T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

RÜZGÂR ENERJİ SANTRALLERİNİN DAĞITIM ŞEBEKELERİNE ENTEGRASYONUNUN İNCELENMESİ

Hazırlayan
Nazlıhan ÖZDOĞAN

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Serkan BAHÇECİ

Yüksek Lisans Tezi

Temmuz 2021
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

RÜZGÂR ENERJİ SANTRALLERİNİN DAĞITIM ŞEBEKELERİNE ENTEGRASYONUNUN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Nazlıhan ÖZDOĞAN

Danışman
Dr. ÖĞR. Üyesi Serkan BAHÇECİ

Temmuz 2021
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: Nazlıhan ÖZDOĞAN

İmza :

“Rüzgâr Enerji Santrallerinin Dağıtım Şebekelerine Entegrasyonunun İncelenmesi ” adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan	Danışman
Nazlıhan ÖZDOĞAN	Dr. Öğr. Üyesi Serkan BAHÇECİ

Elektrik- Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yardım ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Serkan BAHÇECİ'ye teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince emeği geçen değerli hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Eğitim-öğretim hayatım boyunca sabır ve fedakârlık göstererek beni daima destekleyen ve bugünlere gelmemde en büyük katkı sahibi aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Nazlıhan ÖZDOĞAN

Kayseri, Temmuz 2021

RÜZGÂR ENERJİ SANTRALLERİNİN DAĞITIM ŞEBEKELERİNE ENTEGRASYONUNUN İNCELENMESİ

Nazlıhan ÖZDOĞAN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2021

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serkan BAHÇECİ

ÖZET

Elektrik üretimi için fosil kaynaklar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gün geçtikçe daha da yaygın hale gelmektedir. Bu durumun nedeni, fosil yakıtların çevresel olumsuz etkileri ve tükenebilir olmalarıdır. Rüzgâr enerjisi de enerji talep ihtiyacını karşılamada en çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Bu tez çalışmasında rüzgar türbin sistemleri, bu sistemlerin elemanları, matematiksel modeli, şebeke bağlantı kriterleri ve rüzgarın değişken yapısından dolayı oluşan şebeke entegrasyon etkileri incelenmiştir. Bu amaçla PSCAD/EMTDC'de şebekeye bağlı, 3 MVA gücünde kalıcı mıknatıslı senkron generatöre (KMSG) sahip bir rüzgar türbin sistemi oluşturulmuştur.

Oluşturulan model yardımıyla rüzgar türbin sistemini şebekeye bağlamadan öncesi ve sonrası için elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmış ve bu sayede şebeke entegrasyon etkileri gözlemlenmiştir. Aynı zamanda farklı yük koşullarında şebeke ve rüzgâr türbin sistemi tarafından sağlanan güç miktarları sunularak, sonuçlar analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda şebekeye rüzgâr türbin sisteminin bağlanması ile şebeke tarafından sağlanan toplam güç değerinde azalmanın olduğu ve şebeke bağlantı noktasındaki faz gerilim değişim miktarının şebeke yönetmeliğinde belirtilen sınırlar içerisinde olduğu görülmüştür. Bu sonuçların elde edilmesinde DC hat üzerinde gerçekleştirilen, invertörün istenilen gerilim aralığında kontrollü olarak çalışmasını sağlayan gerilim regülasyon işleminin etkisi büyüktür.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar türbin sistemleri; şebeke entegrasyon etkileri; gerilim regülasyonu

INVESTIGATION OF THE INTEGRATION OF WIND POWER PLANTS INTO DISTRIBUTION GRİDS

Nazlıhan ÖZDOĞAN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, July 2021

Supervisor: Asst. Prof. Serkan BAHÇECİ

ABSTRACT

The use of renewable energy sources instead of fossil sources for electricity generation is becoming more common day by day. The reason for this is that fossil fuels have negative environmental effects and are exhaustible. Wind energy is one of the most widely used renewable energy sources to meet the energy demand need. In this thesis, wind turbine systems, the elements of these systems, its mathematical model, grid connection criteria and grid integration effects due to the variable nature of the wind were investigated. For this purpose, a grid-connected wind turbine system with a permanent magnet synchronous generator (PMSG) of 3 MVA has been created in PSCAD/EMTDC.

With the help of the created model, the results obtained before and after connecting the wind turbine system to the grid were compared with each other and the grid integration effects were observed. At the same time, the results were analyzed by presenting the amounts of power supplied by the grid and the wind turbine system under different load conditions. As a result of the studies carried out, it has been observed that the total power value provided by the grid decreases with the connection of the wind turbine system to the grid and the amount of phase voltage change at the grid connection point is within the limits specified in the grid regulation. In obtaining these results, the voltage regulation process performed on the DC line, which enables the inverter to operate in the desired voltage range, has a great effect.

Keywords: Wind turbine systems; grid integration effects; voltage regulation

İÇİNDEKİLER

RÜZGÂR ENERJİ SANTRALLERİNİN DAĞITIM ŞEBEKELERİNE ENTEGRASYONUNUN İNCELENMESİ

Sayfa

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK i
YÖNERGEYE UYGUNLUK ii
TEŞEKKÜR iv
ÖZET v
ABSTRACT vi
İÇİNDEKİLER vii
KISALTMALAR VE SİMGELER x
TABLOLAR LİSTESİ xii
ŞEKİLLER LİSTESİ xiii
GİRİŞ 1

1.BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Literatür Taraması 3
1.2. Rüzgâr Enerjisi 11
1.3. Rüzgâr Türbinleri 13
1.4. Rüzgâr Türbin Elemanları 13
1.4.1. Kule 14
1.4.2. Rotor 14
1.4.3. Dişli Kutusu 15
1.4.4. Fren Mekanizması 15
1.4.5. Generatör 16

1.4.6. Yön Saptırma (Yaw) Sistemi 17
1.4.7. Anemometre 17
1.4.8. Rüzgâr Gülü (Yelkovan) 17
1.5. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması 18
1.5.1. Eksenlerine Göre Rüzgâr Türbinleri 18
1.5.2. Güç Değerlerine Göre Rüzgâr Türbinleri 20
1.5.3. Hızlarına Göre Rüzgâr Türbinleri 20
1.5.4. Güç Kontrol Sistemlerine Göre Rüzgâr Türbinleri 21
1.5.5. Şebeke Bağlantısı Duruma Göre Rüzgâr Türbinleri 22
1.6. Rüzgâr Türbin Tasarımları 22
1.6.1. A Tipi Rüzgâr Türbini 22
1.6.2. B Tipi Rüzgâr Türbini 23
1.6.3. C Tipi Rüzgâr Türbini 24
1.6.4. D Tipi Rüzgâr Türbinleri 24

2.BÖLÜM

GEREÇ VE YÖNTEM

2.1. Yöntem 26
2.2. Rüzgâr Türbin Karakteristikleri ve Matematiksel Model 26
2.3. Benzetim Teknikleri Yardımıyla Sistem Modelleme 35
2.4. Rüzgâr Modelleme 36
2.5. AC/DC/AC Dönüştürücü ve Gerilim Regülasyon İşlemi 38
2.6. Rüzgâr Enerji Santrali Entegrasyonunun Şebeke Üzerindeki Etkileri 40
2.6.1. Gerilim Değişimleri 40
2.6.2. Gerilim Titremesi (Fliker) 43
2.6.2.1. Sürekli Çalışma 45
2.6.2.2. Anahtarlama İşlemleri 45
2.6.2.3. Flikermetre (Titreşim ölçer) 46
2.6.2.4. Fliker Kompanzasyon Stratejisi 49
2.6.3. Harmonikler 50
2.6.4. Frekans Kararlılığı 52
2.6.5. Aktif Güç 54

2.6.6. Reaktif Güç 54
2.6.7. Kesintiler 56
2.7. Arıza Anı ve Sonrası 56

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Rüzgâr Türbin - Generatör Modeli.....58
3.2. AC/DC/AC Dönüştürücü Modeli.....63
3.2.1. Diyot Doğrultucu 64
3.2.2. DC Hat Modeli.....65
3.2.3. İnvertör Modeli.....66
3.2.4. Gerilim Regülasyonu.....67
3.3. Şebeke Modeli.....71
3.3.1. Tek Yüklü Şebeke.....72
3.3.2. Dört Yüklü Şebeke 75

4. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

KAYNAKÇA 88
ÖZGEÇMİŞ.....94

KISALTMALAR VE SİMGELER

Sembol	Anlamı
AC	Alternative Current
DC	Direct Current
PSCAD	Power System Computer Aided Design
PSS/E	Power System Simulator for Engineering
KMSG	Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör
SKAG	Sincap Kafesli Senkron Generatör
RSSG	Rotoru Sargılı Senkron Generatör
RSAG	Rotoru Sargılı Asenkron Generatör
ÇBAG	Çift Beslemeli Asenkron Generatör
GBAS	Gerilime Bağlı Akım Sınırlayıcı
GAK	Genel Akım Kontrolörü
OBN	Ortak Bağlantı Noktası
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
TÜREB	Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği
EN	European Norm
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
STATCOM	Static Compensator
SVC	Satatic VAr Compensator
THB	Toplam Harmonik Bozulma
FACTS	Flexible Alternative Current Transmission System
HVDC	High Voltaje Direct Current
P_t	Türbin gücü
Cp	Türbin güç katsayısı
λ	Uç hız oranı
A	Rotor tarafından süpürülen alan
w	Rotor açısal hız

P_{st}	Kısa süreli fliker şiddeti
P_{lt}	Uzun süreli fliker şiddeti
f(v)	Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu
$f_R(v)$	Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu
k	Boyutsuz şekil parametresi
c	Ölçek parametresi
v_m	Ortalama rüzgâr hızı
σ	Rüzgâr hızı standart sapma

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2. 1. Değişik arazilerin sürtünme katsayıları 30
Tablo 2. 2. EN 50160'a göre fliker sınır değerleri 44
Tablo 3. 1. Türbin parametre değerleri 59
Tablo 3. 2. KMSG'ün parametre değerleri 60
Tablo 3. 3. 6 Darbeli Köprü devresine ait parametreler 64
Tablo 3. 4. Şebekelere ait parametre değerleri 72

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1. RES kurulu güç kapasitesinin Dünyadaki dağılımı 11
Şekil 1. 2. Türkiye'de 2020 yılında üretilen aylık enerjinin rüzgârdan sağlanan yüzdelik değerleri..... 12
Şekil 1. 3. İşletmedeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı..... 12
Şekil 1. 4. Rüzgâr türbin sisteminin çalışma safhaları 13
Şekil 1. 5. Rüzgâr türbininin iç yapısı..... 14
Şekil 1. 6. Savonius türbin 19
Şekil 1. 7. Darrieus türbin 19
Şekil 1. 8. A tipi rüzgâr türbini 23
Şekil 1. 9. B tipi rüzgâr türbini..... 23
Şekil 1. 10. C tipi rüzgâr türbini..... 24
Şekil 1. 11. D tipi rüzgâr türbini 25
Şekil 2. 1. Weibull olasılık dağılımının şekil parametresine göre grafikleri 31
Şekil 2. 2. Rayleigh olasılık dağılımının şekil parametresine göre grafikleri..... 32
Şekil 2. 3. Rüzgâr türbinlerinin çalışma bölgeleri..... 33
Şekil 2. 4. Rüzgâr türbin çalışma bölgelerine göre kanat eğim açısı değişimi 35
Şekil 2. 5. Rüzgâr türbin çalışma bölgelerine göre rotor açısal hız değişimi..... 35
Şekil 2. 6. Rüzgâr kaynağı 36
Şekil 2. 7.Gust bileşenli rüzgâr modeli 37
Şekil 2. 8. Rampa bileşenli rüzgâr modeli 38
Şekil 2. 9. Gürültü bileşenli rüzgâr modeli 38
Şekil 2. 10. Kontrolsüz üç fazlı tam dalga diyot doğrultucu modeli..... 39
Şekil 2. 11. Akım beslemeli invertör modeli 39
Şekil 2. 12. Şebekeye bağlı rüzgâr santralinin tek hat diyagramı 42
Şekil 2. 13. Şebeke ile rüzgâr santrali bağlantısındaki gerilimlerin fazör diyagramı 42
Şekil 2. 14. Sinüzoidal gerilim titremesi..... 44
Şekil 2. 15. IEC flikermetre modelinin blok diyagramı..... 47
Şekil 2. 16. Gerilim düşümünün temsili için kullanılan tek hat diyagramı 49
Şekil 2. 17. EN 50160 standardına göre tekil harmonik gerilimlerin sınır değerleri 51
Şekil 2. 18. Rüzgâr türbini tarafından üretilen aktif gücün frekansa bağlı değişimi 53
Şekil 2. 19. Rüzgâr enerji santralleri için reaktif güç kapasite eğrisi..... 55

Şekil 2. 20. Gerilim dalgalanmaları esnasında rüzgâr türbinleri tarafından verilmesi gereken reaktif güç tepkisi 55
Şekil 2. 21. Rüzgâr enerji sistemlerinin arıza esnasında ve sonrasında sağlamaları gereken tepki 57
Şekil 3. 1. Eğim kontrol işlemi 59
Şekil 3. 2.PSCAD/EMTDC'de oluşturulan rüzgâr türbin - generatör modeli 60
Şekil 3. 3. Değişken rüzgâr hızı 61
Şekil 3. 4. Değişken rüzgâr hızında elde edilen türbin gücü 61
Şekil 3. 5. Generatörün elektromanyetik torku ile türbinin mekanik torku 62
Şekil 3. 6. Rotorun mekanik hızı 62
Şekil 3. 7. Generatör görünür güç 62
Şekil 3. 8. AC/DC/AC dönüştürücü modeli 63
Şekil 3. 9. Doğrultucu modeli 64
Şekil 3. 10. Kesicinin çalışma kontrolü 66
Şekil 3. 11. İnvertör modeli 66
Şekil 3. 12. Gerilim regülasyon işlemi 68
Şekil 3. 13. GBAS elemanının fonksiyonları 68
Şekil 3. 14. GBAS ve GAK elemanlarının çalışma safhaları 69
Şekil 3. 15. İnvertör aktif değilken DC hat gerilim ve akım değerleri 70
Şekil 3. 16. İnvertör aktifken DC hat gerilim ve akım değerleri 70
Şekil 3. 17. İnvertör ateşleme açısı 71
Şekil 3. 18. İnvertör çıkışından elde edilen görünür güç 71
Şekil 3. 19. Tek yüklü şebeke modeli 72
Şekil 3. 20. Rüzgâr türbini ve şebekenin aktif güç değerleri ile aktif güç talebi 73
Şekil 3. 21. Rüzgâr türbini ve şebekenin reaktif güç değerleri ile reaktif güç talebi 73
Şekil 3. 22. Tek yük durumunda şebeke bağlantı noktasındaki faz gerilimi 74
Şekil 3. 23. Dört yüklü şebeke modeli 75
Şekil 3. 24. Şebekeye bağlı rüzgâr türbin sistemin şematik gösterimi 75
Şekil 3. 25. PSCAD/EMTDC'de oluşturulan şebekeye bağlı rüzgâr türbin sistem modeli 76
Şekil 3. 26. Rüzgâr türbin sistemi bağlanmadan önce şebekedeki güç değerleri 77
Şekil 3. 27. Rüzgâr türbin sistemi bağlanmadan önce şebekeden sağlanan görünür güç değerleri 78

Şekil 3. 28. Rüzgâr türbin sistemi bağlanmadan önce şebekedeki gerilim, akım değerleri 78
Şekil 3. 29. Rüzgâr türbin sisteminden elde edilen güç değerleri 79
Şekil 3. 30. Rüzgâr türbin sistemi bağlandıktan sonra şebekedeki güç değerleri 80
Şekil 3. 31. Rüzgâr türbin sistemi bağlandıktan sonra şebekeden sağlanan görünür güç değerleri 81
Şekil 3. 32. Rüzgâr türbin sistemi bağlandıktan sonra şebekedeki gerilim, akım değerleri 82
Şekil 3. 33. Dört yük durumunda şebeke bağlantı noktasındaki faz gerilimi 83
Şekil 3. 34. Dört yük durumunda şebeke bağlantı noktasındaki frekans değerleri 83

GİRİŞ

Yenilenebilir enerji alanına yönelik yatırımlar, ülkemizde ve Dünya'da her geçen gün artış göstermekte ve bu duruma bağlı olarak mevcut geleneksel sistemler yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu sonucunda oluşan dağıtık üretim sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Ülkelerin bu enerji politikalarının temel nedenleri yenilenebilir enerji kaynaklarının temiz olması, tükenmemeleri ve günden güne artan enerji talebine karşılık fosil yakıtların olumsuz etkilere sahip olmasıdır. Bu özellikler, enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanmanın hayatımızdaki önemini göstermektedir. Rüzgâr enerjisi de elektrik üretimi açısından oldukça kullanışlı ve günümüzde en fazla tercih edilen, yenilenebilir enerji kaynaklarından bir tanesidir. Fosil yakıtların sebep olduğu olumsuz etkilerin azaltılabilmesi ve günden güne artan enerji talebinin karşılanabilmesi bakımından önemli potansiyele sahiptir.

Rüzgâr süreksiz ve değişken yapıya sahip bir enerji kaynağıdır. Yönü ve büyüklüğü rastgeledir. Rüzgâr enerjisi sağladığı birçok avantajların yanı sıra yapısı nedeniyle bazı dezavantajları da beraberinde getirir. Çünkü rüzgârın bu değişkenliği, rüzgâr enerjisinden elde edilebilecek elektrik enerjisi miktarını tahmin etmemizi ve şebeke yönetimini zorlaştırmaktadır. Aynı zamanda şebeke üzerinde bazı olumsuz etkilere yol açar. Bu entegrasyon etkilerine, rüzgar türbinlerinin reaktif güç ihtiyacının fazla olması durumunda önemli sorunlara sebep olabilecek ani gerilim düşüşlerinin yaşanması, arz-talep dengesizlikleri esnasında frekansın çok düşmesi ve bu nedenle ani elektrik kesintilerin oluşması, rüzgar türbinlerinin yapısındaki bazı teknik hatalara bağlı olarak şebekede faz dengesizliklerinin meydana gelmesi gibi olayları örnek olarak verebiliriz. Yine rüzgâr enerjisinin şebeke entegrasyonu durumunda en çok karşılaşabileceğimiz etkiler arasında akım ve gerilim harmonikleri, gerilim titreşimleri (fliker olayı), güç dalgalanmaları ve kesintileri vardır. Burada önemli olan, entegrasyon etkilerinin standartlar dahilinde olmasıdır. Bu durumu sağlayabilmek için de rüzgâr

santrallerinin şebeke entegrasyon etkilerinin araştırılarak, oluşabilecek etkilerin azaltılmasına yönelik önlemlerin önceden alınması oldukça önemlidir. Bu sayede şebeke üzerinde oluşabilecek ciddi problemlerin engellenmesi ve enerji kalitesinin artırılması sağlanır. Bu tez çalışmasında da rüzgar enerjisinin şebeke entegrasyon etkileri araştırılarak, oluşturulan sistem yardımıyla gerekli analizler yapılmıştır.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasının en temel amacı, günümüzde artan enerji talebinin karşılanması amacıyla kullanımı yaygınlaşan rüzgâr enerjisi sistemlerinin araştırılmasıdır. Bu kapsamda, rüzgâr türbin sistemleri, bu sistemlerin bileşenleri, özellikleri, matematiksel modeli, şebeke bağlantı kriterleri ve entegrasyon etkileri konularında detaylı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise, şebekeye bağlı bir rüzgâr türbin sistemi tasarlanarak, PSCAD/EMTDC benzetim programı yardımıyla modelleme işlemi yapılmıştır. Modellenen sistem, 3 MVA'lık kalıcı mıknatıslı senkron generatöre (KMSG) sahip değişken hızlı bir rüzgar türbini, AC/DC/AC dönüştürücü ve dağıtım şebekesi olmak üzere 3 temel kısımdan oluşmaktadır. AC/DC/AC dönüştürücüsünün yapısında ise 3 faz tam dalga diyot doğrultucusu, DC hat ve akım kaynaklı invertör vardır.

Model içerisinde DC hat üzerinde invertörün kontrollü olarak istenilen gerilim aralığında çalışabilmesi için gerilim regülasyonu ile aşırı gerilim durumunda DC hattın korunması için ise doğrultucunun bloklanması işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler, şebeke entegrasyon etkilerinin azaltılmasına katkı sağlamıştır. Çalışmada ilk olarak rüzgâr türbin sistemi tek yükten ve 4 yük, 3 düğüm noktasından oluşan 2 ayrı şebeke modeline bağlanarak farklı yük koşulları altında analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise rüzgar enerjisinin şebeke entegrasyon etkilerini gözlemleyebilmek amacıyla 4 yüklü şebekeye rüzgar türbin sistemi bağlanmadan öncesinde ve sonrasında elde edilen sonuçlar sunularak, birbiriyle karşılaştırılmıştır.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Literatür Taraması

Arduini vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, maksimum ve minimum talep durumları için, rüzgâr türbini olmayan dağıtım şebekesi, birim güç faktörü ile çalışan C tipi rüzgâr türbinli dağıtım şebekesi ve sabit gerilim rüzgâr türbinli dağıtım şebekesi şeklinde 3 farklı senaryo ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, rüzgâr türbinlerinin olmadığı maksimum talep durumunda, tüm yüklerin sadece trafo merkezi tarafından sağlandığı ve bu nedenle gerilim seviyelerinde bir düşüşün meydana geldiği, minimum talep durumunda ise rüzgâr türbinlerinin tüm yükü karşıladığı ve fazla olan aktif gücün trafoya aktarıldığı görülmüştür.

Konara vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise, yıllık Weilbull rüzgâr hız olasılık dağılım fonksiyonu kullanılarak, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin yıllık enerji üretim analizi yapılmıştır. Rüzgâr türbinlerinde maksimum güç çıkışı için eğim açısı değişiminin yanı sıra tork kontrol bölgesindeki uç hız oranı ile birlikte güç kat sayısının değişimi, kontrol sistem parametrelerini tanımlamak için analiz edilmiştir. Burada rüzgar türbinin yerden 90 m yükseklikte olduğu kabul edilmiş, Weilbull parametreleri de a=8.3m/s, k=1.9 olarak belirlenmiştir. Tahmini enerji çıkışı ise Welbull olasılık dağılım fonksiyonu ile generatör çıkış gücünden yararlanılarak hesaplanmıştır.

Kamali vd. (2017), tarafından yapılan çalışmanın temel amacı, şebekeye bağlı bir rüzgâr enerji santralini modellemek ve rüzgâr santrallerinin şebekeye etkilerini analiz edebilmektir. Çalışmada kalıcı mıknatıslı senkron generatör kullanılmıştır. Çalışmadaki modelde generatörüne ek olarak, rüzgâr türbini, AC/DC/AC dönüştürücüsü gibi rüzgâr enerjisi üretim sisteminin diğer ana bileşenleri de PSCAD/EMTDC programı yardımıyla modellenmiştir. Çalışma esnasında farklı şartlar için arıza analizi

gerçekleştirilmiş ve bu analizler sonucunda rüzgâr türbini şebekeye bağlıyken, sistemde güç akış yönüne bağlı bir koruma sistemi varsa, oluşan arızanın tespit edilemeyeceği ve bu nedenle arıza akımlarının akmaya devam edeceği sonucuna varılmıştır. Bu durum bize rüzgâr santralini şebekeye bağlamadan oluşabilecek etkilerin önceden incelenmesinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Kim vd. (2010) çalışmalarında, PSCAD/EMTDC programı yardımıyla şebekeye bağlı rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin analizini gerçekleştirerek, etkili güç kontrolü için de invertör kontrol algoritmasını önermişlerdir. Çalışmada kullanılan sistem, bir rüzgar türbini, kalıcı mıknatıslı senkron jeneratör, AC/DC ve DC/AC güç dönüştürücüleri, yükler, trafo ile şebekeden oluşmaktadır. Sistemin nominal gücü 1MW, nominal çıkış gerilim ise AC 690V'dır. Çalışmada ilk olarak güç çıkışları değişken rüzgâr hızı varyasyonunda izlenip, w_r, C_p değerlerine bağlı olarak maksimum güç elde edilmiş daha sonra ise invertörün çıkış terminaline t=10s 'de 126kVAr 'lık reaktif güç eklenmiştir. Reaktif güç kontrolü olmadığı zaman invertör çıkış voltajında hafif bir düşüş olduğu ancak reaktif güç kontrolü ile birlikte invertörün çıkış geriliminin sabit olarak kaldığı gözlemlenmiştir.

Başkurt (2012) çalışmasında, şebekeye bağlı rüzgâr enerji sistemindeki güç akışını sadece sisteme enerji sağlamak üzere tek yönlü olarak gerçekleştirilmiştir. Yani rüzgâr türbini tarafından maksimum güç sağlandıktan sonra, talep fazlası enerji oluşursa, bu enerji suni yükte harcanırken, talepten daha az bir üretim söz konusuysa da ekstra güç şebekeden sağlanacaktır. Oluşturulan bu karma sistemde farklı enerji formlarının bulunma olasılığından dolayı, çalışmada doğrultucular ve yükseltici DC/DC çevirici incelenmiştir.

Benzohra vd. (2020), araştırmada rüzgâr enerji santrali entegrasyonunun şebeke üzerindeki etkisini incelenmiş ve örnek bir çalışma olarak da Tangier rüzgâr çiftliği ele almışlardır. Amaç, rüzgâr çiftliği tarafından üretilen elektrik enerjisinin harmonikler içerip içermediğini doğrulamaktır. Çalışmada ele alınan rüzgâr çiftliği, ünite güç değeri 850 kW olan 165 rüzgâr türbininden oluşmakta yani toplam kurulu gücü 140 MW olmaktadır ve trafo merkezine yeraltı kablolarıyla bağlanacak 8 elektrik devresine ayrılmıştır. Burada elektrik şebekesinin analizi 3 durum için gerçekleştirilmiştir. İlk olarak rüzgâr çiftliğinin beklemede olduğu yani türbinlerin durduğu durum, ikinci olarak rüzgâr santralini, 42MW'lık düşük güçte çalıştırıldığı durum, son olarak ise

rüzgâr türbinlerinin neredeyse nominal güçte çalıştırıldığı durum ele alınmış ve sırasıyla toplam harmonik bozulma oranları %20.71, %1.70 ve %1.23 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, türbin üretimi durdurulduğu zaman toplam bozulma oranının belirlenen limit değerinin (%19.11)'in üzerinde olduğunu, nominal güce yakın enerji üretimde akım ve gerilim harmoniklerinin toplam bozulma oranlarının limit değerlerden daha düşük olduğunu göstermiştir.

Han vd. (2007), makalede şebekeye bağlı rüzgâr enerjisi üretim sistemi uzun süreli, kısa süreli, cut-out rüzgâr hızının altında ve üzerinde olması durumları için PSCAD/EMTDC programında simüle edilmiştir. Simülasyon işleminde ise PSCAD/EMTDC'de FORTRAN ve lineer olmayan bir harici parametrenin ara yüz yönteminde tanıtılmasıyla gerçek hava şartlarına dayalı rüzgâr enerjisi üretim sisteminin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Yani, ölçülen rüzgâr verileri FORTRAN ve ara yüz yöntemi ile simülasyona bağlanmıştır. Çünkü EMTP, PSPICE gibi simülatörler ile gerçek hava şartlarını PSCAD/EMTDC'de oluşturmak zordur ve hava şartlarının harici bir parametresinin gerekli olduğu simülasyonda güvenilirlik garanti edilemez.

Nayak ve Jamel (2018), çalışmalarında oluşturdukları sistem, rüzgâr türbini, kalıcı mıknatıslı senkron makine, kontrol şemalarıyla birlikte güç elektroniği ara biriminden oluşmaktadır. Geliştirilen model, farklı rüzgâr hızlarındaki performansı elde edebilmek için Matlab/Simulink ortamında sunulmuş, toplam simülasyon süresi ise 25 s olarak belirlenmiştir. Burada türbin kapasitesi 10 kW'tır. Başlıca sistemde oluşturulan kontrolör, rüzgâr hızı ve yükler değişse bile 100 rpm rotor dönüş hızını korumak zorundadır. Simülasyon sonuçlarına göre referans hız ile gerçek hız arasındaki fark yani kontrolörün hata değeri geçici durumlar hariç 0 olarak elde edilmiştir, kısacası hız korunmuştur. Tüm bu durumlara bağlı olarak, sık yük değişimi ve rüzgâr hızı sapmalarından dolayı akım değerinde değişikliklerin meydana geldiği geçici durumlar hariç gerilim değerinin belirli bir sınır içerisinde sabit olarak kaldığı sonucuna varılmıştır.

Ghenai ve Bettayeb (2019), bu çalışmada Sharjah üniversite binası için optimize edilmiş şebekeye bağlı PV ve yakıt hücreli, çeşitli yenilenebilir hibrit enerji sistemleri oluşturulmuş, bu sistemlerin sonuçları incelenerek en uygun olanı seçilmiştir. Temel amaç, yenilenebilir enerjinin yüksek nüfuzu, düşük sera gazı emisyonları ve düşük enerji maliyeti ile binanın elektrik yükünü karşılayabilecek şebekeye bağlı en uygun

hibrit yenilenebilir enerji sistemini tasarlamaktır. Bu amaçla sistemlerin performansı test etmek için entegre modelleme, simülasyon, optimizasyon ve kontrol işlemleri yapılmıştır.

Ak (2011), araştırmada günümüzde rüzgâr santrallerinde kullanılan generatör tipleri ifade edilerek bu generatörlerin şebekeye entegrasyonu sırasında şebeke tarafında uyulması gereken prensiplerden bahsedilmiştir. Oluşturulan bilgisayar benzetimi yardımıyla rüzgâr hız değişimleri sonucunda santral davranışları incelenmiş ve 1 faz-toprak, 3 faz-toprak ile faz-faz arızaları esnasında rüzgâr hızı artmasının, azalmasının ve sıfır olmasının şebeke üzerindeki etkileri de simüle edilmiştir.

Bayhan ve Abu-Rub (2019), çalışmalarında tasarladıkları mikro şebeke, iki dağıtık üretim sistemi (Güneş ve rüzgâr), enerji depolama sistemi ve yüklerden oluşmaktadır. Dağıtık üretimlerin çıkış akımını düzenlemek için MPC (Model Öngörü Kontrol) tekniği kullanılırken, AC mikro şebekedeki mevcut enerjiyi yönetmek için de ANFIS tabanlı EMS (Enerji Yönetim Sistemi) geliştirilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksiz yapısı mikro şebeke yönetimde önemli zorluklara sebep olmakta ve bu durumda enerji yönetim sistemine ihtiyaç duyulmaktadır.

Ahshan vd. (2018), bu çalışmada ortalama rüzgâr hızlı alanlar için dağıtık rüzgâr sistemlerinin geliştirilme potansiyelini araştırmış ve yıllık ortalama rüzgâr hızı 4.40-5.98 m/s olan, 10 m yüksekliğe sahip lokasyonlardaki rüzgâr verilerine bağlı olarak inceleme gerçekleştirmişlerdir. Aynı zamanda bu araştırmalar, bölgelerin rüzgâr verilerinin istatiksel analizlerini de (türbinler tarafından yakalanan yıllık enerji analizi, bir yıl boyunca etkili rüzgâr mevcudiyetinin analizi ve türbinlerin kapasite faktörü) içermektedir. Çalışmada 10 m yükseklik için yıllık ortalama rüzgâr hızı birbirinden farklı 5 bölge seçilmiştir. Bu bölgeler için ise farklı boyutlardaki 3 türbin çeşidi kullanılmıştır. Sonuç olarak, küçük güçlü rüzgâr türbinlerin düşük ila iyi rüzgâr hızlı sahalar için iyi bir kapasiteye sahipken, orta güçlü rüzgâr türbinlerinin ise orta ila iyi rüzgâr hızlı sahalar için çok iyi bir kapasite faktörüne sahip oldukları gözlemlenmiştir.

Eltamaly vd. (2019), çalışmalarında, dağıtım şebekeleriyle birlikte rüzgâr dağıtık üretim sistemlerinin kullanılmasını ve rüzgâr türbini rotor hızını kontrol etmek için optimum güç kontrol eğri algoritmasını incelenmişlerdir. Aynı zamanda güç sistem kalitesini artırmak için rüzgâr dağıtık üretim sistemlerinin yüke yakın kullanılmasının katkılarını

göstermek amacıyla simülasyon işlemleri gerçekleştirilmiş ve bu simülasyonlar, rüzgâr dağıtık üretim sistemlerini eklenmeden önce ve sonrası şeklinde 12 baralı, 33 kV'lık bir dağıtım sistemi ile birlikte sunulmuştur. Elde edilen bu verilere göre de iki sistem gerilim değerleri ve güç kayıpları cinsinden kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, toplam aktif güç kaybının rüzgâr dağıtık üretim sisteminin eklenmesiyle 3.02 MW değerinden 2.95 MW değerine düştüğü, toplam reaktif güç kaybının ise 50.96 MVAr değerinden 47.36 MVAr değerine düştüğü gözlemlenmiştir.

Kaplan (2014), bu çalışmada rüzgâr enerjisinin şebekeye entegrasyonu sonuncunda güç sistem kararlılığı, değişiklikleri ve sorunları ele alınmıştır. Oluşturulan sistemin modeli, uygulaması ve benzetimi için PSCAD/EMTDC programı kullanılmış ve rüzgâr türbini statik transfer anahtarı (STA) ile şebekeye bağlanmıştır. Burada amaç STA'nın, rüzgâr türbini ve şebeke arasında hızlı transfer özelliği ile yük için sürekli bir kaynak sağladığını göstermek ve sistemin güç sürekliliğini, kalitesini iyileştirmektir.

Mararakanye ve Bekker (2019), çalışmalarında generatör türü, yenilenebilir enerjinin penetrasyon seviyesi ve şebeke özellikleri olmak üzere 3 faktörün, değişken yapılı yenilenebilir enerjinin şebeke entegrasyonu sorunlarına nasıl katkıda bulunduğuna dair kapsamlı bir literatür taraması sunmaktadırlar. Bu literatür çalışmasında en yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar ve Güneş enerjisi sistemlerine odaklanılmıştır.

Yadav ve Kaur (2016), çalışmada Newton - Rapshon yöntemi ve analitik ifadeler yardımıyla bir dağıtım şebekesine rüzgâr dağıtık üretimin optimum konuma eklenmesiyle birlikte sistem gerilim profilindeki olası iyileşme ve sistem kayıplarının azaltılması için analizler yapılmıştır. Burada önerilen analizler için 14 ve 33 baralı sistemler test sistemi olarak kullanılmış, elde edilen sonuçlara göre de dağıtık rüzgâr sisteminin optimum olan bir konuma yerleştirilmediği sürece gerilm profilinde azalmanın, sistem kayıplarında da artışın yaşanabileceği gözlemlenmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının temel sorunu, şebeke güç kalitesi üzerindeki etkisidir. Bu şebeke güç kalitesi sorunlardan bazıları gerilimin ani düşmesi veya yükselmesi, gerilim titremesi, harmonikler, kesintiler ve gerilim dengesizlikleridir. Ezhililjenekkha ve Marselinebeno (2020) çalışmalarında, Güneş ve rüzgar enerjisinin şebekeye

bağlıyken neden olduğu sorunlar, bu sorunların nasıl iyileştirilebileceği, güç geliştirme cihazları ve güç dönüştürücüleri hakkında bilgi vermişlerdir.

Lu vd. (2016), çalışmada Tayvan güç sistemine bağlı ticari bir rüzgâr çiftliğinin güç kalitesi ölçüm sonuçlarını sunmaktadırlar. Bu rüzgâr çiftliği, içerisinde 23 adet 2 MW'lık çift beslemeli indüksiyon generatörleri bulunduran yani toplamda 46 MW'lık bir rüzgâr çiftliğidir. Bu çiftlik 6 adet besleyici hat ve bir yükseltici transformatör aracılığıyla Tayvan güç sisteminin ekstra yüksek gerilimli Jang-Bin trafo merkezine bağlanmaktadır. Çalışmada 35 gün boyunca güç sistemi için ortak bağlantı noktasında (PCC) ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerde elde edilen veriler arasında üç faz gerilimleri, akımları, güç değerleri, frekans değerleri, akım harmonikleri, gerilim titremeleri ve değişimleri bulunmaktadır. Ölçülen sonuçlara göre incelenen rüzgâr çiftliği güç kalitesinin şebeke kodunu karşılayabileceği açıkça görülmüştür.

Ibrahim vd. (2011) çalışmalarında, rüzgar enerjisinin şebeke entegrasyon etkileri, güç sistem işletim maliyeti, güç dengesizliklerini sunmuş ve rüzgar santrallerinin yönetimi kolaylaştırıp rüzgar enerjisinin penetrasyon oranını artırabilmek için bazı önerilerde bulunmuşlardır. Bu öneriler, depolama sistemlerinin oluşturulması, rüzgâr türbinlerin şebekeye bağlanması için gelişmiş güç elektroniği ekipmanlarının kullanılması ve hibrit sistemlerin oluşturulması şeklindedir.

Çankırı (2019), bu tez çalışmasında oluşturulan sistem için güç akışı ve kısa devre analizi uygulanmış ve bu analizden elde edilen sonuçların reel sonuçlara yakın olması amacıyla gerçek rüzgâr hızı verilerinden ve Çanakkale Organize Sanayi Bölgesi(OSB) barasının şebeke bilgilerinden yararlanılmıştır. IEEE 14 bara test sistemi şebeke analizi için, güç sistemleri analizi programı (ETAP) simülasyon için kullanılmıştır. Şebekenin çalışma şartları, farklı koşullar (tam kapasite, minimum kapasite, yaz dönemi, kış dönemi) için incelenmiş ve enerji üretimi ile tüketim değerleri açısından rüzgar enerji santralinde üretilen güç ile talep güç karşılaştırılmıştır.

Akyürek (2015), çalışmada 10 adet 900 kW'lık rüzgâr türbinleri bulunduran yani toplam kurulu gücü 9 MW olan rüzgâr santrali incelenmiş ve bu sistemin üreteceği enerjinin tahmini yapılmıştır. Bu kapsamda, enerji tahmini için adaptif ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır. Bu enerji tahmini ile talep edilen enerji birbiriyle kıyaslanarak fazla enerjinin miktarı elde edilmiştir. Bu miktar depolama sistemlerini

belirlemede kullanılmıştır. Power System Analysis Toolbox' da IEEE 14 baralı sisteme şebekenin teknik limitleri entegre edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre de depolama sisteminin normalde maliyet açısından uygun olmadığı ancak türbin gücü artıkça depolama maliyeti de azalacağından dolayı uygun olabileceği gözlemlenmiştir.

(Kocatepe vd., 2009) makalede sabit durum gerilim değişim oranı, ters güç, gerilim titreşimleri, kısa devre akımı ve harmonikler gibi güç kalitesi sorunları, bilgisayar simülasyon programı ve IEC tarafından önerilen basitleştirilmiş hesaplama yöntemleri uygulanarak araştırılıp, hesaplanmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda, iki farklı hesaplama yöntemi ile elde edilen gerilim değişim oranlarının birbirine çok yakın olduğu, rüzgar üretim sisteminin güç faktörünün 0.85 geri olması durumda gerilim değişim oranlarınının %5 sınırını aştığı ancak oluşan harmonik akımların ve toplam harmonik akım bozulmasının standartlar dahilinde olduğu görülmüştür.

(Machmoum vd., 2010) çalışmada, rüzgâr enerjisi üretimi için çift beslemeli indüksiyon generatör kontrolü açıklanmış ve bu amaçla generatör modeli oluşturularak makine tarafı ile şebeke tarafı dönüştürücüleri için geçerli olan kontrol stratejisini sunmuşlardır. Titreme (fliker) olayı, sürekli çalışma durumunda incelenmiş ve bu titreme (flicker) seviyesi titreşim ölçer (flikermetre) kullanılarak ölçülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda makine tarafı dönüştürücüsünün kontrolü sonucunda flicker seviyesinin azaltılabileceği gösterilmiştir.

(Kim vd., 2012) çalışmada, yüksek gerilim doğru akım (HVDC) sistemi ve termik santralden oluşan Jeju adası güç sistemi için rüzgâr santrallerinin modellenmesini ve etki analizini sunmaktadır. Bu çalışmada, toplam 88 MW rüzgâr çiftliği, 300 MW HVDC sistemi, termik santraller ve Jeju güç sistem yükü olmak üzere 4 önemli ana bileşen PSACAD/EMTDC programı yardımıyla modellenmiştir. Modelleme işlemi sonucunda iki vaka çalışması için simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu vaka çalışmalarından biri farklı rüzgâr hızları altında sabit, sürekli durum çalışmasıyken, diğeri ise anma değerinden daha yüksek rüzgâr hızları nedeniyle tüm rüzgâr çiftliklerinin Jeju elektrik şebekesinden aniden kesilmesi anındaki geçici durum çalışmasıdır. Geçici durum esnasında rüzgâr çiftliklerinin toplam güç değerleri sıfırlanmıştır. Bu durumdaki sonuçlar incelendiğinde rüzgâr çiftliklerinin kapatılmasıyla sistem frekansının aniden düştüğü ve bu duruma ilk termik santrallerin yanıt verdikleri ardından ise asıl HVDC sisteminin yük dengesini toparladığı görülmüştür.

Bekri ve Mekri (2018) çalışmalarında sincap kafesli indüksiyon generatörlü rüzgar türbininin şebekeye entegre ederken oluşabilecek ani gerilim çökmesi durumunu araştırmış, çalışmada önerilen sürekli güç akış analizi ile rüzgar türbinlerinin optimal lokasyonlarının belirlenmesi ve sistem gerilim kararlığının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan IEEE 14 baralı test sistemi ile birlikte sırasıyla aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1- Sürekli güç akış analizi tekniğinin rüzgar generatörlerinin optimal konumlara yerleştirilmesi problemine karşı önemli bir potansiyele sahip olduğu,
2- Yükleme parametresini maksimum yaparak gerilim kararlılığının daha da iyileştirilebileceği,
3- Rüzgar generatörlerinin optimal konumlara yerleştirilmesi durumunda daha iyi bir gerilim profilinin elde edileceği.

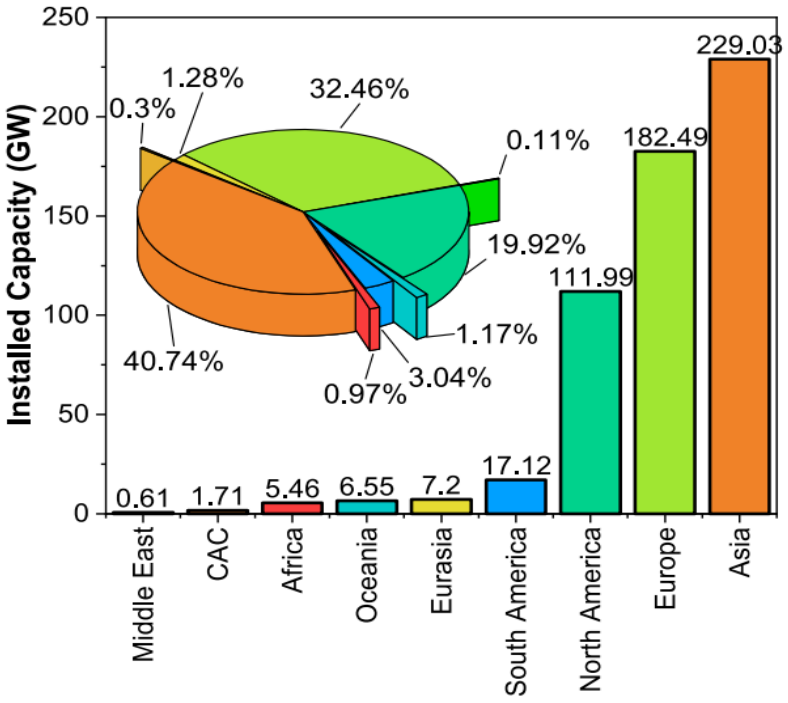
Adetokuna vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada da yine sürekli güç akış analiz tekniği detaylı olarak anlatılmış ve bu tekniğin gerilim kararlılığı üzerindeki olumlu etkisi vurgulanmıştır.

Chen ve Spooner (2001) makalede, değişken hızlı rüzgar türbinlerinin bağlı olduğu bir şebekede gerilim dalgalanması ve harmonik bozulmanın incelenmesi amacıyla uygun modelleme ve simülasyon tekniklerini geliştirmiş, önerilen güç elektroniği ara yüzü ve kontrol sistemi ile sorunların en aza indirilebileceği göstermişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda doğrudan tahrikli değişken hızlı rüzgâr türbinlerinden büyük miktarda güç üretildiğinde ve nispeten küçük güçlü bir şebekeye bağlandığında önemli gerilim dalgalanmalarının meydana gelebileceği ifade edilmiş ve sistem harmoniklerinin nispeten düşük maliyetli filtre ile birlikte yüksek frekanslı PWM anahtarlama tekniği yardımıyla azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.

Bekdirhan (2014), çalışmasında en önemli güç kalitesi problemi olan gerilim kararlılığı konusunu incelenmiştir. Benzetim çalışmaları ilk olarak IEEE 9 baralı test sistemine rüzgâr enerji santrali bağlantılı ve rüzgâr enerji santrali bağlantısız olarak iki farklı şekilde gerçekleştirilmiş ve bu çalışmalar için de MATLAB toolboxı olan PSAT kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre rüzgâr santrali sistemin maksimum yüklenebilirlik limit değerini düşürürken, arıza sonrasında da iyi sonuçlar vermiştir.

1.2. Rüzgâr Enerjisi

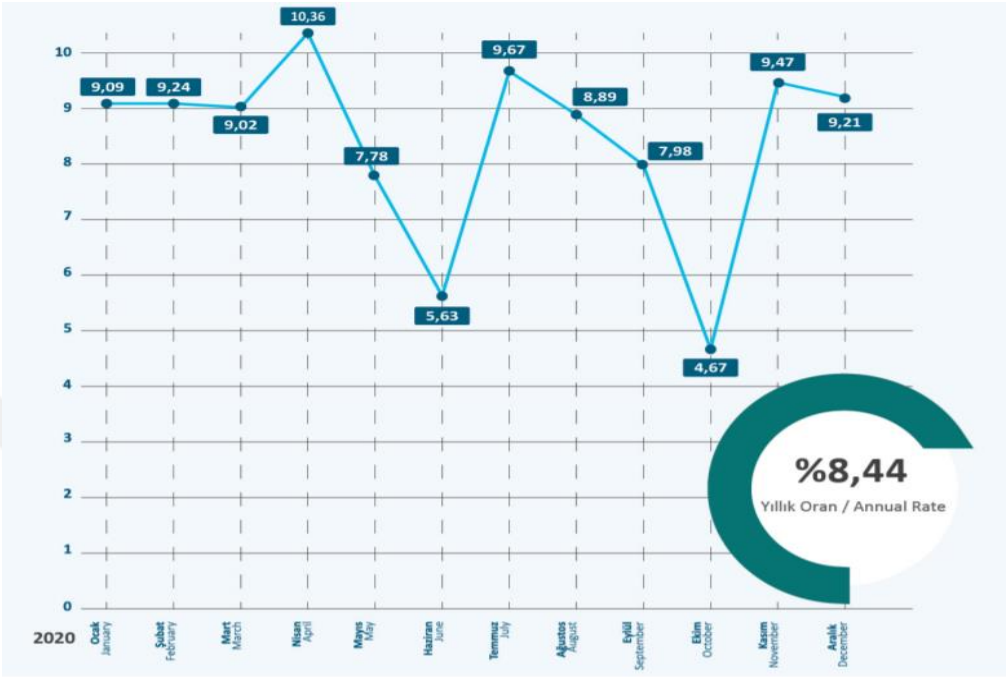
Günümüzde sürekli olarak artan enerji ihtiyacını karşılamada, kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtları kullanan geleneksel enerji üretim sistemlerinin yerine, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan üretim sistemleri daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Bu durumun temel nedeni yenilenebilir enerji kaynaklarının, fosil yakıtların aksine çevre dostu ve tükenmez olmalarıdır. Rüzgâr enerjisi, elektrik üretiminde en fazla tercih edilen yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Dünyada rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminde önde gelen ülkeler arasında Çin, ABD ve Almanya vardır. Şekil 1.1'de rüzgar türbinlerinin kurulu güç kapasitelerinin Dünya üzerindeki dağılımı gösterilmektedir. Dünyada en fazla rüzgâr kurulu güç kapasitesine sahip olan Asya'yı Avrupa ve Kuzey Amerika takip etmektedir (Ahmed vd., 2020).



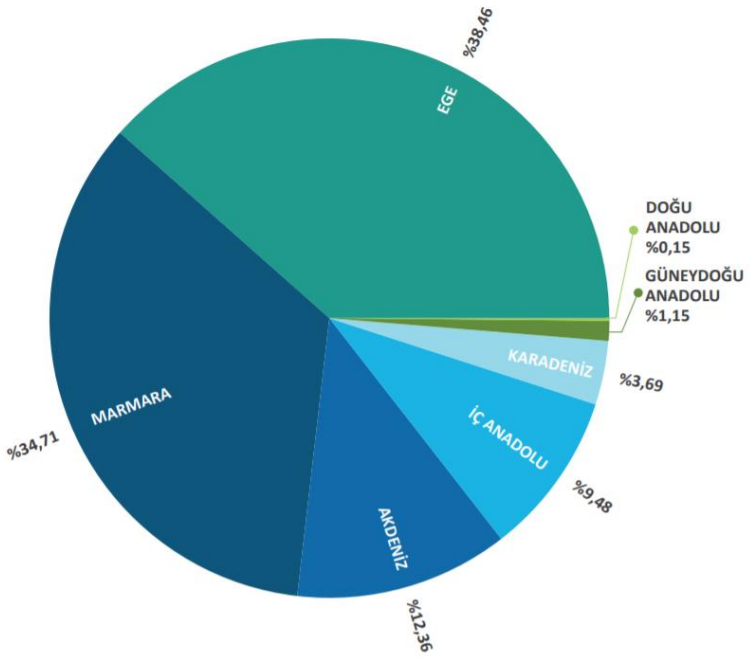
Şekil 1. 1. RES kurulu güç kapasitesinin Dünyadaki dağılımı

Şekil 1.2'de 2020 yılı için rüzgardan elde edilen aylık enerji miktarının, toplam üretilen enerji miktarına göre yüzdelik değerleri verilmiştir. Türkiye'de TÜREB (Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği) verilerine göre, 2020 yılında rüzgârdan elde edilen enerji miktarı toplam 24 milyon 484 bin 679 MWh kadardır. Bu değere göre Türkiye'de

üretilen yıllık elektrik miktarının yaklaşık % 8.44'nü rüzgârdan sağlanmaktadır. Bu değer, Nisan ayında %10.36'ya kadar artmaktadır (TÜREB, 2020).



Şekil 1. 2. Türkiye'de 2020 yılında üretilen aylık enerjinin rüzgârdan sağlanan yüzdelik değerleri

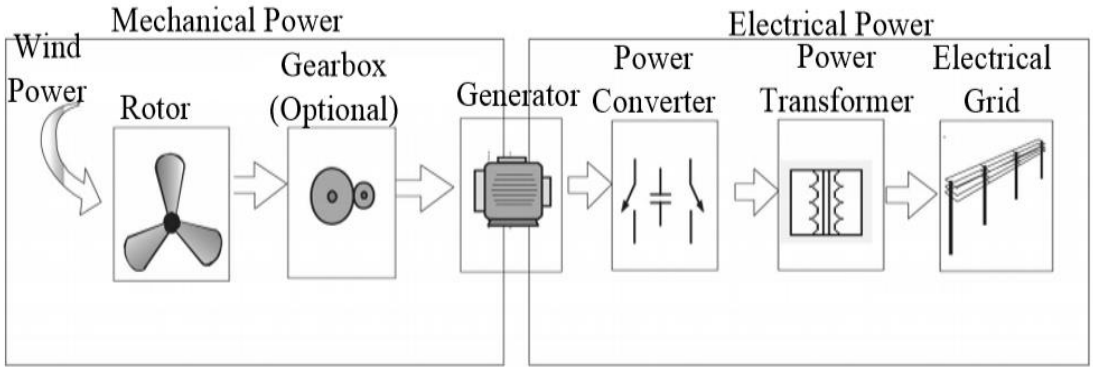


Şekil 1. 3. İşletmedeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı

Türkiye'deki toplam rüzgâr kurulu güç değeri 2020 yılında, TÜREB'in TÜREK(Türkiye Rüzgâr Enerjisi Kongresi) kongre raporuna göre 1.224 MW artarak 9.305 MW değerine ulaşmıştır. Şekil 1.3'de ülkemizde işletmedeki RES'lerin bölgelere göre dağılımı gösterilmiştir. Bu dağılıma göre ülkemizdeki RES'lerin, rüzgâr potansiyeli yüksek olan Marmara ve Ege bölgelerinde daha fazla yoğunlaştığı görülmektedir (TÜREK, 2020).

1.3. Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinleri, dönüştürdükleri rüzgâr enerjisi ile generatörün tahrik edilmesini sağlayan yapılardır. Generatör yardımıyla da elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilir. Elde edilen elektik enerjisi trafo ve iletim hatları aracılığıyla şebekeye bağlanmaktadır. Şekil 1.4'de rüzgâr türbin sisteminin temel çalışma safhaları gösterilmiştir (Eltamaly vd., 2019). Günümüzde kullanılan rüzgâr türbinlerinin gücü birkaç Watt ile MW aralığında değişir. Rüzgâr türbinlerinin verimli bir şekilde çalışabilmesi için tüm bileşenler, dikkatli bir şekilde tasarlanmalı ve sisteme entegre edilmelidir (Dabakoğlu, 2017).

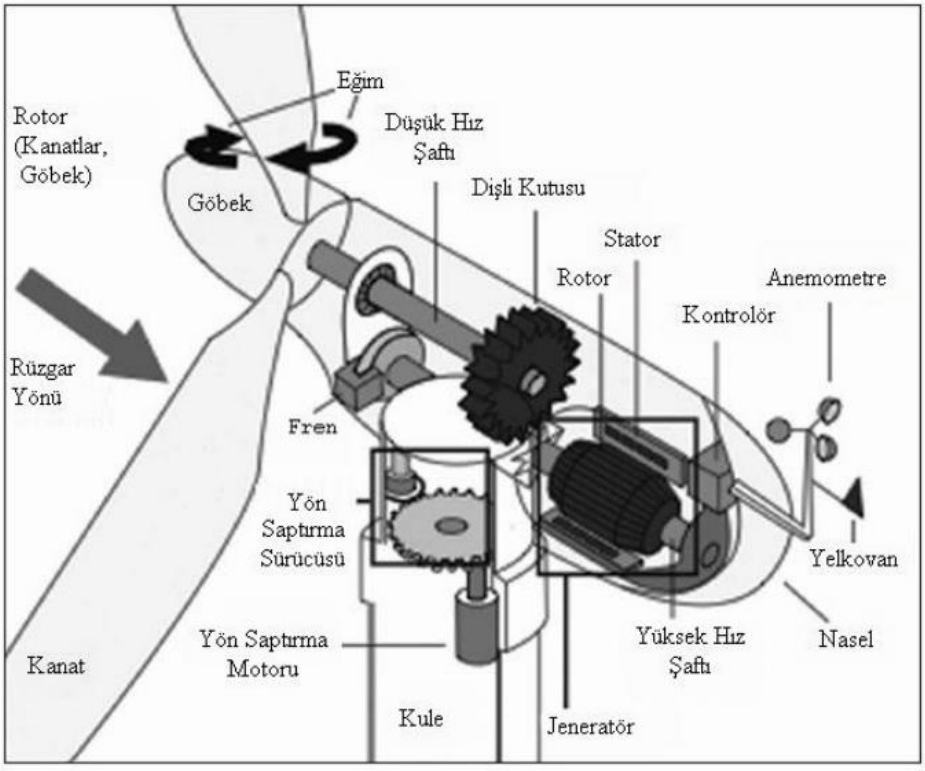


Şekil 1. 4. Rüzgâr türbin sisteminin çalışma safhaları

1.4. Rüzgâr Türbin Elemanları

Rüzgâr türbin çeşidine bağlı olarak türbini oluşturan elemanlar farklılık göstermektedir. Ancak, standart bir rüzgâr türbini, kule, makine dairesi (nasel), göbek ve kanatlar olmak üzere 4 temel kısımdan oluşur. Makine dairesi içerisinde, generatör, şaft sürücü, fren ve kullanılması halinde dişli kutusu, gibi önemli bileşenler yer alır. Üst kısmında ise rüzgâr

sensörleri bulunmaktadır. Rüzgar türbinini oluşturan bu elemanlar Şekil 1.5'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir(Rona, 2014; Uslu, 2019).



Şekil 1. 5. Rüzgâr türbininin iç yapısı

1.4.1. Kule

Rüzgâr türbinini taşıyan kısımdır. Genellikle çelik veya beton malzemeden yapılırlar. Rüzgâr türbin kulelerinin tasarımı, boru veya kafes şeklinde olmaktadır. Boru şeklinde olan kuleler içerisinde bulunan merdiven nedeniyle türbin bakımını yapacak personel için daha emniyetlidir ve genellikle büyük rüzgâr türbinlerinde kullanılırlar. Boyları yaklaşık 20- 30 metre civarındadır.

Kaynatılmış çelik profiller kullanılarak üretilen kafes şeklinde kuleler ise günümüzde büyük rüzgâr türbinlerinde çok nadir olarak kullanılır. Estetik olmayan görüntüleri nedeniyle çok fazla tercih edilmezler. Bu kulelerin tek avantajı boru şeklindeki kulelere göre kullanılan malzemenin az olması yani daha az maliyetli olmalarıdır (Turgut ve Selçuk, 2016).

1.4.2. Rotor

Rotor, rüzgâr türbinin en önemli kısımlarından biridir. Kanat ve göbek olmak üzere 2 temel kısımdan oluşmaktadırlar. Rotorlar rüzgârın kinetik enerjisini mekanik mil gücüne çevirirler ve genellikle rotor kanatları, cam elyafla güçlendirilmiş plastiklerden üretilmektedir. Kanatların üretiminde çelik malzeme de kullanılabilir. Ancak bu durumda eğilmelere karşı dayanım artırılmış olsa da kanatlarda yorulma ve korozyon gibi problemler daha fazla meydana gelmektedir. Günümüzde rotorlar 2 veya 3 kanatlı olarak tasarlanmaktadır. Tek kanatlı rotor tasarımı pratikte mümkün gözükse de rotor dengelenmesinde oluşabilecek problemler, vibrasyon ile gürültünün artması gibi nedenlerle uygulamada tercih edilmez. Genel olarak, türbinde kullanılan kanatların profili ve malzemesi, türbindeki güç verimi açısından oldukça önemlidir(Ceylan, 2020).

Rotor göbeği içerisinde kanat açı motorları, konvertörleri ve sensörleri bulunduran bir elemandır, ana şafta bir flanş bağlantı ile takılır. Üçlü silindirik veya küresel yapıda olmaktadırlar ve genellikle grafit demirden meydana gelirler (Rona, 2014).

1.4.3. Dişli Kutusu

Dişli kutusu, düşük hızlı rotoru, yüksek hızlı generatöre bağlamak amacıyla kullanılır. Yani, kanat milinin düşük devir sayısının generatörün ihtiyaç duyduğu yüksek devir sayısına çıkarılmasını sağlamaktadır. Çok kutuplu senkron generatörlerin kullanıldığı rüzgar türbin sistemlerinde çoğunlukla dişli kutusu bulunmaz. Çünkü bu senkron generatörler, doğrudan elektrik şebekesine bağlı olmadıkları için düşük hızlıdırlar. Bu dişli kutusunun kullanılmadığı rüzgâr türbin sistemlerinde hızın düşük olması nedeniyle sürtünme kayıpları, bakım maliyeti azalmakta, türbin çalışma süresi de artmaktadır. Bu sistemlerin dezavantajı ise, çok kutuplu senkron generatör bulundurmasından dolayı generatör kütlesinin daha ağır olmasıdır (Ceylan, 2020).

1.4.4. Fren Mekanizması

Rüzgâr enerji santrallerinde, aşırı rüzgâr durumunda veya iletim hattı ile generatörde oluşabilecek olası bağlantı problemleri ve arıza durumlarında rüzgâr türbinleri aniden ivmelenebilir. Bu durum türbinin kontrolden çıkarak zarar görmesi anlamına gelir. Bu esnada, fren mekanizması türbinin çok yüksek hızlarda dönmesini engelleyerek türbinin korunmasını sağlamaktadır. Rüzgâr türbinlerinde aerodinamik fren ve mekanik fren olmak üzere iki tür fren sistemi bulunmaktadır. Aerodinamik fren kanat açısının

değiştirilmesi prensibine dayanan bir kanat uç freni iken, mekanik fren dişli kutusuna yerleştirilen bir disk frenidir. Mekanik fren genellikle aerodinamik frende herhangi bir arızanın olması durumunda devreye girmektedir (Dabakoğlu, 2017).

1.4.5. Generatör

Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren generatörler, rüzgâr türbinleri için en önemli elemanlardan biridir. Rüzgar türbinlerinde kullanılabilecek doğru akım, asenkron ve senkron olmak üzere 3 çeşit generatör vardır.

Doğru akım generatörleri genellikle şebekeden bağımsız olarak çalışan küçük rüzgâr türbinlerinde kullanılmaktadırlar. Özellikle sabit mıknatıslı ve doğrultucu ile çalışan DC generatörler, sınırlı güç kapasitesine sahip olduklarından dolayı, yüksek güçlü rüzgâr türbinleri için uygun değildirler. Aynı zamanda bakım ihtiyaçları yüksektir. Bu generatörlerin en büyük avantajı, hız kontrollerinin kolay olmasıdır.

Asenkron generatörler, maliyetlerinin düşük olması, sağlam ve basit bir yapıya sahip olmaları nedeniyle rüzgâr türbinlerinde en çok kullanılan generatörlerdir. Bu generatörlerin en önemli dezavantajı stator sargılarının mıknatıslanma akımına ihtiyaç duymasıdır. Bu durum asenkron generatörlerin şebeke veya güç elektroniği elemanlarından reaktif güç çekmesine neden olur. Bu sorun, çoğunlukla generatörün terminal uçlarına kondansatör bağlanarak giderilmektedir. Asenkron generatörler, sincap kafesli ve rotoru sargılı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Sincap Kafesli Asenkron Generatörler (SKAG), türbin rotoruna dişli kutusu ile bağlanırken, şebekeye doğrudan bağlanmaktadırlar. Bu nedenle bu generatörlerin bağlandığı rüzgâr türbin sistemlerinde, rüzgâr gücündeki dalgalanmalar, doğrudan şebekeye aktarılır. Bu durum şebeke bağlantısı esnasında, akım değerinin anma akımın 7-8 katına çıkmasına ve özellikle de zayıf güçlü şebekelerde ciddi gerilim bozulmalarına neden olabilir. Aynı zamanda bu generatörlerde aktif güç, reaktif güç, rotor hızı ve terminal gerilimi arasında doğrusal ilişki olması nedeniyle yüksek rüzgâr hızlarında aktif güç artışı, şebekeden çekilen reaktif güç miktarının da artmasına neden olacaktır. Bu nedenle, SKAG'lerde reaktif güç kontrol edilemez, bu generatörler, hem sabit hem de değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılabilirler. Rotoru Sargılı Generatörler (RSAG) ise, SKAG'lerden farklı olarak, rotor devresi tarafından manyetize edilerek, rotor uyartım akımı ile aktif ve reaktif güç kontrolü gerçekleştirebilmektedir. Yani, bu generatörlerin şebeke

tarafından manyetize edilmesi gerekmez. Ancak rotor sargılarının bağlandığı bilezikler nedeniyle bakım maliyetleri biraz daha fazladır. Uygulamada en çok tercih edilen türü Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) olmaktadır.

Senkron generatörlerde rotor manyetik alanı, ya rotor sargılarından doğru akımın akmasıyla ya da sabit mıknatıslar tarafından sağlanmaktadır. Yani, bu generatörler mıknatıslanma akımına ihtiyaç duymazlar. Bu nedenle, asenkron generatörlere göre daha kaliteli güç çıkışına sahiptirler, güç faktörleri ve verimleri daha yüksektir. Senkron generatörler uygun kutup sayısına sahip olurlarsa, dişli kutusu olmadan türbin rotoruna bağlanabilirler. Kendi arasında rotoru sargılı ve kalıcı mıknatıslı olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Rotoru Sargılı Senkron Generatörler (RSSG), uyarma devresine ihtiyaç duyarlar ve bu durum uyarma akımını oluşturmak için ek elemanların kullanılmasına neden olmaktadır. Bu akımların rotora iletilmesinde kullanılan fırçalar nedeniyle bakım ihtiyacı ve maliyeti artırmaktadır. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörler (KMSG) ise, RSSG'lerden farklı olarak kendinden uyartımlıdır. Bu durum KMSG'lerin, yüksek güç faktörü ve verime sahip olmalarını sağlamaktadır. Ancak, KMSG'lerin kendinden uyartımlı olması güç elektroniği elemanlarının kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir. Çünkü kendinden uyartımla üretilen gerilim ve frekansın şebekeye aktarılacak gerilim ve frekansa göre ayarlanması gerekmektedir. Bu generatörlerin dezavantajlarından bir tanesi de yüksek sıcaklıklarla sürekli mıknatısların manyetik özelliklerini kaybedebilmeleri ve bu duruma bağlı olarak ek soğutucu sistemlere ihtiyaç duyulmasıdır (Dabakoğlu, 2017; Taşcıkarağlu, 2008; Uslu, 2019).

1.4.6. Yön Saptırma (Yaw) Sistemi

Rüzgâr türbin rotorunu, rüzgâr değişimlerine bağlı olarak rüzgâra karşı dik olacak şekilde tutmaya yarayan mekanizmadır.

1.4.7. Anemometre

Rüzgâr hızını ölçerek, hız değerlerini kontrol sistemine aktaran yapılardır.

1.4.8. Rüzgâr Gülü (Yelkovan)

Rüzgâr yönünü ölçen yapıdır. Rüzgâr yön değişimlerinin, yön saptırma (yaw) motoruna iletilmesini sağlar.

1.5. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgâr türbinleri, eksenleri, yapıları, kontrol sistemleri, güç değerleri gibi etkenlere bağlı olarak farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır.

1.5.1. Eksenlerine Göre Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinleri eksen yapılarına göre kendi arasında yatay ve dikey eksenli rüzgâr türbinleri şeklinde 2'ye ayrılmaktadır,

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri, dönme eksenleri rüzgârın geliş yönüne paralel olacak şekilde tasarlanan türbinlerdir. Bu türbinlerin verimleri yaklaşık %45 civarındadır ve günümüzde özellikle de ticari uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Bu türbinler genellikle sapma (yaw)mekanizmaları yardımıyla yönleri rüzgârı önden alacak şekilde dizayn edilmektedirler. Ancak günümüzde rüzgârı arkadan alacak şekilde tasarlanan yatay eksenli rüzgâr türbinleri de mevcuttur. Bu türbinlerde sapma (yaw) mekanizması bulunmaz. Aynı zamanda bu türbinler de rotor, rüzgâr yönüne göre kulenin arka tarafında kaldığından dolayı gölgeleme etkisi artmakta, kanatlara çarpan rüzgâr hızında azalma meydana gelmektedir. Bu azalma kanadın esneyerek yorulmasına ve türbinin daha gürültülü çalışmasına neden olur.

Dikey eksenli rüzgâr türbinleri, dönme eksenleri rüzgârın geliş yönüne dik olacak şekilde tasarlanan türbinlerdir. Verimleri %35 civarındadır. Generatör, dişli kutusu gibi tüm ağır donanımlar yerdedir. Yani, türbin kule üzerine yerleştirilmez. Bu durum düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin bakım ve onarımlarının kolay olmasını, maliyetin azalmasını sağlamaktadır. Ancak yere yakın olmaları nedeniyle düşük hızlı ve türbülanslı rüzgârlara maruz kalırlar. Bu nedenle, verimleri yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre daha düşük olmaktadır. En yaygın olarak kullanılan Savonius ve Darrieus şeklinde iki tipi vardır (Alkan, 2018; Taşcıkarağlu, 2008; Uslu, 2019).

Savonius rüzgâr türbinleri, iki yatay disk arasına yerleştirilen kanatlar, merkezleri birbirine simetrik olacak şekilde kaydırılmış iki yarım silindirden oluşmaktadır. Bu türbinlerde rüzgârın etkisiyle silindirin iç kısmında pozitif, dış kısmında ise negatif moment oluşur. Pozitif moment değerinin, negatif moment değerinden daha büyük olması nedeniyle pozitif moment yönünde türbin dönmeye başlar. Bu türbinler, yapı

olarak basittir ve başlangıç anında rüzgâr yönünden bağımsız olan yüksek tork değerine sahiptirler(Çetin vd., 2019).



Şekil 1. 6. Savonius türbin

Darrieus rüzgâr türbinlerinin iki kanadı, elips şeklini oluşturacak şekilde yerleştirilmektedir. Dönme hareketi, kanatların iç bükey ile dış bükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkıyla oluşmaktadır. Savonius rüzgâr türbinlerine göre, bu türbinlerin aerodinamik performansı daha yüksektir. Ancak başlangıç anındaki hareketleri için tahrik motoruna ihtiyaç vardır. Şekil 1.6'da Savonius türbin, Şekil 1.7'de ise Darrieus türbin modeli gösterilmiştir (Çetin vd., 2019).



Şekil 1. 7. Darrieus türbin

1.5.2. Güç Değerlerine Göre Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinleri güç değerlerine göre mikro, küçük, orta ve büyük rüzgâr türbinleri şeklinde dört gruba ayrılmaktadır.

Mikro türbinlerin güç değerleri 0-3 kW arasında değişiklik göstermektedir. Bu türbinler, genellikle elektrik şebekesinin olmadığı yerlerde, sokak aydınlatmalarında, ev içi sistemlerde kullanılmaktadır.

Küçük rüzgâr türbinlerin güç değerleri 100 kW değerinden daha azdır. Bu türbinlerin yapısında genellikle sabit mıknatıslı generatörler kullanılmaktadır. Çiftlik ve kırsal alanlardaki su pompalama sistemlerinde, konutlarda ve uzak iletişim sistemleri gibi uygulama alanlarında tercih edilen rüzgâr türbinlerdir.

100 kW ile 1 MW arasında güç değerine sahip olan rüzgâr türbinleri ise orta büyüklükteki rüzgâr türbinleridir. Bu türbinler, günümüzdeki rüzgâr türbinleri arasında en yaygın kullanılanlardır. Hem şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız olarak çalıştırılabilirler.

1 MW ve daha fazla güç değerine sahip olan rüzgâr türbinleri ise büyük rüzgâr türbinleri olarak adlandırılmaktadır. Bu rüzgâr türbinlerinin kullanımı, günümüzde artış göstermeye başlamıştır. Özellikle de denizde kurulan rüzgâr santrallerinde tercih edilmektedirler (Rona, 2014; Turgut ve Selçuk, 2016).

1.5.3. Hızlarına Göre Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinleri hızlarına göre sabit ve değişken hızlı rüzgâr türbinleri şeklinde ikiye ayrılmaktadır.

Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde rotor hızı sabittir ve değeri, rüzgâr hızından bağımsız olarak şebeke frekansı, dişli oranı ve generatör tarafından belirlenir. Bu türbinlerde genellikle indüksiyon generatörler kullanılmaktadır. Yapıları basit ve sağlamdır. Bu türbinlerin en önemli dezavantajları da kontrol edilemeyen reaktif güç tüketimleri ile güç kalitesi üzerindeki kontrol kabiliyetlerinin sınırlı olmasıdır. Rüzgâr hızında meydana gelen tüm dalgalanmalar, bu türbinlerin sabit hızlı işletimlerinden dolayı mekanik tork dalgalanmalarına dönüştürülür. Bu durum da, türbin ömrünü kısaltan mekanik baskıların oluşmasına ve şebekede dalgalanmalara yol açmaktadır.

Değişken hızlı rüzgâr türbinleri, geniş bir rüzgâr aralığında, maksimum verim elde edebilmek amacıyla tasarlanan türbinlerdir. Bu türbinler yapı olarak daha karmaşıktır. Türbinlerin rotor hızı rüzgâr hızına göre ayarlandığı için bu türbinlerde sabit hızlı rüzgâr türbinlerinden farklı olarak, rüzgâr hızındaki dalgalanmaların neden olduğu güç dalgalanmaları generatör hızıyla azaltılır. Aynı zamanda şebeke bozuklukları durumunda oluşabilecek güç salınımları da daha küçük olmaktadır. Bu türbinler, yüksek güç kontrol kabiliyetine sahiptirler ve yanıt süreleri oldukça kısadır (Muljadi vd., 2007; Uslu, 2019).

Sabit hızlı rüzgâr türbinleri generatöre doğrudan bağlanırken, değişken hızlı rüzgâr türbinleri doğrudan bağlanamazlar. Yine bu durumun dışında değişken hızlı rüzgâr türbinleri, sabit hızlı rüzgâr türbinleriyle karşılaştırıldığında %8 ila %15 civarında daha fazla enerji üretir. Ancak değişken hızlı rüzgâr türbinleri de yük terminallerinde sabit gerilim ve frekansı sağlayabilmek için güç elektroniği dönüştürücülerinin kullanımını gerektirmektedir (Nayak ve Jamel, 2018).

1.5.4. Güç Kontrol Sistemlerine Göre Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinlerinin dayanıklılıklarını artırma ve çalışma esnasında oluşabilecek hasarları önlemek amacıyla türbin yapılarında farklı kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Bu kontrol sistemlerine göre rüzgâr türbinleri durma (stall) hız kontrollü ve kanat açısı (pitch) kontrollü olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Durma (stall) hız kontrollü rüzgâr türbinleri, türbin hızının istenilen aralık içerisinde kalmasını sağlayan aktif fren mekanizmasına sahip türbinlerdir. Bu türbinlerde rotor kanatları, türbin göbek kısmına sabit açılarla sabitlenmektedir. Nominal hız değerinin üzerindeki rüzgâr hızlarında, türbinlerden elde edilen güç değeri düşük olmaktadır. Bu durum, hız kontrollü türbinlerin önemli dezavantajlarından biridir.

Kanat açısı (pitch) kontrollü rüzgâr türbinleri ise, rüzgâr hızına bağlı olarak kanat eğim açısının belirli bir aralık içinde kalmasını sağlayan kontrol mekanizmasına sahip türbinlerdir. Yani, rotor kanadı, rüzgâr hızına göre hidrolik veya mekanik sistemler ile kendi ekseni etrafında dönebilecek şekilde konumlandırılmıştır. Bu türbinlerde nominal hız değerinin üzerindeki rüzgâr hızlarında, elde edilen güç değeri sabittir. Bu durum güç çıkışının daha kaliteli olması anlamına gelmektedir. Ancak bu türbinler ani rüzgârlara

karşı daha hassas olmakta ve bu nedenle ani rüzgâr durumlarında türbin güç çıkış değerinde büyük değişiklikler meydana gelebilmektedir (Uslu, 2019).

1.5.5. Şebeke Bağlantısı Duruma Göre Rüzgâr Türbinleri

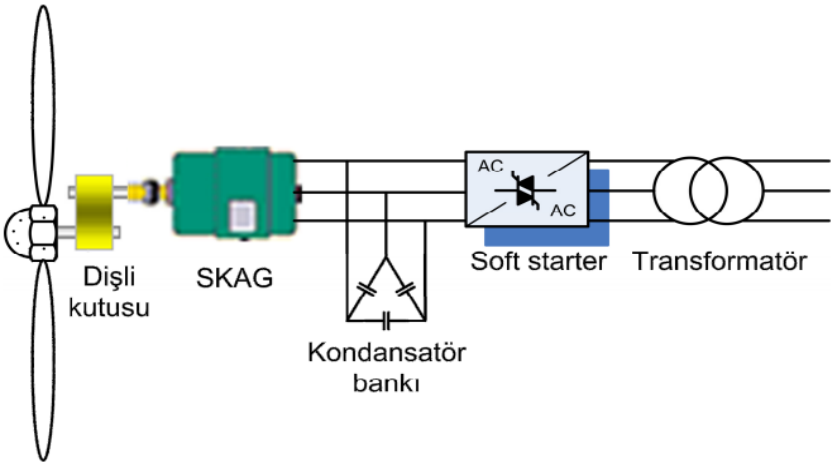
Rüzgâr türbinleri şebekeye bağlı ya da şebekeden bağımsız olarak çalışabilmektedir. Genellikle orta ve büyük rüzgâr türbinlerin çoğu şebekeye bağlı olarak çalışmakta iken, küçük rüzgâr türbinlerinin çoğu şebekeden bağımsız olarak çalışmaktadır. Şebekeye bağlı rüzgâr türbinlerinin en önemli avantajı depolama sistem zorunluluğunun olmamasıdır. Şebekeden bağımsız rüzgâr türbinlerinde, rüzgârın kesintili yapısı, türbin güç değerinde kısa zaman aralıkları içerisinde önemli değişikliklerin oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle bu türbinlerdeki sistem güvenilirliğinin sağlanması amacıyla, bu yapılara batarya, dizel generatör ve fotovoltaik sistemler vb. eklenebilir (Rona, 2014).

1.6. Rüzgâr Türbin Tasarımları

Tasarlanan rüzgar türbinlerinde, asenkron generatörler hem sabit hem de değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılırken, senkron generatörler sadece değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadır(Rona, 2014). Günümüzde çok kullanılan rüzgâr türbin tasarımları kendi arasında 4'e ayrılmaktadır.

1.6.1. A Tipi Rüzgâr Türbini

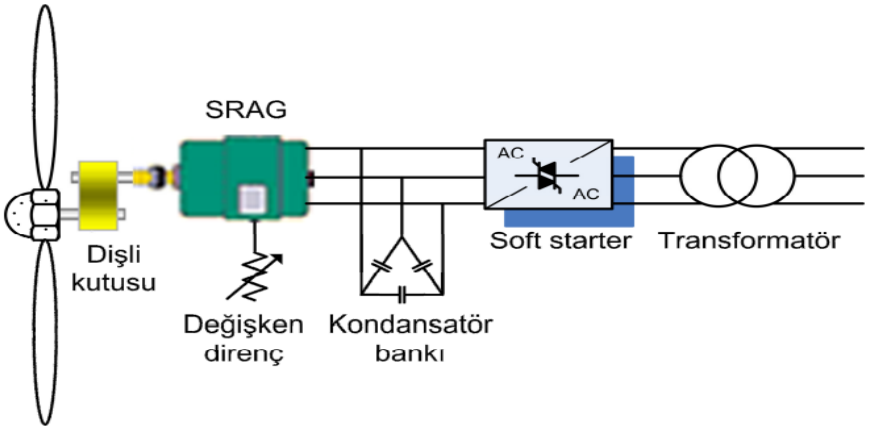
Şekil 1. 8'de A tipi rüzgâr türbin modeli gösterilmiştir. Bu türbinler, sabit hızlı rüzgâr türbinleridir ve yapılarında sincap kafesli asenkron generatörleri bulundurmaktadırlar. SKAG'ler, stator kısmından şebekeye doğrudan bağlanır. Bu generatörlerin reaktif güç ihtiyaçları için A tipi türbin tasarımında, kondansatör grubu, oluşabilecek ani akımları sınırlamak amacıyla da soft- stater kullanılmaktadır. Piyasada kullanımı %15 civarında olan bu tip türbin tasarımının en büyük dezavantajı, hız kontrol özelliklerinin olmamasıdır. Aynı zamanda A tipi rüzgâr türbinlerinin şebeke güç kalitesi üzerindeki etkisi diğer türbin tasarımlarına göre daha fazladır. Çünkü sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde, rüzgâr hızında oluşan dalgalanmalar mekanik baskılara ve daha sonra elektriksel güç dalgalanmalara yol açmaktadır. Bu nedenle bu sistemdeki mekanik yapıların, şiddetli rüzgârların mekanik baskılarına dayanacak şekilde tasarlanması gerekmektedir (Dabakoğlu, 2017; Taşcıkarağlu, 2008).



Şekil 1. 8. A tipi rüzgâr türbini

1.6.2. B Tipi Rüzgâr Türbini

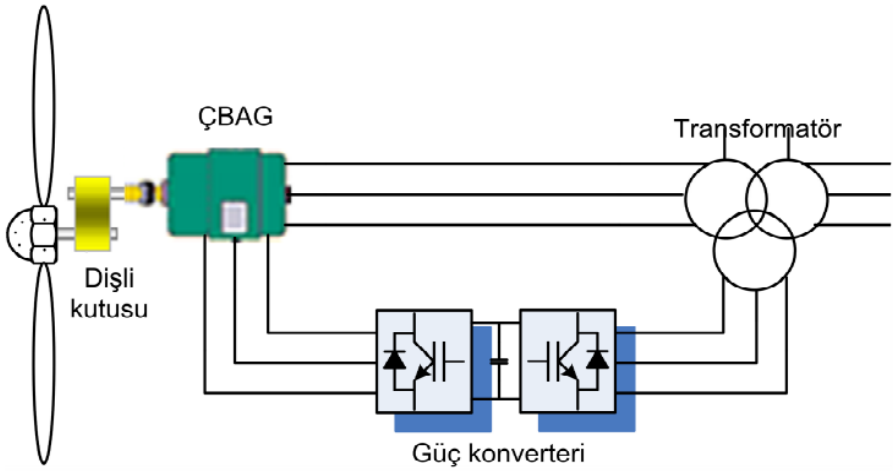
Şekil 1.9' da B tipi rüzgar türbin modeli gösterilmiştir. Bu türbinlerde, değişken rotor direncine sahip rotor sargılı asenkron generatörler kullanılmaktadır. Bu generatörlerin stator kısımları, şebekeye doğrudan bağlanır. Yapıda bulunan kontrollü direnç değerinin değiştirilmesi sonucunda türbin hızları belli bir ölçüde kontrol edilebilmektedir. Aynı zamanda bu direnç değerinin değiştirilmesi sonucunda %10'luk rüzgâr hızı değişiklikleri durumunda, generatörün etkilenmeden çalışması sağlanmaktadır. Bu nedenle, B tipi rüzgâr türbinlerinin şebeke güç kalitesi üzerindeki etkisi, A tipi türbinler göre daha azdır. Yine bu türbin tasarımında da generatörün reaktif güç ihtiyacı için kondansatör grubu, ani akımları sınırlamak için ise soft-stater kullanılmaktadır (Taşcıkarağlu, 2008).



Şekil 1. 9. B tipi rüzgâr türbini

1.6.3. C Tipi Rüzgâr Türbini

Şekil 1.10'da C tipi rüzgâr türbin modeli gösterilmiştir. Bu türbinlerde, çift beslemeli asenkron generatörler kullanılmaktadır. Generatörün stator sargıları şebekeye doğrudan bağlanırken, rotor devresi kısmi ölçekli frekans çeviricisi aracılığıyla şebekeye bağlanmaktadır. Bu kısmi ölçekli güç konvertörü sayesinde generatörün rotor hızı kontrol edilerek reaktif güç ihtiyacı karşılanmakta, ani akımlar sınırlandırılmakta ve şebeke güç kalitesi sorunları azaltılmaktadır. Bu türbin tasarımının en önemli dezavantajı ise şebeke arızası esnasında oluşan koruma problemleri olmaktadır (Taşcıkarağlu, 2008).

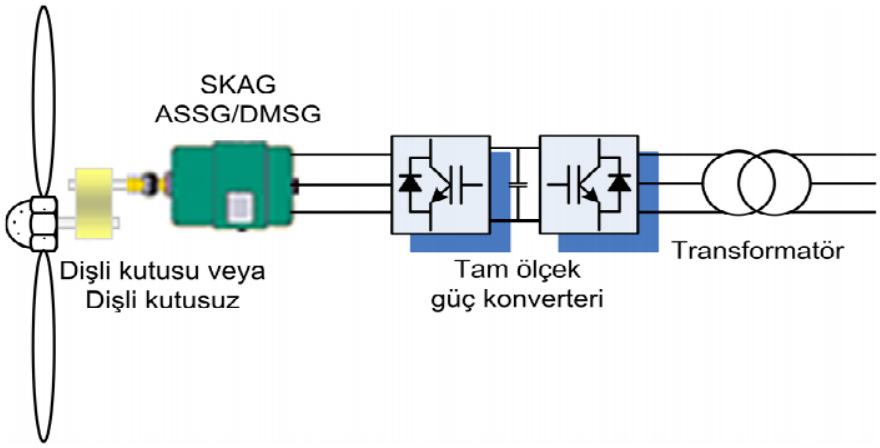


Şekil 1. 10. C tipi rüzgâr türbini

1.6.4. D Tipi Rüzgâr Türbinleri

Şekil 1.11'de D tipi rüzgâr türbin modeli gösterilmiştir. Bu türbinlerde generatörler tam frekans çevirici ile şebekeye bağlanmaktadır. Generatör olarak sincap kafesli asenkron generatörler, rotor alan sargılı senkron generatörler veya kalıcı mıknatıslı senkron generatörlerden herhangi biri kullanılabilmektedir.

Türbin modelinde bulunan tam ölçekli güç konvertörü sayesinde, generatörün rotor hızı geniş bir aralıkta kontrol edilir, reaktif güç kompanzasyonu sağlanır ve ani akımlar sınırlandırılır. Bu türbin tasarımında kullanılan generatörün çok kutuplu olması halinde dişli kutusu kullanılmaz (Dabakoğlu, 2017; Taşcıkarağlu, 2008).



Şekil 1. 11. D tipi rüzgâr türbini

2.BÖLÜM

GEREÇ VE YÖNTEM

2.1. Yöntem

Bu tez çalışmasında izlenecek yöntem aşamalarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

1. Rüzgâr türbin sistemleri ve karakteristiklerinin analizi
2. Rüzgâr türbinlerinin matematiksel modelinin çıkarılması
3. Benzetim teknikleri yardımıyla oluşturulan sistemin modellenmesi
4. Günlük hayattakine benzer değişken yapılı rüzgârın modelinin elde edilmesi
5. AC/DC/AC dönüştürücü modelinin oluşturulmasıyla birlikte DC hat üzerinde gerilim regülasyon işleminin gerçekleştirilmesi
6. Rüzgâr enerji sistemleri entegrasyonunun şebeke üzerindeki etkilerinin araştırılarak incelenmesi

2.2. Rüzgâr Türbin Karakteristikleri ve Matematiksel Model

Rüzgâr türbinleri, hareket halindeki havanın sahip olduğu kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürür. v hızı ile hareket eden m kütleli havanın sahip olduğu kinetik enerji Denklem 2.1 bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$W_{Kinetik} = \frac{1}{2}.m.v^2 \tag{2.1}$$

Enerjinin zamana göre türevi bize gücü vermektedir. Bu güç ile enerji arasındaki ilişki Denklem 2.2'de ve Denklem 2.3'de ifade edilmiştir.

$$W = P.t \tag{2.2}$$

$$P = \frac{dW}{dt} \tag{2.3}$$

Bu güç ile enerji arasındaki ilişkiden yararlanarak Denklem 2.6'da gösterilen rüzgar gücünü, Denklem 2.4 ve Denklem 2.5 ile elde edebiliriz (Ak, 2011; Bekdirhan, 2014).

$$P = \frac{d}{dt}\left({}^{1}/_{2} \,.\, m.v^2\right) = \frac{1}{2} \,.\, \frac{dm}{dt} \,.\, v^2 \tag{2.4}$$

$$Birim\ zamanda\ akan\ k\ddot{u}tle = \frac{dm}{dt} = p.A.v \tag{2.5}$$

$$P_{r\ddot{u}zgar} = \frac{1}{2} p.A.v^3 \tag{2.6}$$

$$A = \pi.R^2 \tag{2.7}$$

$P_{rüzgar}$: rüzgâr gücü (W)
p: hava yoğunluğu (kg/m^3)
A: rotor tarafından süpürülen alan (m^2)
v: rüzgar hızı (m/s)
R: rotor yarıçapı (m)

Denklem 2.6'da görüldüğü gibi rüzgar gücü hava yoğunluğu, rotor tarafından süpürülen alan ve rüzgar hızı ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Hava yoğunluğu ise hava basıncı ve sıcaklığa bağlı olarak değişir. Normal şartlar altında yani 15^{o}C ve 1 atm basınç altında hava yoğunluğu 1.225 kg/m^3 olmaktadır. Hava yoğunluğunun nasıl elde edildiği Denklem 2.8'de ifade edilmiştir (Dabakoğlu, 2017).

$$p(z) = \frac{P_0.MA_{Hava}.10^{-3}}{RT} e^{-1.186.10^{-4}H} \tag{2.8}$$

P_0: referans basınç (1 atm)
MA_{Hava}: hava karışımının moleküler ağırlığı (28.97 g/mol)
R: ideal gaz sabiti (8.2056.10^{-5} m^3.atm/K.mol)
T: sıcaklık (K)
H: rakım (m)

Betz, ideal koşullarda ve sonsuz kanatlarla türbinden maksimum gücün elde edilebileceğini ifade etmiştir. Ancak pratikte bu şartların sağlanması ekonomik ve yapısal nedenlerden dolayı söz konusu değildir. Yani rüzgâr gücünün belirli bir kısmı rotor tarafından yakalanmaktadır. Burada elde edilebilen gücün toplam rüzgar gücüne oranı bize türbinin güç katsayısını diğer bir ifade ile rotor verimini verdiğinden dolayı,

türbin gücünü, Denklem 2.9'da gösterildiği gibi rüzgar gücü ile güç katsayının çarpımı sonucunda elde ederiz.

$$P_t = \frac{1}{2} p.A.v^3.C_P(\lambda,\beta) \tag{2.9}$$

P_t: türbin gücü (W)

λ: uç hız oranı

β: kanat eğim açısı

Cp: güç katsayısı

A: rotor tarafından süpürülen alan (m^2)

Türbinden elde edilen güç değerinin belirlenmesinde büyük öneme sahip olan uç hız oranını (λ), rotor kanat uç hızının, rüzgâr hızına oranı olarak tanımlayabiliriz. Denklem 2.10'da uç hız oran bağıntısı gösterilmiştir(Anderson ve Bose, 1983; Ceylan, 2020).

$$\lambda = \frac{w.R}{v} = \frac{(2\pi f)R}{v} \tag{2.10}$$

w: açısal hız (rad/s)

R: rotor yarıçapı (m)

v: rüzgar hızı (m/s)

f: dönüş frekansı (1/s, Hz)

Güç katsayısı λ, β değişkenlerine bağlı farklı lineer olmayan bağıntılarla elde edilmekte ve bize rotor verimi hakkında bilgi vermektedir. Burada yaygın olarak kullanılan güç katsayısı bağıntılarında bazıları Denklem 2.11 ve 2.13'de gösterilmiştir (Aykut, 2019).

$$C_p = 0.22\left[\frac{116}{\lambda} - 0.4\beta - 5\right] e^{\frac{-12.5}{\lambda}} \tag{2.11}$$

$$\lambda = \left[\frac{1}{\lambda+0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3+1}\right]^{-1} \tag{2.12}$$

$$C_p = 0.73\left[\frac{115}{\lambda} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2\right] e^{\frac{18.4}{\lambda}} \tag{2.13}$$

$$\lambda = \left[\frac{1}{\lambda-0.02\beta} - \frac{0.03}{\beta^3+1}\right]^{-1} \tag{2.14}$$

Bu bağıntıların dışında güç katsayısını hesaplamada karşımıza çıkabilecek bağıntılardan bazıları Denklem 2.15 - Denklem 2.18'de gösterilmiştir (Nayak ve Jamel, 2018; Konara vd., 2016; Kim vd., 2010; Kamali vd., 2017).

$$Cp = (0.5 - 0.00167(\beta - 2))sin\left[\frac{\pi(\lambda+0.1)}{18.5-0.3(\beta-2)}\right] \quad (2.15)$$

$$Cp = 0.5\left[-- 0.022\beta^2 - 5.6\right]e^{-0.17R/\lambda} \quad (2.16)$$

$$Cp = (0.44 - 0.0167\beta)sin\left[\frac{\pi(\lambda-0.3)}{15-0.3\beta}\right] - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (2.17)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167\beta)\sin\frac{\pi(\lambda-2)}{13-0.3\beta} - 0.001854(\lambda - 2)\beta \quad (2.18)$$

Türbin güç katsayısının pratikte alabileceği maksimum değer, %59.26 olarak Betz tarafından hesaplanmıştır. Bu değere Beltz limiti adı verilmektedir. Günümüzde yatay eksenli rüzgar türbinlerinde maksimum güç katsayısı genellikle türbin kanat ve profil kayıplarından dolayı 0.4-0.45 civarındadır (Koç ve Şenel, 2015).

Rüzgâr hızları yüksekliğe bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bölgedeki herhangi bir yükseklikte ölçülen rüzgâr hızı değerine göre başka yükseklikteki rüzgâr hızını Hellmann bağıntısı yardımıyla tahmin edebiliriz (Çetin vd., 2011). Hellmann bağıntısı Denklem 2.19'da, arazi yüzeyinin sürtünme katsayısı (α) ise Denklem 2.20'de gösterilmiştir (Ahshan vd., 2018).

$$\frac{V_{hh}}{V_{rh}} = \left(\frac{H_{hh}}{H_{rh}}\right)^{\alpha} \quad (2.19)$$

$$\alpha = 0.096\log Z_0 + 0.016(\log Z_O)^2 + 0.24 \quad (2.20)$$

V_{hh}: Merkez yükseklikteki rüzgâr hızı (hesaplanması istenen) (m/s)
V_{rh}: Referans yükseklikteki rüzgâr hızı (m/s)
H_{hh}: Merkez yükseklik (m)
H_{rh}: Referans yükseklik (m)
α: Sürtünme katsayısı
Z_o: Yüzey pürüzlülüğü

Arazinin pürüzlülük miktarı artıkça, sürtünme katsayısı da artış göstermektedir. Yani sürtünme katsayısı düz arazilerde düşük, pürüzlü arazilerde ise yüksek değerlere sahiptir. Bu durum değişik arazilere ait sürtünme katsayısı değerlerini veren Tablo 2.1'de gösterilmektedir (Ceylan, 2020; Erduman vd., 2018).

Tablo 2. 1. Değişik arazilerin sürtünme katsayıları

Arazi Tipi	Sürtünme Katsayısı (α)
Göl, okyanus, düzgün araziler	0.1
Toprak seviyesinde uzun çimenli bölgeler	0.15
Toprak seviyesinin üzerinde uzun ekinler, çalılık araziler	0.2
Çok ağaçlı ormanlar	0.25
Az ağaçlı küçük kasaba	0.3
Yüksek binalı büyük şehirler	0.4

Türbin mekanik tork değerini, çıkış güç değerini açısal hız değerine oranlayarak hesaplayabiliriz. Bu duruma göre türbin mekanik tork değeri, Denklem 2.21'deki gibi hesaplanmaktadır (Han vd., 2007).

$$T_t = \frac{P}{w} = \frac{1}{2} pA \frac{v^3}{w} C_p(\lambda, \beta) \tag{2.21}$$

Rüzgâr hız dağılımı, bir bölgedeki rüzgârın belirli bir süre boyunca kullanılabilirliği yani bölgedeki potansiyeli hakkında bize bilgi vermektedir. Bu rüzgâr hız dağılımını yani değişimini, olasılık yoğunluk fonksiyonları ile temsil edebiliriz. Weibull ve Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonları, bir bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyelini belirlemede en çok kullanılan istatistiksel dağılım fonksiyonlarındandır. Rüzgâr hızı için iki parametreli Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonunun genel formu, Denklem 2.22' de, bu Weibull dağılımının kümülatif fonksiyonu ise Denklem 2.23'de ifade edilmiştir. Weibull dağılım fonksiyonu, gerçek rüzgâr hızı verileriyle uyumlu olmasının yanı sıra oldukça esnek ve basit bir fonksiyondur. Bu fonksiyonun elde edilmesinde önemli olan şekil ve ölçek parametrelerinin bağıntıları da sırasıyla Denklem 2.24 ve Denklem 2.25'de gösterilmiştir (Ahshan vd., 2018). Bu parametreler için geçerli olan denklemler moment yöntemi ile elde edilmiştir. Bu yöntem, Weibull dağılım fonksiyon parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan, dağılımın standart sapması ile ortalaması arasındaki ilişkiden şekil parametresinin elde edilmesini sağlayan bir yöntemdir(Kaplan, 2016).

$$f(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right] \quad (2.22)$$

$$F(v) = 1 - exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right] \quad (2.23)$$

f(v): Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu

F(v): Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu

k: boyutsuz şekil parametresi

c: skala, ölçek parametresi

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_m}\right)^{-1.086} \quad (2.24)$$

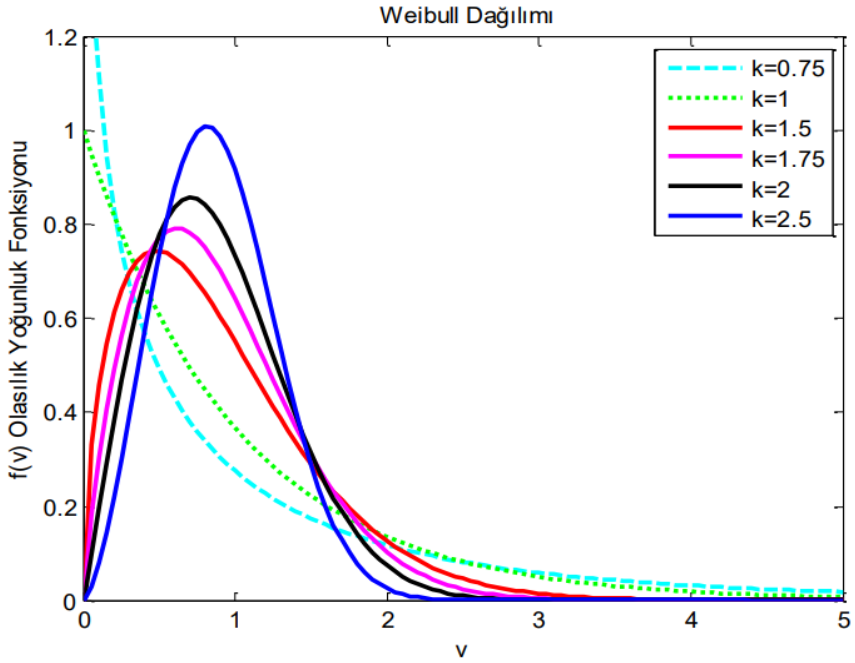
$$c = \frac{v}{\Gamma(1+{}^{1}/_{k})} \quad (2.25)$$

$$v_m = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} v_i \quad (2.26)$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(v_i - v_m)^2\right]^{1/2} \quad (2.27)$$

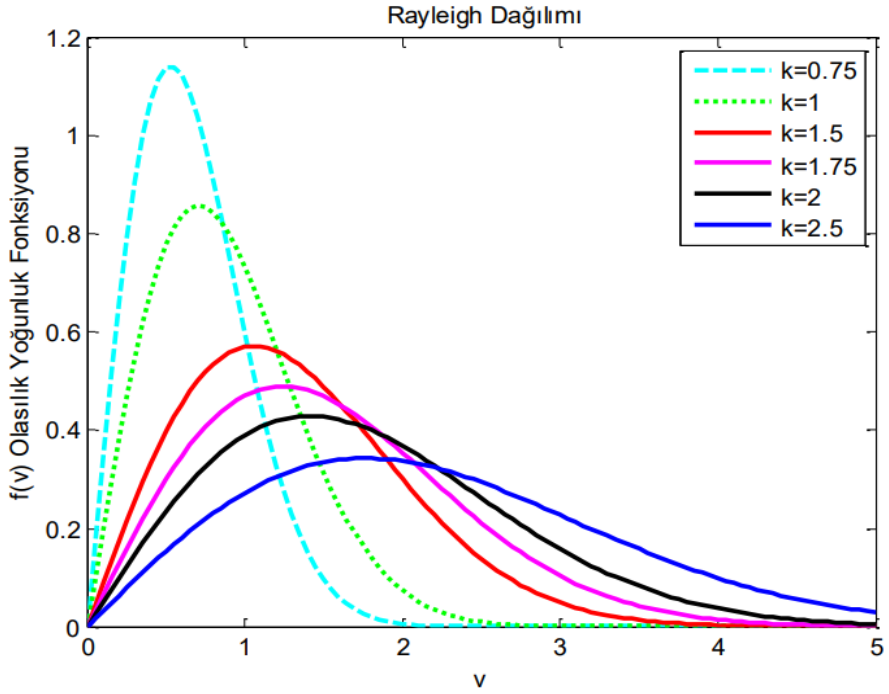
v_m: Ortalama rüzgâr hızı

σ: Rüzgâr hızı standart sapma



Şekil 2. 1. Weibull olasılık dağılımının şekil parametresine göre grafikleri

Şekil 2.1'de Weibull dağılımının şekil parametresine göre grafikleri gösterilmiştir. Burada şekil parametresi değerinin fonksiyon görünümünü etkilediği ve bu parametrenin değeri artıkça rüzgâr veri sıklığının 0 değerinden uzaklaştığı görülmektedir. Rüzgar hızı çalışmalarında, bu parametrenin değeri genellikle 1.5 ila 3 arasında değişiklik gösterir (Kurban vd., 2007). Şekil 2.2'de ise Rayleigh dağılımının şekil parametresine göre grafikleri gösterilmiştir. Burada ise tam tersi durum söz konusudur yani şekil parametresinin değeri artıkça rüzgâr veri sıklığının 0 değerine yaklaştığı görülmektedir. Aynı zamanda bu dağılım, çarpıklık katsayısı 0.6311 olmak üzere her zaman aynı derecede sağa çarpık olmaktadır (Usta ve Kantar, 2016).



Şekil 2. 2. Rayleigh olasılık dağılımının şekil parametresine göre grafikleri

Bir ortamda sadece ortalama rüzgâr hızı biliniyorsa, herhangi bir rüzgâr hızının esme saati yüzdesi Rayleigh dağılım fonksiyonu yardımıyla elde edilebilmektedir. Yani Rayleigh olasılık dağılımı, sadece ortalama rüzgâr hızı ile belirlenebilmektedir. Bu durum Rayleigh dağılımının en önemli avantajıdır. Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonunun genel formu, Denklem 2.28' de, Rayleigh dağılımının kümülatif fonksiyonu ise Denklem 2.29'da ifade edilmiştir. (Gülersoy ve Çetin, 2010).

$$f_R(v) = \frac{\pi}{2}\left(\frac{v}{v_m^2}\right) exp\left[-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{v_m^2}\right)^k\right] \quad (2.28)$$

$$F_R(v) = 1 - exp\left[-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{\pi}{v_m^2}\right)^2\right] \quad (2.29)$$

$$h_r = \frac{\pi}{2}\frac{v_i}{v_m^2}\ exp\left[-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v_i}{v_m}\right)^2\right] \quad (2.30)$$

$f_R(v)$: Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu

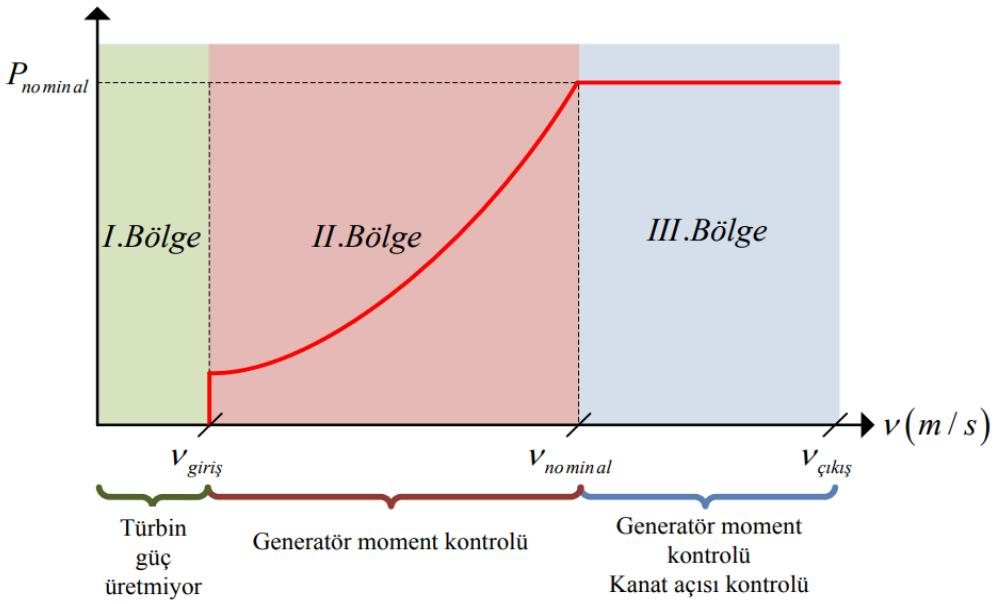
$F_R(v)$: Rayleigh kümülatif dağılım fonksiyonu

k: Boyutsuz şekil parametresi

v_m: ortalama rüzgâr hızı (m/s)

h_r: v_i rüzgâr hızının esme saat yüzdesi

Rüzgar türbinlerinden nominal rüzgar hızının altında maksimum güç elde etmek, nominal rüzgar hızının üzerindeki rüzgar hızlarında ise türbin hızı ile güç değerini optimum seviyede ve sabit tutmak amacıyla, türbinlerde çeşitli aerodinamik güç kontrol işlemleri gerçekleştirilmektedir. Rüzgâr hız değerine göre gerçekleştirilen bu kontrol işlemlerine bağlı olarak rüzgâr türbinlerinin çalışması birkaç bölgeye ayrılmaktadır. Şekil 2. 3'de rüzgâr türbinlerinin çalışma bölgeleri gösterilmiştir (Nak, 2013).



Şekil 2. 3. Rüzgâr türbinlerinin çalışma bölgeleri

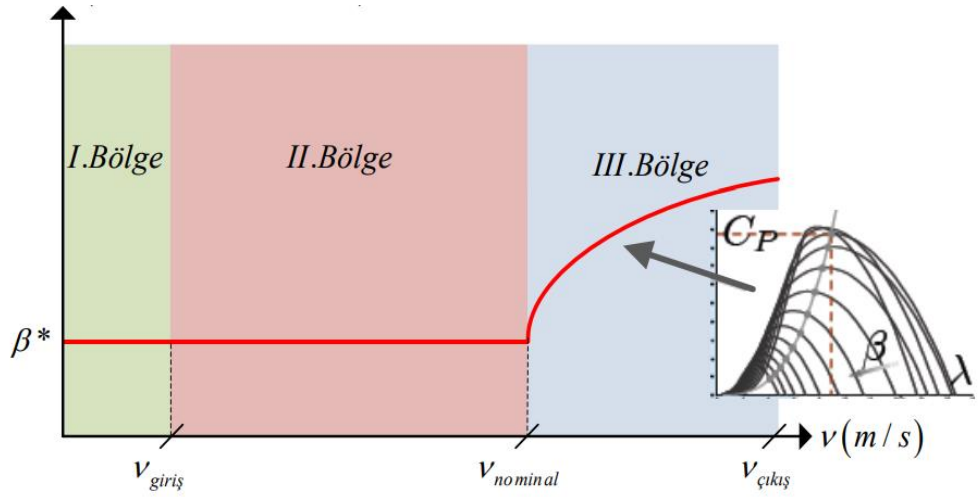
I. Bölge: Rüzgâr türbinleri enerji üretebilmek için belli bir rüzgâr hız değerine ihtiyaç duyarlar. Bu rüzgâr hız değerine cut-in, diğer bir ifade ile devreye girme rüzgâr hızı adı verilmektedir. Bu hız değeri, rüzgâr türbinine bağlı olmakla birlikte genelde 3-4 m/s arasında değişmektedir. I. Bölgede anlık rüzgâr hızı, devreye girme rüzgâr hızından düşük olduğundan dolayı bu bölgede türbin çalışmaz.

II. Bölge: Bu bölgede anlık rüzgar hız değerleri, devreye girme rüzgar hızı ile nominal rüzgar hızı arasında olmaktadır. Kısmi yük bölgesi olarak adlandırılan bu bölgede amaç, türbinin maksimum güç katsayısı ile çalıştırılması yani anlık rüzgâr hız değerlerine karşılık maksimum güç değerlerinin elde edilebilmesidir. Kanatlar, rüzgâr türbininin maksimum rüzgâr güç değerini yakalayabileceği konumda sabit olarak tutulmaktadır yani kanat açısı kontrolü bu bölge için gerçekleştirilmez. Bu bölgede sadece generatör moment kontrolü yapılmaktadır.

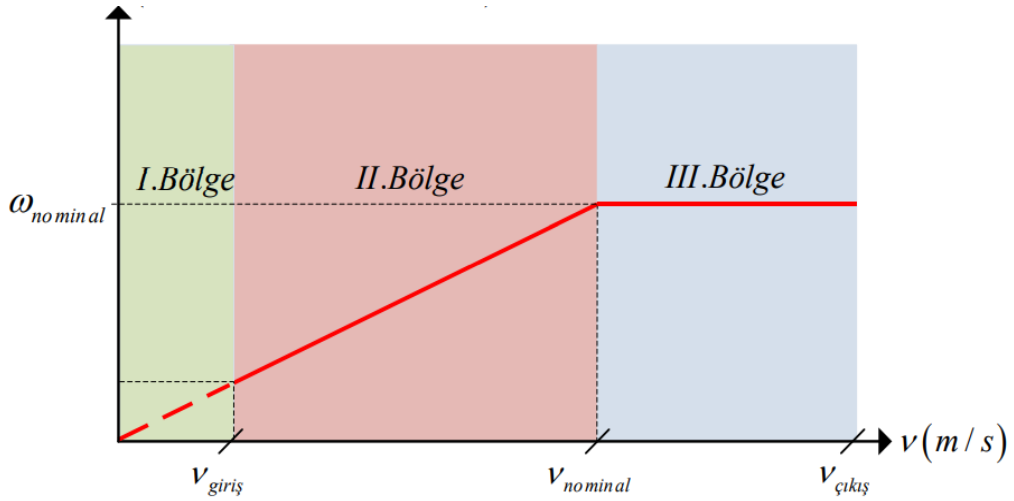
III. Bölge: Rüzgâr hızı, devreye girme rüzgâr hızını aştığı zaman türbin artan hızla elektrik enerjisi üretecek ancak belli bir noktada bu elektrik enerjisi miktarı sabitlenecektir. Bu andaki rüzgâr hızına anma rüzgâr hızı, güce ise anma gücü denilmektedir. Tam yük bölgesi olarak adlandırılan bu bölgede anlık rüzgar hızları, nominal rüzgar hız değerinden yüksek olmaktadır. Bu durum, kanat açısının değişmesine neden olur yani bu bölgede generatör moment kontrolüne ilaveten kanat açısı kontrolü de gerçekleştirilmektedir. Amaç, başta türbin gücü olmak üzere, generatör açısal hız değerini ve türbin momentini nominal değerinde sabit olarak tutabilmektir. Bu bölgede anlık rüzgâr hız değerleri en fazla cut-out olarak da ifade edilen devreden çıkma rüzgâr hız değerinde olmaktadır. Çünkü devreden çıkma rüzgâr hız değerinden daha yüksek hızlı rüzgârlarda, emniyetli bir şekilde güç üretimi gerçekleştirilmez ve türbinde ciddi hasarlar oluşabilir. Bu durumların oluşmasını engellemek amacıyla devreden çıkma hızından daha yüksek hızlı rüzgârlarda, türbin devreden çıkarılır (Aykut, 2019).

Şekil 2.4'te ve Şekil 2.5'de sırasıyla rüzgar türbinlerinin çalışma bölgelerine göre kanat açısının değişimi ile rotor açısal hız değişimi gösterilmiştir. I. ve II. bölgelerde kanat açısı kontrolü gerçekleşmediğinden dolayı, kanatlar türbinin maksimum rüzgâr gücünü yakalayabileceği konumda sabit olarak tutulur yani kanat açısı değiştirilmez. Güç katsayısı kanat açısı ve uç hız oranına bağlı bir değişkendir. Kanat açısının sabit olması, bu bölgelerde maksimum güç katsayısının elde edilebilmesi için uç hız oranının da sabit

olmasını gerekli kılar. Uç hız oranının sabit olması nedeniyle bu bölgelerde artan rüzgâr hız değerlerine karşılık, rotor açısal hız değeri de artış göstermektedir. III. bölgede ise kanat kontrolü ile birlikte, nominal rotor açısal hız ve nominal generatör tork değerlerine ulaşmak için kanat açı değeri değiştirilmektedir(Nak, 2013).



Şekil 2. 4. Rüzgâr türbin çalışma bölgelerine göre kanat eğim açısı değişimi



Şekil 2. 5. Rüzgâr türbin çalışma bölgelerine göre rotor açısal hız değişimi

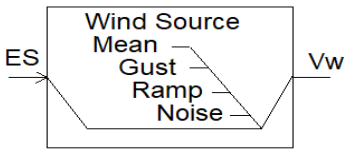
2.3. Benzetim Teknikleri Yardımıyla Sistem Modelleme

Sistem modelleme amacıyla yaygın olarak kullanılan benzetim tekniklerinin başında MATLAB/Simulink gelmektedir. MATLAB/Simulink, sistemlerin ilk incelenmesinde ve oluşturulmasında kullanılan genel bir model geliştirici araçtır. Geniş bir uygulama

alanına sahiptir. Birçok alt sistemi içinde blok olarak bulunduran zengin kütüphanesi sayesinde farklı özellikteki sistemleri kısa sürede modelleyerek simülasyon işlemlerini gerçekleştirmemize olanak sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında, rüzgâr türbin sisteminin modellenmesi amacıyla yine yaygın olarak kullanılan benzetim tekniklerinden biri olan PSCAD/EMTDC ‘den yararlanılmıştır. PSCAD/EMTDC, elektriksel sistemlerin geçici hal davranışlarının incelenmesinde kullanılan, FORTRAN tabanlı hesaplama sistemi ile güçlü grafiksel ara yüze sahip olan bir platformdur. PSCAD/EMTDC’de devre ve topoloji üzerine daha önceden veri bankasında tanımlanan modellerin kullanılması ve sistemdeki ilgili parametrelerin esnek bir şekilde değiştirilmesi ile çok çeşitli modelleme işlemleri gerçekleştirilebilir. PSCAD/EMTDC, güç sistemine bağlı olarak rüzgâr türbinlerinin tasarımı ile performans incelemesi için hazır modüllere sahip olması sebebiyle oldukça kullanışlı bir programdır. Rüzgâr kaynakları, türbin çeşitleri, generatör modelleri, trafolar, güç elektroniği elemanları, şebeke bağlantıyla ilgili araçlar, enerji nakil hatları gibi rüzgâr enerji sistemini oluşturan unsurlar kütüphanesinde hazır modeller şeklinde bulunmaktadır (Tumay, 2010). Güç sistemleri için kullanılabilecek benzetim programlarından biri de PSS/E’dir. PSS/E programı sistemin modellenmesini, kontrol edilmesini ve orta ile uzun vadede yük akışı veya kısa devre analizlerin yapılmasına olanak sağlar. Analizler esnasında sisteme ait olan tüm veriler eksiksiz olarak girilmelidir (Atabey ve Tezcan, 2017).

2.4. Rüzgâr Modelleme

Rüzgâr aralıklı ve değişken bir yapıya sahip enerji kaynağıdır. Rüzgâr hızı birçok faktöre bağlı olarak değişir ve büyüklük ile yönü rastgeledir. Rüzgârın bu yapısı, rüzgâr türbin sistemlerinin şebekeye entegrasyonunu zorlaştırmakta ve şebekeyi olumsuz yönde etkilemektedir. Bu etkilerin benzetim programlarında doğru analiz edilebilmesi için oluşturulan rüzgâr modelinin gerçek hayattaki rüzgâr yapısına benzemesi oldukça önemlidir.

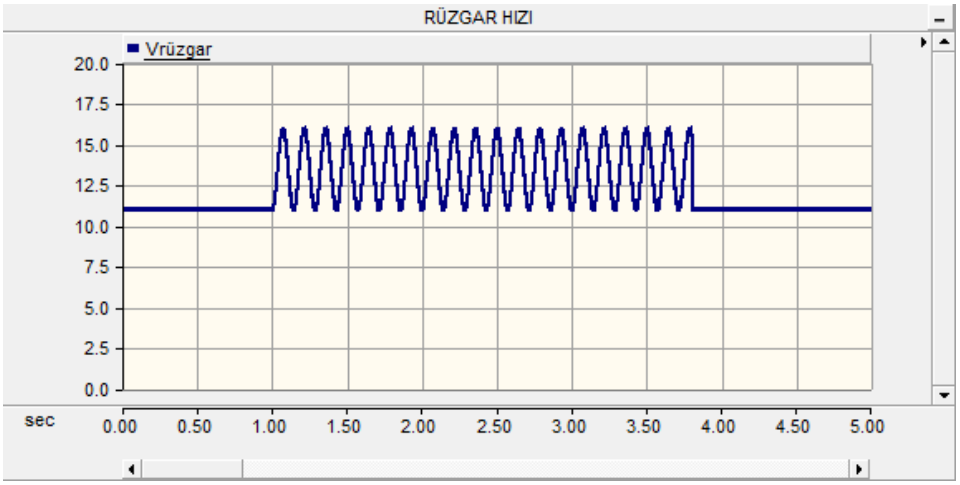


Şekil 2. 6. Rüzgâr kaynağı elemanı

Şekil 2.6'da PSCAD/EMTDC'de rüzgârı modellemek için kullanılan rüzgâr kaynağı elemanı gösterilmiştir. Bu eleman, gerçek hayattaki rüzgâr yapısına benzeyen rüzgârları simüle etmemize olanak sağlamaktadır. Bu modelde rüzgâr, denklem 2.31 'de gösterildiği gibi temel bileşen, , ani rüzgâr bileşeni, rampa bileşeni ve gürültü bileşeni olmak üzere 4 bileşenden oluşmaktadır (Kim ve Kim, 2007; Wei vd., 2011).

$$V_{wind} = V_{base} + V_{gust} + V_{ramp} + V_{noise} \tag{2.31}$$

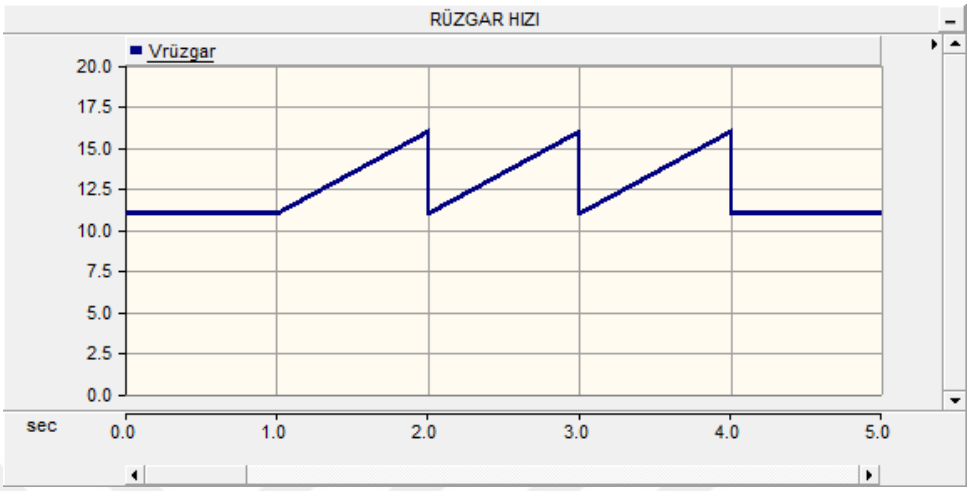
V_{base}, türbin ve generatörün nominal özelliklerinin belirlendiği temel bir bileşendir, sabittir ve her zaman mevcut olduğu varsayılır. V_{gust} bileşeni, sinüs veya kosinüsün bir fonksiyonu olacak şekilde ani rüzgârı temsil ederken, V_{ramp} bileşeni, istenilen değere kadar sürekli artan bir rüzgâr hızını simüle etmektedir. Son olarak V_{noise} bileşeni ise, gürültüyü modeller. Şekil 2.6'da gösterilen PSCAD rüzgâr kaynağı modelindeki ES harici girişi model içerisindeki bileşenlerle tanımlanamayan rüzgâr değişimleri için kullanılmakta ve bu giriş kullanıcı tarafından istenildiğinde devre dışı bırakılmaktadır (Chen ve Spooner, 2001; Kamali vd., 2017).



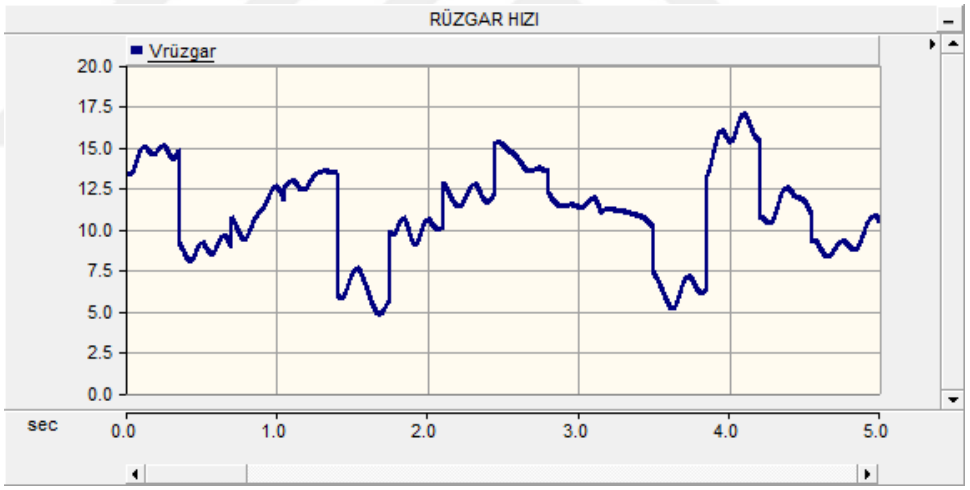
Şekil 2. 7.Gust bileşenli rüzgâr modeli

Şekil 2.7'de ve Şekil 2.8'de sırasıyla gust ve rampa bileşenli rüzgar modelleri gösterilmektedir. Şekil 2.7'de ortalama hızı 11 m/s rüzgar modeline 1.s'de başlayacak şekilde 5 m/s'lik, 0.4 s periyotlara sahip belirli sayıda gust bileşeni ilave edilmiştir. Şekil 2.8'de ise yine ortalama hızı 11 m/s olan rüzgar modeline 1.s'de başlayacak

şekilde 5 m/s'lik 3 adet rampa bileşeni eklenmiştir. Şekil 2.9'da da gürültü bileşenine sahip bir rüzgar modeli gösterilmektedir.



Şekil 2. 8. . Rampa bileşenli rüzgâr modeli



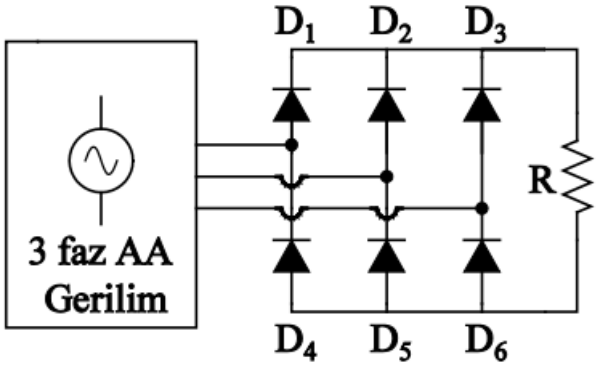
Şekil 2. 9. Gürültü bileşenli rüzgâr modeli

2.5. AC/DC/AC Dönüştürücü ve Gerilim Regülasyon İşlemi

AC/DC/AC dönüştürücüler genel olarak, AC/DC doğrultucu ile DC/AC invertörün bir araya gelmesiyle oluşan çift yönlü dönüştürücülerdir. Bu dönüştürücülerin devre modelleri, yapısında kullanılan doğrultucu ve invertör çeşidine bağlı olarak farklılık göstermektedir.

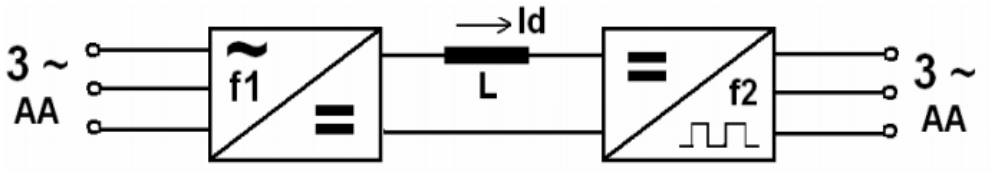
Rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan AC/DC doğrultucular, generatör çıkışındaki AC çıkış geriliminin DC gerilime dönüştürülmesini sağlamaktadırlar. Doğrultucular kendi arasında kontrol durumuna göre kontrollü ve kontrolsüz doğrultucu, doğrultma şekline

göre de tam dalga ve yarım dalga doğrultucu şeklinde sınıflandırılırlar. Kontrolsüz doğrultucuların yapısında diyot bulunurken, kontrollü doğrultucuların yapısında tristör, IGBT veya MOSFET gibi yarı iletken anahtarlama elemanlarından biri bulunmaktadır. Çalışmada kullanılan doğrultucu modeli kontrolsüz üç fazlı tam dalga diyot doğrultucusudur. Şekil 2.10'da kontrolsüz üç fazlı tam dalga diyot doğrultucusunun genel devre yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2. 10. Kontrolsüz üç fazlı tam dalga diyot doğrultucu modeli

İnvertörler, DC gerilimi AC gerilime dönüştüren güç elektroniği elemanlarıdır. İnvertörlerin çıkışından elde edilen gerilimin sinüzoidal yapıda ve istenilen genlik ile frekansta olması amaçlanır. Ancak pratikte invertör çıkış gerilimi sinüzoidal dalga yapısını bozan harmonik bileşenleri içermektedir. İnvertörler besleme kaynaklarına göre gerilim beslemeli invertörler ve akım beslemeli invertörler şeklinde ikiye ayrılmaktadırlar. Çalışmada 6 darbeli tristörlü bir akım kaynağı invertörü kullanılmış ve bu duruma bağlı olarak, Şekil 2.11'de gösterilen akım beslemeli invertör modelindeki gibi akım kaynağının modellenmesi amacıyla invertörün girişine indüktör bağlanmıştır (Tarlak, 2018; Yalçın, 2009).



Şekil 2. 11. Akım beslemeli invertör modeli

Tek bir rüzgâr türbininden oluşan rüzgâr türbin sistemlerinin şebeke ile bağlantısı zayıf olmaktadır. Bu tür zayıf bağlantı durumlarında ani ve büyük AC gerilim düşümleri meydana gelebilir. Genel olarak zayıf bağlantılı güç sistemlerinde oluşabilecek bu gerilim düşümlerini engellemek amacıyla, gerilim kontrolü entegrasyon noktası yerine DC hat üzerinde gerçekleştirilebilir (Cedrat, 2007; Chaithanya vd., 2019). Bu nedenle çalışmada DC hat üzerinde gerilim regülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen gerilim regülasyon işleminin güç sistemine sağladığı önemli faydalar;

- İnvertörün DC hat için güvenli sayılan ± %5 'lik gerilim dalgalanma aralığında kontrollü olarak çalışmasını sağlar.
- Tek bir türbin ile oluşturulan rüzgâr enerji sistemlerin zayıf şebeke bağlantısı noktasındaki oluşabilecek AC gerilim değerindeki büyük gerilim düşüşlerini engeller.
- Zayıf şebeke bağlantı noktasındaki gerilim profilinin iyileştirilmesini sağlar.
- Rüzgâr türbin sistemlerinin şebeke entegrasyonundaki olumsuz etkilerinin azaltılmasına yardımcı olur.

2.6. Rüzgâr Enerji Santrali Entegrasyonunun Şebeke Üzerindeki Etkileri

2.6.1. Gerilim Değişimleri

Şebekedeki gerilim kalitesini olumsuz etkileyen en önemli sorun, yük ile üretim değerlerinin sürekli olarak değişmesidir. Yük değerlerinde oluşan değişime sık devreye girip çıkan güçlü motorlar, ark ocakları, eritme tesisleri vb. yapılar neden olurken, üretim değerlerindeki değişime rüzgâr türbini gibi değişken çıkış gücüne sahip yapılar neden olmaktadır. Rüzgârın sürekli ve değişken yapısına bağlı olarak rüzgâr türbinlerinin şebekeye verdikleri güç miktarı da değişkenlik gösterir. Bu durum şebekedeki geriliminin kalitesini ve kararlılığını doğrudan etkilemektedir. Aynı zamanda rüzgâr türbinleri, şebekeye aktif güç verdikleri zaman şebekedeki gerilim seviyesinin artmasına, reaktif güç çektiklerinde ise gerilim seviyesinin düşmesine neden olmaktadırlar (Taşcıkarağlu, 2008).

Ani gerilim değişimleri, genellikle sabit hızlı indüksiyon generatörlü rüzgâr türbinlerinin devreye girmesi esnasında oluşur. Çünkü bu rüzgâr türbinlerinin devreye girmesi sırasında, rotor hızlanırken kontrol işlemi yoktur. Kanat açı kontrollü rüzgâr

türbinlerinde, türbinin çalışmaya başlatıldığı sırada rotor hızı kontrol edilerek bu etki azaltılabilir(Uslu, 2019).

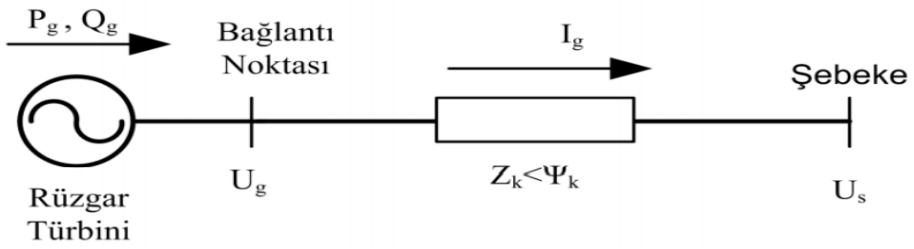
Rüzgâr türbinlerinin düğüm gerilimlerini etkileme şekli, türbinin sabit hızlı ve değişken hızlı olmasına bağlı olarak değişmektedir. Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde rotor hızı, aktif güç, reaktif güç ile terminallerdeki gerilim arasında sabit bir oran vardır ve bu türbinler düğüm gerilimlerini etkilemezler. Ancak, değişken hızlı rüzgâr türbinleri, güç elektroniği dönüştürücülerine bağlı olarak düğüm gerilimlerini etkileyebilirler (Ibrahim vd., 2011). Özellikle de büyük rüzgâr çiftlikleri, zayıf şebekeler söz konusu olduğunda sincap kafesli indüksiyon generatörlerinin reaktif güç harcamaları şebekede ciddi düğüm gerilim düşümlerine neden olabilmektir.

Gerilim düşümü (çökmesi), nominal gerilim efektif değerinin ani bir şekilde %10'u ile %90'ı arasında bulunan herhangi bir değere düşmesi durumudur. Bu olay genellikle, 1 ms ile 1 dk zaman aralığında gerçekleşmekte ve azalan gerilim değeri kısa süre içerisinde düzelmektedir. Gerilim düşümü çoğunlukla elektrik motorlarının çalışmaya başladıkları anda yüksek akım çekmeleri, arızaların oluşması ve aşırı yüklenme gibi durumlar sonucunda gözlemlenmektedir.

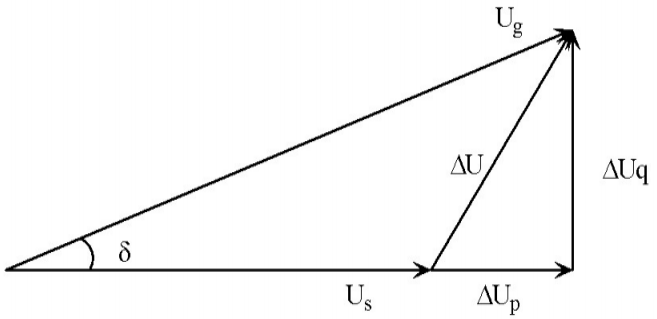
Genel olarak elektriksel sistemlerde, hat başı ile hat sonu arasında oluşan faz farkı, aktif güç ile belirlenirken, gerilim değerinin büyüklüğü reaktif güç tarafından kontrol edilmektedir. Bu nedenle, güç sistemlerinde büyük gerilim ve akım dalgalanmalarının oluşmasını engellemek için, yük ile kaynak arasındaki aktif ve reaktif güç akışı dengelenmelidir. Güç sistemlerinde herhangi bir arıza meydana geldiğinde akım değeri ve trafo merkezine olan uzaklıkla doğru orantılı olacak şekilde bir gerilim düşümü meydana gelmektedir. Burada rüzgâr santrallerinin dezavantajı trafo merkezlerinden genellikle uzakta olmalarıdır. Bu durum empedans değerinin yüksek olmasına ve gerilim düşümü değerinin önemli boyutlara ulaşmasına neden olabilmektedir. Bu tür olumsuzlukların azaltılması için rüzgâr türbin santrallerinin gerilim kontrolü özelliğine sahip olması gerekir. Çünkü trafo merkezinde bulunan gerilim regülatörü, kendi gerilim sınır değerlerine ulaşmadan, şebeke bağlantı noktasındaki gerilim değerini yükseltmeyebilir. Gerilim düşümü olayı, rüzgâr enerjisi entegrasyonunda oluşabilecek önemli şebeke sorunları arasında yer almaktadır. Örneğin MW mertebesindeki çift beslemeli asenkron generatörlü, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin, şebeke bağlantı noktasında gerilim düşümü olayının meydana gelmesi durumunda, bu generatörlerin

mekanik yapısının düşük ağırlıklı, büyük hacimli olması ve güç elektroniği elemanlarının kullanılmasına bağlı olarak, rotor devresinde yüksek akımlar indüklenir. Bu durum, dişli kutusunda aşırı metal yorgunluğuna ve güç elektroniği elemanlarının rotor tarafının ciddi zarar görmesine neden olmaktadır(Boynueğri, 2010; Dabakoğlu, 2017; Taşcıkarağlu, 2008).

Rüzgâr santrallerinin şebeke entegrasyonu sonucunda oluşacak sorunlardan biri de gerilim yükselmesidir. Gerilim yükselmesi, gerilim çökmesi olayının tam tersidir ve gerilimin efektif değerinin %10'u ila %80'nin üzerine çıkması durumudur. Bu olay, yaklaşık 1 dk'ya kadar sürebilir. Gerilim seviyesinin çok yükselmesi durumunda elektronik cihazlarda ciddi hasarlar oluşabilir(Uslu, 2019).



Şekil 2. 12. Şebekeye bağlı rüzgâr santralinin tek hat diyagramı



Şekil 2. 13. Şebeke ile rüzgâr santrali bağlantısındaki gerilimlerin fazör diyagramı

Şekil 2.12'de şebekeye bağlı rüzgâr santralinin tek hat diyagramı, Şekil 2.13'te ise gerilimler arasındaki fazör diyagramı gösterilmiştir. Bu tek hat diyagramına göre rüzgâr santrali, eşdeğer kısa devre empedansı (Z_K) ile şebekeye bağlanmıştır. Burada U_s gerilimi, varsayılan sonsuz baradaki gerilimi ifade ederken, U_g gerilimi ortak bağlantı noktasındaki (OBN) gerilimdir. Genel olarak, rüzgâr santrallerinin şebeke entegrasyonu durumunda, gerilim kalitesi üzerindeki etkisi doğrudan şebeke kısa devre gücüne

bağlıdır. U_s geriliminin sabit kabul edilmesi durumunda şebekenin kısa devre gücü, Denklem 2.32'de ifade edilmiştir.

$$SCC = \frac{U_S^2}{Z_K} \tag{2.32}$$

Rüzgâr santralinin çıkış aktif ve reaktif güç değerleri sırasıyla P_g ve Q_g olmak üzere bu güçlere bağlı olarak oluşan I_g akım bağıntısı, Denklem 2.33'de gösterilmiştir.

$$I_g = \left(\frac{S_g}{U_g}\right)^* = \frac{P_g - jQ_g}{U_g} \tag{2.33}$$

Tüm bu durumlara bağlı olarak U_g ve U_s gerilimleri arasındaki fark (ΔU), Denklem 2.34'de gösterildiği gibi elde edilmektedir.

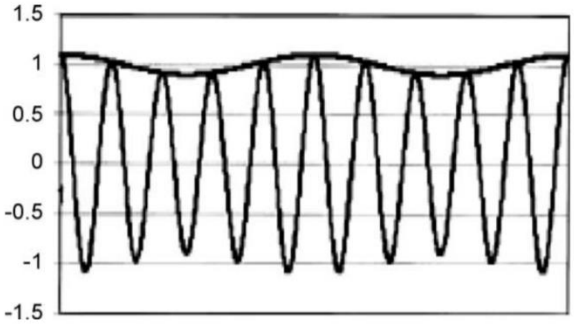
$$\Delta U = U_g - U_s = Z_K . I_g = (R_K + jX_K)\left(\frac{P_g - jQ_g}{U_g}\right)$$
$$\Delta U = \Delta U_p + j\Delta U_q = \frac{R_K P_g + X_K Q_K}{U_g} + j\frac{P_g X_K - Q_G R_K}{U_g} \tag{2.34}$$

Denklem 2.34'ten anlaşılacağı üzere, gerilim farkı, rüzgâr santralinin aktif ve reaktif güç çıkış değerleri ile kısa devre empedansına bağlıdır. Bu durum, rüzgâr santrali tarafından üretilen aktif ve reaktif güçlerde oluşan değişimlerin gerilim dalgalanmalarının oluşmasına neden olduğunu göstermektedir. Genel olarak Z_K değerinin küçük olduğu güçlü şebekelerde gerilim dalgalanmaları az olurken, Z_K değerinin büyük olduğu zayıf şebekelerde gerilim dalgalanmaları daha fazla olmaktadır (Mutlu, 2010).

2.6.2. Gerilim Titremesi (Fliker)

Gerilim titremesi (fliker), çıkış geriliminde oluşan hızlı dalgalanmadır. Gerilim titremesi olayının meydana gelmesinde, temelde rüzgâr hızındaki değişimler etkili olsa da rotorun yanlış hizalanması, türbin kanatlarının gölgesi, kanat yönlendirme ve eğim hatası da bu olayın oluşmasını tetiklemektedir. Gerilim titremesi, düşük güç kalitesine, kullanıcı ekipmanlarının verimsiz çalışmasına yani ışıkların titremesine, sistemde kararsızlığa ve tüketiciye giden gücün kesilmesine neden olur (Benzohra vd., 2020; Ibrahim vd., 2011).

Şekil 2.14'te sinüzoidal bir gerilimin yapısında oluşan gerilim titremesi (fliker olayı) gösterilmiştir (Machmoum vd., 2010).



Şekil 2. 14. Sinüzoidal gerilim titremesi

Fliker şiddeti, kısa ve uzun süreli olmak üzere iki farklı şekilde hesaplanmaktadır. Kısa süreli fliker şiddeti (P_{st}), 10 dk'lık periyotlarla ölçülüp hesaplanırken, uzun süreli fliker şiddeti 2 saatlik bir ölçüm periyodu için, kısa süreli fliker şiddeti değerlerinden yararlanarak Denklem 2.35'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{lt} = \left[\sum_{i=1}^{12}\left(\frac{P_{st,i}^3}{12}\right)\right]^{1/3} \tag{2.35}$$

Tablo 2. 2. EN 50160'a göre fliker sınır değerleri

Gerilim Seviyesi	Kısa Süreli Fliker Şiddeti	Uzun Süreli Fliker Şiddeti
V>154 kV	0.85	0.63
35 kV< V ≤ 154 kV	0.97	0.72
1 kV < V ≤ 35 kV	1	0.8

EN 50160'a göre 1 hafta boyunca ölçülen uzun süreli fliker değerlerinin %95'i, 1'e eşit veya 1'den küçük olmalıdır. EN 50160'a göre, gerilim seviyesine bağlı olarak kısa ve uzun süreli fliker sınır değerleri, Tablo 2.2'de gösterilmiştir (Mantaş vd., 2018). Fliker olayından etkilenme miktarı insandan insana değişir. Örneğin insanların çoğu uzun süreli fliker seviyesinin 1 olması anında etkilenirken bazı insanlar etkilenmeyebilir

(Rona, 2014; Uslu, 2019). Rüzgâr türbinlerinin neden olduğu fliker emisyonları, sürekli çalışma koşulları ve anahtarlama işlemleri için ayrı ayrı incelenmektedir.

2.6.2.1. Sürekli Çalışma

Sürekli çalışma esnasında rüzgâr türbinlerinin sebep olduğu fliker, türbinin güç çıkışındaki dalgalanmalardan kaynaklanmaktadır. Bu güç dalgalanmalarını oluşturan esas nedenler ise, rüzgâr eğimi ile değişimi, kule gölge etkisi ve dişli kutusu gibi türbinin mekanik yapılarıdır.

Sürekli çalışma esnasında oluşan fliker miktarı her bir rüzgâr türbininin fliker katsayı değerine bağlıdır ve bir rüzgâr santrali için toplam fliker değeri, Denklem 2.36 ile hesaplanır(Gutierrez vd., 2011).

$$P_{lt} = P_{st} = \frac{1}{S_k}\sqrt{\sum_{i=1}^{N_{wt}}\left(c_i(\Psi_k, v_\alpha) \times S_{n,i}\right)^2} \qquad (2.36)$$

N_{wt}: toplam rüzgâr türbin sayısı

c_i (Ψ_k,U): tek bir rüzgâr türbini için fliker katsayısı

$S_{n,i}$: tek bir rüzgar türbininin anma görünür gücü

S_k: ortak bağlantı noktasındaki şebekenin kısa devre görünür gücü

Ψ_k: şebeke empedans açısı

v_α: yıllık ortalama rüzgar hızı

Sürekli çalışma esnasında bir rüzgâr santrali için P_{lt}=P_{st} olmasının temel nedeni, sürekli çalışmada kısa dönemdeki şartlar ile uzun dönemdeki şartların birbiriyle aynı olmasıdır. Kullanılan rüzgâr türbinlerinin sayısı ve tipi, hesaplanan toplam fliker miktarının sınır değerinin altında olmasını sağlayacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Örneğin sabit hızlı durma kontrollü rüzgâr türbinlerinin fliker katsayı değerleri, sabit hızlı eğim kontrollü rüzgâr türbinlerinin fliker katsayı değerlerinden daha küçükken, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin fliker katsayı değerlerinden daha büyüktür(Mutlu, 2010; Rona, 2014).

2.6.2.2. Anahtarlama İşlemleri

Rüzgâr türbinlerinin başlatılması ve kapatılmasına anahtarlama işlemleri denilmektedir.

Anahtarlama işlemleri sonucunda oluşan fliker miktarı her bir türbinin fliker adım faktörüne bağlıdır. Bu fliker adım faktörü $k_f(\Psi_k)$, tek bir rüzgâr türbini için en kötü durumdaki anahtarlama işleminin neden olduğu fliker emisyonunun bir ölçüsüdür. Bir rüzgâr santralinin anahtarlama işlemleri sonucunda oluşturduğu toplam kısa süreli ve uzun süreli fliker miktarları sırasıyla Denklem 2.37 ve Denklem 2. 38'de ifade edilmiştir (Gutierrez vd., 2011).

$$P_{st} = \frac{18}{S_k}\left[\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{10}\left(k_{f,i}(\Psi_k) \times S_{n,i}\right)^{3,2}\right]^{0,31} \quad (2.37)$$

$$P_{lt} = \frac{8}{S_k}\left[\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{120}\left(k_{f,i}(\Psi_k) \times S_{n,i}\right)^{3,2}\right]^{0,31} \quad (2.38)$$

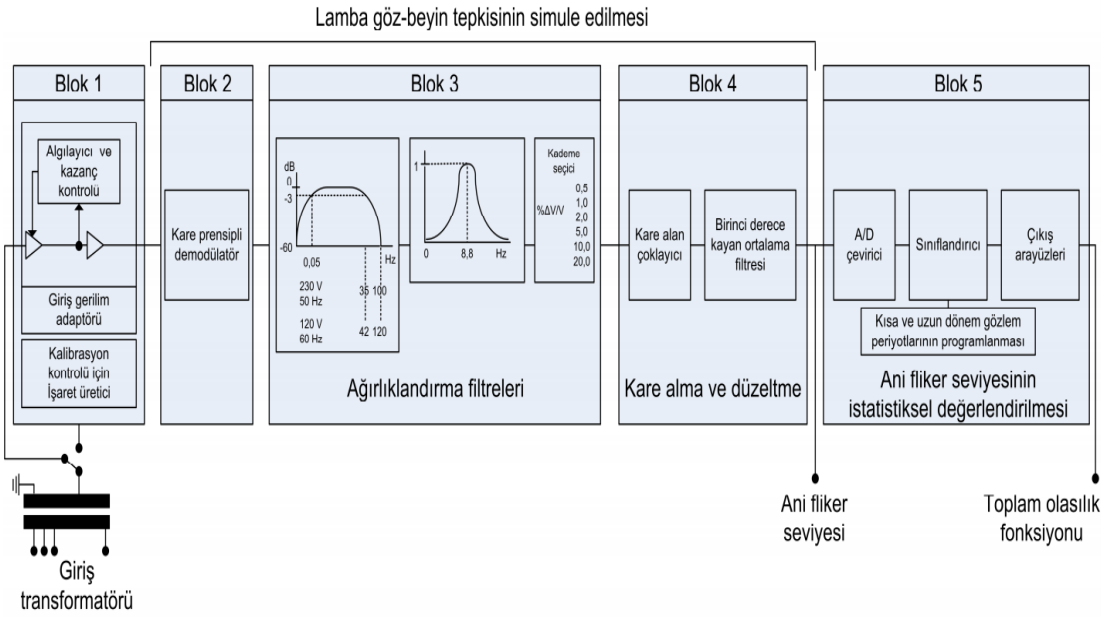
N_{10} ve N_{120} sırasıyla 10 dk'lık ve 2 saatlik sürelerde rüzgâr türbininde yapılan toplam anahtarlama sayısıdır. Anahtarlama işlemleri sonucunda oluşan fliker miktarlarının sınır değerleri aşmaması için daha düşük adım faktörlü rüzgâr türbinleri seçilebilir veya rüzgâr türbinlerinin başlatılması esnasında kontrol sistemleri kullanılabilir. Eğim kontrollü ve değişken hızlı rüzgâr türbinlerini fliker adım faktörleri genellikle küçük olmaktadır.

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde başlatma işlemi, sabit hızlı rüzgâr türbinlerine göre daha yumuşak olmaktadır. Çünkü değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde sabit hızlı rüzgâr türbinlerinden farklı olarak, kullanılan frekans dönüştürücüleri yardımıyla güç faktörü sabit tutulup yumuşak bir kalkış sağlanmaktadır. Rüzgâr türbinlerinde kapatma işlemi ise genellikle rüzgâr hızının çok düşük veya çok yüksek olması esnasında gerçekleştirilir. Düşük rüzgâr hızlarında aktif güç nerdeyse sıfıra yakındır. Bu durum türbinin durdurma işleminin yumuşak olmasını yani şebeke gerilimi üzerindeki etkinin az olmasını sağlamaktadır. Yüksek rüzgâr hızlarında ise türbin anma çıkış gücüne sahip olacak yani durdurma işleminin gerilim üzerindeki etkisi daha fazla olacaktır. Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde durdurma işlemi esnasında, önce kapasitör grupları açılarak frenleme ile türbin hızı yavaşlatılmakta sonra ise güç akışının tersine dönmesi sonucunda generatörün şebeke ile bağlantısı kesilmektedir. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde ise birkaç saniye içerisinde üretilen güç sıfır olmakta ve daha yumuşak bir durdurma işlemi gerçekleştirilmektedir (Rona, 2014).

2.6.2.3. Flikermetre (Titreşim ölçer)

Genel olarak şebekedeki toplam fliker miktarını ölçmek için anlık titreşim hissi $P_{st}(t)$ değerleri referans olarak alınmakta ve bu $P_{st}(t)$ değerleri de flikermetre (titreşim ölçer) adı verilen bir alet yardımıyla ölçülmektedir.

Başlıca elektrik şebekelerinde titreşimin değerlendirilmesi oldukça zor bir işlemdir, çünkü bu değerlendirmeler, uzun hesaplama süreleri ve özel prosedürler gerektirir. Genel olarak titreşim seviyesi, değişikliklerin büyüklüğüne, şekline ve aynı zamanda tekrarlama hızlarına bağlıdır. IEC 61000-4-15 standartlarına göre, kısa vadeli titreşim şiddetini hesaplamak için bir titreşim ölçer modeli oluşturulmuştur(Wei vd., 2011). Bu oluşturulan flikermetre modeli Şekil 2.15'te gösterilmektedir (Kaddah vd., 2016; Taşcıkarağlu, 2008).



Şekil 2. 15. IEC flikermetre modelinin blok diyagramı

Flikermetrede gerçekleştirilen işlevler ifade edilirken bloklar A,B,C,D ve E şeklinde sınıflandırılmaktadır. Bu blokların işlevleri sırasıyla aşağıda ifade edilmiştir.

- Blok A içerisinde, giriş gerilimini pu cinsinden ifade etme ve ikinci dereceden demodülatörü simüle etme şeklinde iki ayrı işlev gerçekleştirilmektedir. Yani Blok A, uygulamada Blok 1 ve 2'nin birlikte gerçekleştirdiği fonksiyonları yerine getirmektedir. Blok 1'de bulunan kalibrasyon sinyal üretecinin amacı, flikermetrenin doğru çalışıp çalışmadığını kontrol etmekken, Blok 2'de bulunan

demodülatörün amacı ise lambanın davranışını simüle etmektir. Bu kare prensipli demodülatör, ölçeklendirilmiş giriş gerilim değerinin karesini alarak yüzde gerilim dalgalanmasının düzeltilmesini sağlamaktadır.

- Blok B, DC gerilimini kesme, taşıyıcı dalganın sinyalini ve ikinci dereceden demodülatörün çıkışında bulunan yüksek frekanslı dalgalanmaları ortadan kaldırma işlevlerine sahiptir. Yani Blok 3'ün ilk filtreleme görevini yerine getirmektedir. Blok 3 içerisinde iki filtre ve bir de ölçüm aralığı seçicisi bulunmaktadır. Bu kademe seçici, kazanç değerini değiştirerek cihazın hassaslığını değiştirmektedir. Flikermetrenin yeterli hassas ölçümler yapması durumunda kullanılmayabilir.
- Blok C, değişken bir sinüzoidal gerilimle çalışan akkor lambanın gerilim dalgalanmalarına karşı insan gözünün frekansındaki tepkiyi simüle eder. Yani bu blok, Blok 3'ün ikinci filtre tarafındaki fonksiyonu yerine getirmektedir.
- Blok D, göz-beyin zincirindeki titreşimin doğrusal olmayan algısını simüle ederek, C bloğundan çıkan sinyalin karesini almaktadır. Yani, Blok 4'ün ilk bölümünde gerçekleştirilen işlev yerine getirilmektedir.
- Blok E ise, Blok 4'ün ikinci bölümünde gerçekleştirilen beynin hafızada tutma süresini simüle eden 0.3 saniyeli birinci dereceden bir yüksek geçiren filtre işlevini yerine getirmektedir. Bu bloğun çıkışında anlık $P_{st}(t)$ değerleri elde edilir. Yani bu blok, titreme olayının beyindeki modellemesidir.

Blok 5 içerisinde ise ani fliker seviyesinin istatiksel analizi gerçekleştirilerek kısa ve uzun süreli fliker değerleri elde edilir. Bu blok içerisindeki istatiksel analizlere bağlı olarak kısa süreli fliker seviyesi Denklem 2.39'dakigibi hesaplanmaktadır.

$$P_{ST} = \sqrt{0.0314\,P_{0,1} + 0.0525P_{1S} + 0.0657P_{3S} + 0.28P_{10S} + 0.08P_{50S}} \quad (2.39)$$

Burada $P_{0.1}$, P_{1S},P_{3S},P_{10S},P_{50S} yüzdelikleri, gözlem periyodu boyunca zamanın sırasıyla %0.1, 1, 3, 10 ve 50'sini aşan titreşim seviyeleridir. Formülde bulunan s indisleri ise daha doğru sonuçlarına ulaşmak için düzgünleştirilmiş değerleri ifade etmektedir. Bu değerlerde aşağıda gösterilen denklemler yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$P_{50s} = (P_{30} + P_{50} + P_{80})/3 \quad (2.40)$$

$$P_{10s} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})/5 \quad (2.41)$$

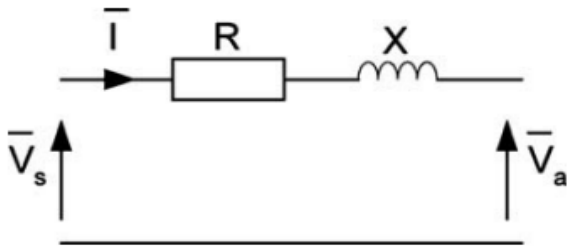
$$P_{3s} = \left(P_{2,2} + P_3 + P_4\right)/3 \quad (2.42)$$

$$P_{1s} = \left(P_{0,7} + P_1 + P_{1,5}\right)/3 \quad (2.43)$$

Flikermetre içerisindeki hafıza süre sabiti 0,3 s olduğundan dolayı, $P_{0,1}$ değeri aniden değiştirilmez ve bu nedenle söz konusu zaman dilimi için düzeltmeye ihtiyaç duyulmamaktadır (Kaddah vd., 2016; Machmoum vd., 2010; Taşcıkarağlu, 2008).

2.6.2.4. Fliker Kompanzasyon Stratejisi

Gerilim titremesi (fliker) olayları, gerilim değişimleriyle oluşmakta, bu gerilim değişimleri de aktif ile reaktif güce doğrudan bağlı olmaktadır. Sonuç olarak gerilim dalgalanmasını yani fliker olayını reaktif güç değerini gerçek gücün değişimi ile düzenleyerek azaltabiliriz. Bu işleme fliker kompanzasyon işlemi denilmektedir. Bu işlem fliker değerinin azaltılması güç faktörü açısı (Ψ) ile şebeke empedans açısı (Ψ_K) açısı arasındaki farkın 90^o'ye yaklaşmasını sağlar. Aynı zamanda bu işlemde DC bara gerilimin, şebeke tarafındaki dönüştürücü tarafından kontrol edilerek sabit tutulduğu varsayılmıştır ve bu nedenle söz konusu işlemlerin tamamı rotor tarafındaki dönüştürücüye dayalı olarak gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2. 16. Gerilim düşümünün temsili için kullanılan tek hat diyagramı

Şekil 2.16'da gerilim düşümü için kullanılan tek bir hat diyagramı gösterilmiştir. Bu diyagrama göre tek hattaki gerilim düşümünü yaklaşık olarak aşağıda gösterilen Denklem 2.44 yardımıyla hesaplayabiliriz.

$$\Delta V = \frac{P_S R + Q_S X}{V_a} \quad (2.44)$$

R: hattın direnci (Ω)

X: hattın endüktansı (Ω)

P_S: generatör stator aktif gücü (W)

Q_S: generatör stator reaktif gücü (VAr)

V_a: terminal hattına uygulanan RMS gerilim (V)

Fliker kompanzasyon işleminde büyük öneme sahip olan güç faktörü açısı (Ψ) ve şebeke empedans açısı (Ψ_K) değerleri sırasıyla Denklem 2.45 ve Denklem 2.46'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\tan \Psi = \frac{Q_S}{P_S} \tag{2.45}$$

$$\tan \Psi_K = \frac{X}{R} \tag{2.46}$$

Buradaki güç faktörü açısı ve şebeke empedans açısı değerlerini veren 3 bağıntıdan yararlanarak gerilim düşümü değeri için Denklem 2.47'deki bağıntıyı elde ederiz.

$$\Delta V = \frac{P_S.R.\cos(\Psi - \Psi_K)}{V_a \cos \Psi.\cos \Psi_K} \tag{2.47}$$

Denklem 2.47'den anlaşılacağı gibi (Ψ-Ψ_K) ifadesinin 90^o 'ye yaklaşması, gerilim değişiminin yanı sıra karşılık gelen titreme (fliker) seviyesinin azalmasına neden olacaktır. Yani fliker kompanzasyon işlemindeki temel amacımız, açılar arasındaki farkı 90^o yapabilmektir. Bu ifadenin 90^o olması durumunda gerilim düşümünün değerinin diğer bir ifadeyle Denklem 2.44'deki bağıntının pay kısmının sıfır olması anlamına gelmektedir. Bu duruma bağlı olarak Denklem 2.48 elde edilir.

$$Q_{ref} = -\frac{R.P_{ref}}{X} \tag{2.48}$$

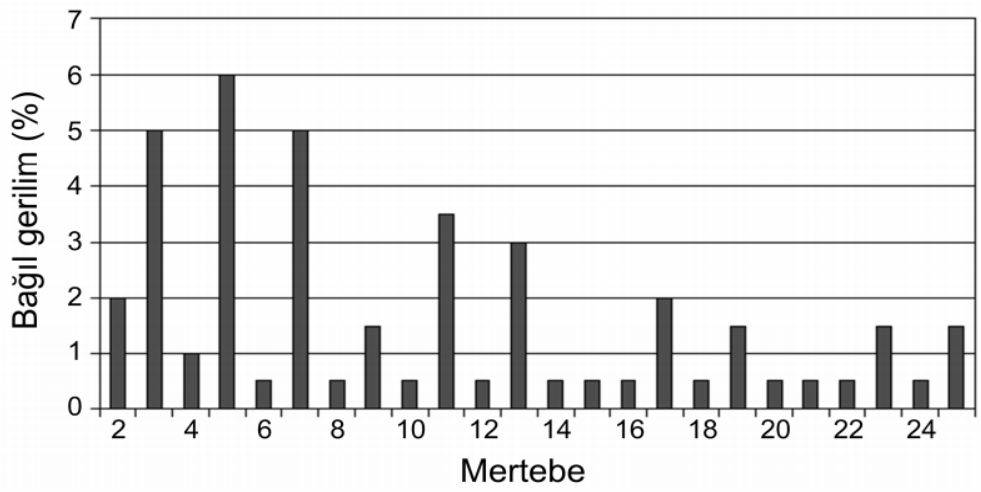
Denklem 2.48 reaktif güç değerini aktif gücün değişimi ile düzenleyebileceğimizi ve böylelikle toplam fliker miktarını azaltabileceğimizi göstermektedir(Hsu vd., 2015; Machmoum vd., 2010).

2.6.3. Harmonikler

Harmonikler, akım ve gerilimin temel sinüs dalgasında bozulmaların meydana gelmesi durumudur. Rüzgâr enerji santrallerinde oluşan harmonikler, şebekede bozucu etkilere neden olan güç kalitesi sorunlarından bir tanesidir. Genelde harmonik akımlar, invertörler, statik VAr kompanzatörleri, ark fırınları, trafolar gibi doğrusal olmayan

yüklerden kaynaklanmaktadır. Bu harmonik akımların sürekli akışı, yükleri etkileyerek gerilim harmoniklerinin oluşmasını tetiklemektedir (Mararakanye ve Bekker, 2019). Harmonikler, güç sisteminde ek kayıplar oluşturarak sistem veriminin azalmasına, şebeke gerilim dalga şeklinin bozulmasına, gerilim düşümlerinin artmasına ve iletkenlerde termal ısınmaya neden olmaktadırlar.

Harmonikler sonucunda bozulan dalga yapısı Fourier transformunun uygulanması ile frekanslarına ayrılmaktadır. Burada temel frekansın katlarında olanlara harmonik adı verilirken, diğerler bileşenlere ara harmonik adı verilmektedir. Örneğin 150 Hz üçüncü harmonik bileşeni, 250 Hz beşinci harmonik bileşeni ifade etmektedir. Şebekede kullanılan standartlar, tekil harmonikler ile Toplam Harmonik Bozulma (THB) için limit değeri getirmiştir. EN 50160 standardına göre her bir tekil harmonik bileşenin 10 dk'lık ortalama efektif değerlerinin, bir haftanın %95'i boyunca, nominal gerilimin yüzdesi olarak Şekil 2.17 'de gösterilen sınırlar içerisinde olması gerekmektedir. Gerilimin toplam harmonik bozulma değeri için sınır ise %8'dir (Dabakoğlu, 2017).



Şekil 2. 17. EN 50160 standardına göre tekil harmonik gerilimlerin sınır değerleri

Güç sistemindeki akım ve gerilimler için toplam harmonik bozulma miktarı (THB), Denklem 2.49 ile hesaplanmaktadır.

$$\mathrm{THB} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} Qh^2}}{Q_1} \tag{2.49}$$

Bu bağıntıda yer alan Q_h ölçülen harmonik değerleri, Q_1 ise ana harmonik değeri ifade etmektedir. Standartlar içerisinde bulunan kabul edilebilir harmonik sınır değerleri 40. harmoniğe kadar tanımlanmaktadır. Çünkü 40. harmonikten sonra gelen bileşenlerin değerleri çok küçüktür (Benzohra vd., 2020; Taşcıkarağlu, 2008).

Sabit hızlı asenkron generatörlü rüzgâr türbinlerinde, güç elektroniği dönüştürücülerine ihtiyaç duyulmaz, sadece başlatma esnasında kısa süreli olarak yumuşak yol verici devresi kullanılmaktadır. Bu duruma bağlı olarak bu sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin harmonik bileşen üretmediği varsayılır. Ancak değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde güç elektroniği dönüştürücüleri kullanılmaktadır. Bu dönüştürücülerden özellikle tristör tabanlı olanlar, standartlarda limit değerleri verilen harmonik gerilimleri etkileyebilecek harmonik akımların oluşmasına neden olur. Fakat günümüzde değişken hızlı rüzgar türbinleriyle kullanılan güç dönüştürücülerinin çoğu transistör tabanlıdır ve 3 kHz'in üzerindeki anahtarlama frekanslarında çalışmaktadırlar. Bu nedenle bu dönüştürücülerin oluşturduğu harmonik değerler, ihmal edilecek kadar azdır ve gerekli olursa küçük filtreler yardımıyla kolayca kaldırılırlar (Rona, 2014).

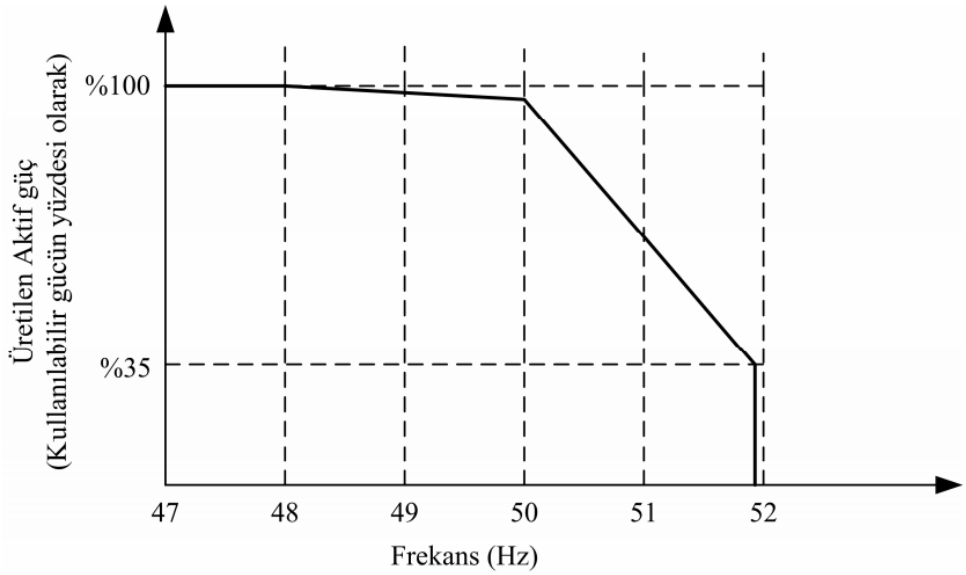
2.6.4. Frekans Kararlılığı

Frekans kararlılığı, güç sisteminin arz-talep arasındaki dengesizlik sonrasında sabit frekans değerini sürdürebilme yeteneğidir. Rüzgâr generatörleri güç dönüştürücüleri yardımıyla şebekeye bağlandığı için güç sisteminin eylemsizliğine katkıda bulunmazlar. Şebekedeki düşük eylemsizlik ve ani arz- talep dengesizlikleri sırasında, birincil rezervler kullanılmadan önce, frekansın çok düşük olma riski vardır ve bu durum güç sisteminde ani kesintilerinin oluşmasına neden olabilir. Genel olarak, frekans kararlılığı büyük ölçüde güç sisteminin boyutuna, yenilenebilir enerjinin payına ve uygulanan kontrol stratejilerine bağlıdır. Yapılan literatür çalışmaları, güç sistemindeki arz-talep dengesini etkileyen sorunların yenilenebilir enerjinin anlık penetrasyon seviyesinin %20'nin üzerinde olduğunda, frekans kararlılığı sorunlarının ise yenilenebilir enerjinin anlık penetrasyon seviyesinin %50'nin üzerinde olduğunda önemli hale geldiğini göstermektedir (Mararakanye ve Bekker, 2019).

Üretim ve tüketim arasındaki fark, sistem frekansında değişimlere neden olur. Üretilen gücün tüketilenden daha fazla olması durumunda frekans artarken, tam tersi durumda ise frekans azalmaktadır. Şebekelerde yük değerinin artmasıyla birlikte, sistem frekans

kontrolü devreye girer ve frekans yeniden nominal değerine ulaşıncaya kadar bazı generatörlerin tork değeri artırılır. Rüzgâr türbinlerinin şebekeye bağlanması da şebeke frekansını etkilemektedir. Yine üretimde aksaklık ve beklenmeyen talep artışı durumlarında şebeke frekansının sabit tutulabilmesi için generatörün güç çıkışını artırma yeteneğine sahip olması istenilir. Bu nedenle rüzgâr türbinlerinin primer ve sekonder frekans kontrolü yapabilmeleri oldukça önemlidir Ancak elektrik piyasası şebeke yönetmeliğine göre rüzgâr enerji santrallerinin frekans kontrolüne katılmaları günümüzde zorunlu değildir (Dabakoğlu, 2017). Buna rağmen güç sistemlerinin sürekli olarak çalışabilmesi için şebeke frekansının sabit kalması oldukça önemlidir. Yani rüzgâr enerji santrallerinin çıkış frekansının şebeke frekansına eşit olması veya farklı zaman aralıkları için frekans değişiminin izin verilen sınırlar içerisinde olması gerekmektedir(Uslu, 2019).

EN 50160 standardına göre yılın %99.5'inde, temel frekans değerinin 10 saniyelik ortalama değerleri 49.5 Hz-50.5 Hz aralığında, yılın %100'ünde ise 47 Hz- 52 Hz aralığında olması gerekmektedir (Taşcıkarağlu, 2008). Şebeke yönetmeliğine göre rüzgar türbini şebeke frekansı 50 Hz'i aştığı anda nominal aktif güç değerini düşürmeli ve belirli bir değerden sonra ise devreden çıkmalıdır. Bu durum Şekil 2.18'de gösterilmiştir (EPDK, 2017).



Şekil 2. 18. Rüzgâr türbini tarafından üretilen aktif gücün frekansa bağlı değişimi

2.6.5. Aktif Güç

Rüzgâr enerjisine dayalı üretim sistemleri için aktif güç çıkışı, tesisin toplam kurulu güç değerinin %20 ila %100'ü arasında, gerekirse TEİAŞ tarafından gönderilen sinyallerle otomatik olarak kontrol edilebilmelidir. Bu kapsamda;

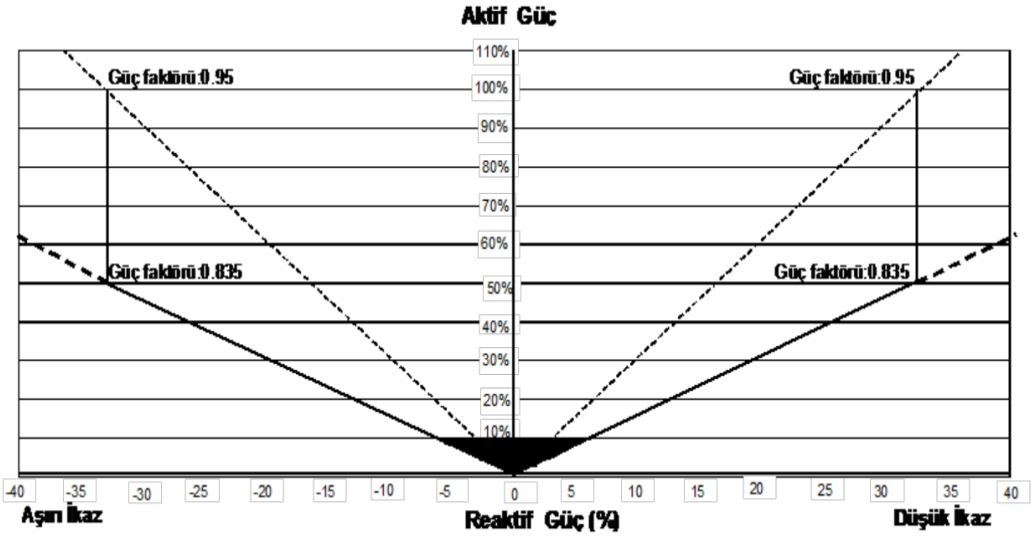
a) Kurulu güç değeri 100 MW ve altındaki rüzgâr santrallerinde dakikada yük alma-atma hızının kurulu güç değerinin %5'i kadar olması gerekir.
b) Kurulu güç değeri 100 MW üzerindeki rüzgâr santrallerinde ise dakikada yük alma-atma hızının kurulu güç değerinin %4'ü kadar olması gerekir (Uslu, 2019).

2.6.6. Reaktif Güç

Bir iletim hattının uçları arasında gerilim farkı, hattaki reaktif gücün akış yönünü belirlemektedir. Gerilim ile reaktif güç arasındaki bu ilişkiye bağlı olarak, üretilen ve talep edilen reaktif güç arasındaki farkın, şebekede gerilim değişimine neden olacağını söyleyebiliriz. Eğer sağlanan reaktif güç, talep edilen reaktif güç değerinden fazla olursa gerilimde artma, daha az olursa da gerilimde azalma meydana gelmektedir. Yani şebekede bulunan endüktif ve kapasitif bileşenler arasındaki ilişkiye bağlı olarak reaktif güç dengesi değişir.

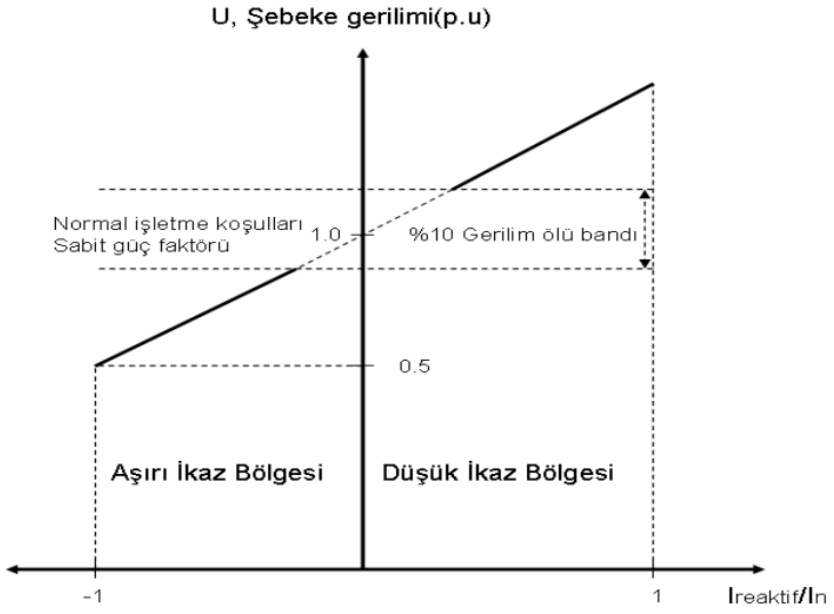
Asenkron generatörler, reaktif güç tüketmektedir. Bu generatörlerin yüksüz durumda bile reaktif güç tüketim miktarları, nominal aktif güç değerinin %30-40'ı civarındadır. Tam yük çalışma esnasında ise reaktif güç tüketimi %60'lara kadar artabilir. Bu nedenle, asenkron generatörlü rüzgâr türbin santrallerinde kompanzasyon işlemine ihtiyaç duyulur. Bu işlem sayesinde şebekeden çekilen reaktif güç miktarı azaltılarak gerilim değeri ve sistem kararlılığı arttırılır.

Generatörler şebeke için talep edilen reaktif güç değerini sağlarken, ürettikleri aktif güç değeri düşük olursa güç faktörü azalır. Normal şartlar altında güç faktörünün 1 değerinden uzaklaşması aşırı akımların oluşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle rüzgâr türbinlerinin güvenli olarak çalışmasını sağlamak amacıyla güç faktörü limitleri belirlenmiştir. Türkiye'de rüzgâr santrallerinin iletim sistemi bağlantı noktasında Şekil 2.19'da belirtilen sınırlar içerisindeki güç faktörü değerleri için her noktada çalışabilir olmaları gerekmektedir (EPDK, 2017).



Şekil 2. 19. Rüzgâr enerji santralleri için reaktif güç kapasite eğrisi

Şekil 2.19'da gösterilen eğriye göre, rüzgâr türbin santrali %100 ile %50 arasında üretim yaparken, 0.95 endüktif ve 0.95 kapasitif güç faktörü aralığında çalışabilmeli, %10 ile %50 arasında üretim yaparken ise 0.835 endüktif ve 0.835 kapasitif güç faktörü aralığında çalışabilmedir. Aktif güç üretimin %10'dan daha düşük seviyelere inmesi durumunda, reaktif güç desteği aranmaz (Boynueğri, 2010; Uslu, 2019).



Şekil 2. 20. Gerilim dalgalanmaları esnasında rüzgâr türbinleri tarafından verilmesi gereken reaktif güç tepkisi

Şekil 2.20'de gerilim dalgalanmalarına karşı rüzgâr türbinlerinin vermesi gereken reaktif güç tepkisi gösterilmiştir(EPDK, 2017). Rüzgâr türbinleri, %10'a kadar şebeke gerilim dalgalanmaları için herhangi bir tepki vermemektedir. Ancak %10'un üzerindeki gerilim dalgalanmalarında, nominal gerilim değerinin %1'lik değişimine karşılık, nominal akım değerinin %2'si oranında reaktif akım desteğinin rüzgar türbin sistemleri tarafından sağlanması gerekir (Taşcıkarağlu, 2008).

2.6.7. Kesintiler

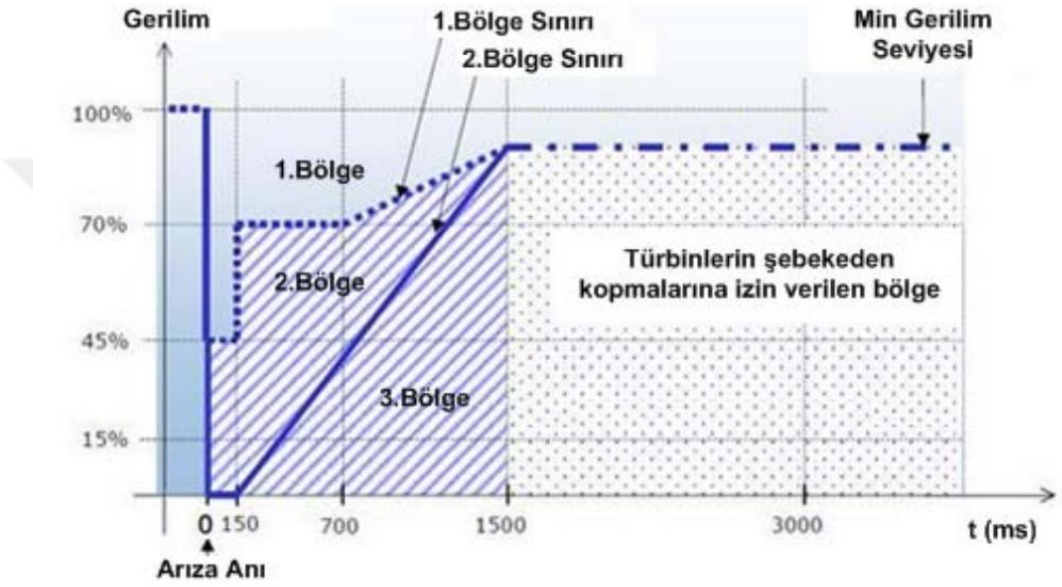
Güç kesintileri, koruma cihazlarının açılıp kapanması, arızalanması, ekipman hataları, kötü koordinasyon vb. durumlarda oluşabilmektedir. Yine bu durumların dışında rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerjinin artan payının bir sonucu olarak şebekede elektrik kesintisi sorunları yaşanabilir. Yani, bazı durumlarda da rüzgâr türbin sistemleri, güç kesintilerinin oluşmasını tetikleyebilir. Bu kesintiler, değişken yenilenebilir enerji üretiminin yüksek olduğu düşük yükleme koşullarında ve geleneksel ünitelerin minimum işletim kısıtlamaları nedeniyle limit değerlerin daha da azaltılmadığı durumlarda, iletim yoğunluğu veya sistem arz- talep dengeleme ile ilgili sorunlardan kaynaklanmaktadır. Bu elektrik kesintilerini azaltmak için alınabilecek ortak önlemler, yeni iletim hatlarını inşa etmek, üretim planlama ve tahminini geliştirmek şeklindedir.

Güç kesintileri, kısa süreli veya uzun süreli olarak gerçekleşebilir. Birkaç milisaniye veya 1-2 saniye arasındaki güç kesintilerine kısa süreli, 2 saniyeden daha fazla olan güç kesintileri ise uzun süreli güç kesintileri adı verilmektedir. Güç kesintileri, bilgi kaybı, ekipmanların arızalanması ve koruma cihazlarının devreye girmesi gibi sorunlara neden olmaktadır (Dabakoğlu, 2017; Mararakanye ve Bekker, 2019).

2.7. Arıza Anı ve Sonrası

Türkiye'de şebeke yönetmeliğinde, ortak bağlantı noktasında (OBN) arızanın oluşması durumunda, arıza anı ve sonrası için rüzgâr enerji santrallerinin vermesi gereken tepki, Şekil 2.21'de gösterilmiştir (EPDK, 2017). OBN'daki hat gerilim değeri, 1.ve 2. bölgede olduğu sürece rüzgâr türbinin şebekeye bağlı olarak kalması gerekmektedir. Ancak 2. bölgede arıza anında rüzgâr türbini kararsız hale gelirse kısa süreli olarak, rüzgâr türbinlerinin şebekeden ayrılmasına izin verilir. Tüm bu durumların dışında,

arıza esnasında gerilim 1. bölgede ise arıza bittikten hemen sonra rüzgar türbinlerinin aktif güç değeri saniyede nominal gücün %20'si oranında artırılırken, arıza esnasında gerilim 2.bölgede ise arıza bittikten hemen sonra rüzgar türbinlerinin aktif güç değeri saniyede nominal gücün %5'i oranında artırılır. Amaç, rüzgâr türbinlerinin üretebileceği maksimum aktif güç değerine ulaşmaktır.



Şekil 2. 21. Rüzgâr enerji sistemlerinin arıza esnasında ve sonrasında sağlamaları gereken tepki

Gerilim 3. bölgede ise, rüzgâr santrallerinin her durum için kısa süreli olarak şebekeden ayrılmasına izin verilmektedir. Bu bölgede koruma sistemleri devreye girebilir. Bu durum rüzgâr santralinin tamamen şebekeden ayrılmasını sağlar (Boynueğri, 2010; Koç ve Güven, 2011).

3.BÖLÜM

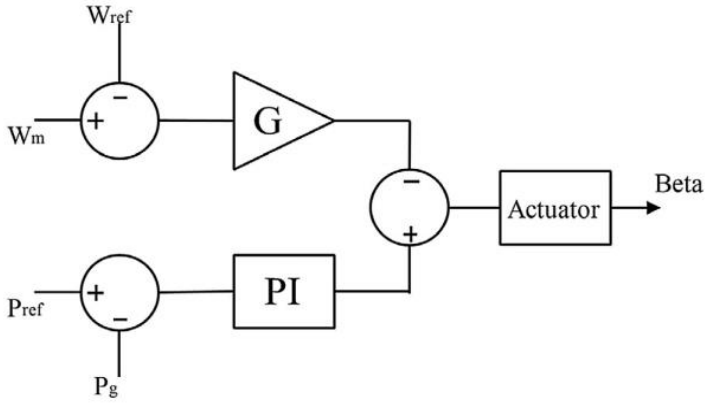
BULGULAR

Bu tez çalışmasında rüzgâr enerji santrallerinin şebeke entegrasyonun incelenebilmesi amacıyla PSCAD/EMTDC'de şebekeye bağlı bir rüzgâr türbin modeli ile oluşturulmuştur. Rüzgar türbin modeli yapısında, değişken hızlı rüzgar türbini, kalıcı mıknatıslı senkron generatör (KMSG) ile tam dalga diyot doğrultucu, DC hat ve akım kaynağı invertörünü içeren bir AC/DC/AC dönüştürücüsünü bulunmaktadır.

3.1. Rüzgâr Türbin - Generatör Modeli

Rüzgâr türbinleri kanatları yardımıyla rüzgâr enerjisinden mekanik enerji üreterek, generatörün tahrik edilmesini sağlayan yapılardır. Generatörler de elektrik enerjisinin üretimini gerçekleştirirler. Türbin gücü genellikle, mekanik döngüdeki sürtünme nedeniyle generatör güç değerinden %20 civarında daha güçlü olacak şekilde seçilmektedir. Bu nedenle çalışmada 3 MVA' lık kalıcı mıknatıslı senkron generatör (KMSG) için 3.6 MW' lık bir rüzgar türbini kullanılmıştır. Bu rüzgâr türbini 3 kanatlı, yatay eksenli ve değişken hızlıdır. PSCAD/EMTDC'de bulunan ve eğim açısı düzenleyicisi olarak bilinen Turbine Governor bileşeni yardımıyla rüzgâr türbininin eğim kontrol özelliğine sahip olması sağlanmıştır.

Eğim kontrol özelliği sayesinde türbin istenilen eğim açısı aralığında çalıştırılmış ve değişken rüzgâr hızlarına karşılık türbin güç regülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Turbine Governor bileşenin eğim açısını düzenlemesini sağlayan kontrol blok yapısı Şekil 3.1'de gösterilmiştir (Chaithanya vd., 2019).



Şekil 3. 1. Eğim kontrol işlemi

Oluşturulan türbin modelinde, generatör olarak KMSG'ün kullanılmasında, geniş değişken hız kontrol özelliğine sahip olmaları, kendinden uyartımlı olmaları, yüksek güç faktöründe çalışabilmeleri, daha az bakım gerektirmeleri ve verim oranlarının yüksek olması gibi nedenler etkili olmuştur. Çalışmada kullanılan türbin ve generatöre ait parametre değerleri sırasıyla Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

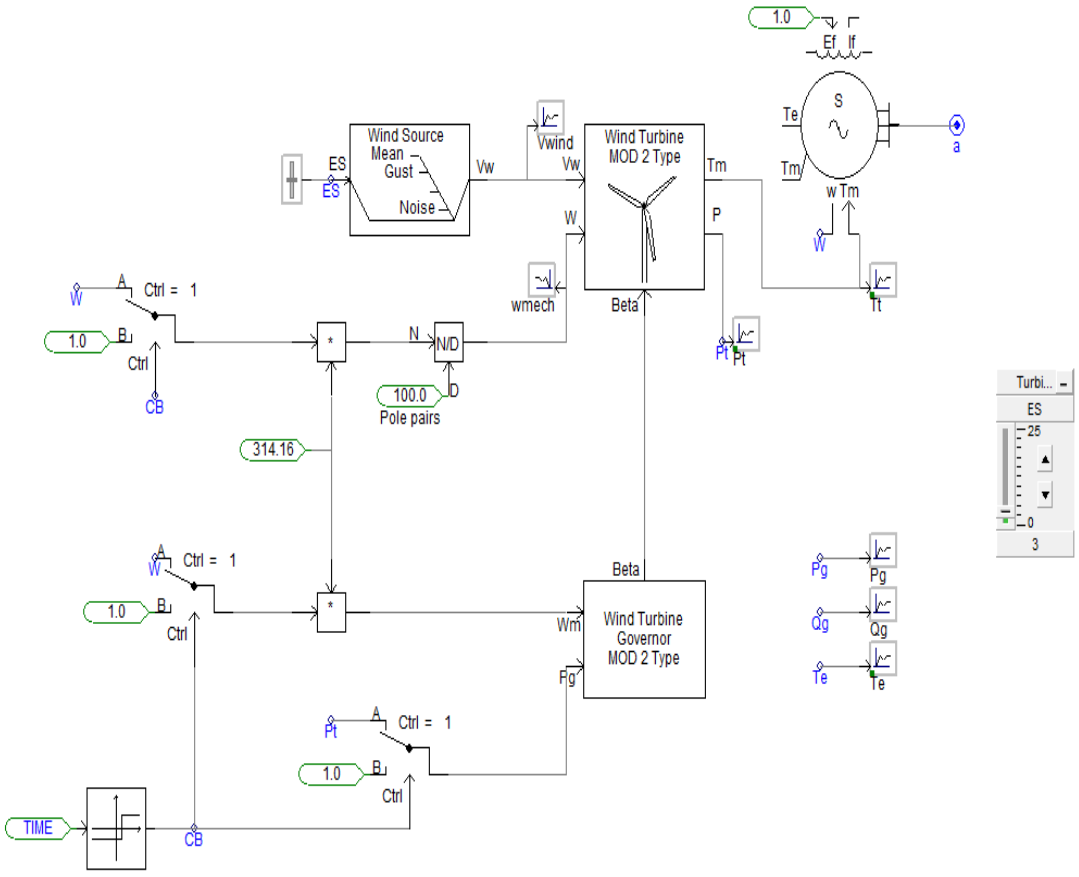
Tablo 3. 1. Türbin parametre değerleri

PARAMETRELER	DEĞERLER
Türbin nominal güç	3.6 MW
Rotor yarıçapı	46.2 m
Hava yoğunluğu	1.225 kg/m^3
Rotor alanı	6716 m^2
Dişli oranı (makine/türbin)	1
İzin verilen eğim açı aralığı	0-25^o
Başlangıç eğim açısı	12^o
Nominal rüzgâr hızı	13 m/s
Maksimim güç faktörü	0.4
Türbin tipi	MOD2

Tablo 3. 2. KMSG'ün parametre değerleri

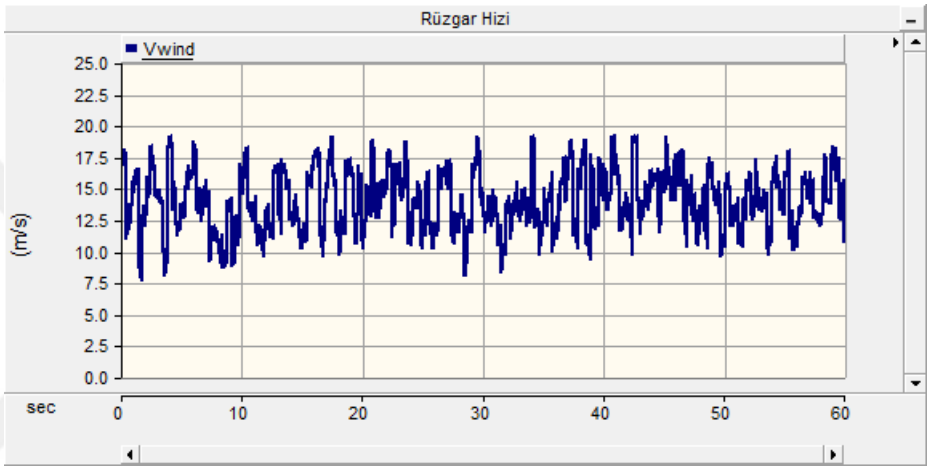
PARAMETRELER	DEĞERLER
Generatör nominal güç	3 MVA
Nominal RMS faz gerilimi	0.69 kV
Nominal RMS hat akımı	1.45 kA
Kutup çifti sayısı	100
Temel açısal frekans	314.16 rad/s

Çalışmada PSCAD/EMTDC'de oluşturulan türbin-generatör modeli, Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

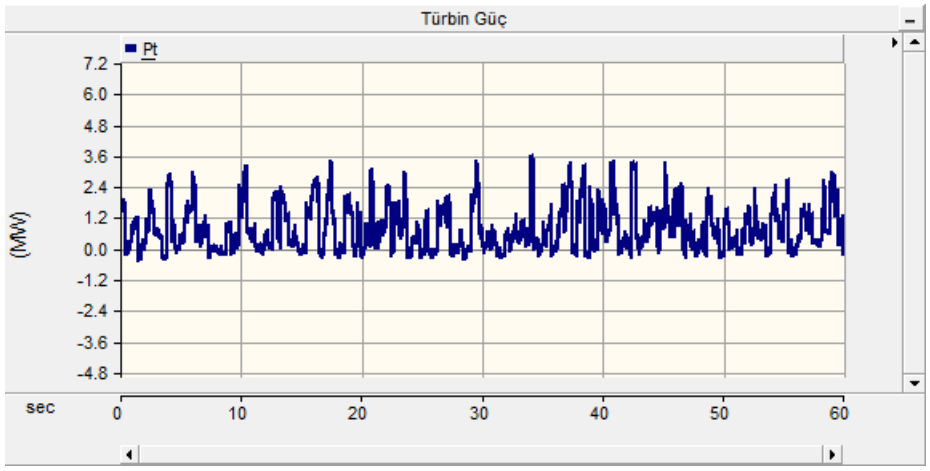


Şekil 3. 2.PSCAD/EMTDC'de oluşturulan rüzgâr türbin - generatör modeli

Bu model için rüzgâr kaynağı elemanı yardımıyla günlük hayattaki rüzgârlara benzeyen değişken yapılı bir rüzgâr elde edilmiştir. Bu amaçla rüzgar kaynağı elemanı içerisinde bulunan V_{gust} ,V_{noise} bileşenleri ile ES harici giriş bileşeni kullanılmış, ortalama rüzgar hızı ise 11 m/s olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak Şekil 3.3'de gösterilen ve 7.8 ile 20 m/s hızları arasında değişkenlik gösteren bir rüzgâr modeli elde edilmiştir. Bu değişken rüzgara karşılık türbin gücü Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Türbin gücü maksimum 3.6 MW olacak şekilde rüzgar hızı değerlerine bağlı olarak değişkenlik gösterir.



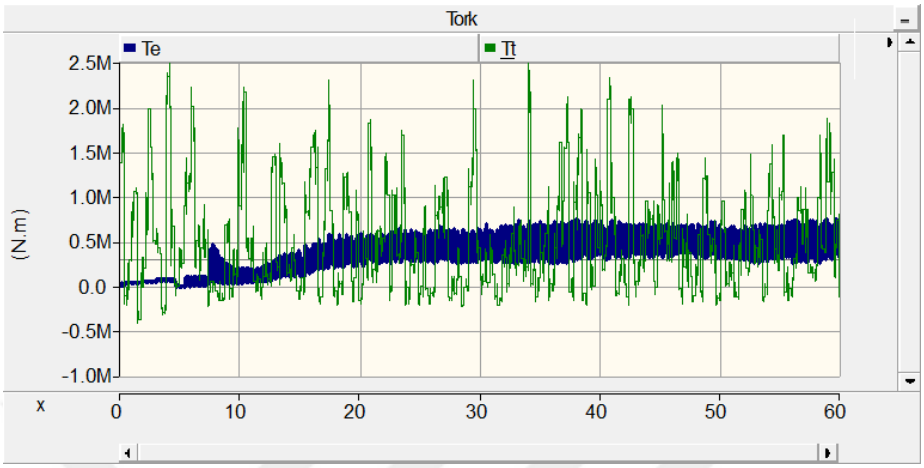
Şekil 3. 3. Değişken rüzgâr hızı



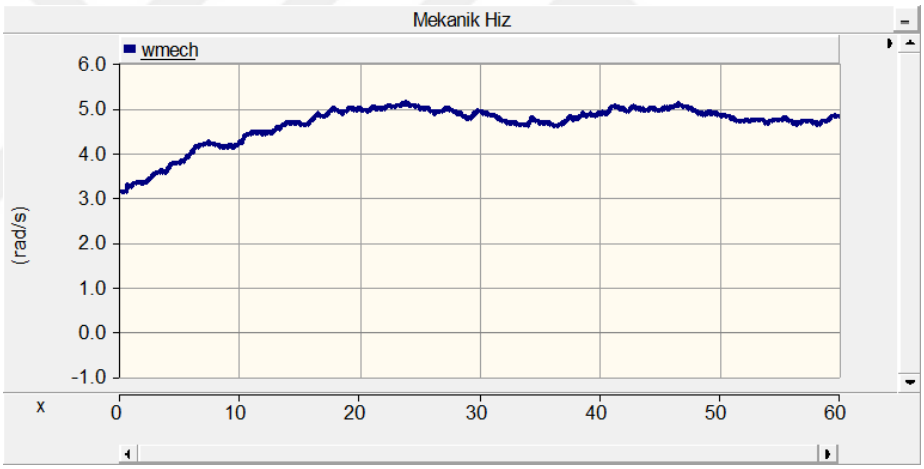
Şekil 3. 4. Değişken rüzgâr hızında elde edilen türbin gücü

Şekil 3.5'te türbin mekanik tork değeri ile generatörün elektromanyetik tork değeri, Şekil 3.6'da ise rotor mekanik hız değeri gösterilmiştir. Mekanik hız değerinde, türbin ve generatörün tork değerleri arasındaki ilişkiye bağlı olarak t=20 s'ye kadar kademeli bir artışın olduğu görülmektedir. Genel olarak mekanik hızdaki dalgalanmaların

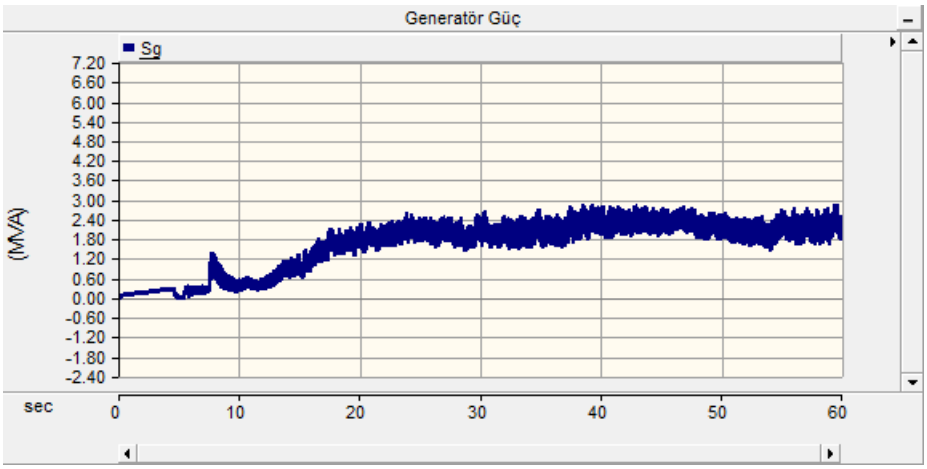
azalarak belirli bir değere ulaştığı yaklaşık t=20s'den sonra türbin mekanik tork değeri, türbin güç değeri ile doğru orantılı olarak değişmektedir



Şekil 3. 5. Generatörün elektromanyetik torku ile türbinin mekanik torku



Şekil 3. 6. Rotorun mekanik hızı

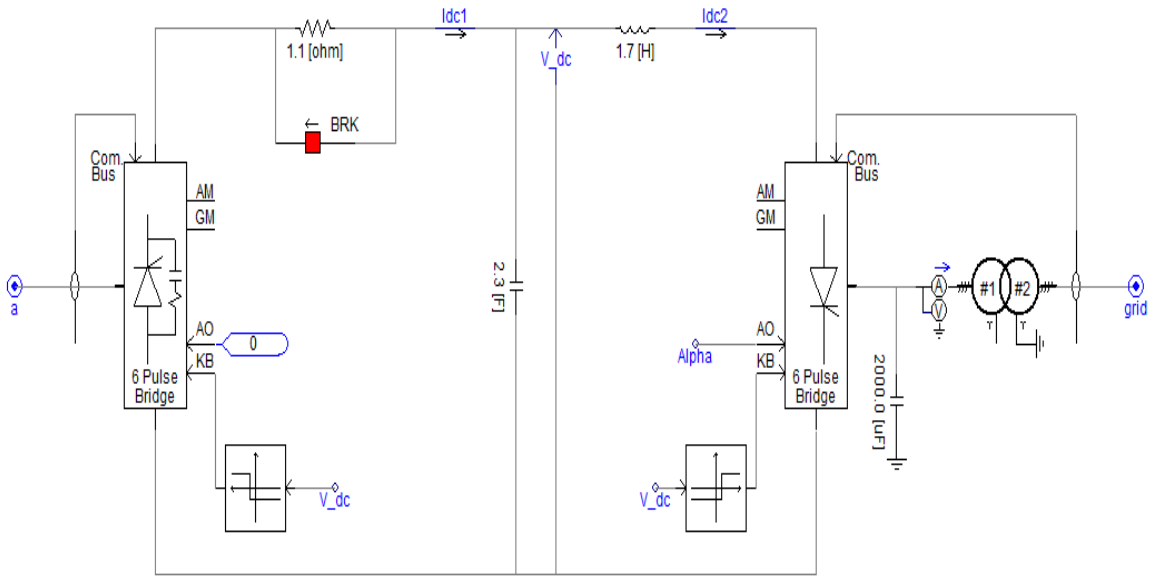


Şekil 3. 7. Generatör görünür güç

Nominal gücü 3 MVA olan KMSG'den değişken hızlı rüzgar modeline karşılık elde edilen görünür güç değerleri Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Generatör görünür güç değerleri t=11.5 s'den yaklaşık t=20 s'ye kadar sürekli olarak artmış ve t=20 s'den sonra generatör çıkışından maksimum 2.84 MVA olmak üzere genellikle 1.7 MVA ile 2.4 MVA aralığında güç elde edilmiştir. Yani generatörün nominal güç değerine göre burada minimum 0.16 MVA olmak üzere genellikle 0.6 MVA - 1.3 MVA aralığında güç kayıpları gerçekleşmektedir.

3.2. AC/DC/AC Dönüştürücü Modeli

Şebekede sabit gerilim ve frekansın sağlanması için değişken hızlı rüzgâr türbinleri şebekeye güç elektroniği dönüştürücüleri ile bağlanmaktadır. Çalışmada diyot doğrultucu, DC hat ve akım kaynağı invertörü olmak üzere 3 ayrı kısımdan oluşan bir AC/DC/AC dönüştürücüsü kullanılmıştır. Bu dönüştürücünün PSCAD modeli Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Dönüştürücünün yapısındaki doğrultucu ile invertör devreleri PSCAD'de bulunan 6 darbeli köprü devresinden yararlanılarak oluşturulmuştur. Bu 6 darbeli köprü devresi için giriş ve çıkış parametreleri Tablo 3.3'te gösterilmiştir.



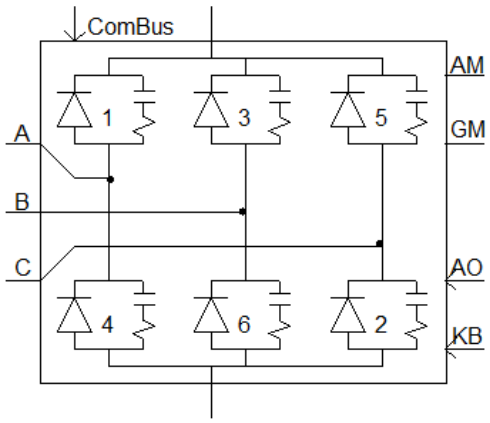
Şekil 3. 8. AC/DC/AC dönüştürücü modeli

Tablo 3. 3. 6 Darbeli Köprü devresine ait parametreler

PARAMETRELER	GİRİŞ/ÇIKIŞ	TANIM
ComBus	Giriş	Dahili faz kilitli osilatörün giriş sinyali
KB	Giriş	Giriş blok/deblok kontrol sinyali
A0	Giriş	Dönüştürücü için alfa sırası
AM	Çıkış	Ölçülen (alfa) ateşleme açısı
GM	Çıkış	Ölçülen (gama) sönme açısı

3.2.1. Diyot Doğrultucu

Rüzgâr türbin sistemlerinde doğrultucular temel olarak, generatör çıkışındaki AC çıkış gerilimin DC gerilime dönüştürülmesi amacıyla kullanılırlar. Modelde bulunan doğrultucu, kontrolsüz 3 faz tam dalga diyot doğrultucusudur. Doğrultucunun devre modeli Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Doğrultucu yapısında anahtarlama kayıplarının azaltılmasını sağlayan RC snubber (durdurucu) devreleri vardır.



Şekil 3. 9. Doğrultucu modeli

Bu tür kontrolsüz 3 faz tam dalga diyot doğrultuculardan elde edilen DC hat gerilim değeri Denklem 3.1' de gösterilen bağıntı ile hesaplanır (Başkurt, 2012).

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{6}V_L}{\pi} \tag{3.1}$$

V_{DC}: DC hat gerilim değeri
V_L: AC nominal RMS faz gerilimi

Oluşturulan model için generatör 0.69 kV'luk nominal RMS faz gerilim değerine sahip olduğundan dolayı Denklem 3.1 yardımıyla doğrultucu çıkışında elde edilecek nominal DC hat gerilim değeri 1.6 kV olarak bulunur.

Generatör hızı kontrol edilemez ve generatör çıkış gerilim değeri hızıyla doğru orantılı olarak değişmektedir (Chaithanya vd., 2019). Bu durum güç sisteminde aşırı gerilim değerlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Çalışmada oluşabilecek aşırı gerilim problemi, PSCAD/EMTDC içerisinde bulunan ve 'Tek Giriş Seviye Karşılaştırıcı' olarak ifade edilen bileşenin doğrultucuya bağlanması ile engellenmiştir. Bu bileşen doğrultucuya KB girişinden bağlanır. DC hat için güvenli olarak kabul edilen maksimum gerilim değeri, nominal gerilim değerinin +%10'u kadardır. Yani 1.6 kV'luk DC hat için aşırı gerilim değeri 1.76 kV olmaktadır. Bu nedenle 'Tek Giriş Seviye Karşılaştırıcı' bileşeni yardımıyla DC hat gerilim değeri 1.76 kV 'u aştığı anda doğrultucu bloke edilecek ve böylece DC bağlantısı aşırı gerilime karşı korunmuş olacaktır.

3.2.2. DC Hat Modeli

DC hat bağlantısında kullanılan en önemli elemanlardan biri kapasitördür. Kapasitörler, DC bağlantıda oluşabilecek gerilim düşümlerinin engellenmesine yardımcı olurlar. Ancak başlangıç anında düşük şarjlıyken kısa devre gibi davranmalarından dolayı, devredeki akım değerinin mutlaka sınırlandırılması gerekir. Bu amaçla devreye direnç bağlanır. Devrede kullanılacak kapasitör ve direncin değeri sırasıyla Denklem 3.3 ve Denklem 3.4'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$E = P_n . t \tag{3.2}$$

$$C = \frac{2.E}{V_{DC}^2} = \frac{2.P_n\, t}{V_{DC}^2} \tag{3.3}$$

$$R = \frac{V_{DC}}{I_n} \tag{3.4}$$

$$\tau = 3.R.C \tag{3.5}$$

P_n: Generatör nominal güç değeri (W)
E: Depolanan enerji (J)

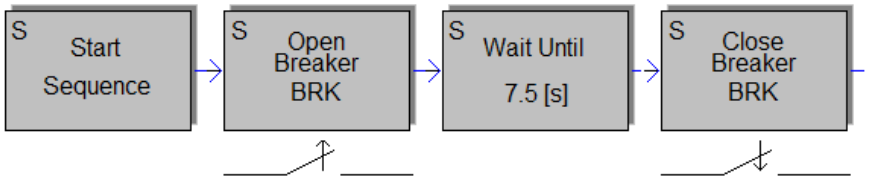
I_n: Generatörün nominal akım değeri (A)

t: Gerilim düşümlerinin tolere edildiği süre (s)

τ: Zaman sabiti (s)

Bu tür birinci dereceden RC devrelerinde kapasitör üç zaman sabitinden sonra şarj olur. Kapasitör şarj olduğu anda oluşabilecek joule kayıplarını engellemek için kesici kapatılarak direnç şöntlenir.

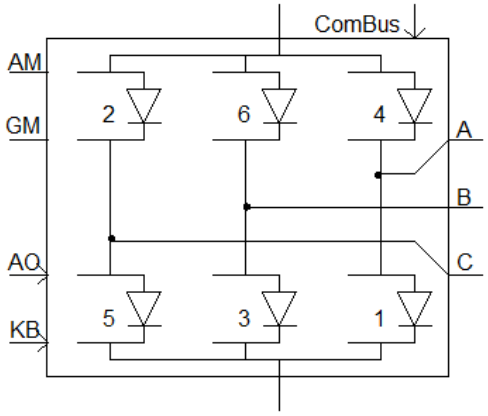
Çalışmada elde edilen R,C değerlerine bağlı olarak τ =7.5 s olmaktadır. Yani, t=7.5 s iken kapasitör şarj olacağından dolayı joule kayıplarını engellemek amacıyla bu esnada kesicinin kapatılması gerekir. Kesicinin kontrolü için Şekil 3.10'da gösterilen sıralayıcılardan yararlanılmıştır.



Şekil 3. 10. Kesicinin çalışma kontrolü

3.2.3. İnvertör Modeli

Bu çalışmada 6 darbeli tristörlü bir akım kaynağı invertörü kullanılmıştır. İnvertör yapısındaki tristörlerin akım iletimi tek yönlüdür. İnvertörün devre modeli Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 11. İnvertör modeli

İnvertörün nominal çıkış faz gerilim değeri Denklem 3.8'de ifade edilmiştir. Tristörlü invertör devrelerinde akımın gerilimin önünde olması gerekir. Denklemde θ=π/4 olarak alınmıştır. İnvertör çıkışındaki transformatörün gerilim dönüştürme oranının invertör çıkış gerilim değeri ile şebeke gerilim değerine uygun olacak şekilde ayarlanması gerekmektedir.

$$V_{ind} = \frac{\pi V_{DC}}{3\sqrt{6}\cos\theta} \tag{3.6}$$

Bu invertörün t saniyelik gerilim düşümlerine dayanabilmesi ve akım kaynağının modellenmesi amacıyla invertörün girişine indüktör bağlanmıştır. DC hat için akım değeri Denklem 3.7 ile, bağlanan indüktörün değeri ise Denklem 3.8 yardımıyla hesaplanır.

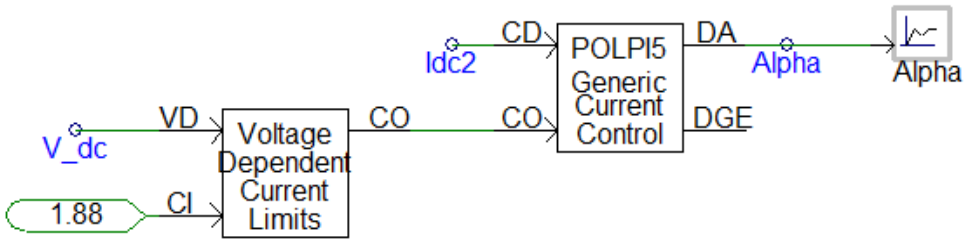
$$I_{DC} = \frac{P_{DC}}{V_{DC}} \tag{3.7}$$

$$L = \frac{2E}{I_{DC}^2} = \frac{2P_n t}{I_{DC}^2} \tag{3.8}$$

3.2.4. Gerilim Regülasyonu

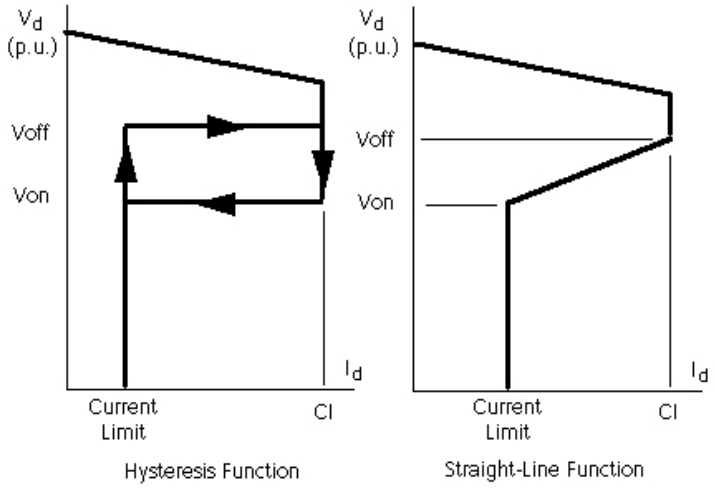
Tek bir rüzgâr türbininden oluşan rüzgâr türbin sistemlerinin şebeke ile bağlantısı zayıftır. Bu tür zayıf bağlantı durumlarında oluşabilecek ani ve büyük AC gerilim düşümleri engellemek amacıyla, çalışmada DC hat üzerinde gerilim regülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bu tür sistemlerde güvenli bir tolerans aralığı için DC hat üzerindeki gerilim dalgalanma miktarı ± %5 civarında olmalıdır. Modelde nominal DC hat gerilim değeri 1.6 kV 'tur. Bu duruma bağlı olarak model için DC hat gerilim değeri 1.52 kV ile 1.68 kV değerleri arasında olması gerektiğini söyleyebiliriz. Bu amaçla PSCAD/EMTDC'de bulunan 'Gerilime Bağlı Akım Sınırlayıcısı (GBAS)' ile 'Genel Akım Kontrolörü (GAK)' elemanları yardımıyla Şekil 3.12'de gösterilen gerilim regülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 12. Gerilim regülasyon işlemi

GBAS elemanının çalıştırılabilmesi için V_{on} (uygulama limiti) ve V_{off} (kaldırma limiti) olmak üzere iki giriş parametresine ihtiyaç vardır. Oluşturulan model için V_{on}=1.52 pu, V_{off}=1.68 pu olarak ayarlanmıştır. GBAS elemanın yapısında kullanılabilecek iki ayrı fonksiyon seçeneği bulunmaktadır. Bu fonksiyonlardan birinde V_{on} ve V_{off} gerilimleri arasında histerezis tipi karakteristiği varken, diğerinde ise iki gerilim arasında eğimli düz hat tipi karakteristiği bulunmaktadır. Bu fonksiyonlar Şekil 3.13'de gösterilmiştir. Çalışmada düz hat fonksiyonu kullanılmıştır.



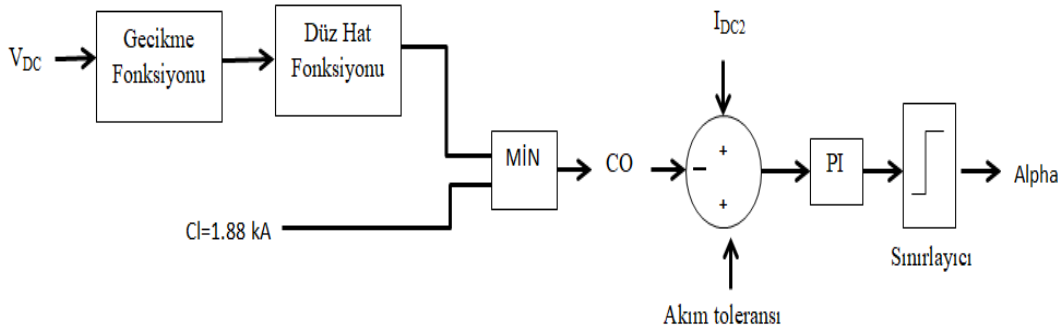
Şekil 3. 13. GBAS elemanının fonksiyonları

Burada DC hat gerilimi V_{on} değerinden daha düşük olursa GBAS elemanı içerine önceden girilen 0.06 pu akım sınırı değeri, CO çıkışına verilecektir. DC hat gerilim değerinin V_{on} değerinde veya daha büyük olması durumunda ise düz hat fonksiyonundan elde edilen akım değerleri elde edilecek ve bu değerler, nominal güç durumundaki DC akım değeri olan 1.88 pu ile kıyaslanacaktır. Sonuç olarak akımlardan

daima minimum olan değer çıkışa verilmektedir. Yani CO çıkışı, maksimum 1.88 pu değerine sahip olabilir.

GAK elemanında uygun PI kontrol kazançları ve hız sınırlayıcısı kullanılarak invertör ateşleme açısı, CO çıkışı ile I_{DC2} akımı arasındaki hata sinyalinden üretilmektedir. Dolayısıyla ateşleme açısının üretildiği anda I_{DC2} > CO olmaktadır. Gerilim regülasyon işleminde kullanılan bu iki elemanın çalışma safhaları Şekil 3.14'de gösterilmiştir.

Çalışmada DC hat gerilim değeri 1.52 kV değerine t=11.5 s'de ulaşır. Bu yüzden invertörün çalışarak I_{DC2} akımının üretilmeye başlanması t=11.5 s'de gerçekleşmektedir. Gerilim regülasyonu DC hat geriliminin 1.52kV ile 1.68kV aralığında invertörün çalışmasına izin vermektedir.



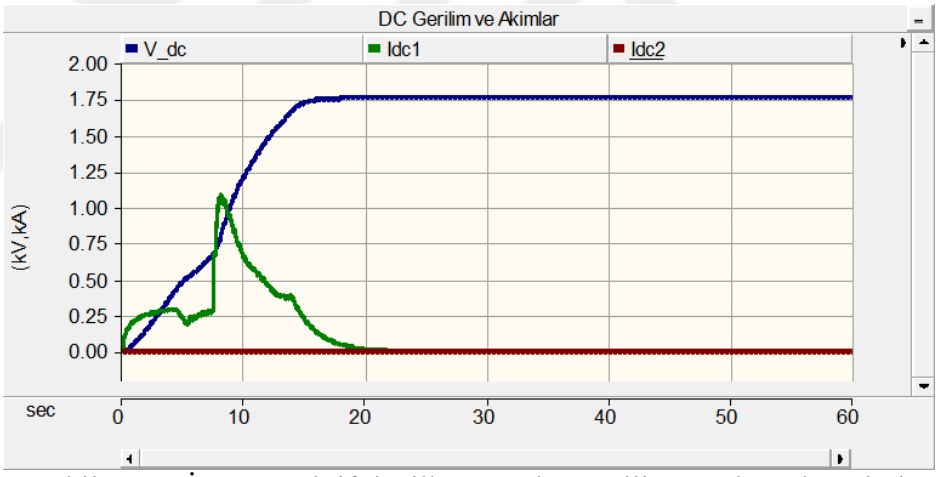
Şekil 3. 14. GBAS ve GAK elemanlarının çalışma safhaları

DC hat sonuçları öncelikle sadece doğrultucunun çalıştırılıp, invertörün çalıştırılmadığı durum için elde edilmiştir. Şekil 3.15'de gösterilen bu sonuçlarda V_{DC} hat geriliminin 1.76 kV değerinde sınırlandırıldığını yani DC hattın %10'luk aşırı gerilim değerine karşı korunduğunu görülmektedir. Çünkü V_{DC} hat geriliminin 1.76 kV değerine ulaştığı durumda doğrultucu bloklanarak çalışması engellenmektedir. Yine burada invertör aktif olmadığından dolayı I_{DC2} akımı üretilmemekte, I_{DC1} akımı da belli bir süreden sonra sıfırlanmaktadır.

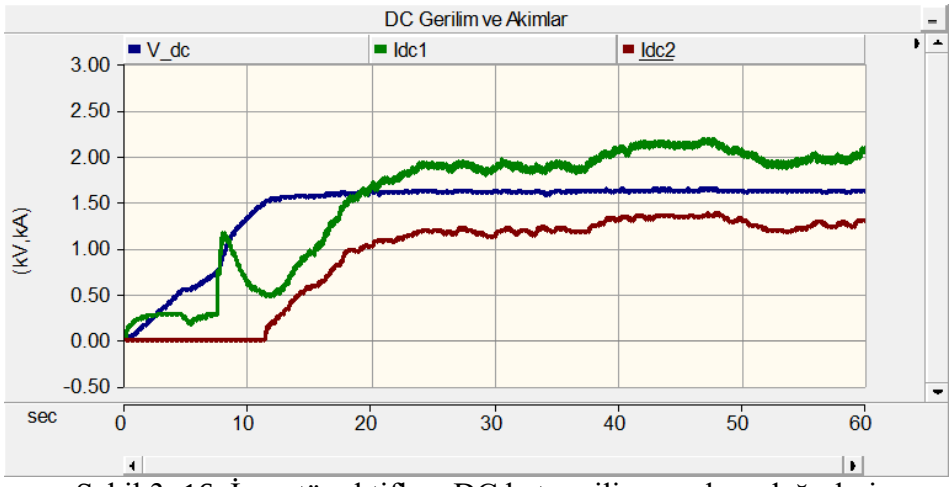
Şekil 3.16'da ise, doğrultucu ile birlikte invertöründe çalıştırılması durumunda elde edilen DC hat sonuçları gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre t=7.5 s'de I_{DC1} akımında ani bir artışın gerçekleştiği görülmektedir. Çünkü bu esnada kapasitörün şarj olmasıyla birlikte oluşabilecek joule kayıplarını engellemek için kesici kapatılarak direnç

şöntlenir. I_{DC1} akım değerinde bir süre artış gerçekleşse bile, DC hat gerilim değeri 1.52 kV oluncaya kadar invertör aktif olmayacağından I_{DC1} akımı, DC hat gerilimi 1.52 kV değerine ulaşana kadar yeniden azalmaktadır. Bu nedenle, DC hat geriliminin 1.52 kV değerine t=11.5 s'de ulaşması ve bu esnada invertörün çalışmaya başlaması sonucunda I_{DC1} akım değerinde tekrardan artış gerçekleşmekte ve I_{DC2} akımı üretilmektedir. Tüm bu durumlar bize t=11.5 s'ye kadar mevcut yük talebinin sadece şebeke tarafından karşılandığını, rüzgar türbin sisteminin şebeke entegrasyon etkisinin t=11.5 s'den sonra gözlemlenebileceğini göstermektedir.

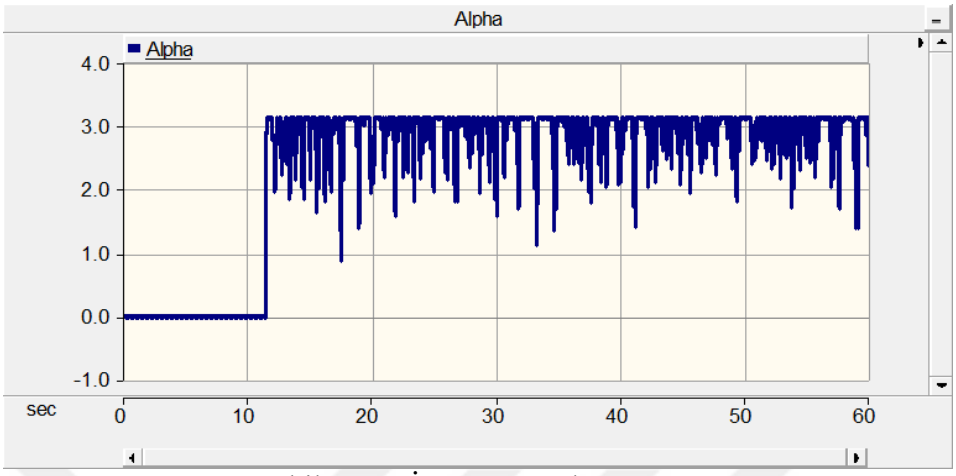
Gerilim regülasyon işleminde kullanılan GAK elemanı tarafından üretilen invertör ateşleme açısı Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Bu ateşleme açısının değeri I_{DC2} akım değerine bağlı olarak değişmektedir. Ateşleme açısı ilk olarak invertörün çalışmaya başladığı t=11.5 s'de üretilmiştir.



Şekil 3. 15. İnvertör aktif değilken DC hat gerilim ve akım değerleri

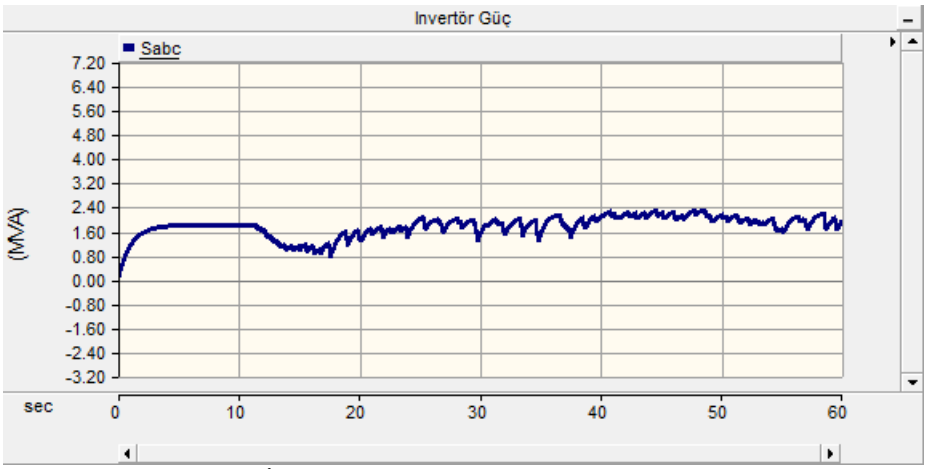


Şekil 3. 16. İnvertör aktifken DC hat gerilim ve akım değerleri



Şekil 3. 17. İnvertör ateşleme açısı

Değişken rüzgar hızı durumunda generatör çıkışından t=20 s'den sonra maksimum 2.84 MVA olmak üzere genellikle 1.7 MVA ile 2.4 MVA aralığında güç değerlerine elde edilmiştir. Bu generatör görünür güç değerlerine karşılık, invertör çıkışından elde edilen güç değerleri Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre invertör çıkışındaki güç değerleri, t=20 s'den sonra maksimum 2.32 MVA olmak üzere genellikle 1.6 MVA ile 2.3 MVA aralığındadır. AC/DC/AC dönüştürücü kısmında ise sadece t=34.8 s'de maksimum 1MVA 'lık kayıp olmak üzere genellikle 0.1 MVA – 0.6 MVA aralığında güç kayıpları gerçekleşmiştir.



Şekil 3. 18. İnvertör çıkışından elde edilen görünür güç

3.3. Şebeke Modeli

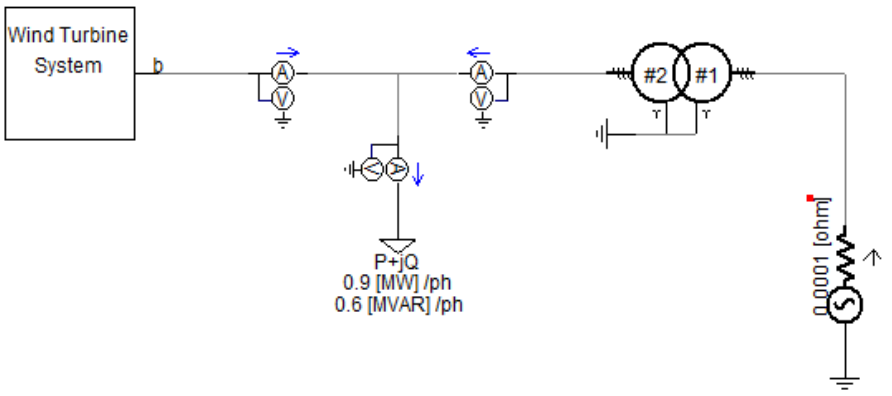
Çalışmada oluşturulan rüzgâr türbin sistemi önce tek yükten daha sonra ise 4 yükten oluşan 12.47 kV'luk şebekelere bağlanmıştır. Oluşturulan şebeke modelleri arasındaki tek fark, toplam yük değerleridir. Şebekelere ait parametre değerleri Tablo 3.4'de gösterilmiştir.

Tablo 3. 4. Şebekelere ait parametre değerleri

PARAMETRELER	TEK YÜKLÜ ŞEBEKE	4 YÜKLÜ ŞEBEKE
Gerilim kaynağının RMS hat gerilimi	34,5 kV	34,5 kV
Frekans	50 Hz	50 Hz
3 faz transformatör güç	300 MVA	300 MVA
3 faz transformatörün sargı gerilimleri	34.5 kV / 12.47 kV	34.5 kV / 12.47 kV
Şebeke RMS hat gerilimi	12.47 kV	12.47 kV
Toplam yük talebi	2.7 MW /1.8 MVAr	8.739 MW / 6.6 MVAr

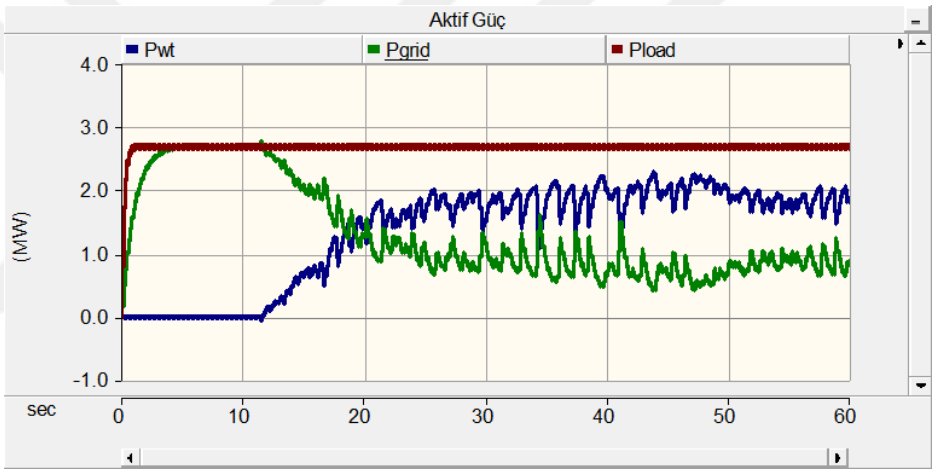
3.3.1. Tek Yüklü Şebeke

2.7 MW aktif, 1.8 MVAr reaktif yük değerine sahip olan tek yüklü şebeke modeli Şekil 3.19'da gösterilmiştir.

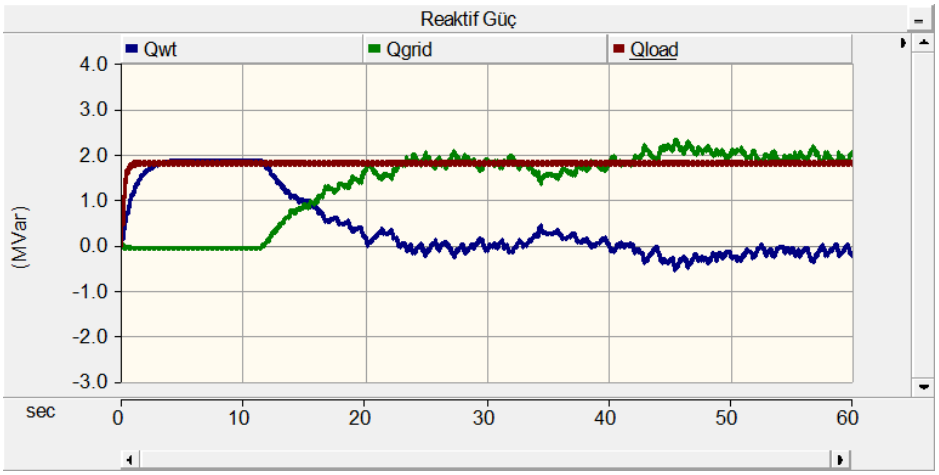


Şekil 3. 19. Tek yüklü şebeke modeli

Tek yükün bağlanması durumunda rüzgâr türbini ile şebekeden elde edilen aktif ve reaktif güç değerleri sırasıyla Şekil 3.20 ve Şekil 3.21 ’de gösterilmiştir. 2.7 MW’lık aktif güç talebi için rüzgâr türbini tarafından sağlanan aktif güç, t=11.5s’den yaklaşık t=20s ‘ye kadar sürekli olarak artmaktadır. Ancak t=20 s’den sonra minimum 1.15 MW maksimum 2.28 MW olmak üzere güç değerleri genellikle 1.4 MW ile 2.2 MW arasında değişiklik gösterir. Bu duruma karşılık şebeke tarafından sağlanan aktif güç değerleri de belirli bir süre azalmadan sonra, genellikle 0.5 MW ile 1.3 MW arasında olmaktadır. Bu güç değerlerine bağlı olarak 2.7 MW’lık aktif güç talebinin büyük oranda rüzgar türbin sistemi tarafından sağlandığını söyleyebiliriz.

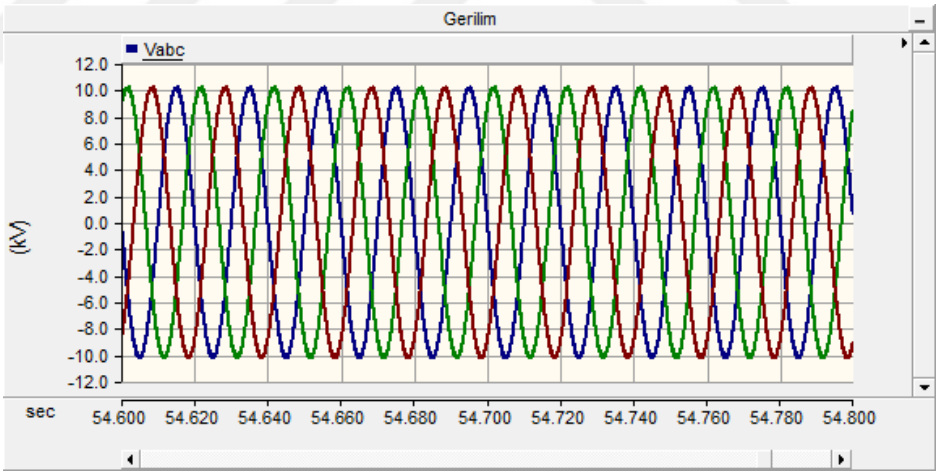


Şekil 3. 20. Rüzgâr türbini ve şebekenin aktif güç değerleri ile aktif güç talebi



Şekil 3. 21. Rüzgâr türbini ve şebekenin reaktif güç değerleri ile reaktif güç talebi

1.8 MVAr'lık reaktif güç talebi için ise, rüzgâr türbini tarafından yaklaşık t=23 s'ye kadar reaktif güç sağlanmasına karşın t=23 s'den sonra rüzgâr türbini çoğunlukla, şebekeden reaktif güç çekmektedir. Rüzgar türbini tarafından t=23 s'den sonra çekilen reaktif güç miktarı genellikle 0.1 MVar ile 0.5 MVar aralığında değişiklik gösterir. Yine elde edilen sonuçlara göre t=23 s'den sonra bazı aralıklarda rüzgâr türbini tarafından en fazla 0.42 MVAr olacak şekilde reaktif güç aktarımlarının olduğu da görülmektedir. Rüzgar türbini tarafından çekilen ve sağlanan reaktif güç değerlerine karşılık şebekeden sağlanan reaktif güç değerleri ise t=23 s'den sonra 1.38 MVAr ile 2.3 MVAr arasında olmaktadır. Model içerisinde generatör, bobin, doğrultucu, trafo gibi reaktif güç tüketicilerinin kullanılması, şebekeden reaktif güç çekilmesindeki en önemli nedenlerden biridir. Ancak çalışmada şebekeden çekilen reaktif güç miktarının azaltılması ve bazen de reaktif güç desteğinin sağlanması amacıyla invertör çıkışına kapasitör bağlanmış ve kendinden uyartımlı olup, yüksek güç faktöründe çalışabilen KMSG kullanılmıştır.



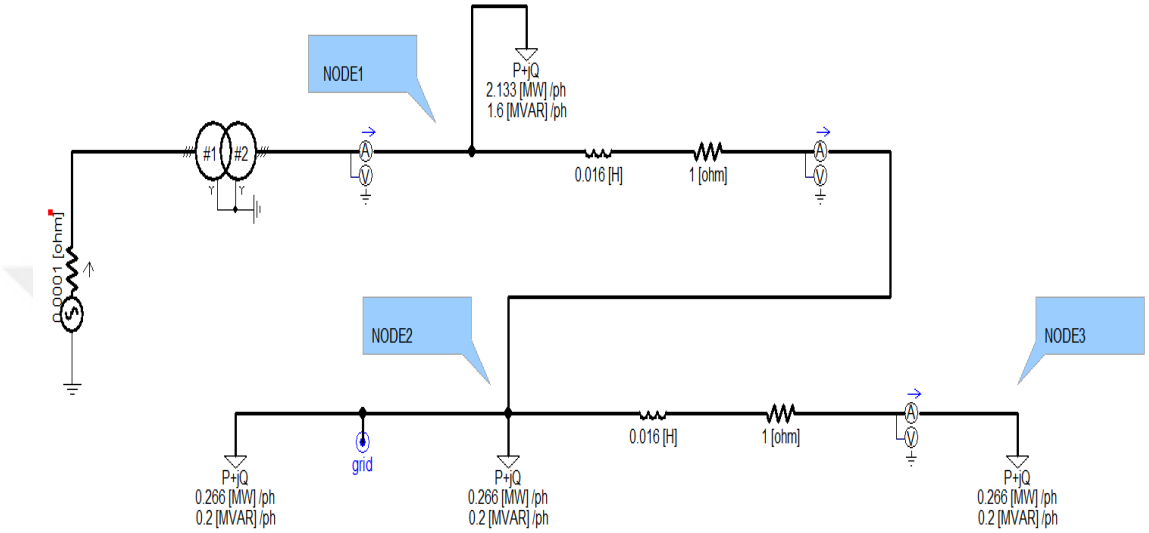
Şekil 3. 22. Tek yük durumunda şebeke bağlantı noktasındaki faz gerilimi

Ülkemizdeki elektrik şebeke yönetmeliğine göre normal işletme koşullarında, şebeke bağlantı noktasındaki gerilim dalgalanmalarının ±%10 aralığı içerisinde olması gerekmektedir (EPDK, 2017).

Şekil 3.22 'de tek yük durumunda rüzgâr türbini ile şebeke bağlantı noktasındaki faz gerilimi gösterilmiştir. Bu faz geriliminin düzgün bir sinüzoidal dalga yapısına sahip olduğu görülmektedir ve gerilimde oluşan en büyük değişim miktarı ±%0.4 olarak elde

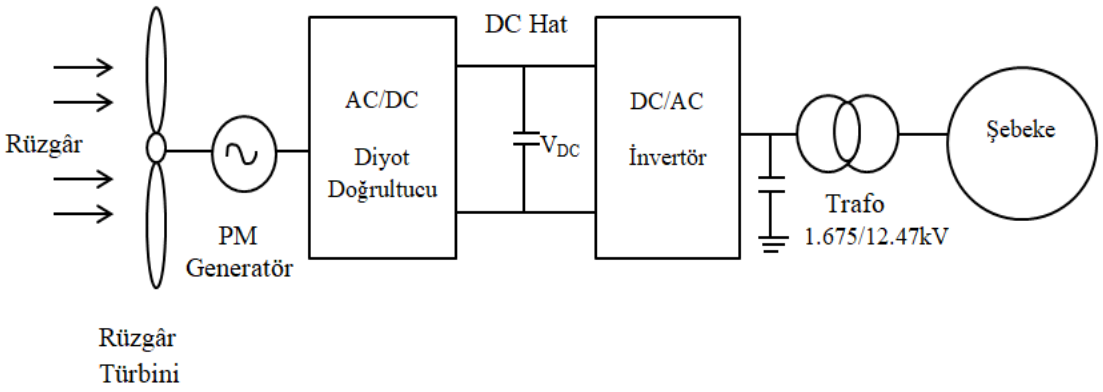
edilmiştir. Yani gerilimdeki dalgalanma miktarı yönetmelikte belirtilen aralık içerisindedir ve oldukça küçük bir değere sahiptir.

3.3.2. Dört Yüklü Şebeke

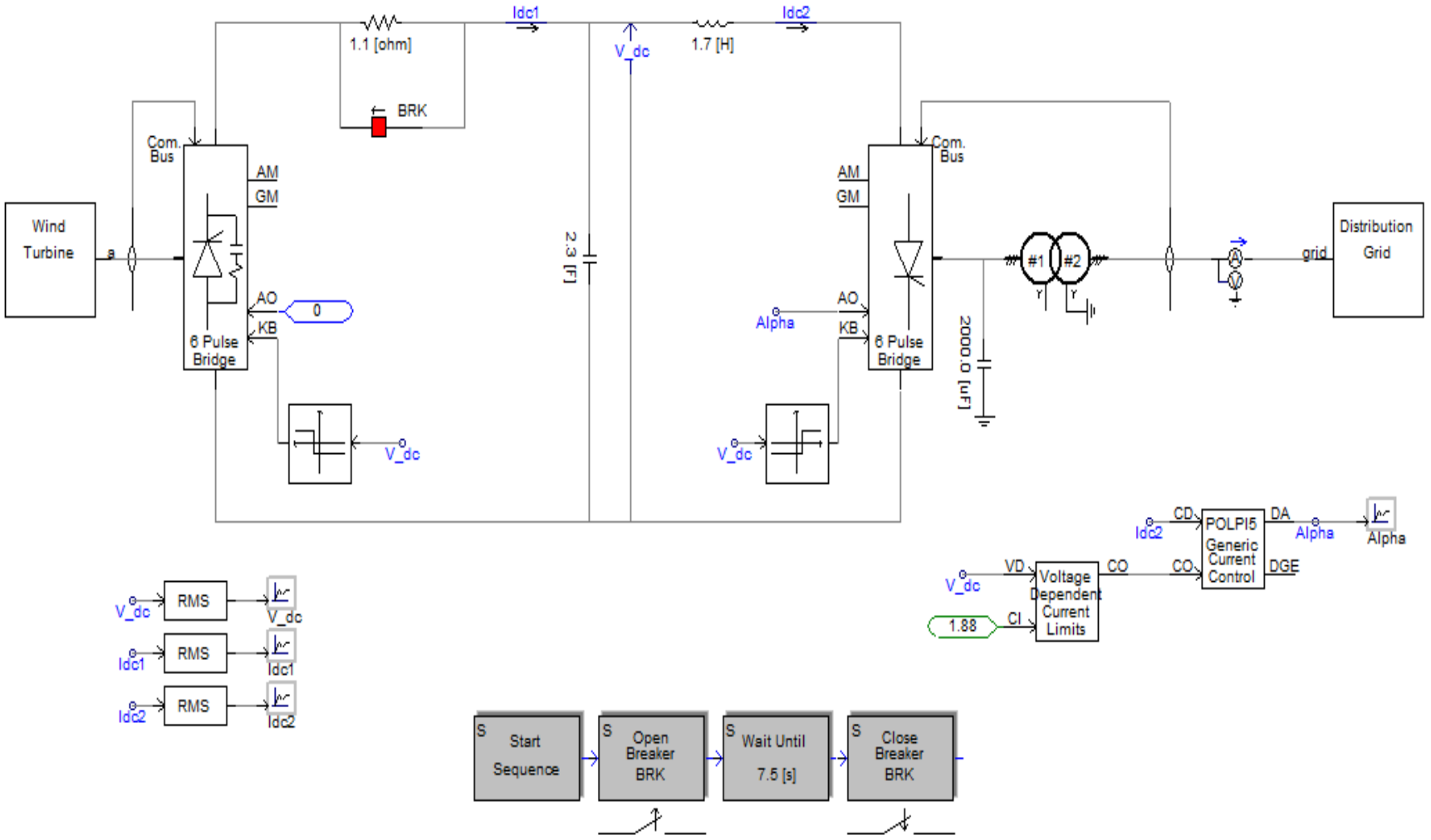


Şekil 3. 23. Dört yüklü şebeke modeli

8.739 MW aktif, 6.6 MVAr reaktif yük talebine sahip olan 4 yüklü radyal şebeke modeli Şekil 3.23'de gösterilmiştir. Bu şebeke içerinde 3 ayrı düğüm noktası vardır ve rüzgâr türbini düğüm 2 noktasında bulunan iki yükün arasına bağlanmıştır. Çalışmada oluşturulan şebekeye bağlı rüzgâr türbin sistemin şematik gösterimi ve PSCAD/EMTDC'deki modeli sırasıyla Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'de gösterilmiştir.



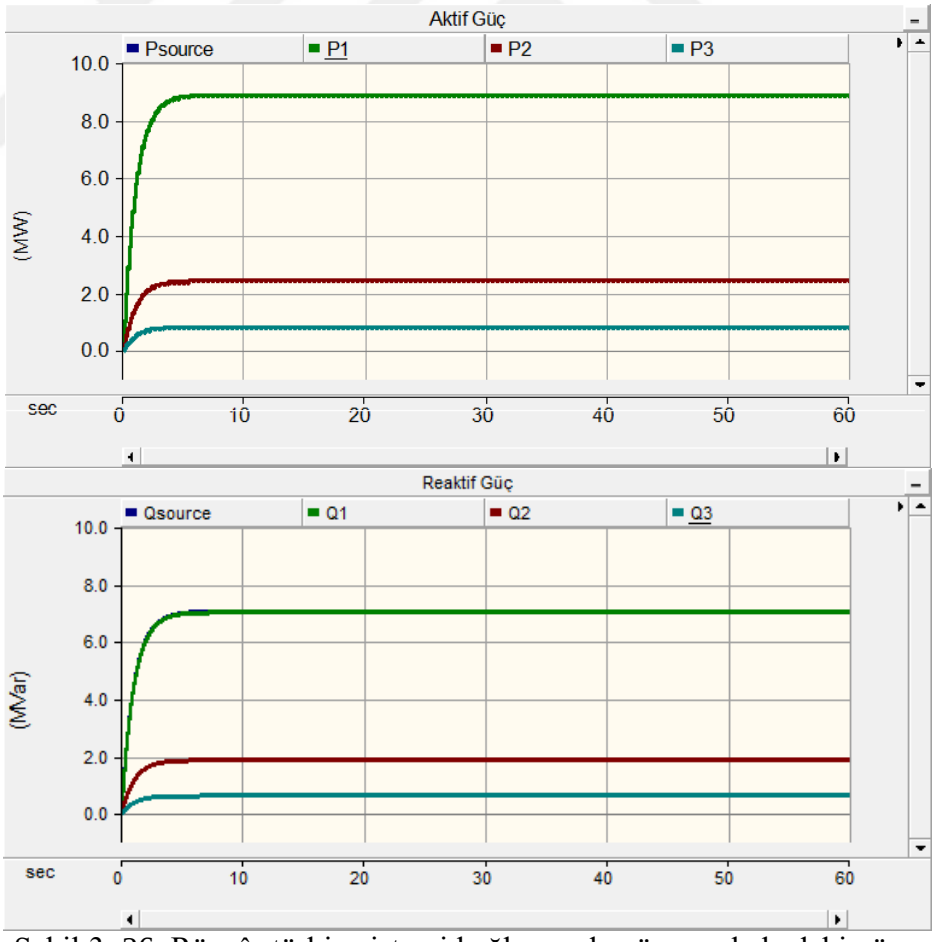
Şekil 3. 24. Şebekeye bağlı rüzgâr türbin sistemin şematik gösterimi



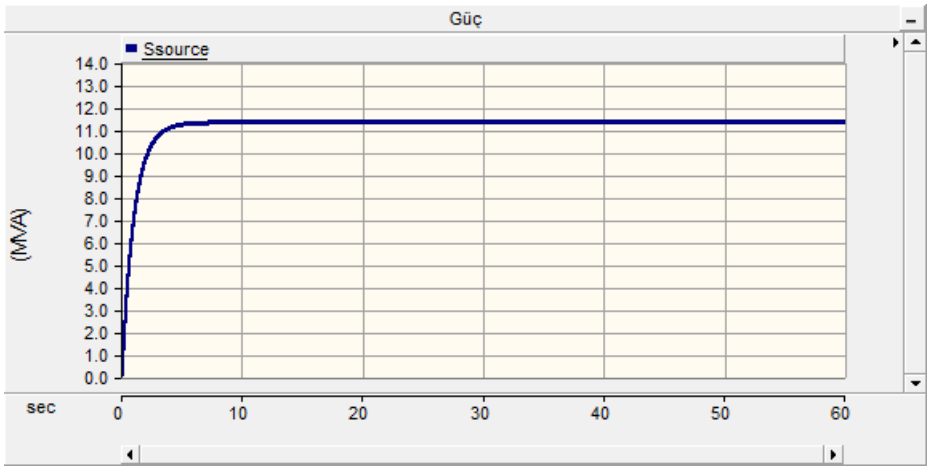
Şekil 3. 25. PSCAD/EMTDC'de oluşturulan şebekeye bağlı rüzgâr türbin sistem modeli

Çalışmada rüzgâr türbin sisteminin şebekeye bağlanmadan öncesi ve sonrası için analiz işlemleri gerçekleştirilerek, iki durumda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buradaki amaç, rüzgâr türbin sisteminin entegrasyonu sonucunda şebeke üzerindeki olumlu ve olumsuz etkilerini gözlemleyebilmektir.

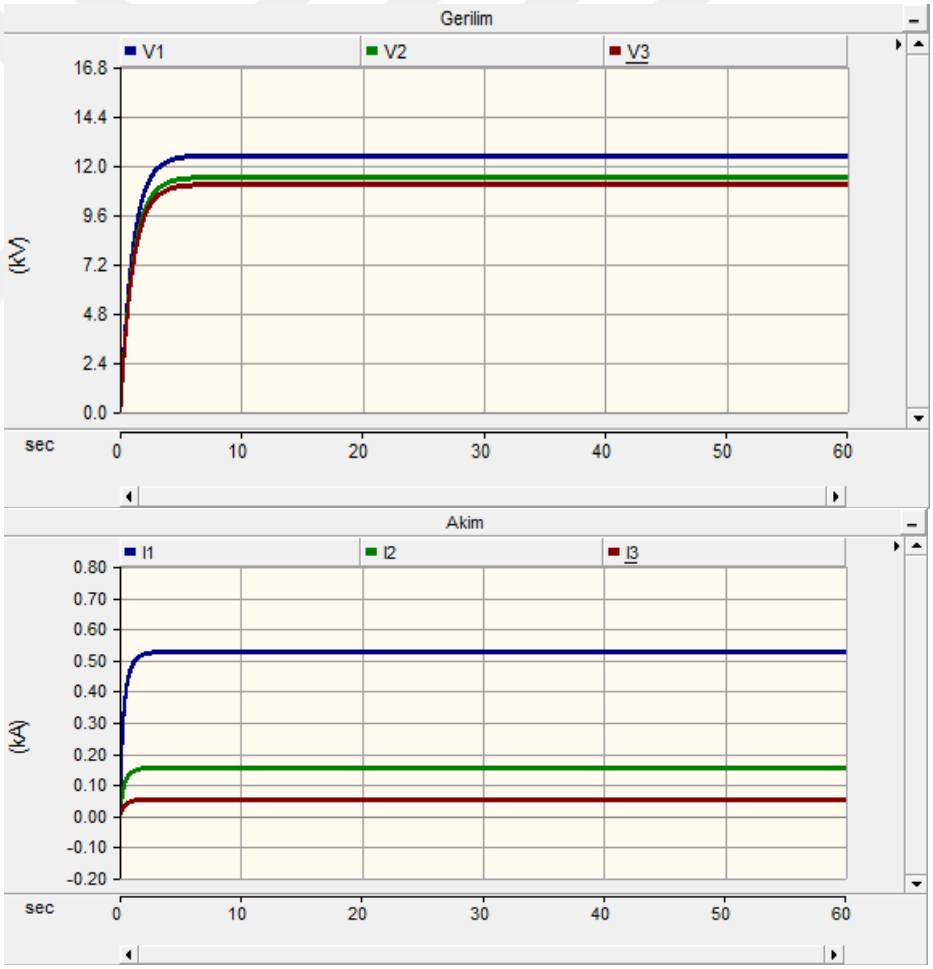
Rüzgâr türbin sistemi şebekeye bağlanmadan önceki durum için şebekedeki aktif ve reaktif güç değerleri Şekil 3.26'da gösterilmiştir. Güç sonuçlarına göre, düğüm noktalarının aktif güç değerleri, düğüm 1 noktasından düğüm 3 noktasına doğru sırasıyla, 8.88 MW, 2.406 MW, 0.799 MW şeklinde iken, reaktif güç değerleri de sırasıyla 7 MVAr, 1.843 MVAr ve 0.6 MVAr şeklindedir. Bu aktif ve reaktif güç değerlerine göre rüzgar türbini bağlanmadan önce şebekeden sağlanan toplam görünür güç değeri Şekil 3.27'de gösterilmiş ve 11.3 MVA olarak elde edilmiştir. Burada, mevcut yük talebinin tamamı şebeke tarafından karşılanmaktadır.



Şekil 3. 26. Rüzgâr türbin sistemi bağlanmadan önce şebekedeki güç değerleri



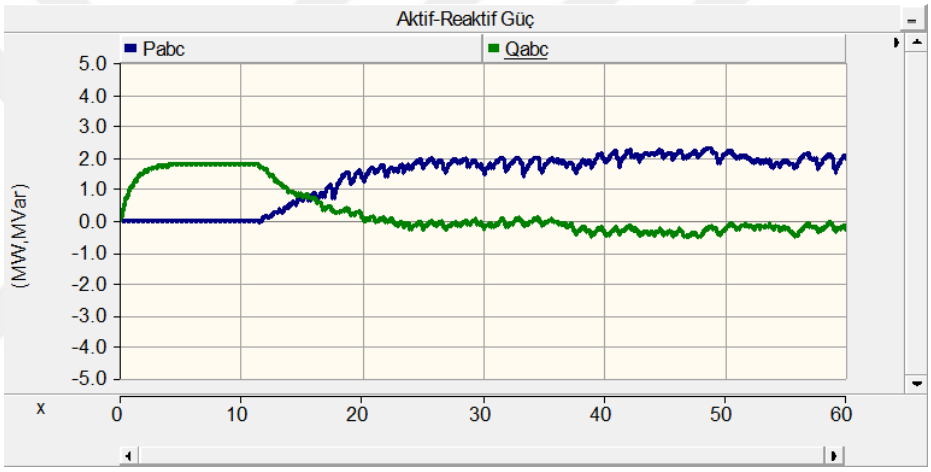
Şekil 3. 27. Rüzgâr türbin sistemi bağlanmadan önce şebekeden sağlanan görünür güç değerleri



Şekil 3. 28. Rüzgâr türbin sistemi bağlanmadan önce şebekedeki gerilim, akım değerleri

Rüzgâr türbin sistemi şebekeye bağlanmadan önceki durum için, şebekedeki gerilim ve akım değerleri ise Şekil 3.28'de gösterilmiştir. Bu durumda sabit gerilim değerleri,

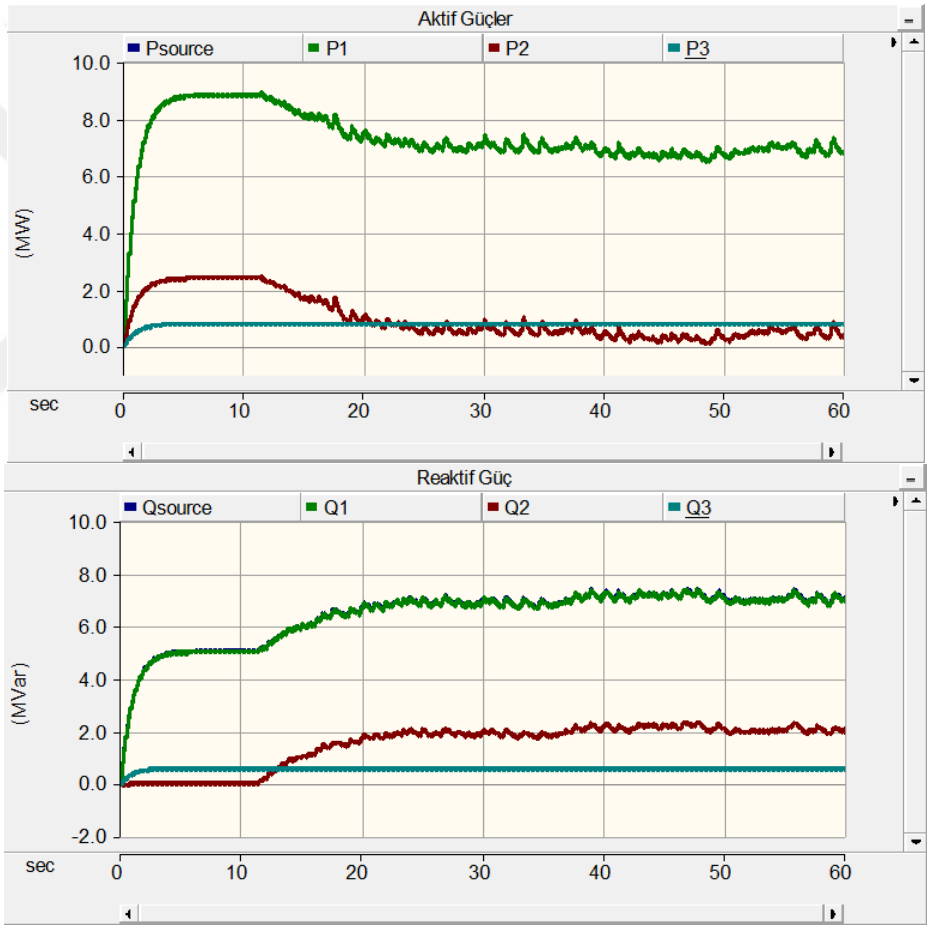
düğüm 1 noktasından düğüm 3 noktasına doğru sırasıyla 12.456 kV, 11.4 kV ve 11.1 kV olarak elde edilirken, akım değerleri de sırasıyla, 0.525 kA, 0.1538 kA ve 0.0523 kA olarak elde edilir. I_1 akımının 0.371 kA'lik kısmı düğüm 1 noktasında bulunan yükün besleme akımı olarak harcanırken, geriye kalan kısmı I_2 akımını oluşturmaktadır. I_2 akımının yönü, düğüm 1 noktasından düğüm 3 noktasına doğrudur. I_2 akımı düğüm 2 noktasına geldiğinde 3 kola ayrılır. Bu kollardan bir tanesi düğüm 2 noktasından düğüm 3 noktasına doğru hareket eden I_3 besleme akımını oluştururken, diğerleri de düğüm 2 noktasında bulunan iki yükün besleme akımını oluşturmaktadır. Bu besleme akımlarının büyüklükleri birbirine eşittir.



Şekil 3. 29. Rüzgâr türbin sisteminden elde edilen güç değerleri

4 yüklü radyal şebekeye rüzgar türbin sisteminin bağlanması sonucunda rüzgar türbin sisteminden elde edilen güç değerleri Şekil 3.29'da , şebekeden elde edilen güç değerleri ise Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Aktif güç sonuçlarına göre, t=11.5 s'ye kadar yük talebi şebeke tarafından karşılanmış ancak daha sonra rüzgar türbin sistemi tarafından aktarılan aktif güç değerlerine bağlı olarak, şebekeden çekilen güç azalmaya başlamıştır. Bu sürekli azalma durumu yaklaşık t=25 s'ye kadar devam etmiştir. t=25s'den sonra ise, toplamda 8.739 MW'lık yük talebine karşılık şebekeden sağlanan aktif güç değerleri 6.5 MW ile 7.2 MW arasında değişiklik göstermiştir. Bu duruma karşılık rüzgar türbin sistemi tarafından sağlanan aktif güç değerleri 1.6 MW ile 2.3 MW arasında değişmektedir. Burada elde edilen sonuçlara göre düğüm 1 noktasındaki yükün aktif güç talebi şebekeden olacak şekilde, düğüm 2 ve düğüm 3 noktalarında bulunan 3 yük ise şebeke ve rüzgâr türbin sistemi tarafından beslenmektedir.

Bu durumdaki reaktif güç sonuçlarına baktığımızda ise, yine t=11.5s'ye kadar reaktif güç talebinin tamamı şebekeden karşılandığı görülmektedir. t=11.5s'den sonra yaklaşık t=21 s'ye kadar rüzgâr türbininden şebekeye sürekli azalan bir reaktif güç aktarımı gerçekleşmiştir. t=21 s'den sonra da ara sıra rüzgar türbininden reaktif güç aktarımı devam etse de genellikle, rüzgar türbininin şebekeden 0.1 MVAr ile 0.4 MVAr aralığında bir reaktif güç çekişi meydana gelmiştir. Rüzgar türbin sisteminin bu güç değerlerine karşılık t=21 s'den sonra şebekeden sağlanan reaktif güç değerleri ise, 6.6 MVAr'lık yük talebi için, 6.7 MVAr ile 7.4 MVAr arasında değişiklik göstermektedir.

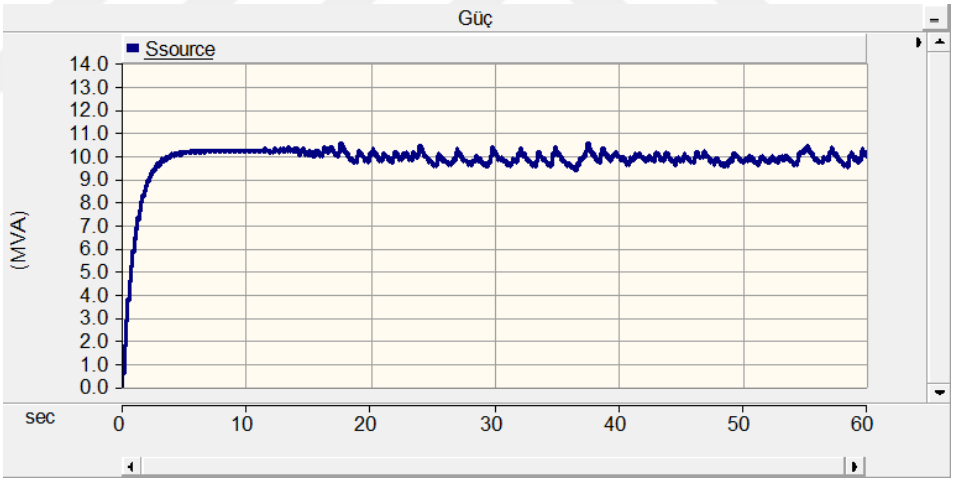


Şekil 3. 30. Rüzgâr türbin sistemi bağlandıktan sonra şebekedeki güç değerleri

Şebekeden elde edilen güç sonuçlarında düğüm 1 ve düğüm 2 noktalarındaki güç dalgalanmalarının rüzgâr türbini ile şebeke arasındaki güç ilişkisine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ancak, düğüm 3 noktasındaki güç değerinin sabit olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni, şebekenin düğüm 3 noktasında sonlanması ve bu

noktada tek yükün bağlı olmasıdır. Dolayısıyla, düğüm 3 noktasındaki güç değeri, rüzgar türbini ile şebeke arasındaki güç ilişkisine bağlı olmaksızın 0.739 MW ve 0.6 MVAr 'lık tek yük talebine eşit olmaktadır.

Rüzgar türbin sistemi bağlanmadan önce şebekeden sağlanan görünür güç değeri 11.3 MVA olmak üzere, Şekil 3.31'de rüzgâr türbin sisteminin bağlanması durumunda şebekeden sağlanan toplam görünür güç değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Buradaki sonuçlara göre şebekeden sağlanan maksimum görünür güç değeri 10.4 MVA, minimum görünür güç değeri ise 9.4 MVA olarak elde edilmiştir. Yani, rüzgar türbin sisteminin bağlanması sonucunda şebekeden sağlanan toplam güç değerinde 0.9 MVA ile 1.9 MVA aralığında azalma meydana gelmiştir. Bu sonuçların elde edilmesinde rüzgâr türbin sisteminin bağlanmasıyla şebekeden çekilen reaktif güç miktarındaki artışın küçük olması ve rüzgâr türbin sistemi tarafından şebekeye aktif güç desteğinin sağlanmış olması etkili olmuştur.

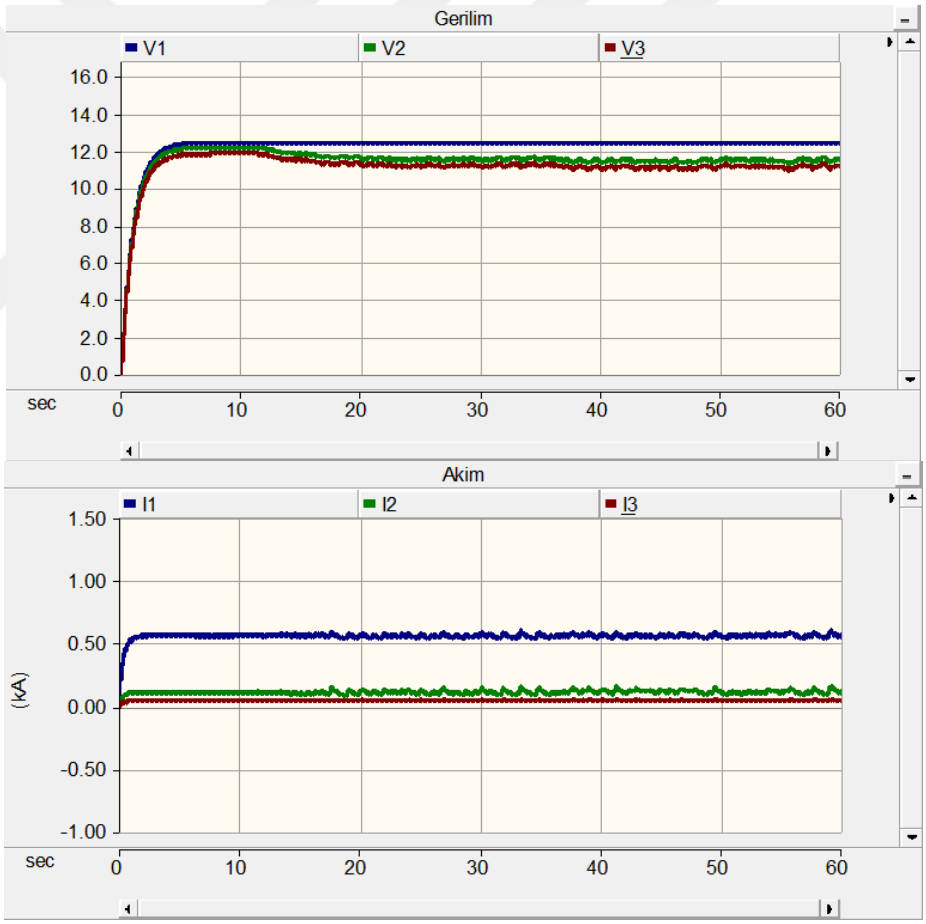


Şekil 3. 31. Rüzgâr türbin sistemi bağlandıktan sonra şebekeden sağlanan görünür güç değerleri

4 yüklü radyal şebekeye rüzgar türbin sisteminin bağlanması sonucunda elde edilen akım ve gerilim değerleri Şekil 3.32'de gösterilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlara göre, sadece trafo çıkışında bulunan düğüm 1 noktasının V_1 gerilimi sabit olmak üzere geriye kalan tüm gerilim ve akım değerlerinin yapısında dalgalanmaların meydana geldiği görülmektedir. Aynı zamanda düğüm 3 noktasındaki yükün besleme akımı olan I_3 akımında oluşan dalgalanmalar oldukça küçüktür ve bu dalgalanmaların seyrek olduğunu söyleyebiliriz.

Rüzgâr türbin sistemi şebekeye bağlandıktan sonra şebekedeki akım yönlerinde bir değişme olmamıştır. Rüzgâr türbin sisteminden şebekeye aktarılan akım, düğüm 2 ve düğüm 3 noktalarında bulunan 3 yükün besleme akım değerlerine katkıda bulunmuştur.

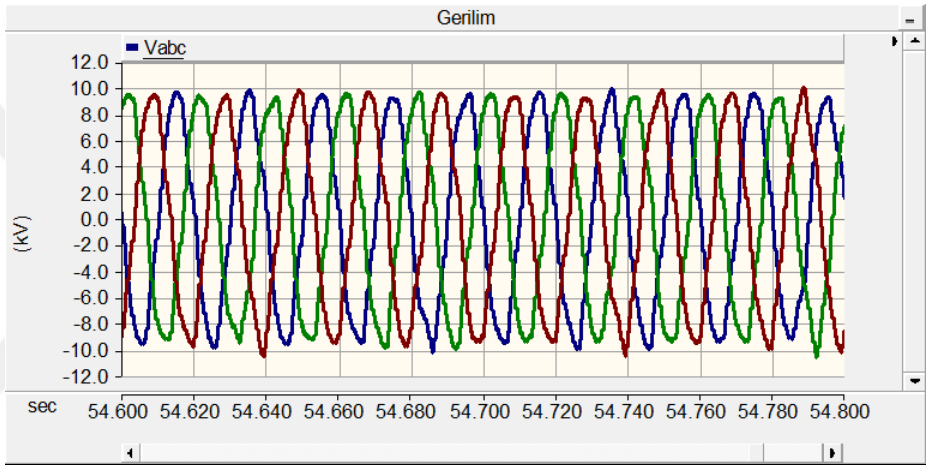
Şebekeye rüzgar türbin sisteminin bağlanması sonucunda elde edilen gerilim değerlerini bağlanmadan önceki gerilim değerleriyle karşılaştırdığımız zaman, t=11.5 s ile t=14 s arasında %5'e civarında bir gerilim değişiminin meydana geldiğini ancak, daha sonra gerilim değişim miktarının yaklaşık %1-2 olduğu gözlemlenmiştir. Bu gerilim değişim miktarı, şebekedeki gerilimler üzerinde, rüzgâr türbin sistemi için hazırlanan sistemin sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



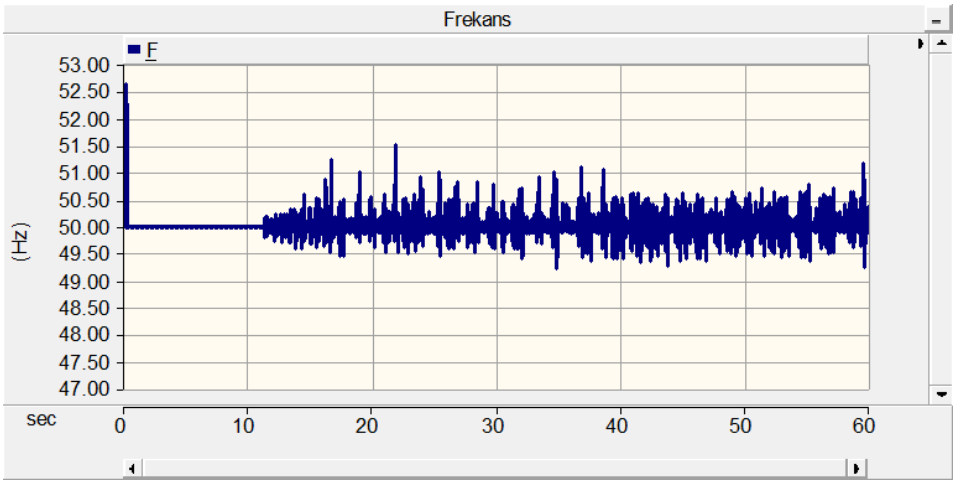
Şekil 3. 32. Rüzgâr türbin sistemi bağlandıktan sonra şebekedeki gerilim, akım değerleri

Rüzgâr türbin sisteminin bağlı olduğu 4 yüklü şebekedeki şebeke bağlantı noktasının faz gerilimi Şekil 3.33'de gösterilmiştir. Bu gerilimin yapısında oluşan en büyük

dalgalanma miktarı yaklaşık %7-10 olarak elde edilmiştir. Yani, farklı yük koşulları altında şebeke bağlantı noktasından elde edilen gerilim dalgalanma miktarı, şebeke yönetmeliğinde normal işletme koşulları için belirtilen ±%10 dalgalanma aralığı içerisinde yer almaktadır. Bu sonuçların elde edilmesinde DC hat üzerinde gerçekleştirilen gerilim regülasyon işleminin katkısı büyüktür. Çünkü gerilim regülasyon işlemi, istenilen aralıkta invertörün kontrollü olarak çalışmasını ve böylelikle şebeke bağlantı noktasındaki gerilim profilinin iyileştirilmesine yardımcı olmuştur.



Şekil 3. 33. Dört yük durumunda şebeke bağlantı noktasındaki faz gerilimi



Şekil 3. 34. Dört yük durumunda şebeke bağlantı noktasındaki frekans değerleri

Rüzgâr türbin sisteminin bağlı olduğu 4 yüklü şebekedeki şebeke bağlantı noktasındaki frekans değerleri ise Şekil 3.34'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre şebeke bağlantı noktasındaki frekans değerlerinin maksimum 51.46 Hz, minimum 49.25 Hz olmak üzere genellikle 49.5-50.5 Hz aralığında olduğu görülmüştür. Bu değerlerde yine şebeke yönetmeliğinde belirtilen frekans aralığı değerlerine uygundur.

4.BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Rüzgâr enerjisi, artan enerji ihtiyacının karşılanması, fosil yakıtların neden olduğu olumsuz çevresel etkiler ve arz güvenliği gibi problemlerin azaltılması amacıyla günümüzde en çok tercih edilen yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Ancak, rüzgârın değişken yapısı, şebeke entegrasyonunu zorlaştırarak şebekeyi olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu etkilerin doğru analiz edilmesi ve etkilerin azaltılmasına yönelik önlemlerin önceden alınması, sistemin güvenilirliği ve kararlığı açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmada şebekeye bağlı 3 MVA'lık bir rüzgâr türbin sistemi için rüzgâr enerjisinin şebeke üzerindeki etkilerini doğru analiz edebilmek amacıyla PSCAD/EMTDC'de bulunan rüzgâr kaynağı bileşeni ile günlük hayatımızdaki rüzgarlara benzeyen değişken hızlı bir rüzgâr modeli elde edilmiştir.

Oluşturulan rüzgâr türbin sistemi ilk olarak tek yüklü şebekeye daha sonra 4 yük ve 3 düğüm noktasından oluşan 12.47 kV'luk radyal şebekeye bağlanmıştır. Farklı yük koşulları için rüzgâr türbin sistemi ve şebeke tarafından sağlanan güç miktarları sunularak, elde edilen şebeke bağlantı noktasındaki faz gerilimleri birbiriyle karşılaştırılmıştır. Bu durumda şebekedeki yük talebinin artışıyla gerilim profilindeki bozulmaların arttığı ancak her iki durumda gerilim değişim miktarlarının şebeke yönetmeliğinde belirtilen %10'luk aralık dahilinde olduğu görülmüştür. Bu sonuçların elde edilmesinde DC hat üzerinde gerçekleştirilen gerilim regülasyon işleminin etkisi büyüktür.

Tek rüzgâr türbini ile oluşturulan rüzgâr türbin sistemlerinin şebekeye bağlantısı zayıf olmaktadır. Bu durum şebeke bağlantı noktasında ani ve istenmeyen AC gerilim düşümlerinin oluşmasını tetikler. Bu durumu engellemek amacıyla gerilim kontrol işlemi zayıf bağlantı noktası yerine DC hat üzerinden gerçekleştirilebilir. Çalışmada bu amaçla DC hat üzerinde gerilim regülasyon işlemi yapılmış ve bu sayede ani AC

gerilim düşümlerinin oluşmasını önleyerek, zayıf şebeke bağlantı noktasındaki gerilim profili iyileştirilmiştir. Bu durum rüzgar türbin sistemlerinin şebeke entegrasyon etkilerinin azaltılması anlamına gelmektedir. Gerilim regülasyon işlemi aynı zamanda istenilen ±%5'lik DC gerilim aralığı içerisinde invertörün kontrollü olarak çalışmasını sağlamıştır.

Gerilim regülasyon işlemine ek olarak çalışmada DC hat üzerinde gerilimin +%10 ve daha fazla olması durumu için doğrultucunun çalışması PSCAD/EMTDC'de hazırlanan model ile durdurulmuştur. Böylece, aşırı gerilim anında DC hattın zarar görmesi ve bu duruma bağlı olarak şebekede ciddi problemlerin oluşması engellenmiştir.

Bu tez çalışmasında rüzgar enerjisinin şebeke entegrasyon etkilerini gözleyebilmek amacıyla 4 yük ve 3 düğüm noktasından oluşan 12.47 kV'luk radyal şebekeye rüzgar türbin sistemi bağlanmadan önceki ve sonraki durumlar için ayrı ayrı şebeke değerleri elde edilerek birbiriyle karşılaştırılmıştır. Şebekeye rüzgar türbin sisteminin bağlanması durumunda genellikle, şebekeden çekilen reaktif güç miktarında 0.1-0.4 MVAr aralığında artışın olduğu gözlemlenirken, şebekeden çekilen toplam görünür güç değerinde 0.9 MVA ile 1.9 MVA aralığında bir azalmanın olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçların elde edilmesinde rüzgâr türbin sisteminin bağlanmasıyla şebekeden çekilen reaktif güç değerindeki artışın küçük olması ve rüzgâr türbin sisteminin şebekeye sağladığı aktif güç desteği etkili olmuştur. Rüzgâr türbin sistemi tarafından şebekeden çekilen reaktif güç değerinin küçük olmasını sağlayan en önemli etkenler ise çalışmada kullanılan KMSG'ün yüksek güç faktöründe çalışabilmesi ve invertör çıkışına reaktif güç desteği amacıyla kapasitörün bağlanmış olmasıdır.

Günümüzde rüzgar enerjisinin şebeke entegrasyon etkilerini azaltmaya yönelik farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlere, enerji depolama sistemlerinin kullanılması, hibrit sistemlerin oluşturulması, güç elektroniği elemanlarının geliştirilmesi, mevcut kontrol sistemlerinin artırılması vb. işlemleri örnek olarak verebiliriz. Yine reaktif güç kontrolü ile güç kayıplarının azaltılmasını veya gerilim regülasyonunu sağlayan Statik VAr Kompanzatörleri (SVC) ile Statik Kompanzatörleri (STATCOM) gibi elemanların sistemde kullanılması ya da akım ve gerilimdeki harmonik bozulmaların azaltılmasını sağlayan harmonik filtrelerin sisteme eklenmesi de şebeke entegrasyon etkilerinin azaltılması için günümüzde yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır.

Genel olarak elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, sağladığı avantajlar nedeniyle oldukça önemlidir. Bu nedenle günümüzde ülkelerin enerji alanındaki temel hedefleri arasında bu yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının artırılması vardır. Bu amaçla rüzgar enerjisinin şebekedeki penetrasyon oranını artırarak şebeke güç kalitesinin korunabilmesi için entegrasyon etkilerini azaltılmasında kullanılan mevcut yöntemlerin geliştirilerek iyileştirilmesine ve yeni alternatif yöntemlere ihtiyaç vardır.

KAYNAKÇA

Adetokuna, B. B., Muriithib, M. C., Ojoc, O. J., 2020. Voltage stability assessment and enhancement of power grid with increasing wind energy penetration. **Electrical Power and Energy Systems**, **120**: 1-11

Ahmed, D. S., Al-Ismaıl, M. S. F., Shafıullah, M., Al- Sulaıman, A. F., El-Amın, M. I., 2020. Grid ıntegration challenges of wind energy: a review. **IEEE Access**, **8**: 10857-10878

Ahshan, R., Shafiq, M., Hosseinzadeh, N., Al-Badi, A., 2018. Distributed wind systems for moderate wind speed sites pp. 1-5. *2018 5th International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications (ICREGA), Feb.25-28 , 2018*, Al Ain, United Arab Emirates.

Ak, A. M., 2011. Rüzgar Santrallerinin Şebekeye Entegrasyonu ve Şebeke Üzerine Etkileri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 107 s.

Akyürek, B., 2015. Akıllı Şebekelerde Depolama Sistemlerine Sahip Rüzgar Enerji Santrallerinde Üretim Tahmini ve Sisteme Katılım Miktarının Belirlenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 76 s.

Alkan, Ö., 2018. Rüzgar ve Güneş Enerjisi Elektrik Santrallerinde Kısa Dönem Tahmini İçin Matematiksel Modellerin Üretilmesi. Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Düzce, 94 s.

Anderson, P. M., Bose, A., 1983. Stability simulation of wind turbine systems. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, **102**(12): 3791-3795

Arduini, R. F., Silva-Pessoa, L. A., Oleskovicz, M., Asada, N. E., 2019. Analysis of the integration of type C wind turbines in distribution networks, pp. *2019 IEEE Milan PowerTech, June 23-27, 2019*, Milan, Italy.

Atabey, G., Tezcan, S. S., 2017. Rüzgâr santrallerinin modellenmesi ve rüzgâr santrallerinin iletim sistemi üzerindeki etkilerinin incelenmesi. **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji**, **5**(3): 197-212

Aykut, O., 2019. Rüzgar Türbin - Generatör Sistemlerinin Modellemesi, Kontrolü ve Şebeke Gerilim Düşmelerine Karşı Sistem Davranışının Analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 174 s.

Başkurt, F., 2012. Şebeke Bağlantılı Bir Rüzgar Enerji Sisteminin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 140 s.

Bayhan, S., Abu-Rub, H., 2019. Smart energy management system for distributed denerations in AC microgrid, pp. *2019 IEEE 13th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), April 23-25, 2019*, Sonderborg, Denmark.

Bekdirhan, B. O., 2014. Voltage Stability Analysis Of Grid Connected Wind Farms: A Case Study In Trakya Transmission System. Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 93 s.

Bekri, L. O., Mekri, F., 2018. Impact of wind turbine on voltage stability, pp. *2018 International Conference on Wind Energy and Applications in Algeria (ICWEAA), Nov.6-7, 2018,* Algeria.

Benzohra, O., Echcharqaouy, S. S., Fraija, F., Saifaoui D., 2020. Integrating wind energy into the power grid: impact and solutions. **Materials Today: Proceedings**

Boynueğri, R. A., 2010. Rüzgar Türbinlerinden Kaynaklanan Gerilim Dalgalanmalarının SVC Kullanılarak Azaltılması. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 49 s.

Cedrat. 2007. PSCAD Version 4.2. **Wind Turbine Applications Technical Paper**

Ceylan, M., 2020. Elektrik Enerjisi Santralleri ve Elektrik Enerjisi İletimi, Dağıtımı. Seçkin Yayıncılık, Ankara, 456 s.

Chaithanya, S., Reddy, B. N. V., Kiranmayi, R., 2019. Modeling & analysis of grid-tied PMA based offshore wind energy system using PSCAD/EMTDC. **Ain Shams Engineering Journal**, **10**: 411-417

Chen, Z., Spooner, E., 2001. Grid power quality with variable speed wind turbines. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, **16**(2): 148-154

Çankırı, E. K., 2019. Orta Gerilim Dağıtım Şebekesine Bağlanan Rüzgâr Türbinlerinin Etkileri. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 73 s.

Çetin, K., S.,, Genç, S. M., Daldaban, F., 2019. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri-küçük ölçekli uygulamalar. **BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi**, **6**(2): 539-551

Çetin, S. N., Çelik, H., Başaran, K., 2011. Rüzgar türbinlerinde kapasite faktörü ve türbin sınıfı ilişkisi, pp. *6'th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), May 16-18, 2011*, Elazığ.

Dabakoğlu, A., 2017. Rüzgar Türbinlerinin Şebekeye Entegrasyonu ve Performanslarının İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 131 s.

Eltamaly, M. A., Mohamed, S. Y., El-Sayed, M. A., Elghaffar, A. N. A., 2019. Analyzing of wind distributed generation configuration in active distribution network pp. *2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), April 15-17,2019,* Manama, Bahrain.

EPDK, 2017. Elektrik Şebeke Yönetmeliği, Rüzgar ve Güneş enerjisine dayalı fotovoltaik üretim tesislerinin şebeke bağlantı kriterleri, EK 18

Erduman, A., Durusu, A., Kekezoğlu, B., 2018. Installation and grid effect evaluation of small-power wind power plant considering technical and economic criteria: a case study **European Journal of Science and Technology**, **13**: 112-117

Ezhililjenekkha, G. B., Marselinebeno, M., 2020. Review of power quality issues in solar and wind energy. **Materials Today: Proceedings**, **24**: 2137-2143

Ghenai, C., Bettayeb, M., 2019. Grid-tied solar PV/fuel cell hibrid power system for university bulding. **Energy Procedia**, **159**: 96-103

Gutierrez, J. J., Ruiz, J., Saiz, P., Azcarate, I., Letuirondo, A. L., Lazkano, A. 2011. Power quality in grid-connected wind turbines. In: Wind Turbines (Eds. H. Ibrahım ,A. Bahadly). Intech Publishers, Massey University, New Zealand.

Gülersoy, T., Çetin, S. N., 2010. Menemen Bölgesinde Rüzgar Türbinleri İçin Rayleigh ve Weibull Dağılımlarının Kullanılması. **Politeknik Dergisi**, **13**(3): 209-213

Han, G. S., Yu, K. I., Park, M., 2007. PSCAD/EMTDC-based simulation of wind power generation system. **Renewable Energy**, **32**(1): 105–117

Hsu, C., Korimara, R., Cheng, T., 2015. Power quality analysis for the distribution systems with a wind power generation system. **Computers and Electrical Engineering**, **54**: 131-136

Ibrahim, H., Ghandour, M., Dimitrova, M., Ilinca, A., Perron, J., 2011. Integration of wind energy into electricity systems: technical challenges and actual solutions. **Energy Procedia**, **6**: 815-824

Kaddah, S. S., Khaled, M., Al, E. A., Megahed, F. T., Osman, G. M., 2016. Probabilistic power quality indices for electric grids with increased penetration level of wind power generation. **Electrical Power and Energy Systems**, **77**: 50-58

Kamali, H. Z., Salameh, Z., Ashfaq, A., 2017. Modeling of wind energy conversion system using PSCAD/EMTDC. **Internatıonal Journal of Renewable Energy Research**, **7**(1): 178-187

Kaplan, A. Y., 2014. Modeling and Simulating of a Wind Energy System With Static Transfer Switch Using PSCAD Program. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir, 120 s.

Kaplan, A. Y., 2016. Rayleigh Ve Weibull Dağılımları Kullanılarak Osmaniye Bölgesinde Rüzgar Enerjisinin Değerlendirilmesi. **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, **20**(1): 62-71

Kim, H. E., Kim, H. J., Kim, H. S., Choi, J., 2012. Impact analysis of wind farms in the Jeju ısland power system. **IEEE Systems**, **6**(1): 134-139

Kim, K. S., Kim, S. E., 2007. PSCAD/EMTDC-based modeling and analysis of a gearless variable speed wind turbine. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, **22**(2): 421-430

Kim, S. E., Song, M. B., Lee, Y. K., 2010. Modeling and analysis of a grid-connected wind energy conversion system using PSCAD/EMTDC pp. 1-6. *2010 Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Jan.19-21 , 2010*, Gothenburg, Sweden.

Kocatepe, C., İnan, A., Arıkan, O., Yumurtacı, R., Kekezoğlu, B., Baysal, M., . . . Akkaya, Y., 2009. Power quality assessment of grid-connected wind farms considering regulations in Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **13**: 2553-2561

Koç, E., Güven, N. A., 2011. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinin modellanmesi ve arıza sonrası sisteme katkı yeteneklerinin incelenmesi. **EMO Bilimsel Dergi**, **1**(1): 51-55

Koç, E., Şenel, C. m., 2015. Yatay eksenli rüzgar türbinlerindeki aerodinamik, mekanik ve elektriksel kayıpların değerlendirilmesi. **Rüzgar Enerjisi Dergisi**, **3**: 56-62

Konara, Y. S. M. K., Beyer, G. H., Kolhe, L. M., 2016. Estimation of annual energy output of a wind turbine using wind speed probability distribution, pp. 117-121. *2016 3rd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), March 17-19, 2016*, Chennai, India.

Kurban, M., Mert K. Y., Hocaoğlu, O. F., 2007. Weibull dağılımı kullanılarak rüzgar hız ve güç yoğunluklarının istatistiksel analizi. **Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, **7**(2): 205-218

Lu, S., Wang, L., Ke, S., Chang, C., Yang, Z., 2016. Evaluation of measured power quality results of a wind farm connected to Taiwan power system. **IEEE Transactions on Industry Applications**, **52**(1): 42-49

Machmoum, M., Hatoum, A., Bouaouiche, T., 2010. Flicker mitigation in a doubly fed induction generator wind turbine system. **Mathematics and Computers İn Simulation**, **81**: 433-445

Mantaş, A. C., Yalman, Y., Tekşut, B., Bayındır, Ç., 2018. Türkiye elektrik iletim şebekesinde güç kalitesi parametrelerinin yönetmelik ve standartlar ışığında yıllara göre değerlendirilmesi, pp. 117-124. *Güç Sistemleri Konferansı*, Ankara.

Mararakanye, N., Bekker, B., 2019. Renewable energy integration impacts within the context ot generator type, penetration level and grid characteristics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **108**: 441-451

Muljadi, E., Butterfield, P. C., Parsons, B., Ellis, A., 2007. Effect of Variable Speed Wind Turbine Generator on Stability of a Weak Grid. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, **22**(1): 29-36

Mutlu, S. Ö., 2010. Evaulating the impacts of wind farms on power system operation. **Journal of Naval Science and Engineering**, **6**(2): 166-185

Nak, H., 2013. Değişken Hızlı Değişken Açılı Rüzgar Türbinlerinin Kontrolü. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 75 s.

Nayak, K. S., Jamel, S., 2018. Variable wind, dynamic load, constant voltage wind turbine generation system, pp. 903-907. *2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), May 22-25, 2018*, Singapore.

Rona, B., 2014. Rüzgar Santrallerinin Güç Sistemine Entegrasyonu ve Şebeke Yönetmenliğine Göre Analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 97 s.

Tarlak, H., 2018. Elektrikli Araçlar İçin İki Yönlü Şarj Devresi Tasarımı. Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü 101 s.

Taşcıkarağlu, A., 2008. Rüzgar Türbinlerinin Güç Kalitesi Üzerine Etkilerinin Modellenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 93 s.

Tumay, A., 2010. Rüzgar Santrallerinin Sistem Entegrasyonunun Benzetim Temelli Tekniklerle İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 73 s.

Turgut, E., Selçuk, K., 2016. Elektrik Enerjisi Üretimi, İletimi ve Dağıtımı. Detay Yayıncılık, Ankara, 388 s.

TÜREB, 2020. Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu

TÜREK, 2020. pp. 1-52. *Türkiye Rüzgar Enerjisi Kongresi, 5-7 Kasım*, İzmir.

Uslu, F. A., 2019. Rüzgar Türbinlerinin Şebekeye Etkilerinin İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 83 s.

Usta, İ., Kantar, M. Y., 2016. Farklı Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları Kullanarak Rüzgar Gücü Potansiyelinin Tahmini. **Fen ve Mühendislik Dergisi**, **18**(3): 362-380

Wei, C., Han, M., Yan, W., 2011. Voltage fluctuation and flicker assessment of a weak system integrated wind farm, pp. *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-28, 2011*, Detroit, MI, USA.

Yadav, K., Kaur, M., 2016. Investigation of optimal allocation of wind DG in distribution system, pp. *2016 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE), November 17-19, 2016*, Patiala, India.

Yalçın, F., 2009. Bir Fazlı İnverter Tasarımı. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 137 s.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Nazlıhan ÖZDOĞAN

Uyruğu: Türkiye (TC)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü	2019
Lise	Sema Yazar Anadolu Lisesi, Kayseri	2013

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2020- Halen	Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi
2019-2020	Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce