununla birlikte, artan ilave etme ve tadilat maliyetleri, yatırımcıların bir dizi tasarım seçeneğini dikkate almasını ve her bir seçeneğin sistem üzerindeki etkisinin çeşitli varsayımlara dayanarak detaylı incelemelerini yapmasını zorunlu kılmıştır. Örneğin, normal ve anormal çalışma koşulları, tam kapasite çalışma ve tepe yükler bu araştırmaların başında gelmektedir. Bununla birlikte,güç sistemi istikrarı, gerilim çökmesinden dolayı güç sistemi alanında büyük bir endişe oluşturmaktadır. Kararlılık analizi, elektrik şebekesini tasarlamak ve geliştirmek için önemlidir. Bu nedenle, çeşitli güç şebekelerinin kararlı bir bölgede çalışması için analiz edilmektedir.

Rüzgâr türbininin davranışları şebekedeki arıza senaryoları sırasında, güç kalitesine etki etmektedir. Güç akışı ve kısa devre analizler ile kurulumdan önce ve işletme sırasında endüstriyel sistemlerin karşılaşabileceği sorunlar çözülebilir. Bu sonuçlar yapılacak projelerde göz önünde bulundurulabilir. Güç akışı analizi, birbirine bağlı bir sistemdeki elektrik gücü akışının sayısal bir analizidir. Bu analizin amacı, belirli bir yük, generatör gücü ve gerilim koşullarında bulunan bir güç sistemindeki her bara için gerilim açısı ve

büyüklüğü hakkında tam bilgi elde etmektir. Bunun yanında, entegre edilen sistemin kararlı olması yeterli değildir. Simülasyon ile kısa devre arızalarının, güç sisteminin davranışlarında oluşturduğu etkiler tespit edilmelidir. Böylece muhtemel hatalar önceden fark edilmektedir. Elektrik şebekesinde yapılan kısa devre analizi, sistemde meydana gelebilecek arıza akımlarını güvenli şekilde temizleme olanağı sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, tasarlanan sisteme güç akışı ve kısa devre analizi uygulanmıştır. Analizin reel sonuçlara yakın olması için gerçek değerli ortalama rüzgâr hızı verisi, rüzgâr türbini tasarımı ve Çanakkale Organize Sanayi Bölgesi(OSB) barasının şebeke bilgileri kullanılmıştır. Şebeke analizi için IEEE 14 bara test sistemi seçilmiştir. Simülasyon, güç sistemleri analizi programı (ETAP) yardımı ile yapılmıştır. Şebekenin farklı koşullardaki (tam kapasite, minimum kapasite, yaz dönemi, kış dönemi) çalışma şartları incelenmiştir. RES'te üretilen güç ile talep güç arasındaki enerji üretim ve tüketim değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların, rüzgâr enerjisi potansiyelinin yüksek olduğu Çanakkale bölgesinde, kurulacak RES fizibilite çalışmalarına katkı sunması amaçlanmıştır. Rüzgâr enerjisi üretiminin diğer enerji kaynakları içinde payının artması nedeniyle, zayıf baraların zamanında düzeltilmesi ve şebeke için düzeltici faaliyetlerin talep edilmesi gelecekteki enerji sistemlerinde büyük önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yük akışı analizi, kısa devre analizi, rüzgâr enerji santrali

ABSTRACT

The Effects Of Wind Turbines Integrated To The Medium Voltage Distribution Network

Kemal Emre ÇANKIRI

Department of Electrical Installations

Master's Thesis

Thesis Advisor: Assist. Prof. Erdin GÖKALP

Renewable energy investments are increasing day by day in our country and in the world. The energy industry is moving towards the integration of the traditional energy system of renewable energy sources. The priority in the countries' energy and climate policy objectives is the integration of renewable energy sources. Thus, the increasing demand will not only help to meet the power but will also be protected from the negative effects of the fossil fuels used. This will affect the existing network infrastructure and system operation. The distribution systems connection of Wind Power Plant (WPP) which one the renewable sources is rapidly increasing thanks to the technological developments in the wind turbine (WT) devices and the incentives in state policies. However, increasing costs of connection and renovation made it necessary for investors to consider a range of design options and to make detailed analyses of each option's impact on the system based on various assumptions. For example, normal and abnormal working conditions, full capacity operation and peak loads are the leading ones. On the other hand, power system stability is a major concern in the field of power systems due to voltage collapse. Stability analysis is important to design and develop the electricity grid. Therefore, various power networks are analyzed to operate in a stable region.

The behavior of the wind turbine influences power quality during grid fault scenarios. With power flow and short circuit analysis, problems that industrial systems may encounter before installation and during operation can be solved. These results can be taken into account in the projects to be done. Power flow analysis is a numerical analysis of the electric power flow in the system. The purpose of this analysis is to obtain complete information on the angle and magnitude of the voltage for each bus in a power system located under a certain load, generator power, and voltage conditions. In addition, the integrated system is not sufficient for stability. The effects of short circuit

faults on the behavior of the power system should be determined by simulation. Thus, possible errors can be predetermined. A short circuit analysis in the power grid provides the possibility to safely clean the fault currents that may occur in the system.

In this thesis study, power flow and short circuit analysis are applied to the designed system. For the analysis to be close to the real results, real-valued average wind speed data, wind turbine design and Çanakkale Organized Industrial Zone (OIZ) busbar's grid information was used. IEEE 14 bus test system is selected for network analysis. The simulation was performed with the help of power systems analysis program (ETAP). The working conditions of the network in different situations (full capacity, minimum capacity, summer period, and winter period) are examined. The energy production and consumption values between the power produced in WPP and the demand power were compared. The results are intended to contribute to the WPP feasibility studies in the Çanakkale region, where the wind energy potential is high. Due to the increase in the share of wind energy generation among other energy sources, the timely correction of the weak busbars and demanding corrective actions for the grid are of great importance in the future energy systems.

Key Words: Power flow analysis, short circuit analysis, wind power plant

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Yel değirmenleri en az 3000 yıldır, özellikle tahıl öğütmek veya su pompalamak için kullanılmışken, yelkenli gemilerde rüzgâr daha uzun süre için önemli bir güç kaynağı olmuştur. On üçüncü yüzyılın başlarından itibaren yatay eksenli yel değirmenleri, kırsal ekonominin ayrılmaz bir parçasıdır. Bu yel değirmenleri, ucuz fosil yakıtlı motorların ortaya çıkışı ve ardından kırsal alan elektrifikasyonunun yayılmasıyla farklı şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Elektrik üretmek için rüzgâr türbinlerinin kullanımı, ABD'de ve Danimarka'da 19. Yüzyılın sonlarına kadar izlenebilir. Ancak, 20. yüzyılın büyük bir bölümünde, uzak konutlar için batarya şarjı dışında rüzgâr enerjisi kullanımına çok az ilgi duyuldu ve bu düşük güçlü sistemler elektrik şebekesine erişim sağlandıktan sonra hızla değiştirildi.

Günümüzde elektrik enerjisi talebi dünya çapında sürekli artmaktadır. Tüketicinin maksimum talebini telafi etmek ve daha yüksek güç talepleri için temiz, yenilenebilir enerji sistemleri gerekli hale gelmektedir. Sürekli artan talebi karşılamak için rüzgâr türbinlerinin mevcut elektrik sistemine entegresi yaygınlaşmaktadır. Rüzgâr enerjisi sistemi, geleneksel güç sistemleriyle bağlantılı olarak güç üretme yöntemlerinden biridir. Ancak bu rüzgâr çiftliği şebekeye entegre edildiğinde, sistemin kararlılığı düşme eğilimindedir [1]. Sistem entegrasyonunun zorlukları ulusal ve bölgesel ihtiyaç ve koşullara göre değişmekle birlikte, rüzgâr enerji pazarının düzenli bir şekilde nasıl genişlemeye devam edebileceği sorusunu da barındırmaktadır. Rüzgâr santrallerinde üretilen elektrik zamana göre değişkenlik göstermektedir. Enerji kaynağına özgü fiziksel, teknik ve serbest piyasa denetleyici kısıtlamalar bulunmaktadır.

Güç talebinde günden güne artan artış nedeniyle, sistemin gerilim profilini kontrol etmek için daha fazla odaklanılmaktadır. Enerji talebindeki artış ile birlikte alternatif enerji üretim kaynakları kurulmaktadır. Rüzgâr enerjisi, bununla bağlantılı çeşitli avantajlar nedeniyle, bugün talep edilen yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir [2].

Entegre sistemler için sistem modellemesi ve performans değerlendirmesi yapılmaktadır. Gerilim dalgalanması, güç değişimleri güç kalitesi sorunlarındandır. Tasarlanan modelin güç sistemiyle ilişkili güç parametreleri üzerinden etkisi analiz edilmektedir [3].

Elektriksel güç sisteminin tasarlanması ve geliştirilmesinde geçici kararlılığın önemli bir unsur olduğu kabul edilmektedir. Sistemin iki ayrı bölgesinde üç fazlı arıza senaryosu uygulanmaktadır. Böylece arıza yeri ve kritik arıza giderme süresinin sistem kararlılığın etkileri analiz edilmektedir. İletken ve yalıtkanları korumak için arızalı bölgenin en hızlı şekilde sistemden izole edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır [4]. Ani yük değişimlerinden veya elektriksel manevralardan dolayı güç sisteminde, şebekede, tüketici tarafında olduğu gibi güç sisteminde de zararlı olan ani bir rahatsızlık meydana gelir. Bazen bir veya daha fazla noktadaki yalıtımın başarısız olması nedeniyle arıza oluşur. Bu nedenle hata analizi, kararlı bir şebeke için önem arz etmektedir. Şebekedeki dengeyi korumak için üç fazlı kondansatörlerden faydalanılmıştır [5].

Rüzgâr türbini olarak kullanılan indüksiyon generatörlerinde, senkron generatörlere göre daha riskli bir şebeke işletmesi görülmektedir. ÇBİG veya SKİG kullanılan türbinlerin entegre edilen sistemin, şebekede gerilim kararlılığına farklı etkileri vardır. ÇBİG ile sistem daha kararlı hale gelmektedir. Yapılan özdeğerler analizi ile zayıf baraların zamanında düzeltilmesini ve gerekli önlemlerin alınmasını sağlamaktadır. [6]. Aynı zamanda şebeke tarafında gerilim kaynağı kontrolörlü ÇBİG tabanlı bir rüzgâr türbin modeli ile sistemde reaktif güç kontrolü sağlanmakta ve gerilim profilini iyileştirme kabiliyeti artırılmaktadır [7].

Güç şebekesi gerilim dengesizliği, güç aktarım kaybı, sürekli artan arıza akımları, elektrik kesintileri gibi çeşitli zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Tüm bu problemler elektrik tüketimindeki tıkanıklıkları çok yüksek seviyelere taşımaktadır. Süper iletken malzemelerin sıfır direnç ve düşük endüktansa sahiptirler. Süper iletken kabloların iletim-dağıtım hatlarında kullanılması güç kaybının azalmasına, daha fazla güç aktarımına ve yapım maliyetlerinin düşmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca süper iletken arıza akımı sınırlayıcıları güç sistemleri içinde uyguladığında arıza akımlarını sınırlayıcı imkan sunmaktadır [8].

Simülasyonlarda öne çıkan bir diğer uygulama yük akış analizleridir. Güç akışı analizi için farklı doğrusal olmayan yaklaşımların performans karşılaştırmasına odaklanılmıştır. Karşılaştırma, gerilim profili ve hat kayıpları ve çalışma süresinden oluşur. Newton-Raphson, Gauss-Seidel ve Fast Decoupled bu lineer olmayan denklemleri çözmek için kullanılır. Sisteme yük akış analizi uygulanır ve gerilim profilinde ve hat kayıplarındaki değişikler gözlenmektedir [9].

Rüzgâr üretimi, güç kaynağı yapısını kademeli olarak değiştirmektedir. Yeni talepleri karşılamak için yöntem ve teknikler geliştirmesi gerekmektedir. RES'in şebeke bağlantısı için araştırılan çözümlerde rüzgâr generatörünü uygun şekilde modellemek çok önemlidir [10].

Rüzgâr enerjisi santrali ile normal enerji santrali arasındaki matematiksel model ve şebeke yapısındaki farklılıklar bulunmaktadır. Kısa devre analizleri için, uygun şebeke modeli oluşturulmalıdır. Pratik kısa devre hesaplamaları yerine, IEC, ANSI gibi uluslararası bir yöntem kullanılması mühendislik hesaplamaları açısından önem arz etmektedir [11].

Büyük ölçekli elektrik şebeke altyapılarına sahip şehirlerde veya endüstriyel tesislerde sistemin karakteristikleri, karmaşık elektrik enerjisi sistemlerinin üretim yönetimini, çalışma zamanlamasını ve teknik dönüşümünü belirlemektedir [12]. Temel olarak yük yönetimi ve çalışma zamanlaması tarafından getirilen büyük çaplı avantajların yanı sıra, yük akışı ve kısa devre analizinin gerektirdiği veri hazırlama, giriş ve tamamlama ile ilgili hesaplamalar gerçek sonuca yakın değerler sunmaktadır.

Endüstriyel tesisler düzgün bir şekilde modellenir ve kayıplar belirlenirse büyük enerji tasarrufu sağlamaktadır. Sektörlerdeki enerji kaybını belirledikten sonra, Elektrik Enerjisi tasarrufu için düzeltici adımlar atmaya olanak sunulmuştur. Elektrik Enerjisi kayıplarını incelenmiştir ve enerji tasarrufu yöntemlerini uygulanmıştır. Güç faktörü iyileştirmesi, LED lambaların kullanılmaması ve enerji tasarruflu motorların kullanılması sonucuna varılmıştır [13].

Büyük ölçekli endüstrideki elektrik enerjisi sistemi söz konusu olduğunda, kendi içinde istisnalara sahiptir. Güç kaynağı, yük boyutları büyüktür ve güç üretimi karmaşıktır. Çok sayıda orta ve düşük gerilimli motor bulunmaktadır. Santralin güç kaynağı, dağıtım şebekesi, büyük miktarda motor yükü, üretim ve teknik yönetim gereksinimlerini içeren

girift bir elektrik enerjisi sisteminden meydana gelmektedir. Orta ölçekli endüstrilerde oldukça fazla olan kritik şartlar bulunmaktadır. Düzenli olarak trafo işletmesinin gerçekleştirilmesi, yeni transformatörün devreye alınması, kapasitenin artırılması, yeni ve büyük ölçekli motorların işletmeye alınması için ilgili analitik hesaplamalar ve üretim raporları oluşturulmaktadır [14].

Güç kalitesinin ölçülmesi, izlenmesi ve değerlendirilmesi; elektrik enerjisi üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimi aşamalarında şebeke ve cihaz kaynaklı sorunlardan kaçınmak için büyük öneme sahiptir. Bu amaçla ülkemizdeki ve dünyadaki güç sistemlerinin güç kalitesini bozan etkileri en aza indirmek için çeşitli standartlar getirilmiştir. Organize sanayi bölgesinde bulunan orta gerilim trafosunun faz-faz etkin gerilimlerinde meydana gelen gerilim düşmeleri ve gerilim dengesizlikleri standartlara göre analiz edilmiştir. Yüksek gerilim düşümü sayısı ve aşırı gerilim dengesizliklerinin oranları ortaya çıkarılmıştır. Standartlarda belirtilen sınırların altında değerler almak ve gerilim düşümünü azaltmak amaçlanmıştır. Sonuç olarak, büyük güçlü üç fazlı motorlar kademeli olarak çalıştırılmalıdır ve gerilimi azaltmak için tek fazlı yükler eşit şekilde dağıtılmalıdır [15].

Endüstriyel Tesisler sürekli olarak elektrik ihtiyacının olduğu yerlerdir. Enerjinin her daim kullanımını aktif tutmak için ring şebeke sisteminden yararlanılmaktadır. Bu şebeke sisteminin herhangi yerindeki bir arıza, tüm sistemi etkilemektedir. Müşteri barasının enerji çıkışları aşırı akım röleleriyle, yer altı kabloları diferansiyel röleler ile korumaya yardımcı olmaktadır. Ring şebeke sistemi üzerinde tasarımlanan yardımcı koruma elemanları sanayi bölgelerinde uygulanmış ve efektif sonuçlar vermiştir [16].

Kısa devre hesaplaması, sistem çalışma analizindeki en önemli hesaplamalardan biridir. Elektrik sisteminde kısa devre arızası oluşumu önlenememektedir. Elektrik sistemi için seçilen tüm elektriksel donanımlar, sistemdeki mümkün olan maksimum arıza akımı için uygun olmalıdır. Ayrıca koruma elemanları sistemdeki minimum olası arıza akımını belirleyebilmelidir. Kısa devre hesaplamasına bağlı olarak tüm elektriksel ekipmanların parametrelerinin (trafo, generatör, bara vb.) uygunluğu analiz edilmektedir [17].

Rüzgâr enerjisi, artan yük talebini karşılamak için bir elektrik şebekesine bağlanabilen yenilenebilir enerjidir. Ancak rüzgâr üretim sistemleri şebekeye karşı son derece

hassastır. Gerilim dalgalanmaları veya frekans değişimleri, şebeke üzerinde olay anında üretimin kesilmesini içerir. Bu kopukluk üretim/tüketim dengesizliğini kötüleştirmektedir ve şebekede büyük bir arızanın ortaya çıkmasını hızlandırabilir. Bir rüzgâr çiftliğini şebeke sistemi içerisinde en iyi konuma yerleştirmek, hem aktif hem de reaktif güç kayıplarını azaltır. Yük akış analizi ile sistemin gerilim kararlılığına en uygun bağlantı barası bulunabilmektedir [18].

Enerji nakil hatlarında oldukça yaygın olan kısa devre ve toprak arızaları incelenmiştir. Bu arızalar, rüzgâr enerjisi tarafından sağlanan bir sistem göz önüne alınarak tasarlanarak analiz edilmektedir. Rüzgâr türbini ile beslenen bir sistemde önerilen kısa devre arıza analizi modeli, anahtarlama ve arıza rejimleri sırasında geçici işlemlerin analizi için uygundur. Rüzgâr enerji sistemleri hem ekonomik hem de çevresel olarak uyumludur. Bu avantajlar ilgili araştırmaları çok önemli kılmaktadır. Aşırı gerilim işlemlerini etkileyen kilit faktörler analiz edilmiştir [19].

Rüzgâr türbinlerinin orta gerilim dağıtım şebekesinin korunmasında kısa devre akımı davranışları analiz edilmiştir. Çalışmada tek tip indüksiyon genaratörüne bağlı kalmayıp, farklı model ve tiplerdeki rüzgâr türbini genaratör modelleri kullanılmıştır. Kısa devre arıza davranışları daha kapsamlı incelenmiştir. Modellerin avantaj ve dezavantajları raporlandırılmıştır [20]. Ayrıca bir başka çalışma, sistem modeli üzerinde rüzgâr türbini bağlı değilken ve farklı tiplerdeki RT modelleri bağlı olduğunda sisteme etki eden gerilim düşümünü analiz etmektedir. RT'nin türü, büyüklüğü ve yerinin seçimine büyük ölçüde katkıda bulunmaktadır [21].

Rüzgâr enerji üretiminin artmasıyla rüzgâr çiftliğinin özellikleri, güç sisteminin güvenliği üzerinde önemli bir etki oluşturmuştur. Çevresel faydaları arttırırken kademeli arıza riskini nasıl azaltılacağını araştırmaya öncelik verilmiştir. Arıza kademeleri rüzgâr çiftliğinin yapısı, rüzgâr çiftliğinin anlık üretim gücünün rastgeleliği, rüzgâr türbininin sanal atalet kontrolü ve rüzgârın kopma tepkisi gibi rüzgâr gücü özelliklerini dikkate alınarak olumsuz senaryolar üzerinden analize tabi tutulmuştur. Sanal atalet kontrolü, reaktif güç kompanzasyonu, iletim hattı yatırımlarının etkisi simülasyon yardımıyla gösterilmektedir [22].

Geleneksel şebeke ile entegrasyonu yapılan büyük ölçekli bir RES'in kararlılık analizi araştırılmakta ve çözümler aranmaktadır. Güç elektroniği ekipmanlarıyla oluşturulan

DC kıyıcı fren direnci yerleştirilmiş ve esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) pratikte uygulanmıştır [23].

Güç akışı kısa devre analizleri ile baraların uygun gerilim kararlılığında çalışması sağlanmaktadır. İletim kayıpları, trafoların aşırı yüklenmesi problemlerini en aza indirme imkanı sunmaktadır.

2.1 Tezin Amacı

Elektrik enerjisine olan ihtiyaç gün geçtikçe artmakta ve güç sistemlerine bağlı yüklerin özellikleri hızla değişmektedir. Bu durum güç kalitesi ve enerji verimliliğini güç sistemleri için daha önemli kılmaktadır. Bu bakımdan, güç sistemlerinde meydana gelen gerilim düşümleri ve gerilim dengesizlikleri, güç kalitesi açısından önde gelen problemlere çözüm sunulması amaçlanmaktadır. Gerilim düşümü, nominal frekanstaki besleme gerilimi etkin değerinin kısa vadeli azalmasıdır. Gerilim düşümlerinin ana nedenleri, iletim ve dağıtım sistemlerindeki arızalar, şebeke arızaları, aşırı yüklenmeler ve büyük güçlü motorların ve kısa devrelerinin başlatılmasıdır. Gerilim dengesizliğinin oluşturduğu nedenlerin RES kurulumu öncesinde gözlenmesi amaçlanmaktadır.

Kısa devre arıza analizleriyle, özellikle rüzgâr enerji sistemleriyle entegreli bir endüstriyel kompleksin elektrik şebekesinin korunması amaçlar arasındadır. Farklı arıza noktaları üzerinden sistem üzerinde oluşabilecek en kötü senaryoların analizleri elde edilmek istenilmektedir. Böylece elektriksel donanımların hasarları en aza indirilmektedir.

Marmara Bölgesi Sanayinin en gelişmiş olduğu bölgemizdir. En çok enerji talebi bu bölgemizde gerçekleşmektedir. Rüzgâr enerjisi Marmara Bölgesi açısından yüksek enerji potansiyeli barındırmaktadır. Amaçlar arasında, artan güç talebini karşılamak için kurulacak RES'lerin analitik çözüm önerileri ve fosil yakıtların etkisini azaltmak bulunmaktadır. Ayrıca ülkemizin enerji ihtiyacında dışa bağımlılığı azaltmamız için büyük önem arz etmektedir. Elektrik enerjisinin arz ve talep tarafındaki sistemsel bilgi eksiklerini giderip, öngörülebilir şebeke işletmesi imkanı amaçlanmıştır. Böylece ekonomik maliyetleri azaltacağı ve rüzgâr enerjisi yatırımlarının ilerleyişini hızlandıracağı düşünülmektedir.

3.1 Hipotez

Temel elektrik enerjisi sistemi teorisini ve entegrasyon sorunlarını daha iyi anlamak için rüzgâr enerjisi üretiminin nasıl davrandığının temellerini içermektedir. Ek bir güç sisteminin nasıl çalıştırıldığını göstermek için rüzgâr gücüne sahip bir güç sistemine mekanik bir eşdeğer verilmiştir.

Simülasyonda 4 farklı senaryo tasarlandı. Bunlar yaz ve kış aylarındaki yüklerin; santralin tam kapasite ve minimum kapasitedeki çalışmasının ortalama rüzgâr hızı verileriyle oluşturulan üretimleridir. Senaryolarda simüle ettiğimiz yük akışı analizi ile baraların yüklenmelerini, güç akış yollarını, gerilim düşümü-yükselmesi durumlarını ve elektriksel kayıpları izleme olanağı sağlandı. Sistemi kararlı işletebilmek, muhtemel arızaları öngörebilmek adına maksimum ve minimum durumları yakalayabileceğimiz bu senaryolar ile şebekenin yük akışı analizinde kapsamlı araştırma imkanı sunuldu. Başlangıçta Yük Akışı sonuçları, ÇBİG'nin yüksek rüzgâr hızlarında yüksek güç çıkışı sağlayabildiğini açıkça göstermektedir. Dahası, ÇBİG makineleri şebekeye reaktif güçler vererek gerilim kararlılığı sağlar.

Çanakkale'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli göz önüne alınarak, Organize Sanayi Bölgesi (OSB) elektrik şebekesine; Rüzgâr Enerji Santrali (RES) bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Çanakkale OSB elektrik şebekesinin gerçek verileri kullanılmıştır. Eski teknolojili mevcut şebeke ve yenilenebilir enerji kaynaklı yeni sistem ile hibrit bir model oluşturulmuştur. Rüzgâr türbini gerçek değerlerden yola çıkılarak tasarlanmıştır. RES bağlantı öncesi ve bağlantı sonrası olmak üzere iki farklı senaryonun sonuçları birbiriyle karşılaştırılmıştır. Her iki tasarımda, IEEE 14 baralı test sistemi şebeke modeli olarak kullanılmıştır. Yük akışı ve kısa devre analizleri, Elektrik Güç Sistemleri Analizi (ETAP) programı ile gerçekleştirilmiştir. Yeni kurulacak hibrit sistemler için mevcut elektrik tesisleri hakkında öneriler yapılmıştır.

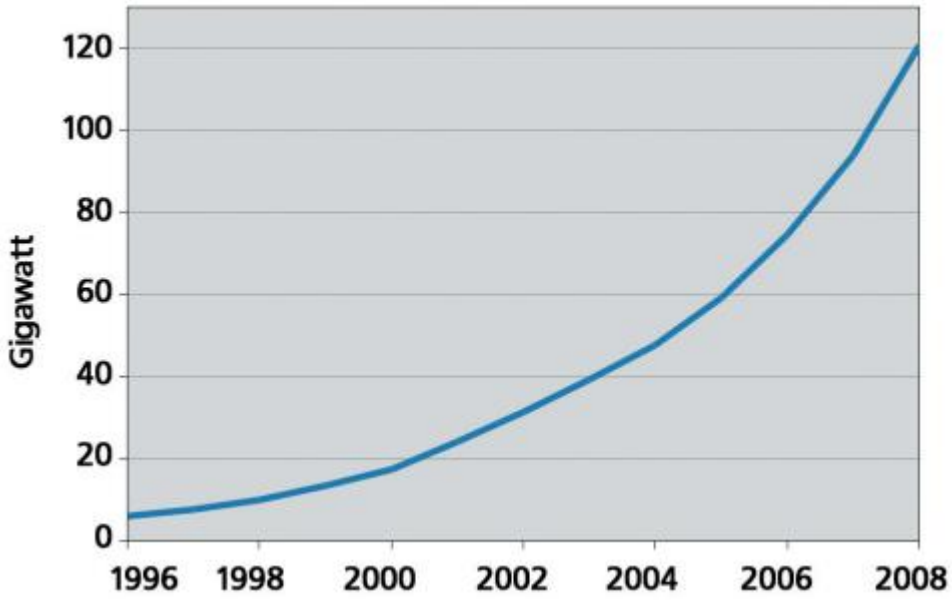
2
TÜRKİYE'DE ve DÜNYA'DA RÜZGÂR ENERJİSİ

2.1 Rüzgâr Enerjisinin Küresel Enerjideki Yeri ve Geleceği

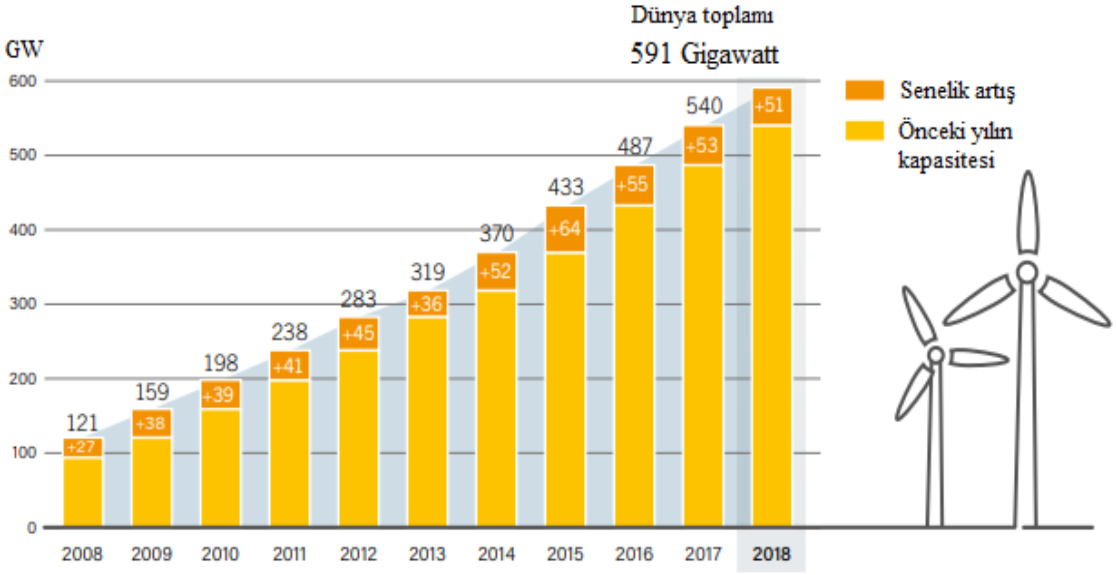
Yirminci yüzyılın başlarına kadar rüzgâr enerjisi, mekanik güç sağlamak için kullanıldı. Modern sanayileşmenin başlangıcında, dalgalanan rüzgâr enerjisi kaynağının kullanımı, daha tutarlı bir güç kaynağı sağlayan fosil yakıtla çalışan motorlar ya da elektrik şebekeleriyle değiştirildi.

1970'lerin başında, ilk petrol fiyat şokuyla birlikte, rüzgâr gücüne ilgi yeniden ortaya çıktı. Ancak bu sefer, asıl odak nokta, mekanik enerji yerine elektrik enerjisi sağlayan rüzgâr enerjisi oldu. Bu sayede, yedek enerji olarak - elektrik şebekesi üzerinden - diğer enerji teknolojilerini kullanarak güvenilir ve tutarlı bir güç kaynağı sağlamak mümkün hale geldi [24].

Elektrik üretimi için ilk rüzgâr türbinleri yirminci yüzyılın başlarında geliştirilmişti. Teknoloji 1970'lerin başından itibaren adım adım iyileştirildi. 1990'ların sonunda, rüzgâr enerjisi en önemli sürdürülebilir enerji kaynaklarından biri olarak ortaya çıkmıştır. Yirminci yüzyılın son on yılında, dünya çapında rüzgâr kapasitesi yaklaşık üç yılda bir ikiye katladı. Rüzgâr enerjisinden elde edilen elektriğin maliyeti 1980'lerin başında maliyetin yaklaşık altıda birine düştü. Ve eğilim devam ediyor gibi görünüyor [25]. Kümülatif kapasitenin 96-08 ve 2008-2018 yılları arasındaki değişimi Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.1 96-08 Dünya geneli rüzgâr enerjisi kapasitesi (Ren21)

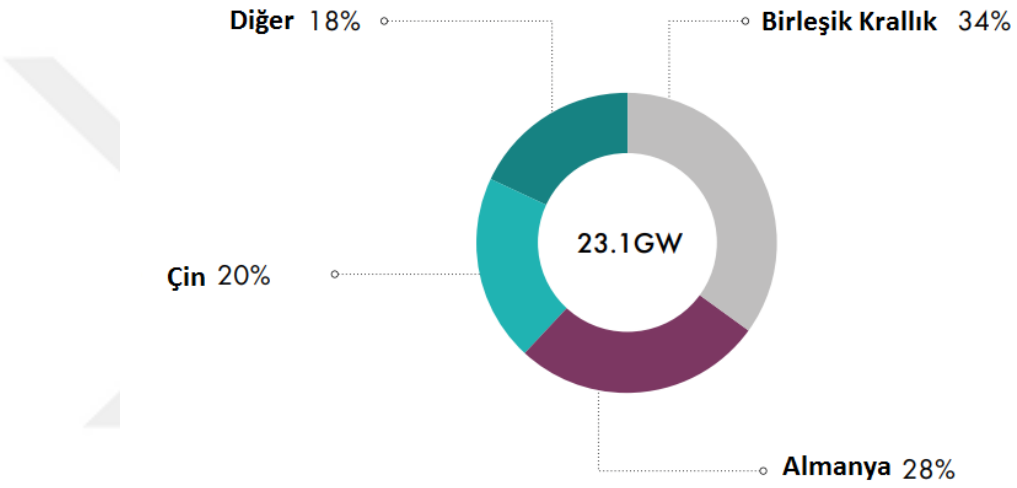


Şekil 2.2 2008-2018 Dünya geneli rüzgâr enerjisi kapasitesi (Ren21)

Rüzgârın küresel enerji karışımındaki gelecekteki rolü, önde gelen enerji endüstrisi, araştırma ve uluslararası kuruluşlar tarafından yürütülen bir dizi enerji modelleme senaryosundan değerlendirildi. (Bunlar arasında Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA), Uluslararası Uygulamalı Sistem Analizi Enstitüsü (IIASA), Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi (GWEC), Exxon Mobile ve ABD Enerji Bakanlığı (ABD DoE) bulunmaktadır). Rüzgâr gücünün ne kadar büyük bir rol oynaması beklendiğini görmek için gelecekteki sera gazı hedefleri için farklı

seviyelerde hırs içeren bir dizi küresel enerji senaryosunu karşılaştırıyoruz. Ardından, IRENA'nın yakın zamanda yenilenebilir enerji yol haritası çalışmasından (REmap) 2030'a kadar gerçekleşebilecek küresel ve bölgesel rüzgâr enerjisi potansiyeli tahminlerini, ismi geçen kuruluşlardan alınan verilerle açıklanmaktadır [26].

IRENA'da yayınlanan rapora göre, rüzgâr enerjisi tesisleri küresel olarak 2000'den bu yana yılda yaklaşık% 25 artmıştır. Rüzgâr, 2001–2013 döneminde küresel yenilenebilir enerji sektörü kapasite eklerinin neredeyse üçte birini sağlamıştır. 2018 sonunda küresel kurulu rüzgâr kapasitesi yaklaşık 591 GW civarındadır. Ayrıca Şekil 2.3'te görüleceği gibi, mevcut küresel rüzgâr kapasitesinin yalnızca % 4'ü açık denizde kuruludur.

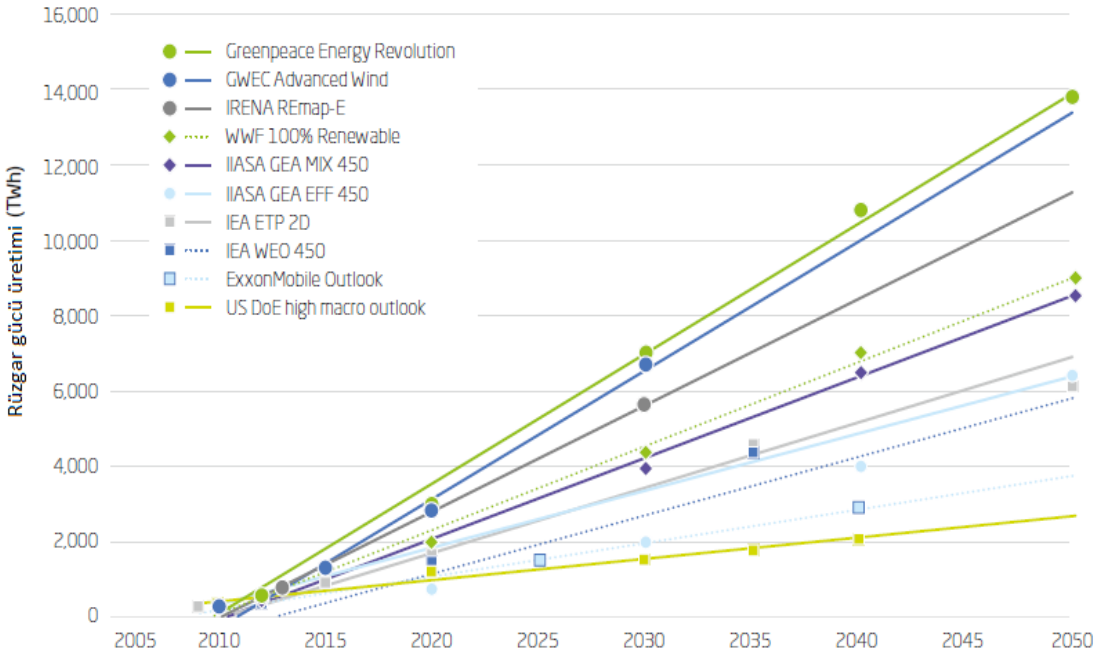


Şekil 2.3 Dünya'da kurulu offshore RES gücü (GWEC)

Küresel ölçekli hazırlanan raporlara göre bugün en fazla rüzgâr kapasitesine sahip bölgeler Çin, ABD, Hindistan ve Avrupa'dır. Bunlar aynı zamanda kurulu kapasitede en hızlı büyümeye sahip bölgelerdir. Karada rüzgâr tesisatları Çin'de, ardından AB ve ABD'de yoğunlaşırken, karada rüzgâr tesisatları AB'de, özellikle İngiltere, Danimarka, Almanya ve Belçika'da yoğunlaşmıştır [27].

Rüzgâr enerjisinin küresel ölçekte nasıl bir rol oynayabileceğini önem arz etmektedir ve araştırmalar devam etmektedir. Öncü enerji endüstrisi, araştırma ve uluslararası kuruluşlar tarafından üretilen küresel enerji sistemi modellerinden türetilen senaryolarda rüzgâr gücünün rolünü incelenmektedir. Rüzgâr gücü için 2050'ye yönelik çeşitli tahminleri geniş bir yelpazeyi göstermektedir. Burada tartışılan en ilerici küresel rüzgâr enerjisi öngörüleri Greenpeace, Global Rüzgâr Enerjisi Konseyi ve IRENA tarafından

yayınlandı. En temkinli küresel rüzgâr enerjisi tahminleri Exxon Mobile ve ABD Enerji Bakanlığı tarafından sunulmaktadır. Şekil 2.4, bu senaryoların ardındaki temel varsayımları özetlemekte ve 2050'deki rüzgâr gücünün rolü konusunda yol göstermektedir.



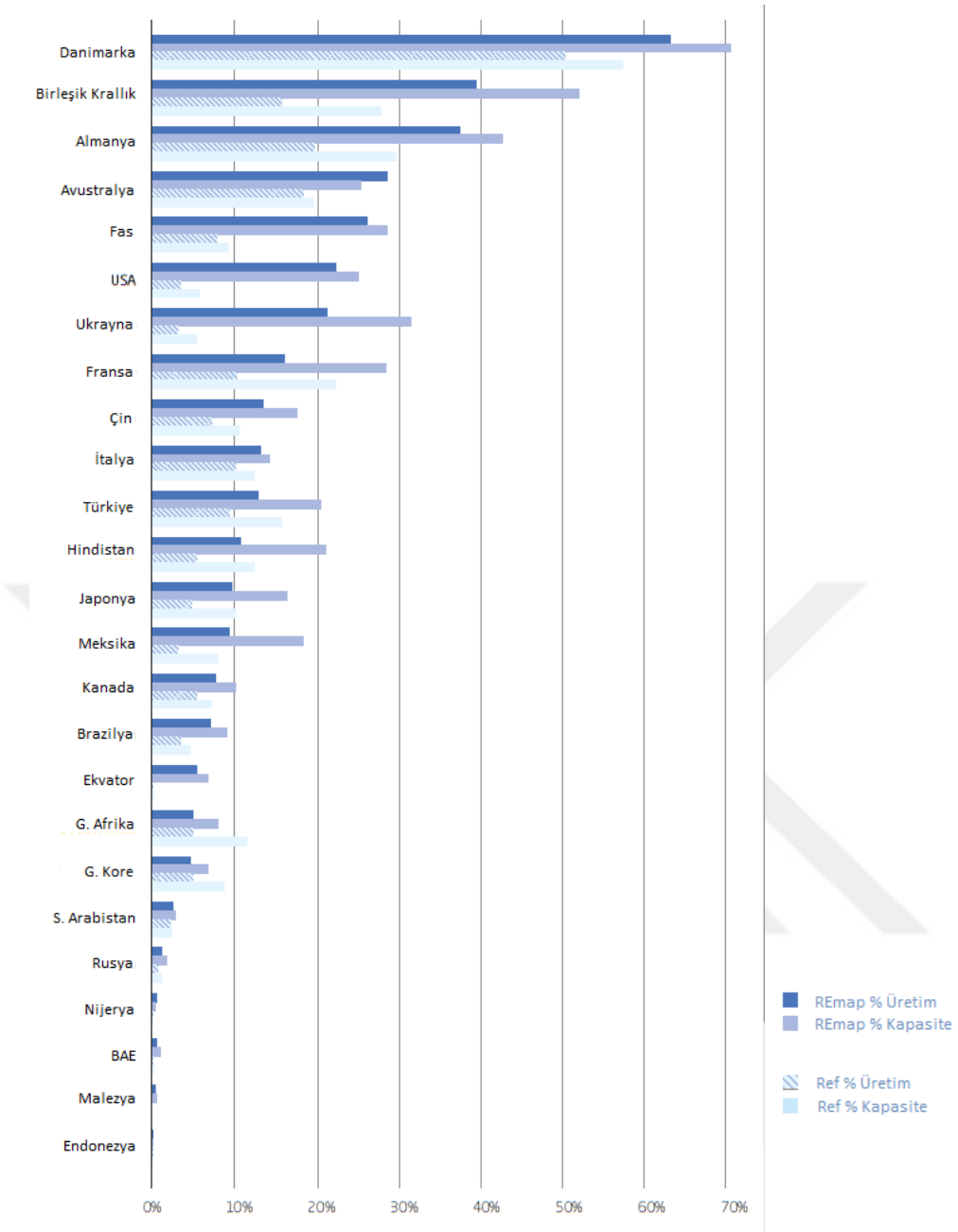
Şekil 2.4 2050 yılına kadar öngörülen rüzgâr enerjisi üretimi (DTU)

Küresel çapta araştırmaları bulunan GWEC, IRINA, WWF %100 Renewable gibi enstitülerin önümüzdeki 2050 yılı için tahmini rüzgâr enerjisi üretim senaryoları rüzgâr enerjisine verilen önemi anlamamızı sağlamaktadır.

Rüzgâr gücünün küresel ölçekte gelecekteki rolü daha da artacaktır. Bununla birlikte, rüzgâr enerjisi üretimine yönelik hırs düzeyi, pek çok faktöre ve tartışılan çalışmalardan elde edilen tahminlere dayanmaktadır. Rüzgâr enerjisi için en iyimser çalışmalar gelecekteki düşük karbonlu enerji sistemi için güçlü bir politik bağlılığa dayanmakta ve küresel ortalama sıcaklığın 2050 yılına kadar 2 °C'nin altında kalmasına yönelik küresel bir enerji geçişi varsaymaktadır [28].

Kademeli rüzgâr enerjisi tahminleri, 2050'de 5000 GW'a kadar kurulu bir rüzgâr kapasitesine sahiptir. Bu, yaklaşık 4600 GW rüzgâr tesisatının (mevcut seviyenin 14 katından daha fazla) küresel olarak üretilmesi, kurulması ve şebekeye bağlı olması gerektiğini varsaymaktadır. Günümüzde 20 yıllık bir türbin ömrünü öngörüldüğü

düşünüldüğü zaman, küresel rüzgâr kapasitesinde bu şekilde bir genişleme; rüzgâr türbini imalat endüstrisinin, 2020'den itibaren yaklaşık 100 GW/yıl, 2030'dan itibaren 200-250 GW/yıl inşa etmek ve kurmak zorunda kalacağı anlamına gelir. Bununla birlikte kıyı ve deniz rüzgârından elektrik üretimi yayılımının coğrafi kalıplarının ülkeye özgü koşullara bağlı olarak çeşitlendirilmesi öngörülmektedir. Öngörülerden herhangi bir marjinal yenilenebilir enerji senaryosunu uygulamak için rüzgâr gücüne önemli miktarda ilave yatırım yapılması gerekmektedir. Şekil 2.5, REMAP 2030'da belirlenen rüzgâr kapasitelerine ulaşmak, kara rüzgârı için yıllık 314 milyar dolar/yıl'a, deniz rüzgârı için ise 47 milyar dolar/yıl yatırım gerektirecektir.



Şekil 2.5 Referans durum (Ref) ve REmap 2030 durum (IRENA) için 2030'da ülkelere göre rüzgâr enerjisi kurulu güç ve üretim kapasiteleri

Gelecekte rüzgâr enerjisini yükseltmek için temel faktörleri mümkün kılan tespitleri sıralarsak:

• Esnek elektrik talebinin olması; elektrik sektöründeki enerji sistemlerine geçiş yapılması. Örneğin ulaştırma sektörünün elektrifikasyonu,

• Aralıklı enerji üretimlerini kaldırabilen güç sistemlerinin kapasitesinin sürekli artırılması,

• Rüzgâr enerjisi teknolojilerinde artan maliyetin azalması,

• Dünya çapında yaklaşık 100 GW/yıl üretim ve kurulum sağlayan rüzgâr enerjisine yüksek yatırımlar yapılması şeklinde sıralanabilmektedir.

Hızla gelişen rüzgâr türbin teknolojisi rüzgâr enerjisine olan ilgiyi dünya çapında artırmıştır. Birçok ülke değerlendirmeyi bekleyen rüzgâr potansiyellerini birer birer değerlendirmeye başlamıştır. 21 Dünya Enerji Konseyi (WEC)'nin yaptığı araştırmaya göre, km² başına üretim kapasitesi olarak 8 MW güç değeri ve kapasite faktörü olarak % 23 esas alınarak dünyanın rüzgâr teknik potansiyeli yıllık 20.000 TWh olarak belirlenmiştir. Ayrıca, dünya yüzeyinin % 27' sinin (zeminden 10 m yüksekte) yıllık ortalama rüzgâr hızı 5, 1 m/s den yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu alanların % 4'ü RES yatırımı için uygun olmakta diğer alanlar ise çeşitli amaçlara hitap etmektedir.

2.1.1 Modern Rüzgâr Türbinleri

Bir rüzgâr türbinden elde edilen P gücü, iyi bilinen bir ifade ile verilmiştir:

$$P = 1/2 * (Cp * r * A * U^3) \quad (2.1)$$

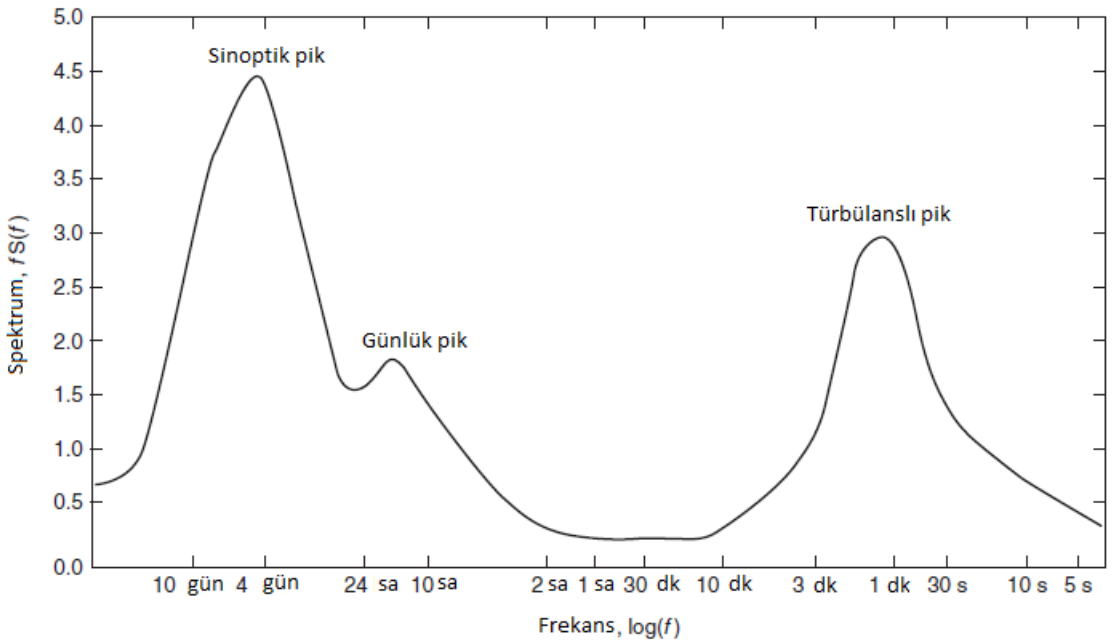
Burada r hava yoğunluğudur (1: 225 $kg.m^{-3}$), Cp güç katsayısıdır, A rotor süpürme alanıdır ve U rüzgâr hızıdır.

Hava yoğunluğu hidroelektrik santraline güç veren sudan 800 kat daha düşüktür ve bu doğrudan rüzgâr türbininin büyüklüğüne yol açar. Seçilen tasarım rüzgâr hızına bağlı olarak, bir rüzgâr türbini daha büyük bir rotora sahip olabilir. Güç katsayısı, türbin tarafından mekanik çalışmaya dönüştürülebilen rüzgârdaki gücün kesrini açıklar. Teorik olarak maksimum 0,593 (Betz sınırı) ve daha düşük bir tepe değerine sahiptir. Bir rotorun güç katsayısı, uç hızı oranına (rotor ucu hızının serbest rüzgâr hızına oranı) göre değişir ve sadece benzersiz bir uç hızı oranı için maksimumdur. Güç katsayısındaki artımlı iyileştirmeler, rotorun detaylı tasarım değişiklikleri tarafından sürekli olarak araştırılmaktadır ve değişken hızda çalışarak maksimum güç katsayısını bir rüzgâr hızı aralığında tutmak mümkündür. Bununla birlikte, bu önlemler güç çıkışında sadece mütevazı bir artış sağlayacaktır. Çıkış gücündeki büyük artışlar, yalnızca rotorun süpürülmüş alanını artırarak veya rüzgâr türbinlerini daha yüksek rüzgâr hızlarına sahip sahalara yerleştirerek elde edilebilir.

2.1.2 Rüzgâr Enerjisi

Hava kütleleri, bu kütlelerin farklı termal koşulları nedeniyle hareket eder. Hava kütlelerinin hareketi, bölgesel ve yerel bir akımın yanı sıra küresel bir akım (yani jet akımı) olabilir. Bölgesel fenomen orografik koşullarla (örneğin alanın yüzey yapısı) ve küresel olaylarla belirlenir. Rüzgâr türbinleri, yere yakın rüzgâr enerjisi kullanır. Sınır tabakası olarak bilinen bu bölgedeki rüzgâr koşulları, jeostrofik rüzgârın bozulmamış yüksek enerjili akımından, bölgesel koşulların yanı sıra aşağıdaki tabakalara aktarılan enerjiden etkilenir. Yerin pürüzlülüğünden dolayı, yerin yakınındaki yerel rüzgâr akımı türbülanslıdır.

Rüzgâr hızı, zaman ve yüksekliğin bir fonksiyonu olarak sürekli değişir. Rüzgâr değişimlerinin zaman ölçekleri, Şekil 2,6'da bir rüzgâr frekansı spektrumu olarak sunulmuştur.



Şekil 2.6 Rüzgâr enerjisi frekans spektrumu (van der Hoven)

Türbülanslı zirveye, esas olarak müteakip saniyedeki dakika aralığındaki paylar neden olur. Günlük tepe noktası günlük rüzgâr hızı değişikliklerine (örneğin karada ve denizde farklı sıcaklıkların neden olduğu kara-deniz meltemleri) ve sinoptik pik, tipik olarak günlük olarak haftalık olarak değişen ancak aynı zamanda mevsimsel döngüleri içeren değişen hava düzenlerine bağlıdır.

Bir güç sistemi açısından, türbülanslı pik, rüzgâr enerjisi üretiminin güç kalitesini etkileyebilir. Türbülansların güç kalitesi üzerindeki etkisi uygulanan türbin teknolojisine büyük ölçüde bağlıdır. Örneğin değişken hızlı rüzgâr türbinleri, rüzgâr türbini tahrik hattının dönen kütlelerinde derhal enerjinin depolanmasıyla kısa vadeli güç değişimlerini emebilir. Bu, güç çıkışının güçlü bir şekilde şebekeye bağlı türbinlerden daha yumuşak olduğu anlamına gelir. Bununla birlikte, günlük ve sinoptik pikler, güç sisteminin uzun vadeli dengelemesini etkileyebilir. Rüzgâr hızı tahminleri, güç sisteminin uzun vadeli dengelemesinde önemli bir rol oynar.

Bir diğer önemli konu ise rüzgâr kaynaklarının uzun vadeli değişimleridir. Bu konuyla ilgili çeşitli çalışmalar vardır [29]. Bu çalışmalara dayanarak, yıllık ortalama güç çıktısının bir 20 yıllık dönemden diğerine değişiminin % 10 veya daha az bir standart sapmaya sahip olduğu tahmin edilmektedir. Bu nedenle, bir rüzgâr türbininin ömrü boyunca, kaynak rüzgârının belirsizliği büyük değildir. Bu durum rüzgâr türbininin ekonomik değerlendirilmesi için önemli bir faktördür. Dünyanın birçok yerinde, hidroelektrik üretimi için daha uzun bir süre (1 yıldan fazla) suyun mevcudiyetine ilişkin belirsizlik rüzgâr enerjisininkilerden daha fazladır [30].

Rüzgâr enerjisinde güç eğrisi önemli bir faktördür. Denklem (rüzgâr formülü) tarafından açıklandığı gibi, rüzgârdaki mevcut enerji rüzgâr hızının küpüne göre değişir. Bu nedenle rüzgâr hızındaki % 10'luk bir artış mevcut enerjide % 30'luk bir artışa neden olacaktır. Bir rüzgâr türbininin güç eğrisi, kesme rüzgâr hızı (rüzgâr türbininin çalışmaya başladığı hız) ile yaklaşık kapasite arasındaki bu ilişkiyi takip eder. Rüzgâr türbini, bireysel rüzgâr türbininin tasarımına bağlı olarak, genellikle 12–16m/s arasında bir rüzgâr hızında nominal kapasiteye ulaşır.

Nominal rüzgâr hızından daha yüksek rüzgâr hızlarında, maksimum güç üretimi sınırlı olacaktır veya bir başka deyişle, rüzgârda mevcut enerjinin bazı kısımları “dökülmüş” olacaktır. Güç çıkışı düzenlemesi, perde kontrolü ile (yani gücü kontrol etmek için kanatları yumuşatarak) veya durak kontrolü ile (yani, rotor kanadının aerodinamik tasarımı rüzgâr türbininin gücünü düzenleyecektir) yapılabilir. Bu nedenle, bir rüzgâr türbini, kesme rüzgâr hızında üst sınırına sahip belirli bir rüzgâr aralığında maksimum güç üretir. Boşaltma rüzgâr hızı, rüzgâr türbininin üretimi durdurduğu ve ana rüzgâr yönünden geri döndüğü rüzgâr hızıdır. Tipik olarak, kesme rüzgâr hızı 20 ila 25 m/s aralığındadır.

Güç eğrisi, hava basıncına bağlıdır (yani, güç eğrisi, deniz seviyesinden yüksekliğe ve ayrıca rotor kanatlarının aerodinamik şeklindeki, kir veya buzun neden olabileceği değişikliklere bağlı olarak değişir). Sabit hızlı, durak ayarlı rüzgâr türbinlerinin güç eğrisi de güç sistemi frekansından etkilenebilir.

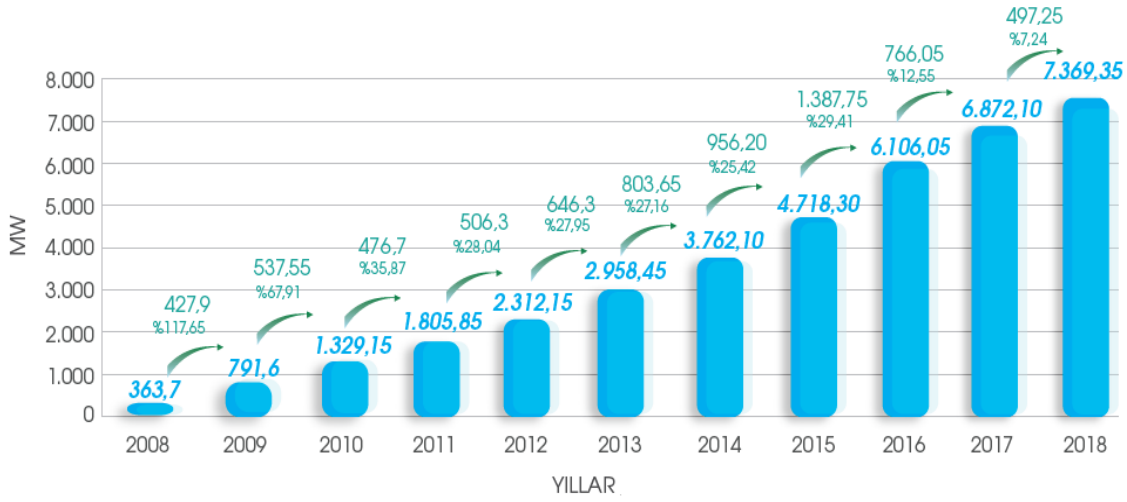
Pm / Cic oranı, kapasite faktörü (CF) olarak adlandırılır ve bireysel üniteler veya birkaç ünitenin toplam üretimi için hesaplanabilir. Kapasite faktörü, konumdaki rüzgâr kaynaklarına ve rüzgâr türbininin türüne bağlıdır, ancak genellikle yaklaşık 0.25 (düşük rüzgâr hızı konumları) ila 0.4 (yüksek rüzgâr hızı konumları) arasındadır. Yılda saat cinsinden kullanım süresi 8760 Pm / Cic olarak tanımlanır. Bu süre, yılda 2200-3500 saat aralığında yer almaktadır. Genel olarak, kullanım süresi yüksekse, ünitenin nispeten sık olarak nominal kapasitede çalışması muhtemeldir.

2.2 Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi

Avrupa rüzgâr enerji potansiyeli sıralamasında Türkiye üçüncü sırada yer almaktadır [31]. Türkiye'nin teknik rüzgâr potansiyeli Avrupa'ya kıyasla % 25-30 daha fazladır. Türkiye'deki rüzgâr türbinlerinin çalışma süreleri yıllık 3.000 saat ve üzeri iken Avrupa'da bu 2.000 - 2.500 saat civarındadır [32].

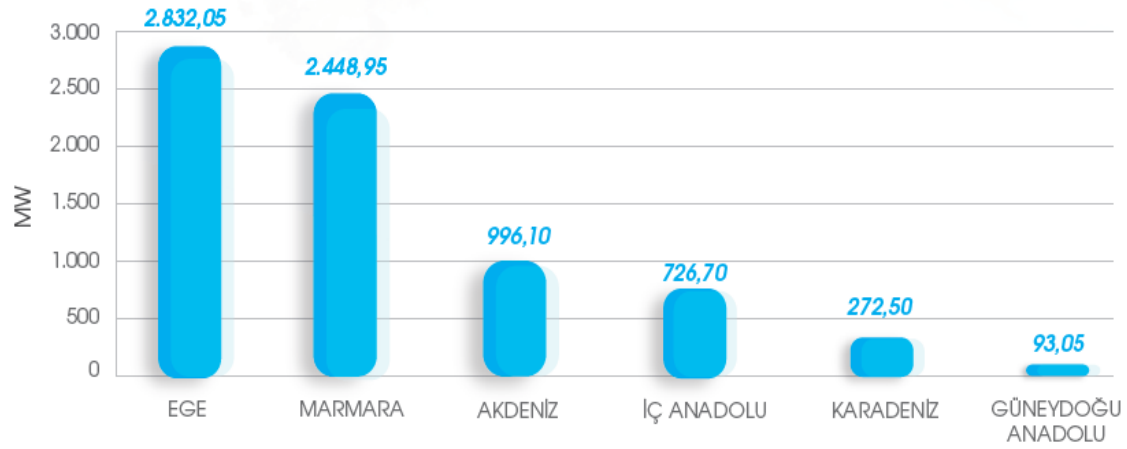
Türkiye coğrafik yapısı sebebiyle önemli bir rüzgâr potansiyeline sahip ülke konumundadır. Bu potansiyelinin verimli bir kısmı genellikle kıyı şeridi boyunca devam etmektedir. Türkiye'deki rüzgâr enerji santrali (RES) yatırımlarının büyük bir kısmı bu alanlarda yapılmıştır. Yapılan araştırmalara göre Türkiye'nin rüzgâr enerji potansiyeli 48.000 MW olarak belirlenerek 7, 5 m/s ve üstü rüzgâr hızlarını barındıran 50 m yükseklikteki alanlar için km² başına 5 MW'lık RES kurulabileceği fikrine varılmıştır [33]. Bu potansiyele denk gelen 23 alan Türkiye yüz ölçümünün yaklaşık %1, 3'ünü oluşturmaktadır. Ayrıca, rüzgâr hızının 6, 5 m/s'den fazla olduğu noktalardaki rüzgâr teknik potansiyeli ise 131.7456, 40 MW olarak hesaplanmıştır.

Türkiye'nin son 10 yılına (2008-2018) ait rüzgâr enerji kümülatif kurulumu Şekil 2.7'de verilmiştir. 2019 yılı ocak ayına ait Türkiye'deki RES'lerin kümülatif kurulum grafiği incelendiğinde kurulan RES'lerin her yıl arttığı görülmektedir.



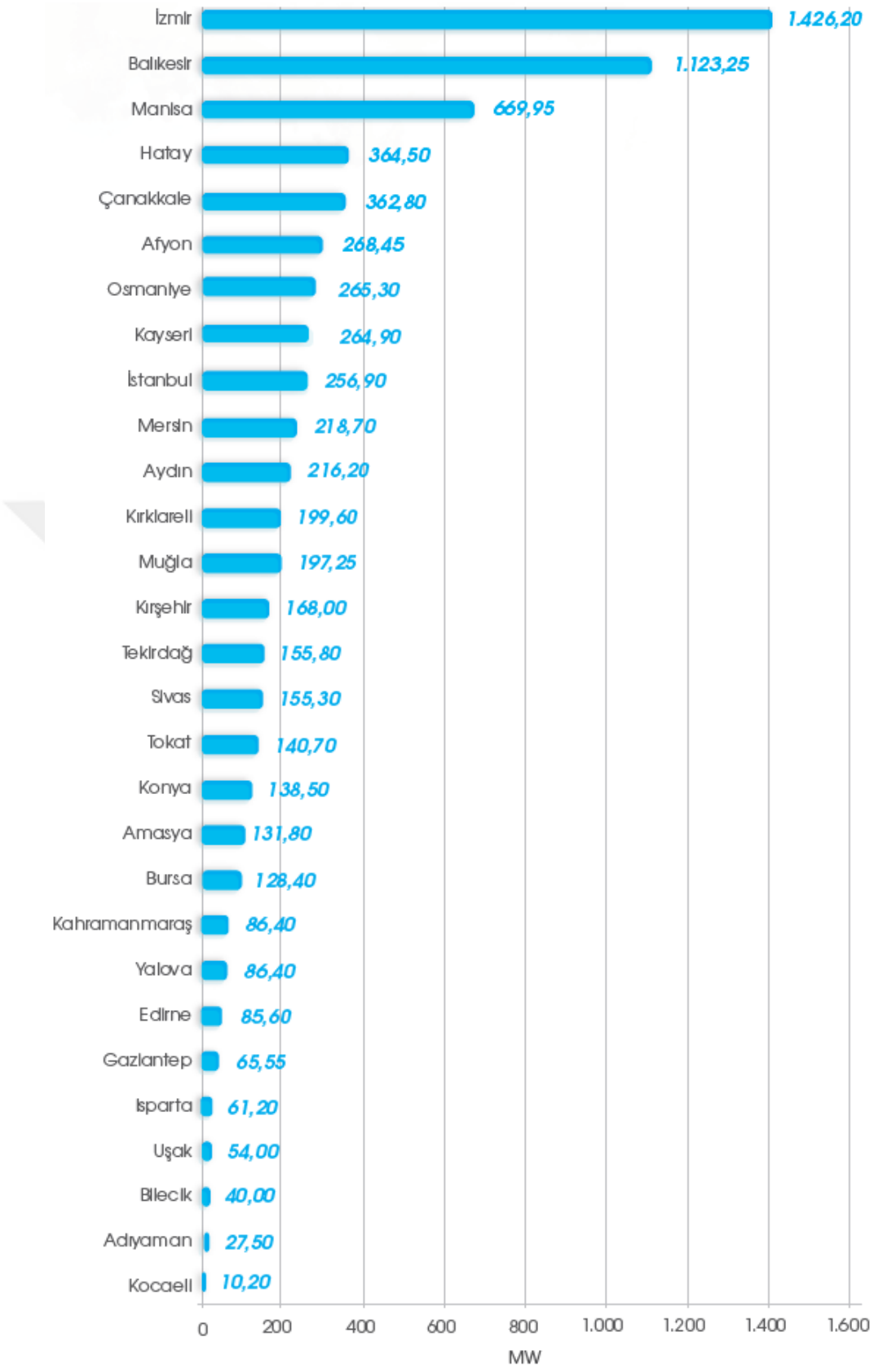
Şekil 2.7 Türkiye'deki RES'lerin kümülatif kurulum Ocak 2019 (TÜREB)

Bu verilere göre ülkemizde kurulu RES toplam gücü 7.369,35 MW'tır. Oysa ülkemize ait RES toplam potansiyeli 48.000 MW olup kurulu bu değer potansiyelimizin yaklaşık % 15'ine denk gelmektedir. Değerlendirmeyi bekleyen bir hayli rüzgâr potansiyelimizin olduğu açıktır. İşletmede olan RES'lerin bölgelere göre dağılımı Şekil 2.8'de verilmiştir.



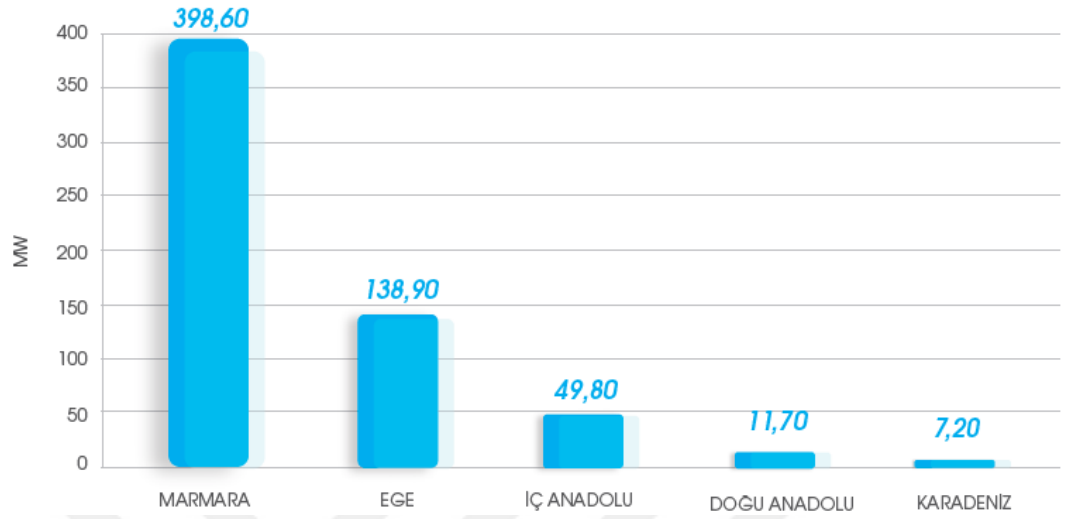
Şekil 2.8 İşletmede olan RES'lerin bölgelere göre dağılımı (TÜREB)

Burada en büyük payı % 38,43 ile Ege bölgesi (2.832,05 MW) alırken, % 33,23 ile Marmara (2.448,95 MW), % 13,52 ile Akdeniz (996,10 MW), % 9,86 ile İç Anadolu (726,70 MW), % 3,70 ile Karadeniz (272,50 MW) ve % 1,26 ile Güney Doğu Anadolu (93,05 MW) bölgeleri gelmektedir. İşletmede olan RES'lerin illere göre dağılımı ise Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9 İşletmedeki RES'lerin MW cinsinden illere göre dağılımı 2019 (TÜREB)

En büyük yatırım % 19,07 ile İzmir'de (1.426,20 MW) iken en küçük yatırım % 0,14 ile Kocaeli'nde (10,20 MW) yer almaktadır. İnşa halindeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı Şekil 2.10'da verilmiştir.

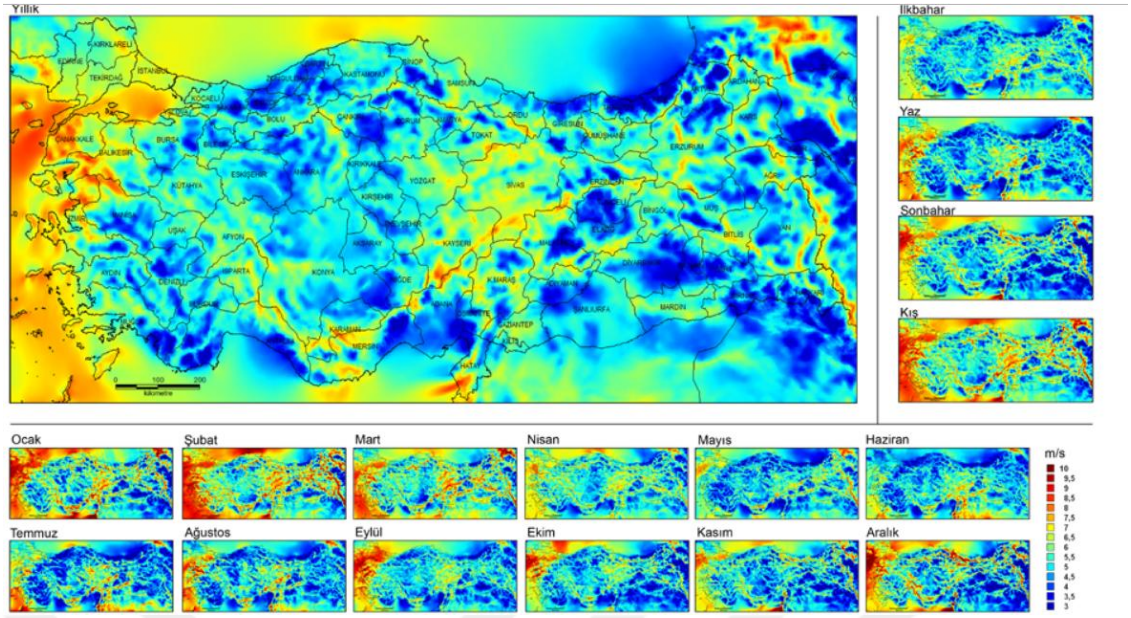


Şekil 2.10 İnşa halindeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı (TÜREB)

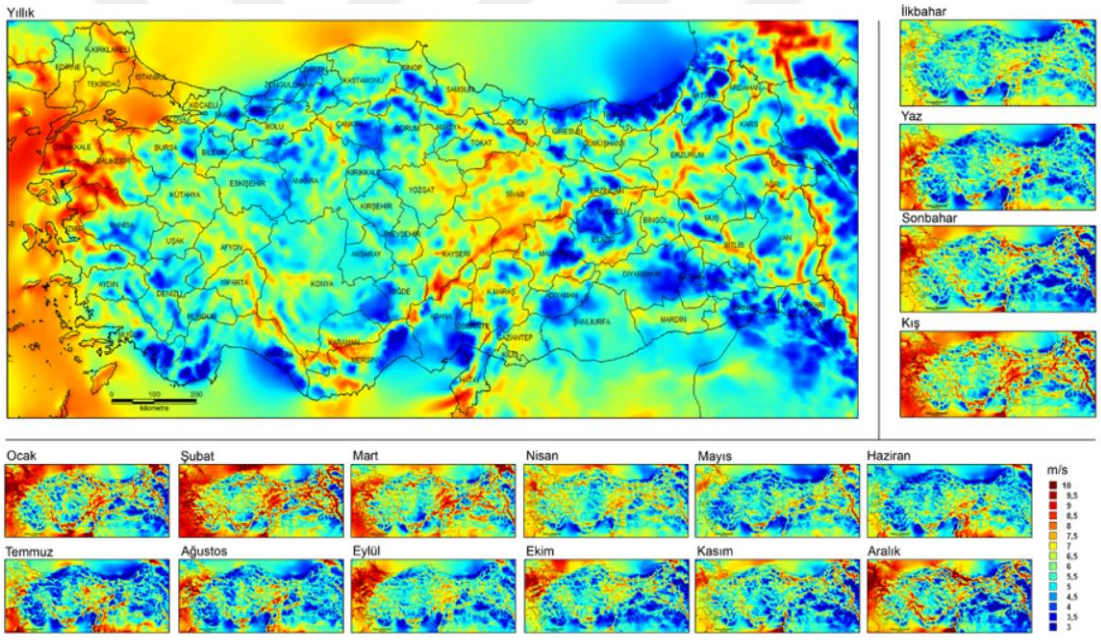
Burada en büyük payı % 65,75 ile Marmara (398,6 MW) alırken, % 22,91 ile Ege (138,90 MW), % 8,22 ile İç Anadolu (49,8 MW), % 1,93 ile Doğu Anadolu (11,70 MW) ve % 1,19 ile Karadeniz (7,20 MW) bölgeleri gelmektedir.

2.2.1 Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası

50 m yükseklik için Türkiye Rüzgâr Enerji Potansiyel Atlası (REPA) Şekil 2.11'de verilmiştir. 50 m yükseklikte rüzgâr hızı ortalamalarının kış mevsiminde en yüksek seviyede iken ilkbahar mevsiminde en düşük seviyede olduğu görülmektedir. Ay bazında ise Şubat ayı rüzgâr hızı en yüksek değerde iken Haziran ayı en düşük değerdedir. 100 m yükseklik için REPA Şekil 2.12'de verilmiştir. 100 m yükseklikte rüzgâr hızı ortalamalarının kış mevsiminde en yüksek seviyede iken ilkbahar mevsiminde en düşük seviyede olduğu görülmektedir. Ay bazında ise Şubat ayı rüzgâr hızı en yüksek değerde iken Haziran ayı en düşük değerdedir.



Şekil 2.11 50 m için Rüzgâr Enerji Potansiyel Atlası (YEGM)



Şekil 2.12 100 m için Rüzgâr enerjisi potansiyel atlası (YEGM)

Türkiye rüzgâr enerji potansiyel atlası, Şekil 2.11 ve Şekil 2.12 detaylıca incelendiğinde, 100 m deki yıllık, mevsimlik ve aylık rüzgâr hızlarının 50 m deki rüzgâr hızlarına kıyasla çok daha fazla olduğu görülmektedir.

2.2.2 Rüzgâr Enerjisinin Şebekeye Olan Etkileri

Yönergeler, tavsiyeler ve gereksinimler dağıtım ağı şirketlerine, rüzgâr türbini üreticilerine ve şebeke operatörlerine ve ayrıca rüzgâr çiftliklerini AG veya OG şebekesine bağlamakla ilgilenen diğerlerine yöneliktir. Teknik standartların amacı, rüzgâr türbinleri ve şebekeleri için gerilim kalitesi ve tedarik güvenilirliği için geçerli standartlara uygun kılavuzlar, öneriler ve gereklilikler belirlemektir. Kurallar ve gereklilikler, rüzgâr türbini için kullanılan tasarım yaklaşımından bağımsız olmalı ve örneğin invertörlü veya invertörlü senkron veya endüksiyon generatörlerine uygulanacak kadar açık olmalıdır. Müşteri tarafında gerilim kalitesi ve rüzgâr türbinlerinin güç kalitesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek için gereken teknik verilerle ilgilenmektedirler. Bununla birlikte rüzgâr türbinlerinin bağlanacağı şebeke tarafından karşılanacak gereksinimleri araştırmaktadırlar.

3
TEMEL ŞEBEKE ANALİZLERİ

3.1 Kısa Devre Analizi

Kısa devre çalışması, arıza durumunda elektrik cihazlarının derecesini kontrol etmek ve tesisin çeşitli işletme koşulları için sistemin arıza seviyelerini çeşitli gerilim seviyelerinde tespit etmektedir.

Generatörlerden, şalt cihazlarından, transformatörlerden ve iletim hatlarından oluşan bu tür büyük bir şebekede, olağandışı bir durumda sistemin bir yerinde bir arıza meydana gelecektir. Hata, aşağıdakiler arasındaki temel yalıtım gücünü azaltan anormal durum anlamına gelmektedir. Nominal gerilimde arıza olması, yalıtımın bozulması, kuşların tellere tünemesi, yılanların kazayla kısa devre yapması, uçurtma ipleri, ağaç dalları vb. durumlarda meydana gelmektedir. Anormal gerilim arızasında ise şok dalgalanmaları ve yıldırımın neden olduğu dalgalanmalar kabul edilmektedir. Ayrıca, canlı iletken veya toprak arasındaki kısa devre veya bir veya daha fazla fazdaki kırık iletkenlerden kaynaklanabilir. Bazen hem kısa devre hem de kırık iletken hatalarını (aynı zamanda açık devre hataları olarak da bilinir) içeren eş zamanlı arızalar ortaya çıkabilir. Arıza simetrik veya simetrik olmayabilir, arıza bir anda tüm üç fazda meydana geldiğinde, simetrik arıza olduğu ve bir veya daha fazla fazın dahil olabileceği simetrik arıza olduğu söylenir. Simetrik arıza nadir olsa da, bu tür arızalar güç sistemlerimiz üzerinde en ciddi etkileri göstermektedir. Simetrik olmayan arıza, güç sisteminin düzenli bir problemi olarak ele alınabilir ve daha hassas bir şekilde analiz edilmesi gerekir Böylece sistem kararlı durumda kalabilir ve sürekliliği bozmadan çalışmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, bir arıza durumunda, sistem gerilim ve akım değerlerinin belirlenmesi önemlidir. Böylece koruyucu cihazlar, arızayı tespit etmek ve sistemin hatalı bölümünü izole etmek üzere ayarlanmaktadır. Şalt seçimi, rölelerin ayarlanması ve sistemin çalışmasının kararlılığı bir güç sisteminin arıza analizi bilgisi ile belirlenmektedir[34]. Kısa devre analizi:

a. Kısa devre akımı ve arıza gücü bilgisini verir

b. Arıza sonrası bara gerilimleri hem faz hem de sıralama şeklindedir.

c. Diğer baralardan ve topraklama bağlantısından arıza katkısı mevcut sırayla ve biçimsel olarak yapılır.

d. Her bara için Pozitif, Negatif ve Sıfır dizi empedans değerlerini hesaplar.

3.1.1 ANSI/IEEE C37.010.1999 ve Kısa Devre Hesabı

1000 V ve üzerinde orta ve yüksek gerilim kesicilerinin seçilmesinde ANSI/IEEE C37.010.1999 standardı göz önüne alınmaktadır. ANSI standardı basitleştirilmiş kısa devre hesabı yapmamıza imkân sağlar. Metot olarak, p.u cinsinden ideal bir gerilim kaynağı seçilir ve onun önünde reaktanstan oluşan eşdeğer devre üzerinden bu hesaplama gerçekleştirilir. E hata öncesi gerilim olarak tanımlanmaktadır ve aynı zamanda gerilim kaynağının tepe değeri hatanın oluştuğu baranın en yüksek çalışma voltajıdır. Nominal voltaj çalışma geriliminin bilinmediği hesaplamalarda kullanılabilir. ANSI standardı muvafık düzeltici katsayılar yoluyla DC ve AC kısa devre oluşumlarını göz önüne alır. DC bileşen kısa devre noktasından görünen eşdeğer empedansın X/R oranına bağlı olarak, AC bileşen ise motor ya da eşzaman generatör gibi döner makinelerin davranışları değerlendirilerek hesaplanır. AC bileşen hesaplamalarında, döner makine kısa devre noktasına uzak ya da yakın olması durumlarına göre iki olasılık göz önüne alınır. ANSI standardı kesiciyi simetrik akıma göre belirleme eğilimindedir. Göz önüne alınan ister simetrik ister asimetrik olsun standart üç faz ve faz-toprak kısa-devreler üzerinde yoğunlaşır. ANSI/IEEE C37.010.1999 da yapılan 3 çeşit çalışma vardır bunlar: İlk döngü çalışması (first cycle duty), Kontak ayırma görevi (contact parting duty), Zaman gecikmeli cihazlar için kısa devre hesabı (short-circuit current for time delayed relaying devices) [35].

3.1.1.1 İlk Döngü Çalışması

Bir periyotluk zamanda efektif akımın yarım döngüsüdür. Hata oluşumu sonrasındaki ilk döngü içinde oluşacak arızanın oluşumunun incelenmesini sağlar. Hesaplamayı yapmak için ilk çevrim devresi kurulmalıdır. Bunun için durağan yüklerin empedansı ihmal edilmeli seri empedanslar ve çarpım katsayısıyla düzeltilmiş döner makinelerin geçici hal empedansları hesaba katılmalı. Reaktanslar, empedans yerine kullanılabilir. Döner makinelerin çarpım faktörleri tablodan alınır. İndüksiyon motorları güçleri ve

kutup sayılarına göre 3 gruba ayrılır. İlk çevrim çalışmasında, hesaplamalarda yerel ya da uzak kısa devre akım kaynaklarının göz önüne alınmasını gerektirmez. İlk olarak eşdeğer reaktans X belirlenir, İlk döngü hesabı E/X oranı ile yapılabilir. Bu simetrik çalışma kesicinin açma ve kapama kapasitesinde daha az olmalıdır ve DC bileşen hesaba katılmaz. Standart X/R değerine ulaşmak için 2 değişik devreyi önerir. İlki reaktans diğeri rezistanstan oluşur. Bu uygulama karmaşık empedans kullanımından daha güvenlidir. X, R değerleri sanal ve reel kısımlardır.

3.1.1.2 Kontak Ayırma Görevi

Bu çalışma kesici başlarının açması sırasında oluşan akımın hesabı için yapılır. Standartta en düşük kontak ayırma zamanı 2.5-4 çevrim arası olan kesiciler dikkate alınmıştır. Hata öncesi gerilim kaynağı ve eşdeğer empedans ile oluşturulmuş kesici devre yapılmalıdır. Eşdeğer empedans daha önce belirtildiği gibi hesaplanır. Döner makinelerin geçici hal reaktansı çarpım kat sayısı farklıdır. Çünkü en az kontak ayırma zamanındaki AC bileşen ilk çevrimdekinden daha büyüktür. ANSI standardı uygun kesici seçiminde iki koşul sağlar. En basit ihtimal X/R bilinmiyorsa, yeterli kesiciyi simetrik kapasitesi 2.25 E/X'ten daha büyük seçmektir. Ötekisi ise X/R oranı analiz edilmesi ve sistem rezistansının bilinmesi gerekmektedir. Eğer X/R oranı 15'ten küçükse kesici simetrik kapasitesi E/X değerine büyük-eşit seçilebilir, aksi halde daha detaylı bir prosedür (AC ve DC azalma miktarı için ayar isimli) gündeme gelir ve müteakip olarak değerlendirilir. Bu uygulama yolunda ilk olarak E/X hesaplanır. X/R oranına bağlı olan uygun düzeltici katsayıyı kullanarak kesiciyi seçmek mümkündür. Kesicinin nominal simetrik kapasitesi F.E/X'ten büyük olmalıdır. Bu yüzden geciktirici cihaz toplam kısa devre akımı için de yeterli olmalıdır. F katsayısı oluşturulurken eğrilerin 2 durumu uygundur. Bunlar ANSI normunda belirtilen uzak ve yakın olan eğriler. Öncelikle hataya yakın noktadaki generatör deneye dayalı olarak bilinen AC ve DC bileşenler hesaba katılır. Sonraki eğri uzak generatörde olan hata ile ilgilidir ve DC bileşen içindir. Bu durumda F.X/R'nin analitik fonksiyonu olarak bulunabilir. Yerel ve uzak kaynaklar görüldüğünde hangi eğriden faydalanılacağına karar vermek zordur. Daha yüksek değerli bir katsayı uygulamak daha güvenli bir yol olacaktır. Tekil olarak hataya matematiksel tekniklerle yaklaşıldığında, her bir durum için farklı çarpım faktörü uygulanır.

3.1.1.3 Zaman Gecikmeli Cihazlar İçin Kısa Devre Hesabı

Zaman gecikmeli rölesi olan uygulamalarda 6 periyottan daha fazla uygulanması gereken çalışmadır. E/X'ten elde edilen kısa-devre akımı, oluşturulan devrenin sadece generatörlerden oluşturulup, hat ve trafo gibi pasif elemanlar ve omik motorlar göz ardı edilir. Generatörler transient (geçici) reaktansları ile ya da AC vektörel uzantıda hesaba katılan daha büyük reaktans ile gösterilir. DC vektörel uzantı 0 alınmalıdır. Buradan bulunacak değer IEC 60909'daki I_k ile kıyaslanabilir.

3.1.2 IEC 60909 Normu Kısa Devre Analizi

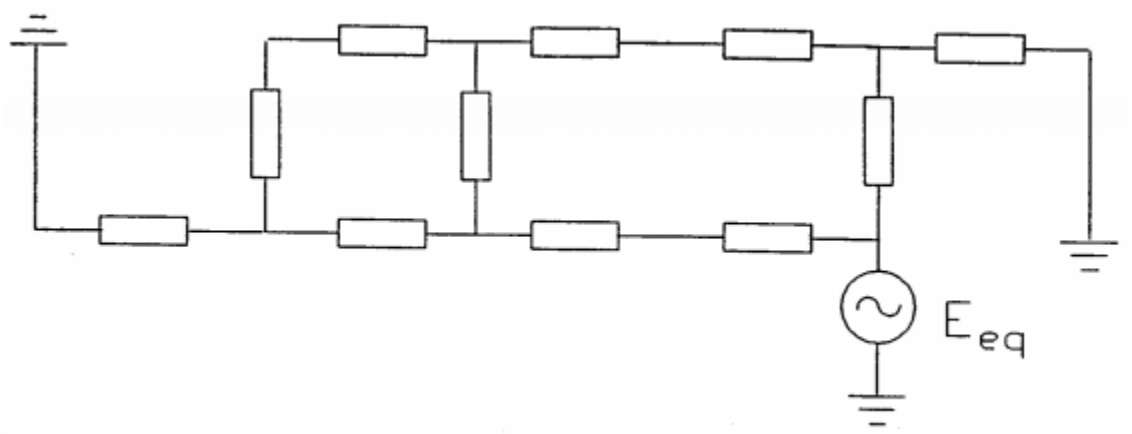
Endüstriyel ve ticari güç sistemleri için kısa devre hesaplamaları, ilk başlangıç yıllarından bu yana tanıtılan ANSI onaylı standartlara uygundur. O zamandan beri, AC / DC düşüş modellemesi ile çeşitli kesici sınıflandırma yapıları arasındaki uyumu yansıtmak için çeşitli yenilemeler yapıldı. Bu güne kadar kısa devre hesaplamaları yapmak için önemli ve güvenilir bir araç olarak kullanılmaktadırlar.

Kısa devre hesaplamalarının diğer uluslararası standartlar tarafından nasıl ele alındığına değinecek olursak: Birçok Avrupa ülkesinde çeşitli hata hesaplama kılavuzları kullanılmaktadır. Bu izole edilmiş sistem için yaygın olarak kullanılan bir IEC standardı IEC 61363-1: 1998.1'dir. 1980'lerin ortasına kadar hem endüstriyel hem de yardımcı elektrik güç sistemleri için geçerli Avrupa standartlarından biri, Alman VDE-0102 (IEC 60909-0: 2001, IEC 61362 1: 1998)'dir. 1980'lerde Uluslararası Elektroteknik Komisyonu altında yürütülen çalışmalar, IEC 60909 standardının meyvelerini getirdi. IEC 60909, önceki VDE 0102 kurallarına büyük oranda benzer.

1988'deki girişinden bu yana, IEC 60909-0: 2001, 1991'de yayımlanan Avustralya standardı AS-3851 gibi diğer Uluslararası standartlar için bir platform olarak hizmet vermiştir. Kullanıcının daha fazla detay için standardın kendisine (IEC 909: 1988, IEC 61363-1: 1998) başvuruda bulunabilir [36].

IEC 60909-0: 2001, düşük voltajlı sistemler de dahil olmak üzere, 230 kV gerilimlere kadar 50 Hz veya 60 Hz'de çalışan üç fazlı AC elektrik güç sistemlerini kapsar. Standart, üç fazlı, hattan toprağa, fazdan faza ve çift faz-toprak kısa devrelere yöneliktir. "Helmholtz süperpozisyonu" yöntemi veya "zaman alanı" analizi gibi titiz hesaplama teknikleri de uygulamalarda kullanılmaktadır. IEC 60909 standardı ise daha basit

"eşdeğer kaynak" tekniğini önermektedir. Şekil 3.1'de gösterilen "eşdeğer kaynak" tekniği, kısa devre konumundaki ağın sadece bir kaynağın tetikleyici olduğunu varsayarken, diğer tüm katkıda bulunan kaynaklar pasif hale getirilmektedir.



Şekil 3.1 Arızadurumundaki "eşdeğer kaynak" (IEEE Std 551-2006)

Açık devre sekans gösterimi ile simetrik bileşenlerin yöntemi, kısa devre akımlarını hesaplamak için, hata yerindeki eşdeğer gerilim kaynağı ile birlikte kullanılır. Diğer tüm mevcut kaynaklar pasif olarak kabul edildiğinden, şebeke besleyicileri (yardımcı bağlantı noktaları), senkron, asenkron makineler ve rejeneratif SCR sürücüleri eşdeğer iç empedansları ile temsil edilir. Eşdeğer voltaj kaynağının büyüklüğü, hata konumundaki voltaj faktörü C'nin ürünü ve nominal sistem hat-toprak gerilimi olarak hesaplanır. Sistem şöntleri (hat / kablo kapasitansları, şönt kapasitörleri, şönt indüktörler) ve statik yükler pozitif ve negatif dizi ağlarında göz ardı edilir. Bununla birlikte, IEC 60909-0, sistemin nötrü sağlam bir şekilde topraklanmadıysa, sıfır sekanslı şebekeye hat kapasitanslarının dahil edilmesini önerir. Sistem nötrü sağlam bir şekilde topraklanırsa, sıfır sekanslı sistem şöntlerinin ihmal edilmesi tutucu sonuçlara yol açar ve dikkate alınması gerekli değildir. Üç fazlı iletim hatlarının ve kabloların, simetrik bileşenlerin kullanımını haklı çıkarmak için, arada bir bağlantı olmadan, dengede olduğu varsayılmaktadır. Sekans şebekeleri, sonraki hesaplamalar için hata konumundaki eşdeğer empedanslara indirgenir. Dönmeyen ekipman için sekans empedansları pozitif olarak eşit kabul edilir. Negatif sekanslar ve transformatörler, genel olarak, ana konumdaki bağlantı uçlarına karşılık gelmektedir.

Potansiyel arıza akımının AC bileşenin zamanla azalmasının modellenmesinde IEC 60909-0: 2001 "generatörden uzakta" kısa devreler ile "generatörün yanında" kısa

devreler arasında ayrım yapar. Tepe kısa devre akımlarının hesaplanmasında ve DC akım bileşeninin azalmasının modellenmesinde, standart, hata akımının hataya “gözlü, ağ şebeke” veya “gözlü olmayan” sistemlerden kaynaklanıp kaynaklanmadığını kontrol eder. Kararlı durum hata akımlarını hesaplarken, IEC 60909, senkronize makinelerin uyarılma sistemlerinin (özel şartlar altında senkron motorlar dahil) dikkate alınmasının gerekli olabileceğini önermektedir. Bu hususların hepsi önemlidir ve belirli hesaplama tekniklerini kapsamaktadır.

Generatörden uzak kısa devre hatası: Potansiyel arıza akımının simetrik AC bileşeninin büyüklüğü zamanla esasen sabit kaldığında, kısa devre "generatörden uzak" olarak kabul edilir. Bu durum, sabit iç gerilimler sergileyen katkıda bulunan kaynakları algılayarak sezgisel olarak görselleştirilebilir; Başka bir deyişle, “generatörden uzakta olmayan” kısa devreler, herhangi bir şekilde AC azalmasına sahip olmadığı varsayılan kaynaklardan beslenen kısa devrelerdir. Bununla birlikte, arıza akımı, kesici açtırması gerekliliklerini ve kısa devre akımlarının potansiyel olarak zarar verebilecek mekanik etkilerini değerlendirmek için dikkate alınan bir periyodik olmayan DC içerebilir.

Generatöre yakın kısa devre hatası: Potansiyel arıza akımının simetrik AC bileşeninin büyüklüğü zamanla azaldığında kısa bir devrenin “generatöre yakın” olduğu kabul edilir. Bu durum, katkıda bulunan kaynakların sürekliliğini sağlayan iç gerilimleri sabitlerken algılanabilir. Kaynak empedansları ise hatanın başlangıcında, zamanla büyük bir artış gösterir. Kısa devre, IEC 909: 1988 tarafından, eğer en az bir senkron makine nominal akımının iki katını aşan bir akıma katkıda bulunursa veya senkron ve asenkron motorlar, herhangi motorlar IEC 909: 1988 dikkate alınmadan hesaplanan ilk kısa devre akımının % 5'inden daha fazla katkıda bulunursa, generatöre yakın olarak kabul edilir. “Yakın generatör” arızaları için ek hususlar, generatörler ve bunlara eşlik eden trafolar (varsa) için empedans düzeltme faktörlerini içerir. Generatörün yakınındaki arızalar için, kararlı durum arıza akımı normalde, kırılma akımından daha küçük bir büyüklüğe sahip olacaktır. Bu durum başlangıçtaki arıza akımından daha küçük bir büyüklük demektir. Generatör yakınındaki arıza akımları, başlangıç değerinden sıfıra düşen periyodik olmayan bir DC bileşen içerebilir. Bu periyodik olmayan bileşenin, kesici açmasına neden olan şartlarını ve kısa devre akımlarının potansiyel olarak zarar verici mekanik etkilerini değerlendirmek için dikkate alınması gerekecektir.

3.2 Yük Akışı Analizi

Yük akışı çalışmasının amacı, ekipmanın kapasitesini ve mevcut üretim için tesisin toplam yük dağıtım kapasitesini incelemektir. Bu analiz ile sistemdeki bara gerilimleri ile birlikte diğer elektrik donanımlarının yüklenmeleri hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlamaktadır. Şebeke trafo, kablo vb. şubelerin farklı yükleme koşulları için gerilim sınırı, güç faktörü ve şebekenin ısıl davranışı analiz edilir. Transformatörlerin kesilmesi gibi olası durumlarda dahi tatmin edici bir sistemin çalışmasını sağlar. İletim ve dağıtım sisteminin nominal koşullarda işletilmesiyle beraber, ayrıca çalışmanın raporları, tesisin gelecekteki genişlemesi için temel kılavuzlar sunmaktadır. Yük akış analizi:

a. Tüm baralar için döner baraya göre bara gerilimi ve faz açısı, MW ve MVAR'da üretim, MW ve MVAR'da yükleme, MVAR telafisi.
b. Tüm generatörler için generatör reaktif güç çıkışı.
c. MW, MVAR'da hat akışı ve hat kaybı ve hattın yüzde yüklenmesi.
d. Kabloların aşırı yüklenmesi ve gerilim baralarının aşırı/düşük olması gibi anormal çalışma koşulları.
e. Güç Özeti, Sistem Yükü, bara reaktörü girişi, bara kapasitör çıkışı, hat şarjı, iletim sistemi kayıpları hakkında bize bilgi sağlamaktadır.

Yük akışı hesaplama yöntemleri, farklı yük akış hesaplama yöntemlerinin formülasyonlarını gösterir. Yakınsama oranları ile ilgili karşılaştırmalar, farklı sistem parametrelerine ve yapılandırmalarına dayanarak yakınsamaların iyileştirilmesi ve uygun bir hesaplama yöntemi seçilmesine ilişkin bazı fikirler vermektedir. Güç sistemlerinde yük akışı analizi için çeşitli metotlar kullanılmıştır. Gauss-Seidel, Newton-Raphson ve Fast Decoupled en çok tercih edilen metotlardır. Yük akışı analizi için her bir k barasındaki aktif güç (Pk), reaktif güç (Qk), gerilim genliği (Vk) ve faz açısı (δk) değişkenlerini bilinmelidir. Kurulan denklermerle elimizdeki herhangi iki değişken belli ise, diğer parametrelerin hesabı yapılmaktadır. Ayrıca, bir güç sisteminde kullanılan baralar yük barası (P-Q), üretim barası (P-V) ve salınım barası olarak sınıflandırılır [37]. Yük baralarında güç sisteminden çekilen aktif ve reaktif güçler bilinirken gerilim genliği ve faz açısı hesaplanır. Üretim baralarında aktif güç ve gerilim genliği bilinirken reaktif güç üretiminde sınırlamalar bulunur. Salınım baralarında ise

gerilim genliği ve faz açısı değerleri bilinirken aktif ve reaktif güçlerin bulunması gerekir [38].

3.2.1 Gauss-Siedel Metodu

Bu metot, *n* baralı bir güç sisteminde hesaplanan yeni bara gerilimleri ile bir önceki iterasyonda bulunan bara gerilimleri arasındaki farkın, kullanıcı tarafından belirlenen hata değerinden küçük olduğunda hesaplamanın sonlandırılması esasına dayanır [39]. Gauss-Seidel metodunda bara başlangıç gerilim değerleri, Newton-Raphson metodu ve Fast-Decoupled metoduna göre daha düşük gereksinimlerine sahiptir. Baradaki aktif ve reaktif güç uyumsuzluğunu yakınsama ölçütü olarak kullanmak yerine, çözüm hassasiyetini kontrol etmek için ardışık iki yineleme arasındaki bara gerilim büyüklüğü toleransını kontrol etmektedir.

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}}\left[\frac{P_i - J\,Q_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k\neq i}}^{n} Y_{ik}\,V_k\right], i = 1,2,\dots,n \qquad (3.1)$$

Eşitlik (2)'de Ii bara akımını, Pi bara aktif gücünü, Qi bara reaktif gücünü ve $V_i^* i$ barasına karşılık gelen son hesaplanan gerilim değeri ifade etmektedir. Vi bara gerilimini, Yii baraların özadmintansı, Yik, i ve k baraları arası admintansı ve Vk ilgili bara için en son hesaplanan gerilim değerini veya ilgili bara için herhangi bir iterasyon yapılmamışsa tahmini gerilimi ifade etmektedir [40] .

3.2.2 Newton-Raphson Metodu

Newton-Raphson yöntemi, aşağıdaki yük akış denklemini yinelemeli olarak formüle eder ve çözer:

$$\begin{bmatrix}\Delta P \\ \Delta Q\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\delta \\ \Delta|V|\end{bmatrix} \qquad (3.2)$$

Eşitlik 3'te, Jacobian matrisi (J_1… J_4) aktif ve reaktif güç değerlerindeki değişimler (ΔP, ΔQ) ile gerilim-açı ($\Delta\delta$, $\Delta|V|$) arasındaki değişimleri göstermektedir.

Newton-Raphson yöntemi benzersiz bir ikinci dereceden yakınsaklık karakteristiğine sahiptir. Diğer yük akış hesaplama yöntemleriyle karşılaştırıldığında genellikle çok hızlı bir yakınsama hızına sahiptir. Aynı zamanda, veri yolu gerçek gücü ve reaktif güç

uyumsuzluklarının birleşmesini sağlamak için yakınsama ölçütlerinin belirlenmesi avantajına sahiptir. Bu kıstas, yük akışı çözümü için belirtmek istenilen doğruluğun doğrudan kontrolünü sağlar. ETAP yazılımında Newton-Raphson yöntemi için yakınsama kıstasları tipik olarak 0.001 MW ve MVar olarak ayarlanmıştır.

Newton-Raphson yöntemi bara gerilimi başlangıç değerlerine büyük ölçüde bağlıdır. Bara gerilimi başlangıç değerlerinin dikkatlice seçilmelidir. Newton-Raphson yönteminin bir sistemde ilk seçenek olarak tercih edilmesini sağlayan avantajları bulunmaktadır [41].

3.2.3 Fast-Decoupled Metodu

Fast-Decoupled metodu Newton-Raphson metodundan türetilmiştir. Jacobian matrisinde reaktif gücün faz açısına bağlılığı (J_3) ve aktif gücün gerilime bağlılığı (J_2) ihmal edilerek yük akışı analizlerinin yapılması esasına dayanmaktadır. Bara geriliminin büyüklüğündeki küçük bir değişikliğin bara üzerindeki aktif gücü önemli ölçüde değiştirmemektedir. Benzer şekilde, bara geriliminin faz açısındaki küçük bir değişiklik için, reaktif güç önemli ölçüde değişmez. Böylece Newton-Raphson yönteminden gelen yük akış denklemi yinelenerek çözülebilen iki ayrı yük akış denklemi grubuna basitleştirilebilir:

$$J_1(i)\Delta\delta(i) = \Delta P(i) \tag{3.3}$$

$$J_4(i)\Delta V(i) = \Delta Q(i) \tag{3.4}$$

Her ne kadar sabit bir yineleme için Newton-Raphson yöntemi kadar doğru olmasa da, bilgisayar zamanındaki tasarruf ve daha uygun yakınsama kıstasları çok iyi bir genel performans sağlamaktadır. Genel olarak, Fast-Decoupled yöntemi, Newton-Raphson yöntemine bir alternatif olarak kullanılabilir. Uzun radyal sistemler, uzun iletim hatlarına veya kablolara sahip sistemler ile çalışırken Newton-Raphson yöntemi ile hesaplamaların sağlamasının yapılmasında fayda vardır.

3.2.4 Bara Tipleri

Enerji iletim sistemlerinde her bir baranın özellikleri, dört parametre bulunmaktadır. Bu parametreler; aktif güç (P), reaktif güç (Q), gerilim açısı (faz açısı) değeri (δ), gerilim

büyüklüğü (genlik) (V)'dir. Sistemin frekansı sabit ve gerilimi kararlı durum kabullerine göre baraları üç şekilde başlıklandırırız.

3.2.4.1 Salınım (Slack) Barası

Şebekedeki tüm santrallerin aktif üretimlerini tamamen bilmek mümkün değildir. Çünkü hat kayıpları bilinmemektedir. Bu nedenle aktif bara güçlerinden birini bilinmeyen yaparak, bunu çözümün sonunda elde etmek gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle, iletim hatlarındaki kayıp güçler nedeniyle, Şebekedeki bütün santrallerin aktif güç üretim miktarları, sistemdeki baralardan birinde aktif güç bilinmeyen seçilerek, çözümün sonunda elde edilebilmektedir. Bu nedenle generatör baralarından birinde aktif güç bilinmeyen seçilir ki, bu baraya "salınım barası", diğer bir deyişle "referans bara" denilir. Yük akışı analizlerinde salınım barası geriliminin genliği ve faz açısı değerleri girilir. Yani bu barada, V ve δ bilinen değerlerdir. Salınım barasının aktif ve reaktif güçleri ise değişkendirler ve hesaplanmaları gerekir.

Bununla birlikte, salınım barasının üretim baralarından biri olması zorunlu değildir. Salınım barasının seçimi bazen problemin çözümünde yakınsaklaşmayı etkileyebilir. Genellikle salınım barası sistemin elektriksel olarak merkezinde ya da çok sayıda hattın bağlı olduğu baraların arasından seçilir. Tabii bu kurallar tamamen deneyseldir. Salınım barasının aktif gücü değiĢkendir, bu gücün değeri de diğer santrallerin aktif üretimi ile aktif yükler ve kayıpların toplamı arasındaki fark kadardır. Şebeke baralarına numara verilirken salınım barasına numara vermek ve bu baradaki gerilimi diğer gerilimlerin faz referansı olarak almak faydalı olacaktır. Salınım barasının seçimi, gerilim kararlılığının analizinde önemlidir. Salınım baraları arasındaki güç farklılıklarının kritik değerlerde daha fazla bir değişime neden olduğu, eşit güçlü salınım baralarının ise kritik değerlere etkisinin daha az olduğu tespit edilmiştir. Güç farklılıkları arttıkça kritik değerlerdeki değişmelerin daha fazla olması beklenmelidir. Bu nedenle gerilim kararlılığı analizlerinde kritik noktaların tayininde, seçilecek salınım barası etkilerinin de göze alınması gerekmektedir.

3.2.4.2 Yük Barası

Yük barası P-Q barası olarak da adlandırılmakta olup, P ve Q bilinen, V ve δ ise bulunması gereken değişkenlerdir. Buradaki P+jQ gücü, fiziksel güç sistemlerinde bir

Çehir veya sanayi bölgesi gibi yük merkezlerine karşılık gelir. Bara gerilimlerindeki küçük değişikliklerin, P ve Q güçlerinin değerlerini etkilemediği varsayılır.

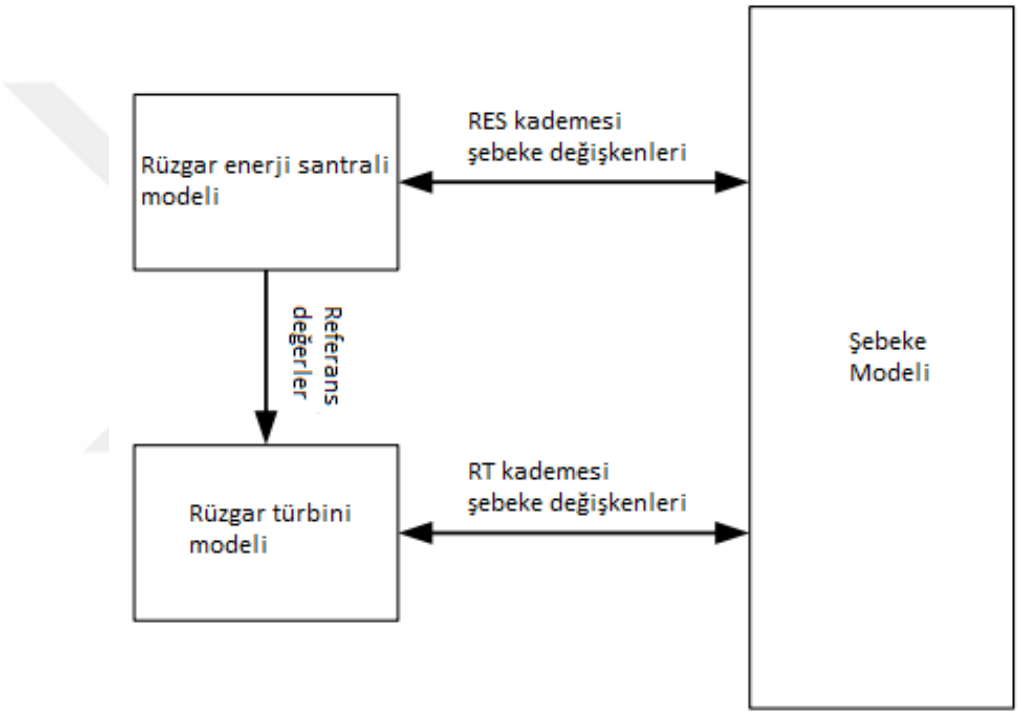
3.2.4.3 Gerilim Kontrollü Bara veya Generatör Barası

Bu tip baralarda P ve V bilinen değerler olup; generatör, statik kapasitör vb sistem elemanlarının bağlı olduğu bu baradaki reaktif güç limitleri ile gerilim sabit tutulabilir. Diğer bir deyişle, bu barada toplam P aktif gücü bilinmekte olup, V gerilim genliği de reaktif güç verilmesi ile belli bir değerde korunmaktadır. Bu bara tipi, genelde bir generatöre karşılık gelir. Yardımcı santrallerde, statik paralel kapasitörlerden ya da senkron kompansatörlerden reaktif güç beslemesi ile gerilimin sabit olduğu baradır.

4
SİMÜLASYON ve METODOLOJİ

4.1 Şebeke Modellerinin İncelenmesi

IEC 61400 – 27 normuna göre rüzgâr enerji sistemlerinin şebeke modellemesinde takip edilecek arayüz Şekil 4.1 gibidir.



Şekil 4.1 Türbin, santral kontrol ve şebeke modelleri arasındaki arayüz (IEC 61400-27)

IEEE 14 baralı test sistemi ile iki farklı şebeke modeli oluşturulmuştur. 1. Şebeke modeli rüzgâr türbinlerinin farklı üretim verileri göz önüne alınmıştır. Farklı baralara entegrasyonu yapılan 10 adet türbinin dağıtım şebekesi için yük akış analizi incelenmektedir. 2. Şebeke modelinde aynı rüzgâr türbinleri kullanılarak, endüstriyel şebeke sisteminin dağıtım barasına bağlantısı gerçekleştirilmiştir. 2. modelde ön şebeke modeli kullanılarak yük akış analizi ile birlikte kısa devre analizi de yapılmıştır.

1. Şebeke Modeli: Simülasyonda 4 farklı senaryo tasarlandı. Bunlar yaz ve kış aylarındaki yüklerin; santralin tam kapasite ve minimum kapasitedeki çalışmasının

ortalama rüzgâr hızı verileriyle oluşturulan üretimleridir. Senaryolarda benzetimini gerçekleştirilen şebekenin yük akış analizi ile baraların yüklenmelerini, güç akış yollarını, gerilim düşümü-yükselmesi durumlarını ve elektriksel kayıpları izleme olanağı sağlanmıştır. Sistemi kararlı işletebilmek, muhtemel arızaları öngörebilmek için maksimum ve minimum durumlara ağırlık verilmiştir. Bu senaryolar ile şebekenin yük akışı analizinde kapsamlı araştırma imkânı sunulmaktadır. Her biri 2 MW olan 10 adet rüzgâr türbininin bulunduğu toplam 20 MW gücündeki bir santralin farklı baralarda bağlantıları mevcuttur. IEEE 14 baralı test sistemine entegrasyon iletim hatları ve yükseltici, indirici transformatörler vasıtasıyla yapılmıştır. Bu bilgilerle, voltaj aralıkları ve azami yükler tarafından öngörülen çalışma sınırlamalarına uyum incelenmektedir. Ayrıca, yük akışı ve voltaj kararlılığı analizleri her zaman uygun bir kurulum, kararlı ve güvenilir çalışma ve bir santralin koruyucu şema ayarları için gerekmektedir.

2. Şebeke Modeli: Çanakkale OSB hattına ait elektrik dağıtım şebekesinde, OSB barasındaki yük akışı ve kısa devre analizi yapılmaktadır. İşletme koşullarını incelemek ve arıza akımlarını gözlemlemek amacıyla IEEE 14 baralı test sistemi kullanılmıştır. Test sistemi, çalışma yapılan bölgedeki elektrik dağıtım yapısının şebeke modeli olarak düşünülmüştür. IEEE 14-baralı test sistemine ait parametreler aynı şekilde kullanılmıştır [42]. Bu tasarımla, iki farklı senaryo kurgusu yapılmıştır: Senaryo 1 (S1) OSB barasına RES bağlı değilken ve senaryo 2 (S2) RES bağlandıktan sonra. Bu senaryolara göre yük akışı ve kısa devre analizleri simülasyonu yapılmıştır. Endüstriyel sistemlerin kendi içindeki şebeke yapıları, dağıtım şebeke yapılarından farklılık göstermektedir. Çok sayıda elektrik motorunun çalıştığı ve bunların düşük gerilimlere sebebiyet verebileceği işletme şartları bulunmaktadır. Yük akışı ve kısa devre analizleriyle, endüstriyel sistemlerin kurulum öncesinde ve işletme esnasında karşılaşacağı sorunlar çözülebilir. Yapılacak projelerde, bu sonuçlar göz önünde bulundurulabilir. Ayrıca, endüstriyel şebeke korumasının önündeki zorluklar değerlendirilip; karmaşık yapıda koruma sistemlerinin uygulanmasına ön hazırlık oluşturulabilir. Sistemi kararlı işletebilmek, muhtemel arızaları öngörebilmek için yük akışı analizi uygulanmıştır. Yük akışı analizi yapılırken sistemin düşük gerilimde çalışan ve belirtilen düşük gerilim limitini ihlal eden zayıf yük baraları tanımlanmıştır. Benzer şekilde, bara gerilimleri için aşırı gerilim limiti de belirtilmiştir. Bu sonuçlar tesis işletmesine yardımcı olmaktadır [43]. Sistemde meydana gelebilecek arıza akımlarını güvenli şekilde temizleyebilmek için elektrik

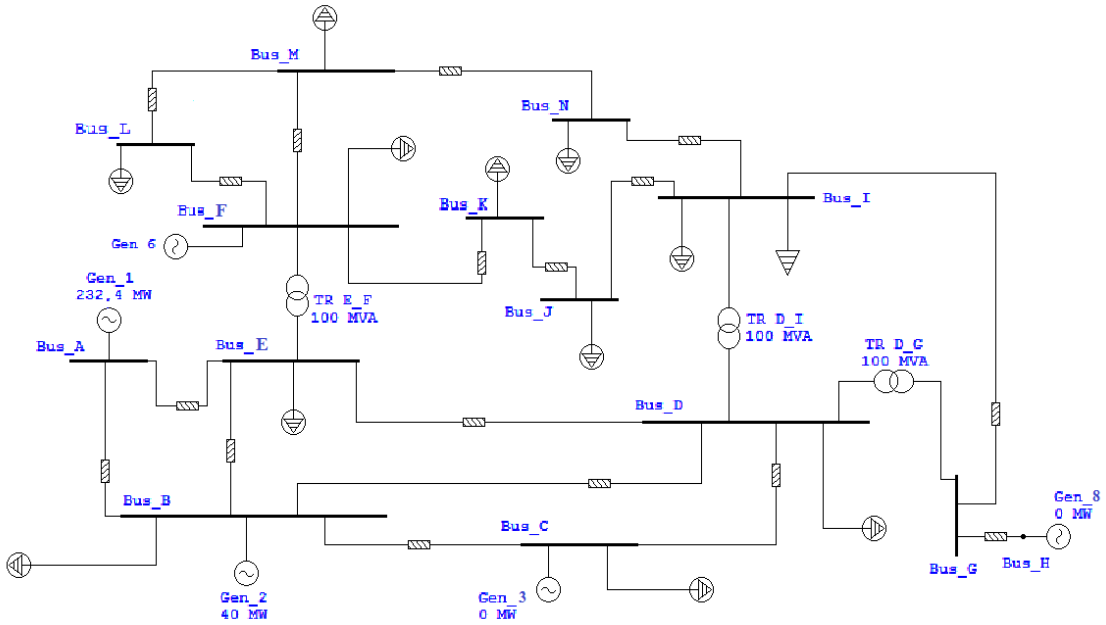
şebekesinin kısa devre analizi yapılmaktadır. Çünkü, entegre edilen sistemin kararlı olması yeterli değildir. Simülasyon ile kısa devre arızalarının, güç sisteminin davranışlarında oluşturduğu etkiler tespit edilmelidir. Böylece muhtemel hatalar önceden fark edilmektedir [44]. Bununla birlikte, kısa devre arızaları şebekede telafisi mümkün olmayan hasarlara neden olmaktadır. Rüzgâr gücünden elektrik üretilen bir şebekedeki kısa devre arızalarından ötürü, sistem çökmeye (blackout) gidebilmektedir [17].

ETAP Kısa Devre Analizi programı, üç faz, faz-nötr, faz-faz ve iki faz-toprak hatalarının elektrik dağıtım sistemindeki etkisini değerlendirir. Yazılım, toplam kısa devre akımlarını, bireysel motorların, generatörlerin ve kullanım bağlarının katkısı ile birlikte hesaplar. Kısa devre akımı için kaynak empedansı ve şebekenin anma gerilimi gereklidir. Şebekenin anma gerilimi, üç fazlı kısa devre görünür gücü (MVAsc), X / R oranı ve tek fazlı kısa devre görünür gücü, X/R oranı ETAP'ta şebeke modellemesi için gereklidir. Bu bilgi şebeke sisteminden gerçek değer verisi olarak alınır. Mevcut maksimum arıza akımını hesaplamak için maksimum değer, mevcut minimum arıza akımını hesaplamak için minimum değer kullanılacaktır. Maksimum değerin veya minimum değerin seçilmesi, konfigürasyon durumu kullanılarak yapılır. ETAP kaynak empedansını (pozitif, negatif ve sıfır dizi empedansı) bu değerlerden hesaplar.

ETAP yük akışı analiz modülü, bara gerilimi, akım, güç faktörü ve tesis ağının tüm şubelerinin güç akışları gibi benzetilmiş bilgiler sağlar. Ayrıca, teknik özelliklerin bütünlüğünü koruduğu gözlenen herhangi bir aşırı yük veya yük uyuşmazlığı varsa uyarı verip raporlamaktadır.

4.2.1 IEEE 14 Baralı Test Sistemi

Kullanılan IEEE 14 baralı test siteminin tek hat şeması Şekil 1'deki gibidir. Sisteme ait yük parametreleri Tablo 1 referans alınarak simülasyonda kullanılmıştır.



Şekil 4.2 IEEE 14 baralı test sistemi

Tablo 4.1 IEEE 14 baralı test sistemi yükleri

Yükler	Bağlı Olduğu Bara	Güç (MVA)	Aktif Yük (MW)	Reaktif Yük (MVAr)
Load_2	Bus_B	25,143	21,7	12,7
Load_3	Bus_C	96,097	94,2	19
Load_4	Bus_D	47,959	47,8	-3,9
Load_5	Bus_E	7,767	7,6	1,6
Load_6	Bus_F	13,479	11,2	7,5
Load_9	Bus_I	33,85	29,5	16,6
Load_10	Bus_J	10,77	9	5,8
Load_11	Bus_K	3,936	3,5	1,8
Load_12	Bus_L	6,306	6,1	1,6

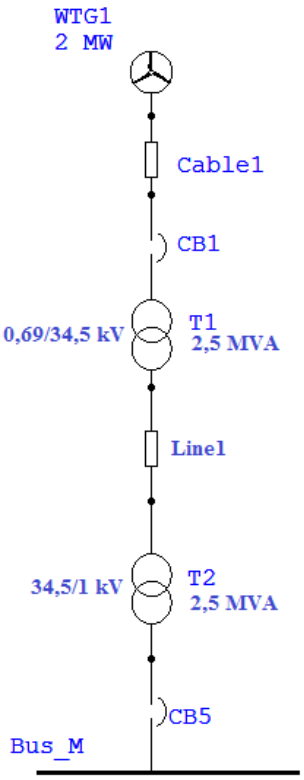
Tablo 4.1 IEEE 14 baralı test sistemi yükleri (devamı)

Load_13	Bus_M	14,693	13,5	5,8
Load_14	Bus_N	15,717	14,9	5
BusShunt_9	Bus_I	19	0,002	-19

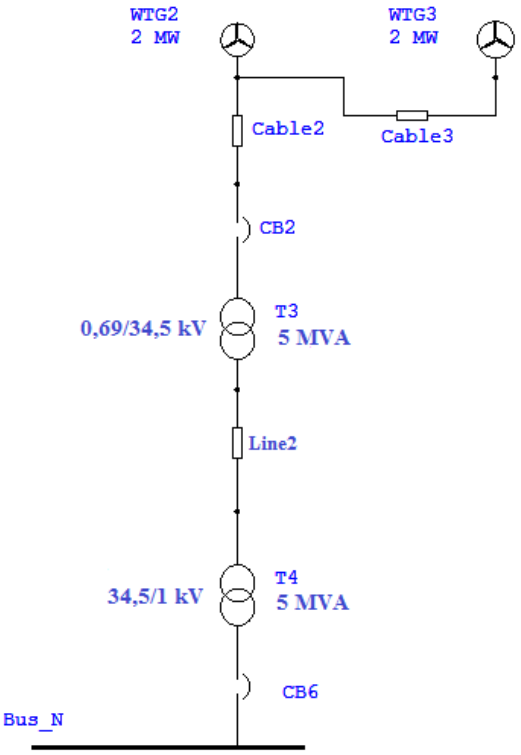
4.2 Rüzgâr Enerji Santralinin Şebekeye Entegresi

Rüzgâr gücünün güç sistemlerine entegrasyonu ile ilgili zorluklara genel bir bakış sunmaktadır. Rüzgâr enerjisi penetrasyon seviyelerinden bağımsız olarak güç sistemi çalışmasının genel amacı, tüketicilere kabul edilebilir bir gerilim sağlamak ve üretim ile tüketimi dengelemeye devam etmektir. Ayrıca, güç sistemi, rüzgâr gücüne nüfuz etmekten bağımsız olarak kabul edilebilir bir güvenilirlik seviyesine sahip olmalıdır. Bu nedenle, rüzgâr gücünün gerilim kontrolü ve genel sistem dengesi üzerindeki etkisini incelenmektedir.

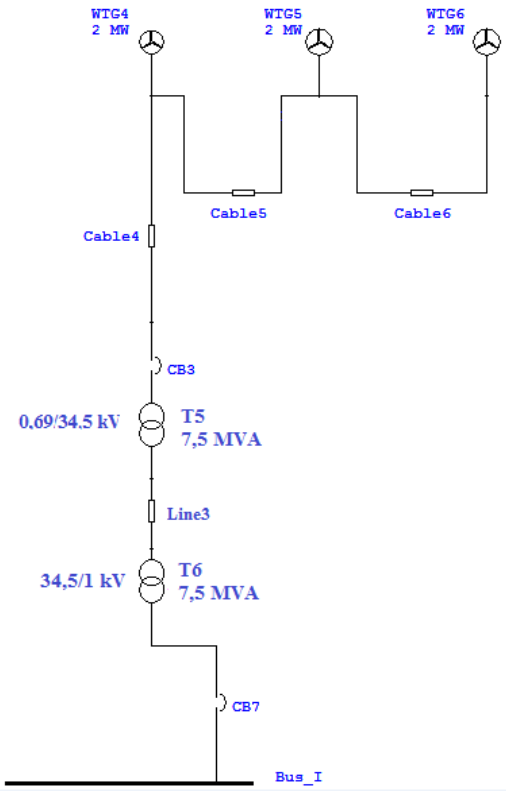
1. şebeke modelinde, rüzgâr Türbinleri kablo ile 0,69/34,5 kV yükseltici transformatöre bağlandı. Transformatörden çıkan güç 13 km uzunluğundaki havai hat ile 34,5/1 kV indirici transformatöre taşındı. İndirici transformatörün sekonderindeki alçak gerilim devre kesici ile sistemdeki baraya entegrasyonu tamamlandı. Bakır kablo ve çelik özlü alüminyum havai hat kesitlerinin seçimi, gerilim düşümü hesabı ve maksimum akım taşıma kapasite hesabına göre yapıldı (Öznur kablo Prysimian Kablo). Yükseltici ve indirici transformatör güçleri trafo güç hesabıyla belirlendi. Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6'da rüzgâr türbininin baraya bağlantısının tek hat şemaları bulunmaktadır. Tablo 2'de devre kesicinin anahtarlama durumlarına göre maksimum ve minimum kapasiteler oluşturulmuştur.



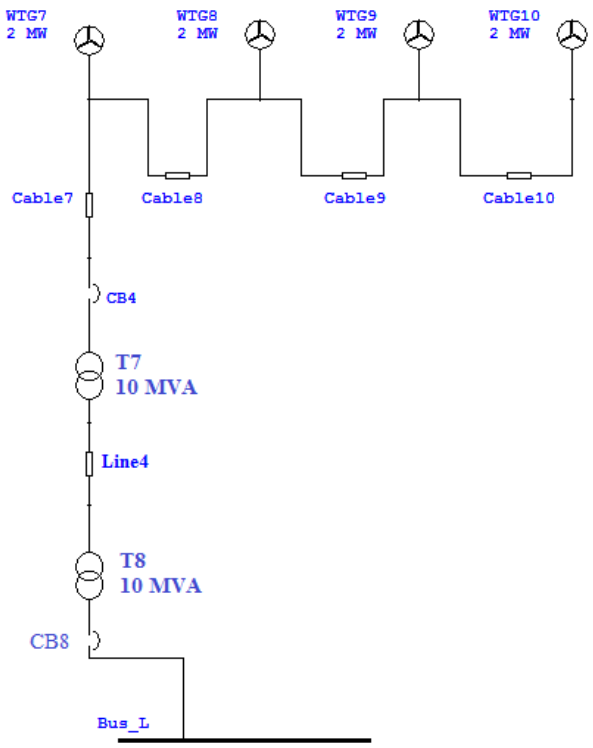
Şekil 4.3 1. Şebeke modeli WTG1 rüzgâr türbini tek hat şeması



Şekil 4.4 1. Şebeke modeli WTG2-WTG3 rüzgâr türbini tek hat şeması



Şekil 4.5 1. Şebeke modeli WTG4-WTG5-WTG6 rüzgâr türbini tek hat şeması

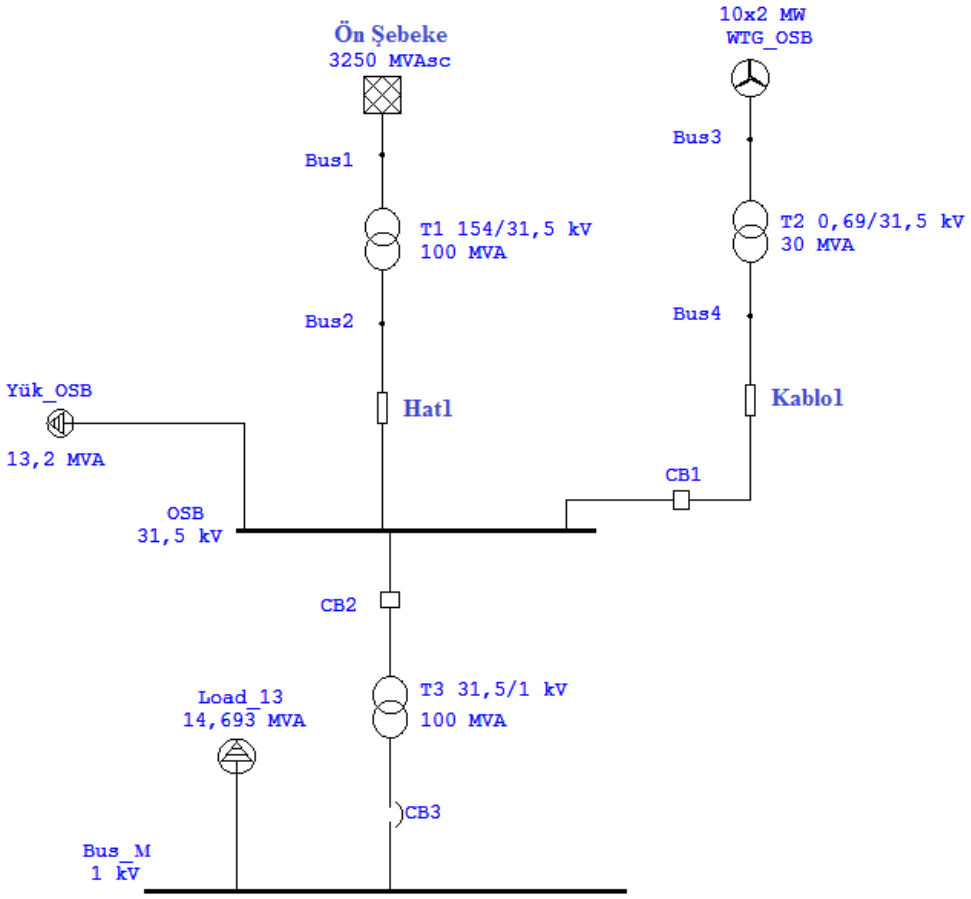


Şekil 4.6 1. Şebeke modeli WTG7-WTG8-WTG9-WTG10 rüzgâr türbini tek hat şeması

Tablo 4.2 1. Şebeke modeli devre kesici anahtarlama konumları

Devre Kesici	Tam Kapasite (20 MW)	Minimum Kapasite (2 MW)
CB1	Kapalı	Kapalı
CB2	Kapalı	Kapalı
CB3	Kapalı	Kapalı
CB4	Kapalı	Kapalı
CB5	Kapalı	Kapalı
CB6	Kapalı	Açık
CB7	Kapalı	Açık
CB8	Kapalı	Açık

2. şebeke modelinde, Sanayi bölgesinin, elektrik şebekesinin tasarımı yapılarak Bus_M barasıyla bağlantısı yapılmıştır. Tasarımda TEİAŞ'ın 154 kV Çanakkale trafo merkezinden 100 MVA gücünde 154/31,5 kV indirici trafosundan OSB'ye ait bir çıkış barası beslenmektedir. İletilen güç, 6 km'lik 477 MCM iletim hattıyla OSB barasına ulaşmaktadır. OSB'nin tatbikat projesindeki toplam kurulu gücü 13,2 MVA'dır. Mevcut işletmesi yapılan bu şebekeye OSB barasından bağlanacak toplam 20 MW kurulu güce sahip 10 adet, her biri 2 MW olan; rüzgâr türbininden oluşan RES entegrasyonu planlanılmıştır. Türbinin, baraya bağlantı şekli olarak tek baralı seçenek kullanılmıştır [22]. Şekil 4.4'te tasarımın tek hat şeması mevcuttur.



Şekil 4.7 2. Şebeke modeli OSB tek hat şeması

Senaryolara göre devre kesicilerin anahtarlama konumları aşağıdaki Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3 2. Şebeke modeli devre kesici anahtarlama konumları

Devre Kesici	**S1**	**S2**
CB1	Açık	Kapalı
CB2	Kapalı	Kapalı
CB3	Kapalı	Kapalı

4.2.1 Sistem Bileşenleri

1. şebeke modeli için, santralin tam kapasite ve minimum kapasite durumunda, kış ve yaz ayı yüklenmelerine ait senaryolar bulunmaktadır. Kullanılan her bir türbin için yıllık ortalama rüzgâr hızı bilgileri gerçek zamanlı tasarlandı. Rüzgâr santrallerine ait 10'ar dakikalık periyotlarla ortalama rüzgâr hızı ölçüm verilerinin aylık bazda ortalaması hesaplandı. Bu verilerin kış ve yaz mevsimleri için olan aralık, ocak şubat ve haziran, temmuz, ağustos rüzgâr hızı ortalamaları çıkarıldı. Ayrıca rüzgâr türbinlerinin bir, iki, üç ve dörtlü olarak bara bağlantıları gerçekleştirildi. Sitemdeki yüklerin gücü sürekli çalışma modunda tasarlandı. Senaryolarda yaz yükü kategorisi için %100 yüklenme, kış yükü kategorisi için %80 yüklenme olduğu varsayılmıştır.Bu bilgiler Tablo 4.3'te gösterilmektedir.

Tablo 4.4 1. Şebeke modeli ortalama rüzgâr hızları ve türbin bağlantı baraları

Ad	Kış (m/s)	Yaz (m/s)	Bağlantı Barası
WTG1	6,5	4,7	Bus_M
WTG2	7,4	5,4	Bus_N
WTG3	6,1	4,5	
WTG4	5,7	4,3	Bus_I
WTG5	7	5,5	
WTG6	7,1	5,5	
WTG7	5,7	4,5	Bus_L
WTG8	6	4,7	
WTG9	6,7	5	
WTG10	6,8	5	

Tek hat şemasındaki havai hat ve kabloları Tablo 4.4'te düzenlenmiştir. Havai hat Pirelli (Prysmian) kablo kataloğundaki 262 mm² kesitli "DARTS" a karşılık gelmektedir. Kabloların kesiti ise yazılım programının kendi veritabanından seçilmiştir.

Tablo 4.5 1. Şebeke modeli kablo ve havai hat parametreleri

Kablo	**kV**	**Faz başına iletken adedi**	**Kesit (mm²)**	**Uzunluk (m)**	**Cinsi**	**Yalıtım Maddesi**
Cable1	1	3	240	150	Cu	XLPE
Cable2	1	5	300	150	Cu	XLPE
Cable3	1	3	240	250	Cu	XLPE
Cable4	1	7	400	150	Cu	XLPE
Cable5	1	5	300	250	Cu	XLPE
Cable6	1	3	240	250	Cu	XLPE
Cable7	1	8	400	150	Cu	XLPE
Cable8	1	7	400	250	Cu	XLPE
Cable9	1	5	300	250	Cu	XLPE
Cable10	1	3	240	250	Cu	XLPE
Line1	36	1	262	13000	ACSR	Havai
Line2	36	1	262	13000	ACSR	Havai
Line3	36	1	262	13000	ACSR	Havai
Line4	36	1	262	13000	ACSR	Havai

2. şebeke modeli için, OSB barasının şebeke analizleri üzerinde durulmaktadır. OSB yüklerinin toplamı tek bir yükmüş gibi baradan bir çıkış alınarak gösterilmiştir. OSB'ye ait yük parametreleri Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.6 2. Şebeke modeli OSB yük parametreleri

Yük	Bağlantı Barası	Güç (MVA)	Motor Yük (%80)		Statik Yük (%20)	
			(MW)	(MVAr)	(MW)	(MVAr)
Yük_OSB	OSB	13,2	8,976	5,563	2,244	1,391

İletim hattı Hat1, mevcut şebekede kullanılan iletken, yazılımda yer almadığı için en yakın eşdeğeri olan bir iletken seçimi yapılmıştır. Ayrıca RES için kullanılan Kablo1 mesafesi tahmini olarak 500m seçilmiştir. Bu uzunluk, OSB barasına yakın olması amaçlanarak seçilmiştir. Elektrik hatlarının özellikleri Tablo 4.6'da gösterilmiştir. Hat1 ve Kablo1 seçiminde, maksimum akım taşıma kapasitesi göz önüne alınarak; gerilim düşümü ve kesit hesabı yapılmıştır.

Tablo 4.7 2. Şebeke modeli 3 fazlı kablo ve iletim hattı parametreleri

Kablo	kV	Faz başına iletken adedi	Kesit (mm^2)	Uzunluk (m)	Cinsi	Yalıtım Maddesi
Kablo1	33	1	3x400	500	Cu	XLPE
Hat1	36	1	3x356	6000	ACSR	Havai

4.2.2 Rüzgâr Türbini Verileri

RES için rüzgâr türbin modeli seçilmiştir. Tablo 4.7'de türbin modeli bilgileri mevcuttur.

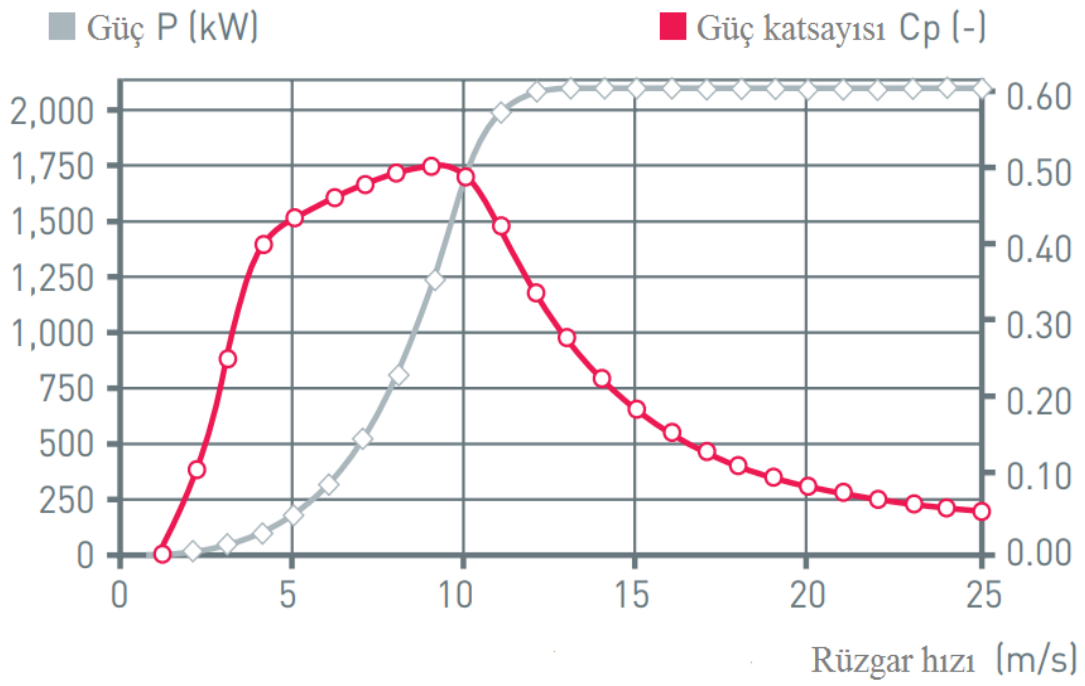
Tablo 4.8 Rüzgâr türbini parametreleri

Model	Enercon E-82 E2
Güç (kW)	2000

Tablo 4.8 Rüzgâr türbini parametreleri (devamı)

Rotor çapı (m)	82
Kule Yüksekliği (m)	78
Rotorun taradığı alan (m^2)	5281
Hava Yoğunluğu (kg/m^3)	1225
Generatör Gerilimi (V)	690
Kesme Rüzgâr Hızı (m/s)	2
Anma Rüzgâr hızı (m/s)	12
Boşalma Rüzgâr Hızı (m/s)	28
Güç Faktörü (%)	85

1. şebeke modelinde rüzgâr türbinlerine ait ortalama rüzgâr hızları tablo gösterilmiştir 2. şebeke modelinde türbinlerin ortalama bir rüzgâr hızı verisine göre üretim kapasitesi belirlenmiştir. Rüzgâr hızı, Çanakkale'de 50m yükseklikte ortalama rüzgâr hızı 8 m/s 'dir [45]. Şekil 4.5'te güç eğrisi grafiğinden yola çıkılarak iki model için santrallerin üretim kapasiteleri test sonuçları kısmında tablo haline getirilmiştir.



Şekil 4.8 Rüzgâr türbini güç eğrisi grafiği (Enercon E82)

Bir türbinin güç eğrisi ortalaması ile üretebileceği güç hesaplanmaktadır. Güç eğrisi ortalama gücün ortalama rüzgâr hızına oranını vermektedir. Böylece 4 durum ortaya çıkar. Birinci durum; ortalama rüzgâr hızı başlama (cut-in) hızından düşükse türbin devreye girmez. Türbin enerji üretmeden hareketsiz kalır. İkinci durum; ortalama rüzgâr hızı başlama hızından fazla ise sistem elektrik üretmeye başlar. Ancak türbinin üreteceği maksimum elektrik için gerekli hız sistem tarafından ayarlanmaya çalışır. Üçüncü durum; ortalama rüzgâr hızı en uygun elektrik üretilecek alanı yani nominal hızı geçerse türbin en uygun hıza düşürülür. Dördüncü durum; ortalama rüzgâr hızı türbinin tasarlandığı en yüksek (cut-off) hızın üstüne çıkarsa sistemin durdurulması gerekmektedir. Yoksa türbinde hasarlar meydana gelir. Bu koşulda da enerji üretimi olmamaktadır [46].

4.3 Birinci Şebeke Modeli Test Sonuçları

RES kış ve yaz dönemlerinde, tam kapasite çalıştırılarak; türbinlerin üretim güçleri simülasyonla belirlendi. Ayrıca, salınım generatörü Gen_1, kış ve yaz mevsimlerinde için türbinlerin tam kapasite ve minimum kapasitede çalışmasında, ürettiği güç değerleri görüldü (Tablo 4.8).

Tablo 4.9 Rüzgâr türbinlerinin üretim gücü

Ad	Kış (%)	Yaz (%)	Kış (MW)	Yaz (MW)
WTG1	54,1	39,1	1,1	0,8
WTG2	61,7	45	1,2	0,9
WTG3	50,8	37,5	1	0,8
WTG4	47,5	35,8	0,9	0,7
WTG5	58,3	45,8	1,2	0,9
WTG6	59,1	45,8	1,2	0,9
WTG7	47,5	37,5	0,9	0,8
WTG8	50	39,2	1	0,8
WTG9	55,8	41,7	1,1	0,8
WTG10	54,2	41,7	1,1	0,8

Santralin bulunduğu konumdan dolayı kış döneminde, rüzgâr gücünden, yaz dönemine göre daha çok faydalanılmıştır. Rüzgâr santralinin tam kapasitede çalışması Tablo 4.9'da görüldüğü üzere Gen_1'in üretim gücünde hem kış hem yaz dönemlerinde azalma olduğu görülmektedir.

Tablo 4.10 Gen_1 üretim güçleri

Gen_1	Kış (MW)	Yaz (MW)
Tam Kap.	164,2	223,8
Min. Kap.	172,6	229,6

4.3.1 Yük Akışı Analizi

Newton-Raphson metodu kullanılarak sistemin yük akış simülasyonu gerçekleştirildi. Kış ve yaz yükü senaryolarına göre türbinlerin bağlı olduğu baralardaki gerilim regülasyonları aşağıda verilmiştir (4.10).

Tablo 4.11 Baraların gerilim oranları

Bara Adı	Kış Yükü (%)		Yaz Yükü (%)	
	Tam Kap.	Min. Kap.	Tam Kap.	Min. Kap.
Bus_I	106,2	106,5	105,3	105,6
Bus_L	105,7	105,85	105,3	105,5
Bus_M	105,4	105,5	104,85	105
Bus_N	104,3	104,7	103,2	103,6

Baralardaki gerilim oranları marjinal ve kritik seviyede bir sonuç sergilemiştir (%102 - %105 arası marjinal, %105 ‘ten sonra kritik değer). Sistemdeki bu gerilim seviyeleri kararlı şebeke işletmesinde istenmeyen bir durumdur. Bununla birlikte kış ve yaz yüklerinde, tam kapasite ile üretim yapan santralde; minimum kapasite ile üretime göre baralarda daha düşük bir gerilim yükselmesi olmuştur. Yaz yükünde tam ve minimum kapasitede çalışma, kış yüküne göre daha düşük gerilim yükselmesi oluşturmuştur. Ayrıca rüzgâr türbini güç üretiminden dolayı bağlandıkları barada tersine bir yük akışı olduğu görülmektedir.

4.4 İkinci Şebeke Modeli Test Sonuçları

Yük akışı analizi ile baraların yüklenmeleri, bara gerilim durumları ve elektriksel kayıpları hesaplanmıştır. Ayrıca kısa devre analizi ile yürütülen çalışmalar tablolar halinde düzenlenmiştir.

4.4.1 Yük Akışı Analizi

Yük akışı analizi Newton-Raphson metoduyla gerçekleştirilmiştir. Bara gerilim değerleri %102 veya %98 olduğunda marjinal; %105'i geçtiğinde veya %95'in altına indiğinde ise kritik değer olarak vasıflandırılacaktır. Sistemdeki yükler tam yük değerinde çalıştırılmaktadır. S1 ve S2 senaryolarına göre simülasyon sonuçları Tablo 4.11'de gösterilmiştir.

Tablo 4.12 Yük akışı analizi sonuçları

Yük Akışı	S1	S2
Ön Şebekeden Çekilen Güç (MW)	41,2	33,2
Gen_1 Üretilen Güç (MW)	201,6	195,6
Yük_OSB (MW)	11,3	11,2
OSB Bara Gerilimi(%)	100,78	98,97
Hat1 Gerilim düşümü (%Vd)	0,4	1,3
WTG_OSB (MW)	-	13,3

RES entegrasyonundan sonra, şebekeden gelen güçte ve Gen_1'in üretim gücünde düşüş olduğu görülmektedir. Yük_OSB'nin aktif gücünde farklılık gözlemlenmektedir. Motor yüklerinin güçlerinde bir değişiklik olmasa da; statik yükler RES bağlantısından sonra azalmıştır. OSB bara gerilimi iki senaryo için de kabul edilebilir değerdedir. İletim hattı, gerilim düşümü sınır değerine biraz daha yaklaşmıştır. RES'in üretim verimi %66,7 ile 13,3 MW olmuştur.

4.4.2 Kısa Devre Analizi

ANSI / IEEE kısa devre hesaplamalarında, hata konumundaki konumdaki ön arıza gerilimine eşit olan eşdeğer bir gerilim kaynağı tüm harici gerilim kaynaklarını ve makine dahili gerilim kaynaklarını değiştirir.

Tüm makineler iç empedansları ile temsil edilir. Hat kapasitansları ve statik yükler ihmal edilir. Transformatör kademeleri, nominal konumda veya kılavuzda belirtilen

konumda ayarlanabilir. Nominal olmayan kademe ayarı mevcutsa, trafo empedansını ve sistem gerilimlerini düzeltmek için farklı şemalar mevcuttur. 3 fazlı hata için hatanın değişmeyeceği varsayılır. Bu nedenle, ark dirençleri dikkate alınmaz. Sistem empedanslarının 3-fazlı olduğu varsayılır ve simetrik bileşenlerin metodu dengesiz hata hesaplamaları için kullanılır.

Tablo 4.13 2. Şebeke modeli kısa devre parametreleri

Gerilim (kV)	**Kısa Devre Gücü (MVAsc)**	**X/R**
154	3250	4,025

Kısa devre hesaplamaları ANSI standartlarına göre yapılmıştır. S1 ve S2 senaryoları için Tablo 4.12 kullanılarak maksimum ve minimum kısa devre akımları (Isc) hesaplanmıştır. Sonuçlar aşağıda paylaşılmıştır (Tablo 4.13). Maksimum Isc, yarım periyotluk bir dilimdeki (subtransient) kısa devre akımları için ifade edilir; minimum Isc ise 30 periyotluk kararlı hal kısa devre akımını belirtmektedir.

Tablo 4.14 S1 ve S2 senaryolarının kısa devre akımları

Kısa Devre (OSB Bara)	**S1**	**S2**
Maksimum Isc (kA)	4	11,24
Minimum Isc (kA)	3,73	8,81

Sisteme RES bağlantı ile (S2) maksimum ve minimum kısa devre akımlarında ciddi yükselmeler meydana gelmiştir.

5
SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmayla, RES entegrasyonunun avantaj ve dezavantajları görülmüştür. farklı koşullar altında standart bir IEEE 14 bara sisteminin tasarımını göstermiştir. RES bağlı olmadan önceki ve bağlı olduktan sonraki durumları yük akışı analizi ve kısa devre analizleriyle karşılaştırılmıştır Simülasyonlar ETAP yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

1. şebeke modelinde, 4 farklı senaryo ile IEEE 14 baralı test sistemine rüzgâr türbini entegrasyonu yapılarak; şebekeyi izleme ve analiz amacıyla bu makale oluşturuldu. Enerji sektöründeki şirketler ve sektör çalışanları için farklı bakış açıları sunulmaya çalışıldı. Simülasyonu yapılan sistemde rüzgâr santrallerinin bağlı olduğu baralarda %103 ile %107 arasında gerilim yükselmeleri mevcuttur. Marjinal yüklenmeler kabul edilebilir fakat kritik seviyedeki bara gerilimleri için iyileştirme yapılmalıdır. Kış mevsiminde santralin üretim gücü artsa da sistemdeki talep güç, yaz dönemine göre azaldığından gerilim artışı daha yüksek yaşanmaktadır. Üretim tüketim dengesi sistem işletmeden önce iyi analiz edilirse, şebekede doğru ayarlamalar yapılır ve daha gerçekçi tahminler elde edilir. Baralardaki yüklerin gerilim yükselmeleri, gerekli korumalar yapılarak önlenebilir. Mesela, endüktif çalışabilen reaktif güç kompanzasyonu kurulumu yapılabilir. Bu makaleyle ileriye yönelik olması düşünülerek; yapılacak yenilik ve yatırımlar öngörülebilir. Bunun yanında, mevcut şebeke ağını iyileştirmek için; öncesinde yapılan analizler yararlı olacaktır. Rüzgâr türbini alanındaki yeni, teknolojik gelişmeler; elektrik şebeke kalitesinde yeni teknolojiler geliştirmeyle beraber paralellik göstermelidir. Ayrıca daha sonra yapılacak çalışmalarda gerilim seviyesi normal düzeye getirtilip, sistemin harmonik analizleri yapılarak şebekenin bütününe yorum getirilmelidir.

2. şebeke modelinde, OSB barasının gerilim kararlığı ve kısa devre akımları simülasyon yardımıyla izlenilmiştir. Mevcut şebeke (S1), OSB barası uygun gerilim limitleri arasında çalışmıştır. S2 senaryosuyla beraber göz önüne alındığında ise; gerilimde düşüş olmaktadır. Bu, sistem için kabul edilebilir bir gerilim değişikliği olmakla beraber;

farklı bara ve sistemlerde olumsuz koşullara sebebiyet verebilir. Bu sebeple RES'lerin kurulum öncesi analiz ve simülasyonları mutlaka yapılmalıdır. RES bağlantısı ile Hat1 iletkeninin gerilim düşümündeki artış, santralin olumsuz etkilerindendir. Bununla beraber sistemdeki iletkenin kapasitesi yeni tesis kurulumu için uygundur. OSB barasının kısa devre akım güçleri büyük bir artış gösteriyor. Mevcut sitemdeki kesiciler kısa devre güçlerine dayanamaz. Bu yüzden, OSB barasının bulunduğu dağıtım merkezindeki şebeke koruma ve analiz cihazları yenilenmeli ve yeni sisteme uygun hale getirilmelidir.

Şebeke işletme koşullarında en uygun kararlı davranışları görebilmek için, rüzgâr türbinlerinin şebeke üzerinde kontrolünü sağlayan ve iyileşmesine katkıda bulunan yenilikleri kullanması oldukça önemlidir. Mevcut elektrik tesisleri, bakım, yenileme, modifikasyon işlemleri ile gözden geçirilmelidir. Şebekenin adaptif koruma ve güvenilirlik değerlendirmesi analizleri ayrı bir çalışma konusu olabilir.

Elektrik üretmek için rüzgâr enerjisinin kullanımı, büyük bir sanayi üretimi ve her yıl binlerce MW'lık yeni kapasite kurulumu ihtiyacı oluşturmaktadır. Özellikle büyük güçlü rüzgâr türbinlerinde heyecan verici yeni gelişmeler olmasına rağmen birçok zorluk devam etmektedir. Bu olumsuzlukların üstesinden gelebilmek için rüzgâr türbinlerinin bilimi ve teknolojisi ile ilgili kayda değer bir bilgi birikimi oluşturulmaktadır. Rüzgâr enerji üretiminin büyük ölçüde hava koşullarına bağlı olduğu görülmektedir. Üretimin değişkenliği son kullanıcılara istikrarlı ve güvenli enerji hizmetlerinin sağlanmasını zorlaştıracaktır. Sürdürülebilir sistem oluşturma hedefinde ilerleyebilmek için çıkan sonuçlar iyi analiz edilmelidir.

.

Kaynakça

[1] Sharma, N. K., Kumar, S. ve Kumar, A., (2015). "Analysis of Power Flow, Continuous Power Flow and Transient Stability of IEEE-14 Bus Integrated Wind Farm Using PSAT", 2015 International Conference on Energy Economics and Environment (ICEEE), 27-28 March 2015, Noida, India.

[2] Çelik, İ., Yıldız, C. ve Şekkeli, M., "Rüzgar Enerjisi Santrali Kurulumunda Rüzgar Türbinlerinin Mikro Yerleşimi için bir Optimizasyon Modeli", GU J Sci, Part C, 6(4): 898-908, Ağustos 2018.

[3] Gupta, S., Garg, S., Babbar, V., Saha, S. ve Nagarwal, N., (2018). "Modeling and Performance Investigation of PV Integrated IEEE 14 Bus Test System", 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), 28-29 September 2018, Greater Noida, India

[4] Iyambo, P.K. ve Tzoneva, R., (2007). "Transient Stability Analysis of the IEEE 14-Bus Electric Power System", AFRICON 2007, 26-28 September 2007, Windhoek, South Africa.

[5] Pattanaik, P.P ve Panigrahi, C. K., (2018). "Stability and Fault Analysis in a Power Network Considering IEEE 14 bus system", Proceedings of the Second International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC 2018), 19-20 January 2018, Coimbatore, India.

[6] Niazi, M. T. K., Arshad., Ali, M. ve Hussain, A., (2018). "Influence of Fault and Wind Turbine Type on Voltage Stability of IEEE 14 Bus System", 2018 IEEE 21st International Multi-Topic Conference (INMIC), 1-2 November 2018, Karachi, Pakistan.

[7] Moghbel, M., Mokui, H. T., Masoum, M. A. S. ve Mohseni, M., (2012). "Reactive Power Control of DFIG Wind Power System Connected to IEEE 14 Bus Distribution Network", 2012 22nd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 26-29 September 2012, Bali, Indonesia.

[8] Tomar, A., (2016). "Feasibility Analysis of replacing 10kV, 50MVA short transmission overhead line with HTS cable in IEEE 14-bus system, on a pilot basis; by simulating the system on PowerWorld Simulator 18", 2016 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, 5-6 March 2016, Bhopal, India.

[9] Muzzammel, R., Ahsan, M. ve Ahmad, W., (2015). "Non-linear analytic approaches of power flow analysis and voltage profile improvement", 2015 Power Generation System and Renewable Energy Technologies (PGSRET), 10-11 June 2015, Islamabad, Pakistan.

[10] Qiao, J., Min, Y. ve Lu, Z., (2007). "Optimal Reactive Power Flow in Wind Generation Integrated Power System", 2006 International Conference on Power System Technology, 22-26 October 2006, Chongqing, China.

[11] Bayindir, R., Yesilbudak, M. ve Ermis, S., (2016). "Standards-Based Investigation of Voltage Dips and Voltage Imbalances in an Organized Industrial Zone", 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, 25-28 Sept. 2016, Varna, Bulgaria.

[12] Jyoti., Arya, A., Arunachalam, P., Ramesh, L., Ganesan, V. ve Egbert, H., (2017). "Energy usage Analysis of Industries with ETAP case Study", 2017 International Conference on circuits Power and Computing Technologies, 20-21 April 2017, Kollam, India.

[13] Shah, K. B., Rathor, S. K. ve Mehta, R., (2016). "Industrial Grade Power System Study Analysis", 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, 3-5 March 2016, Chennai, India, 3955-3960.

[14] Dashti, R., Hassani, S.ve Shaker, H. R., (2018). "Protection Coordination Assessment and Improvement of Electrical Network of an Industrial Complex in Connection to Power Grid: An Experience Report", 2018 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 3-5 May 2018, Istanbul, Turkey, 263-268.

[15] Shobole, A., Baysal, M., Wadi, M. ve Tur, M. R., (2018). "Protection Coordination Practices for Industrial Ring Distribution Network Case Study of Organized Industrial Zone (GEBZE, Turkey)", 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 14-17 Oct. 2018, Paris, France, 1027-1031.

[16] Prabhu, J. A. X., Nande, K. S., Shukla, S. ve Ade, C. N., (2016). "Design Of Electrical System Based On Short CircuitStudy Using ETAP For IEC Projects", IEEE 6th International Conference on Power Systems, 4-6 March 2016, New Delhi, India.

[17] Yuxin, Z., Xuemin, Z., Shengmei, M., Deming, X., Shuai, W. ve Rui, S., (2016). "Blackout Risk Analysis and Control of Power System Integrated with Wind Farm", 2016 Chinese Control and Decision Conference, 28-30 May 2016, Yinchuan, China.

[18] Yadav, S. K., Sharma, N. K., Choube, S. C. ve Varma, A., (2017). "Optimal Coordination of Overcurrent Relays in Power Systems for Reliability Assessment Under the Presence of Distributed Generation Using ETAP", 2017 6th International Conference on Computer Applications In Electrical Engineering-Recent Advances, 5-7 October 2017, Roorkee, India.

[19] Gheydi M., Hamian, M., Farhadi, P. ve Ghafari, R., (2017). "Comparative Assessment of Power Loss among Four Typical Wind Turbines in Power Distribution System", 2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering, 30 June-2 July 2016, Bucharest, Romania.

[20] Xiang, L., Lee, S. J. ve Choi, M. S., (2012). "Investigation of the Short-circuit Current Behavior of Wind Generators", 2011 International Conference on

Advanced Power System Automation and Protection, 16-20 October 2011, Beijing, China.

[21] Pathan, M. ve Shah, A., (2018). "Co-ordination of Protective Relays for 16 MW Load System using ETAP" 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing, 1-2 August 2017, Chennai, India.

[22] IEEE Power and Energy Society, (2015). Fault Current Contributions from Wind Plants, 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, USA 137-227.

[23] ENERCON, Enercon Product Overview, https://www.enercon.de/fileadmin/Redakteur/Medien-Portal/broschueren/pdf/en/ENERCON_Produkt_en_06_2015.pdf, 17 Haziran 2015.

[24] Burton, T. Sharpe, D., Jenkins, N. ve Bossanyi, E., (2001). Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons Ltd, England.

[25] Ackermann, T., (2005). Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons Ltd, England.

[26] Ren21, (2018). *Renewables Global Status Report (GSR)*, Paris, France

[27] Larsen, H. H., & Sønderberg Petersen, L. (Eds.) (2014). DTU International Energy Report 2014: Wind energy drivers and barriers for higher shares of wind in the global power generation mix. Technical University of Denmark (DTU)

[28] Larsen, H. H., & Sønderberg Petersen, L. (Eds.) (2015). DTU International Energy Report 2015: Energy systems integration for the transition to non-fossil energy systems. Technical University of Denmark (DTU).

[29] Petersen, E. L., Mortensen, N. G., Landberg, L., Højstrup, J., Frank, H. P. (1998) 'Wind power Meteorology, Part II: Siting and Models', Wind Energy; 1(2) 55–72.

[30] Hills, R. L. (1994) Power from Wind–A History of Windmill Technology, Cambridge University Press, Cambridge.

[31] Global Wind Atlas, Rüzgâr Enerji Potansiyelleri, https://globalwindatlas.info/, 9 Ocak 2019.

[32] Wind Europe, (2018). Wind energy in Europe in 2018 trends and statistics, Brussels, Belgium.

[33] Liu, Y. J., Chen, P. A., Lan, P. H. ve Chang Y. T., (2017). "Dynamic simulation and analysis of connecting a 5 MW wind turbine to the distribution system feeder that serves to a wind turbine testing site", 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia), 3-7 June 2017, Kaohsiung, Taiwan.

[34] Turan, T.T., (2016). Akıllı Şebekelerde Arıza Analizi ve Koruma, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[35] Özbay, S., (2007). Kısa Devre Analizinin Uluslararası Standartlar ve Simülasyon ile Çözümlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[36] IEEE, (2006). IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems, IEEE.

[37] Yaşar, C., Fadıl, S., Taş, M. A. ve Yıldız, T., (2003). "Görsel Bir Program: Yük Akışı Analizi ve Aktif Güç Optimizasyonu", Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği, 10. Ulusal Kongresi, Ocak 2003, İstanbul.

[38] Moradia, M.H., Foroutana, V.B. and Abedinib, M., (2017). "Power flow analysis in islanded Micro-Grids via modeling different operational modes of DGs: A review and a new approach", Renewable and Sustainable Energy Reviews, March 2017, 69, pp. 248-262.

[39] Singhal, K., (2014). "Comparison between load flow analysis methods in power system using MATLAB", International Journal of Scientific & Engineering Research, May 2014, 5, 1412-1419.

[40] Alqadi, R. and Khammash, M., (2007). "An efficient parallel Gauss-Seidel algorithm for the solution of load flow problems", The International Arab Journal of Information Technology, April 2007, 4, no. 2, 148-152

[41] Yeşilbudak, M., Ermiş, S. ve Bayındır, R., (2017). "Farklı Bara Sayısına Sahip Güç Sistemlerinde Yük Akışı Analiz Metotlarının Karşılaştırılması", Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 237-246.

[42] IEEE 14 bus test system, 14 Bus Power Flow Test Case, http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm, 27 Şubat 2019.

[43] Mehtre, M. M. Desai, S. G. Bankar, D. S. (2016). Analysis of a Doubly Fed Induction Generator based Wind Farm. IEEE Technological Innovations in ICT for Agriculture and Rural Development, 15-16 July 2016, Chennai, India..

[44] Wang, L. Wu, C. Chang, C. Prokhorov, A. V., (2015). " 2015 Stability Evaluation of Simplified Taiwan Power System Connected with a Large-Scale Offshore Wind Far". IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference, 1-4 Nov. 2015, Taipei, Taiwan.

[45] Güney Marmara Kalkınma Ajansı, Çanakkale Enerji Sektörü Yatırım Rehberi, https://www.gmka.gov.tr/dokumanlar/yayinlar/Canakkale-Enerji-Yatirim-Rehberi.pdf, 27 Şubat 2019.

[46] İTÜ, Rüzgâr Enerjisi, https://web.itu.edu.tr/~kaymak/windpower.html, 18 Haziran 2019

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: kecankiri@yandex.com

Konferans Bildirileri

1. Çankırı, K. E., Gökalp, E., (2019). "Senaryo Tabanlı Kısa Devre ve Güç Akışı Analizleri ile Rüzgâr Türbinlerinin Şebeke Üzerinde Oluşturduğu Etkilerin İncelenmesi", Ereğli Uluslararası Bilim ve Akademi Kongresi, 8-9 Mart 2019, Ereğli, Konya, Türkiye.