



**RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖR TİPLERİNİN
AKILLI ŞEBEKELER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

Melike Selcen AYZAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2016

Melike Selcen AYZAZ tarafından hazırlanan “RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖR TİPLERİNİN AKILLI ŞEBEKELER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Kurtuluş BORAN

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

İkinci Danışman: Prof. Dr. İlhami ÇOLAK

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gelişim Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Ayhan ALBOSTAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Atılım Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. H. Mehmet ŞAHİN

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 30/04/2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Metin GÜRÜ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Melike Selcen AYAZ

30.04.2016

RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖR TİPLERİNİN AKILLI ŞEBEKELER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Melike Selcen AYZAZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2016

ÖZET

Rüzgâr türbinlerinde, rüzgâr hızının meydana getirdiği mekanik gücün elektrik enerjisine dönüştürülmesi işlemi generatörlerle gerçekleşmekte olup rüzgâr hızındaki anlık değişimler generatörün ürettiği gerilim üzerinde salınımlara neden olmakta ve enerji kalitesini bozmaktadır. Bu nedenle sunulan tez çalışmasında, rüzgâr türbinlerinde kullanılan farklı yapılarıdaki generatörlerin şebekeye olan etkileri üzerinde durularak hangi şartlarda hangi generatör türünün seçilmesinin uygun olacağı araştırılmıştır. Tez kapsamında, sabit mıknatıslı senkron generatör (SMSG), çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG), sincap kafesli asenkron generatör (SKAG) ve rotoru sargılı asenkron generatör (RSAG) ele alınmış ve aralarındaki farklar MATLAB/Simulink ortamında analiz edilmiştir. Ayrıca sonuçların daha görsel bir ortamda yorumlanabilmesi ve kolay erişim için MATLAB GUI ile bir ara yüz oluşturulmuş ve burada kullanıcının kendi belirlediği parametre değerlerini simülasyona uygulayabilme seçeneği sunulmuştur. Geliştirilen uygulamada, her bir generatör tipi için rüzgâr hızı salınımlarına karşı generatörün ürettiği gerilim, akım ve güç değerleri incelenmiştir. Bu amaçla, rüzgâr hızı, kanat açısı ve SMSG, ÇBAG, SKAG ile RSAG parametreleri kullanıcı tarafından veri girdisi olarak belirlenebilmektedir. Şebekede meydana gelen değişimlerin belirgin bir şekilde gözlenebilmesi için simülasyon testleri sırasında generatörlerin şebekeye aynı gücü verecek şekilde modellenmesi göz önünde tutulmuştur. Tez çalışmasında generatörlerin şebeke üzerindeki toplam harmonik bozunumu incelenerek şebeke için en uygun tipteki generatörlerin SMSG ve ÇBAG tipindeki türbinler olduğu yorumu yapılmıştır. Yapılan bu tez çalışmasının rüzgâr enerji tesisi kuracak girişimciler ve bu alanda araştırma yapacaklar için oldukça faydalı bir referans teşkil etmesi beklenmektedir.

Bilim Kodu : 90502
Anahtar Kelimeler : Rüzgâr enerjisi, Generatör sistemleri, Akıllı Elektrik Şebekeleri
Sayfa Adedi : 95
Danışman : Doç. Dr. Kurtuluş BORAN
İkinci Danışman : Prof. Dr. İlhami ÇOLAK

EFFECTS OF WIND TURBINE GENERATOR TYPES ON SMART GRID SYSTEMS

(M. Sc. Thesis)

Melike Selcen AYAZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2016

ABSTRACT

The operation of the mechanical energy conversion into the electrical energy occurs with the generator in wind turbines. During the connection of the turbines into the grid, due to sudden changes in wind power, voltage fluctuations occur in the grid that affect the power quality. This essential has required investigation of the generators used in wind turbines. In this study, the impact of each generator on the system has been examined and compared. Widely used types of wind turbines which are Permanent magnet synchronous generators (PMSG), double-fed asynchronous generators (DFIG), squirrel cage induction generators (SCIG) and wounded rotor induction generators (WRIG) are considered. In order to detect the differences between the generators, MATLAB / Simulink software is used. When the total installed power according to suitable generator parameters are applied, simulation outputs will be taken into consideration in the comments. Therefore, the selection of the most suitable generator and the effects of the generator on the grid will be investigated. For better monitoring and easy access, a graphical user interface (GUI) in MATLAB has been created where the user has the option to set the simulation parameter values. In simulation application, the current change in the wind, voltage and power parameters will be compared. Wind speed, pitch angle and generator parameters can be entered in the system. In order to examine the effect of the generators on the network system, breakers, transformers and simulation results of a system consisting of network were observed. It is determined that the most suitable generators for the grid are PMSG and DFIG generators. It is expected that this thesis will be a reference to investors and researchers who are studying on the wind energy systems.

Science Code : 90502

Key Words : Wind energy, generator types, smart electrical grids

Page Number : 95

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Kurtuluş BORAN

Co-Supervisor : Prof. Dr. İlhami ÇOLAK

TEŞEKKÜR

Bu tez konusunun belirlenmesinde, araştırma aşamasında, yön tayininde ve tamamlanmasında bana destek olan değerli hocalarım sayın Doç. Dr. Kurtuluş Boran ve Prof. Dr. İlhami Çolak'a bana ayırdıkları değerli zaman ve sağladıkları destek için minnettarım. Tezimin başlangıcından bitimine kadar bana inanan, benden yardımlarını esirgemeyen, her zaman yanımda olan, bildiklerini paylaşan ve bildiklerimizi paylaşmamızı öğreten ve yardımlarını esirgemeyen tüm hocalarıma teşekkürlerimi bir borç bilirim. Sunulan bu tez çalışmasının nihai şeklini almasında kıymetli fikir ve önerileriyle beni yönlendiren hocalarım sayın Prof. Dr. H. Mehmet ŞAHİN, Prof. Dr. Ayhan ALBOSTAN ve Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR'a, yine bu süreç boyunca her zaman yanımda olan ailem ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---|--------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| TEŞEKKÜR..... | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ..... | x |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ..... | xi |
| RESİMLERİN LİSTESİ | xiv |
| SİMGELER VE KISALTMALAR..... | xv |
| 1.GİRİŞ..... | 1 |
| 2. RÜZGÂR ENERJİ SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ..... | 7 |
| 2.1. Rüzgâr Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi | 7 |
| 2.1.1. Dünyada rüzgâr enerjisi | 10 |
| 2.1.2. Türkiye’de rüzgâr enerjisi..... | 14 |
| 3. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN İNCELENMESİ..... | 23 |
| 3.1. Rüzgâr Türbinlerinin Aerodinamiği..... | 23 |
| 3.1.1.Rüzgâr enerjisi ve gücü..... | 23 |
| 3.1.2. Kanat ucu hız oranı (KHO) hesabı..... | 25 |
| 3.1.3. Durdurma (Stall) ve kanat açısı (pitch) kontrolü | 27 |
| 3.2. Rüzgâr Türbininin İç Yapısı | 27 |
| 3.3. Rüzgâr Türbinlerinin Bileşenleri | 28 |
| 3.3.1. Kanatlar..... | 29 |
| 3.3.2. Rotor | 29 |
| 3.3.3. Kanat açısı sürücüsü | 30 |

| | Sayfa |
|--|--------------|
| 3.3.4. Sapma sürücüsü | 30 |
| 3.3.5. Rotor şaftı..... | 30 |
| 3.3.6. Fren | 30 |
| 3.3.7. Dişli kutusu | 30 |
| 3.3.8. Kontrol paneli | 30 |
| 3.3.9. Generatör..... | 31 |
| 3.4. Rüzgâr Türbini Teknolojileri | 31 |
| 3.4.1. Dönme eksenlerine göre türbinler..... | 31 |
| 3.4.2. Kanat sayısına göre türbinler | 34 |
| 3.4.3. Rüzgâr alışı yönüne göre türbinler..... | 36 |
| 3.4.4. Rüzgar türbinlerinin dönüştürücü türlerine göre sınıflandırılması | 36 |
| 3.5. Rüzgâr Türbinlerinin Teknik Olarak Karşılaştırılması | 41 |
| 4. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖRLER... | 45 |
| 4.1. Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Generatör Tipleri | 46 |
| 4.1.1. Doğru akım generatörleri..... | 46 |
| 4.1.2. Senkron generatörler | 47 |
| 4.1.3. Asenkron generatörler..... | 50 |
| 5. RÜZGÂR GENERATÖRLERİNİN MODELLENMESİ | 53 |
| 5.1. SMSG'nin Matlab Simulink Modeli..... | 53 |
| 5.2. SKAG'li Matlab Simulink Modeli..... | 57 |
| 5.3. ÇBAG'li Rüzgâr Türbini Matlab Simulink Modeli..... | 59 |
| 5.4. Rotoru Sargılı Asenkron Generatör Matlab Simulink Modeli..... | 62 |
| 5.5. MATLAB Kullanıcı Ara yüzü..... | 65 |

| | Sayfa |
|--|--------------|
| 6. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN AKILLI ŞEBEKELERLE ENTEGRASYONU | 69 |
| 6.1. Akıllı Şebekeler Entegrasyonu..... | 69 |
| 6.2. Şebekede Meydana Gelen Hatalar | 71 |
| 6.2.1. Şebeke kaynaklı hatalar | 72 |
| 6.2.2. Generatör ve güç dönüştürücü kaynaklı hatalar | 72 |
| 6.2.3. Mekanik ve aerodinamik olaylar | 72 |
| 7. ANALİZ, SONUÇ VE ÖNERİLER | 75 |
| 7.1. Analizlerin Yorumlanması..... | 75 |
| 7.1.1. Yüklerin devreye giriş ve çıkışları | 76 |
| 7.2. Sonuçlar | 80 |
| KAYNAKLAR | 85 |
| EKLER..... | 89 |
| EK-1. Referans düzlem dönüşümü | 90 |
| EK-2. Sabit mıknatıslı senkron generator matematiksel modeli | 91 |
| ÖZGEÇMİŞ | 94 |

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge | Sayfa |
|--|-------|
| Çizelge 2.1. Dünya üzerindeki rüzgâr enerjisinin ülkelere göre dağılımı | 12 |
| Çizelge 2.2. Dünya rüzgâr potansiyelinin dağılımı | 13 |
| Çizelge 2.3. Ülkemizin elektrik enerjisi kurulu gücü (MW) | 15 |
| Çizelge 3.1. Büyüklüklerine göre türbinlerin karşılaştırılması | 41 |
| Çizelge 3.2. Rüzgâr alış yönüne göre türbinlerin karşılaştırılması | 42 |
| Çizelge 3.3. Kanat çeşitlerine göre türbin karşılaştırılması | 42 |
| Çizelge 3.4. Harici özelliklere göre türbinlerin karşılaştırılması | 42 |
| Çizelge 7.1. Akıllı şebeke senaryoları | 75 |
| Çizelge 7.2. Generatör tiplerinin akıllı şebeke uygunluğunun karşılaştırılması | 81 |
| Çizelge 7.3. Generatörlerin şebekede meydana getirdiği THD oranları, sırasıyla SMSG, ÇBAG, SKAG, RSAG | 82 |

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil | Sayfa |
|--|-------|
| Şekil 2.1. Smith-Putnam türbini..... | 8 |
| Şekil 2.2. Jull tarafından kullanılan ilk alternatif akım üreten generatör | 9 |
| Şekil 2.3. Ulrich Hutter'in tasarladığı rüzgâr türbini | 9 |
| Şekil 2.4. Dünyadaki kümülatif kurulu rüzgâr kapasitesinin yıllara göre değişimi..... | 11 |
| Şekil 2.5. Dünyada yıllık kurulan rüzgâr kapasitesinin yıllara göre değişimi | 12 |
| Şekil 2.6. Dünya üzerindeki rüzgâr enerjisinin ülkelere göre dağılımı | 13 |
| Şekil 2.7. 2015 yılında ülkemizde kurulu elektrik enerjisi gücü | 15 |
| Şekil 2.8. 2015 Yılı sonu itibarıyla Türkiye'den kaynak bazında kurulu güç oranı | 16 |
| Şekil 2.9. Türkiye'deki rüzgâr enerjisi santralleri için kümülatif kurulumu | 17 |
| Şekil 2.10. 2015 yılında Türkiye'deki rüzgâr enerji santrallerinin kurulumunun yıllara göre dağılımı..... | 17 |
| Şekil 2.11. 2015 yılında Türkiye'de işletmedeki rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yatırımcılara göre dağılımı | 18 |
| Şekil 2.12. 2015 yılında Türkiye'de işletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından türbin markalarına göre dağılımı | 18 |
| Şekil 2.13. Türkiye rüzgâr atlası | 19 |
| Şekil 2.14. 2015 yılında işletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre dağılımı | 20 |
| Şekil 2.15. 2015 yılında Türkiye'de işletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre yüzdesel dağılımı | 21 |
| Şekil 2.16. Türkiye'de 2015 yılında işletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından illere göre dağılımı | 21 |
| Şekil 2.17. 2015 yılında işletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından illere göre yüzdesel dağılımı | 22 |
| Şekil 3.1. Rüzgâr enerjisi dönüşüm aşamaları | 23 |
| Şekil 3.2. Güç katsayısı C_p 'nin λ (KHO) ile değişimi | 26 |
| Şekil 3.3. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT)..... | 32 |

| Şekil | Sayfa |
|--|--------------|
| Şekil 3.4. Savonious, Darrieus ve H-Darrieus tipi türbinler | 34 |
| Şekil 3.5. Tek kanatlı ve iki kanatlı rüzgâr türbini | 36 |
| Şekil 3.6. Üç kanatlı ve çok kanatlı rüzgâr türbini | 36 |
| Şekil 3.7. Sabit hızlı rüzgâr türbinleri- 1,5 MW gücündeki NEG Micon türbin | 38 |
| Şekil 3.8. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde RSAG–1,65 MW gücündeki Vestas V66'nın bağlantı şeması | 38 |
| Şekil 3.9. ÇBAG li rüzgâr türbinleri -General Electric 1,5 MW bağlantı şeması | 39 |
| Şekil 3.10. Tam dönüştürücülü rüzgâr türbinleri- Enercon E-82 2 MW | 40 |
| Şekil 4.1. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan elektrik makinaları | 45 |
| Şekil 4.2. Senkron generatör | 47 |
| Şekil 4.3. Alan sargılı senkron generatör | 48 |
| Şekil 4.4. Sabit mıknatıslı senkron generatör | 49 |
| Şekil 4.5. Sincap kafesli asenkron generatör | 51 |
| Şekil 4.6. Rotoru sargılı asenkron generatör | 51 |
| Şekil 4.7. Çift beslemeli asenkron generatör | 52 |
| Şekil 5.1. SMSG modeli | 54 |
| Şekil 5.2. SMSG modeli sistem bileşenleri | 55 |
| Şekil 5.3. SMSG bloğu parametre girişi | 55 |
| Şekil 5.4. Kazanç ve yük bloğu parametre girişi | 56 |
| Şekil 5.5. Ölçüm bloğu iç yapısı | 56 |
| Şekil 5.6. SMSG türbin çıkış gerilimleri | 57 |
| Şekil 5.7. SKAG modeli | 58 |
| Şekil 5.8. SKAG elektrik modeli | 59 |
| Şekil 5.9. SKAG türbin çıkış gerilim ve akımı | 59 |
| Şekil 5.10. ÇBAG modeli | 60 |

| Şekil | Sayfa |
|--|--------------|
| Şekil 5.11. ÇBAG bloğu maske yapısı | 61 |
| Şekil 5.12. ÇBAG bloğunun iç yapısı..... | 61 |
| Şekil 5.13. ÇBAG türbin çıkış gerilim ve akımı..... | 62 |
| Şekil 5.14. RSAG simulink modeli..... | 63 |
| Şekil 5.15. Dönüştürücü sistem çıkışındaki değerler | 63 |
| Şekil 5.16. Gerilim regülatörü tasarım parametreleri..... | 64 |
| Şekil 5.17. RSAG türbin çıkış gerilim ve akımı | 64 |
| Şekil 5.18. GUI ara yüz tasarımında SKAG modeli..... | 65 |
| Şekil 5.19. GUI ara yüz tasarımında ÇBAG modeli..... | 66 |
| Şekil 5.20. GUI ara yüz tasarımında tüm generatör tipleri | 67 |
| Şekil 6.1. Rüzgâr türbini için güç-frekans eğrisi | 71 |
| Şekil 7.1. Sistem görünümü | 76 |
| Şekil 7.2. Sistemdeki 15 kW'lık yüklerin görünümü | 76 |
| Şekil 7.3. Yük 1'in hat gerilimi | 77 |
| Şekil 7.4. Yük 2'nin hat gerilimi | 78 |
| Şekil 7.5. Yük 3'ün hat gerilimi..... | 78 |
| Şekil 7.6. Evirici öncesi ve sonrası sistem gerilimleri | 79 |
| Şekil 7.7. Generatörlerin şebekede meydana getirdiği THD oranları, sırasıyla SMSG, ÇBAG, SKAG, RSAG | 82 |

RESİMLERİN LİSTESİ**Resim****Sayfa**

Resim 3.1. Rüzgâr türbini kesit görünümü 28



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

| | |
|--------------------------------------|---|
| s | Saniye |
| \dot{m} | Kütleli debi (kg/s) |
| V | Hacim (m ³) |
| v | Rüzgâr hızı (m/s) |
| ω_m | Açısal hız (rad/s) |
| ρ | Yoğunluk (kg/m ³), |
| A | Rüzgâr akımına dik alan (m ²) |
| t | Zaman(s) |
| hz | Hertz |
| (λ, β) | Rüzgâr mekanik güç katsayısı |
| β | Pitch (kanat) açısı |
| T_e | Elektromekanik tork |
| T_m | Mekanik tork |
| Q_{ref} | Reaktif güç |

Kısaltmalar

Açıklamalar

| | |
|-------------|------------------------------------|
| ÇBAG | Çift Beslemeli Asenkron Generatör |
| DGM | Darbe Genlik Modülasyonu |
| KHO | Kanat Ucu Hız Oranı |
| MKD | Makine Kısmı Dönüştürücü |
| REDS | Rüzgâr Enerji Dönüşüm Sistemi |
| RSAG | Rotoru Sargılı Asenkron Generatör |
| SKAG | Sincap Kafesli Asenkron Generatör |
| SMSG | Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör |
| ŞKD | Şebeke Kısmı Dönüştürücü |
| THD | Toplam Harmonik Distorsiyon |

1. GİRİŞ

Günümüzde yenilenebilir enerjinin kullanımının artmasıyla birlikte şebeke üzerindeki etkileri daha çok araştırmaya açık hale gelmiştir. Rüzgâr enerjisinin bu derece tercih edilmesinin sebepleri arasında yenilenebilir, çevre dostu ve tükenmeyen bir kaynak olması yer almaktadır. Geleneksel enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında, rüzgâr enerjisinin bu avantajları son yıllarda yükselişe geçmesini kanıtlayacak niteliktedir. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde ise rüzgâr türbinleri büyük bir paya sahip olmasına karşın şebeke üzerindeki bozucu etkisi diğer kaynaklara göre oldukça fazladır.

Rüzgâr enerjisi, rüzgârı oluşturan hava akımının sahip olduğu hareket (kinetik) enerjisi olarak ifade edilir. Bu enerjinin bir bölümü yararlı olan mekanik veya elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu teknoloji, 1980'lere gelene kadar oldukça gelişmiş ve güvenilir ve verimli bir enerji kaynağı haline dönüşmüştür. Son 20 yılda birçok türbin teknolojisi geliştirilmiş ve enerji verimliliği yükseltilmiştir. Türbin kapasiteleri birkaç kW'tan 7 ila 10 MW mertebelerine kadar yükselmiştir. Ayrıca, sadece karada kurulan (on-shore) türbinlere ek olarak denizde kurulan (off-shore) türbinler de geliştirilmiş, enerji potansiyeli ve verimlilik artırılırken türbin maliyetleri düşmüştür.

Rüzgâr, yenilenebilir enerji teknolojileri arasında karşılaştırma yapıldığında en ekonomik enerji kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle Türkiye'nin rüzgâr enerji potansiyeli düşünüldüğünde, rüzgâr enerjisine yatırım yapmak enerji sektöründe atılabilecek en güvenli adımlardan biridir. Fosil yakıtların maliyetlerindeki artışlar, rezervlerin azalması ve çevresel faktörlerden dolayı rüzgâra verilen değer gün geçtikçe artmaktadır.

Rüzgâr türbin sisteminin tasarım, planlama, ölçüm ve kurulum aşamaları zaman gerektiren ve maliyetli aşamalar olmasına rağmen kurulumdan sonra yatırımcıya önemli ölçüde kar sağlamaktadır. Türkiye'de rüzgâr enerjisi yatırımları, ilk olarak 1997 yılında başlandı. 2016 yılı Mart ayı itibarı ile 73,7 GW olan Türkiye kurulu gücünün 4,7GW'ını rüzgâr enerjisi oluşturmaktadır. Yapılan istatistikler ve dünyadaki yenilenebilir enerjiden üretilen elektrik enerjisindeki önemli artış oranı, gelecek yıllarda da bu yükselişin giderek artacağına önemli bir göstergesidir. Bu açıdan türbinlerle ilgili araştırmalar daha da artmakta ve geliştirilmektedir [1-3].

Problem Durumu/ Konunun Tanımı

Rüzgâr türbinleri, gücünü rüzgârın kinetik enerjisinden elde eden elektromekanik sistemlerdir. Türbinin kanatlarından geçen hava yoğunluğu, kanatların dönmesi aracılığıyla rotora ulaşır. İlk profesyonel rüzgâr türbinleri 1980'li yılların başında, birkaç kW'lık güçlerde üretilmeye başlandı. Kullanılan ilk teknolojik rüzgâr türbini, şebekeye doğrudan bağlanan sincap kafesli asenkron generatör (SKAG) Danimarka tasarımıydı. Bu türbin, daha sonra sabit hızlı rüzgâr türbini olarak sınıflandırılacak; özellikleri arasında sade tasarımı ve güvenilir çalışma koşulları sayılacaktı. Bu tip Generatörlerin en çok tercih edilme sebebi elektrik ve mekanik aksamlarının düşük maliyetidir. Avantajlarının yanı sıra, düşük güç kalitesi, rotorda mekanik baskı ve kontrolsüz aktif/reaktif güç tüketimi gibi dezavantajları vardır. Rüzgâr hızının tüm dalgalanmaları generatör tarafından mekanik tork ve elektrik enerjisine dönüşür ve şebekeye verilir. Bu durum zayıf şebelere bağlanıldığında büyük gerilim dalgalanmalarına sebep olabilir [4-6].

Güç elektroniği alanındaki gelişmeler, rüzgâr türbinlerinin özelliklerinin de gelişmesini sağlamıştır. Değişken hızlı rüzgâr türbinleri geliştirilmiş son teknoloji türbinlerdir. Bu türbinler verimliliği arttırmak ve güç ile dalga şekillerindeki kaliteyi iyileştirmek üzere tasarlanmışlardır. Değişken hızlı türbinler geniş bir rüzgâr hız(v) aralığında çalışabilir ve açısız hızı (ω) mekanik veya elektronik olarak ihtiyaç olduğunda arttırıp azaltabilmektedir. Değişken hızlı türbinlere 1990'lı yıllardan beri kullanılan rotoru sargılı asenkron generatör (RSAG) örnek olarak verilebilir. Reaktif güç kompanzasyonu sağlayan kapasitör grubu ve şebeke bağlantısı sırasında ani akımı önleyen yumuşak yol verme devresi içerir. Rotor sargılarına bağlanan dirençler generatörün tork karakteristiğini değiştirerek senkron hızın %10 fazlasına kadar değişim sağlayabilir. Buna "Opti Slip" teknolojisi denmiştir.

Başka bir sınıflandırma çift beslemeli asenkron generatörlü (ÇBAG) türbinlerdir. Bu türbinler kısmi ölçekli dönüştürücü grubu ve rotor devresinde üretilen enerjiyi normal bir RSAG'ye göre %30 kadar daha arttırabilen generatörlerdir. Bu tip türbinler 2000'li yılların en çok kullanılan teknolojilerinden olmuştur.

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan rüzgâr türbin teknolojisi tam dönüştürücülü türbinlerdir. Şebekeye türbin gücünün tamamına karşılık gelen bir tam ölçekli frekans dönüştürücü ile bağlandığında, reaktif güç kompanzasyonu ve az harmonikli bir bağlantı sağlar. Bu tip türbinler sabit

mıknatıslı senkron generatör (SMSG), rotoru sargılı senkron generatör (RSSG) ve RSAG şeklinde olabilir [4,6-8].

Bu tez çalışmasında, bahsi geçen rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör tipleri Matlab ve Simulink programları kullanılarak modellenmiş ve şebeke üzerindeki analizleri gerçekleştirilmiştir. Modelleme dosyalarının yanı sıra geliştirilen grafik kullanıcı ara yüzü (GUI), türbinlerin çeşitli koşullarda nasıl çalıştığının analizine imkân sağlamakla birlikte performans ve verim yönünden karşılaştırılmasını da sağlayan bir araç olarak tasarlanmıştır. Geliştirilen bu araç, yenilenebilir enerjinin akıllı şebekeler bağlantısına yönelik çalışmalarda da kullanılabilir olacaktır. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatörlerin şebekede oluşturdukları etkiler tasarlanan modellerle incelenmiş ve karşılaştırmalı sonuçlar ortaya konmuştur.

Literatür Araştırması

Vournas ve arkadaşları, eğitim amaçlı olarak bir simulink tabanlı uygulama geliştirmişlerdir. Buradaki amaç, güç sistem kontrolü ve kararlılığı sağlarken, tasarım sırasında karşılaşılan problemlerde öğrencilere yönelik gerçekçi bir metot sergilemektir[9]. Badoni ve Prakash, 2 MW'lık bir rüzgâr türbininde kullanılan SMSG ve dönüştürücü sistemlerin Simulink ortamında d-q referans düzlemi temel alınarak modelleme ve simülasyonunu yapmışlardır [10]. Benzer bir çalışmada Samanvorakij, S., SMSG'nin matematiksel modellemesini yaparak kanat açısı kontrolü ve AA/DA/AA dönüştürücü kullandığı devrede güç katsayısının generatörü koruma durumunu incelemiştir [11].

Yin, M. ve arkadaşları, değişken hızlı SMSG kullanılan bir rüzgâr türbininin dinamik modelini ve kontrolünü, ayrıca alternatif akımlı bir şebekeye bağlantısını incelemiştir. Rüzgâr türbinlerinin şebekeye bağlantı sırasında dikkat edilmesi gerekenlere dikkat çekmişlerdir [12]. Benzer olarak konuyla ilgili NREL Amerikan yenilenebilir enerji laboratuvarı bir araştırma raporu hazırlamıştır. Bu raporda SKAG, SMSG ve ÇBAG gibi rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör modelleri simüle edilerek FAST adını verdikleri bir programla entegre edilmiş, tüm sistemlerin güç dönüştürücüleri ve kontrol aşamaları test edilerek detaylı bir çalışma hazırlanmıştır [13]. Li, H. ve Chen, Z. rüzgâr türbin sistemlerini kendi aralarında generatör tiplerine ve doğrudan sürücü veya dişli kutusu kullanılan generatörler şeklinde gruplandırarak matematiksel ve ekonomik açıdan sınıflandırmışlardır. Buna göre doğrudan sürücülü SMSG generatör sistem maliyetleri minimum olduğundan en ekonomik olduğuna karar verilmiştir. Yıllık enerji üretimleri karşılaştırıldığında ise ÇBAG sistemi en yüksek enerji üretimi

ile en ekonomik olarak seçilmiştir [14]. Benelghali ve arkadaşları, generatörleri karşılaştırma işlemini offshore (deniz üstü) türbinler için yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda ÇBAG'lerin düşük dönüştürücü maliyetine sahip olması bir avantaj kabul edilmiş fakat deniz üstü yatırımlara daha uygun olduğu sonucuyla SMSG'ler üretilen enerji açısından daha uygundur denmiştir [15].

Tekin, rüzgâr santrallerinin sisteme bağlanması ile birlikte sistemde oluşan bozucu etkileri, türbinlerdeki sürekli hal sorunlarını, rüzgâr gücünün şebekeye katılımının etkilerini, kısa-devre arızası durumunda rüzgâr türbinlerinin tepkisini ve rüzgâr santrallerinin şebekeyi en fazla ne kadar besleyebileceği gibi önemli konuları işlemiştir [16]. Köse, kurulu gücü 1-10 kW arasında değişen on adet şebekeden bağımsız, 15 kW ile 45 kW arasında değişen altı adet şebekeye bağlı olmak üzere toplam on altı adet senaryo oluşturmuştur. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Merkez Kampüs alanı içinde rüzgâr ve güneş enerjisinden oluşan şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı hibrit enerji sistemleri ile elektrik üretimi incelemiş ve maliyet analizlerini gerçekleştirmiştir [17].

Özdemir, rüzgâr enerji santrallerinin enerji sistemine entegrasyonu ile Türkiye elektrik sistemine etkilerini araştırmış ve rüzgâr enerji santrallerinin, sistem güç kalitesine olan etkilerini incelemiştir. Sistemde bulunan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu gücünün “kullanılabilirlik kat sayısının” belirlenmesi ile gerçek rüzgâr enerji santrallerinin kapasitesinin ortaya konması için rüzgâr enerji santrallerinin finansal analizi ile birlikte hangi koşullarda sistem maliyetinin daha ekonomik olacağı belirlenmiştir [18].

Araştırmanın Amacı

Araştırmanın amacı rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatörlerin aynı şartlar altında nasıl çalıştığını gözlemlemek ve böylece gerçek uygulamalarda meydana gelen hataların önüne geçebilmektir. Türbin kullanıcılarına yük değişimleri ve şebeke bağlantıları sırasında bilgi verebilmek amacıyla kullanıcı dostu bir ara yüz oluşturulmuştur.

Bu çalışmada rüzgâr enerji sistemlerinin akıllı şebekeler üzerindeki etkileri araştırılacaktır. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatörler, coğrafi ve ekonomik imkânlarla göre farklılık göstermektedir. Bu tezde hedeflenen amaç; farklı yapıdaki rüzgâr türbin sistemlerinin modellenerek, akım, gerilim, frekans, güç kat sayısı ve güç analizlerinin yapılması ve buna bağlı olarak şebekede oluşan harmonik etkilerinin simülasyon ile incelenmesidir.

Tez çalışmasının mevcut literatüre katkısı, incelenecek olan rüzgâr türbini sistemlerinin birbirleriyle kıyaslanması, sistemlerin genel analizlerinin yapılması ve akıllı şebeke sistemlerine entegre etme olacaktır. Mevcut çalışmalar yurt dışı bazlı olarak yapılmış, ancak Türkiye'ye özgü bir çalışma anlamında literatüre bu tez çalışması katkı sağlanacaktır.

Araştırmanın Önemi

Bu çalışmada, dünyanın çeşitli ülkelerinde geniş kullanım alanı olan rüzgâr türbinlerindeki generatörlerin aynı şartlar altında değerlendirildiğinde şebekede yarattığı etkiler gözlemlenmektedir. Geleceğin önemli araştırma alanlarından olan yenilenebilir enerji teknolojilerinin şebeke entegrasyonu kısmında çeşitli varsayımlar yapılarak gelecekteki akıllı şebeke kavramında ortaya çıkabilecek problemlerin tanımı yapılmış ve öneriler sunulmuştur.

Bu tez çalışması sayesinde ülkemizde öncelikli alanlardan olan yenilenebilir enerji kaynaklarına katkıda bulunulacak, değişik rüzgâr türbini generatör sistemleri kendi aralarında karşılaştırılarak, yatırımcı ve araştırmacılar için fayda sağlayacak değerlendirmeler ortaya konularak, sanayicinin ihtiyacı olan rüzgâr türbini generatör değerlendirilmesi sağlanmış olacaktır. Günümüzde öncelikli alan olarak belirlenen yenilenebilir enerjinin bir kolu olan rüzgâr enerjisine devlet teşviği ve bu alana yönelik yatırımlar artmıştır. Yapılan tez çalışması ile yatırımcı firmaların rüzgâr türbinlerini karşılaştırması kolaylaşacak, en uygun türbin seçimi kolaylıkla yapılabilecektir.

Varsayımlar/ Sayıtlar

Aradaki farkları tespit edebilmek amacıyla MATLAB/Simulink yazılımı kullanılmıştır. Kıyaslama yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlardan biri mevcut bir şebekeye generatörlerin ayrı ayrı bağlanarak kıyaslamasının yapılmasıdır. Şebekede meydana gelen değişimlerin belirgin bir şekilde görülebilmesi için rüzgâr gücü ve diğer kaynaklardan elde edilen güç eşit olarak alınmakta ve diğer kaynaklardan sağlanan güçler ideal kabul edilmektedir. Rüzgâr generatörlerinde kurulu (toplam) gücü rüzgâr hızıyla değişim göstermektedir.

Elde edilen çıktılar göz önüne alınarak simülasyonların yorumu yapılacaktır. Bundan yola çıkarak şebekede hangi generatörün kullanılmasının daha uygun olacağı ve bağlantı sözleşme gücünü etkileyip etkilemeyeceği araştırılacaktır. Yapılan çalışmanın daha iyi izlenebilmesi ve kolay erişimi için

MATLAB GUI de bir ara yüz oluşturulmuş ve burada kullanıcının kendi belirlediği parametre değerlerini simülasyona uygulayabilme seçeneği sunulmuştur. Simülasyon uygulamasında, rüzgâr değişimlerinde Akım, Gerilim ve Güç parametreleri kıyaslanacaktır. Programın girdisi olarak ise rüzgâr hızı, kanat açısı ve SMSG, ÇBAG, RSAG ve SKAG makine güç parametreleri girilecektir.

Sınırlılıklar

Teknik olarak bakıldığında, araştırmanın simülasyon yöntemiyle gerçekleştirilmesi bire bir uygulama olarak yapılmaması bazı sonuçlarda tam olarak gerçek değerlere karşılık gelmeyebilir. Bu durumlarda yaklaşık olarak sonuçların değerlendirilmesi yapılabilir ve hata payları hesaba katılabilir.



2. RÜZGÂR ENERJİ SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

2.1. Rüzgâr Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi

Rüzgâr, insanlık tarihi boyunca toplumlar üzerinde önemli bir rol oynamıştır. Rüzgâr enerjisinin yüzyıllar öncesinden kullanıldığı, gemilerdeki yelken uygulamaları ve yel değirmenlerinde tahıl işlenmesi ve su pompalarında kullanılması gibi örneklere dayandırılabilir. Rüzgâr enerjisinden yararlanma oldukça geçmişe dayanır. Çin, Tibet ve İran'da yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. 19. yüzyılın sonlarında elektrik enerjisinin kullanılmaya başlamasının ardından enerjiye duyulan talep arttı. Bu dönemde gittikçe yaygınlaşmaya başlayan elektrik jeneratörlerinde ihtiyaç duyulan mekanik enerji rüzgâr türbinleri vasıtasıyla sağlanabileceği fikri, ilk rüzgâr türbini çalışmalarının başlamasına imkân vermiştir [19].

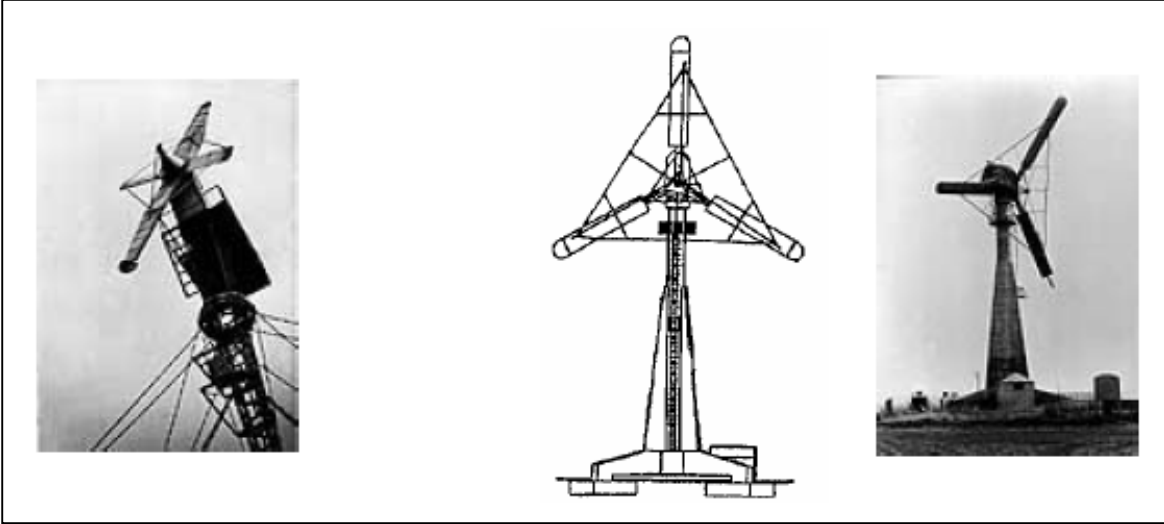
Elektrik üretmek amacıyla rüzgâr türbini kullanımının en iyi örneklerinden birisi, Charles F. Brush tarafından 1888 yılında Ohio'da gerçekleştirildi. 12 kW gücündeki türbinin rotoru 17 metre çapındaydı ve dişli bir sistem yardımıyla DC generatör için 500 rpm'lik bir hız elde edilmekteydi. Literatürde ilk olarak rüzgâr enerjisini kullanarak elektrik elde eden kişi Danimarka'lı Dane Poul La Cour'dur. La cour, 1891 yılında ilkel aerodinamik profiller kullanılarak gerçekleştirilmiş ilk 4 kanatlı, elektrik üreten rüzgâr türbinini geliştirdi[2]. Danimarka'da 1918 yılında elektrik üreten 120 adet türbin bulunmaktaydı. Bu türbinler toplamda 3 MW'lık bir kurulu güç oluşturarak Danimarka'nın elektrik gücünün % 3 ünü oluşturmuştur. 3 MW'lık güç günümüzde tek bir türbinden karşılanabilmektedir.

İkinci dünya savaşı sırasında elektrik kesintilerin önüne geçmek için Danimarkalı bilim adamları rüzgâr enerjisi teknolojisini geliştirdiler. Özellikle 1941 yılında F.L. Smith firması tarafından geliştirilen sistemler bugünkü rüzgâr türbinlerinin öncüleri olarak kabul görmüştür. F.L. Smith firması 2 ve 3 kanatlı rüzgâr türbinleri imal etmişlerdir. İmal edilen bu türbinlerin en büyüğü 1941 yılında Vermont'ta yapılan 1,25 MW gücündeki Smith-Putnam türbinidir (Şekil 2.1). Yatay eksenli, 2 kanatlı ve yaklaşık 54 metre rotor çapına sahiptir [21].



Şekil 2.1. Smith-Putnam Türbini

1950’li yıllardan sonra doğru akım jeneratörlerinin yerini alternatif enerji üreten asenkron makineler almaya başladı. AC jeneratör üretimiyle ilgili ilk çalışmalar, Poul La Cour’un öğrencisi olan Johannes Juul tarafından başlanmıştır. 1960 yılında, 200 kW kapasitesinde Gedser türbini Juul tarafından SEAS elektrik firması için Gedser ‘de imal edilmiştir. İmal edilen türbin 3 kanatlı, elektromanyetik yaw (eğim) sistemini ve asenkron jeneratörü bulunmaktaydı. Frenleme ve durdurma kontrol sistemine göre çalışan Gedser türbininde, aerodinamik üç fren sistemi bulunmaktadır. Bu frenleme sistemi günümüzde hala türbinlerde de kullanılmaktadır [22]. Juul tarafından kullanılan ilk alternatif akım üreten jeneratör Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2. Jull tarafından kullanılan ilk alternatif akım üreten generatör [23]

Aynı zamanda Alman Ulrich Hütter yeni bir yaklaşım geliştirdi. Rüzgâr türbini iki yana sallanan bir göbek üzerindeki kuleye rüzgâr ı arkadan alacak şekilde monte edilen iki ince fiberglas kanattan oluşmaktaydı. Hütter'in türbini yüksek verime sahip olmasıyla tanınmaktaydı [23-24]. Örnek uygulama Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3. Ulrich Hutter'in tasarladığı rüzgâr türbini

1960'lı yıllardan itibaren rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi yerini daha ekonomik olan fosil yakıtlarla (kömür, petrol, doğal gaz vb.) imal edilen termik santraller almıştır.1973 yılından sonra dünya olan petrol krizi, alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeye sebep olmuştur.

Dünya enerji gereksiniminin oldukça önemli bir bölümünü oluşturan fosil yakıtların sınırlı kullanma sürelerinin olması ve bu yakıtlardan enerji elde edilmesi esnasında çevreye verdiği tahribat ve gelecek nesillerinde enerji gereksinimi dikkate alındığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi daha da artmaktadır. Belirli ülkelerde hükümetlerin desteği ile ilave gelişimler yaşanmıştır. Kamu Kurumu Düzenleyici Politikaları (PURPA) yenilenebilir enerji sistemleri için vergi kredileriyle birleştirildiğinde rüzgâr enerjisinin patlamasına neden oldu. Özellikle Amerika'da pek çok rüzgâr çiftliği kuruldu. Danimarkalı firmaların rüzgârı ön cepheden karşılayabilen rüzgâr türbini tasarımıyla türbinlerin enerji kapasitelerini neredeyse 30 katına çıkıttı. Adım adım geliştirilen teknoloji, 1990'ların sonunda en önemli yenilenebilir enerji kaynağı halini aldı [25].

Günümüzde rüzgâr santralleri, enterkonnekte şebeke ile bağlantılı çok sayıda türbini içeren rüzgâr çiftlikleri biçimindedir. Gelişmiş rüzgâr türbinleri yatay eksenli, iki veya üç kanatlı olup tek makine güçleri çoğunlukla 250 kW'ın üzerindedir. Kule yükseklikleri 30 ile 70 m arasında değişmekte, rotor çapları 30-60m arasında olmaktadır. California Palm Springs'deki rüzgâr parkı, 55 kW'lık 1000'den fazla generatörün kullanıldığı en büyük rüzgâr tarlasıdır.

2.1.1. Dünyada rüzgâr enerjisi

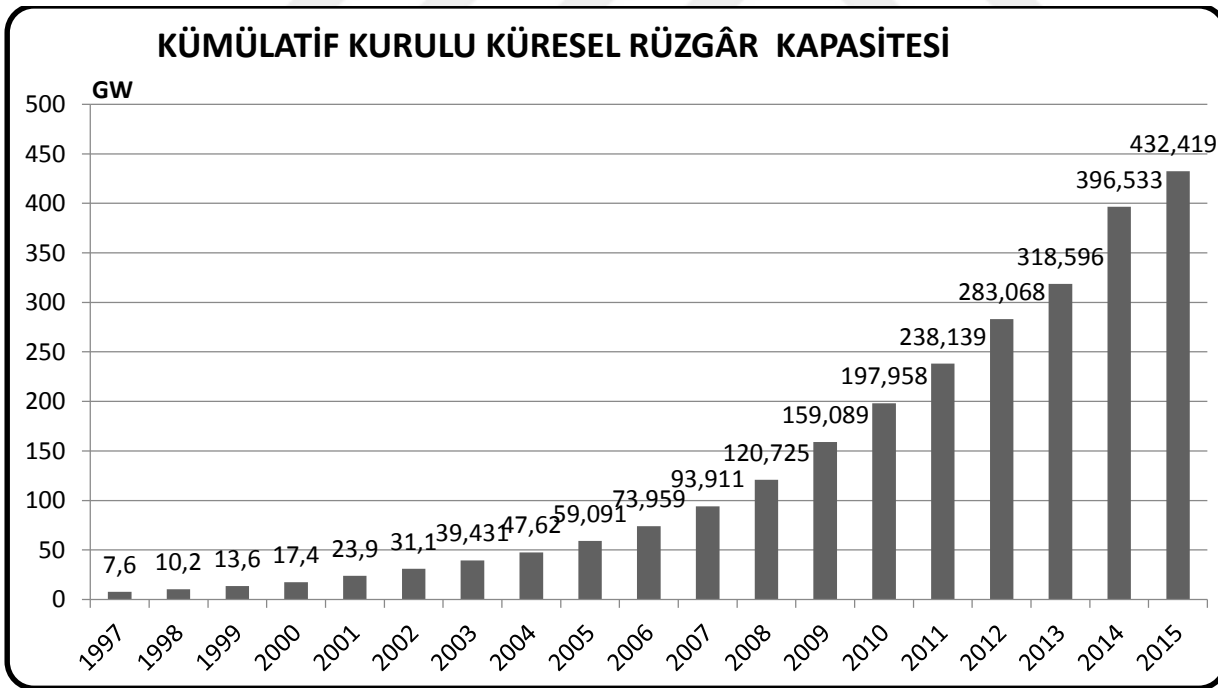
Dünya üzerinde gelişen teknoloji ve sanayiyle birlikte elektrik ihtiyacı da artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamada kullanılan fosil yakıtlar, su gücü ve nükleer yakıtların çevreye verdiği zararlar insanları rahatsız etmeye başlamıştır. İnsan hayatını olumsuz etkileyen ve doğaya zarar veren bu enerji üretim yöntemlerini en az miktarda kullanmak için yenilenebilir ve çevreye zararı olmayan enerji üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Bunların başında ise rüzgâr gücünden elektrik üretimi gelmektedir. Rüzgâr enerjisi çok uzun zamanlardan beri kullanılmaktadır. Günümüz teknolojisiyle birlikte ise rüzgâr türbinleri daha çok gelmiştir. İlk zamanlarda güçleri 20-30 kW civarında olan türbinler şimdi 5-7 MW civarlarına kadar çıkmıştır. Gelişen teknolojiyle birlikte daha da artacağı düşünülmektedir.

İnsanlığın geleceği için uzun vadede sürdürülebilir enerji tedarik sistemine geçişi, tükenir ve tükenmez kaynakların birlikte kullanımı ile mümkün olabilir. Bu noktada kilit iki nokta dünya nüfusunun artışı ve yerel-küresel çevre etkileridir. Dünya rüzgâr enerjisi teknik potansiyeli 53.000 TW/h olarak tahmin edilmektedir. Daha kötümser tahminlerde ise 20.000 TW/h olarak gösterilmektedir [26].

Rüzgâr enerjisi günümüzde kullanımı hızla artan enerji türlerinde biri haline gelmiştir. Dünya üzerinde teknik potansiyel olarak mevcut olan güç dünya enerjisinin çok üzerindedir. Fakat ekonomik, fiziksel ve görsel sebeplerden dolayı bu enerjinin hepsinden yararlanmak mümkün değildir.

Günümüzde dünya üzerindeki rüzgâr kurulu gücü yaklaşık olarak 430 GW seviyesine ulaşmıştır. Dünya üzerinde rüzgâr enerjisi özellikle bazı ülkelerde önemli yatırımlara olanak sağlamıştır. Bu potansiyeli iyi değerlendiren ülkeler arasında Çin (%33,6), Amerika (%17,2), Almanya (%10,4), İspanya (%5,3), ve Hindistan (%5,8), dünya genelindeki rüzgâr enerji kapasitesinin büyük çoğunluğunu oluşturmaktadırlar. Diğer yandan, rüzgâr enerjisinin yaygınlığı Kanada, İngiltere, Japonya, Romanya ve Türkiye gibi ülkelerde de gittikçe artmaktadır.

Dünya üzerinde kümülatif kurulu rüzgâr gücü, Şekil 2.4' te görüldüğü üzere 1997 yılından itibaren sürekli artış göstermiştir. 1997 yılında 7600 MW olan toplam güç 2002 yılında 31100 MW 2008 yılında 120725 MW ve 2015 yılında 396553 MW'a kadar çıkmıştır. 2014 yılında 396533 MW olan kurulu güç 2015 yılında 432,419 MW değerine yükselmiştir [27].



Şekil 2.4. Dünyadaki kümülatif kurulu rüzgâr kapasitesinin yıllara göre değişimi [27]

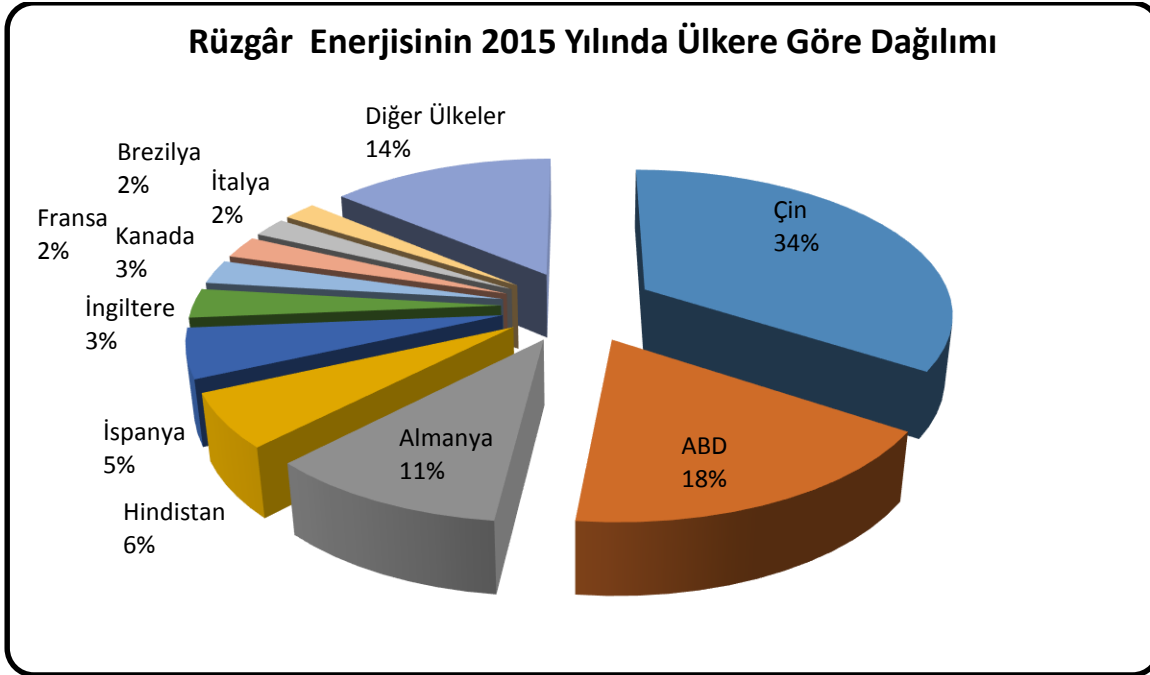


Şekil 2.5. Dünyada yıllık kurulan rüzgâr kapasitesinin yıllara göre değişimi [27]

Yıllık rüzgâr kapasitesinin küresel olarak değişimi ise Şekil 2.5’de görülmektedir. Günümüzde Dünyadaki rüzgâr enerjisinde kümülatif güç olarak en çok pay Çizelge 2.1’de görüldüğü üzere Çin’e aittir. Çin dünyadaki rüzgâr enerjisinin % 33,6’sını üretmektedir. Çin şu anda 145,104 MW ile dünyada ilk sırayı almaktadır. Çin’i % 17,2 ile USA izlemektedir ve bunları da % 10,4 ile Almanya takip etmektedir. Dünya üzerindeki rüzgâr enerjisi dağılımı şekil 2.6’da grafik olarak verilmiştir [27].

Çizelge 2.1. 2015 yılında dünya üzerindeki rüzgâr enerjisinin ülkelere göre dağılımı [27]

| Sıralama | Ülke | Kurulu Güç GW | % Pay |
|---------------|-----------|---------------|-------|
| 1 | Çin | 145,104 | 33,6 |
| 2 | ABD | 74,471 | 17,2 |
| 3 | Almanya | 44,497 | 10,4 |
| 4 | Hindistan | 25,088 | 5,8 |
| 5 | İspanya | 23,025 | 5,3 |
| 6 | İngiltere | 13,608 | 3,1 |
| 7 | Kanada | 11,200 | 2,6 |
| 8 | Fransa | 10,358 | 2,4 |
| 9 | İtalya | 8,958 | 2,1 |
| 10 | Brezilya | 8,715 | 2,0 |
| Diğer Ülkeler | | 66,951 | 15,5 |
| Dünya Toplam | | 432,419 | 100 |



Şekil 2.6. Dünya üzerindeki rüzgâr enerjisinin ülkelere göre dağılımı [27]

Dünya üzerindeki rüzgâr enerjisinin brüt potansiyeli kıtalara göre farklılık göstermektedir. Dünya üzerinde brüt potansiyelin en büyük olduğu kıta Kuzey Amerika kıtasıdır. Dünya üzerindeki brüt potansiyelin %10,64'ü teknik potansiyeldir. Teknik potansiyelinde en büyük olduğu kıta Kuzey Amerika kıtasıdır. Onu Afrika kıtası takip etmektedir. Çizelge 2.2'de teknik brüt ve teknik potansiyellerin kıtalara göre dağılımı verilmiştir.

Çizelge 2.2. Dünya rüzgâr potansiyelinin dağılımı [28]

| Kıta | Brüt Potansiyel (TWh/Yıl) | Teknik Potansiyel (TWh/Yıl) |
|---------------|---------------------------|-----------------------------|
| Afrika | 106,000 | 10,600 |
| Avustralya | 30,000 | 3,000 |
| Kuzey Amerika | 139,000 | 14,000 |
| Güney Amerika | 54,000 | 5,400 |
| Doğu Avrupa | 106,000 | 10,600 |
| Batı Avrupa | 31,400 | 4,800 |
| Asya | 32,000 | 4,900 |
| <i>Toplam</i> | <i>498,000</i> | <i>53,000</i> |

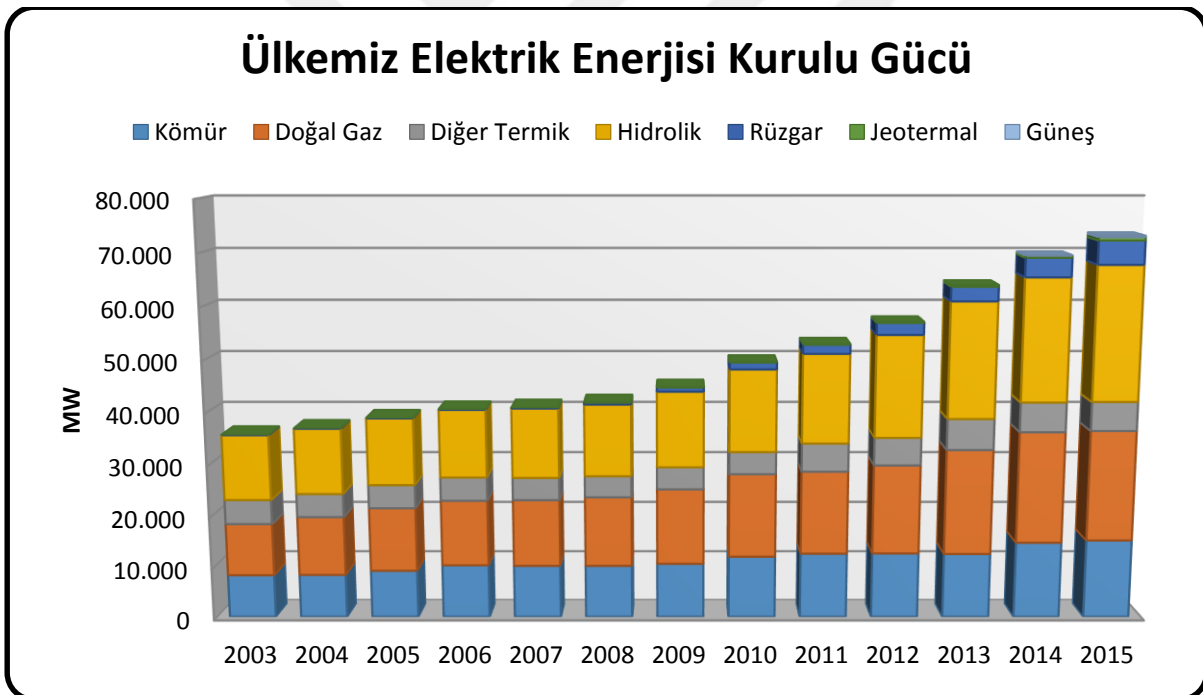
2.1.2. Türkiye’de rüzgâr enerjisi

Rüzgâr enerjisi sistemlerinin kullanılması ve geliştirilmesi geliştirmekte olan ülkeler için çok önemli bir enerji politikası olmuştur. Geliştirmekte olan ülkeler çevresel etkileri ve arz güvenliğini dikkate alarak enerji üretmek zorundadır. Alt yapısı ve iletimi düşünüldüğünde rüzgâr enerjisi diğer enerji türlerinden daha ekonomik bir yapıdadır [29]. Rüzgâr türbinlerinin devreye girip elektrik üretmesi kolaydır. Özellikle nükleer ve termik santrallere göre daha kısa sürede ve daha ekonomik bir şekilde elektrik üretmektedir. Fosil yakıtların çevreye olan zararlarının azaltılması için fosil yakıt kullanan santrallerin azaltılması gerekmektedir. Bu santrallerin azaltılması içinse mevcut sisteme rüzgâr enerji sistemlerinin entegre edilmesi daha kolaydır ve çevre için çok yararlıdır. Rüzgârdan elektrik elde edilmesi için gerekli rüzgâr potansiyellerinin incelenmesi ve belirlenmesi gerekmektedir. Rüzgâr potansiyelinin verimli olduğu yerlerin rüzgâr türbini kurmak için uygun olup olmadığı araştırılmalıdır. Çünkü rüzgâr potansiyeli uygun olsa bile türbinlerin kurulması için gerekli çevresel ve ekonomik şartlar uygun olmayabilir. Bunlar iyice araştırılmalı ve bunların yanında rüzgâr hızı, ayrıntılı rüzgâr potansiyeli sonuçları değerlendirilip incelenmelidir.

Türkiye’de rüzgâr ölçümleri, diğer meteorolojik(sıcaklık, radyasyon vb.) ölçümleri ile beraber Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) ve Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) tarafından yapılmaktadır. 1930’lardan beri rüzgâr hızı, yönü ve frekansı DMİ tarafından ülkenin her yerinde ölçülmüştür [29].Türkiye’de halen işletilmekte olan ilk rüzgâr enerji santrali 1998yılıının şubat ayında, İzmir ilinin Çeşme ilçesine bağlı Germiyan köyünde otoprodüktör statüsünde kurulmuştur. Her biri 500 kW olan üç türbini bulunan bu santral 1,5 MW’lık güce sahiptir. Bunu takiben yine Çeşme ilçesine bağlı Alaçatı köyünde yap işlet devret modeli ile 7,2 MW’lık 12 adet türbinden meydana gelen ikinci bir rüzgâr santrali devreye alınmıştır. 25 Haziran 2000 tarihinde Çanakkale Bozcaada’da 17 adet rüzgâr türbininden oluşan 10,2 MW gücünde olan üçüncü bir santral devreye girmiştir. Ülkemizde işletmede olan enerji tesislerinin kaynak kapasiteleri ve yıllara göre dağılımı Çizelge 2.3’te, grafik gösterimi ise Şekil 2.7’de görülmektedir.

Çizelge 2.3. 2015 yılında ülkemizin elektrik enerjisi kurulu gücü (MW)[30]

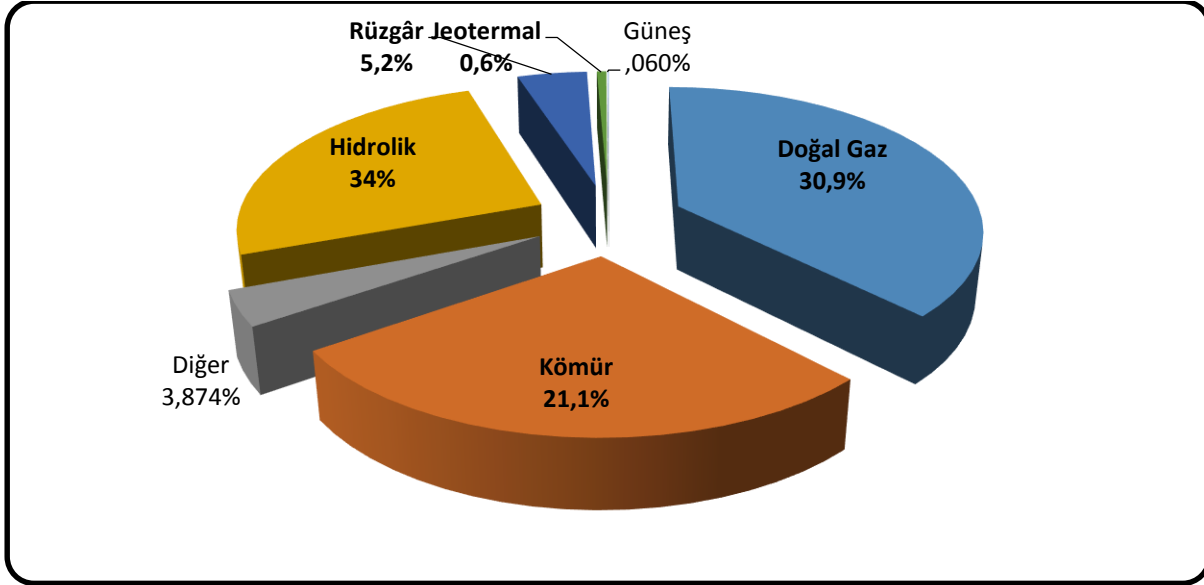
| Yıl | TERMİK | | | Hidrolik | Rüzgâr | Jeotermal | Güneş | Toplam | Artış (%) |
|------|--------|-----------|-------|----------|--------|-----------|-------|--------|----------------|
| | Kömür | Doğal Gaz | Diğer | | | | | | |
| 2003 | 8239 | 10053 | 4683 | 12579 | 18,9 | 15 | - | 35587 | 11,7 |
| 2004 | 8296 | 11349 | 4500 | 12645 | 18,9 | 15 | - | 36824 | 3,5 |
| 2005 | 9117 | 12275 | 4487 | 12906 | 20,1 | 15 | - | 38820 | 5,4 |
| 2006 | 10197 | 12641 | 4520 | 13063 | 59 | 23 | - | 40502 | 4,3 |
| 2007 | 10097 | 12853 | 4322 | 13395 | 146,3 | 23 | - | 40836 | 0,8 |
| 2008 | 10095 | 13428 | 4072 | 13829 | 365,65 | 29,8 | - | 41817 | 2,4 |
| 2009 | 10501 | 14555 | 4284 | 14553 | 791,6 | 77,2 | - | 44761 | 7,0 |
| 2010 | 11891 | 16112 | 4276 | 15831 | 1320 | 94,2 | - | 49524 | 10,6 |
| 2011 | 12491 | 16003 | 5438 | 17137 | 1729 | 114,2 | - | 52911 | 6,8 |
| 2012 | 12530 | 17162 | 5337 | 19620 | 2261 | 162,2 | - | 57072 | 7,9 |
| 2013 | 12428 | 20254 | 5965 | 22289 | 2760 | 311 | - | 64007 | 12,2 |
| 2014 | 14636 | 21474 | 5961 | 23641 | 3630 | 404,9 | 40,2 | 69516 | 8,6 |
| 2015 | 15088 | 21474 | 5692 | 23643 | 4503 | 623,9 | 248,8 | 73148 | 5,2 |
| ORAN | 20,6 % | 29,1% | 7,5 % | 35,4 % | 6,2 % | 0,9 % | 0,3% | 100 % | - |



Şekil 2.7. 2015 yılında ülkemizde kurulu elektrik enerjisi gücü [30]

Elektrik üreten kaynaklar ayrı ayrı incelendiğinde ülkemiz en çok enerjisi % 35,4 ile hidrolik kaynaklardan üretmektedir. Bunu % 29,1 ile doğalgaz ve % 20,6 ile kömür takip etmektedir. Doğalgaz ve kömür termik enerji türünde incelenir. Buradan hareketle enerjimizin yarısından fazlasının termik kaynaklardan elde edildiğini söylenebilir [30].

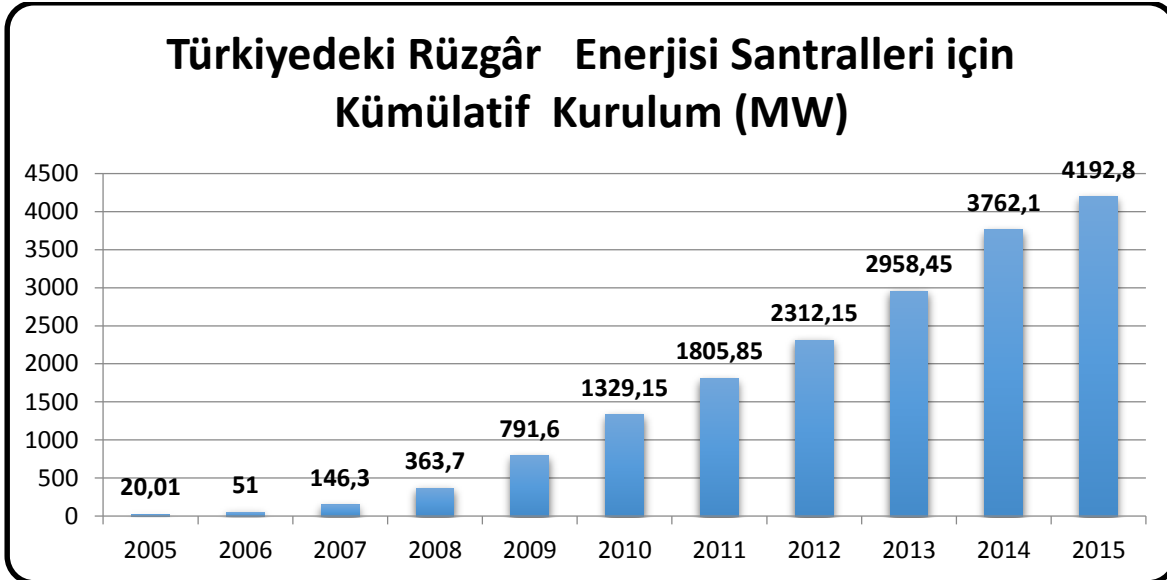
Yenilenebilir enerji kaynakları dikkate alındığında en çok pay rüzgâr enerjisine aittir. Şekil 2.8’de görülen, 2015 yılının sonunda ülkemizde üretilen elektriğin % 5,2’si rüzgâr enerjisinden elde edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının toplamı ülke enerjisinin hemen hemen % 6’sına denk gelmektedir. Ama yenilenebilir enerjiye verilen önem giderek artmaktadır. Verilerde de görüldüğü gibi rüzgâr enerjisinde çok büyük artışlar olmuştur. İlerleyen yıllarda gelişen teknoloji ve sanayiyle birlikte bu artışın çok daha fazla olacağı tahmin edilmektedir [30].



Şekil 2.8. 2015 Yılı Sonu İtibarıyla Türkiye’de Kaynak Bazında Kurulu Güç Oranı [30]

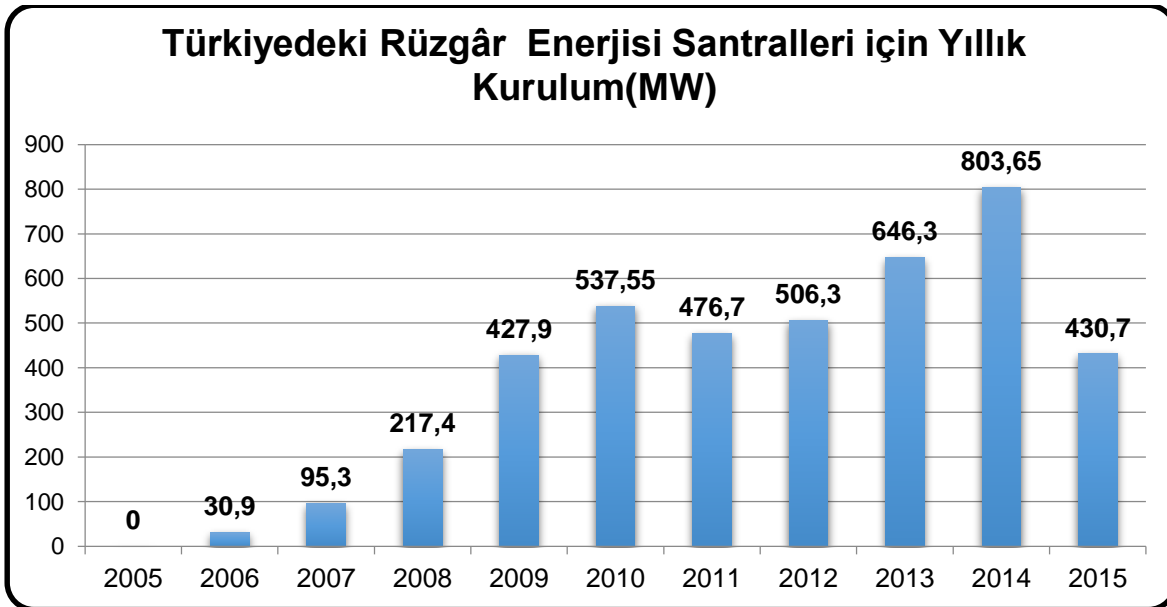
Ülkemizde rüzgâr enerjisine yönelim son 10 yılda yoğun bir şekilde artmaktadır. 2003 yılında 20,01 MW olan kurulu güç hızlı bir şekilde artarak 2009 yılında 791,6 MW’a ulaşmıştır. Bu artış sürekli devam etmiş ve 2015 yılının sonuna gelindiğinde 4192,8MW’a ulaşmıştır. 2015 yılındaki bu mevcut kurulu rüzgâr enerjisi gücü ülkemizde kurulu toplam enerjinin %6,2’sini oluşturmaktadır [31].

Doğu Karadeniz, Marmara, Ege ve Batı Akdeniz bölgeleri Türkiye’de rüzgâr enerjisi için en uygun yerler arasında gösterilebilir. Marmara bölgesinde bulunan Çanakkale ve Balıkesir illerindeki toplam kurulu güç, ülke genelindeki toplam kapasitenin % 25 ini oluşturmaktadır.

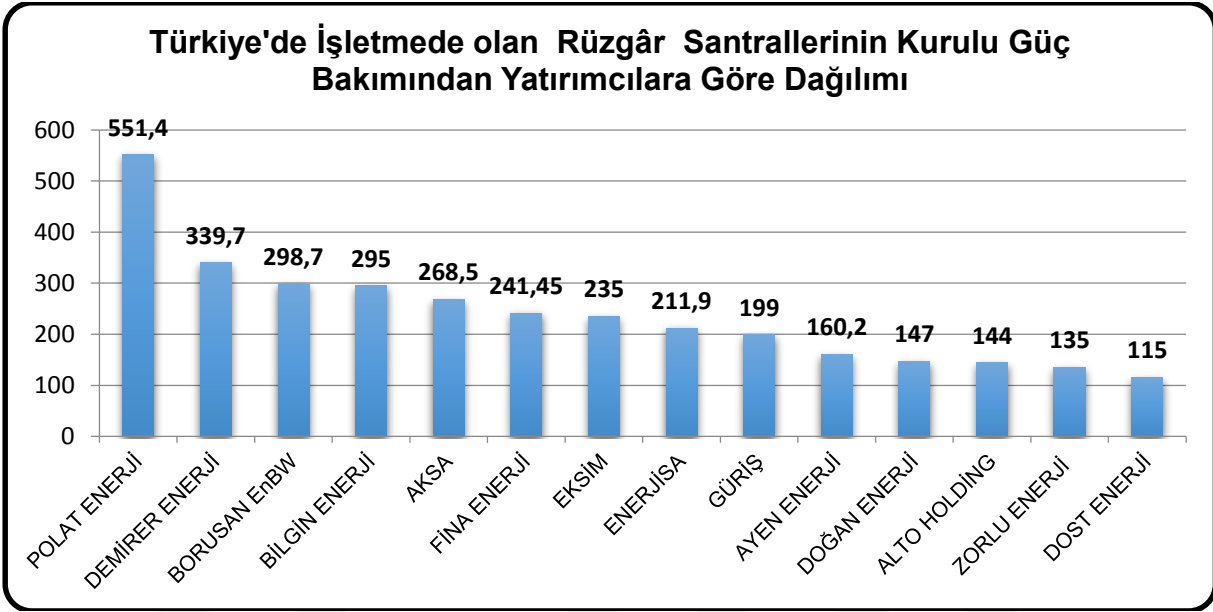


Şekil 2.9. Türkiye’deki rüzgâr enerjisi santralleri için kümülatif kurulum [31]

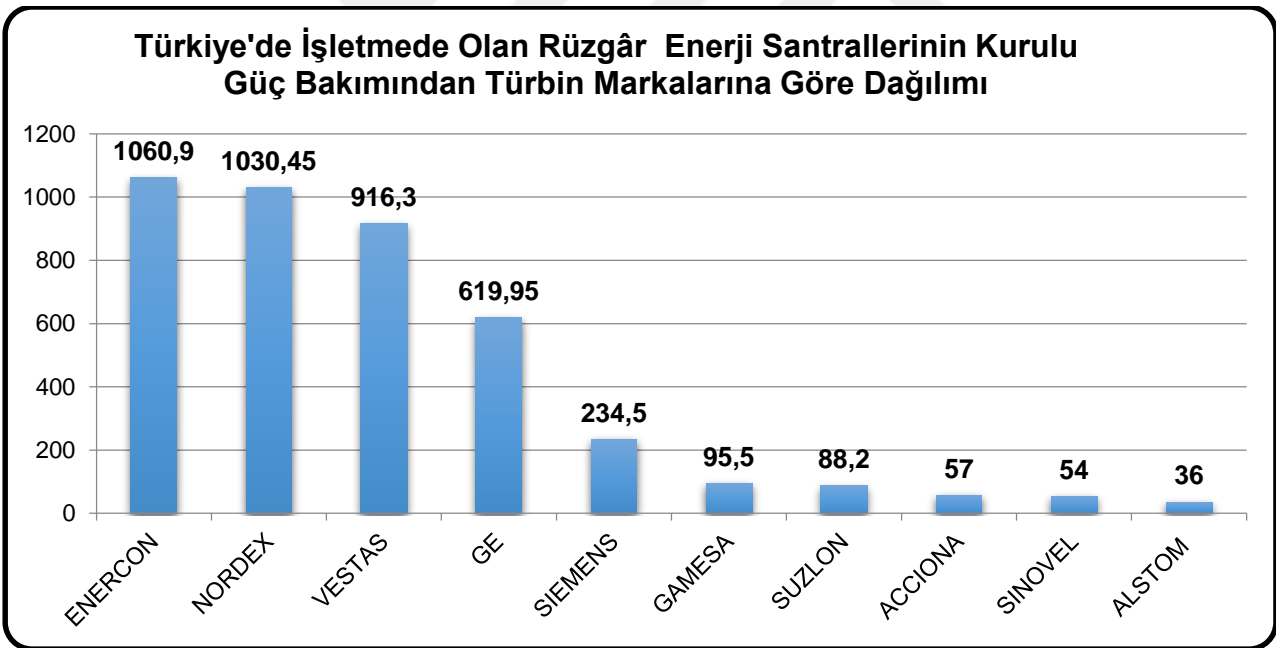
Şekil 2.9’da görüldüğü gibi ülkemizde rüzgâr enerjisi kümülatif kurulu gücü sürekli bir artış göstermiştir. Planlanan hedefler doğrultusunda bu kurulu güç ilerleyen yıllarda daha çok artacaktır. Hem ülke enerjisinin karşılanmasında rüzgâr enerjisinin payı da daha çok artacaktır. Şekil 2.10’da Türkiye’de 2015 yılının haziran ayına kadar olan verileri değerlendirildiğinde, rüzgâr a verilen önemin gitgide arttığının göstergesidir.



Şekil 2.10. 2015 yılında Türkiye’deki rüzgâr enerji santrallerinin kurulumunun yıllara göre dağılımı



Şekil 2.11. 2015 yılında Türkiye’de işletmedeki rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yatırımcılara göre dağılımı [31]



Şekil 2.12. 2015 yılında Türkiye’de işletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından türbin markalarına göre dağılımı [31]

Türkiye’de rüzgâr enerji santrallerine yatırım yapan firmaların toplam rüzgâr kurulu güçleri Şekil 2.11’de verilmiştir. Şekil 2.12, Türkiye’deki rüzgâr enerji santrallerinde kullanılan türbinlerin markalarını göstermektedir. Enercon, Nordex ve Vestas gibi türbin markaları Türkiye pazarında önemli yere sahiptir.

Türkiye rüzgâr haritası oluşturulurken, Danimarka Meteoroloji Teşkilatı'nca hazırlanan ve Avrupa rüzgâr haritasının oluşturulmasında da yararlanılan WASP (Wind atlas analysis and application program) paket programından yararlanılmıştır. Bu harita çalışmaları için, Türkiye'de benzer dağılım gösteren 96 adet meteoroloji istasyonu için yerinde araştırmalar yapılmış ve bu istasyonlardan 45 ölçüm noktasının verileri kullanılarak Türkiye rüzgâr haritası oluşturulmuştur.



| Beş farklı topoğrafik durum için yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgar potansiyeleri | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|---------|---------------|---------|---------|---------|------------|---------|------------------|-----------|
| | Kapalı Araziler | | Açık Araziler | | Kıyılar | | Açık Deniz | | Tepe ve Bayırlar | |
| | Ms | Ws | Ms | Ws | Ms | Ws | Ms | Ws | Ms | Ws |
| | > 6,0 | > 250 | > 7,5 | > 500 | > 8,5 | > 700 | > 9,0 | > 800 | > 11,5 | > 1800 |
| | 5,0-6,0 | 150-250 | 6,5-7,5 | 300-500 | 7,0-8,5 | 400-700 | 8,0-9,0 | 600-800 | 10,0-11,5 | 1200-1800 |
| | 4,5-5,0 | 100-150 | 5,5-6,5 | 200-300 | 6,0-7,0 | 250-400 | 7,0-8,0 | 400-600 | 8,5-10,0 | 700-1200 |
| | 3,5-4,5 | 50-100 | 4,5-5,5 | 100-200 | 5,0-6,0 | 150-250 | 5,5-7,0 | 200-400 | 7,5-8,5 | 400-700 |
| | < 3,5 | < 50 | < 4,5 | < 100 | < 5,0 | < 150 | < 5,5 | < 200 | < 7,0 | < 400 |

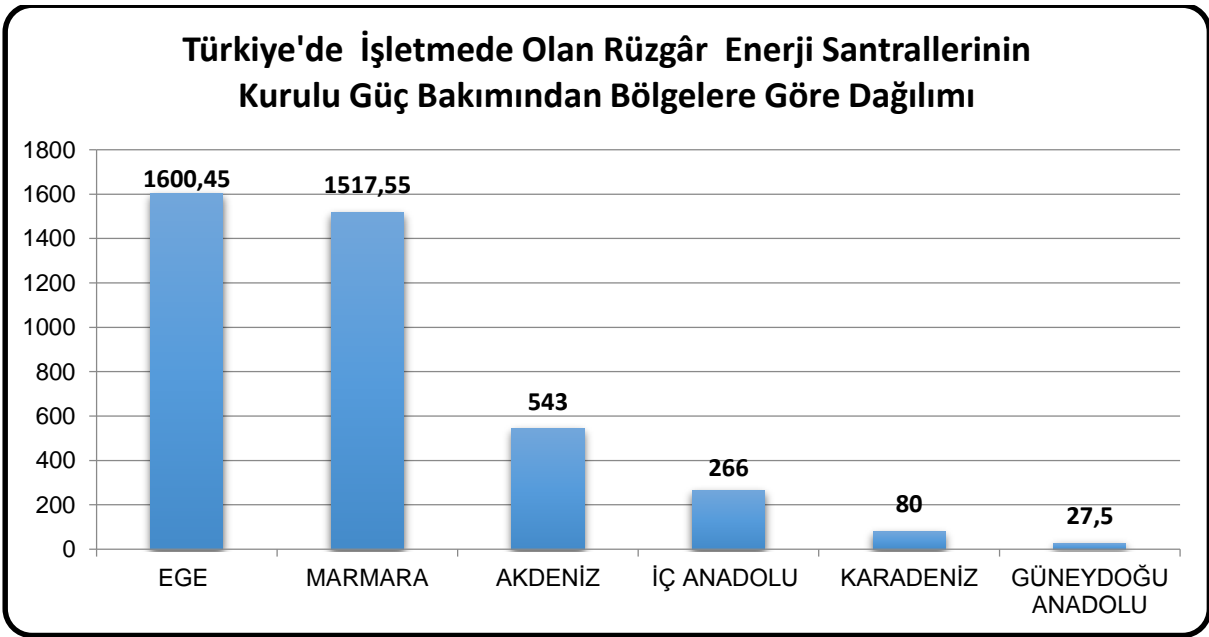
Şekil 2.13. Türkiye rüzgâr atlası [32]

Seçilen rüzgâr istasyonları için hesaplanan ortalama rüzgâr hızları (m/s) ile ortalama enerji yoğunlukları (W/m^2) kullanılarak 50 m yükseklik için rüzgâr haritası oluşturulmuştur. Hazırlanan haritaya göre, Ege ve Batı Karadeniz kıyıları ile Marmara Bölgesi ve Doğu Akdeniz kıyı bölgelerinde rüzgâr enerjisi potansiyelleri en üst düzeydedir (Bkz. Şekil 2.13). Buradan hareketle bu bölgelerimizde daha fazla rüzgâr enerjisi projeleri yapıldığı sonucuna varılabilir.

Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliğinin (EWEA) oluşturduğu sınıflandırmaya göre, rüzgâr enerjisinden faydalanılacak yükseklikteki ortalama rüzgâr hızları, sırasıyla;

- 6,5 m/s için iyiye yakın,
- 7,5 için m/s iyi
- 8,5 m/s için çok iyi olarak belirtilmiştir.

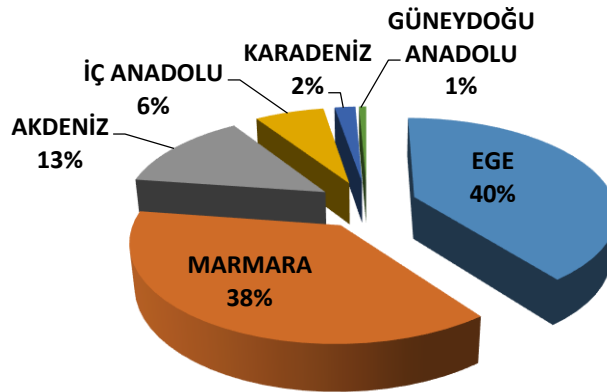
Türbin eksen yüksekliklerinin çoğunlukla 50 m ila 70 m arasında olduğu göz önüne alındığında, Ege ve Marmara Bölgeleri ile Batı Karadeniz ve Hatay bölgelerinde rüzgâr enerjisinden faydalanılacağı görülmüştür [29].



Şekil 2.14. 2015 yılında işletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre dağılımı [31]

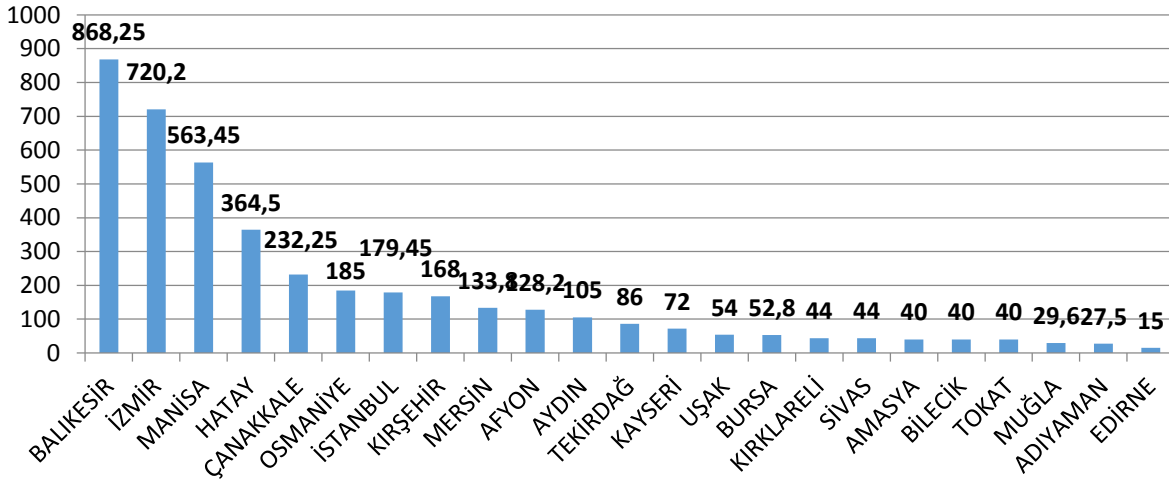
Şekil 2.14'e göre Ege ve Marmara bölgeleri rüzgâr enerji santrallerine sahip olma konusunda başı çekmektedir. Bu da Türkiye geneli değerlendirildiğinde en fazla rüzgâr potansiyeline sahip bölgelerin Marmara ve Ege bölgeleri olduğunu kanıtlar niteliktedir. Türkiye'de işletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre dağılımı, Şekil 2.15'te grafik olarak gösterilmektedir.

Türkiye'de İşletmede Olan Rüzgâr Enerji Santrallerinin Kurulu Güç Bakımından Bölgelere Göre Yüzdesele Dağılımı

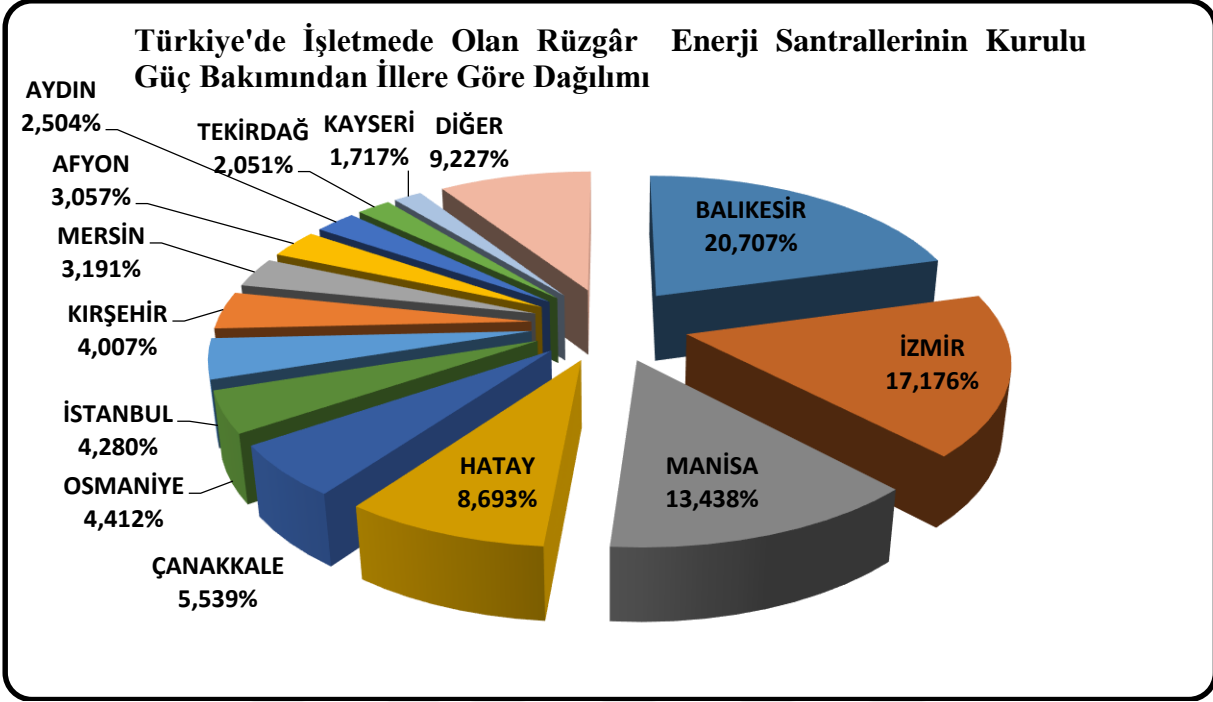


Şekil 2.15. 2015 yılında Türkiye’de işletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre yüzdesele dağılımı [31]

Türkiye'de İşletmede Olan Rüzgâr Enerji Santrallerinin Kurulu Güç Bakımından İllere Göre Dağılımı



Şekil 2.16. Türkiye’de 2015 yılında işletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından illere göre dağılımı [31]



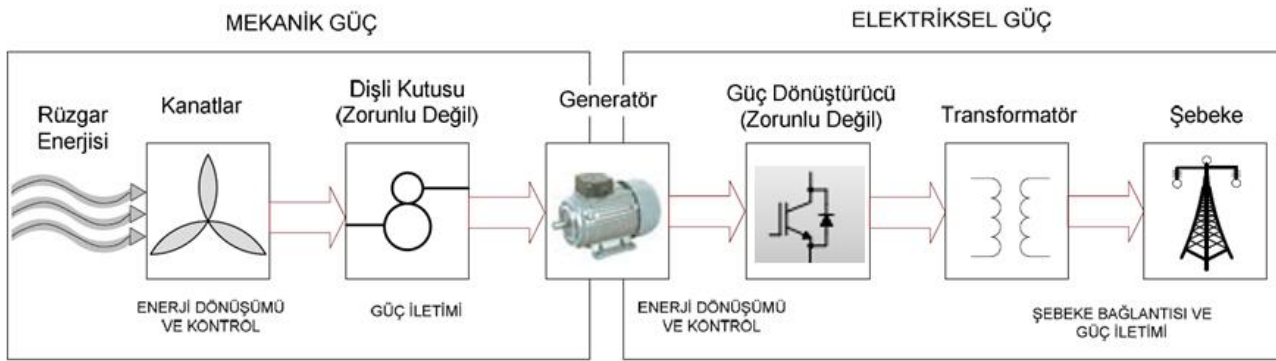
Şekil 2.17. 2015 yılında işletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından illere göre yüzdesel dağılımı [31]

Şekil 2.16 ve 2.17'de ise şehir bazında kurulu rüzgâr güçleri ile ilgili istatistiki veriler verilmiştir. İstatistiki verilere göre Balıkesir ili 818 kW kurulu gücü ile Türkiye'deki en fazla rüzgâr enerji santraline sahip olan ilimizdir.

3. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN İNCELENMESİ

3.1. Rüzgâr Türbinlerinin Aerodinamiği

Rüzgâr türbinleri, rüzgârdan elde edilen kinetik enerjiyi mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemler olarak tanımlanabilir. Rüzgâr türbininin bileşenleri; kanatlar, kule, generatör, hız dönüştürücüleri (dişli kutusu), elektrik-elektronik güç dönüştürücüleri, anemometre ve rüzgâr kuyruğundan meydana gelmektedir. Rüzgârın kinetik enerjisi ilk olarak rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Pervane milinin dönme hareketi artırılarak gövdedeki jeneratöre iletilir. Generatörde dönüştürülen elektrik enerjisi akü sistemiyle depolanarak veya doğrudan alıcılara iletilir [21].



Şekil 3.1. Rüzgâr enerjisi dönüşüm aşamaları

3.1.1. Rüzgâr enerjisi ve gücü

Rüzgâr türbinlerinde elektrik enerjisinin üretimi, rüzgâr türbininin rotoru ile rüzgâr arasındaki etkileşime dayanır. İlk aerodinamik analizler Betz [33] ve Glauert [34] tarafından 1920’li yıllarda ortaya konmuştur. Rüzgârdan elde edilen enerji şu şekilde ifade edilir:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3.1)$$

Eş. 3.1’de ρ hava yoğunluğunu, A kanatların dairesel alanını ve “ v ” de rüzgâr hızını ifade etmektedir. Betz yasasına göre, ideal bir türbinden elde edilebilecek maksimum güç rüzgâr gücünün %59,26’sı kadardır. Bu sınıra, Betz limiti denir. Günümüzde genellikle kullanılan türbinlerde kullanılabilir güç, rüzgâr gücünün %40 ila %50’si civarında olmaktadır.

Rüzgârdan güç üretiminde bilinmesi gereken en önemli yasa olan Betz yasasında tanımlanan Betz limitinin hesaplanma aşamaları Eş. 3.2 - 3.6 arasında gösterilmiştir.

$$P_{giren} = \frac{1}{2} \dot{m} V_{giren}^2 = \frac{1}{2} \rho A V_{giren}^3 \quad (3.2)$$

$$\dot{m}_{ort} = \rho A V_{ort} \quad (3.3)$$

$$V_{ort} = \frac{V_{giren} + V_{çikan}}{2} \quad (3.4)$$

$$P_{çikan} = \frac{1}{2} \dot{m}_{ort} (V_{giren}^2 - V_{çikan}^2) \quad (3.5)$$

Eş.3.5., Eş.3.3 ve Eş. 3.4 numaralı ifadelerdeyerine koyulursa Eş. 3.6 elde edilir.

$$P_{çikan} = \frac{1}{2} \rho A V_{ort} (V_{giren}^2 - V_{çikan}^2) = \frac{1}{2} \rho A \frac{(V_{giren} + V_{çikan})}{2} (V_{giren}^2 - V_{çikan}^2) \quad (3.6)$$

$$P_{çikan} = \frac{1}{4} \rho A (V_{giren} + V_{çikan}) (V_{giren}^2 - V_{çikan}^2) \quad (3.7)$$

$$P_{çikan} = \frac{1}{4} \rho A (V_{giren}^3 - V_{giren} V_{çikan}^2 + V_{çikan} V_{giren}^2 - V_{çikan}^3) \quad (3.8)$$

$$P_{çikan} = \frac{1}{4} \rho A V_{giren}^3 \left(1 - \frac{V_{çikan}^2}{V_{giren}^2} + \frac{V_{çikan}}{V_{giren}} - \frac{V_{çikan}^3}{V_{giren}^3}\right) \quad (3.9)$$

Buraya kadar olan eşitliklerde elde edilen ifadeler, Eş. 3.6 ‘dan itibaren yerine yazılırsa Eş. 3.9 elde edilir. Daha kolay çözüm yapabilmek için $x = \frac{V_{çikan}}{V_{giren}}$ olarak tanımlanırsa;

$$P_{çikan} = \frac{1}{4} \rho A V_{giren}^3 (1 + x - x^2 - x^3) = \frac{P_{giren}}{2} (1 + x - x^2 - x^3) \quad (3.10)$$

olur. Eş. 3.11’de verilen $(1 + x - x^2 - x^3)$ ifadesi bir eğriyi tanımlamaktadır. Bir eğrinin en yüksek ve en düşük değerli noktalarını bulmak için eğri denkleminin türevi alınıp 0’a eşitlenir (Bkz. Eş. 3.11, Eş. 3.12, Eş.3.13).

$$\frac{d(P_{\text{çıkan}})}{dx} = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{P_{\text{giren}}}{2} (1 + x - x^2 - x^3) \right) = 0 \quad (3.12)$$

$$1 - 2x - 3x^2 = 0 \quad (3.13)$$

3.13 numaralı denklemin kökleri bulunur. Denklemin küçük kökü en az gücü, büyük kökü ise en fazla gücü bulmak için kullanılır. Bu denklemin kökleri 1/3 ve -1’dir. Maksimum güç için $x=1/3$ değeri alınır;

$$P_{\text{çıkan,maksimum}} = \frac{P_{\text{çıkan}}}{2} \left(1 + \frac{1}{3} - \left(\frac{1}{3}\right)^2 - \left(\frac{1}{3}\right)^3 \right) \quad (3.14)$$

$$P_{\text{çıkan,maksimum}} = \frac{P_{\text{çıkan}}}{2} \left(\frac{16}{27} \right) \quad (3.15)$$

$$P_{\text{çıkan,maksimum}} = 0.593 P_{\text{çıkan}} \quad (3.16)$$

Böylece, ideal bir türbinden elde edilebilecek maksimum güç rüzgâr gücünün Betz yasasına göre %59.3 olabileceği kavramı Eş. 3.16 ile ispatlanmış olur.

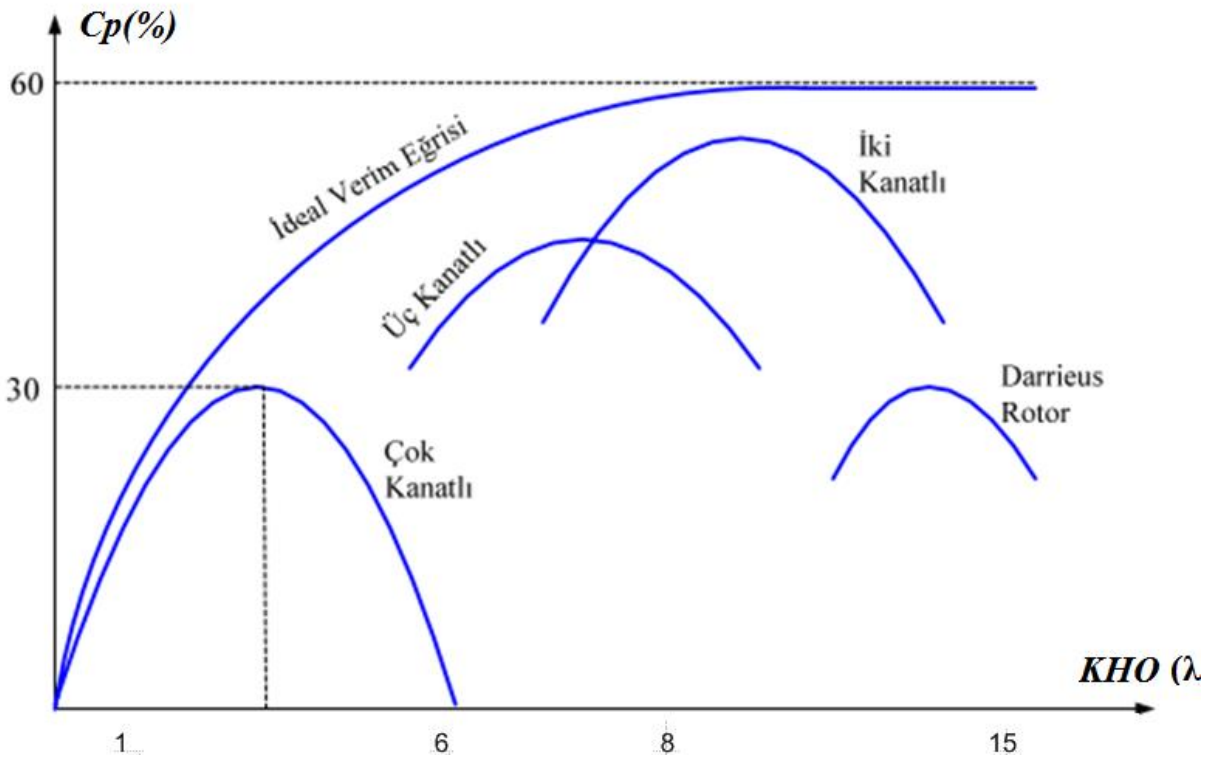
3.1.2. Kanat ucu hız oranı (KHO) hesabı

Kanat ucu hız oranı rüzgâr türbinlerinde önemli bir parametredir. Eğer elde edilen gücün sürekli olarak maksimum seviyede olması isteniyorsa, rotor dönüş hızının herhangi bir şekilde anlık rüzgâr hızlarına göre değiştirilerek kanat ucu çevresel hız oranının maksimum C_P değerini verebilecek bir optimumda

tutulması gerekmektedir. Geliştirilmiş rüzgâr türbinlerinde bu düzenleme otomatik olarak gerçekleştirilmektedir.

$$\lambda = \frac{\omega_m \cdot R_{rotor}}{V_{rüzgâr}} \quad (3.17)$$

Burada λ , Kanat ucu hız oranını, R_{rotor} : Rotor yarıçapını [m], ω_m generatörün mekanik açısal hızını (rad/s) ve $V_{rüzgâr}$ rüzgâr hızını (m/s) ifade etmektedir. Güç katsayısı C_p ise kanattaki mekanik gücü etkileyen bir parametre olduğundan dolayı önemlidir.



Şekil 3.2. Güç katsayısı C_p 'nin λ (KHO) ile değişimi

Şekilde farklı rüzgâr türbinleri için kanat uç hız oranı olan λ 'nin ($\lambda = \frac{\omega_m \cdot R_{rotor}}{V_{rüzgâr}}$) C_p 'ye göre değişimi verilmiştir. İdeal verim eğrisinde C_p 'nin maksimum değeri % 59'a kadar çıkarken iki ve üç kanatlı türbinlerin ideal verimli türbin çalışmasına en yakın olduğu yorumu yapılabilir.

3.1.3. Durdurma (stall) ve kanat açısı (pitch) kontrolü

Kanat açısı kontrolü, büyük güçlü türbinlerde kullanılır. 3 ile 15 m/s arasındaki rüzgâr hızlarında olan normal çalışma şartlarında kanat açısı maksimum güç üretebilmek için sabit bir değere ayarlanır. Rüzgâr hızı anma hızının üstüne çıktığında, kanatlar rüzgâr yönüne doğru döndürülerek üretilen güç azaltılır. Kanatlar dikey eksenlerinde rotor kulesine yerleştirilen hidrolik ya da elektromekanik dişli sistemiyle döndürülür ve her bir kanat birbirinden bağımsız olarak kontrol edilir. Sonuç olarak üretilen güç, türbinin anma gücünü geçmeyecek şekilde sınırlandırılır.

Rüzgâr hızının 25 m/s'den yüksek olduğu durumlarda kanatlar tamamen rüzgâr yönünde ayarlanır ve güç üretimi durdurulur. Bu yöntem, türbin korumasında etkilidir ve sert rüzgârlarda meydana gelecek hasarları önlemek için kullanılır. Kanatlar alan kontrolüyle tamamen yönlendirildiğinde rotor mekanik frenle kilitlenir ve türbin park moduna alınmış olur. Bu sistemin dezavantajı ekstra karmaşıklık ve maliyet gerektirmesidir. Bunun yanı sıra, yavaş ilerleyen açı kontrolü güçlü rüzgâr da üretilen güçte salınımlara neden olur.

Bir diğer aerodinamik kontrol yöntemi ise aktif durdurma mekanizmasıdır. Bu yöntem de temel olarak kanat açısının yönlendirilmesiyle kullanılır. Kanatların açısı, durdurmayı sağlamak üzere rüzgâr ı karşıdan alacak şekilde konumlandırılır. Aktif durdurma kontrolü, pasif durdurma mekanizmasının geliştirilmiş versiyonudur ve düşük rüzgâr hızlarında da enerji dönüşüm verimini koruyabilir. Bununla birlikte, açı kontrollü türbinler daha karmaşık sistemlerdir. Aktif durdurma yöntemi, genellikle orta ve yüksek güçlü türbinlerde kullanılır.

3.2. Rüzgâr Türbininin İç Yapısı

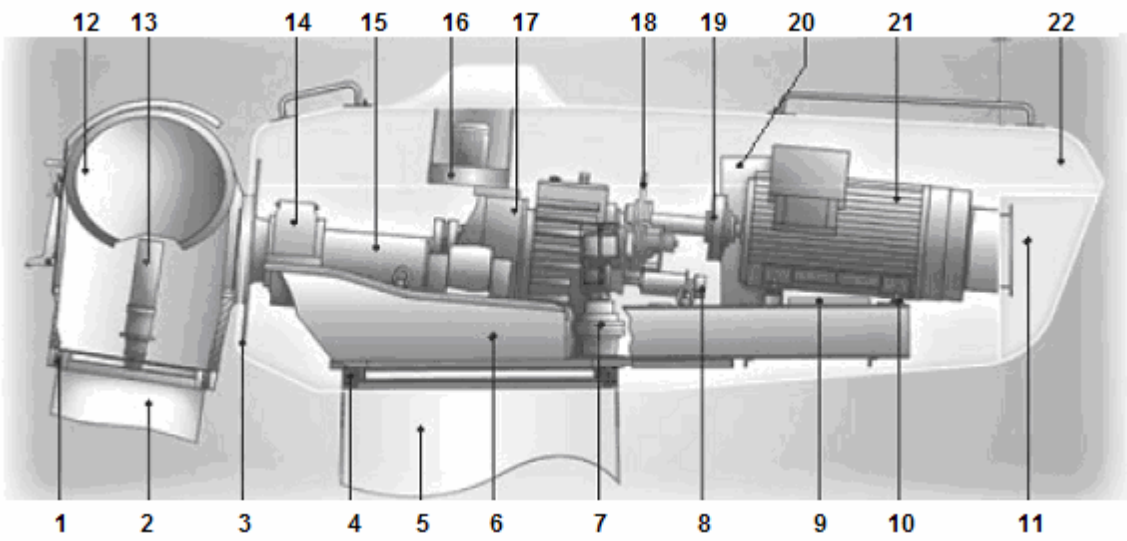
Rüzgâr türbini, rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin (REDS) en önemli parçasıdır. Rüzgâr türbinine ait kesit görünümü Resim 3.1'de verilmiştir. Kanatların rüzgârı almasıyla elde edilen mekanik enerji, generatörün miline dişli kutusu yardımıyla veya generatörün çok kutuplu olması durumunda doğrudan da uygulanabilmektedir. Generatör, miline uygulanan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Generatörde üretilen elektrik enerjisi, şebekeye doğrudan aktarılabilirdiği gibi bir güç elektroniği dönüştürücüsü yardımıyla da aktarılabilir. Günümüzde rüzgâr türbin sistemlerinin çoğunda güç elektroniği dönüştürücüleri kullanılmaktadır. Rüzgâr türbinindeki parçaların büyük bir kısmı kulenin üstünde yer alan motor bölümünde nacelle (makine yeri) bulunur.



Resim 3.1. Rüzgâr türbini kesit görünümü

3.3. Rüzgâr Türbinlerinin Bileşenleri

Bu bölümde bir rüzgâr türbininde bulunan parçalar detaylı olarak anlatılmıştır. Bir rüzgâr türbini, kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için gereken çeşitli parçalar içerir. Tipik bir rüzgâr türbinini iç yapısı Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Türbinin içyapısı [23]

| | |
|-------------------|----------------------------------|
| 1- Kanat Yatağı | 12- Rotor Göbeği |
| 2- Kanat | 13- Kanat Açısı (pitch) Sürücüsü |
| 3- Rotor Kiliti | 14- Yatak Engelleyicisi |
| 4- Sapma Yatağı | 15- Rotor Şaftı |
| 5- Kule | 16- Yağ Soğutucu |
| 6- Ana Gövde | 17- Dişli Sistemi |
| 7- Sapma Sürücüsü | 18- Fren |
| 8- Transmitter | 19- Kuplaj Sistemi |
| 9- Akü | 20- Kontrol Paneli |
| 10- Ses Yalıtım | 21- Generatör |
| 11- Havalandırma | 22- Dış Yüzey |

3.3.1. Kanatlar

Kanatlar, rüzgâr eserken türbin kanatlarında oluşturduğu kaldırma kuvveti prensibiyle çalışırlar. Dönen kanat sistemleri rüzgâr enerjisini rotora aktarırlar. Modern rüzgâr türbinlerinde bu kanat boyutları 35 metreden büyük olabilir. Rüzgâr türbinlerinin kanat yapısı; alüminyumdan, titandan, çelikten, takviye elyaf ile güçlendirilmiş plastik ve ağaç gibi çeşitli malzemelerden olabilir. Modern rüzgâr türbinlerinin kanatları genellikle cam elyafı ile takviye edilmiş polyester veya cam elyafı plastikten imal edilir. Çelikten imal edilen kanatların eğilmeye mukavemeti iyi olmasına rağmen korozyon problemi meydana gelmektedir. Alüminyum kanatlar, çeliğe göre daha hafiftir, yorulma dayanımları daha iyidir ve korozyona karşı daha mukavimdir. Alüminyum malzemenin dezavantajı; malzemenin çabuk burkulması, imalat biçiminin zor ve pahalı olmasıdır.

3.3.2. Rotor

Kanatlar ve kanatları birleştiren merkez, rotor olarak adlandırılır. Geçmişte farklı sayıda kanatlı sistemler denenmişse de günümüzde 2 kanatlı veya 3 kanatlı sistemler kullanılmaktadır. Üç kanatlı rotor sürekli (istikrarlı) enerji sağlar ve gürültüsüz çalışır, ancak maliyeti yüksektir. Sistemin merkezi rotor şaftına bağlıdır. Rotor çapı büyüdükçe üretilen elektrik kapasitesi de artmaktadır. Rotor çapı türbinin aldığı rüzgâr alanıdır. Rotorlar önceden genellikle metalden imal edilirken, yeni nesil rotorlar kompozit malzemelerden imal edilmektedir. Rotorlar çoğunlukla kulenin hemen önünde yer alır ve türbin önünde rüzgâr gelişine göre ayarlanabilmesi için elektrikli yönlendiriciler bulunur.

3.3.3. Kanat açısı sürücüsü

Rüzgâr hızının enerji üretmek için çok düşük veya çok yüksek olduğu zamanlarda veya rüzgâr hızı değiştiğinde, rotorun dönmesini engellemek için, rotor kanatlarının rüzgâra karşı gelen açıları değiştirilerek rüzgârın oluşturduğu kaldırma kuvvetinin değiştirilmesiyle bir hız kontrolü yapılmış olur.

3.3.4. Sapma sürücüsü

Sapma sürücüsü, rüzgârın yönü değiştikçe rotoru döndürerek, sistemin rüzgâra karşı durmasını sağlar. Sapma motoru tarafından hareket ettirilir. Dönüş yönü ve miktarı, rüzgâr kanatçığından alınan bilgiler ile kontrol sistemi tarafından hesaplanır.

3.3.5. Rotor shaftı

Bu shaft rotoru dişli sisteme veya doğrudan tahrikli sistemlerde generatöre bağlar.

3.3.6. Fren

Acil durumlarda veya ihtiyaç olduğunda rotoru durdurmaya yarar.

3.3.7. Dişli kutusu

Dönüş hızı yüksek generatörler için geçerlidir. Pahalı ve ağır bir sistemdir. Dişli kutusunda, bir düşük hız mili ve yüksek hız mili bulunur. Yüksek hız mili, düşük hız milinden 50 kat hızlı döner.

3.3.8. Kontrol paneli

Rüzgâr türbinini sürekli izleyen, kanatların alacağı açıyı kontrol eden bir arıza anında türbini durduran sistemdir.

3.3.9. Generatör

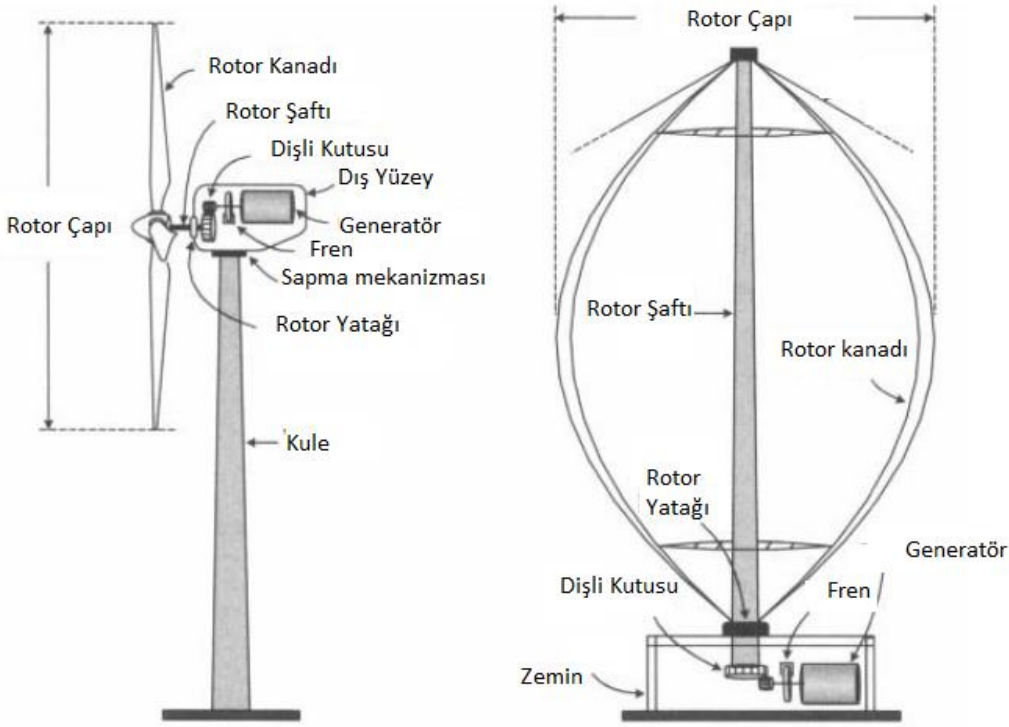
Rüzgâr enerjisi santrallerinde kullanılan generatörler, alternatif akım veya doğru akım üretebilirler. Rüzgâr enerjisi santrallerinde elde edilen elektrik akımı, yetersiz kalitede alternatif akım veya doğru akım olsa bile, farklı elektronik cihazlarıyla şebekeye uygun hala getirilebilmektedir. Doğru akım generatörleri, büyük kapasiteli rüzgâr enerjisi santrallerinde tercih edilmemektedir. Bunun sebebi, sık sık bakım ihtiyacı ve alternatif akım generatörlerine göre daha maliyetli olmasıdır. Doğru akım generatörleri, günümüzde sadece düşük kapasiteli rüzgâr enerji tesislerinde akülere enerji depolamak için kullanılmaktadır. Dişli kutusundaki kayıplar ve gürültünün engellenmesi için, çok kutuplu generatörü bulunan dişli kutusu olmayan türbinler de kullanılmaktadır. Bu nedenle, çok kutuplu generatörlerde dişli kutusuna ihtiyaç duyulmamaktadır. Şebekeye bağlantısı olan alternatif akım generatörlerinde, yalnız şebeke frekansını sağlayan devir sayısında elektrik enerjisi üretebilmektedir. Bunun anlamı, rüzgâr türbininde örneğin 8 m/s olan ideal hızda yararlanma demektir. Rüzgâr türbinlerinin bir kısmında, bu sebeplerden dolayı düşük ve yüksek rüzgâr hızları için iki ayrı generatör kullanılmaktadır [35].

3.4. Rüzgâr Türbini Teknolojileri

Rüzgâr türbinleri geçmişten günümüze kadar çeşitli aşamalar geçiren rüzgâr teknolojilerinde kullanılan türbinler farklı tiplerdedir. Bugüne kadar değişik özellikte ve tipte geliştirilen bu rüzgâr türbinlerinden bazıları günümüzde ticari hale dönüşmüştür. Rüzgâr türbinleri dönme eksenine göre üç grupta incelenebilir.

3.4.1. Dönme eksenlerine göre türbinler

- a) Yatay eksenli rüzgâr türbinleri
- b) Düşey eksenli rüzgâr türbinleri



Şekil 3.3. Yatay ve düşey eksenli rüzgâr türbinleri

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT)

Bu türbinlerde; türbinin dönme eksenini rüzgâr yönüne paralel ve kanatlar rüzgâr yönüne dik yerleştirilmiştir. YERT’te rotor kanatlarının sayısı azaldıkça rotor hızı artar. Bu tip türbinlerin verimi % 45 seviyelerindedir. YERT genel olarak yer hizasından 20 ila 30 m yükseklikte ve çevredeki engebelerden 10 m yükseklikte olacak biçimde yerleştirilmiş olmalıdır. Daha önce bahsi geçen λ (KHO) değerine göre YERT şöyle sınıflandırılabilir:

$\lambda = 1$ ila 5 arasında ise Çok kanatlı rotor,

$\lambda = 6$ ila 8 arasında ise Üç kanatlı rotor,

$\lambda = 9$ ila 15 arasında ise İki kanatlı rotor,

$\lambda > 15$ ’den ise Tek kanatlı rotor kullanılır.

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri, farklı sayıda rotor kanadı olan ve rüzgârı ön taraftan veya rüzgârı arka taraftan alan sistemler olarak da farklılık gösterirler. Günümüzde en çok kullanılan rüzgâr türbinleri, yatay eksenli türbinlerdir.

Düsey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT)

Dönme eksenleri rüzgâr yönüne dik ve düşey olan bu türbinlerin kanatları da düşey konumlandırılmıştır. Bu tip türbinler rüzgârı sürüklenme veya kaldırma özelliğine sahiptir bundan dolayı ilk harekete geçişleri güvenli değildir. Bu türbinlerin verimi YERT'den daha düşük ve %35 civarındadır. Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin düzeneği toprak seviyesinde kurulabildiğinden kuleye gerek duyulmaz. Bundan dolayı düşük rüzgâr hızlarında çalışmak zorunda kalırlar ve bir kontrol sistemi olan “Yaw” mekanizmasına ihtiyaç duymazlar. Bu türbinlerin en büyük avantajı, dönüş yönü yatay olduğundan rüzgâr dan tek bir noktadan değil, her noktadan yararlanabilmeleridir.

Savonious rüzgâr türbinleri

Savonious rüzgâr türbinleri, Finlandiyalı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından 1925 yılında icat edilmiştir. İki yatay disk arasına yerleştirilmiş ve merkezleri birbirine göre simetrik olarak kaydırılmış, “kanat” adı verilen iki yarım silindirden meydana gelmiştir. Belirli bir hızla gelen rüzgârın etkisiyle, çarkı oluşturan silindirin iç kısmında pozitif ve dış kısmında negatif bir moment olmaktadır. Pozitif moment, negatif momentten daha büyük olduğundan, dönme hareketi pozitif moment yönünde olmaktadır.

Darrieus rüzgâr türbinleri

Fransız mühendis George J.M. Darrieus tarafından 1931 yılında yapılmıştır. 1970 ila 1980 yılları arasında Amerika ve Kanada da Darrieus türbinlerinin kanat tasarımları üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Kanatları geometrik biçimli aerodinamik yapıya sahip olduğundan yüksek performanslıdır. Kanatlardaki hafif eğim sayesinde kanatlardaki çekme gerilmeleri en az düzeye inmektedir. Yüksek hızlarda da çalışabilir ve türbin; 2 veya 3 kanatlı olabilir. İlk hareket için Savonius rüzgâr türbini veya bir tahrik motoruna ihtiyaç duyulmaktadır.

H-Darrieus rüzgâr türbinleri

Darrieus rüzgâr türbinleri düşey eksenli rüzgâr türbinlerinden en önemli birisidir. Darrieus rüzgâr türbinleri karmaşık tipte bir türbindir. Darrieus rüzgâr türbinlerinin aerodinamik profili düzdür. Kanatlara açı kontrolü uygulanır [36].



Şekil 3.4. Savonius, Darrieus ve H-Darrieus tipi türbinler

3.4.2. Kanat sayısına göre türbinler

Tek kanatlı rüzgâr türbinleri

Tek kanatlı rüzgâr türbinleri kanat sayısına göre dönme hızının yüksek olması ve bu sayede makine kütlesini ve rotorun döndürme momentini azaltma amacıyla tasarlanmıştır. Ayrıca rotor kanadı, kanat üzerindeki yapısal yükleri azaltacak mekanizma ve kanat mekanizma hareketinin pürüzsüz olabilmesi için sabitleştirilip, iki karşı ağırlıkla dengelenmelidir. Bu türbinlerin rotorlarında, ilave yüklerden ortaya çıkan aerodinamik balanssız olması ve mekanizma hareketinin kontrol altında tutulması için bileşenleri taşıyan sistem yapımı önemlidir. En önemli ticari dezavantajı, 120m/s. civarındaki kanat uç hızının sebep olduğu rotorun aerodinamik gürültü seviyesidir. Bir kanatlı rüzgâr türbinlerinin kanat uç hızı, üç kanatlı türbinler ile karşılaştırıldığında, daha fazla olduğundan gürültü seviyesi artmaktadır.

Çift kanatlı rüzgâr türbinleri

Üç kanatlı türbinlerin rotor maliyetinin azaltılmak istenmesi iki kanatlı türbin fikrini doğurmuştur. Bu ticari türbinlerden istenen verim sağlanamamış, sayılı türbin prototip durumundan, seri üretime geçebilmiştir.

İki kanatlı rotorun balansı, bir kanatlı rotora göre daha düzgündür. Fakat iki kanatlı rotorun meydana getirdiği dinamik hareketleri önlemek için gerekli olan ilave teknik güç, maliyeti de artırmaktadır. Göbek kısmının titreşimi azaltmak için rotora kadran sistemi ilave edilmiştir. Bu kadran, rotor şaftına

dikey ve iki rotor kanadına dik yerleştirilir. Günümüzde iki kanatlı rotor, verilen sebeplerden ötürü tercih edilmemektedir. Şekil 3.5'te tek kanatlı ve çift kanatlı türbinlerin görselleri verilmiştir.

Üç kanatlı rüzgâr türbinleri

Üç kanatlı modern türbinler, tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Üç kanat kullanımının avantajı, eşit aralıklarla yerleştirilen kanatların dengeli olmasıdır. Bu türbinde, türbin üzerinde depolanan yüklerden dolayı salınım yapan atalet momentini olmadığından, göbek içinde titreşim önleyici mekanizmaya ihtiyaç yoktur. Kanat uç hızı 70m/s. altında olduğundan gürültü seviyesi oldukça düşüktür. Küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde, üç kanatlı rotor kullanılması güç problemlerini beraberinde getirir. Bu problemin çözümü için düşük devirde dönen rotorun devir sayısını $1/n$ oranında arttıran dişliler kullanılır ve kesme hızı olarak adlandırılan hız değerine ulaşmaya kadar, jeneratör boşa çalıştırılır.

Çok kanatlı rüzgâr türbinleri

Çok kanatlı rüzgâr türbinleri, rüzgâr türbinlerinin gelişmemiş ilk örnekleridir. Geçmişte su pompalanmasında kullanılan bu türbinler, moment gereksiniminin karşılanabilmesi amacıyla, çok kanatlı olarak üretilmiştir. Bu türbinler düşük hızda çalışırlar. Türbin kanat genişliği, pervane göbeğinden uçlara gidildikçe artış gösterir. Pervane mili, dişli kutusuna bağlanarak, jeneratör mili devir sayısı artırılır. Türbinin pervane düzleminin rüzgâr hız vektörünü her zaman dik olarak alabilmesi için türbinlerde rüzgâr yön sensörü bulunmaktadır [37]. Şekil 3.6'da üç kanatlı ve çok kanatlı türbinlerin görselleri verilmiştir.



Şekil 3.5. Tek kanatlı ve iki kanatlı rüzgâr türbini



Şekil 3.6. Üç kanatlı ve çok kanatlı rüzgâr türbini

3.4.3. Rüzgâr alış yönüne göre türbinler

Rüzgârı önden alan türbinler

Geçmişten günümüze kullanılan bu makinelerde rotor cephesi rüzgâra dönüktür. Öne çıkan özellikleri arasında kulenin arkasında oluşan rüzgâr gölgeleme etkisinin az görülmesidir. Kuleni şekli değişmeksizin kanadın her dönüşünde türbinin ürettiği güç biraz azalır. Bundan dolayı kanatların sert yapılması ve kuleden biraz uzakta konumlandırılması gerekir. Ayrıca, önden rüzgârlı makineler, rotoru

rüzgâra karşı döndürmek için “Yaw” (eğim) mekanizmasına gerek duyarlar. Eğim mekanizması, yelkovanı kullanarak rüzgâr yönünü algılayan elektronik kontrol ünitesi tarafından çalıştırılır. Rüzgâr, yön değiştirdiğinde normalde türbin bir defada sadece birkaç derece eğilir.

Rüzgârı arkadan alan türbinler

Bu türbinlerin rotorları kulenin arkasına yerleştirilir. Bu türbinler rüzgâra dönmek için eğim mekanizmasına gerek duymazlar. Eğer nacelle ve rotor uygun tasarlanırsa, nacelle rüzgârı pasif olarak takip eder. Bu türbinlerin kanatları esnek özelliğe sahiptir. Bu özellik, hem ağırlık hem de makinenin güç dinamiği açısından önemli bir üstünlüktür. Bu türbinler önden rüzgâr alan makinelere göre daha hafif yapılı ve böylece kule yükü azalır. Ancak, kanat kuleden geçerken meydana gelen güç dalgalanması, türbinde daha çok zarara sebep olur.

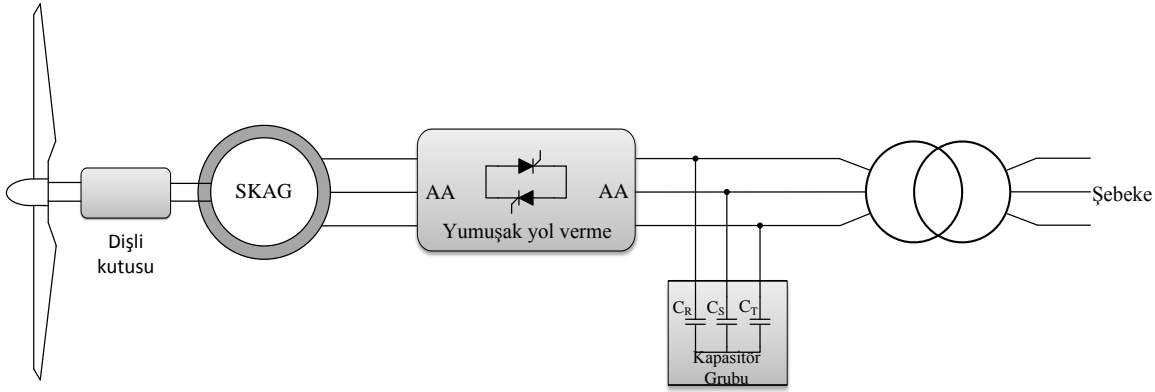
3.4.4. Rüzgâr türbinlerinin dönüştürücü türlerine göre sınıflandırılması

Rüzgâr türbinleri, enerji dönüşüm yöntemleri açısından incelendiklerinde 4 grupta toplanabilir:

- Sabit hızlı rüzgâr türbinleri
- Değişken hızlı rüzgâr türbinleri
- Kısmi ölçekli güç dönüştürücülü rüzgâr türbinleri
- Tam ölçekli güç dönüştürücülü rüzgâr türbinleri

Sabit hızlı rüzgâr türbinleri

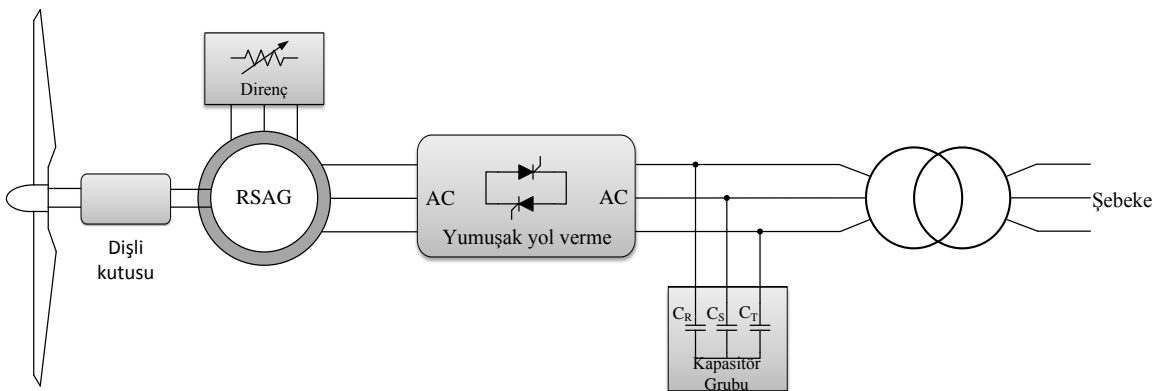
Sabit hızlı rüzgâr türbinleri, türbinin rotor hızında çok küçük bir değişiklik yaratırlar ve genellikle şebekeye doğrudan bağlanırlar. Bu tip türbinlere örnek olarak SKAG'ler verilebilir. Asenkron generatörün ihtiyaç duyduğu reaktif gücü karşılamak için harici olarak reaktif kaynağa ihtiyaç duyulur. Bu rüzgâr türbinlerinin sınırlı hız aralığı ve dolayısıyla generatöre zarar verebilecek oranda geçici ve ani tork değişimleri vardır. Kanatlar ve rotor yatağı, generatöre dişli kutusu yardımıyla bağlanır. Şekil 3.7'de örneklendirilen bu rüzgâr türbininde, stator şebekeye yükseltici bir transformatör ile bağlanır. Sistemin reaktif güç ihtiyacı ise şönt kapasitör grubu tarafından reaktif güç sağlar. Bu tür rüzgâr türbinlerine 1,5 MW gücündeki NEG Micon NM64 türbini örnek verilebilir.



Şekil 3.7.Sabit hızlı rüzgâr türbinleri- 1,5 MW gücündeki NEG Micon NM64/1500 türbin

Değişken hızlı rüzgâr türbinleri

Sabit hızlı sistemlere alternatif olan değişken hızlı sistemlerde, rotor hızı kontrol edilmeye uygundur. Bu özellik, rüzgâr türbin sisteminin sürekli olarak optimum hız oranına yakın çalışmasına imkan sağlamaktadır. Değişken hızlı rüzgâr türbinleri, geniş bir aralıktaki rotor hızlarında çalışmak üzere tasarlanmıştır. Güç regülasyonu için kanat kontrolü tercih edilir. Hız ve güç kontrolü sayesinde sabit hızlı türbinlere göre daha fazla enerji elde üretilir. RSAG tipindeki generatörün sargı yapısı sayesinde makinenin hem stator hem de rotoruna ulaşılabilir. Makinenin rotor devresi, bir AA/DA dönüştürücü ve sabit dirence bağlıdır. Dönüştürücü sayesinde yaklaşık %10 a kadar bir hız artışı sağlanabilir. Harici rotor devresinde ısı kaynaklı bir güç kaybı yaşanabilir. Güç çıkışını kontrol eden bir kontrolcü kullanılırsa güç kaybı önlenir. Şekil 3.8’de değişken hızlı rüzgâr türbinlerine ait Vestas 1,65 MW gücündeki RSAG bağlantı şeması verilmiştir.

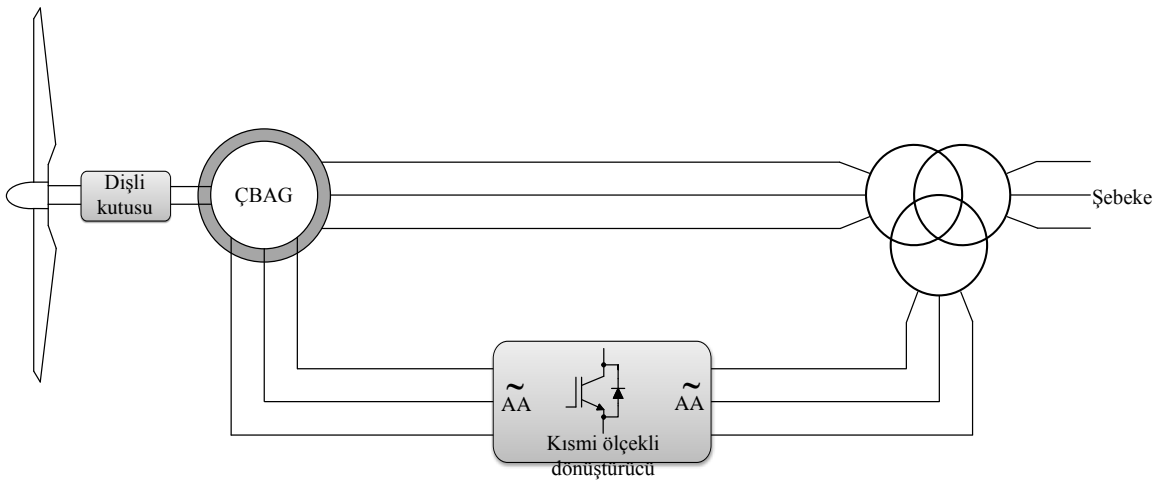


Şekil 3.8. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde RSAG 1,65 MW gücündeki Vestas V66’nın bağlantı şeması

Değişken hızlı türbinlerde, hızın değişimi elektrik ve mekanik kısımlarda tork değişimine neden olur. Rotor sargılarına ulaşmak için bilezik ve fırçalar kullanılır. Harici rotor direnci kullanılarak da istenilen çıkış gücü elde edilebilir. Rotor direncinin kontrolü, 3 fazlı kontrolsüz doğrultucu ve Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) kullanılarak gerçekleştirilir. 3-fazlı kontrolsüz tam köprü doğrultucu, rotor uçlarındaki AA gerilimi DA'ya çevirir. AA/DA dönüşümünün uygulanma sebebi; her fazı ayrı ayrı kontrol etmek yerine DA beslemeli tek bir IGBT ile eşzamanlı kontrol sağlamaktır. IGBT'nin etkin çalışma süresini belirleyen görev periyodunun oranı sıfır ile maksimum arasında ayarlanarak rotor direncinin maksimum değerden sıfıra doğru azaltılması sağlanır.

Kısmi ölçekli güç dönüştürücü rüzgâr türbinleri

ÇBAG'de stator sargıları şebekeye 50 Hz frekans seviyesinden bağlıdır. Hızın $\pm\%30$ civarında çalışırlar ve güç dönüştürücü sistem, toplam sistem gücünün $\%30$ u kadarını oluşturur. Art arda bağlanan AA/DA/AA dönüştürücü, darbe genişlik modülasyonu (DGM) kontrollü iki adet güç kaynaklı evirici ile DA bara bağlantısından oluşur. ÇBAG'ler rotor devresindeki ısı kaybını bir AA/DA/AA dönüştürücü kullanarak rotor devresindeki kaymadan dolayı harcanan gücü azaltır. Güç regülasyonu için kanat kontrolü kullanılır. Dönüştürücü sadece rotor devresinin gücünü taşıdığı için tüm çıkış gücüne göre ayarlanmasına gerek yoktur. Şekil 3.9'da ÇBAG'li türbinlere örnek olarak General Electric'in 1,5 MW'lık bir türbininin bağlantı şekli verilmiştir.

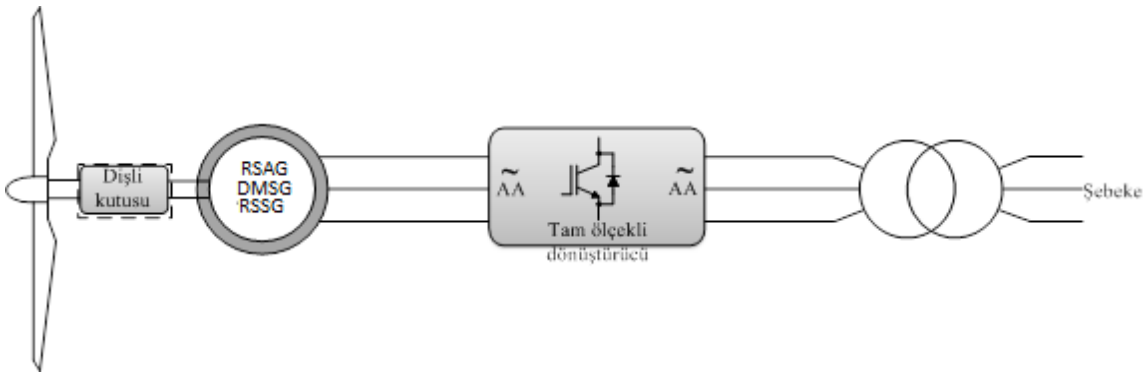


Şekil 3.9. ÇBAG'li rüzgâr türbinleri -General Electric 1,5 MW bağlantı şeması

ÇBAG'ler, hem stator hem de rotor sargılarını alternatif akımla besleyen rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine çevirmek için en yaygın kullanılan makinelerden biridir. ÇBAG'ler rotoru sargılı olan ve rotor devresi harici olarak kontrol edilebilen asenkron makinelerdir. Diğer makinalara göre üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir: Rotora gelen rüzgâr hızı değişse bile çıkış geriliminin genlik ve frekans değerlerini sabit bir değerde sürdürebilirler. Bu nedenle, bu türbinler AA sisteme doğrudan bağlanabilir ve senkronize olabilirler. Diğer güç elektroniği elemanları makul bir ayar dayken güç faktörünün kontrolü yapılabilir. Ayrıca bu makina harici bozucu etkilere karşı dayanıklılık ve kararlılık göstermektedir. Dezavantaj olarak ise yüksek maliyet ve bünyesinde periyodik bakıma ihtiyaç duyan bilezik tertibatının bulunmasıdır.

Tam ölçekli güç dönüştürücülü rüzgâr türbinleri

Tam ölçekli güç dönüştürücü kavramı, rüzgâr türbini ile şebeke arasındaki bağlantıyı sağlayan ve stator çıkışı ile hat transformatörünün primeri arasında yer alan dönüştürücü sistem için kullanılır. Bu dönüştürücüler, generatör ve şebeke arasında seri bağlandığı için dönüştürdüğü güç oranının generatör çıkışındaki maksimum güce eşit ya da daha büyük olması gereklidir. Bu nedenle, tam ölçekli ya da 1:1 güç dönüştürücüsü olarak adlandırılır. Her iki sistem arasında generatör tarafında makine kısmı dönüştürücüsü (MKD), şebeke tarafında da şebeke kısmı dönüştürücüsü (ŞKD) yer alır. MKD, ihtiyaç duyulan gerçek ve reaktif gücü bağımsız ve kesintisiz olarak üretir. Bu tip türbinlerde generatör doğrudan sürme tekniği ile çalıştırılır. Böylece dişli kutusuna ihtiyaç duyulmaz. Fakat doğrudan sürme tekniğinde türbin rotorunun dönel hızını yakalayabilmesi için generatör düşük hızda çalışmalıdır. Bu tip generatörler çoğunlukla geniş çaplı ve çok kutupludur. Düşük maliyetli dönüştürücü sistemlerde MKD, bir kontrolsüz tam köprü doğrultucu ve yükseltici DA/DA dönüştürücü kullanılırken gelişmiş sistemlerde her iki dönüştürücü de çift yönlü enerji akışına imkan tanıyacak şekilde IGBT'lerle oluşturulur.



Şekil 3.10. Tam dönüştürücülü rüzgâr türbinleri- Enercon E-82 2 MW

Şekil 3.10’da tam dönüştürücülü rüzgâr türbinlerine örnek olarak Enercon’un 2 MW’lık türbini verilmiştir. Tam dönüştürücülü türbinlerde art arda AA-DA-AA dönüştürücü, rüzgâr türbini ile şebeke arasındaki tek geçiş noktasıdır. Bu yüzden dönüştürücü gücü, tüm çıkış gücünü karşılamalıdır. Bu türbinler genelde dişli kutusu içermeyen, yüksek kutup sayılı, sabit mıknatıslı senkron generatörlerdir. Gerçek ve aktif güç kontrolü sağlarken güç regülasyonunu kanat kontrolüyle gerçekleştirirler. Pahalı olmalarına rağmen, kullanım ve kurulum kolaylığı için tercih edilirler [13].

3.5. Rüzgâr Türbinlerinin Teknik Olarak Karşılaştırılması

Bu bölümde rüzgâr türbinlerinin farklı özelliklerine göre karşılaştırılması incelenmiştir. Bu karşılaştırma unsurları arasında büyüklüğüne, rüzgâr 1 alış yönüne ve kanat çeşitlerine göre türbinlerin incelenmesi söz konusu olabilir. En genel sınıflandırmaya göre türbinler büyük ölçekli (50 kW ve üstü) ve küçük ölçekli (50 W ile 50 kW arasında) olarak değerlendirilebilir (Bkz Çizelge 3.1). Küçük ölçekli türbinler ev aydınlatması ve temel seviyedeki elektrik ihtiyaçları için kullanılırken büyük ölçekli türbinler şebekeye güç sağlamak için kullanılır.

Rüzgâr 1 alış yönü de türbinlerde kullanılan malzemenin yapısını ve döndürme mekanizması gibi bazı harici bileşenlerin sisteme dahil olup olmamasını etkilemektedir. Bu gibi durumlarda daha az sistem bileşeni tercih edilmesinde fayda vardır (Bkz Çizelge 3.2).

Türbinler kanat çeşitlerine göre yatay ve düşey eksenli olmak üzere Bölüm 3.4.2 de sınıflandırılmıştı. Bu türbinler maliyet, estetik, kullanım amacı gibi ihtiyaçlarına göre karşılaştırılmıştır. Günümüzde en çok kullanılan türbin çeşidi üç kanatlı türbinler olmakla beraber Savonius ve Darrius gibi düşey eksenli türbinlerin kullanımıyla da karşılaşılmaktadır (Bkz. Çizelge 3.3).

Çizelge 3.1. Büyüklüklerine göre türbinlerin karşılaştırılması

| | Kullanım Alanı | Tek Türbin Gücü | Üretilen Enerjinin Verildiği Yer | Akü İhtiyacı | Bakım Masrafı | Kurulum Masrafı |
|-------------------------|----------------|-----------------|---|--------------|---------------|-----------------|
| Büyük Rüzgâr Türbinleri | Endüstriyel | 50 kW-3MW | Şebeke | Yok | Var | Yüksek |
| Küçük Rüzgâr Türbinleri | Bireysel | 50W-50kW | Çiftlik Evleri, Telekomünikasyon Alıcısı, Seralar | Var | Yok | Düşük |

Çizelge 3.2. Rüzgâr alış yönüne göre türbinlerin karşılaştırılması

| | Yaw(Eğim) Mekanizma İhtiyacı | Kanat Yapısı | Malzeme | Kuleye Binen Yük | Rüzgârın Türbine Verdiği Zarar |
|--------------------------------|------------------------------|--------------|---------|------------------|--------------------------------|
| Rüzgârı Önden Alan Türbinler | Var | Sert | | Ağır | Az |
| Rüzgârı Arkadan Alan Türbinler | Yok | Esnek | | Hafif | Çok |

Çizelge 3.3. Kanat çeşitlerine göre türbin karşılaştırılması

| | Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri | | | | Düsey Eksenli Rüzgâr Türbinleri | |
|-----------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| | Tek Kanatlı | 2 Kanatlı | 3 Kanatlı | Çok Kanatlı | Savonius | Darrius |
| Maliyet | Yüksek | Yüksek | Düşük | Düşük | Düşük | Düşük |
| Estetik Görünüm | Kötü | Kötü | İyi | İyi | İyi | İyi |
| Gürültü | Yüksek | Yüksek | Düşük | Az | Az | Az |
| Çalışma Hızı | Yüksek | Düşük | Yüksek | Düşük | Düşük | Düşük |
| Kule İhtiyacı | Var | Var | Var | Var | Yok | Yok |
| Kullanım Amacı | Elektrik | Elektrik | Elektrik | Elektrik üretme ve sulama | Elektrik üretme ve sulama | Elektrik üretme ve sulama |
| Günümüzde Kullanımı | Yok | Yok | Var | Var | Az | Az |
| Rotorun Dönmesi İçin Rüzgâr | Kaldırır | Kaldırır | Kaldırır | Kaldırır & Sürükler | Kaldırır & Sürükler | Kaldırır & Sürükler |

Çizelge 3.4. Harici özelliklere göre türbinlerin karşılaştırılması

| | Rüzgâr Türbin Sistemi | | | |
|-------------------------------|-----------------------|------|------|------|
| | SMSG | SKAG | RSAG | ÇBAG |
| Aktif Güç Denetimi | VAR | VAR | VAR | VAR |
| Reaktif Güç Denetimi | VAR | VAR | | VAR |
| Tam Ölçekli Güç Dönüştürücüsü | VAR | VAR | | |
| Ada Modunda Çalışma | VAR | VAR | | VAR |
| Reaktif Kompanzasyon | | | VAR | |
| İlave Güç Elektronikleri | | | VAR | |

Türbinleri sınıflandırırken aktif-reaktif güç kontrolü ve dönüştürücü yapılarını da göz önünde bulundurmak gereklidir(Bkz Çizelge 3.4). SMSG, SKAG ve ÇBAG’de aktif ve reaktif güç kontrolü bulunurken RSAG’de sadece aktif güç denetimi bulunmaktadır. SMSG ve SKAG tipi türbinler tam

ölçekli bir güç dönüştürücüsüne ihtiyaç duyarken RSAG ve DFIG tipi türbinler daha küçük çapta bir dönüştürücüye sahip olabilirler.

Ada modunda çalışma özelliği SMSG, SKAG ve ÇBAG'de bulunurken RSAG'de bulunmaz. RSAG'de sisteme eklenen kapasitörler ile reaktif güç kompanzasyonu yapılırken diğer generatörlerde buna ihtiyaç duyulmaz. RSAG'de harici güç elektroniği devresine ihtiyaç duyulabilir [38].

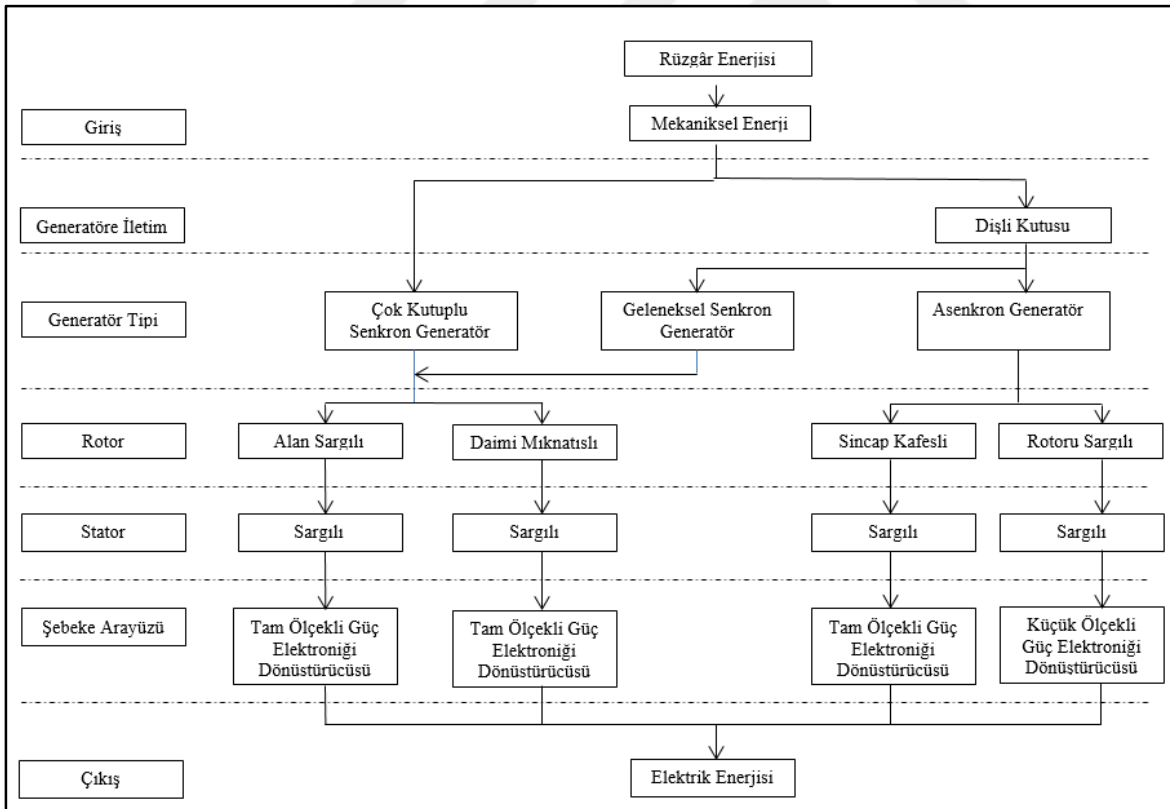
Yapılan bu sınıflandırmalar, türbinlerin karşılaştırılması açısından önemli bir yere sahip olup doğru türbin seçimi için başlangıçta gözden geçirilmesi gerekli olan unsurlardır.





4. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖRLER

Rüzgâr türbin teknolojilerinin gelişmesiyle beraber, farklı generatör modelleri rüzgâr gücünden elektrik enerjisi üretmek üzere kullanılmaya başlanmıştır. Büyük rüzgâr enerji sistemlerinde kullanılan en yaygın elektrik generatörleri şekil4.1’de özetlenmiştir. Rüzgâr enerjisinin mekanik enerjiye dönüşüm aşaması giriş olarak, dişli kutusuna aktarma işlemi de generatöre iletim kısmında verilmiştir. Generatör tipleri senkron ve asenkron makinalar olarak ayrılırken dişli kutusu barındıran sistemler asenkron ve geleneksel senkron generatörler olarak ayrılmıştır. Rotor yapılarına göre değerlendirildiğinde senkron generatörler alan sargılı ve sabit mıknatıslı olarak ayrılmaktadır. Stator yapıları sargılı ve şebeke ara yüzü olarak iki makine de tam ölçekli güç dönüştürücüsü kullanmaktadır. Asenkron generatörler sincap kafesli ve rotoru sargılı olarak ikiye ayrılır. SKAG ve RSAG stator yapıları olarak sargılıdır. SKAG tam ölçekli güç elektroniği dönüştürücüsü kullanırken RSAG daha küçük ölçekte bir güç elektroniği yapısı kullanır. Generatörlerin detaylı anlatımları bölüm 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan elektrik makinaları

4.1. Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Generatör Tipleri

Rüzgâr generatörleri çalışma özelliklerine ve yapılarına göre üç ana gruba ayrılmaktadır.

1. Doğru Akım Generatörleri
2. Senkron Generatörler(SG)
3. Asenkron Generatörleri (AG)

Eskiden daha yaygın olarak kullanılan doğru akım generatörleri, günümüzde ürettikleri gücün az olması sebebiyle yerlerini senkron ve asenkron generatörlere bırakmışlardır. Bahsi geçen generatör sistemleri, üretilen enerjinin güç dönüştürücü devreler kullanılarak şebekeye aktarılmasını uygun hale getirmektedir. Temel olarak senkron ve asenkron generatörlerdeki fark rotor yapısından kaynaklanmaktadır. Senkron generatörlerde rotor sargısı, bilezikler üzerinden döner bir alan yardımıyla doğrudan beslenirken, asenkron generatörlerde ise rotor akımları zamanla değişen stator akımları ve rotorun statora göre hareketi sayesinde rotor sargılarında indüklenir. Bu generatörlerin ve rüzgâr türbinlerinde kullanımlarının detayları alt bölümler halinde aşağıda açıklanmıştır.

4.1.1. Doğru akım generatörleri

Mekanik enerjiyi doğru akım şeklinde elektrik enerjisine dönüştüren generatörlerdir. Hız kontrolünün kolaylığından dolayı,1980’li yıllara kadar yaygın olarak kullanılmışlardır. Doğru akım generatörleri, genellikle küçük kapasiteli rüzgâr türbinlerinde ve şebeke ile bağlantısı olmayan sistemlerde kullanılmaktadır. Bu da genelde sabit mıknatıs veya fırçasız generatör sistemleriyle sağlanmakta olup, en fazla 100 kW gücüne kadar çıkabilmektedir [19]. Bir DC generatörde indüklenen gerilim,

$$E_0 = \frac{Z n \Phi}{60} \quad (4.1)$$

Burada,

E_0 : fırça uçlarındaki gerilim

Z : armatürdeki (DC generatörde dönen parça) toplam iletken sayısı

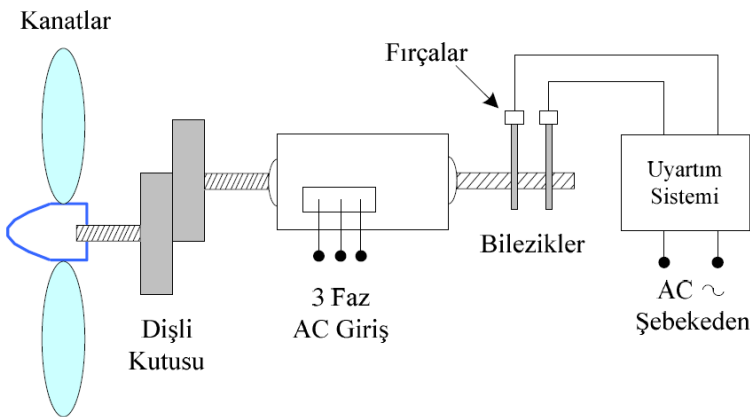
n : devir sayısı (dev/dk.)

Φ : kutup başına düşen manyetik alan akısı (WB)

Eş. 4.1'den anlaşılacağı üzere DC generatörde üretilen gerilim doğrudan kutup başına düşen manyetik alan akısı ve dönüş hızı ile doğru orantılıdır. Günümüzde yaygın bir kullanım alanına sahip olmaması ve teknolojik olarak geliştirme yapılmadığından dolayı detaylı olarak ele alınmayacaktır.

4.1.2. Senkron generatörler

Senkron generatörler, rotorda yer alan mıknatısların stator manyetik alanıyla senkronize olması sonucunda manyetik hızları eşit olan makinalardır. Rotorun oluşturduğu bu manyetik alan, sabit mıknatıslar veya sargılardan akan doğru akımla üretilir. Modern senkron generatörlerde rotor ihtiyaç duyduğu manyetik alanı kendisi üretebilmektedir. Böylece doğru akım ve fırça ihtiyacı reluktans motorunun kullanımı ile devre dışı bırakılabilir ve güvenilirlik artarken maliyet azalır. Bu tip makinalar, sabit hızlı rüzgâr türbinleri için daha uygundur fakat gelişen teknolojiyle birlikte doğrudan sürücülü senkron generatörlerin kullanımı da giderek artmıştır.



Şekil 4.2. Senkron generatör

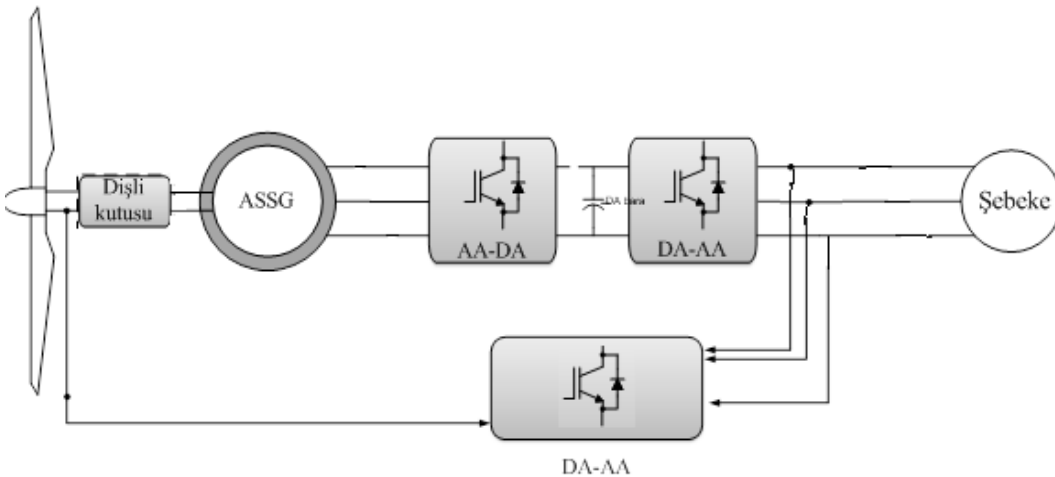
Senkron generatörlerin rüzgâr türbininde kullanılması açısından avantajlı tarafı ise reaktif güce ihtiyaç duymadığı için daha kaliteli bir güç elde edilmesini sağlamasıdır [19]. Senkron generatörler, kutup sayılarına bağlı olarak çok kutuplu veya geleneksel senkron generatörler olarak sınıflandırılmaktadır. Çok kutuplu senkron generatörler, genellikle mekanik enerjiyi doğrudan kanatlardan almaktadır. Geleneksel senkron generatörler ise mekanik enerjiyi bir dişli kutusu aracılığı ile almaktadır. Senkron generatörler, uyartım bakımından alan sargılı senkron generatörler ve sabit mıknatıslı senkron generatörler olarak sınıflandırılır [20].

Alan sargılı senkron generatör ile karşılaştırıldığında alan sargısının olmaması bir avantaj olarak görülmesine karşın üretilen aktif ve reaktif gücü kontrol etmek için tam ölçekli güç elektroniği dönüştürücüsünün kullanılması gerekir. Bu ise sistemin maliyetini arttıran en büyük dezavantajı olarak görülmektedir. Ayrıca SMSG’de kullanılan mıknatıs maliyetleri, generatör maliyetini arttıran bir diğer faktördür.

Alan sargılı senkron generatör

Alan sargılı senkron generatörlerde (ASSG); stator sargısı, darbe genişlik modülasyonu (DGM) tekniğine göre anahtarlama yapabilen, çift yönlü akım akışının olabildiği (art arda) gerilim kaynaklı iki eviriciden meydana gelmiş, dört bölgeci bir güç konvertörü üzerinden şebekeye bağlanır. Stator tarafındaki konvertör elektromanyetik torku, şebeke tarafındaki konvertör ise bu sistemin oluşturduğu aktif ve reaktif gücü regüle eder. ASSG ’nin sağladığı avantajlar şunlardır:

Elektromanyetik tork üretiminde stator akımının tamamı kullanıldığı için bu makinanın verimi genellikle yüksektir. Çıkık kutuplu alan sargılı senkron generatörün kullanılmasının en büyük faydası, makinanın güç faktörünün doğrudan kontrolüne müsaade edilmesidir. Bunun sonucu olarak, stator akımı birçok işletim durumunda minimize edilebilir. Bu generatörlerin kutup eğimi indüksiyon makinalarına göre daha küçük olabilir. Bu durum dişli kutusu elimine edilerek, düşük hızlı çok kutuplu makinalar elde edilmesinde önemli bir özellik olabilmektedir. Rotorda sargı devresinin bulunması sabit mıknatıslı senkron generatör (SMSG) ile kıyaslandığında bir dezavantajdır. Ayrıca üretilen aktif ve reaktif gücü regüle etmek için, nominal rüzgâr gücünün 1,2 katı büyüklüğünde konvertörler kullanılması gerekmektedir [21].

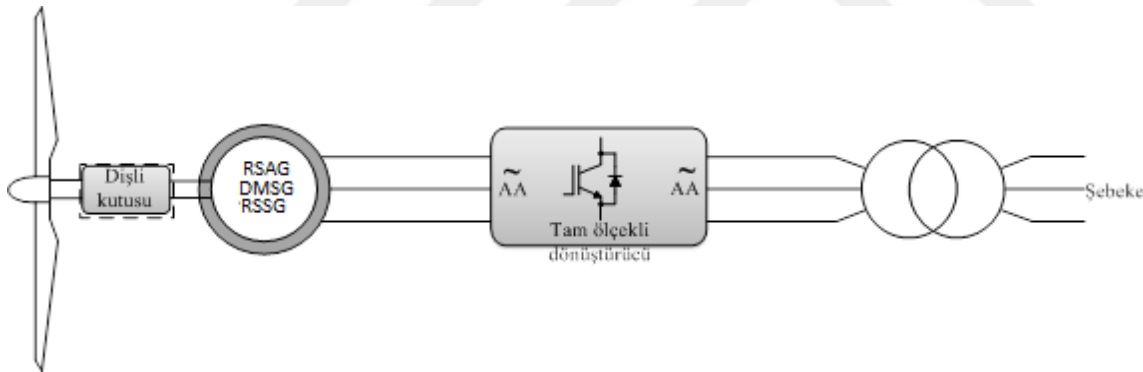


Şekil 4.3. Alan sargılı senkron generatör

Sabit mıknatıslı senkron generatör (SMSG)

Sabit mıknatıslı senkron generatör (SMSG) de rotorun manyetik akısı sabit mıknatıslar tarafından üretilmektedir. SMSG herhangi bir enerji kaynağına gerek duymadan kendinden uyarımlı olması nedeniyle rüzgâr türbini uygulamalarında önerilmektedir. En büyük artışı herhangi bir hızda güç üretebilmesidir. Bakım maliyeti düşüktür. Küçük ve hafif uygulamalar için uygundur. Generatör hızı herhangi dişli kutusuna gerek kalmadan kontrol edilebilir. SMSG'nin statoru sargılıdır ve rotoruna sürekli mıknatıslar yerleştirilmiştir. SMSG'nin çok yaygın kullanılan tipleri; radyal akılı, aksenel akılı ve çapraz akılı SMSG'lerdir [42].

Sabit mıknatıslı senkron generatörlerin bazı dezavantajları vardır. Harekete geçme anında senkronizasyonda ve gerilim regülasyonunda bazı sorunla çıkartabilir. Makinanın fiyatını arttıran sabit mıknatısların maliyeti yüksektir. Akımın genliğini arttıran diyotlu doğrultucular kullanılmaktadır. Mıknatıs malzemesinin manyetikliği bozulabilmektedir. Makinanın güç faktörünün kontrol edilmesi mümkün değildir. Rotor sıcaklıklarının soğutma sistemleri ile kontrolünün sağlanması gereklidir [21].



Şekil 4.4. Sabit mıknatıslı senkron generatör

Senkron generatörler doğrudan sürüş tahrik teknolojisine sahip rüzgâr türbinlerinde kullanılmaktadır. Bu yöntemde düşük devirde dönen rüzgâr türbini pervanesi doğrudan senkron generatörü tahrik etmektedir. Bu yöntemin en büyük avantajı herhangi bir dişli sistemine ihtiyaç duymamasıdır [43]. Dişli kutusu rüzgâr türbin sistemlerinde en çok arıza çıkaran parçalardan biridir. Belirgin bir dezavantajı ise generatörün ürettiği güç değerini şebekeye uygun şekilde aktarmaya yarayan güç elektroniği devreleri ile ilgilidir. Senkron generatörün statoru bir güç elektroniği devresi üzerinden şebekeye bağlıdır. Bu yüzden generatörün toplam gücü doğrudan güç elektroniği devreleri üzerinden

şebekeye aktarılmaktadır. Bu durum özellikle yüksek güçlerde güç elektroniği devreleri tasarımını zorlaştırmakta ve maliyeti arttırmaktadır [23].

4.1.3. Asenkron generatörler

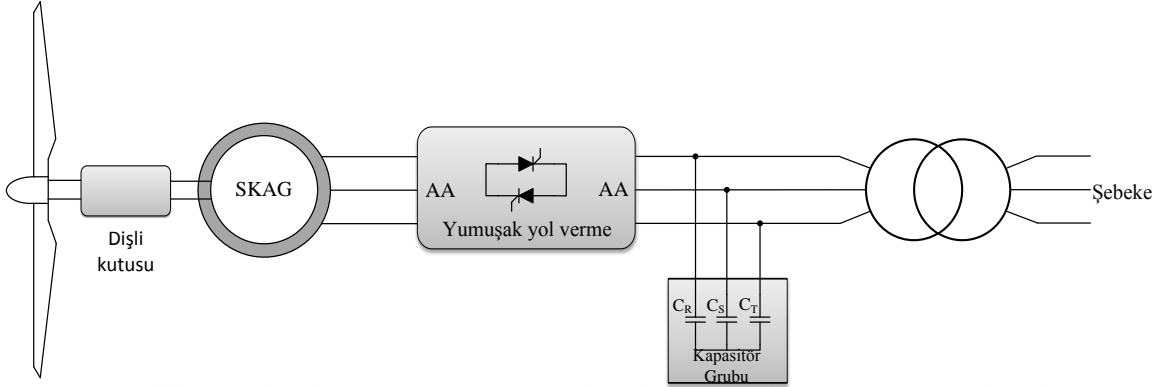
Dünyadaki rüzgâr türbinlerinin çoğunluğu alternatif akım üretebilmek için 3 fazlı asenkron generatörleri kullanırlar. Asenkron generatörler hem ucuz maliyetli hem de güvenilir olduğu için tercih edilirler. Asenkron generatörün temel avantajı, sağlam fırçasız yapısının harici bir doğru akım gücüne ihtiyaç duymamasıdır. Asenkron makinalarda sargılar statorda bulunur. Stator sargılarından geçen akım rotor etrafında döner bir manyetik alan oluşturur. Döner manyetik alanın hızı makinanın senkron hızını oluşturur.

Asenkron makinanın rotorunu rüzgâr türbinine bağlayıp senkron hızdan daha hızlı döndürüldüğü zaman indüklenen akım ve gerilimin yönü motor çalışmanın tam tersi yönde olacağı için generatör çalışmaya geçecektir. Buradan da şebeke bağlantısı sağlanacaktır. Asenkron makinelerde stator ile rotor arasında elektriksel bir bağlantı olmayıp, tamamen elektromanyetik indüksiyon prensibine göre çalışır. Statordaki yüksek gerilim sargıları kendisi üzerinde kısa devre edilmiştir. Güç her iki sargı yönünde de akabilir. Asenkron generatörlerde stator ve rotor arasında elektrik bağlantısına ihtiyaç yoktur. Temelde senkron döner manyetik alana bağlı kayma prensibi ile açıklanır [19], [25].

Sincap kafesli asenkron generatör (SKAG)

SKAG ile oluşturulan ilk REDS, Şekil 4.5'te görüldüğü yumuşak yol verme devresi, kondansatör grubu ve hat transformatöründen oluşmaktadır. Bu sistemde, yumuşak yol verme devresi, şebeke tarafından ani akım çekilmesini ve stator sargılarının zarar görmesini engelleyen silisyum kontrollü doğrultucu (SCR) çiftleriyle kontrol edilmektedir. Her faz için birer adet ters paralel bağlı SCR grubu, şebeke bağlantısı esnasında yüksek anahtarlama açısında kontrol edilerek şebekeye aktarılmasına izin verilen akım değeri sınırlandırılır. Sistem kararlı hale geldikten ve bağlantı aşamaları tamamlandıktan sonra anahtarlama açıları düşürülerek etkin güç anma gücüne yükseltilir. Bu sistemde, reaktif enerji ihtiyacı ise kondansatör grubu tarafından sağlanmaktadır. Güç elektroniğinde ve elektrik makinalarında yaşanan gelişmeler sonucunda SKAG içeren rüzgâr türbinleri de zamanla Şekil 4.4'te görülen art arda konvertörlerle kontrol edilir hale gelmiştir. Bu sistemde stator sargısı, DA baranın iki tarafına ardışık bağlı gerilim kaynaklı iki darbe genişlik modülasyonu (DGM) eviriciden meydana gelen, dört bölgeli güç konvertörü üzerinden şebekeye bağlanır. Stator tarafındaki dönüştürücü kontrol

sistemi, elektromanyetik torku regüle eder ve makinanın manyetik alan üretebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki dönüştürücü ise sistemden şebekeye aktarılan aktif ve reaktif gücü ve aynı zamanda DA barayı regüle eder.

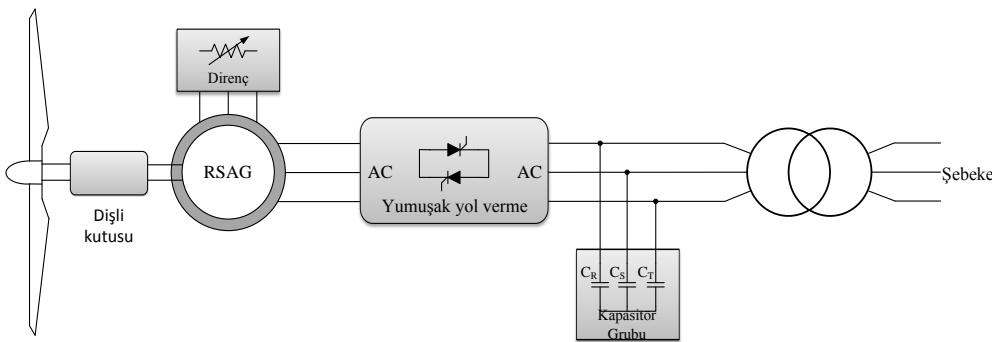


Şekil 4.5. Sincap kafesli asenkron generatör

Generatör parametrelerinin sıcaklık ve frekansla değişerek sistemin kontrolünü karmaşıklaştırması ve stator tarafındaki konvertörün, makinanın ihtiyaç duyduğu manyetik alanı sağlamak için nominal güce göre %30-%50 oranında daha büyük ölçülerde yapılması, bu sistemin dezavantajları arasında yer alır [40].

Rotoru sargılı asenkron generatör (RSAG)

RSAG'lerde rotor devresini etkileyen harici ayarlı direnç grubu bulunur. Rotor direnci değiştiğinde generatörün tork/hız karakteristiği de değişir ve böylece hız değişimi sağlanmış olur. Rotor direnci genelde diyot köprüsü ve IGBT kıyıcıdan oluşan bir güç dönüştürücüsü ile ayarlanır. Hız, genellikle senkron hızın %10 fazlasına kadar değişebilir [45]. Bu tip generatörler, yüksek kutup sayısına sahiptir ve düşük rotor hızlarında çalışırlar. Diğer generatör tiplerindeki fırçalar ve bilezikli yapıya harici rotor direnci sayesinde gerek kalmayabilir. Bu durum maliyeti azaltmakla birlikte generatörde ısı artışına sebep olabilir.

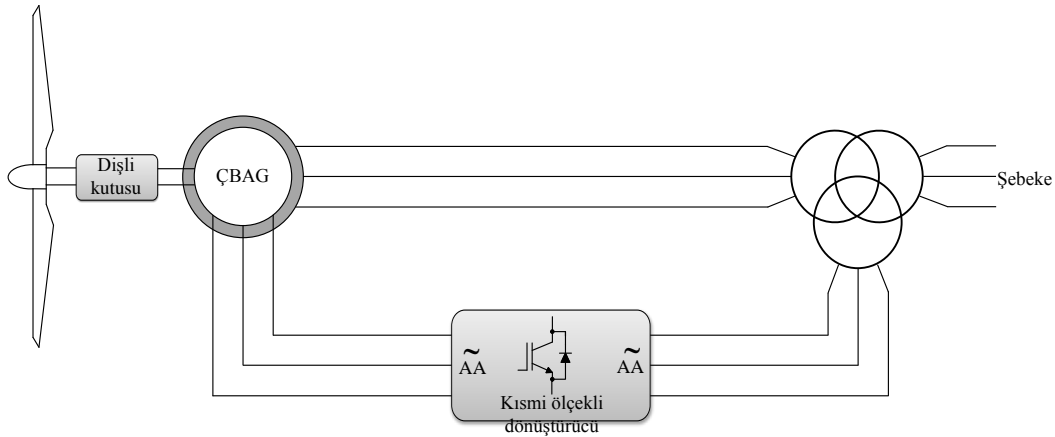


Şekil 4.6. Rotoru sargılı asenkron generatör

Çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG)

Çift beslemeli asenkron generatör(ÇBAG), rüzgâr türbini endüstrisinde en yaygın kullanılan generatörlerden biridir. Türbin pervanesinin düşük devirdeki dönüş hızı bir dişli sistemi ile yükseltilerek ÇBAG rotor mili tahrik edilmektedir. ÇBAG'nin statoru doğrudan şebekeye bağlı iken rotoru çift yönlü bir dönüştürücü üzerinden şebekeye bağlanır. Generatörün güç ve frekans kontrolü, bu dönüştürücü üzerinden yapılmaktadır. Böylece üretilen elektrik enerjisi, stator ve rotor üzerinden şebekeye aktarılmaktadır. ÇBAG'nin rotoru üzerinde çift yönlü güç akışı söz konusudur. Bu sistemin blok diyagramı Şekil 4.7'de görülmektedir. Generatör, senkron hızın altında çalışırken rotor üzerinden şebekeden güç çeker, senkron üstü çalışma durumunda ise rotor üzerinden şebekeye güç aktarmaktadır. Bu güç akışı, generatörün toplam gücünün yaklaşık %30'u kadar olduğundan burada kullanılan güç dönüştürücülerinin değeri de aynı oranda olmaktadır. Bu durum, yüksek güçlerde bile güç elektroniği elemanlarının tasarımında kolaylık sağlamakta ve maliyeti düşürmektedir [41].

Asenkron generatörlü rüzgâr türbinlerinde dişli kutusu kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, düşük devirde türbin kanatlarından elde edilen mekanik güç bir dişli kutusu yardımı ile yüksek devirlere çıkarılarak asenkron generatör tahrik edilmektedir. Bu tip uygulamalarda çoğunlukla çift beslemeli asenkron generatörler (ÇBAG) kullanılmaktadır. ÇBAG'nin statoru şebekeye doğrudan bağlıdır. Üretilen güç, rotor sargıları üzerinden güç elektroniği devreleri ile kontrol edilir. Dişli sisteminin bulunması, bakım ve onarım maliyetlerini de beraberinde getirmektedir [23].



Şekil 4.7.Çift beslemeli asenkron generatör

5. RÜZGÂR GENERATÖRLERİNİN MODELLENMESİ

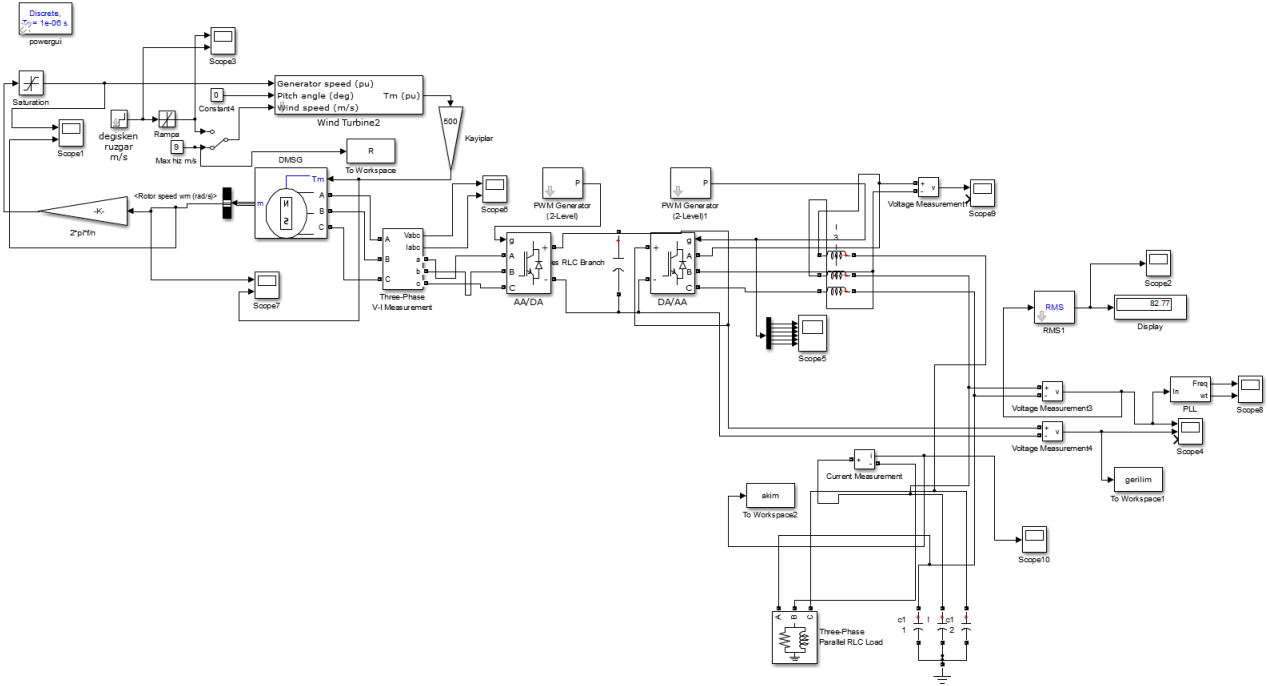
Bu bölüm, rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör tiplerinin modellenmesi ve simülasyonlarını içermektedir. Günümüzde rüzgâr türbini endüstrisinde en çok kullanılan generatör tipleri, MATLAB/Simulink programında ayrıntılı olarak incelenmiş ve kıyaslamalar yapılmıştır. Dinamik ve kararlı hal modelleri, generatörlerin yapısal özelliklerine ve çalışma karakteristiklerine dayanarak gösterilmiştir. Rüzgâr türbinleri, farklı enerji türleriyle etkileşim içinde olan karmaşık elektromekanik enerji dönüşüm sistemleridir. Rüzgâr türbinlerinin modelleri oluşturulurken, aerodinamik ve elektrik modellemeyi bir bütün halinde değerlendirmek gereklidir.

Bu tez çalışmasında, 4 farklı REDS topolojisi incelenmiştir. SMSG, SKAG, RSAG ve ÇBAG içeren bu enerji dönüşüm sistemleri genelde büyük güçlerdeki türbinlerde kullanılmaktadır.

Simülasyonlarda yapılan genel kabuller şöyle sıralanabilir; simülasyon modeli “discrete” zaman seçiminde çalışmaktadır ve T süresi 30 saniye olarak seçilmiştir. Türbine rüzgâr hızı değişken ya da sabit olarak verilebilmektedir. Bunun yanı sıra, kanat açısı sıfır derece olarak kabul edilmektedir. Bu bölümde, rüzgâr türbinlerinin tasarım aşamaları ve geliştirilen sistem modelleri incelenmiştir. Şebeke bağlantısının detaylı analizleri ise ayrıntılı olarak bölüm 6.3’te incelenmiştir.

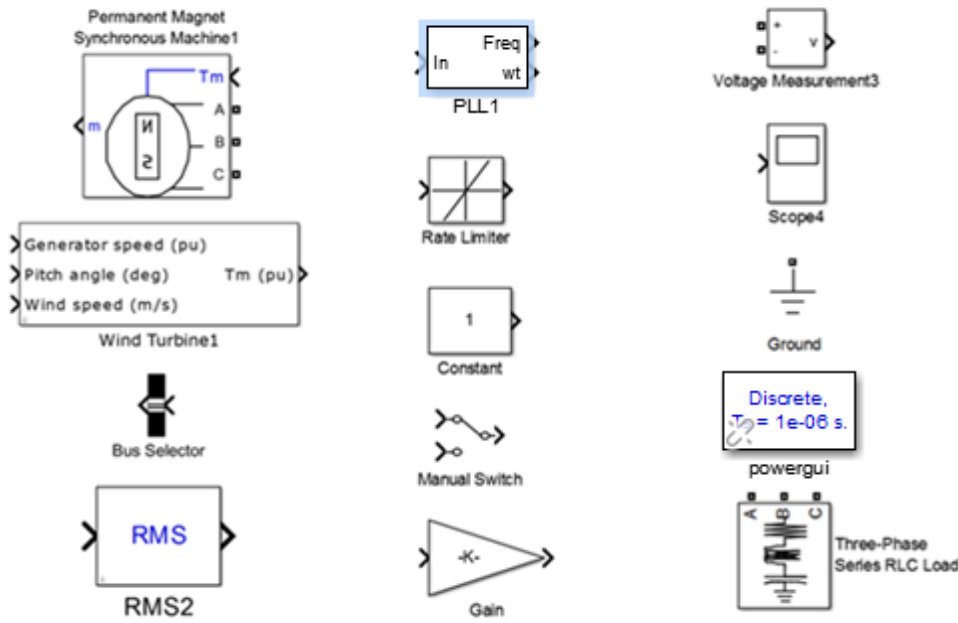
5.1. SMSG’nin Matlab Simulink Modeli

SMSG simulink modelinde, rüzgâr türbin bloğu ve SMSG bloğu temel unsurları oluşturmaktadır. Bu modelleme çalışmasında, 2MW’lık bir türbin tasarlanmış ve çalışması incelenmiştir. Rüzgâr türbini bloğunun giriş parametreleri; generatör hızı, kanat açısı ve rüzgâr hızı olarak tanımlanmıştır. Bloğun çıkışında mekanik torkun birim değeri (p.u.) SMSG’ye giriş olarak verilmektedir. SMSG’nin A,B,C uçları şebekeyle çift yönlü etkileşim halindedir. SMSG gerilimi, kontrolsüz doğrultucu ve MOSFET’lerle tasarlanan bir evirici aracılığıyla şebekeye aktarılmaktadır. Rüzgâr türbini bloğu ve SMSG bloğunun iç yapısı şekil 5.1’de verilmiştir.



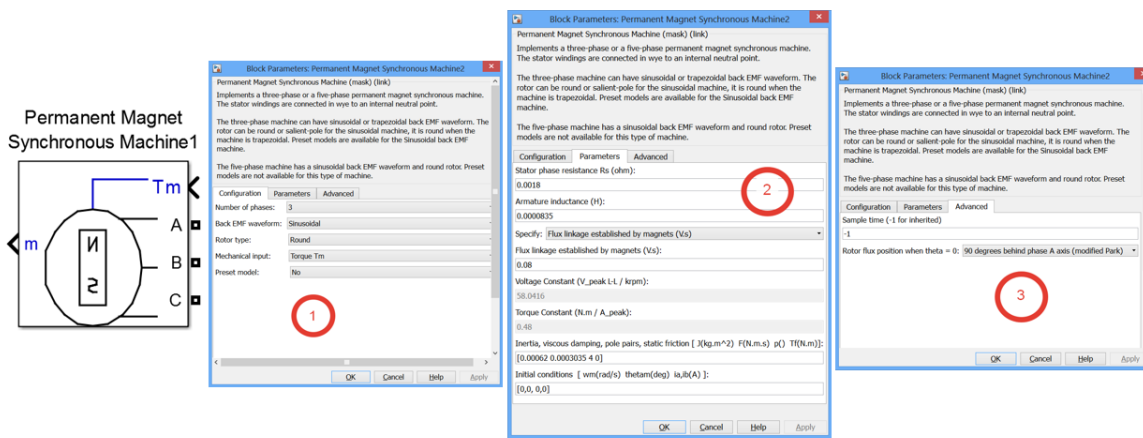
Şekil 5.1. SMSG modeli

Sistemin şebekeye paralel bağlanabilmesi için gerekli olan şartlardan faz ve frekans eşitliği, faz kilitli döngü (PLL) kullanılarak sağlanmıştır. Geliştirilen simülasyon modelinde kullanılan bloklar Şekil 5.2’de verilmiştir. Kullanılan bloklar içerisinde PLL’in yanı sıra geliştirilen SMSG modeli, türbinin hız ve kanat açısını kontrol eden kontrolcü blok (wind turbine) bulunmaktadır. Ayrıca etkin değer dönüşümünü gerçekleştiren RMS bloğu, akım sınırı için kullanılan sınırlayıcı (rate limiter), sabit katsayı bloğu (constant), anahtar, kazanç (gain), gerilim ölçüm probu (voltage measurement), osiloskop, GND, zamanlama ve kontrol bloğu (powergui) ve üç faz seri RLC yük blokları olarak sıralanabilir. Simülasyon sisteminden GUI ara yüzüne aktarım sağlayan (to workspace) ayrı bir blok da bulunmaktadır. SMSG modelinde iki köprü tipi doğrultucu ve aradaki DA bara ile oluşturulan tam dönüştürücülü AA/DA/AA sistemi kullanılmıştır. Bahsi geçen bloklar, diğer generatör modellerinde de kullanılmıştır.



Şekil 5.2. SMSG modeli sistem bileşenleri

SMSG bloğunun parametrelerini belirlemeye yarayan ara yüz, Şekil 5.3'te görülmektedir. 1 numaralı şekilde faz sayısı, dalga şekli ve rotor türü gibi bilgiler tanımlanmıştır. 2 numaralı şekilde ise makineye ait direnç, endüktans ve kutup sayısı gibi parametreler belirlenmektedir. Son şekilde ise gelişmiş ayarlar bulunmaktadır. Generatöre hız bileşenini geri besleme olarak verirken kullanılan kazanç ifadesi ise Şekil 5.4'te sayısal olarak gösterilmiştir. Generatör şebekeden bağımsız çalışırken yapılan yük bağlantıları ise Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir.

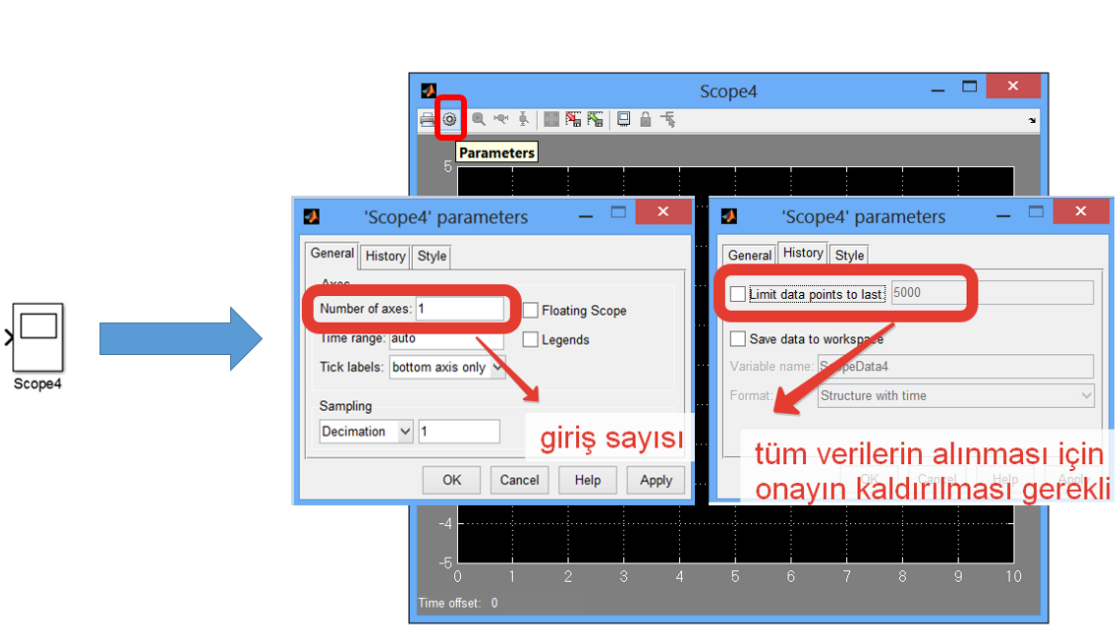


Şekil 5.3. SMSG bloğu parametre girişi

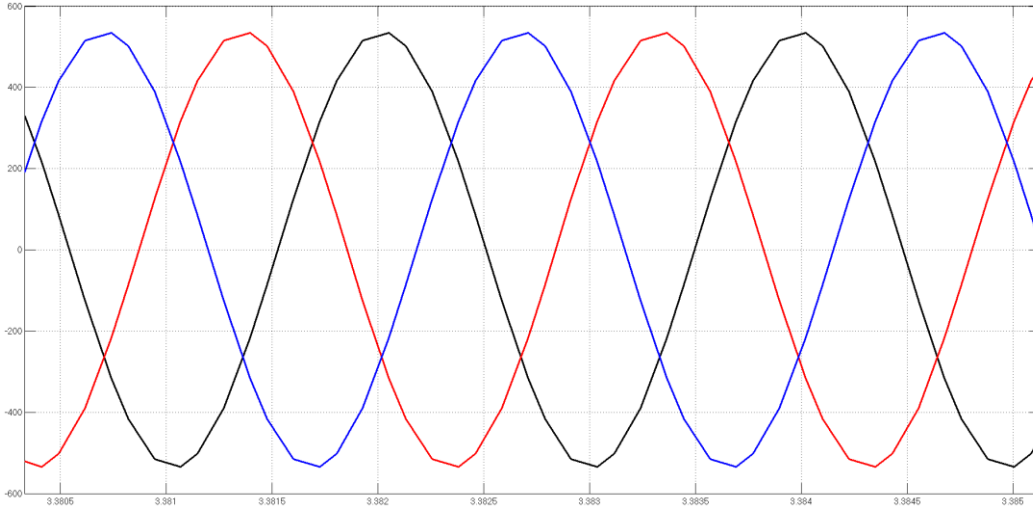


Şekil 5.4. Kazanç ve yük bloğu parametre girişi

İstenen ölçümlerin parametre sayısı ve verilerin hangi değere kadar ölçüleceğine yönelik ayarlar, Şekil 5.5'te görülen ölçüm bloğunun ayarlarından düzenlenebilir. Şekil 5.6'da ölçüm sonucu türbinin çıkış gerilimi 500 V üç fazlı dengeli olarak ölçülmüştür. Sistemde şebeke bağlantısı henüz kurulmamış olup sistem sadece yükü beslemektedir.



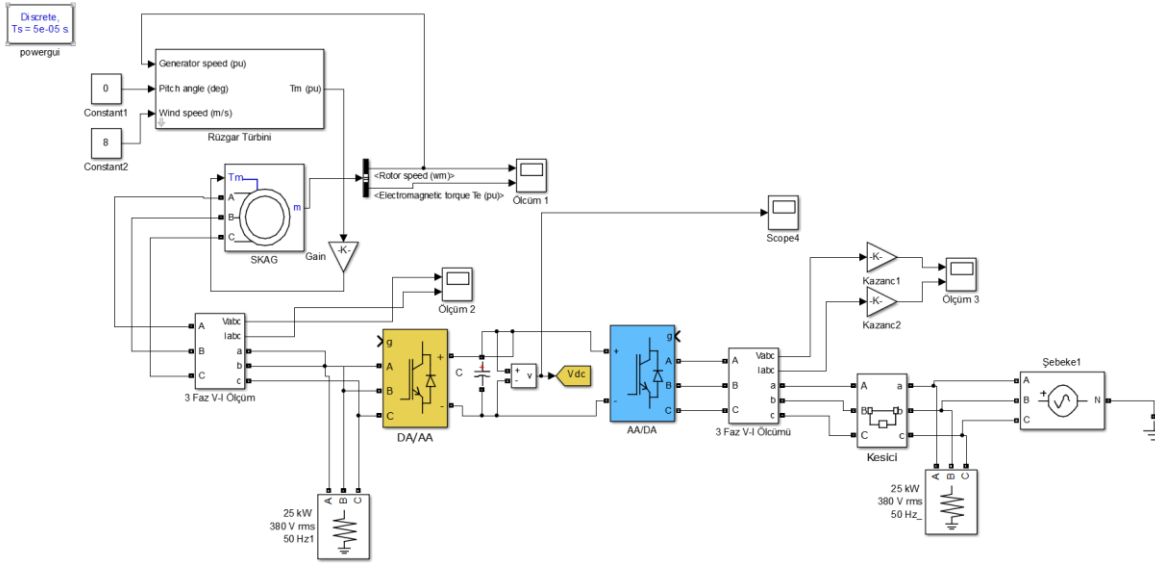
Şekil 5.5. Ölçüm bloğu iç yapısı



Şekil 5.6. SMSG Türbin çıkış gerilimleri

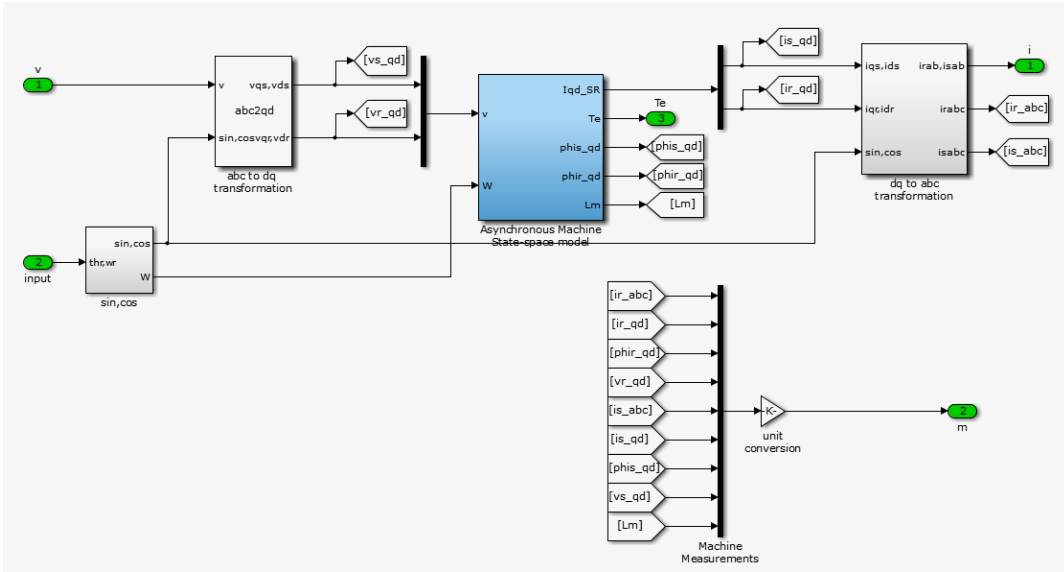
5.2. SKAG'li Matlab Simulink Modeli

SKAG simulink modelinde asenkron generatör modeli, rüzgâr türbin modeli ve dönüştürücü sistem bulunmaktadır. Bu modelleme çalışmasında, 1,5MW'lık bir türbin tasarlanmış ve çalışması incelenmiştir. Rüzgâr türbini bloğunun giriş parametreleri, generatör hızı, kanat açısı ve rüzgâr hızı olarak tanımlanmıştır. Bloğun çıkışında rotor hızı, SKAG'ye giriş olarak verilmektedir. SKAG'nin A, B, C uçları şebekeye çift yönlü etkileşim halindedir. SKAG bloğunun iç yapısı Şekil 5.7'de verilmiştir. Dönüştürücü sistemde AA/DA dönüştürücü sisteme reaktif güç sağlarken, DA/AA dönüştürücüsü ise şebekeye aktarılan aktif güç ile reaktif güç ve aradaki DA barayı kontrol eder. Asenkron makinanın uçları şebekeye dönüştürücü sistem aracılığıyla bağlıdır. Bu sistemde bulunan dönüştürücünün gücü, tam ölçekli yani en az asenkron generatörün gücü kadar olmalıdır. Makinanın generatör modunda çalışabilmesi için senkron hızdan yüksek hızda çalışmalıdır. Fakat hız değişimi çok küçük olduğundan neredeyse sabit hızlı çalıştığı kabul edilebilir. Bundan dolayı üretilen aktif güç de sabit değerde olacaktır. Rüzgâr hızının artmasıyla birlikte çıkış gücü nominal güç sınırına kadar artarak nominal rüzgâr gücünde sabitlenecektir [46].



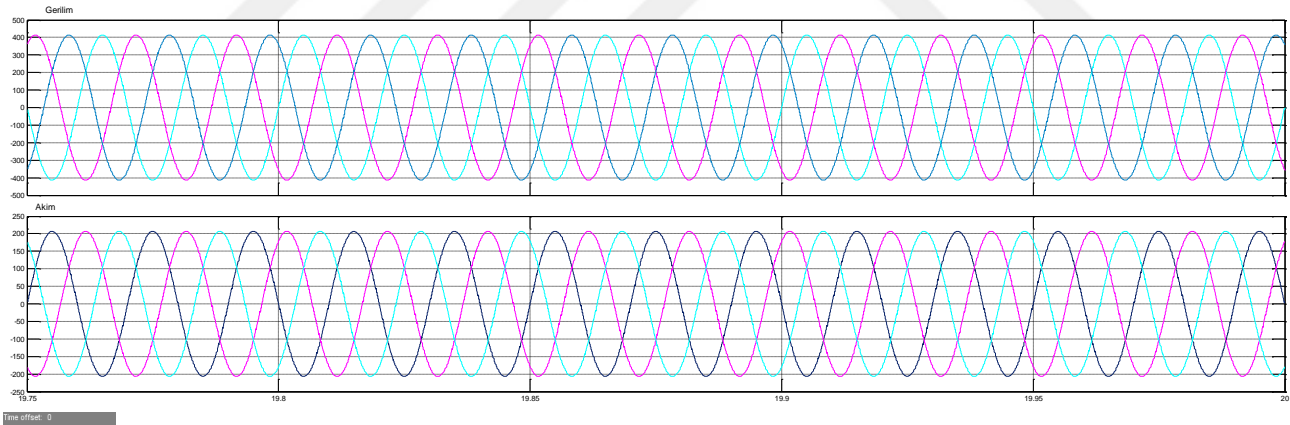
Şekil 5.7. SKAG modeli

SKAG bloğunun içyapısında elektrik mekanik ve ölçüm blokları bulunmaktadır. Şekil 5.8’de generatörün elektrik modeli gösterilmiştir. Sistemdeki $abc-dq$ dönüşümü de bu kısımda gerçekleşir. abc düzleminde üç boyutlu olarak tanımlanan üç fazlı değişkenler, bir referans düzlemde birbirine dik olacak şekilde d ve q olarak tanımlanan iki eksene dönüştürülür. Bu dq eksen düzlemi, a eksenini ile d eksenini arasında isteğe göre seçilmiş bir θ açısı ile oluşturulur. Bu dq eksen düzlemi, a eksenini ile d eksenini arasında isteğe göre seçilmiş bir θ açısı ile oluşturulur ve θ ’ya bağlı olarak değişen bir ω hızıyla döner. Hız ve açısal hız parametreleri asenkron makinanın durum-uzay modeline girerek elektromekanik tork (T_e) verisini oluştururlar. Bloğun çıkışında $dq-abc$ dönüşümü yapılır ve sistemden akım çıktı olarak alınır. SKAG bloğundaki mekanik model ise mekanik tork (T_m) ve elektrik modelinden elde edilen T_e giriş parametreleri “z dönüşümü” ile ölçülmesi istenen değerlere dönüştürülür.



Şekil 5.8. SKAG elektrik modeli

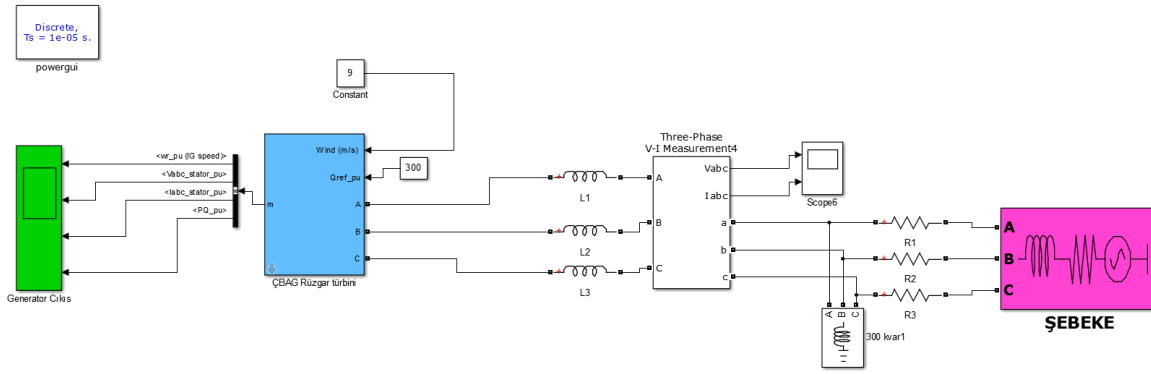
Şekil 5.9’da SKAG’nin türbin çıkışında bulunan ölçüm sonuçları verilmiştir. Buna göre 1,5 MW’lık generatörün çıkışında gözlemlenen gerilim 500 V değerini, akım ise 200 Amper değerini göstermektedir.



Şekil 5.9. SKAG türbin çıkış gerilim ve akımı

5.3. ÇBAG’li Rüzgâr Türbini Matlab Simulink Modeli

1,5 MW’lık bir türbinin incelendiği ÇBAG modelinde, ÇBAG rüzgâr türbin bloğu, endüktans ve şebekeden oluşan bir sistem bulunmaktadır. ÇBAG rüzgâr türbin modeli şekil 5.10’da verilmiştir. Türbin modelinde sabit bir değer olarak hız ve reaktif güç (Q_{ref}) giriş olarak verilir. Türbin statorunun reaktif mıknatıslanma akımına ihtiyacı olduğundan asenkron jeneratörün reaktif güç ihtiyacını karşılamak için Q_{ref} verilir. Hız değeri sabit olarak 9 m/s verilmiştir.

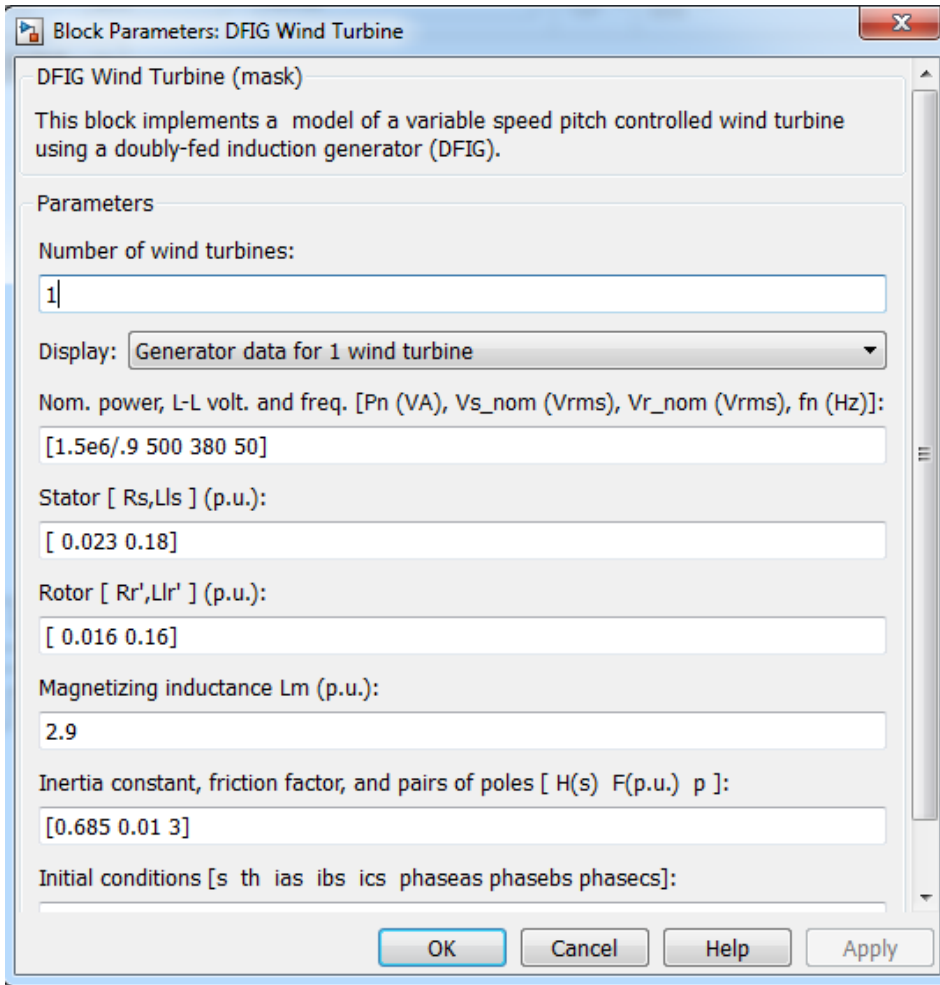


Şekil 5.10. ÇBAG modeli

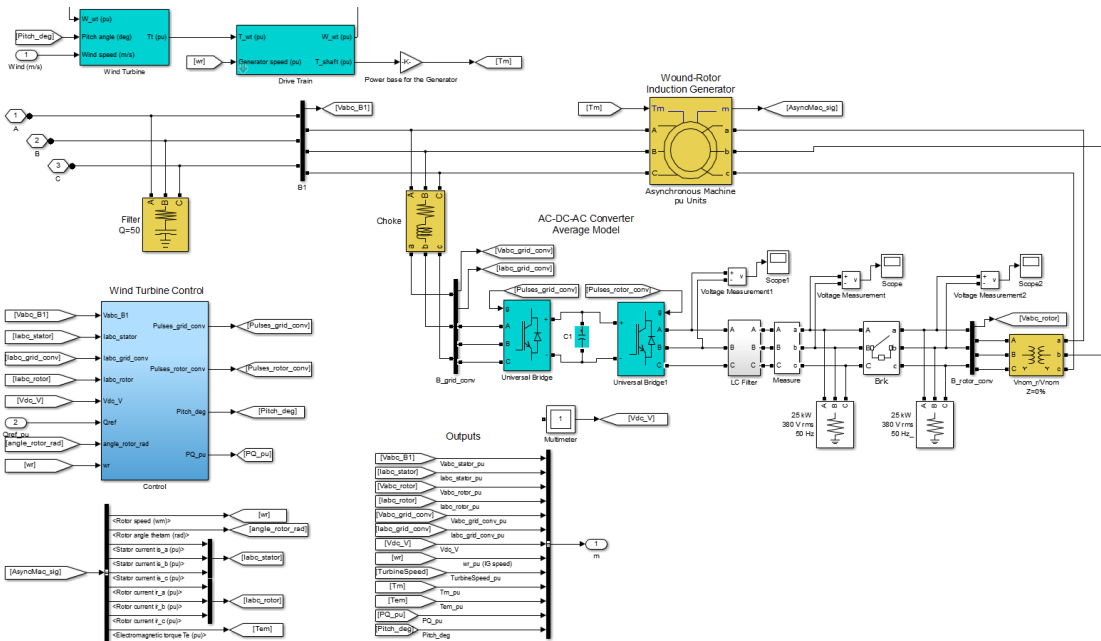
ÇBAG bloğunun içyapısı incelendiğinde, AA/DA/AA dönüştürücü görevi gören iki adet IGBT den oluşan DGM dönüştürücü görülür. Bunlar gerilim kaynaklı dönüştürücüler olarak tanımlanıp anahtarlama frekansından bir periyot fazla sürede alternatif akım üretilmesini sağlar [47]. Stator sargıları direk şebekeye bağlanırken rotor ise değişken frekansla dönüştürücü sistem üzerinden yine şebekeye bağlanır. Böylece sistemde kullanılan AA/DA/AA dönüştürücünün gücü toplam sistem gücüne eşit olmayıp, sistem gücünün %30'luk oranına karşılık gelir. Dönüştürücü sistemin maliyeti diğer sistemlere göre daha düşük olacaktır.

ÇBAG rüzgâr bloğunun maske yapısı şekil 5.11'de verilmiştir. Kullanıcı rüzgâr türbin sayısını, nominal güç, fazlar arası, hatlar arası gerilim değerini ve frekansı belirler. Stator ve rotora ait direnç ve endüktans değerleri, manyetizma endüktansı, kutup sayısı gibi değerler istenen alanlara yazılır.

ÇBAG bloğunun içyapısı şekil 5.12'de verilmiştir. Bloğun içyapısı incelendiğinde, RSAG modeli ve AA/DA/AA dönüştürücünün yapısı görülmektedir. Rüzgâr türbininin kontrol bloğu, rotor tarafı ve şebeke tarafı kontrol olarak ayrılmıştır. Kontrol kısmında, hız ve kanat açısı kontrolü uygulanır. Reaktif güç kontrolü, rotor kısmı dönüştürücüde reaktif akım ile sağlanır. Türbin, generatör çalışma moduna geçtiğinde reaktif güç bir VAR regülatörü tarafından sabit tutulur. Bu regülatör aynı zamanda güç kontrolünde rotor akımını referans değerde tutmak için de kullanılır [48].

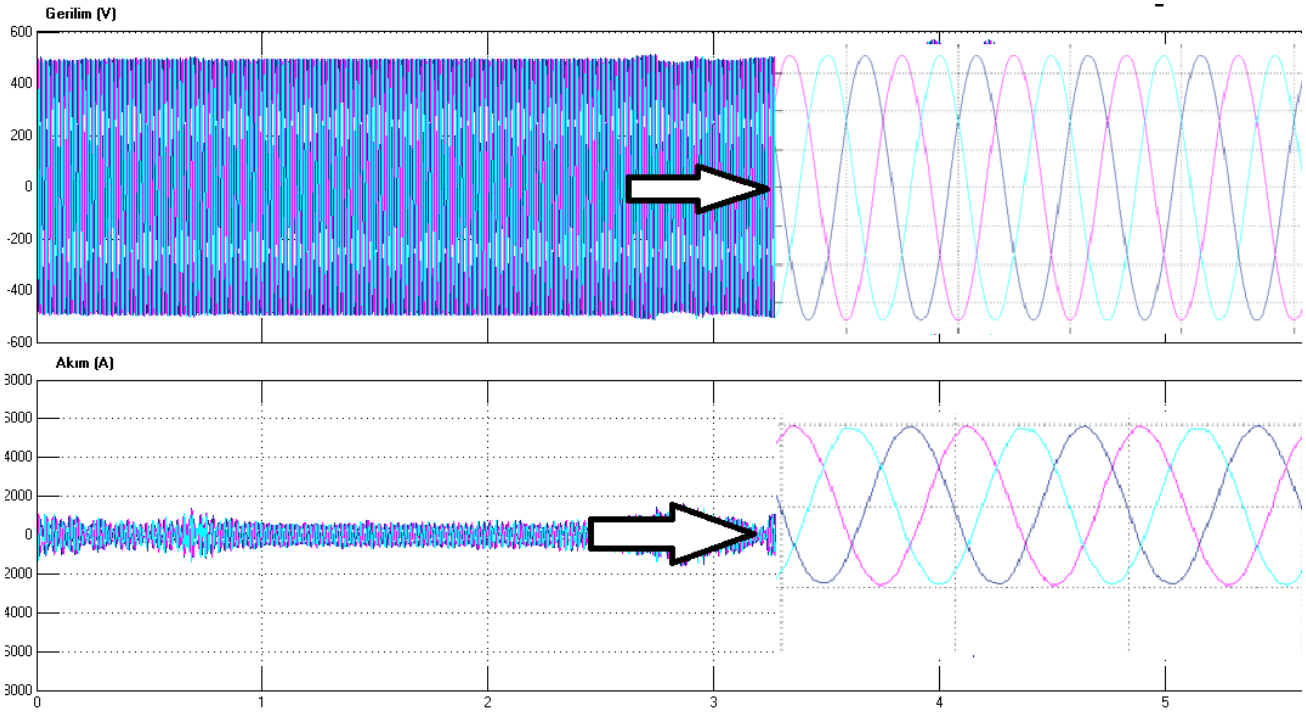


Şekil 5.11. ÇBAG bloğu maske yapısı



Şekil 5.12. ÇBAG bloğunun iç yapısı

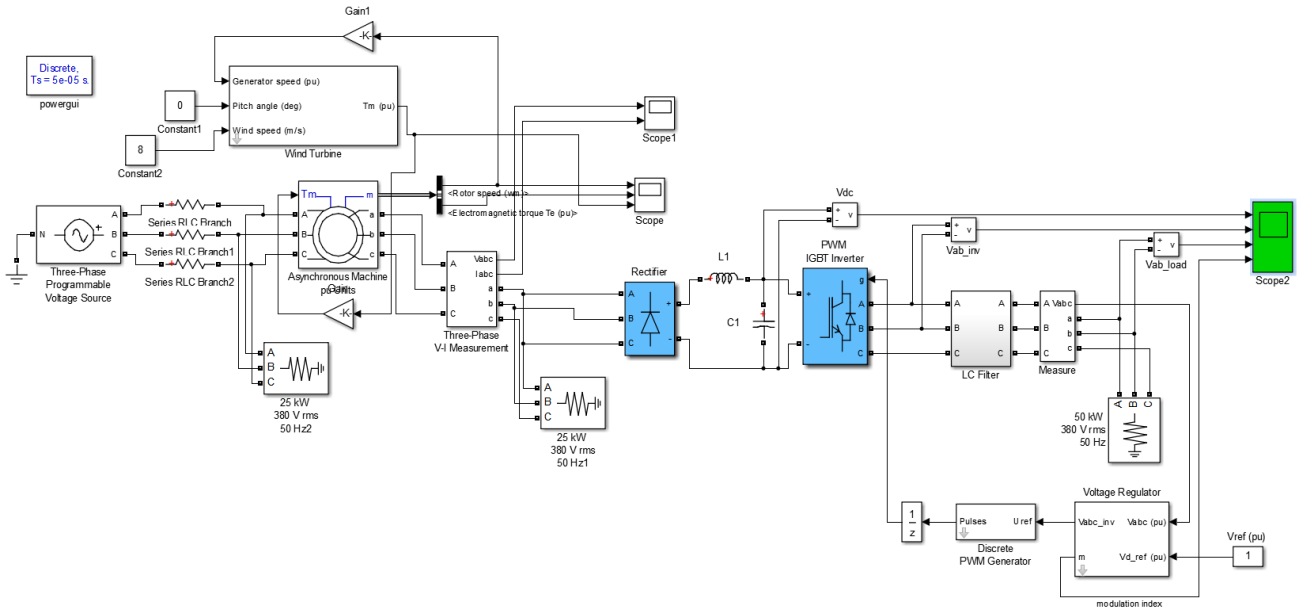
ÇBAG türbinin çıkışındaki gerilim ve akım grafikleri Şekil 5.13'te gösterilmektedir. Generatörde üretilen gerilim, şebekeye iletilmeden önce dönüştürücü sistem tarafından istenilen seviyeye ayarlanarak gerilim kontrolü sağlanır. Gerilim ve akım değerleri şekilde gösterildiği üzere türbinin çıkışında istenen değerlerde üretilmektedir.



Şekil 5.13. ÇBAG türbin çıkış gerilim ve akımı

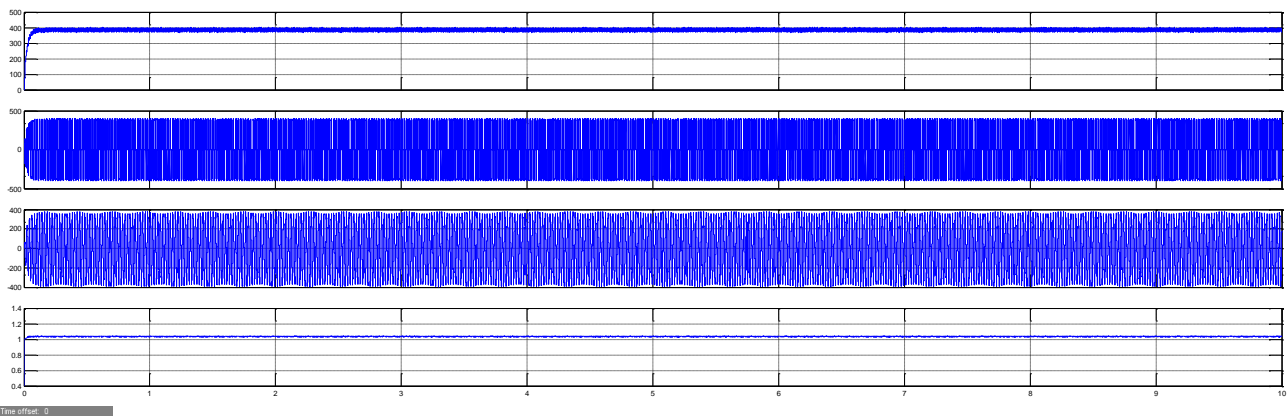
5.4. RSAG Matlab Simulink Modeli

Geliştirilen RSAG modelinde; 1,5 MW'lık bir RSAG rüzgâr türbin bloğu, kontrolsüz doğrultucu ve IGBT eviriciden oluşan bir güç dönüştürücü sistem bulunmaktadır. RSAG rüzgâr türbin modeli şekil 5.14'te verilmiştir. RSAG modeli, rotor devresi ayarlı dirençler ile kontrol edilen bir sistemi göstermektedir. Rotor direnci değiştiğinde generatörün tork/hız karakteristiği de değişir ve böylece hız değişimi sağlanmış olur. Rotor direnci kontrolsüz doğrultucuyu oluşturan diyot köprüsü ve IGBT eviriciden oluşan bir güç dönüştürücü ile ayarlanmıştır. Şebeke bağlantısından önce kapasitör grubu ile kompanzasyon sağlanmakta ve üretilen enerji şebekeye verilmektedir.

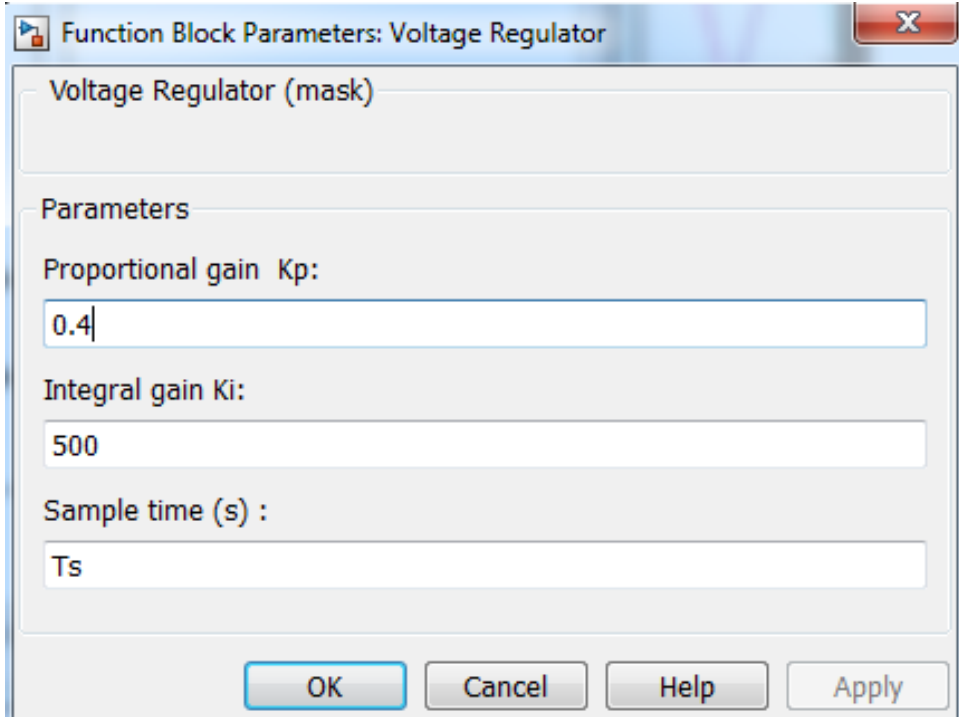


Şekil 5.14. RSAG simulink modeli

Dönüştürücü sistem çıkışındaki değerler Şekil 5.15'te verilmiştir. Doğru akım gerilimi 200 V civarında sabitlenmiştir. IGBT ile oluşturulan evirici çıkışında elde edilen AA gerilim dalga şekli ikinci ölçüm ekseninde görülmektedir. Burada ölçülen gerilim, 400 V_{pp} rms değerinde salınmaktadır. Bu değer, dönüştürücü çıkışında 50 kW'lık yük uçlarında ölçüldüğünde ise önceki ölçüme eşit sinüzoidal dalga şeklinde görülmektedir. Modülasyon indeksinin değeri 1,05 civarında değişmektedir ve bir gerilim regülatörü tarafından kontrol edilmektedir. Gerilim regülatörüne ait tasarım değerleri şekil 5.16'da verilmiştir.

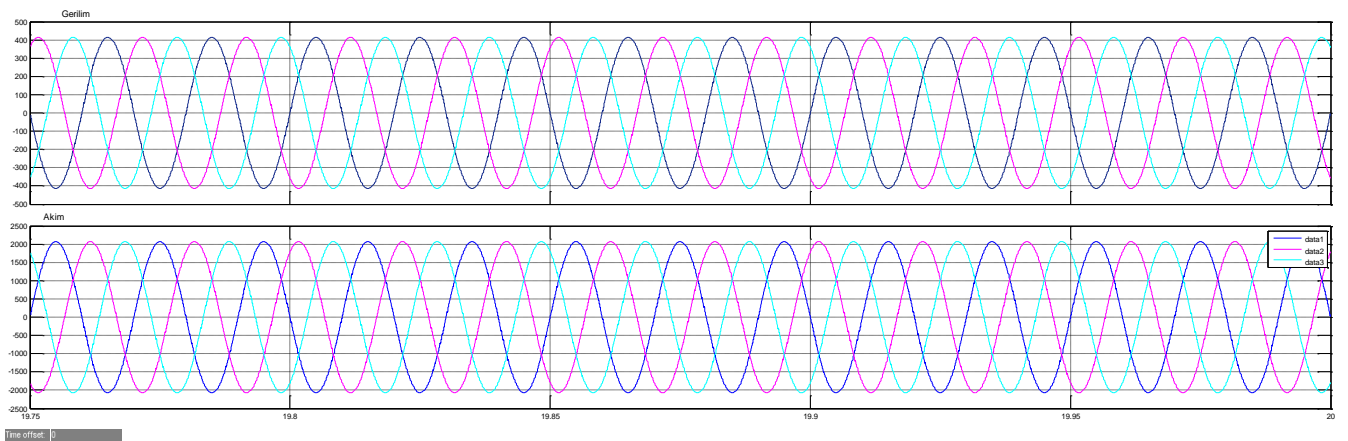


Şekil 5.15. Dönüştürücü sistem çıkışındaki değerler



Şekil 5.16. Gerilim regülatörü tasarım parametreleri

Türbin çıkışında elde edilen akım ve gerilim ölçümleri Şekil 5.17’de verilmiştir. RSAG türbininin çıkışından alınan gerilimi şebekeye ilemeden önce dönüştürücü sistemden gerilim istenen seviyeye ayarlanarak kontrolü sağlanır. Türbin çıkışında 500 V civarında gerilim üretilmektedir. Buna karşın zaman zaman yüksek seviyede akım değerleri görülmüştür. Güç kalitesi faktörü ve harmonik analizlerin incelenmesi detaylı olarak anlatılacaktır.



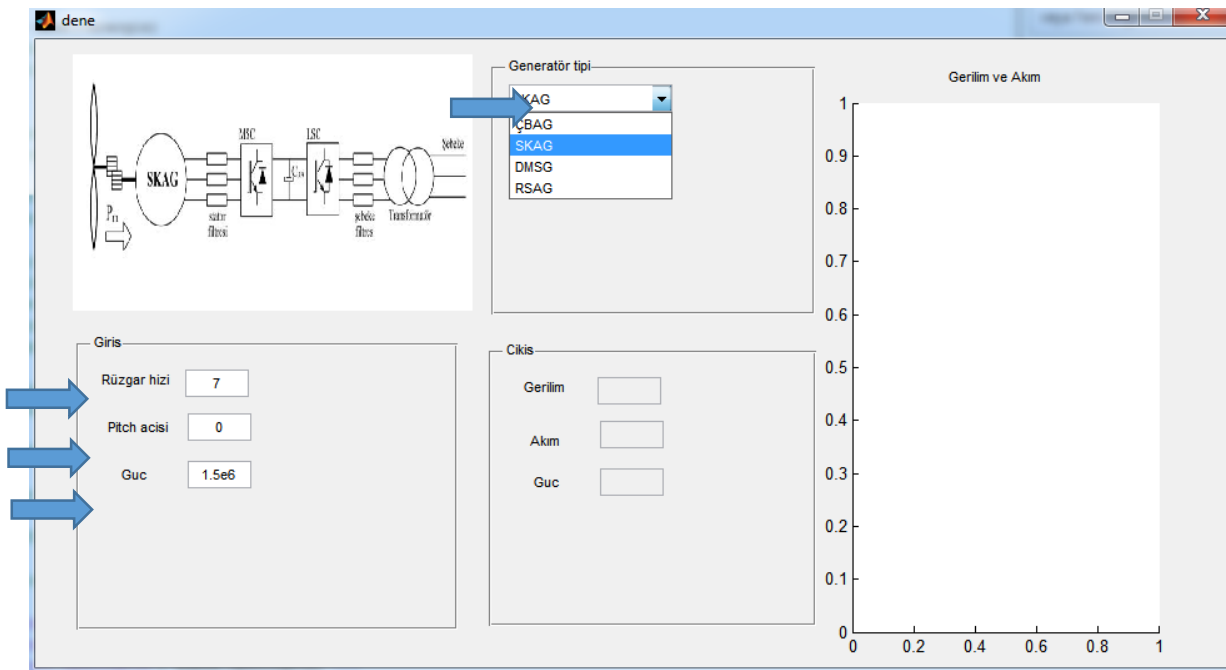
Şekil 5.17. RSAG türbin çıkış gerilim ve akımı

5.5. MATLAB Kullanıcı Ara yüzü

Yapılan çalışmadaki analizlerin daha iyi izlenebilmesi ve kolay erişilebilmesi için MATLAB GUI'de bir ara yüz oluşturulmuş ve burada kullanıcının kendi belirlediği parametre değerlerini simülasyona uygulayabilme seçeneği sunulmuştur.

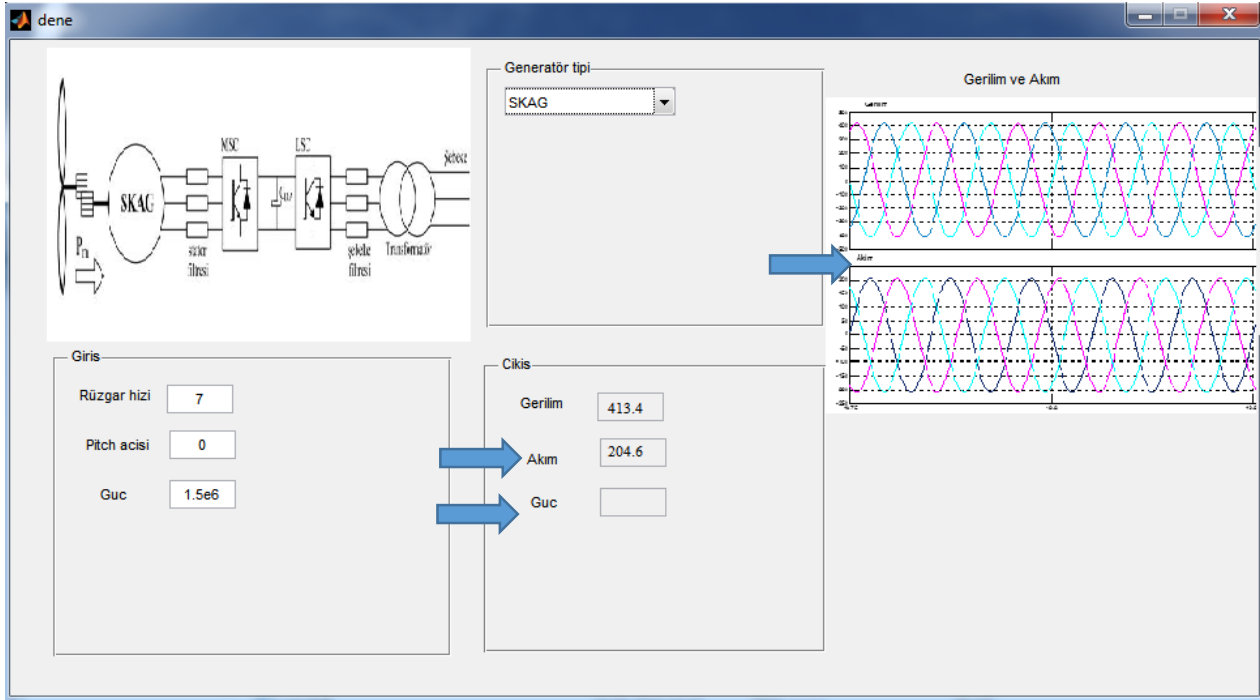
Matlab GUI ara yüzü ile oluşturulan sistemde, SMSG, RSAG, ÇBAG ve SKAG simülasyon tasarımları arka planda çalıştırılırken kullanıcı tarafından parametreler GUI ara yüzünde belirlenecektir. Sistemde belirlenen rüzgâr hızı, kanat açısı ve generatör gücü gibi parametreler aracılığıyla çıkışta akım, gerilim ve çıkış gücü değerleri üretilecektir. Rüzgâr hızının zamanla değişimi matris bloğu halinde girilebilmektedir. Simülasyon süresi ve makine parametreleri belirli değerlere ayarlanmıştır.

Bir SKAG rüzgâr türbinine ait GUI parametre giriş ekranı Şekil 5.18'de verilmektedir. Burada sol alt köşede giriş kısmında verilen rüzgâr hızı, kanat açısı ve güç gibi makineye ait parametreler kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. GUI editör sayfasında SKAG'ye ait Simulink modeli arka planda komutla çağırılıp çıkış parametreleri ile "Gerilim & Akım" olarak pencerenin alt tarafında görünen simülasyon sonuçlarını ekranda göstermektedir.



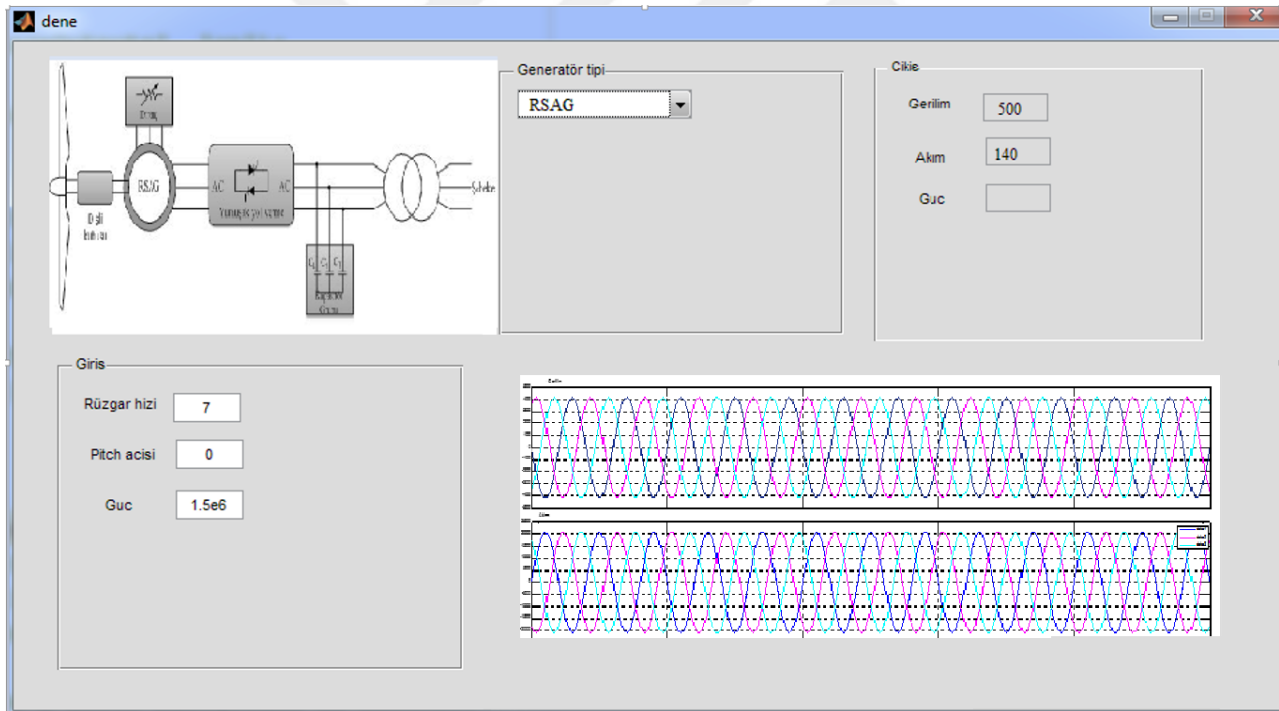
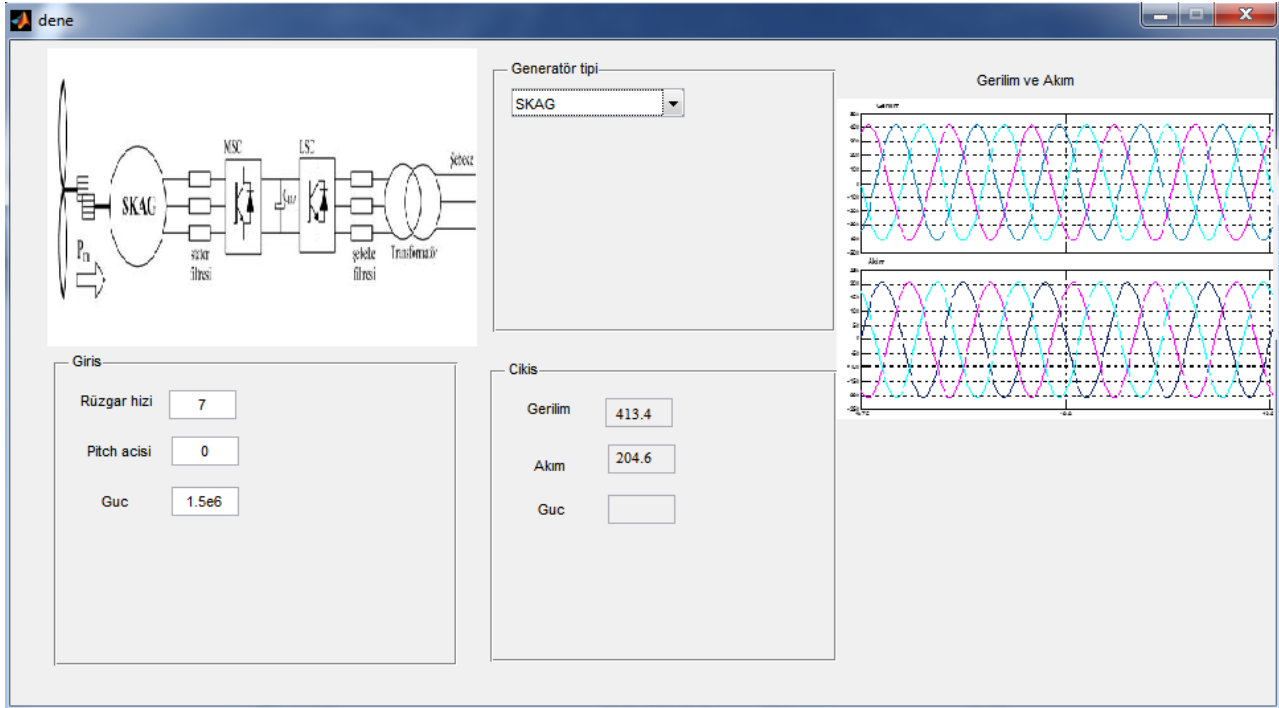
Şekil 5.18. GUI ara yüz tasarımında SKAG giriş parametreleri

ÇBAG modelinin ara yüze aktarıldığı sistem Şekil 5.19’da görülmektedir. Generatör tipi seçimi yapıldıktan sonra sol üst köşede generatör blok diyagramı görülmektedir. Giriş parametreleri olan rüzgâr hızı, kanat açısı ve güç parametreleri yazıldıktan sonra arka planda çalışan simülasyon çıkış parametrelerini ve “Gerilim&Akım” simülasyon sonuçlarını göstermektedir.

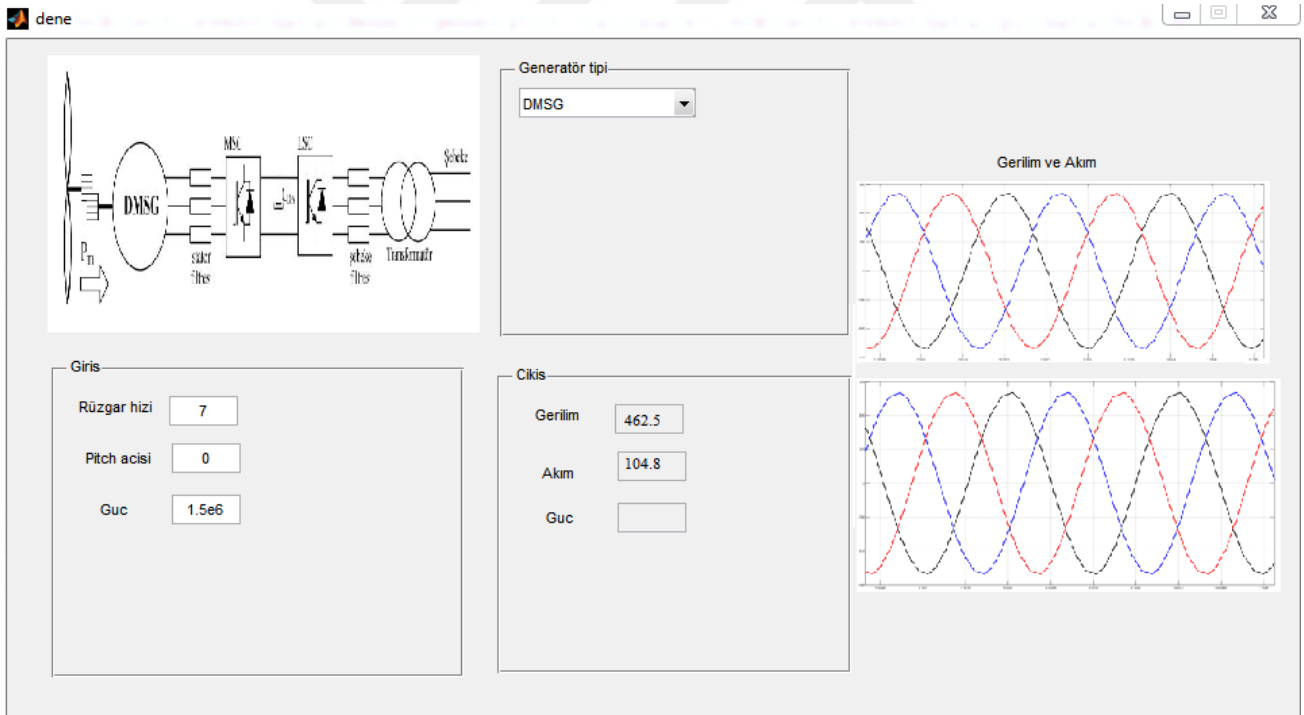
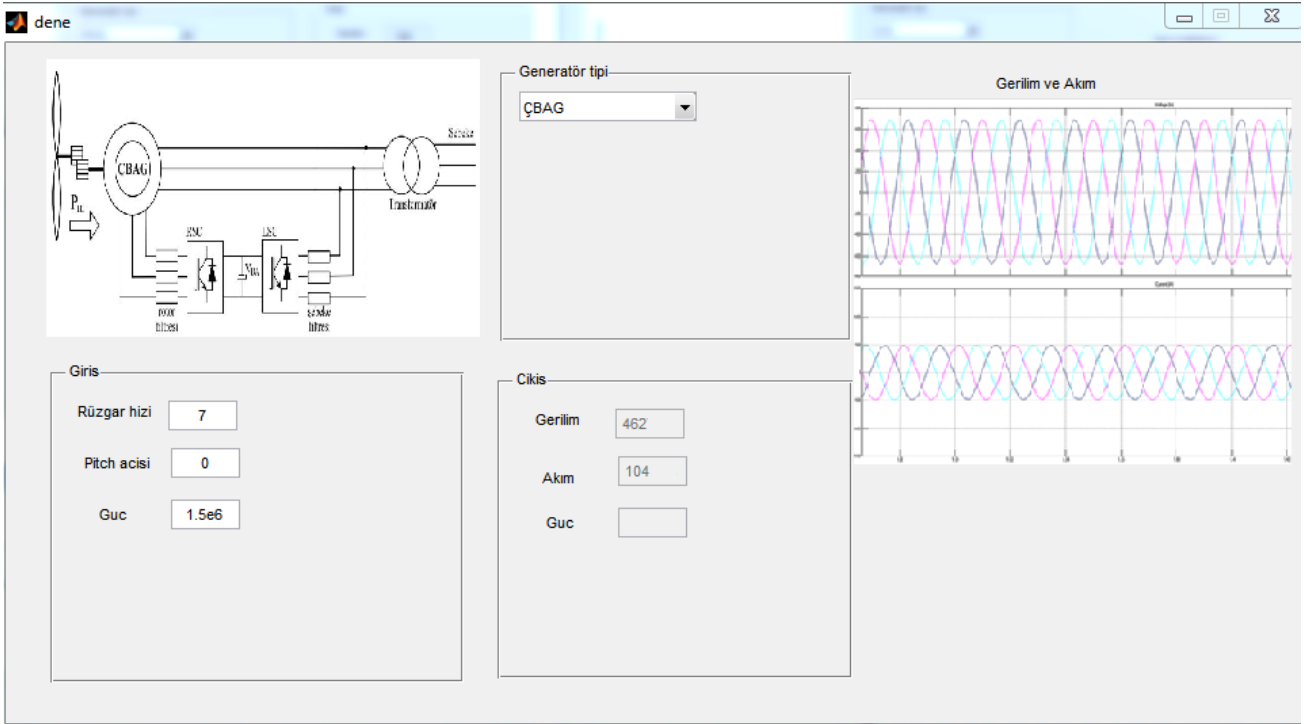


Şekil 5.19. GUI ara yüz tasarımında SKAG çıkış parametreleri

Bu bölümde kullanıcı odaklı bir ara yüz oluşturularak kullanıcının generatör tipleri ve belirleyici etkenler olan rüzgâr hızı, kanat açısı ve türbin gücü parametrelerini manuel olarak giriş imkânı sunulmuştur. Şekil 5.20 tüm generatör sistemlerinde elde edilen sonuçları bir arada göstermektedir. Bu sistem kullanılarak çeşitli kıyaslamalar ile kullanıcının türbin tercihi aşamasında kolaylık sağlanması amaçlanmıştır.



Şekil 5.20. GUI ara yüz tasarımında tüm generatör tipleri sırasıyla SKAG, RSAG, ÇBAG ve PMSG



Şekil 5.20. (devam) GUI ara yüz tasarımında tüm generatör tipleri sırasıyla SKAG, RSAG, ÇBAG ve PMSG

Sınıflandırılan rüzgar türbinlerinin GUI ara yüzündeki sonuçları Şekil 5.20'de verilmiştir. Yapılan bu arayüz ile bir türbinin seçimindeki en önemli parametreler belirlenerek seçilen generatör tiplerinin gerilim ve akım değerleri elde edilebilir.

6. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN AKILLI ŞEBEKELERLE ENTEGRASYONU

6.1. Akıllı Şebekeler Entegrasyonu

Akıllı şebeke sistemleri; geleneksel ve yenilenebilir enerji sistemleri, güç elektroniği arayüzleri, enerji depolayıcıları ve farklı yüklerin birleşimiyle haberleşme sistemlerinin entegrasyonu olarak ortaya çıkar. Bu sistemin daha verimli, istikrarlı ve güvenilir olması için uygun bir şekilde tasarlanması ve kontrol edilmesi gereklidir. Rüzgâr sistemleri diğer geleneksel kaynaklar ile karşılaştırıldığında, sürdürülebilirlik, kirlilik içermeyen çalışma ve kullanıcıya yakın olması gibi avantajlarıyla değerlendirilebilir. Ayrıca rüzgâr türbinlerinin sınırlı öngörülebilirliği, kısa ve uzun vadede değişkenliği ve sıfıra yakın marjinal maliyeti gibi faktörleri göz önünde bulundurulmalıdır [49].

Günümüzde yenilenebilir enerjinin kullanımının artmasıyla birlikte şebeke üzerindeki etkileri daha çok araştırmaya açık hale gelmiştir. Rüzgâr türbinlerinin ürettiği elektrik enerjisi, büyük oranda rüzgâr hızıyla orantılı olup, rüzgâr hızında meydana gelen değişiklikler ve kesintilerden etkilenmektedir. Rüzgâr hızının türbinlerde meydana getirdiği mekanik gücün elektrik enerjisine dönüştürülmesi işlemi generatörde gerçekleşmektedir. Generatörün şebekeye bağlantısı esnasında, rüzgâr hızındaki anlık değişimler şebekede gerilim salınımlarına neden olmakta ve enerji kalitesini etkilemektedir. Bu bölümde, rüzgâr türbinlerinde hangi generatörün şebekeyi nasıl etkilediği ve aralarındaki farklar incelenmiştir.

Rüzgâr generatörlerinin karşılaştırılması yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi mevcut bir şebekeye generatörlerin ayrı ayrı bağlanarak analiz edilmesidir. Şebekede meydana gelen değişimlerin belirgin bir şekilde görülebilmesi için rüzgâr gücü ve diğer kaynaklardan elde edilen güç eşit olarak alınmakta ve diğer kaynaklar ideal kabul edilmektedir. Rüzgâr generatörlerinin de kurulu (toplam) gücü rüzgârla değişim gösterdiğinde bu çıktılar göz önüne alınarak simülasyonlar yorumlanmıştır.

Şebekeye entegrasyon sırasında iki konuya açıklık getirilmelidir:

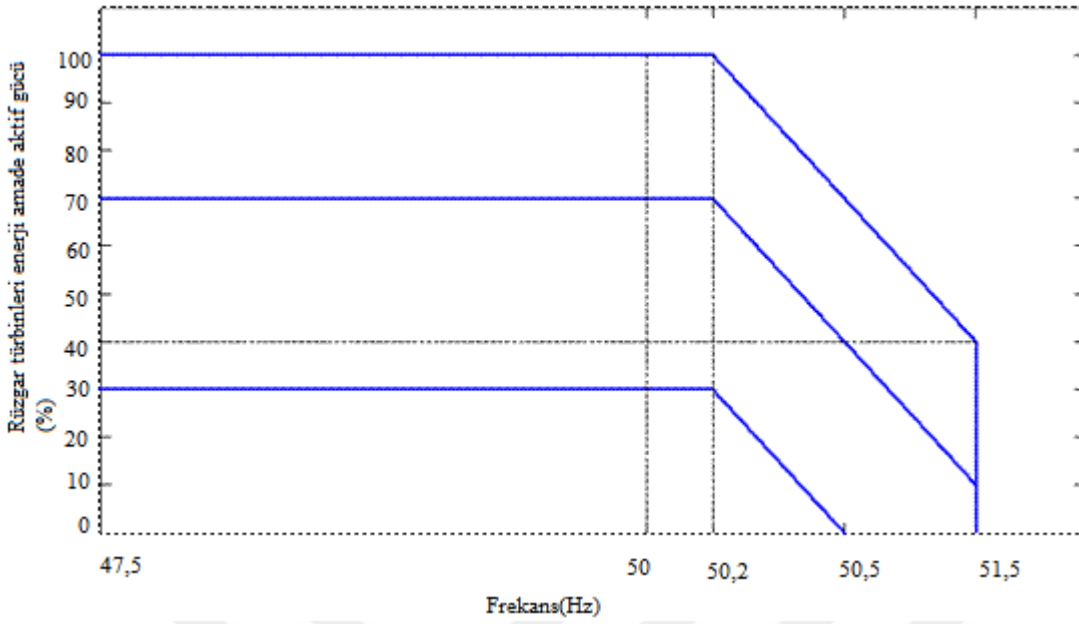
1. Güç sisteminin tüm kullanıcıları için kabul edilebilir bir gerilim seviyesinin ve
2. Sistemdeki güç dengesinin nasıl sağlanacağı bilinmelidir.

Rüzgârdan elde edilen gücü şebekeye aktarmak için REDS operatörlerinin de mevcut güç sistemi üzerinde belirli etkileri vardır. Rüzgâr santrallerinin şebekeye katılım koşulları ise şöyle verilmiştir:

1. Rüzgâr santralleri bağlantı noktalarında belirli bir gerilimi gerektirir. Çünkü rüzgâr türbinleri genellikle belirli bir gerilim aralığında çalışmak üzere tasarlanmıştırlar. (örneğin anma gerilim $\pm\%10$)
2. REDS sahiplerinin, rüzgâr güç üretimi mümkün olduğu anlarda şebekeye üretilen elektriği satmaları gerekir. Aksi takdirde enerjinin depolanması söz konusu olmadığından üretilen enerji yok olacaktır. Ancak; güç sistemi tasarımına ve rüzgâr gücü değerine bağlı olan bu durum, iletim kısıtlamalarına ve kararsızlık gibi hususlara neden olmaktadır.
3. İlk iki koşul rüzgâr tesisinin bağlantı noktasındaki güç sistem güvenilirliğini de içermektedir.

Bir güç sisteminde oluşacak olan puant (maksimum) yük talebini karşılamak için sistemde gerekli ve yeterli kapasite şebeke operatörleri tarafından karşılanmalıdır. Herhangi bir güç sisteminde puant tüketim talebinin karşılanamama olasılığı daima vardır. Rüzgâr gücünün şebekeye entegre edilmesi şebekedeki güvenilirlik oranını artıracaktır. Bir güç sisteminde rüzgâr güç kapasitesinin artırılması sistemdeki yenilenebilir ve temiz enerji oranını arttıracığı için tercih edilen bir uygulamadır. Şebekedeki aktif güç kontrolü, şebekedeki gerilim ve frekans kararlılığının sürdürülebilmesi için talep anlarında rüzgâr santrallerin çıkış gücünün $\%20$ - $\%100$ 'ü arasında otomatik olarak kontrol edilebilir olması gerekmektedir. Bu kapsamda; kurulu gücü 100 MW ve altında olan rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisleri için, yük alma hızı dakikada santral kurulu gücünün $\%5$ 'ini geçmemeli, yük atma hızı ise dakikada santral kurulu gücünün $\%5$ 'inden az olmamalıdır. Kurulu gücü 100 MW'ın üzerinde olan rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisleri için yük alma hızı dakikada kurulu gücün $\%4$ 'ünü geçmemeli, yük atma hızı ise dakikada santral kurulu gücünün $\%4$ 'ünden az olmamalıdır.

Rüzgâr türbini, şebeke frekansı 47,5-50,3 Hz aralığında olduğu sürece emreamade gücünün tamamını üretebilecek özellikte olmalıdır. Şebeke frekansının 50,3 Hz'in üzerine çıkması durumunda rüzgâr santralleri, Şekil 6.1'deki aktif güç-frekans karakteristiği takip edilerek $\%4$ hız düşümü değerini sağlayacak şekilde yük atmalı ve 51,5 Hz'de ise tamamıyla devre dışı olmalıdır.



Şekil 6.1. Rüzgâr türbinleri için güç-frekans eğrisi [50]

6.2. Şebekede Meydana Gelen Hatalar

Uluslararası standartlara göre şebekeye elektrik sağlarken uyulması gereken kurallar vardır. Bu kurallar, rüzgâr enerji kapasitesi artarken güç kalitesi ve sistem güvenliğini sağlamaya yöneliktir. Bu nedenle, rüzgâr türbinleri için birçok sağlayıcı tarafından özel şebeke kodları sunulmuştur. Bu özel kodlar; reaktif güç kontrolü, frekans kontrolü ve şebekeni kapsar. Rüzgâr türbinleri, şebekedeki ihtiyacın önemli kısmını karşılarken bu özel kodlar şebeke kaynaklı hataları önlemeye yöneliktir. Şebeke kod talepleri özellikle sürekli ve geçici rejimde gerilim kararlılığı problemini çözmek için reaktif gücü desteklemeye odaklıdır. Özet olarak bu kodlar, şebekeye bağlı bir rüzgâr enerji santralinin frekans aralığı, gerilim toleransı, güç faktörünün operasyonel sınırı ve güç sistemindeki bir arıza anındaki davranışları olarak tanımlanabilir [51].

Rüzgâr türbin üreticileri, özellikle arıza esnasında çalışma (FRT) durumunu da göz önünde bulundurmalıdır. Rüzgâr türbinleri, kısa süreli bir güç dengesizliği olduğu takdirde şebekeye bağlı kalmalı ve aktif güç-reaktif güç desteği sağlayarak frekans ve gerilim dengesine yardımcı olmalıdır. Güç kalitesi de son yıllarda gündemde olan bir diğer parametredir. Gelişen teknolojiyle kurulan değişken hızlı türbinlerde güç kalitesinin geliştiği gözlemlenmiştir. Güç kalitesiyle ilgili ilk standart 1995 yılında Uluslararası Elektroteknik Komisyon (IEC) tarafından yayınlanmıştır. Bu standartta titreşim analizi, anahtarlama işlemi ve harmonik analizi üç temel unsuru oluşturmaktadır. Titreşim

analizleri için akım ve gerilim zaman serilerinden gerilim dalgalanmalarını hesaplayan bir yöntem kullanılmaktadır. Anahtarlama için rüzgâr türbini anahtarlama operasyonu sırasında gerilim ve akımın geçici hal durumları kayıt altına alınır. Harmonik analiz için ise hızlı Fourier yöntemi(FFT) kullanılarak akım veya gerilim dalgası üzerindeki toplam harmonik distorsiyonu (THD) incelenir. Frekans ve gerilim işletme değerleri de yine belirlenen aralıkta olmalıdır.

6.2.1. Şebeke kaynaklı hatalar

Şebekede meydana gelen olağan dışı olaylar, entegrasyon sırasında rüzgâr türbinlerinin performansını etkiler. Bu hatalar esnasında her türbin tipi kendine göre avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu olayların örnekleri aşağıda sıralanmıştır:

- Dengeli gerilim olayları (üç fazda alçak gerilim ve aşırı gerilim)
- Dengesiz gerilim olayları (tek veya iki fazda alçak ve aşırı gerilimler)
- Geçici hal hataları (3 faz- toprak, tek veya iki faz hataları, topraklı veya değişken)
- Gerilim düşümleri (büyük asenkron motorların direk kalkışı, hat veya üretim kayıpları)
- Güç sistem dalgalanmaları (ara bölge, iç bölge vs.)

6.2.2. Generatör ve güç dönüştürücü kaynaklı hatalar

Şebeke üzerinde generatörden ve güç dönüştürücüsünden kaynaklanan hatalar olması mümkündür. Bu hatalar şu şekilde özetlenebilir:

- Dengesiz empedans
- Dengesiz faz bağlantıları ve geçici durum hataları(3 faz- toprak, tek veya iki faz hataları)
- Hat kayıpları nedeniyle DA baradan geçen giriş ve çıkış güçleri arasındaki dengesizlik
- Güç –Anahtarlama hataları ve buna bağlı DA bara dalgalanmaları
- Farklı depolama cihazları ve kapasitör hataları ve dinamik frenleme ile DA bara koruması

6.2.3. Mekanik ve aerodinamik olaylar

Rüzgâr enerji sistemlerinde en sık karşılaşılan sorunlardan biri de mekanik ve aerodinamik sebeplere dayanmaktadır. Bu sebepler aşağıda sıralanmıştır.

- Kanat açısı ayarlayıcı/ kontrol uyumsuzluğu ve dengesiz eğim kontrol tepkisi
- Kanat açısı ayarlayıcı/ kontrol veya fren mekanizmasından kaynaklanan kaçak durumları
- Ani rüzgâr kaybı, kontrolsüz rampa girişi ve diğer aerodinamik giriş değişimleri
- Şiddetli rüzgâr türbülansları
- Yük faktörü

Generatörlerin şebekeye bağlanması; genlik, frekans ve faz açısının kontrol edilmesiyle sağlanmaktadır. Generatör sistemlerinin hız ve gerilim parametreleri kontrol edilerek şebekeye bağlanma şartları sağlanmış olur. Generatörün frekansını şebeke frekansına eşitlemek için motorun hızı ayarlanır. Generatörün gerilimini şebeke gerilimine eşitlemek için uyarma akımı ayarlanır. Generatör ile şebeke fazları arasındaki açı farkı sıfırlanır. Frekans, gerilim ve faz farkı şartları sağlandığında generatör devreye alınır. Senkron sinyali oluşur oluşmaz generatör artık devreye paralel bağlanmıştır ve senkron hızda çalışmaya başlar.

Mevcut şebekenin sorunları düşünüldüğünde akıllı şebekeler olarak nitelendirilen sistemin şebeke başta olmak üzere tüm sorunları daha kısa bir zaman diliminde tespit edip müdahale etmesi hedeflenmektedir. Böylece şimdiye kadar yaşanmış olası problemlerin tekrarlanmaması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının sistemde daha aktif olarak rol alması sağlanabilecektir.



7. ANALİZ, SONUÇ VE ÖNERİLER

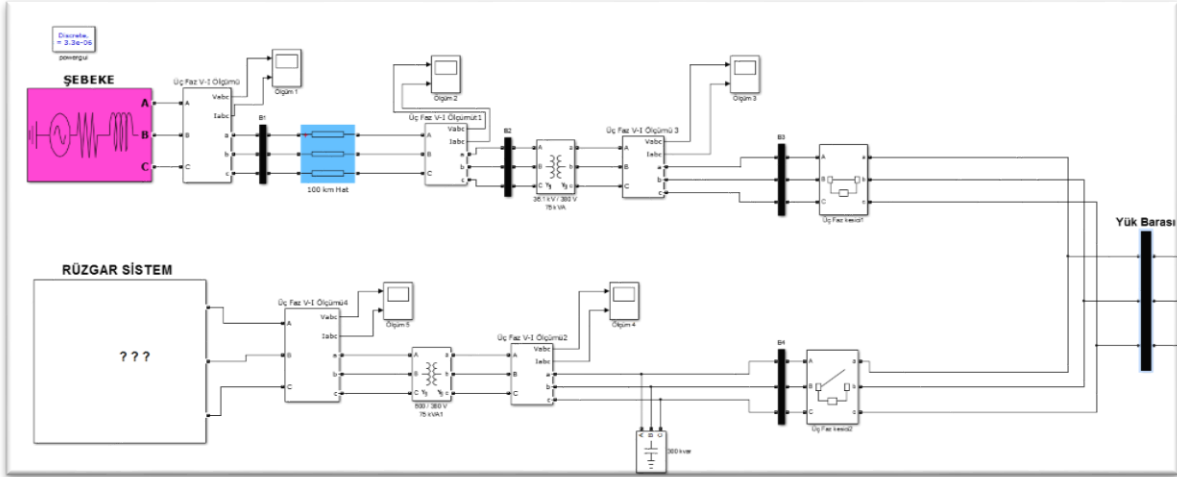
7.1. Analizlerin Yorumlanması

Bahsi geçen dört rüzgâr türbin sisteminin şebeke üzerindeki etkileri incelenmek istendiğinde öncelikle bölüm 6.2’de detaylandırılan, türbinin şebekeye enerji verebilmesi için belli şartların uygun hale getirilmesi gerekir. Analizler şu aşamalarda gerçekleştirilir: İlk bağlantı anında akım ve gerilim değerlerine bakılır, türbin şebekeye bağlandıktan sonra yük değişimine tepkisi gözlemlenir ve türbinin devre dışı bırakılması anında transformatörün giriş ve çıkış akım ve gerilim değerlerinin harmonik analizleri yapılır. Çizelge 7.1’de türbin ve yüklerin şebekede durma süreleri verilmiştir. Analizler bu senaryo üzerinden yapılacaktır.

Çizelge 7.1. Akıllı şebeke senaryoları

| | |
|-----------------------------|--|
| Şebeke | 0.s – 15.s ile 24.s-30.s arası yükler yalnızca şebeke üzerinden beslenmektedir. Tüm rüzgâr enerji kaynakları devre dışıdır. Tasarımda kullanılan şebeke kesicisi, 6. ve 24.s’ler arası açık konumda anahtarlanmıştır. |
| Şebeke dışındaki bileşenler | Rüzgâr enerjisi bloğunu oluşturan şebeke dışındaki bileşenler 6.s ve 24.s arası yükleri beslemektedirler. Bu sürede şebeke kaynağı devre dışıdır. Tasarımda kullanılan rüzgâr hattı ana kesicisi 6. ve 24.s’ler arası kapalı konumda anahtarlanmıştır. |
| SMSG | 30.s’ye kadar (1-2)s arası devrede(her iki saniyede devreye girer) |
| Yük1 | Sürekli devrededir. |
| Yük2 | (0,4 – 1) s ve (1,4 – 2) s aralığıyla 30 s’ye kadar devrededir. |
| Yük3 | (0,7 – 1) s ve (1,7 – 2) s aralığıyla 30 s’ye kadar devrededir. |

Şekil 7.1’de rüzgâr sistemi ile akıllı şebeke entegrasyonu sağlanmıştır. Şebeke bağlantısından önce sistem üç fazlı şebekeye bağlanmıştır. Rüzgâr türbinleri ölçüm kısmında seçilen rotor hızı, stator akım ve gerilimleri, aktif reaktif güç gibi bileşenlerin çıktılarını elde edilebilmektedir. Simülasyon 30 saniye boyunca sürmektedir. Daha iyi gözlem yapabilmek için simülasyon 2 saniye aralıklarla incelenmiştir.



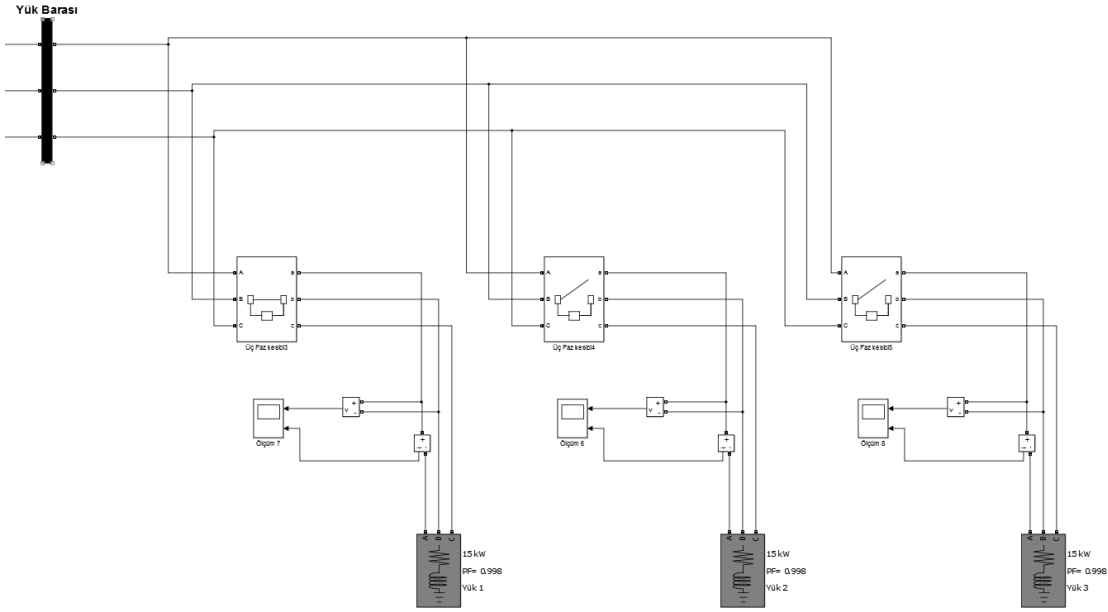
Şekil 7.1. Sistem görünümü

Türbinden şebekeye enerjinin iletilmesi üç adımda gerçekleşir. Birincisi alçak gerilimden orta gerilime yükseltilebilir türbin aşaması ikincisi orta gerilim olan dağıtım aşaması üçüncüsü ise iletim gerçekleşen yüksek gerilim aşamasıdır. Üç fazlı transformatörler şebekenin korunmasında görev alırlar. Şebeke bağlantısı öncesinde 100 km'lik bir hat bulunmaktadır. Hattan sonra şebekede kayıplar gözlemlenebilir.

7.1.1. Yüklerin devreye giriş ve çıkışları

Yüklerin şebeke bağlantısı Şekil 7.2'de verilmiştir. (0 – 15) s ve (24 – 30) arası yükler yalnızca şebeke üzerinden, (10 – 30) s arası rüzgâr türbini üzerinden beslenmektedir. Her biri 15 kW gücünde 3 adet yük mevcuttur ve bu yükler kademeli olarak devreye girip çıkmaktadırlar. Yüklerin devreye girip çıkma zamanları aşağıdaki gibidir.

- Yük 1: Sürekli devrede kalmaktadır.
- Yük 2: (0,4 – 1) s ve (1,4– 2) s arasında ve ilerleyen zamanda aynı periyotta olacak şekilde 30 s'ye kadar devreye girip çıkmaktadır.
- Yük 3: (0,7 – 1) s ve (1,7 – 2) s arasında ve ilerleyen zamanda aynı periyotta olacak şekilde 30 s'ye kadar devreye girip çıkmaktadır.



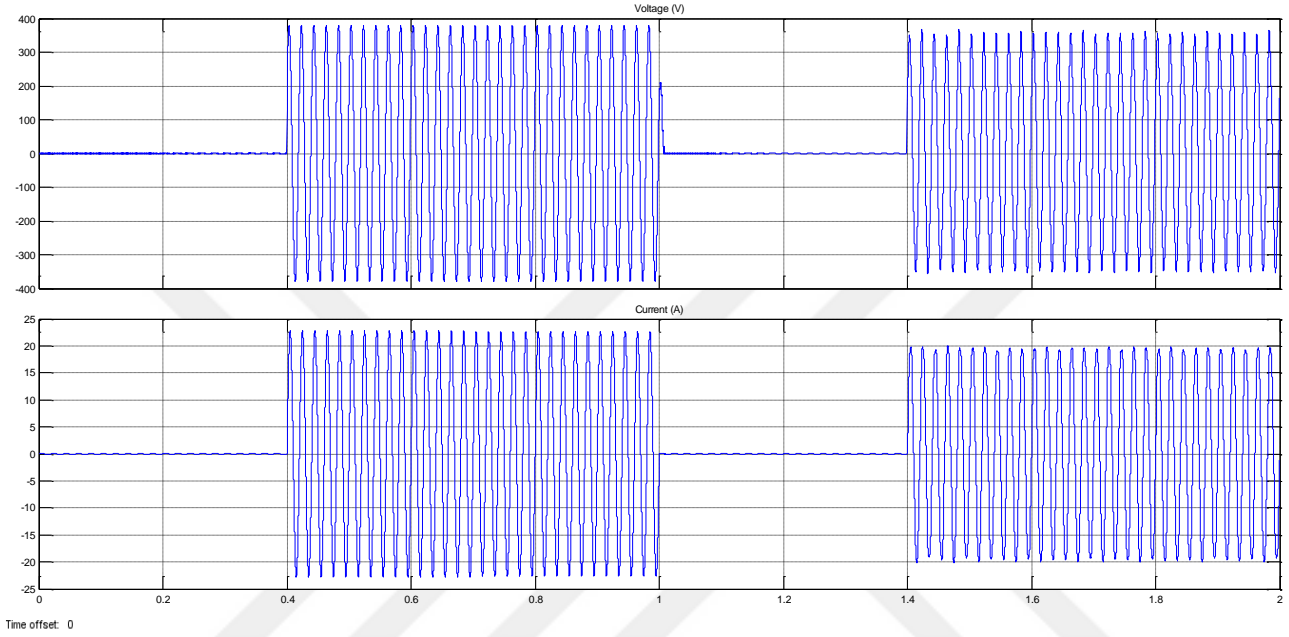
Şekil 7.2. Sistemdeki 15 KW'lık yüklerin görünümü

Şekil 7.3'de simülasyon süresi boyunca gerilim ve akım değerleri gösterilen Yük1, sürekli devrede ve mikro şebeke yapısından beslenmektedir. 1 s sonrası gerilim ve akım değerlerinde az miktarda yükselme (20 V gibi önemsiz bir miktar) olduğu gözlemlenmektedir. Bu küçük miktarda artışın sebebi, Yük2'nin 1,4s'de devreden çıkması ve Yük3'ün henüz devreye girmemiş olmasıdır (1,7s'de devreye girecektir). Sistem 400 V kararlı halde takip etmektedir.

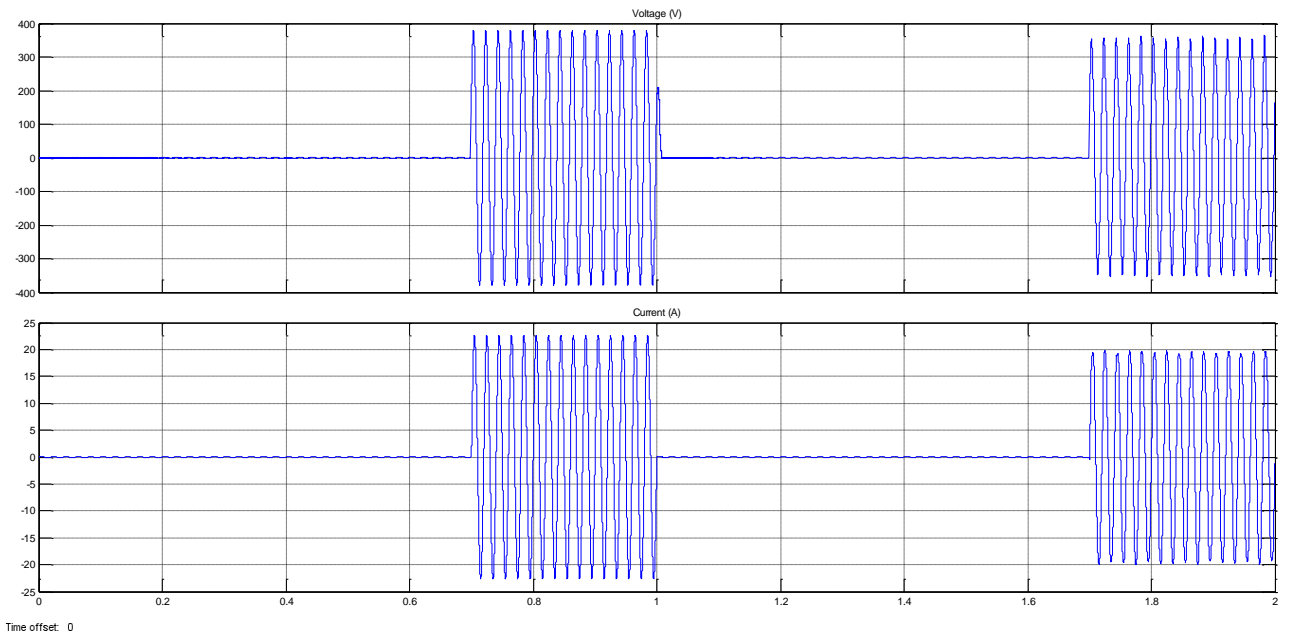


Şekil 7.3. Yük 1'in hat gerilimi

Şekil 7.4'de Yük2'ye ait barada görülen sinüsoidal gerilim ve akım değerlerine örnek olması için 0.s ve 2.s arası değerler verilmiştir. Tüm simülasyon süresi boyunca bu şekilde sinüsoidal gerilim ve akım gözlemlenmektedir. Yük 2; (0,4 – 1) s ve (1,4– 2) s arasında devreye girip çıkmaktadır. Devreye girme ve çıkma esnasında milisaniyelik kaymalar olmakla beraber şebekenin genel yapısını etkileyecek bir hareketlilik gözlemlenmemektedir. Şebeke gerilimi 400 V kararlı halde takip etmektedir.

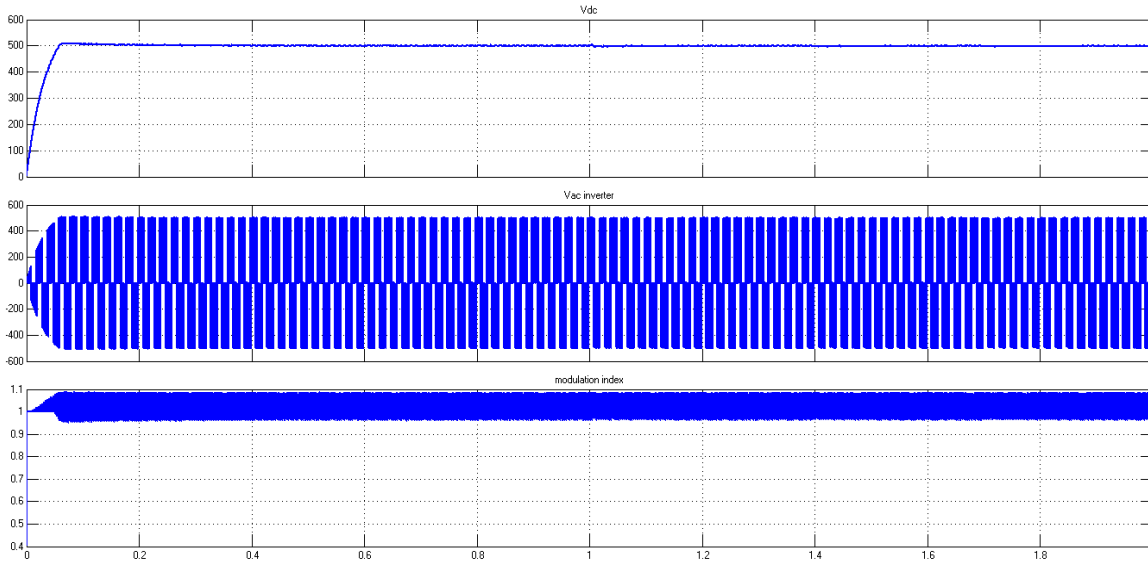


Şekil 7.4. Yük 2'nin hat gerilimi



Şekil 7.5. Yük 3'ün hat gerilimi

Şekil 7.5'te Yük3'e ait barada görülen sinüsoidal gerilim ve akım değerlerine örnek olması için 0.s ve 2.s arası değerler verilmiştir. Tüm simülasyon süresi boyunca bu şekilde sinüsoidal gerilim ve akım gözlemlenmektedir. Yük 3 (0,7 – 1) s ve (1,7 – 2) sarasında devreye girip çıkmaktadır. Devreye girme ve çıkma esnasında milisaniyelik kaymalar olmakla beraber şebekenin genel yapısını etkileyecek bir hareketlilik gözlemlenmemektedir. Şebeke gerilimi 400 V kararlı halde takip etmektedir.



Şekil 7.6. Evirici öncesi ve sonrası sistem gerilimleri

Evirici öncesi ve sonrası sistem giriş ve çıkışı ile ilgili gerilim değerleri şekil 7.6' da verilmiştir. İlk şekilde dönüştürücü sistem öncesinde gerilimin 500 V (doğru akım)olarak gözlenmektedir. Dönüştürücü sistem sonrasında ise sinüzoidal dalga şeklindeki (üç fazlı alternatif akım) gerilim 500 V olarak şebekeye verilmektedir. Son şekilde genlik modülasyonu değeri 1.1 olarak verilmiştir.

Sisteme eklenen yüklerin gücü, mevcut santrallere kıyasla daha az kapasitede olduğundan sistemde kullanılan 1,5-2 MW'lık rüzgâr santrali yükleri beslemek için yeterli olabilmektedir. Yük değerleri büyütülüp ve enerji kaynakları yükleri karşılayamaz durumda olduğunda, sistem çökebilir (yüklerin beslenemediği- blackout durumu) ve bu durum şebeke dalgalanmasına sebep olur.

7.2. Sonuç ve Öneriler

Son yıllarda rüzgar teknolojisinin daha yaygın olarak kullanılmasıyla beraber rüzgar türbinlerinin şebeke üzerindeki olumsuz etkileri de açığa çıkmaya başlamıştır. Enerjiye olan ihtiyacın giderek arttığı günümüzde bu gibi durumlarla karşılaşıldıkça, negatif etkilerin olabildiğince azaltılması için farklı çözüm yolları arayışına gidilmesi zorunluluk haline gelmiştir.

Enterkonekte şebekeye enerji bağlantısı sırasında rüzgâr türbinlerinin sağlaması gereken bazı şartlar vardır. Giriş ve çıkışta şebekede gerilimde dalgalanma ve aşırı akım çekilmesi olaylarını en az seviyeye indirmek için rüzgâr türbinlerinin şebekeye entegrasyon konusu önemlidir. Uygun bir türbin seçilmesi ve de kontrol yöntemi olması önemlidir. Rüzgâr türbininin şebekeye bağlantısı sağlanırken paralel olarak bağlanması gerekir. Faz eşitliği frekans eşitliği genlik eşitliği koşullarını sağlayıp sağlamadığına bakılır. Modelleme sırasında öncelikle dönüştürücü sistem şebekeden bağımsız çalışmakta, faz ve frekans eşitlikleri sağlandığında bağlantı aşamasına geçilmiştir. Şebeke bağlantısı esnasında gerilim harmoniklerinin %5'in altında kalması gerektiği elektrik tesisleri şebeke yönetmeliğinde belirtilmiştir.

Elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtım aşamalarında belirli koşullar sağlanmak zorundadır. Kalite ve süreklilik, sağlanması gereken bu koşullardan en temel ve vazgeçilmez olanlarıdır. Özellikle hassas yükler için gerilim ve akım dalga şekillerinin sinüs biçimine en yakın halde olması ve beslemede sürekliliğin sağlanması hayati öneme sahiptir. Mevcut şebeke yapısı nedeniyle kritik yüklere sahip son kullanıcılar, kalite ve sürekliliği sağlamak için bireysel önlemler alma zorunluluğu duymaktadır. Ancak, modern dünyanın vazgeçilmezi olan elektrik ve elektronik teknolojisinin çok hızlı ilerlemesi, günlük hayatın içine giren cihazların küçülmesi ve hızlanmasının yanında dezavantaj olarak aşırı hassaslaşmalarına yol açmaktadır. Bir şebekedeki tüm kullanıcıların hassas yüklere sahip olması, bireysel önlemlerin, yerini şebeke bazında alınacak önlemlere bırakmasını zorunlu kılmaktadır.

Tüm bu gelişmeler sonucunda tezde incelenen generatör tipleri arasında bir çizelge oluşturulup karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatörlerin aerodinamik ve elektrik verimi, dişli kutusu, dönüştürücü özellikleri, rotor hız aralığı, mekanik gerilme, harmonik problemler, gürültü problemleri, maliyet ve hata akımına etkisi gözlemlenebilmektedir [51].

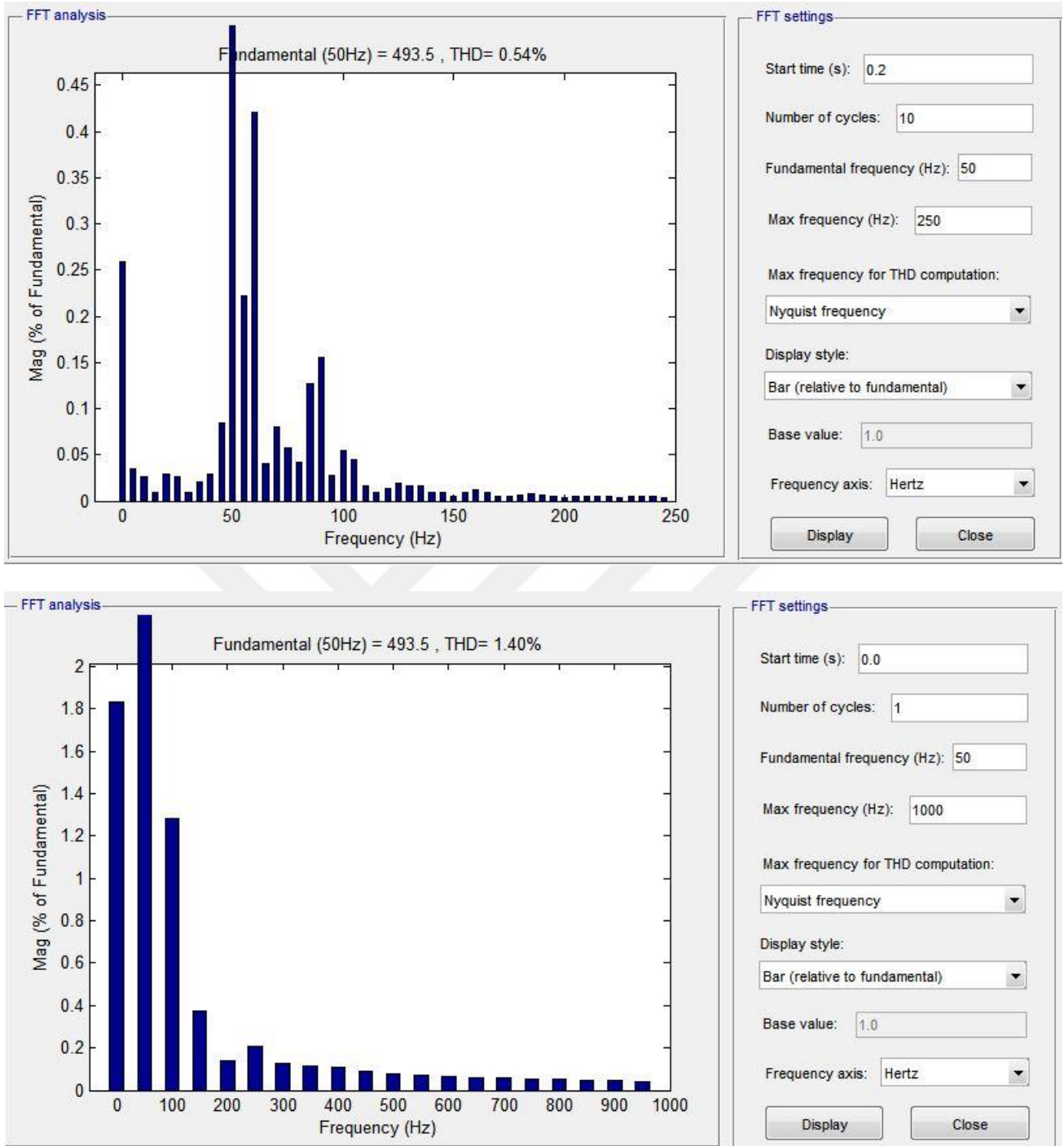
Çizelge 7.2. Generatör tiplerinin akıllı şebeke uygunluğunun karşılaştırılması

| | | | | |
|------------|-----|------|------|------|
| Ayrıntılar | MSG | ÇBAG | SKAG | RSAG |
|------------|-----|------|------|------|

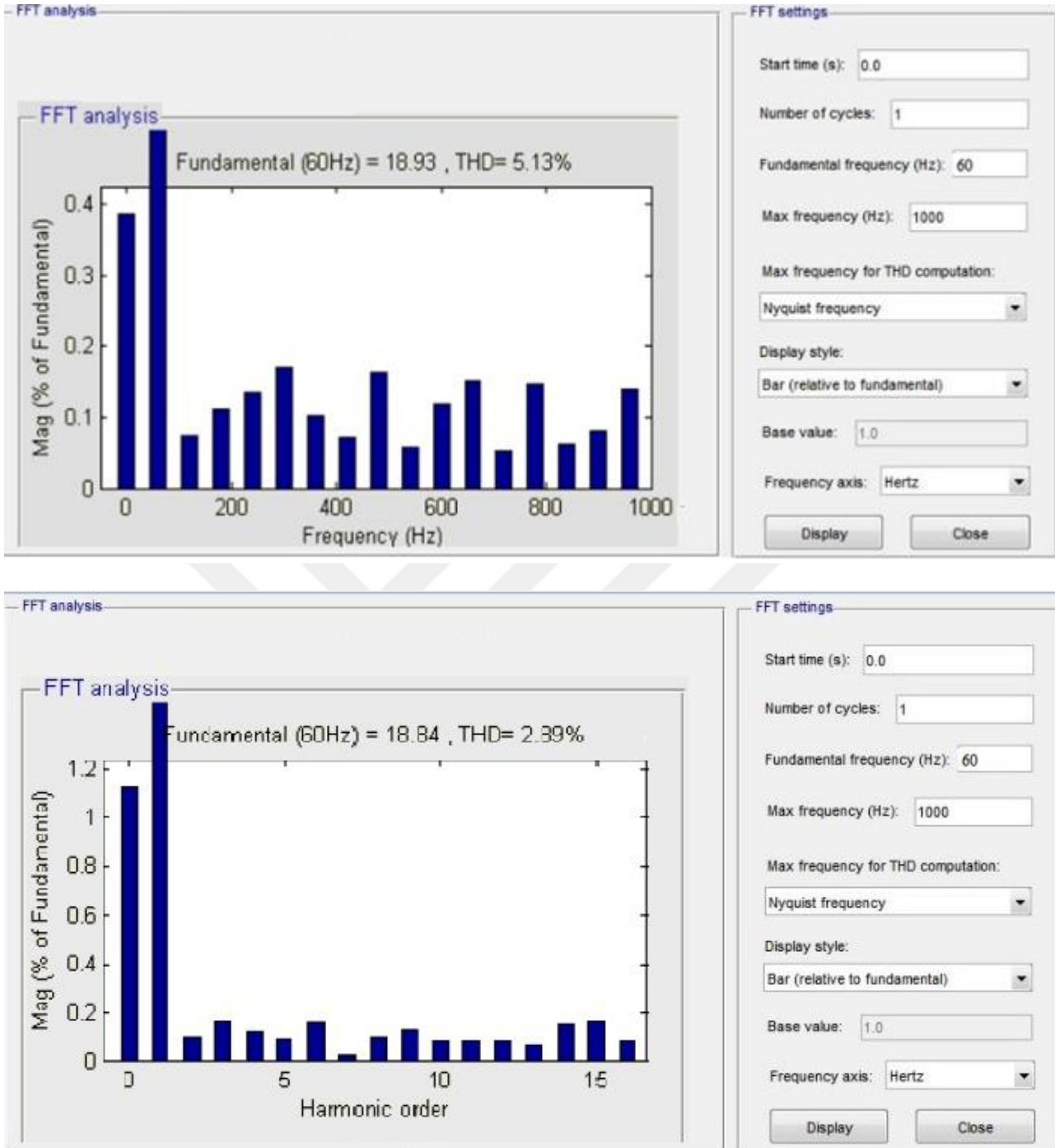
| | | | | |
|---------------------|---|---|--|---|
| Aerodinamik verim | Verimli | Verimli | Az verimli | Verimli |
| Elektrik verimi | Az verimli | Az verimli | Verimli | Az verimli |
| Dişli Kutusu | Yok | Var | Var | Var |
| Mekanik gerilme | Az | Az | Çok | Az |
| Dönüştürücü | Tam ölçekli dönüştürücü | Kısmi ölçekli dönüştürücü | Tam ölçekli dönüştürücü | Tam ölçekli dönüştürücü |
| Rotor Hızı | Geniş aralıktaki rüzgâr hızında çalışır | Geniş aralıktaki rüzgâr hızında çalışır | Sabit rüzgâr hızında çalışır | Geniş aralıktaki rüzgâr hızında çalışır |
| Harmonik Problemler | Oldukça az THD: 1.27% | Oldukça az THD:1.42 % | Yüksek THD:5.13% | Az THD=2.33% |
| Gürültü Problemi | Az gürültülü | Az gürültülü | Gürültülü | Az gürültülü |
| Maliyet | Yüksek | Normal | Düşük | Yüksek |
| Hata akımına etkisi | Güç dönüştürücü sistem sayesinde hata akımına bir etkisi olmaz ve generatör hata anında devre dışı kalır. | Hata akımını arttırmaz fakat güç dönüştürücüsü hatayı daha hızlı tespit ederek etkilenme süresini kısaltır. | Şebekeye direk bağlı olduklarından (dönüştürücü olmadan), hata akımını arttırmaz | Hata akımını arttırmaz fakat güç dönüştürücüsü hatayı daha hızlı tespit ederek etkilenme süresini kısaltır. |

Rotor hız aralığı olarak SKAG dışındaki türbinler geniş aralıktaki değişken rüzgâr hızlarında çalışabilmektedir. Eğer generatör torku artarsa (ani rüzgâr darbesi), generatör hızındaki artışı engellemek için generatör de elektromekanik tork oluşturur. Asenkron generatörlerde ise tork değişimiyle hızda küçük bir değişiklik olur. Böylece sürücüde meydana gelen gerilme senkron generatöre göre azdır. Karşılaştırılan generatörler arasında mekanik gerilmesi ve elektrik verimi en yüksek olan generatör SKAG'dir. Kanat açısı her türbin için sıfır alınarak KHO ile güç katsayısı karşılaştırması yapıldığında SKAG'nin diğerleri arasında maksimum verimi transfer ettiği sonucuna varılmıştır. Elektrik verimi, sisteme ilave edilen güç elektroniği devreleriyle azalmaktadır. SKAG şebekeye doğrudan bağlandığı için verimi yüksek olmaktadır [52-53].

Dönüştürücü sistemlere bakıldığında kısmi ölçekli dönüştürücü kullanan tek sistem ÇBAG'dir. Kısmi ölçek, toplam gücün yaklaşık %30'una karşılık geldiğinden sistemdeki dönüştürücü maliyetini düşürmektedir. Bu durum maliyet kıyaslamasında ön plana çıkabilmektedir. SKAG dönüştürücü sistem kullanmadığından maliyeti düşüktür.



Şekil 7.7. Generatörlerin şebekede meydana getirdiği THD oranları, sırasıyla SMSG, ÇBAG, SKAG, RSAG



Şekil 7.7.(devam) Generatörlerin şebekede meydana getirdiği THD oranları, sırasıyla SMSG, ÇBAG, SKAG, RSAG

Türbinin şebekeye harmonik etkisi, rüzgâr türbinlerinin akıllı şebeke entegrasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 7.7, tüm generatörlerin harmonik analiz sonuçlarını göstermektedir. SMSG(%1,27) ve ÇBAG(%1,42) tipi türbinler düşük gerilim harmoniği ile birbirlerine oldukça yakın seviyelerdedir. RSAG yapısal olarak ÇBAG'ye benzer olduğundan (kısmı dönüştürücü hariç) yaklaşık %2,5 gerilim harmoniği gözlemlenmiştir. SKAG düşük güç kalitesi ve şebekeye doğrudan bağlantılı

olması gibi sebeplerden %5,13 gerilim harmoniği ile şebeke yönetmeliğinin üstünde bir değerde kalmaktadır. Elde edilen sonuçlar SMSG ve ÇBAG tipi türbinlerin şebekeye uygunluğunu artırır niteliktedir.

Türbinlerin hata akımından etkilenme oranları bağlantı tiplerine bağlı olarak değişmektedir. ÇBAG şebekeye çift yönlü bağlandığından hata akımını bir süre artışına sebep olabilir. Fakat dönüştürücü sistemin müdahalesi ile hata daha hızlı tespit edilerek etkilenme süresi kısaltılır. SMSG şebekeye güç dönüştürücü aracılığıyla direk olarak bağlandığından hata akımına bir etkisi olmaz ve generatör hata anında devre dışı kalır. SKAG ise şebekeye doğrudan bağlandığı için hata akımını artırıcı etki göstermektedir.

Piyasadaki rüzgâr türbin generatörleri yorumlanacak olursa, doğrudan sürüş tekniği kullanan SMSG şebeke bağlantılı rüzgâr türbinlerinin gelecek vaat ettiği söylenebilir. Sistem güvenilirliği ve verimliliği, dişli kutularının kaldırılması ve güç elektroniği dönüştürücülerinin sadeleştirilmesiyle daha da artmaktadır. SMSG şebekeye bağlandığında, hız şebeke frekansı tarafından belirlenir ve sabittir. Bu yüzden şebekenin kararlılığında olumlu etki yaratabilir. Tercih edilebilirliği yüksek bir diğer generatör tipi de ÇBAG şebeke bağlantılı rüzgâr türbinleridir. Kısmi ölçekli dönüştürücü ile sisteme daha az bir maliyet ile katılabilir. Genellikle daha yüksek güçteki sistemler için (600 kW ve üzeri) ÇBAG daha uygun görülmektedir. Geçmişten geleceğe bakılacak olursa son yıllardaki gelişmelere paralel olarak SKAG tipi rüzgâr türbinlerinin kullanımının azaldığı söylenebilir.

Bu sonuçlardan hareketle, kullanım alanına ve toplam kurulu güce göre türbinlerin seçiminde farklılıklar görülmekte ve seçim kullanıcıya bırakılmaktadır. Gelecek çalışmalarda türbin çeşitlerinin akıllı şebekeler üzerindeki etkileri test düzeneği üzerinde denenebilir ve yorumlanabilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Enerji Enstitüsü, Türkiye'nin Güncel Kurulu Gücü
URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fenerjienstitusu.com%2Fturkiye-kurulu-elektrik-enerji-gucu-mw%2F&date=2016-05-09>, Son Erişim Tarihi: 17.03.2016.
2. Colak, I., Ayaz, M. S. ve Boran, K. (2015). CFD Based Wind Assesment in West of Turkey, *International Conference on Renewable Energy and Applications*, Palermo.
3. Çolak, İ. ve Demirtaş, M. (2008). Rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminin Türkiye deki Gelişimi, *Tübav Bilim Dergisi*, 1(2), 55–62.
4. Ackermann, T. (2005). *Wind Power in Power Systems*, New York: Wiley, 140 .
5. Blaabjerg, F., Liserre, M. and Ma, K. (2011). Power electronics converters for wind turbine systems. *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 281–290.
6. Burton T, Sharpe D. and Jenkins N, B. E. (2001). *Wind energy handbook*. New York: Wiley
7. Chen, H. L. Z. (2008). Overview of different wind generator systems and their comparisons, (August 2007), *IET Renewable Power Generation*,123–138.
8. Colak I. ve Kabalci E. (2014). Control Methods Applied in Renewable Energy Systems, *Green Energy and Technology*, 341–370.
9. Vournas, C. , Potamianakis, E. G. and Moors, C. (2004). An Educational Simulation Tool for Power System Control and Stability, *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(1), 48-55.
10. Badoni, P. and Prakash, S. B. (2014). Modeling and Simulation of 2 MW PMSG Wind Energy Conversion Systems,*Journal of Electrical Engineering & Technology*, 9(4), 53–58.
11. Samanvorakij, S. (2013). Modeling and Simulation PMSG based on Wind Energy Conversion System in MATLAB / SIMULINK, *Proceeding of Second Intelligent Conference on Advances in Electronics and Electrical Engineering*, 2(1), 978–981.
12. Yin, M., Member, S., Li, G. and Zhou, M. (2007). Modeling of the Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator for Integration,*Power Engineering Society General Meeting*, 1–6.
13. Singh, M., Muljadi, E., Jonkman, J., Gevorgian, V., Girsang, I., and Dhupia, J. (2014). Simulation for Wind Turbine Generators — With FAST and MATLAB-Simulink Modules, *NREL Technical Report*.
14. Li, H. and Chen, Z. (2008.). Design Optimization and Evaluation of Different Wind Generator Systems, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2396–2401.
15. Benelghali, S., El, M., Benbouzid, H., Member, S., and Charpentier, J. F. (2012), Generator Systems for Marine Current Turbine Applications : A Comparative Study, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 37(3), 554–563.

16. Tekin, K. (2006). *Rüzgâr Santrali İçeren Elektrik Sistemlerinde Etkilenmeler ve Kısa-Devre İncelemesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
17. Köse, G. (2010). *Hibrit (Güneş +Rüzgâr) Enerji Sisteminden Elektrik Üretimi: Kütahya Örneği*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
18. Özdemir, M. (2010). *Rüzgâr Enerjisi Santrallerinin Türkiye Elektrik Enerji Sistemine Olan Etkilerinin Analizi*, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
19. Kincay, O., Yumurtacı, Z. ve Bekiroglu, N. (2009). Rüzgâr Enerjisi Ders Notları, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi
20. Hepbasli, A. ve Ozgener, O. (2004), A review on the development of wind energy in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(3), 257-276.
21. Turhal, S. (2009). *Rüzgâr Türbinleri ve Kontrol Sistemleri*. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
22. Golding, E. W. (1976), *The generation of electricity by wind power*, London: Spon Ltd., 8-16.
23. Ergür, Ö. (2006), *Rüzgâr türbinleri ile enerji üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
24. European Commission Directorate-General for Energy, (2009). *Wind energy - The facts*, Technology, 1, 35-40.
25. Vural, A. (2011). *Rüzgâr Türbinleri için Kanat Açısı ve Rotor Hız Kontrolü Yaparak Verimliliğin Sağlanması*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
26. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2013). *Dünyada ve Türkiye’de enerji durumu - genel değerlendirme*, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı raporu, Ankara.
27. Global Wind Energy Council (2016). *Global wind statistics 2015*, Global Wind Energy Council Report , Brussels.
28. Türkeş Kalyoncu, Ö. (2012). *Avrupa Birliği’nde rüzgâr enerjisi : İspanya ve Türkiye örneği*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
29. Mehel, N. (2009). *Dünya’da ve Türkiye’de rüzgâr enerjisi : potansiyeli , kullanımı ve almanya-türkiye karşılaştırması*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, , Eskişehir.
30. İnternet: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2016), Dünya ve ülkemiz enerji tabii kaynaklar görünümü, Enerji ve Tabii Kaynaklar Raporu, URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.enerji.gov.tr%2FResources%2FSites%2F1%2FPages%2FSayi_11%2FSayi_11.html%23p%3D2&date=2016-05-09, Son Erişim Tarihi: 17.03.2016

31. Turkish Wind Energy Association (2016). *Wind Energy Statistics Report_January 2015*, Ankara :Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği.
32. İnternet: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, (2015), Türkiye Rüzgâr Haritası, URL.: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.eie.gov.tr%2Fimages%2Fres_haritasi.png&date=2016-05-09, Son Erişim Tarihi: 17.03.2016
33. Betz, A. (1926). *Wind Energy and its Exploitation by Windmills*, Gottingen: Van-Denhoeck Und Ruprccht, 64.
34. Glauert, H. (1935). *Windmills and fans, Aerodynamic Theory*, Germany: Springer, 3-5.
35. Avci, B. ve Yilmaz, T. (2012). *Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı Ve Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
36. Hau, E. (1985). *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics* (second edition), Germany: Springer.
37. Nurbay, N. ve Çınar, A. (2005). Rüzgâr Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması. *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, 1976–1980.
38. Wu, S., Lang, B. , Zargari, Y. and Kouro, N. (2011). *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*, Sydney: Wiley, 118-144.
39. Breu, F., Guggenbichler, S. and Wollmann, J. (2008). *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation*, London: Taylor and Francis, 58-62.
40. İnternet: Kabalci, E. (2015), *Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemleri ve Yapıları Ders Notları*, :http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fekblc.files.wordpress.com%2F2015%2F02%2F092015_pp2_tr.pdf&date=2016-05-10. Son Erişim: 20.04.2016.
41. Uyar, M., Gençoğlu, M.T. ve Yildirim, S. (2005). Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri İçin Generatör Sistemleri, *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Mersin, 173-178.
42. Demirbaş, S. (2015), Rüzgâr türbinlerinde enerji dönüşümü ders notları, Ankara: Gazi Üniversitesi, Ankara.
43. Singh, M., Muljadi, E., Jonkman, J. and Gevorgian, V. (2014). *Simulation for Wind Turbine Generators — With FAST and MATLAB*, National Renewable Energy Laboratory Report, USA.
44. Ulu, C. ve Komurgoz, G. (2012). Rüzgâr Türbini Uygulamaları için 500 kW Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tasarımı, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 46–50.
45. Burnham, D. J. Santoso, S. and Muljadi, E. (2009). Variable Rotor-Resistance Control of Wind Turbine Generators. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*.

46. Bindu, H. M. and Mandadi, N. (2014). Design and Modelling of Induction Generator Wind Power Systems by using MATLAB / SIMULINK, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 3(8), 11472–11478.
47. İnternet: Matlab DFIG detailed model,(2016). <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.mathworks.com%2Fhelp%2Fphysmod%2Fsps%2F+examples%2Fwind-farm-dfig-detailed-model.html&date=2016-05-10>. Son Erişim: 04.03.2016.
48. Lamchich, M. T. and Lachguer, N. (2012). Matlab Simulink as Simulation Tool for Wind Generation Systems Based on Doubly Fed Induction Machines. *MATLAB - A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications*, 2-4.
49. Colak, I., Fulli, G., Bayhan, S., Chondrogiannis, S. ve Demirbas, S. (2015). Critical aspects of wind energy systems in smart grid applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 155–171.
50. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (2013). *28.05.2014 tarihli Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği*, Ankara.
51. Mohseni, M., & Islam, S. M. (2012). Review of international grid codes for wind power integration: Diversity, technology and a case for global standard. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3876–3890.
52. Mudi, J. and Sinha,D. (2014). Comparative study among different wind turbines used for wind energy system, *International Conference on Non Conventional Energy*, 175–179.
53. Eriksson, J. and Eriksson, J. (2012). *Analysis of high frequency harmonics injected by wind turbines in a local grid*, Master Thesis, Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology,Sweden.



EKLER

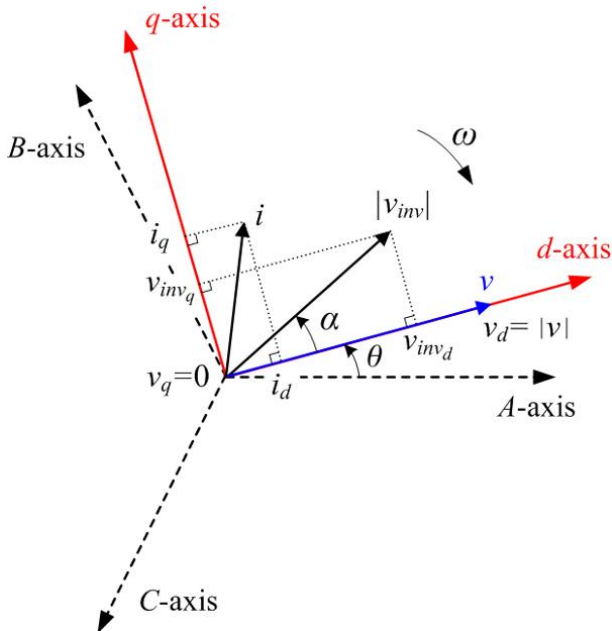
EK-1. Referans düzlem dönüşümü

Referans düzlem teorisi elektrik makinalarının analizini kolaylaştırmak amacıyla ve REDS'lerinin simülasyonunda veya sayısal kontrolünde kullanılır. 3 faz durgun referans düzlemi (abc düzlemi), 2 faz durgun referans düzlem (a b düzlemi) ve 2 faz döner düzlem (dq) düzlemi en yaygın kullanılan düzlemlerdir. Burada daha yaygın olarak tercih edilen abc-dq dönüşümü ele alınacaktır.

Abc/dq Referans Düzlem Dönüşümü

Abc düzleminde üç boyutlu olarak tanımlanan üç fazlı değişkenler, bir referans düzlemde birbirine dik olacak şekilde d ve q olarak tanımlanan iki eksene dönüştürülebilir. Bu dq eksen düzlemi, a ekseni ile d ekseni arasında isteğe göre seçilmiş bir θ açısı ile oluşturulur. Bu dq eksen düzlemi de θ 'ya bağlı olarak değişen bir ω hızıyla ($\omega = \frac{d\theta}{dt}$) uzayda döner. Son olarak, d ekseni için dönüşüm; $x_d = x_a \cos \theta + x_b \cos(\theta - 2\pi/3) + x_c \cos(\theta - 4\pi/3)$ şeklinde ifade edilir. Matrisel gösterimde ifade edilecek olursa;

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$



Şekil 1.1. Fazlı (abc) referans düzleminde iki fazlı (dq) düzlemine geçiş

EK-2.Sabit mıknatıslı senkron generatör matematiksel modeli

Üç fazlı sabit mıknatıslı senkron generatörün dq referans eksen takımındaki gerilim, akı ve güç ifadelerine ilişkin denklemler aşağıdaki gibidir.

$$\varphi_{sd} = L_d \cdot i_{sd} + \varphi_m$$

$$\varphi_{sq} = L_q \cdot i_{sq}$$

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_e \cdot \varphi_{sq}$$

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_e \cdot \varphi_{sd}$$

$$P_e = \frac{3}{2} (V_{sd} \cdot i_{sd} + V_{sq} \cdot i_{sq})$$

Burada; V_d, V_q ; dq eksenli stator gerilimleri, i_d, i_q ; dq eksenli stator akımları, φ_d, φ_q ; dq eksenli stator akıları, L_d, L_q ; dq eksenli endüktansları, R_s ; stator sargı direnci ve ω_e ; elektriksel hızdır. Yukarıdaki eşitliklerden sabit mıknatıslı senkron makineye ait genel moment ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir;

$$T_e = \frac{3}{2} p_p (i_q \cdot i_d (L_d - L_q) + \varphi_m \cdot i_q)$$

Bu çalışmada kullanılan yüzey mıknatıslı sabit mıknatıslı senkron generatörün özelliğinden dolayı L_d ve L_q endüktanslarının birbirine eşit olduğu bilindiğine göre bu makinede moment ifadesi i_q akımı ile doğrudan orantılıdır.

$$T_e = \frac{3}{2} p_p \cdot \varphi_m \cdot i_q$$

AC Asenkron Generatörler

Frekans f olan p sayılı kutup çiftine sahip asenkron makinanın senkron hızının formülü verilmiştir.

$$N_s = \frac{60f}{p}$$

EK-2.(devam) Sabit mıknatıslı senkron generatör matematiksel modeli

Statorda oluşan akımın (Φ) rotor tarafından kesilmesiyle indüklenen gerilimin (e) formülü verilmiştir.

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

İndüklenen gerilimle oluşan sirkülasyon akımı stator akısıyla etkileşime girerek momente sebep olacaktır. Bu indüklenen gerilim rotorda bir sirkülasyon akımı oluşturur. Rotor akımı ile stator akısı arasındaki etkileşim torka (T) neden olur.

$$T = k\Phi I_2 \cos \Phi_2$$

k : oransallık katsayısı

Φ : Stator akı (dalgasının) genliği

Φ_2 : rotor akımı ile rotor gerilimi arasındaki faz açısı

I_2 : rotor çubuklarındaki akımın genliği

Asenkron makinanın rotorunu rüzgâr türbinine bağlayıp senkron hızdan daha hızlı döndürdüğümüz zaman indüklenen akım ve gerilimin yönü motor çalışmanın tam tersi yönde olacağı için generatör çalışmaya geçecektir.

Asenkron makinelerde stator ile rotor arasında elektriksel bir bağlantı olmayıp, tamamen elektromanyetik indüksiyon prensibine göre çalışır. Asenkron makinenin çalışma prensibini transformatöre benzetebiliriz. Statordaki yüksek gerilim sargıları kendisi üzerinde kısa devre edilmiştir. Güç her iki sargı yönünde de akabilir. Rotor ile stator döner alanı arasındaki bağıl hız da transformatör prensibine göre açıklanabilir. Bu hız kayma indisi ile ifade edilir ve s ile gösterilir. Motor çalışmada pozitif generatör çalışmada negatiftir.

$$s = (N_s - N_r) / N_s = 1 - N_r / N_s$$

s : rotorun kayması

N_s : senkron hız = $60f/p$

N_r : rotor hızı

s : motor çalışmada pozitif, generatör çalışmada ise negatiftir.

EK-2.(devam) Sabit mıknatıslı senkron generatör matematiksel modeli

“s” büyüdükçe elektromekanik enerji dönüşümü büyür. “s” (kayma) büyüdükçe elektriksel kayıpta artar. Elektriksel kayıp ısı şeklinde açığa çıktığından (işletme sıcaklığı kabul edilebilir limitler içerisinde tutabilmek için) bu ısının rotordan uzaklaştırılması gerekir. Bu ısı küçük boyutlu makinelerde fan ile uzaklaştırılabilir. Büyük boyutlu makinelerde su sirkülasyonu ile yapılır.

Sürekli hal işletme şartlarında ve “s” kaymasında asenkron generatörde aşağıdaki hızlar tanımlanır.

Stator akısı hızı: N_s

Rotor mekanik hızı: $N_r = (1-s).N_s$

Rotora göre stator akısı hızı: $s.N_s$

Statora göre rotor akısı hızı: $N_s = N_r + s.N_s$

Asenkron makinadan elde edilebilecek elektromanyetik güç (P_{em}) ve tork (T_{em}) ifadeleri aşağıdaki denklemlerde verilmiştir. ω rotorun açısal hızını temsil etmektedir.

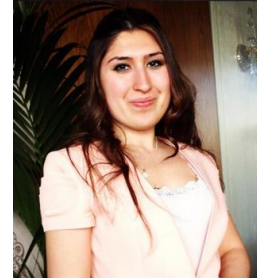
$$P = 3I^2 R_2 \frac{1-s}{s}$$

$$T_{em} = P_{em} / \omega$$

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AYAZ, Melike Selcen
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 17.08.1989, Balıkesir
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 202 89 56
 e-mail : melikeayaz@gazi.edu.tr



Eğitim

| Derece | Eğitim Birimi | Mezuniyet tarihi |
|---------------|---|------------------|
| Yüksek lisans | Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Mühendisliği | Devam Ediyor |
| Lisans | Sakarya Üniversitesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği | 2012 |
| Lise | Ankara Gazi Anadolu Lisesi | 2007 |

İş Deneyimi

| Yıl | Yer | Görev |
|------------|-------------------|---------------------|
| 2013-Halen | Gazi Üniversitesi | Araştırma Görevlisi |

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Çolak, İ. Ayaz, M.S. Boran, K. (2015). *CFD Based Wind Assesment in West of Turkey*, International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Palermo, İtalya.
- Irmak, E Ayaz, M.S. Gök, S.G. Şahin, A.B. (2014). *A Survey on Public Awareness Towards Renewable Energy in Turkey*, Third International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Milwaukee, USA.
- Çolak, İ. Ayaz, M.S. Bilgili, M. Boran, K. (2014). *Cost Benefit Analysis of Wind Turbines in Smart Grid Systems*, 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, Türkiye.

Hobiler

Yüzme, Dans





GAZİ GELECEKTİR..