

**DEĞİŞKEN HIZLI - DEĞİŞKEN KANAT AÇILI  
RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN TORK VE KANAT  
AÇISI KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Şehmus FİDAN**

**DANIŞMAN  
Prof. Dr. Hasan ÇİMEN**

**ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI  
TEMMUZ 2010**

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DEĞİŞKEN HIZLI - DEĞİŞKEN KANAT AÇILI**  
**RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN**  
**TORK VE KANAT AÇISI KONTROLÜ**

**Şehmus FİDAN**

**DANIŞMAN**  
**Prof. Dr. Hasan ÇİMEN**

**ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**TEMMUZ 2010**

## ONAY SAYFASI

Prof. Dr. Hasan ÇİMEN danışmanlığında,  
Şehmus FİDAN tarafından hazırlanan  
DEĞİŞKEN HIZLI - DEĞİŞKEN KANAT AÇILI RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN  
TORK VE KANAT AÇISI KONTROLÜ  
başlıklı bu çalışma, lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri  
uyarınca .../.../...  
tarihinde aşağıdaki jüri tarafından  
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

|               | Ünvanı, Adı, SOYADI        | İmza |
|---------------|----------------------------|------|
| <b>Başkan</b> | Yard. Doç. Dr. Uçman ERGÜN |      |
| <b>Üye</b>    | Yard. Doç Dr. Murat CANER  |      |
| <b>Üye</b>    | Prof. Dr. Hasan ÇİMEN      |      |

Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Rıdvan ÜNAL  
Enstitü Müdürü

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### DEĞİŞKEN HIZLI - DEĞİŞKEN KANAT AÇILI RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN TORK VE KANAT AÇISI KONTROLÜ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Bu tezde şebekeden bağımsız çalışan bir rüzgar türbininin, kanat açısının ayarlanmasıyla tork kontrolü yapılmıştır. Değişken kanat açılı rüzgar türbinleri için, tasarım sonrasında elde edilen aerodinamik gücün değiştirilebilir parametresi performans katsayısıdır. Performans katsayısı ise kanatların dikey ekseninde kendi etrafında çevrilmesiyle ayarlanabilmektedir. Kanat açısı ayarlanarak, rüzgardan en uygun enerji elde edilebilir ve güç değişimleri azaltılabilir. Böylece, çıkış gücü salınımları ve yüksek hızlardaki mekaniksel yüklenmelerde azaltılabilmektedir. Kanat açısını değiştirmek için kanat hareket mekanizmaları kullanılmaktadır. Birçok uygulama için kanat hareket mekanizması hidrolik veya elektrikli hareket mekanizmaları olabilirler.

Yapılan çalışmada kanat hareketini sağlamak için iki farklı hareket mekanizması modeli kullanılmıştır. Bu hareket mekanizmaları, doyum sınırlarına sahip integratörlü kanat hareket mekanizması ve 3 eğim hız seviyeli kanat hareket mekanizmasıdır. Nihayetinde 3 eğim hız seviyeli kanat hareket mekanizmasının, kanatların sürekli hareketini azalttığı ancak doyum sınırlarına sahip integratörlü kanat hareket mekanizmasına göre biraz daha fazla güç salınımı yaptığı gözlemlenmiştir. Simulasyonlar için Matlab/Simulink benzetim programı kullanılmıştır.

**2010, 90 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgar Türbinleri, Aerodinamik Tork Kontrolü, Kanat Açısı Kontrolü, Kanat Hareket Mekanizması, Matlab/Simulink

## **ABSTRACT**

M. Sc. Thesis

### **TORQUE AND BLADE PITCH CONTROL OF VARIABLE SPEED VARIABLE PITCH WIND TURBINES**

Afyon Kocatepe University

Institute for the Natural and Applied Sciences

In this thesis, aerodynamic torque control of isolated distribution network wind turbines is accomplished by adjusting pitch angle. The changeable parameter of aerodynamic power value after the desing of wind turbine is performance coefficient for variable-pitch wind turbines. Performance coefficient can be adjusted by turning blades around itself at vertical axes. By modifying blade pitch, maximum available wind energy can be obtained and variations in power can be reduced. Thus, output power oscillation and stresses of mechanical structure in high speed can be also reduced. Pitch actuators is used for the adjusting of pitch angle. Pitch actuators have hidrolic or electrical structure in many applications.

In this study, two different pitch actuators model is used in order to provide blade movement. These are pitch actuator as integrator with saturation and pitch actuator with three levels of pitching speed. After all using of the pitch acuator with three levels of pitching speed reduce the duration of blade movement but this will produce much more power oscillations than the pitch actuator as integrator with saturation. The PI controller has been used for pitch angle control and the models has been made up in the Matlab/ Simulink simulation enviroment.

**2010, 90 Pages**

**Anahtar Kelimeler :** Wind Turbines, Aerodynamic Torque Control, Blade Pitch Control, Pitch Actuator, Simulink

## TEŞEKKÜR

Öncelikle çalışmalarımda beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Hasan ÇİMEN'e, her konuda desteğini esirgemeyen değerli hocam Arş. Gör. Mehmet YUMURTACI, Arş. Gör. Hidayet OĞRAŞ'a ve bilgisine başvurduğum bütün akedemisyenlere, ayrıca beni yetiştirip bu günlere getiren aileme teşekkürlerimi sunarım.

Şehmus FİDAN

AFYONKARAHİSAR, Temmuz 2010

## İÇİNDEKİLER

|                                                                      |      |
|----------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET.....                                                            | i    |
| ABSTRACT .....                                                       | ii   |
| TEŞEKKÜR.....                                                        | iii  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                                  | ix   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                 | xiii |
| RESİMLER DİZİNİ .....                                                | xv   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                              | xvi  |
| <br>                                                                 |      |
| 1. GİRİŞ.....                                                        | 1    |
| <br>                                                                 |      |
| 2. GENEL BİLGİLER .....                                              | 6    |
| 2.1 Küresel ve Ulusal Enerji Göstergeleri.....                       | 6    |
| 2.1.1 Küresel Elektrik Enerjisi Tüketimi ve Talep Tahmini.....       | 6    |
| 2.1.1.1 Kömür .....                                                  | 6    |
| 2.1.1.2 Doğal Gaz.....                                               | 7    |
| 2.1.1.3 Sıvı ve Petrol Yakıtları.....                                | 8    |
| 2.1.1.4 Nükleer Enerji.....                                          | 8    |
| 2.1.1.5 Hidroelektrik Enerjisi ve Diğer Yenilenebilir Enerjiler..... | 8    |
| 2.1.2 Türkiye'nin Elektrik Enerjisi Tüketimi ve Talep Tahmini .....  | 9    |
| 2.1.3 Küresel Yenilenebilir Enerji Göstergeleri.....                 | 10   |
| 2.1.4 Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Göstergeleri .....            | 12   |
| 2.1.4.1 Hidroelektrik Enerjisi.....                                  | 13   |
| 2.1.4.2 Biyoyakıt Enerjileri.....                                    | 13   |
| 2.1.4.3 Güneş Enerjisi.....                                          | 14   |
| 2.1.4.4 Jeotermal Enerji .....                                       | 15   |
| 2.1.4.5 Rüzgar Enerjisi .....                                        | 16   |
| 2.1.5 Küresel Rüzgar Enerjisi Durumu.....                            | 16   |
| 2.1.6 Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Durumu .....                       | 18   |
| 2.2 Rüzgar Enerjisi İlgili Temel Kavramlar .....                     | 19   |
| 2.2.1 Rüzgarın Oluşumu ve Temel Özellikleri .....                    | 19   |

|             |                                                                       |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.2       | Rüzgar Enerjisi Tarihçesi.....                                        | 20 |
| 2.2.3       | Rüzgar Türleri .....                                                  | 20 |
| 2.2.4       | Rüzgarı Doğuran Etmenler.....                                         | 21 |
| 2.2.4.1     | Gradyan Kuvveti.....                                                  | 21 |
| 2.2.4.2     | Coriolis Kuvveti.....                                                 | 22 |
| 2.2.4.3     | Merkezkaç Kuvveti.....                                                | 22 |
| 2.2.4.4     | Sürtünme Kuvveti .....                                                | 23 |
| 2.2.5       | Rüzgarın Hızı ve Yönü .....                                           | 23 |
| 2.2.6       | Rüzgar Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları .....                    | 23 |
| 2.2.7       | Rüzgar Enerjisi Sistemlerinde Yaygın Olarak Kullanılan Kavramlar .... | 24 |
| 2.2.7.1     | Hava Yoğunluğu .....                                                  | 24 |
| 2.2.7.2     | Rotorun Süpürdüğü Alan.....                                           | 24 |
| 2.2.7.3     | Rüzgardan Elde Edilebilecek Teorik Güç .....                          | 25 |
| 2.2.7.4     | Kanat Hız Oranı .....                                                 | 26 |
| 2.2.7.5     | Performans Katsayısı .....                                            | 27 |
| 2.2.7.6     | Rüzgar Hızı Dağılımı .....                                            | 28 |
| 2.2.7.7     | Yüksekliğe Bağlı Rüzgar Hızı Değişimi.....                            | 29 |
| 2.3         | Rüzgar Türbinleri .....                                               | 30 |
| 2.3.1       | Rüzgar Türbini Parçaları.....                                         | 30 |
| 2.3.2       | Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması.....                           | 33 |
| 2.3.2.1     | Güç Sınıflarına Göre Rüzgar Türbini Türleri.....                      | 33 |
| 2.3.2.1.1   | Mikro Türbinler.....                                                  | 33 |
| 2.3.2.1.2   | Küçük Güçlü Rüzgar Türbinler .....                                    | 33 |
| 2.3.2.1.3   | Büyük Güçlü Rüzgar Türbinleri .....                                   | 33 |
| 2.3.2.1.4   | Megawatt Türbinleri.....                                              | 34 |
| 2.3.2.2     | Eksen Tipine Göre Rüzgar Türbinleri.....                              | 34 |
| 2.3.2.2.1   | Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri .....                                 | 34 |
| 2.3.2.2.1.1 | Rüzgarı Önden Alan Rüzgar Türbinleri .....                            | 34 |
| 2.3.2.2.1.2 | Rüzgarı Arkadan Alan Rüzgar Türbinleri .....                          | 34 |
| 2.3.2.2.2   | Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri .....                                 | 35 |
| 2.3.2.2.2.1 | Darrieus Rüzgar Türbinleri.....                                       | 35 |
| 2.3.2.2.2.2 | Savonious Rüzgar Türbinleri.....                                      | 35 |

|             |                                                                   |           |
|-------------|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.2.3     | Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri .....                              | 36        |
| 2.3.3       | Rüzgar Türbinlerinin Birbirleri ile Karşılaştırılması .....       | 36        |
| 2.4         | Rüzgar Türbini Sistemleri .....                                   | 38        |
| 2.4.1       | Rüzgar Türbin Sistemlerine Genel Bakış .....                      | 38        |
| 2.4.1.1     | Sabit Hızlı Rüzgar Türbinleri .....                               | 38        |
| 2.4.1.2     | Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri .....                            | 39        |
| 2.4.2       | Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler .....                | 41        |
| 2.4.2.1     | Doğru Akım Generatörleri .....                                    | 41        |
| 2.4.2.2     | Asenkron Generatörler .....                                       | 41        |
| 2.4.2.2.1   | Sincap Kafesli Asenkron Generatör .....                           | 41        |
| 2.4.2.2.2   | Rotoru Sargılı İndüksiyon Generatörleri .....                     | 42        |
| 2.4.2.2.2.1 | Çift Beslemeli İndüksiyon Generatörleri .....                     | 42        |
| 2.4.2.3     | Senkron Generatör .....                                           | 43        |
| 2.4.2.4     | Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörlerin Kıyaslanması ..... | 44        |
| 2.4.3       | Rüzgar Türbinlerinin Kontrolü .....                               | 45        |
| 2.4.3.1     | Pasif Hız Kesme Kontrolü .....                                    | 46        |
| 2.4.3.2     | Aktif Hız Kesme Kontrolü .....                                    | 47        |
| 2.4.3.3     | Kanat Hareket Mekanizması Kontrolü .....                          | 47        |
| 2.4.3.4     | Rüzgara Karşı Çevirme Mekanizması Kontrolü .....                  | 48        |
| 2.4.4       | Rüzgar Enerji Sistemlerinde Güç Elektronikliği .....              | 48        |
| 2.4.4.1     | Yumuşak Başlatıcılar .....                                        | 49        |
| 2.4.4.2     | Kapasitör Grubu .....                                             | 50        |
| 2.4.4.3     | Doğrultucular ve Eviriciler .....                                 | 50        |
| 2.4.4.4     | Frekans Eviricileri .....                                         | 51        |
| <b>3.</b>   | <b>MATERYAL ve METOT .....</b>                                    | <b>53</b> |
| 3.1         | Rüzgar Hızı Matematiksel Modeli .....                             | 53        |
| 3.1.1       | Rüzgar Hızı Matematiksel Modeli Eşitliği .....                    | 54        |
| 3.1.2       | Stokastik Bileşen .....                                           | 56        |
| 3.1.2.1     | Ortalama Rüzgar Hızı .....                                        | 56        |
| 3.1.2.2     | Rüzgar Rampa Hızı .....                                           | 57        |
| 3.1.2.3     | Rüzgar Ani Hızı .....                                             | 57        |
| 3.1.2.4     | Kule Gölgesi Etkisi .....                                         | 58        |

|           |                                                                     |            |
|-----------|---------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.1.2.5   | Stokastik Bileşen Simulink Uygulaması.....                          | 58         |
| 3.1.3     | Deterministik Bileşen.....                                          | 59         |
| 3.1.3.1   | Turbulans.....                                                      | 59         |
| 3.1.3.1.1 | Kaimal Spektrumu ve Spektral Güç Yoğunluğu .....                    | 60         |
| 3.1.3.1.2 | 0. ve 3. Harmonik Filtreleri .....                                  | 61         |
| 3.1.3.2   | Deterministik Bileşen Blok Diyagramı.....                           | 62         |
| 3.1.4     | Toplam Rüzgar Hızı Simulink Modeli .....                            | 62         |
| 3.2       | Rüzgardan Elde Edilen Güç Modeli.....                               | 63         |
| 3.2.1     | Hava Yoğunluğu Modeli.....                                          | 63         |
| 3.2.2     | Cp ve Ct Performans Katsayıları.....                                | 64         |
| 3.2.3     | Rüzgardan Elde Edilen Güç .....                                     | 65         |
| 3.2.4     | Rüzgardan Elde Edilebilecek Güç ve Torkun Toplam Modeli .....       | 66         |
| 3.3       | Mekanik Dişli Kutusu Modeli.....                                    | 67         |
| 3.4       | İndüksiyon Makinalarının Temelleri ve Modellenmesi .....            | 68         |
| 3.4.1     | Dq0 Dönüşümü.....                                                   | 69         |
| 3.4.2     | İndüksiyon Makinası Modeli.....                                     | 70         |
| 3.5       | Kanat Hareket Mekanizması Modeli.....                               | 72         |
| 3.5.1     | Doyum Sınırlarına Sahip İntegratörlü Kanat Hareket Mekanizması..... | 72         |
| 3.5.2     | 3 Eğim Oturtma Hız Seviyeli Kanat Hareket Mekanizması .....         | 73         |
| 3.6       | Hareket Mekanizması Kontrolü .....                                  | 75         |
| 3.7       | Senkron Kondenser .....                                             | 75         |
| 3.8       | Anahtarlama Direnç Grubuyla Gerilim Regülasyonu .....               | 76         |
| <b>4.</b> | <b>SİMULASYON SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>                        | <b>78</b>  |
| <b>5.</b> | <b>SONUÇLAR.....</b>                                                | <b>89</b>  |
| <b>6.</b> | <b>KAYNAKLAR .....</b>                                              | <b>91</b>  |
| 6.1       | İnternet Kaynakları.....                                            | 99         |
| <b>7.</b> | <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                               | <b>100</b> |
|           | <b>EKLER.....</b>                                                   | <b>101</b> |
|           | <b>EK-1 OECD Üye olan ve olmayan ülkeler.....</b>                   | <b>101</b> |

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>EK-2</b> Rüzgar Hızı Modeli Parametreleri .....                             | 101 |
| <b>EK-3</b> Kanat Açısına ve Kanat Hız Oranına Bağlı Performans Katsayısı..... | 102 |
| <b>EK-4</b> Kaimal Spektral Güç Yoğunluğu.....                                 | 103 |
| <b>EK-5</b> Hareket Mekanizması Modelleri.....                                 | 104 |
| <b>EK-6</b> Simulasyon Parametreleri.....                                      | 104 |
| <b>EK-7</b> Frekans Regülatörü Simulink Modeli .....                           | 106 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### 1. Simgeler

|            |                                                                 |
|------------|-----------------------------------------------------------------|
| $D$        | Rotor çapı (m)                                                  |
| $R$        | Rotor yarıçapı (m)                                              |
| $A$        | Rotorun süpürdüğü alan ( $m^2$ )                                |
| $H$        | Rotor göbeği yüksekliği (m)                                     |
| $W$        | Güç (watt)                                                      |
| $PWh$      | Peta Watt Saat (W) = Trilyon Kilo Watt saat                     |
| $Mt$       | Milyon ton                                                      |
| $Kt$       | Kilo ton                                                        |
| $G$        | Basınç kuvveti (atm)                                            |
| $\rho$     | Hava yoğunluğu ( $kg/m^3$ )                                     |
| $\Delta P$ | İzobarlar arası basınç farkı                                    |
| $h$        | İzobarlar arası uzunluk (m)                                     |
| $a$        | Merkezkaç kuvvetin birim kütleye etki eden ivmesi ( $m/sn^2$ )  |
| $V$        | Rüzgar hızı (m/s)                                               |
| $P$        | Mutlak basınç (atm)                                             |
| $R$        | İdeal gaz sabiti = $8.2056.10^{-5} m^3.atm.K^{-1}.mol^{-1}$     |
| $V$        | Hacim ( $m^3$ )                                                 |
| $n$        | Kütle (mol)                                                     |
| $T$        | Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık(°)                             |
| $M.W.$     | Havanın moleküler ağırlığı (g/mol)                              |
| $P_w$      | Rüzgardan elde edilen güç (watt)                                |
| $C_P$      | Rüzgardan elde edilen güç denkleminde ait performans katsayısı  |
| $\omega_w$ | Türbinin açısal hızı(rad/san)                                   |
| $\lambda$  | Kanat hız oranı                                                 |
| $T_w$      | Rüzgardan elde edilen tork (N.m)                                |
| $C_T$      | Rüzgardan elde edilen tork denkleminde ait performans katsayısı |

|                                   |                                                                  |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| $N_w$                             | Rüzgar türbinin devir türünden dönme hızı (devir/dak)            |
| $\beta$                           | Kanat açısı (°)                                                  |
| $f_w(v)$                          | Weibull dağılım fonksiyonu                                       |
| $k$                               | Şekil parametresi                                                |
| $c$                               | Ölçek parametresi                                                |
| $f_r(v)$                          | Rayleigh dağılım fonksiyonu                                      |
| $V_m(z_{ref})$                    | Ölçülen rüzgar hızı (m/sn),                                      |
| $z_{ref}$                         | Rüzgar hızının ölçüldüğü yükseklik (m),                          |
| $V_m(z)$                          | Bulunmak istenen rüzgar hızı (m/sn),                             |
| $z$                               | Rüzgar hızının hesaplanacağı yükseklik (m),                      |
| $\alpha$                          | Pürüzlük katsayısı                                               |
| $V_{det}(t), V_{sto}(t)$          | Deterministik ve Stokastik rüzgar hızı (m)                       |
| $V_{wr}(t), V_{wg}(t), V_{wt}(t)$ | Rüzgar rampa, ani hızları ve türbülans bileşenleri (m)           |
| $A_r, A_g$                        | Rampa ve ani hız genlikleri                                      |
| $T_{sr}, T_{er}$                  | Rampa hızı başlangıç ve bitiş zamanı (s)                         |
| $T_{sg}, T_{eg}$                  | Rüzgar ani hızı başlangıç zamanı (s)                             |
| $I_u$                             | Türbülans yoğunluğu (%)                                          |
| $\sigma$                          | Standart sapma,                                                  |
| $S_{kai}(f)$                      | Kaimal spektral güç yoğunluğu fonksiyonu                         |
| $x_L$                             | Türbülans uzunluk ölçeği (m)                                     |
| $H_{adm\{0p\}}, H_{adm\{3p\}}$    | 0.ve 3 harmonik filtreler                                        |
| $d_{tf}$                          | Normalizasyon parametresi                                        |
| $T_{gen}, T'_{wtr}$               | Generatör ve Düşük hızlı milden yüksek hızlı mile aktarılan tork |
| $\omega_{gen}, \omega_{wtr}$      | Generatör milinin ve türbin milinin açısal hızı (rad/san)        |
| $J_{gen}, J_{wtr}, J_{eco}$       | generatör, türbin ve elektromekanik atalet momentleri (Nm/s)     |
| $N_s, N_r$                        | Senkron ve rotor hız (devir/dakika)                              |

|                                              |                                                                 |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| $f_s$                                        | Statora uygulanan gerilimin frekansı                            |
| $2P$                                         | Kutup sayısı                                                    |
| $\omega_s, \omega_r, \omega_{kay}, \omega_m$ | Stator, rotor, kayma ve mekaniksel açısal hızı (rad/san)        |
| $S$                                          | Kayma                                                           |
| $P_{in}, P_o, P_{mil}, P_{FW}$               | Giriş, çıkış, generatör mili ve sürtünme kaybı güçleri (Watt)   |
| $V_s, V_r$                                   | Stator ve Rotor gerilimi (Volt)                                 |
| $I_s, I_r$                                   | Statora sargılarından geçen akım (Amper)                        |
| $\cos \phi$                                  | Güç katsayısı                                                   |
| $R_s, R_r, R_M$                              | Stator, rotor ve ortak sargı direnci (Ohm)                      |
| $L_{ls}, L_{lr}, L_m$                        | Stator, rotor sargı endüktansları ve ortak kaçak endüktansı (H) |
| $f_{dq0}, f_{abc}$                           | dq0 ve abc dönüşüm ifadeleri                                    |
| $i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$             | Stator ve rotora ait dq akımları                                |
| $V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}$             | Stator ve rotor ait dq gerilimleri                              |
| $\Psi_{sd}, \Psi_{sq}, \Psi_{rd}, \Psi_{rq}$ | Stator ve Rotora ait dq kaçak akıları                           |
| $K_p, K_I, K_D$                              | Oransal, integral ve türev sabiti                               |

## 2. Kısaltmalar

|       |                                                           |
|-------|-----------------------------------------------------------|
| IEO   | International Energy Outlook                              |
| EIA   | Energy Information Administration                         |
| OECD  | Organisation for Economic Co-operation and Development    |
| TEİAŞ | Türkiye Elektrik İletim A.Ş.                              |
| DPT   | Devlet Planlama Teşkilatı                                 |
| TEP   | Ton Eşdeğeri Petrol                                       |
| GSYİH | Gayri Safi Yurtiçi Hasıla                                 |
| HES   | Hidro Elektrik Santrali                                   |
| MTA   | Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü                     |
| EU    | European Union                                            |
| WBGU  | Wissenschaftlicher Beirat der Globale Umweltveränderungen |
| DMİ   | Devlet Meteoroloji İşleri                                 |

|       |                                              |
|-------|----------------------------------------------|
| REGSR | Renewable Energy Global Status Report        |
| JE    | Jeotermal Enerji                             |
| GE    | Güneş Enerjisi                               |
| RE    | Rüzgar Enerjisi                              |
| RES   | Rüzgar Enerjisi Santrali                     |
| EİE   | Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü |
| REPA  | Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası    |
| RT    | Rüzgar Türbini                               |
| AC    | Alternaf Akım                                |
| DC    | Doğru Akım                                   |
| GTO   | Gate turn off Thyristor                      |
| IGBT  | Insulated Gate Bipolar Transistor            |
| PWM   | Pulse Width Modulation                       |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 Enerji türlerine göre elektrik tüketimi ve 2030 yılı talep tahmini.....                       | 7  |
| Şekil 2.2 Türkiye'nin artan enerji talebi ve talep tahmini.....                                         | 10 |
| Şekil 2.3 1990-2008 arası küresel rüzgar gücü kapasite artışı .....                                     | 17 |
| Şekil 2.4 Değişik $\beta - \lambda$ değerlerine karşılık gelen performans katsayıları.....              | 28 |
| Şekil 3.1 Rüzgar rampa hızı simulink blok diyagramı .....                                               | 58 |
| Şekil 3.2 Ani rüzgar hızı simulink blok diyagramı.....                                                  | 59 |
| Şekil 3.3 Kaimal spektral güç yoğunluğu .....                                                           | 60 |
| Şekil 3.4 Toplam rüzgar hızı simulink modeli .....                                                      | 62 |
| Şekil 3.5 Rüzgar hızı simulasyonu .....                                                                 | 63 |
| Şekil 3.6 Hava yoğunluğu simulink modeli .....                                                          | 64 |
| Şekil 3.7 1 Atm, 15° sıcaklıkta, deniz seviyesinde hava yoğunluğu değeri .....                          | 64 |
| Şekil 3.8 Performans katsayısı( $C_p$ ) simulink modeli .....                                           | 65 |
| Şekil 3.9 $\beta = 0^\circ$ ve $\lambda = 8.1$ değerleri için maksimum performans katsayısı değeri..... | 65 |
| Şekil 3.10 Rüzgardan elde edilen aerodinamik gücün simulink modeli.....                                 | 66 |
| Şekil 3.11 Rüzgardan elde edilen aerodinamik torkun simulink modeli .....                               | 66 |
| Şekil 3.12 Rüzgardan elde edilen gücün toplam simulink modeli .....                                     | 66 |
| Şekil 3.13 Mekanik dişli kutusu simulink modeli .....                                                   | 68 |
| Şekil 3.14 ABC-Dq dönüşümü simulink modeli.....                                                         | 69 |
| Şekil 3.15 Dq-ABC dönüşümü simulink modeli.....                                                         | 70 |
| Şekil 3.16 Rüzgar türbini kanat eğim mekanizması .....                                                  | 72 |
| Şekil 3.17 Farklı $\beta$ ve $K$ değerleri için kanat açısı grafiği .....                               | 73 |
| Şekil 3.18 Farklı $\beta$ değerleri için kanat açısı grafiği.....                                       | 74 |
| Şekil 3.19 3 Hızlı kanat hareket mekanizması simulink modeli .....                                      | 74 |
| Şekil 3.20 PI kontrolörü simulink modeli .....                                                          | 75 |
| Şekil 3.21 Senkron kondenser ve uyarıtımı simulink modeli.....                                          | 76 |
| Şekil 3.22 Puls çözücülü PD tipi kontrolör .....                                                        | 76 |
| Şekil 4.1 Sabit rüzgar hızlı rüzgar türbinini simulink modeli (Model-1) .....                           | 78 |
| Şekil 4.2 Dinamik rüzgar hızlı rüzgar türbinini simulink modeli (Model-2).....                          | 79 |

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.3 İntegratörlü hareket mekanizması modelinin kullanıldığı tork ve kanat açısı kontrolü simulink modeli (Model-3) .....      | 79 |
| Şekil 4.4 3 hızlı kanat hareket mekanizmasının kullanıldığı aerodinamik güç ve kanat açısı kontrolü simulink modeli (Model-4) ..... | 80 |
| Şekil 4.5 Tüm modeller için Turbin Gücü – Kanat Açısı grafikleri .....                                                              | 82 |
| Şekil 4.6 Tüm modeller için rüzgar hızları .....                                                                                    | 82 |
| Şekil 4.7 Tüm modeller için frekans grafikleri .....                                                                                | 83 |
| Şekil 4.8 Tüm modeller için gerilim grafikleri .....                                                                                | 84 |
| Şekil 4.9 Tüm modeller için belli zaman aralığında detaylandırılmış gerilim grafikleri .....                                        | 84 |
| Şekil 4.10 Tüm modeller için akım grafikleri .....                                                                                  | 85 |
| Şekil 4.11 Tüm modeller için belli zaman aralığında detaylandırılmış akım grafikleri .....                                          | 85 |
| Şekil 4.12 Kontrollü yük gruplarının oluşturulan 4 model için çektikleri güç .....                                                  | 86 |
| Şekil 4.13 Senkron kondenser reaktif güç grafikleri .....                                                                           | 87 |
| Şekil 4.14 Senkron kondenser reaktif güç grafikleri .....                                                                           | 88 |
| Şekil 5.1 İntegratörlü kanat mekanizmasının zamanla açısal olarak değişen hareketi ...                                              | 89 |
| Şekil 5.2 3 hız seviyeli kanat mekanizmasının zamanla açısal olarak değişen hareketi .....                                          | 89 |

## RESİMLER DİZİNİ

|                                                                                    | Sayfa No |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Resim 2.1 Kanat hız oranına bağlı olarak değişen rotor verimliliği                 | 26       |
| Resim 2.2 Rüzgar türbini bileşenleri                                               | 31       |
| Resim 2.3 Savonius rotor(a) ve Darrieus rotor(b)'a ait rotor yapıları              | 36       |
| Resim 2.4 Sabit hızlı rüzgar türbininin genel yapısı                               | 39       |
| Resim 2.5 Değişken hızlı rüzgar türbininin genel yapısı                            | 40       |
| Resim 2.6 Belirli sınırlar dahilinde değişken hızlı rüzgar türbininin genel yapısı | 40       |
| Resim 2.7 Şebekeye sincap kafesli indüksiyon generatörüyle bağlı RT düzeneği       | 42       |
| Resim 2.8 Çift beslemeli indüksiyon generatörlü RT düzeneği                        | 43       |
| Resim 2.9 Şebekeye rotoru sargılı indüksiyon generatörüyle bağlı Rüzgar Türbini    | 43       |
| Resim 2.10 Güç kontrolü blok diyagramı                                             | 46       |
| Resim 2.11 Aktif durdurma kontrolü blok diyagramı                                  | 47       |
| Resim 2.12 Kanat eğim mekanizması hareketi                                         | 48       |
| Resim 2.13 Rüzgara karşı çevirme mekanizması                                       | 49       |
| Resim 2.14 Yumuşak başlatıcı güç devresi                                           | 49       |
| Resim 2.15 Kapasitör grubu şeması                                                  | 50       |
| Resim 2.16 Back-to-back frekans invertörünün yapısı                                | 51       |
| Resim 3.1 Belli bir bölge için rüzgar hızı yapısı                                  | 54       |
| Resim 3.2 Rüzgar enerjisi dönüşüm şeması                                           | 55       |
| Resim 3.3 Deterministik bileşen blok diyagramı                                     | 61       |
| Resim 3.4 İndüksiyon makinası d-ekseni eşitliği                                    | 71       |
| Resim 3.5 İndüksiyon makinası q-ekseni eşitliği                                    | 71       |
| Resim 3.6 Rüzgar türbini 3 hızlı kanat eğim mekanizması modeli                     | 73       |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                               | Sayfa No |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Çizelge 2.1 Türkiye elektrik enerjisi üretiminin yıllara göre gelişimi.....   | 10       |
| Çizelge 2.2 Yenilenebilir enerjilere ait belli başlı göstergeler.....         | 12       |
| Çizelge 2.3 2008 Rüzgar gücü kurulum ve kapasite ilk 10.....                  | 18       |
| Çizelge 2.4 Performans katsayısı sabitleri.....                               | 27       |
| Çizelge 2.5 Rüzgarı alış yönüne göre türbinlerin karşılaştırılması.....       | 37       |
| Çizelge 2.6 Büyüklüklerine göre türbinlerin karşılaştırılması.....            | 37       |
| Çizelge 2.7 Rüzgarı alış yönüne göre türbinlerin karşılaştırılması.....       | 37       |
| Çizelge 2.8 Rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörlerin kıyaslanması.....  | 45       |
| Çizelge 5.1 İki kanat hareket mekanizmasının performansının kıyaslanması..... | 90       |

## 1. GİRİŞ

Sürekli artan dünya nüfusu, teknolojinin gelişmesine paralel olarak araç kullanımının yaygınlaşması, sanayileşme, aydınlatma ihtiyacı vb. unsurlar enerji tüketimini gittikçe arttırmaktadır. Artan enerji talebine karşılık geçen yüzyılın başından bu yana kontrolsüzce tüketilen fosil yakıtlarının sebep olduğu çevre felaketleri ve küresel ısınma gibi dünyamızı ve dolayısıyla bizi tehlikeye sürükleyecek etkenler ancak alternatif küresel enerji politikalarıyla ve insanların bilinçlendirilmesiyle engellenebilir. Dahası sınırlı olan fosil yakıtlarının gün gelipde bitecek olması alternatif enerji kaynaklarına yönelmeyi zorunlu hale getirmektedir. Bu durum küresel çapta geleceğe yönelik ciddi çalışmaların yapılması zorunluluğunu doğurmuştur.

Artan enerji talebi ve tükenen fosil yakıtları, ülkelerin ve dünya siyasetinin şekillenmesinde önemli rol oynamaktadır. Oluşturulan enerji politikaları gereği sera gazı salınımının azaltılması, enerjinin verimli kullanılması, iletim hatları kayıplarının azaltılması, yenilenebilir enerji kaynakları için teşviklerin sağlanması vb. geleceğimizin enerji dünyasını şekillendirmeye yönelik bir dizi çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar, artan talebin olası sorunlarını azaltabilmeli ve daha yaşanabilir bir dünya için tüm insanları etkileyecek düzeyde olmalıdır. Aksi takdirde enerji krizleri patlak verecek, ülkeler ciddi ekonomik problemlerle karşılaşacaklar ve en kötüsü belkide çocuklarımız için güvenilir, temiz bir çevre kalmayacaktır. Bu kötü senaryoyu güzel sonlandırmanın yollarından biride temiz enerji olarak adlandırılan alternatif enerji kaynaklarına yönelmektir. Bu kaynaklar; güneş, rüzgar, dalga, jeotermal, doğal gaz, hidrolik enerji kaynakları vb. olarak örneklendirilebilir. Alternatif enerji kaynaklar fosil yakıtlarına rakip olabilecek düzeyde ve geleceğin enerji talebine karşılık verebilecek miktardadır. Çalışmamız boyunca alternatif enerji kaynaklarından biri olan ve geleceği oldukça parlak rüzgar enerjisinin hammaddesi olan rüzgarların nasıl oluştuğundan, rüzgardan elde edilebilecek teorik güçten, gücün oluşumunu etkileyen parametrelerden, bu gücü elektrik enerjisine çevirebilecek türbinlerden ve genel olarak bu türbinlerin yapılarından ve modelleme çalışmalarından bahsedilecektir.

Acar ve Doğan (2008) çalışmasında enerji talebinin gün geçtikçe arttığından, artan teleple birlikte oluşan çevre kirliliği ve sera gazı etkisinin yenilenebilir enerjilere yönelik çalışmalar yapmayı zaruri hale getirdiğinden bahsetmişlerdir. Güler (2006) elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarından özellikle güneş ve rüzgar enerjisinin dışa olan bağımlılığı azalttığından ve son yıllarda dünya’da ve özellikle Avrupa’da rüzgar türbinlerini geliştirme çalışmalarının hız kazandığından bahsetmiştir.

EIA raporunda (2007) küresel elektrik üretim değerinin 18,78 Trilyon KWh olduğu söylenmiştir. TEİAŞ (2008) verilerine göre ülkemizde elektrik üretiminin 2007 yılında 191 Milyar KWh olmuş ve on yıllık süreçte yaklaşık % 80’lik artış gerçekleşmiştir.

WBGU’nun (2003) raporuna göre deniz ve karalardan elde edilebilecek küresel teorik rüzgar enerjisi 277 Trilyon KWh olarak hesaplanmıştır. Bu potansiyelin sadece % 10-15 gibi bir değer kullanılabılır olduğu düşünüldüğünde 38 Trilyon KWh gibi küresel tüketimin yaklaşık 2 katı ekonomik rüzgar enerjisinin olduğu ortaya çıkmaktadır. REGSR Update (2009) raporunda RES’lerin, küresel çapta 2004 - 2008 yılları arasında toplam kapasitesinin 2,5 kat arttığını ve 121 GW değerine ulaştığı belirtilmiştir. Bu değerler yenilenebilir enerji kaynakları içinde rüzgarın önemli bir potansiyele sahip olduğunu anlamak bakımından önemlidir.

Ülkemizde EİE ve DMİ tarafından hazırlanan rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesi ve altyapı çalışmalarında kullanılması amacıyla, Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası oluşturulmuştur. Teorik olarak ülkemiz 160 Milyar KWh rüzgar potansiyeli değeriyle Avrupa’nın en yüksek teorik rüzgar enerjisine sahiptir (Oğulata 2003).

Rüzgar gücünün kullanımı 3000 yıllık maziye sahiptir. 20. yüzyılın başlarına kadar rüzgar gücü su pompalama, değirmenlerde ve yelkenlerde kullanılmaktaydı. Geçen yüzyılda en büyük rüzgar teknolojisi gelişmeleri Danimarkada olmuştur. İlk elektrik üreten rüzgar türbini Danimarkalı Poul La Cour (1891) tarafından yapılmıştır. Danimarkalı H.C. Vogt, J. Irminger ve Amerikalı P.S. Langley (1930) birlikte aerodinamik sürtünme ve kaldırma teorisini ortaya koydular. İkinci dünya savaşından sonra Johannes Juul 200 KW gücünde türbin üretti. Bu türbin indüksiyon generatörü ve

3 kanatlı aerodinamik güç kontrolü kullanması bakımından oldukça yenilikciydi. Rüzgar türbinlerinde diğer bir öncüde Alman Ulrich Hütter'dir. Hütter rüzgar türbini tasarımında modern aerodinamik prensiplerini kullanma üzerine yoğunlaştı. Çalışmaları hala günümüzde birçok tasarımın temelini oluşturmaktadır. Amerikalı Palmer Putnam (1941) 53 metre çapında 1250 KW'lık türbini inşa etti. Bu türbin özellikle kanat açısını değiştirilmesi bakımından önemliydi (Manwell et al. 2002, Vestergard et al. 2004, Ackermann 2005, Hau 2005, Matthew 2006).

Dönemin ilginç tasarımlarından biride Fransız Darrius G.J.M'in (1920) kendi adıyla bilinen dikey eksenli Darrius türbini icat etmesiyle gerçekleşti. Diğer bir önemli gelişmede Finlandiyalı S.J Savonius'un tasarladığı dikey eksenli rüzgar türbiniydi. Yapısının basit olması ve kolay inşa edilmesi tüm ilgileri üzerine çekmesini sağlamıştır (Dursun vd. 2005, Matthew 2006).

1970'li yıllardan sonra daha ucuz ve güvenilir elektrik fosil yakıtlı kaynaklardan elde edildi. 1940'larda rüzgardan üretilen elektrik 12-30 cent/KWh iken, fosil ve diğer tür yakıtlarından elde edilen elektrik 3-6 cent/KWh civarındaydı. Fosil yakıtlarının gittikçe düşen üretim maliyetleri özellikle 1970'li yıllara kadar rüzgar enerjisine olan ilgiyi azalttı (Matthew 2006). 1970'lerde petrolün sınırlı olduğu ve çevre tahribatına yol açtığına farkına varıldı. Bununla birlikte 1973 yılında Arap emirliğinin petrol ambargosu sonrasında insanlar petrol kökenli yakıtlar hakkında yeniden düşünmeye başladılar ve yenilenebilir enerji kaynaklarından özellikle rüzgar enerjisi çalışmalarına ağırlık verdiler (Muyeen 2009). Rüzgar türbinlerinde asıl gelişmeler 1970-1990'lı yıllar arasında olmuştur. Bu dönem içerisinde rüzgardan elde edilen enerjinin verimi arttırılmış ve üretim maliyetleri düşürülmüştür. Günümüzde hala bu trend devam etmektedir (Ackermann 2005).

Robert Hook'un (1667) anemometreyi icat etmesi rüzgar hızını ve yönünü belirleme açısından oldukça önemliydi. Jacques Charles (1787) havanın basınç ve sıcaklık arasındaki ilişkiyi gösterdi. Gaspard Coriolis (1835) dünya dönüşünün atmosferik hareketleri etkilediğini söyledi. 1840'lı yıllarda rüzgar ve fırtına kısmen anlaşıldı. 1869'da izobar eğrileri keşfedildi. 1922 - 1925 yılları arasında Albert Betz sabit bir

noktadan geçen hava akımının kinetik enerjiye çevirilmesiyle ilgili kendi adıyla bilinen Betz teoremini ortaya koydu ve performans katsayısının maksimum değerinin 0.593 olduğunu gösterdi. 1940'larda atmosfer balonu kullanılmaya başlandı. 1950'li yıllarda atmosferik olaylar matematiksel olarak ifade edildi (Hau 2006, Çelik 2008).

Wan ve Brian (1993) çalışmalarında, 1970'lerin sonundan 1980'lere kadar olan süreçte yenilenebilir enerjilerin şebekeye uyumunu sağlamak için çalışmaların yapıldığını ancak bu dönemdeki çalışmaların tutarlı bir veritabanında birleştirilmediğini ve günümüzün yüksek istatistiksel verilerinin kullanılmadığını belirttiler. Wan ve Brian'ın temel amaçlarından biri güç sistemine uyum sürecinde teknik limitleri tanımlamaktı. Yenilenebilir enerjilerin güç sistemine bağlanma sürecinde belirli bir sınırın olmadığını ve bu sınırın teknik sınır yerine ekonomik sınır üzerinden değerlendirildiğini söylediler. Bu yüzden rüzgar hızı dağılımının dikkate alınması gerektiğini ve rüzgar hızı veri tabanına ihtiyaç olduğu kanısına vardılar.

Wilkie vd. (1990) rüzgar türbinlerinin basit modelini gösterdi ve yazılarında rüzgar türbinlerini bileşenlerinin modellenmesi gerektiğini savundu ancak modeli doğru gösterim için yeterli değildi. Estanqueiro (2007) ve Petru (2003) güç kalitesi çalışmalarında kullanılabilecek rüzgar türbinlerini gösterdi. Sorensen (2004) ve Estanqueiro (2007) doğru rüzgar hızı gösterimine bağlı rüzgar çiftliği güç kalitesi değerlendirmesini gösterdiler.

Günümüzde artık güç sistem analizi oldukça geniş düzeyde incelenmiştir. Anderson ve Fouad (1993) ve Kundur (1993) güç sistemi bileşenlerinin dinamik modellerini gösterdi ve stabilite çalışmalarını analiz ettiler. Analizlerinin bazıları tüm güç sisteminin normal ve hata durumlarında simulasyonlarını içermektedir.

Muyeen vd. (2009) çalışmasında altı, üç, iki ve bir kütleli aktarma organlarının matematiksel modellerini belirtmiş ve birbirleriyle kıyaslamıştır. Birçok çalışmada iki ve bir kütleli aktarma organının matematiksel modeli mevcuttur ancak Muyeen vd. (2009), Iov vd. (2004) ve Munteanu vd. (2008) bir veya daha fazla kütleli aktarma organlarının simulasyon modellerinide oluşturmuştur.

Iov vd., Hansen vd., Amirat vd., Munteanu vd. birçok araştırmacı rüzgar türbinlerinin temel topolojilerini göstermiş ve rüzgar türbini sistemleri için bazı simulasyon ortamlarından bahsetmişlerdir. Ayrıca Iov vd. Matlab altında kullanılabilen özel rüzgar türbini sistemlerinde kullanılan elemanlar için kütüphane geliştirmişlerdir. Popa vd., Johnsen ve Eliasson, Abdollahi ve Vahedi, Iov vd., Dusonchet vd. ve daha birçok isim türbinlerin simulasyonları ve uygulamalarıyla ilgili çalışmalar yapmıştır (Iov et al. 2004, Popa et al. 2004, Johnsen and Eliasson 2004, Abdollahi and Vahedi 2005, Hansen et al. 2005, Amirat et al. 2007, Dusonchet et al. 2007, Munteanu et al. 2008).

Soter ve Wegener (2007) rüzgar türbinlerinde Danimarka yaklaşımı olarakda bilinen ilk indüksiyon generatörlü yaklaşımın sincap kafesli indüksiyon generatörüyle oluşturulduğunu belirtmiştir. Sonraki dönemlerde rüzgar türbinlerinde, rotoru sargılı asenkron generatörlerin kullanılarak rotor bileziklerinden rotor direncini ayarlayarak reaktif güç ve dönme hızı kontrolünün yapıldığını söylemişlerdir. Modern rüzgar türbinlerinde ise çift beslemeli indüksiyon generatörlerinin genel rüzgar türbini generatörlerinin kullanımına göre oranının %70'lere vardığını belirtmişlerdir.

Zhang vd. (2008) kanat açısı kontrolünün aerodinamik güç üretiminde kullanılan en yaygın kontrol yöntemi olduğunu belirtmiştir. Sharma vd. (2001) ve Zhang vd. (2008) kanat açısı kontrolüyle nominal rüzgar hızından yüksek hızlarda en uygun enerjinin elde edilebileceğini söylemişlerdir. Muljadi ve Butterfield (1999), El-Tous (2008), Sharma vd. (2001), Zhang vd. (2008) kanat açısı kontrolüyle mekanik yüklenmelerin azaltıldığını ve daha az güç salınımı yapılabileceğini çalışmalarında göstermişlerdir. Kulka (2004) farklı iki hareket eyleyici modeli kullanarak hareket eyleyicilerin hareket zamanlarını kıyaslamış ve 3 hızlı kanat hareket mekanizmasının daha az devrede kalma süresine sahip olduğunu ayrıca bu şekilde sürekli kanat hareketiyle oluşak mekanik yüklenmelerin azaltılabileceğini çalışmasında göstermiştir.

Bu çalışmada ise reid ve arkadaşlarının Matlab/Simulink için geliştirdiği model baz alınmış ve ilk modelde üç farklı yük bağlanarak simulasyon yapılmıştır. İkinci modelde sabir rüzgar hızı yerine dinamik rüzgar hızı modeli kullanılmıştır. Üçüncü modelde integratörlü hareket mekanizması eklenmiş ve kontrolü yapılmıştır. Dördüncü modelde ise 3 hızlı hareket mekanizması kullanılmış ve simulasyon sonuçları kıyaslanmıştır.

## **2. GENEL BİLGİLER**

### **2.1 Küresel ve Ulusal Enerji Göstergeleri**

#### **2.1.1 Küresel Elektrik Enerjisi Tüketimi ve Talep Tahmini**

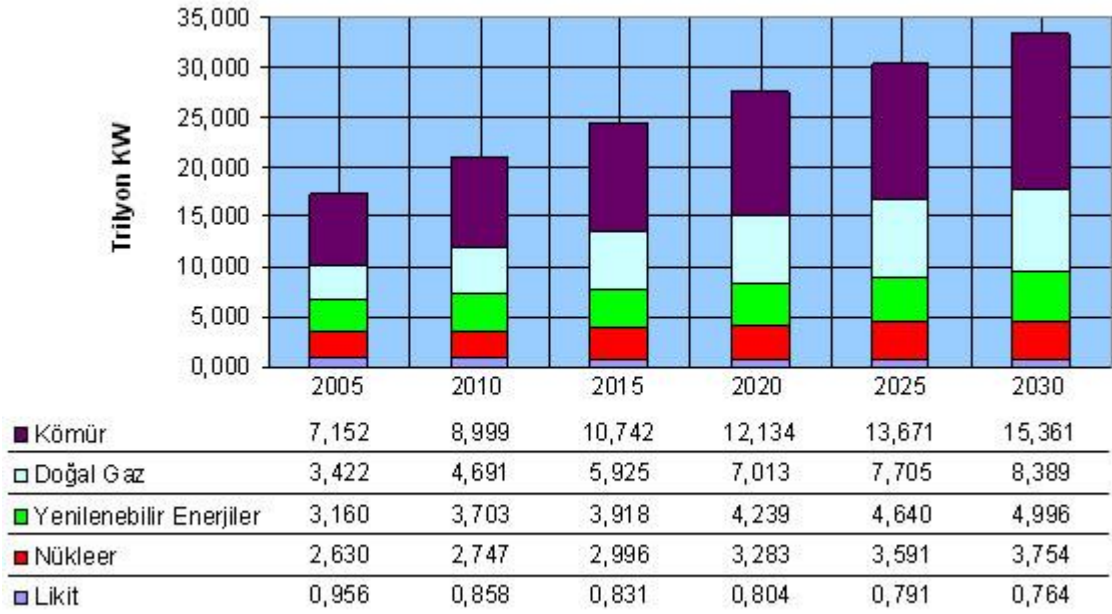
IEO 2008 raporunun 2030 yılı öngörülerine göre, son kullanıcıların en çok ihtiyaç duyacağı enerji türünün elektrik olarak kalacağı ve elektrik tüketiminin % 60 artacağı tahmin edilmektedir. 1990 yılından bu yana yıllık elektrik artışı % 1,9 ve % 2,9 değerleri arasında değişmiş ve talep tahmini için 2005 yılından sonrası için yıllık % 2,6 artış olacağı kabul edilmiştir. EIA 2007 yılı verilerine göre elektrik tüketim değeri 18.78 Trilyon KWh olarak hesaplanmıştır. Bu verilere bağlı olarak oluşturulan 2015 yılı tahmini üretim değeri 24.4 Trilyon KWh, 2030 yılı tahmini üretim değeri ise yaklaşık 33.3 Trilyon KWh değerine ulaşacağı öngörülmektedir. OECD'ye üye ülkelerde büyüme hızı % 1.3 iken OECD'ye üye olmayan ülkelerde bu oran % 4.0 olarak öngörülmektedir. Bu büyüme oranlarındaki fark, OECD'ye üye olmayan ülkelerde 2030 yılına kadar nüfusun % 36 artacağı ve dolayısıyla enerji talebinde artışıyla alakalıdır (IEO 2008). Şekil 2.1'de 2005 yılı verileri ve bu verilere dayalı olarak oluşturulan 2010-2030 yılları arasında 5'er yıllık tahmini değerler gösterilmektedir.

##### **2.1.1.1 Kömür**

Kömür dünyadaki halihazırda kullanılabilir enerji kaynaklarının en bol olanıdır. Katı ve stabil yapılı olduğu için, taşınması, depolanması ve kullanımı en emniyetli fosil yakıttır. Dünyanın birçok ülkesinde kolayca bulunabilmektedir. Kömürün uzun vadeli kullanım açısından stratejik öneme sahip olması nedeniyle, kömürden kaynaklanan problemleri azaltmaya yönelik çeşitli çalışmalar yapılmaktadır (Arslan 2007).

2030 yılı için yapılan talep tahmini raporuna göre, doğal gaz dünyanın en hızlı büyüyen enerji kaynağı olacak, kömür kaynakları en büyük pay sahibi olmaya devam edecektir. 2005 yılında kömür kaynaklı elektrik üretimi 7,152 Trilyon KWh değerine ulaşmış ve toplam elektrik üretiminin yaklaşık % 41'lik kısmını oluşturmuştur. 2030 yılına kadar

kömür kaynaklı üretim 2 kat büyüyecek ve toplam elektrik üretiminin % 46'sını karşılayacaktır. Petrol ve doğal gaz fiyatlarının yüksekliği özellikle ABD, Çin ve Hindistan gibi kömür yataklarının zengin olduğu ülkelerde kömür kaynaklı elektrik üretimini ekonomik olarak daha çekici hale getirmektedir (IEO 2008).



**Şekil 2.1** Enerji türlerine göre elektrik tüketimi ve 2030 yılı talep tahmini

### 2.1.1.2 Doğal Gaz

Petrol gibi fosil kökenli bir kaynak olan doğalgaz kül ve atık bırakmadan yanan, depolama sorunu olmayan, yanma sonucunda havayı kirleten kükürtdioksit ve karbondioksit gazlarını açığa çıkarmayan temiz bir enerji kaynağıdır (Gültekin ve Ölgün 1993). Geleneksel katı ve sıvı yakıtlar insanlar ve çevre için zehirli gazlar açığa çıkarırken doğalgaz yanmasında böyle bir sorun yoktur. Bu özellik günümüzde bu yakıt türünü çok popüler hale getirmiştir. 2008 yılı verilerine göre elektrik üretiminde doğal gaz en hızlı büyüyen enerji kaynağıdır. 2005’de 3.4 Trilyon KWh üretim yapılırken, bu miktarın 2030 yılında 8.4 Trilyon KWh olacağı ve % 140 büyümeye gerçekleştireceği öngörülmektedir. Doğalgaz kaynaklı yakıtlar; yakıt verimliliği, işletme esnekliği, daha kısa santral tasarlama ve inşa süresi, diğer teknolojilere göre daha düşük sermaye gerektirmesi gibi özellikleri sayesinde gittikçe daha çok tercih edilmektedir (IEO 2008).

### **2.1.1.3 Sıvı ve Petrol Yakıtları**

Yenilenemeyen temel enerji kaynaklarının başında yer alan petrol, dünya ekonomisinde hammadde, güç ve enerji kaynağı olarak çok önemli bir yer tutmaktadır. Petrolün mutlak bir alternatifi henüz mevcut değildir. Petrol, doğalgaz ve kömürden oluşan fosil yakıtlar sadece enerji hammaddesi değil, aynı zamanda birçok sanayinin (boya, plastik, eczacılık, kozmetik, demir-çelik, alüminyum vb.) ana girdilerinin üretildiği hammaddeler arasında yer almaktadır (Bayraç 2006). Ancak petrole bağımlılık gelişen teknolojiyle azaltılmaya çalışılmaktadır. 2030 yılı tahminlerine göre yakıt fiyatları varil başına 113\$ gibi oldukça yüksek değerlerde seyredecektir. Dünya çapında 2005'den 2030 yılına kadar sıvı yakıtlı elektrik üretimin yıllık ortalama % 0,9 azaltılması planlanmıştır. OECD ülkelerinde ise bu oranın % 2.4 olması öngörülmüştür (IEO 2008).

### **2.1.1.4 Nükleer Enerji**

Nükleer enerjiden enerji üretimi oldukça verimli bir şekilde sağlanmaktadır. Ayrıca küresel ısınmaya etki edecek gazları açığa çıkarmamaktadır. Bu enerji çeşidindeki en önemli sorun, radyoaktif atıkların yok edilmesi hususunda yaşanmaktadır (Çukurçayır ve Sağır 2006). Nükleer enerjiden elektrik üretimi 2005 yılında 2.6 Trilyon KWh iken 2030 yılında 3.8 Trilyon KWh olacağı tahmin edilmektedir. Yüksek fosil yakıt fiyatları, enerji güvenliği ve sera gazı salımı gibi endişelerden dolayı nükleer kaynaklı elektrik enerjisi üretimi gittikçe daha çekici hale gelmektedir. Nükleer enerji üretim santralleri iyice gelişince kurulum fiyatlarının ve bakım masraflarının yüksek olmasına rağmen kömür, doğalgaz ve sıvı yakıtlı elektrik üreten santrallerle ekonomik olarak yarışmaktadır. Buna rağmen nükleer tesislerin 25-30 yıl ile sınırlı ömürleri bittikten sonra ne olacağı endişesi vardır (IEO 2008).

### **2.1.1.5 Hidroelektrik Enerjisi ve Diğer Yenilenebilir Enerjiler**

Hidroelektrik enerji santralleri sera gazı salınımı yapmamaktadır. Dünyada hidroelektrik üretim potansiyelinin yarısının bile yapılması, sera gazı emisyonunu % 13

oranında azaltacaktır. Ayrıca erezyonun önlenmesinde önemli bir etkidir. Bununla birlikte HES'ler doğal ortamı olumsuz etkilemekte, su kalitesini bozmakta, ormanların tahrip olmasına ve su akışına kısmende olsa engel olmaktadır (Acar ve Doğan 2008). 2030 yılına kadar olan süreçte hidroelektrik enerji üretiminin yıllık ortalama % 1.8 artması öngörülmüştür. Doğalgaz ve benzin fiyatlarının yüksekliğinden dolayı yenilenebilir enerjilerden özellikle hidroelektrik enerjinin kullanımının yaygınlaşması için ısrar edilmektedir (IEO 2008).

### **2.1.2 Türkiye'nin Elektrik Enerjisi Tüketimi ve Talep Tahmini**

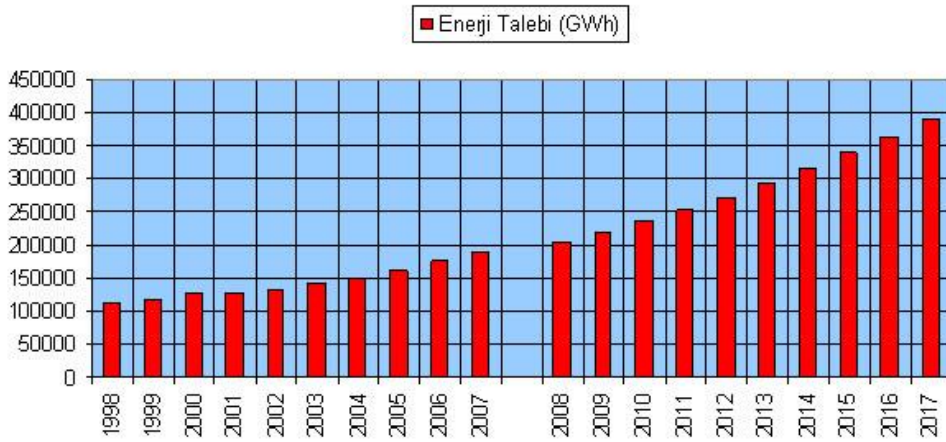
Ülkemizde 2006 yılındaki üretim değerleri 1970 yılına göre neredeyse 2 kat artmıştır. Bu artışta en büyük pay sahibi 6,7 kat büyüyen ve % 47 paya sahip olan linyit kömürü kaynaklı yakıttır. Yine bu süreçte tüketim değerleri ise 5,2 kat artıp 98138 bin TEP değerine ulaşmıştır. Tüketimdeki en büyük pay sahipleri petrol (% 33.2) ve doğal gaz (% 29.4) olmuştur. 2006 yılında enerji talebinin % 73.3'ü ithalat ile karşılanırken ancak % 26.7'si yerli üretimle karşılanabilmiştir. Elektrik enerjisi üretimi 2006 yılında % 8.5 artış ile 176.3 Milyar KWh, 2007 yılında ise % 8 artış ile 191.5 Milyar KWh olmuştur. Net üretim 2006 yılında 144.1 Milyar KWh, 2007 yılında ise 155.1 Milyar KWh (GWh) olmuştur. 1997 yılında 103 GWh olan elektrik üretimi 2007 yılında 191 GWh değerine ulaşmış ve on yılda % 85,4'lük büyüme gerçekleşmiştir. Üretimde en büyük pay sahibi ise 155 GWh değeriyle termik kaynaklı santrallerdir. Ardından 95 GWh değeriyle doğal gaz yakıtlı santraller gelmektedir (Akpınar vd. 2008). TEİAŞ kurumunun yaptığı talep tahmininde; 1998 - 2007 yılları arasındaki enerji talebi verilerine bağlı olarak 2008 – 2017 yılları için talep tahmininin ne olacağı hesaplanmıştır. Şekil 2.2'de gösterilen talep tahminine göre 2005-2010 yılları için % 5.8'lik artış 2010-2030 yılları arası için % 5.5'lik ortalama artış öngörülmüştür.

Talep tahminleri brüt talebi göstermektedir (TEİAŞ 2008). 1998 yılı değerleri ile dünyadaki toplam birincil enerji tüketiminin yaklaşık % 90'ı fosil yakıtlardan sağlanmıştır. Dünyadaki fosil yakıt rezervlerinin sınırlı ve bunların yakın bir gelecekte tükenecek olması, yenilenebilir enerji kaynakları arayışını hızlandırmıştır. Avrupa

Birliği'nin hedefi, 2010 yılındaki toplam enerji tüketiminin % 15'inin yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasıdır (DPT 2000).

**Çizelge 2.1** Türkiye elektrik enerjisi üretiminin yıllara göre gelişimi (İnt.Kay.9).

| Yakıt Türü                | 2002   | 2003   | 2004   | 2005   | 2006   | 2007   |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Taşkömürü + İthak Kömür   | 4093   | 8663   | 11998  | 13246  | 14217  | 15136  |
| Linyit                    | 28056  | 23590  | 22450  | 29946  | 32433  | 38295  |
| Fuel – Oil                | 9505   | 8153   | 6690   | 5121   | 4232   | 6470   |
| Motorin                   | 271    | 4      | 7      | 3      | 58     | 13     |
| Lpg                       | 35     | 3      | 33     | 34     | 0      | 0      |
| Nafta                     | 933    | 1036   | 940    | 326    | 50     | 44     |
| Doğal Gaz                 | 52497  | 63536  | 62242  | 73445  | 80691  | 95025  |
| Yenilenebilir+Atık        | 174    | 116    | 104    | 122    | 154    | 214    |
| Termik                    | 95563  | 105101 | 104464 | 122242 | 131835 | 155196 |
| Hidrolik                  | 33684  | 35330  | 46084  | 39561  | 44244  | 35851  |
| Jeotermal+Rüzgar          | 153    | 150    | 151    | 153    | 221    | 511    |
| Genel Toplam (Milyon KWh) | 129400 | 140581 | 150698 | 161956 | 176300 | 191558 |



**Şekil 2.2** Türkiye'nin artan enerji talebi ve talep tahmini

### 2.1.3 Küresel Yenilenebilir Enerji Göstergeleri

Günümüz dünyasında enerji tüketiminin çok önemli bir kısmı fosil yakıtlarından sağlanmaktadır. Öngörülere göre fosil yakıtlarının 30 yıl içinde tükenme noktasına gelecek olması, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini gittikçe arttırmış ve modern

insanda yeşil gezegenimizin dolayısıyla geleceğimizin ipoteğinin yenilenebilir enerji kaynaklar olduğu bilincini oluşturmuştur. Bununla birlikte küresel ısınmanın olası tehlikeleriyle karşı karşıya kalan dünyamızı koruma adına küresel politikalar geliştirilmeye ve geniş çaplı bilinç oluşturmaya çalışılmaktadır.

Küresel yenilenebilir elektrik enerjisi kapasitesi 2008 yılında yaklaşık 280 GW değerine ulaşmış ve 2004 yılına göre % 75 gibi oldukça önemli bir artış göstermiştir. 2004-2008 yılları arasında güneş pillerinden elde edilen elektrik 6 kat artmış ve 16 GW olmuştur. Yine bu dönem için rüzgar enerjisi toplam kapasitesi 2,5 kat artmış 121 GW olmuştur. Solar ısıtma kapasitesi 2 kat artmış 145 GWth değerine ulaşmıştır. Çizelge 2.2'de 2006-2008 yılları arasında yenilenebilir enerjilere ait kapasite değerleri gösterilmektedir.

Biodizel üretimi 6 kat artmış ve yıllık 12 Milyar litre, ethanol 2 kat artmış ve 67 Milyar lt değerine ulaşmıştır. 2007 yılına göre rüzgar enerjisi toplam kapasitesi % 29, şebekeye bağlı güneş pili % 70, ethanol ve biodizel üretimi % 34, biodizel, jeotermal, küçük hidroelektrik kapasiteleri ise ortalama % 8 artış göstermiştir.

2008 yılında yıllık yenilenebilir enerji yatırımı 120 Milyar \$ gibi oldukça önemli bir düzeye ulaşmıştır. ABD 24 Milyar \$'lık yatırımla küresel yenilenebilir enerji yatırımlarının % 20 payına sahip olmuştur. Çizelge 2.2'nin yıllık yenilenebilir enerji kapasite yatırımlarının 2006-2008 yılları içinde gelişimi gösterilmektedir (IEO 2008, REGSR Update 2009). Bu çizelge yenilenebilir kaynakların gelişiminin en önemli göstergelerinden biridir .

Enerji üretim teknolojisinde dünyada en hızlı büyümeyi 2008 yılında 13 GW değerine ulaşarak bir önceki yıla göre % 86 artış büyüyen fotovoltaiik güneş pilli üretimi gerçekleştirmiştir. Bu değer bir yıl içinde yaklaşık 2 milyon evin çatısına fotovoltaiik güneş pil takıldığı manasına gelmektedir. Su ısıtmak için kullanılan çatı tipi solar ısı toplayıcıları dünya çapında yaklaşık 50 milyon adet değerine ulaşmıştır. Ayrıca alan ısıtma içinde kullanımı gittikçe artmaktadır. Solar ısıtma toplayıcıları 2007 yılına göre % 15 büyüyerek 2008 yılında 145 GWth değerine ulaşmıştır (REGSR Update 2009).

Biokütle ve jeotermal enerji hem ısıtma hemde güç üretimi amaçlı olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda birçok ülkede alan ısıtması için kullanımı gittikçe

yaygınlaşmaktadır. Yapı ısıtma ve havalandırma için 30 ülkede 2 milyondan fazla yeraltı kaynaklı ısı pompası bulunmaktadır. Biyoyakıt üretimi (etanol ve biodizel) 2008 yılında 79 Milyar lt değerine ulaşmış ve 2006 yılına oranla % 75 gibi oldukça önemli sayılabilecek bir artış göstermiştir (REGSR 2007, REGSR Update 2009).

**Çizelge 2.2** Yenilenebilir enerjilere ait belli başlı göstergeler (REGSR Update 2009)

| <b>Belli başlı göstergeler</b>                                       | <b>2006</b> | <b>2007</b> | <b>2008</b> | <b>Birim</b> |
|----------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Yıllık Yenilenebilir Enerji Kapasite Yatırımları                     | 63          | 104         | 120         | Milyar Dolar |
| Yenilenebilir Güç Kapasitesi (Büyük hidroelektrik santralleri hariç) | 207         | 240         | 280         | GW           |
| Yenilenebilir Güç Kapasitesi (Büyük hidroelektrik santralleri dahil) | 1020        | 1070,0      | 1140        | GW           |
| Rüzgar Enerjisi Kapasitesi (Varolan)                                 | 74,0        | 94,0        | 121         | GW           |
| Şebekeye Bağlı Foto Voltaik Güneş Pilleri (Varolan)                  | 5,1         | 7,1         | 13          | GW           |
| FotoVoltaik Güneş Pili Üretimi (Yıllık)                              | 2,5         | 3.7         | 6,9         | GW           |
| Solar Su Isıtma Kapasitesi (Varolan)                                 | 105,0       | 126         | 145         | GWth         |
| Ethanol Üretimi (Yıllık)                                             | 39,0        | 50          | 67          | Milyar Lt    |
| Biodizel Üretimi (Yıllık)                                            | 6,0         | 9           | 12          | Milyar Lt    |

Gelişen ülkelerin kırsal alanında özellikle küçük hidroelektrik santralleri, biokütle enerjisi ve güneş pilleriyle elektrik sağlama gibi yenilenebilir enerji türleri ısı, hareket gücü ve su pompalamada on milyondan fazla insan farklı yerlerde kullanmaktadır. 25 milyon aile yemek ısıtma ve aydınlanma ihtiyacını biyogazla sağlamaktadır ve yaklaşık 2.5 milyon evde solar aydınlatma sistemleri kullanmaktadır (REGSR 2007).

#### **2.1.4 Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Göstergeleri**

Sanayileşmenin hızlı bir şekilde arttığı ülkemizde buna paralel olarak elektrik enerjisi talebide günbegün artmaktadır. 1990 yılında 57 Milyar KWh olan brüt elektrik enerjisi talebi 2001 yılında % 114 artış göstermiş ve 122 Milyar KWh (TWh) değerine ulaşmıştır. 2007 yılında 191 TWh değerine ulaşan brüt elektrik enerjisi talebi 2001 yılına göre % 56, 1990 yılına göre ise % 235 artış göstermiştir. 1990-2003 döneminde

ortalama yıllık brüt elektrik enerjisi talep artışı % 7.3 olarak gerçekleşmiştir. 1990'lı yılların başında yenilenebilir kaynakların toplam brüt değeri 23.2 TWh ile % 42 paya sahip iken 2007 yılında kurulu güçteki gelişmenin ağırlıklı olarak doğal gazla dayalı olması nedeniyle, 2007 yılı sonunda yenilenebilir enerjilerin brüt üretimi 36,5 TWh değerine ulaşmış ve toplam elektrik üretimine göre oranı yaklaşık % 20 değerine düşmüştür. Yenilenebilir kaynaklar içinde en büyük paya sahip olan hidrolik kurulu gücü 1990 yılında 23 TWh iken 2007 yılında % 52 artarak 35,8 TWh değerine çıkmıştır. 2001 yılında rüzgar ve jeotermal enerjilerinden elde edilen elektrik 152 GWh iken bu değer 2007 yılında % 336 artmış ve 511 GWh değerine ulaşmıştır. (İnt.Kay.9).

#### **2.1.4.1 Hidroelektrik Enerjisi**

Çeşitli enerji kaynakları içerisinde hidroelektrik enerji santralleri çevre dostu olmaları ve düşük risk potansiyeline sahip olmaları sebebiyle tercih edilmektedir. Hidroelektrik santralleri (HES); çevreye uyumlu, temiz, yenilenebilir, yüksek verimli, yakıt gideri olmayan, enerji fiyatlarında sigorta rolü üstlenen, uzun ömürlü, işletme gideri çok düşük dışa bağımlı olmayan yerli bir kaynaktır. Türkiye'de teknik olarak değerlendirilebilir hidroelektrik potansiyeli 36 GW'tır. Günümüz itibarıyla işletmede bulunan 150 adet HES 13,83 GW'lık kurulu güce ve toplam potansiyelin % 38'ine karşılık gelmektedir. 2008 yılında elektrik üretimimizin % 16,77 si hidroelektrik santrallerden temin edilmiştir. Son yıllarda yaşanan kuraklıklar hidroelektrik santrallerinden beklenen katkının sağlanamamasına neden olmuştur (İnt.Kyn.1).

#### **2.1.4.2 Biyoyakıt Enerjileri**

Biyoyakıt, içeriklerinin hacim olarak en az % 80'i son on yıl içerisinde toplanmış canlı organizmalardan elde edilmiş, her türlü yakıt olarak tanımlanır. Biyodizel, biyoetanol, biyogaz ve biyokütle olarak değerlendirilmektedir. Biyodizel, kolza (kanola), ayçiçek, soya, aspir gibi yağlı tohum bitkilerinden elde edilen bitkisel yağlardan veya hayvansal yağlardan üretilen bir yakıt türüdür. Biyodizel, tarımsal bitkilerden elde edilmesi nedeniyle, fotosentez yolu ile CO<sub>2</sub> 'i dönüştürüp karbon döngüsünü sağladığı için, sera

etkisini arttırıcı yönde etki göstermez. Ülkemizde de biyodizel çok soğuk bölgelerimizin dışında dizelin kullanıldığı her alanda kullanılabilecek bir yakıttır.

Biyoetanol, hammaddesi şeker pancarı, mısır, buğday ve odunsular gibi şeker, nişasta veya selüloz özlü tarımsal ürünlerin fermantasyonu ile elde edilen ve benzinle belirli oranlarda harmanlanarak kullanılan alternatif bir yakıttır. Ulaştırma sektöründe benzin ile karıştırılarak, küçük ev aletlerinde, kimyasal ürün sektöründe kullanılan biyoetanol, yakıtın oksijen seviyesini arttırarak, yakıtın daha verimli yanmasını sağlar, egzoz çıkışındaki zararlı gazları azaltır, kanserojen maddelerin çevreci alternatifidir, egzoz emisyonlarını azaltır. 3 Mt'u benzin tüketimi olmak üzere toplam 22 Mt akaryakıt tüketimi olan ülkemizde 160 Kt biyoetanol kurulu kapasitesi bulunmaktadır.

Biyogaz organik maddelerin (hayvansal atıklar, bitkisel atıklar, şehir ve endüstriyel atıklar) oksijensiz şartlarda biyolojik parçalanması (anaerobik fermantasyon) sonucu oluşan ağırlıklı olarak metan ve karbondioksit gazıdır. Biyogaz teknolojisi ise organik kökenli atık/artık maddelerden hem enerji eldesine hem de atıkların toprağa kazandırılmasına imkan vermektedir. Türkiye'nin hayvansal atık potansiyeline karşılık gelen üretilebilecek biyogaz miktarı 1,5 - 2 Milyon Ton Eşdeğer Petrol (Mtep) olduğu değerlendirilmektedir. Biyokütle kaynaklarımız; tarım, orman, hayvan, organik şehir atıkları vb.den oluşmaktadır. Atık potansiyelimiz yaklaşık 8,6 MTep olup bunun 6 MTep'i ısınma amaçlı kullanılmaktadır. 2007 yılında biyokütle kaynaklarından elde edilen toplam enerji miktarı 11 KTep'dir (İnt.Kyn.2).

#### **2.1.4.3 Güneş Enerjisi**

Doğal bir enerji kaynağı olan güneş enerjisi (GE) yenilenebilir enerji kaynakları içinde en popüler enerji türlerinden biridir. Coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu GE potansiyeli yüksek olan Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2.640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışınlam şiddeti 1.311 KWh/m<sup>2</sup>.yıl (günlük toplam 3,6 KWh/m<sup>2</sup>) olduğu tespit edilmiştir. Ülkemizin GE potansiyeli 380 milyar KWh/yıl olarak hesaplanmıştır. GE teknolojileri yöntem, malzeme ve teknolojik düzey açısından çok çeşitlilik göstermekle birlikte iki ana gruba ayrılabilir:

*Isıl Güneş Teknolojileri ve Odaklanmış GE:* GE'den ısı elde edilen bu sistemlerde, ısı doğrudan kullanılabilceği gibi elektrik üretiminde de kullanılabilir. Bu santraller, değişik ayna konumları kullanmak sureti ile güneşin enerjisini yüksek sıcaklıklı ısıya dönüştürerek elektrik üretir. İstenen güçte kurulabilmeleri nedeniyle genellikle sinyalizasyon, kırsal elektrik ihtiyacının karşılanması vb. alanlarda kullanılmaktadır.

*Güneş Pilleri:* Fotovoltaik piller olarakda adlandırılan yarı iletken malzemeler güneş ışığını doğrudan elektriğe çevirirler. Güneş pilleri için en önemli dezavantaj, halen ticari olan silisyum kristali ve ince film teknolojisiyle üretimlerinin olağanüstü yüksek maliyetlerde olmasıdır. Güneş pili kullanım maliyetlerinin düşmesi ve verimliliğin artması ile Türkiye'de güneş pili üretimine bağlı olarak enerji üretiminin artacağı beklenmektedir. Ayrıca, Türkiye GE potansiyel atlasına göre bu teknoloji ile 380 milyar KWh/yıl enerji üretilebileceği hesaplanmıştır.

Ülkemizde kurulu olan güneş kolektörü miktarı yaklaşık 12 milyon m<sup>2</sup> ve teknik GE potansiyeli 76 MTep olup, yıllık üretim hacmi 750.000 m<sup>2</sup>'dir ve bu üretimin bir miktarı da ihraç edilmektedir. Bu kullanım miktarı, kişi başına 0,15 m<sup>2</sup> güneş kolektörü kullanıldığı anlamına gelmektedir. GE'den ısı enerjisi yıllık üretimi 420.000 TEP civarındadır. Bu haliyle ülkemiz dünyada kayda değer bir güneş kolektörü üreticisi ve kullanıcısı durumundadır (İnt.Kyn.3).

#### **2.1.4.4 Jeotermal Enerji**

Jeotermal enerji yerin derinliklerindeki kayalar içinde birikmiş olan ısınn akışkanlarca taşınarak rezervuarlarda depolanması ile oluşmuş sıcak su, buhar ve kuru buhar ile kızgın kuru kayalardan yapay yollarla elde edilen ısı enerjisidir. Modern jeotermal elektrik santrallerinde CO<sub>2</sub> gibi gazların salınımı çok düşük olduğundan temiz bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Dünyada JE kurulu gücü 9.700 MW, yıllık üretim 80 milyar KWh olup, elektrik dışı kullanım ise 33.000 MW'tır. Türkiye, oldukça yüksek jeotermal potansiyele sahip olan bir ülkedir. Ülkemizin jeotermal potansiyeli 31.500 MW'tır. Bu güne kadar bu potansiyelin % 13'ü (4.000 MW) MTA tarafından kullanıma hazır hale getirilmiştir. Türkiye'deki jeotermal alanların % 55'i ısıtma

uygulamalarına uygundur. Ülkemizde, JE kullanılarak 1200 dönüm sera ısıtması yapılmakta ve 15 yerleşim biriminde 100.000 konut JE ile ısıtılmaktadır. JE arama çalışmaları son yıllarda canlandırılmış, 2003 yılından itibaren MTA Genel Müdürlüğü tarafından yapılan arama çalışmaları sonucu 840 MW JE kaynağı tespit edilmiştir. JE potansiyelimizin 1.500 MW'lık bölümünün elektrik enerjisi üretimi için uygun olduğu değerlendirilmekte olup kesinleşen veri şu an için 600 MWe'dir. 39 MW'lık bir bölümü elektrik üretim amaçlı kullanılmaktadır (İnt.Kyn.4).

#### **2.1.4.5 Rüzgar Enerjisi**

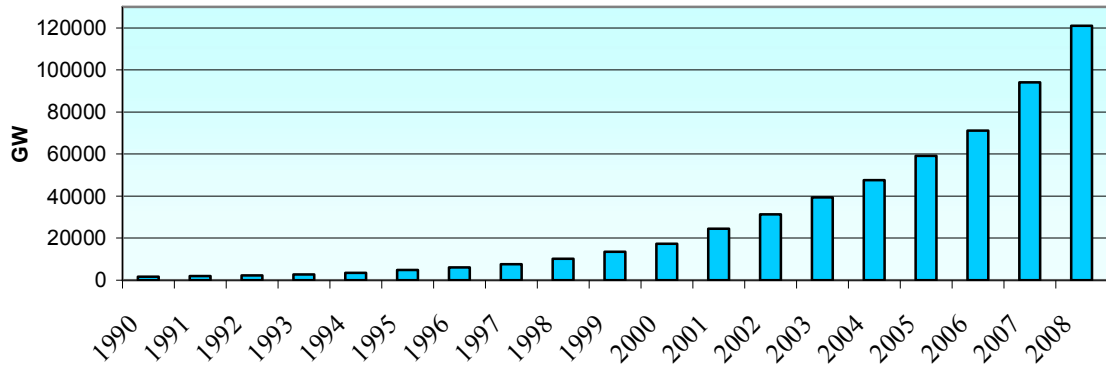
Elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir enerjilerin kullanımı, dünyamızın ve ülkelerin geleceği için önemi açıktır. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan RE ile ilgili çalışmalar hızlanmış ve büyük yatırımlar yapılmaya başlanmıştır.

Rüzgâr türbinlerinin çalışması çevreye zararlı gaz emisyonuna neden olmadığından enerji geleceğimizde ve iklim değişikliğini önlemede büyük bir role sahiptir. Geleneksel güç santrallerinin aksine, enerji güvenliği açısından yakıt maliyetlerini ve uzun dönemli yakıt fiyatı risklerini eleyen, ekonomik, politik ve tedarik riskleri açısından diğer ülkelere bağımlılığı azaltan yerli ve her zaman kullanılabilir bir kaynaktır (İnt.Kayn.5). Ayrıca kısa sürede devreye alınabilmekte ve gerektiğinde hızlı bir şekilde sökülebilmektedir. Bununla birlikte rüzgâr türbinlerinin büyük alan kaplaması, gürültü oluşturması, üretilen elektriğin kalite sorunları, kuş ölümleri, belli alan içinde radyo ve TV alıcılarında parazitler oluşturması vb. dezavantajları bulunmaktadır (Güler 2005).

#### **2.1.5 Küresel Rüzgar Enerjisi Durumu**

Belli ölçütler dahilinde elde edilebilecek küresel teorik potansiyel RE 277 Trilyon KWh olarak hesaplanmıştır. Bu potansiyelin yalnızca % 10-15 gibi bir oranının kullanılabilir olduğu göz önüne alınırsa 38 Trilyon KWh gibi küresel enerji tüketiminin yaklaşık 2 katına olan ekonomik kullanılabilir RE'nin olduğu ortaya çıkmaktadır (WBGU 2003).

Yenilenebilir enerjilerin küresel durumu 2009 adlı çalışmada, 2008 yılı sonu itibariyle küresel toplam rüzgâr enerjisi kurulu gücü 121 GW olmuş ve 2007 yılına göre % 15 gibi hatırı sayılı bir büyüme gerçekleşmiştir. Şekil 2.3’de küresel toplam rüzgar enerji kapasitesinin yıllara göre gelişimi görülmektedir. Küresel değerin yaklaşık % 53 oranına sahip olan EU ülkelerinin toplam RE kurulu gücü ise 65 GW değerine ulaşmıştır. 2008 yılında 8,3 GW’lık ek kapasite kurulumuyla % 50 büyüyerek bir önceki yılın dünya lideri olan Almanya’yı geride bırakan ve toplam 25,2 MW RES kurulu gücüne ulaşan ABD küresel çapta yaklaşık % 20 payla dünya lideri durumuna gelmiştir. Çizelge 2.3’de 2008 yılında toplam RE kapasitesi değerlerinde ilk 10 ülkenin 2008 yılı ek kapasite kurulum değerleri gösterilmiştir (REGSR Update 2009).



**Şekil 2.3** 1990-2008 arası küresel rüzgar gücü kapasite artışı (REGSR Update 2009)

2008 yılı yenilenebilir enerji kaynakları açısından önemli gelişmelerin yaşandığı bir yıl olarak tarihe geçmiştir. Uzun yıllardır rüzgar enerjisi kapasitesinde dünya lideri olan Almanya bu ünvanını müthiş çıkış yapan ABD’ye kaptırmıştır. Çin 2010 yılı hedefi olan 10 GW değerini yakalamış hatta 12 GW değerine ulaşmıştır. Dünyada bir çok ülke ilk ticari rüzgar türbin kurulumunu gerçekleştirmiştir. Birleşik krallık denizsel rüzgar enerjisi kapasitesinde dünya lideri olmuştur. 2020 yılında 1,245 GW dünya rüzgâr gücü hedefine ulaşmak için gereken yatırım miktarı 692 milyar €’dur. Bu süre içinde 3,79 Euro-cents/KWh’den olan üretim maliyetlerinin 2,45 Euro-cents/KWh’a düşmesi beklenmektedir. Rüzgâr türbinlerinde küresel piyasa 2020 yılına kadar şimdiki 8 milyar Euro’dan 80 milyar Euro yıllık iş hacmine çıkacaktır. Toplam potansiyeli en az 48.000 MW olan, yıllık ortalaması 7,5 m/s’nin üzerindeki bölgelerde günümüz fiyatlarıyla ekonomik olabilecek yatırımlar yapmak mümkündür (İnt.Kyn.5).

**Çizelge 2.3 2008 Rüzgar gücü kurulum ve kapasite ilk 10 (REGSR Update 2009)**

| Sıra | Ülkeler          | 2008 yılı kurulum (MW) | 2008 yılı toplam kapasite (MW) |
|------|------------------|------------------------|--------------------------------|
| 1    | ABD              | 8360                   | 25170                          |
| 2    | ALMANYA          | 1670                   | 23900                          |
| 3    | İSPANYA          | 1610                   | 16740                          |
| 4    | ÇİN              | 6300                   | 12210                          |
| 5    | HİNDİSTAN        | 1800                   | 9650                           |
| 6    | İTALYA           | 1010                   | 3740                           |
| 7    | FRANSA           | 950                    | 3400                           |
| 8    | BİRLEŞİK KRALLIK | 840                    | 3240                           |
| 9    | DANİMARKA        | 80                     | 3180                           |
| 10   | PORTEKİZ         | 710                    | 2860                           |

#### **2.1.6 Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Durumu**

Yenilenebilir enerji kaynakları içinde rüzgar enerjisi ülkemizin ve dünyanın geleceğini belirleyecek önemli aktörlerden biridir. Gittikçe popülerleşen bu enerji kaynağı ülkemizde son yıllarda oldukça ciddiye alınmış ve bir dizi çalışmalar neticesinde rüzgar atlası oluşturulmuş ve bu sayede yapılabilecek ciddi yatırımların önü açılmıştır.

EİE ve DMİ tarafından Türkiye'nin rüzgar potansiyelinin belirlenmesi ve rüzgar enerjisi altyapı çalışmalarında kullanılması amacıyla "Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA)" çalışması yapılmıştır. 2007 yılında oluşturulmuş olan bu atlasa göre ülkemizde yıllık rüzgâr hızı 8,5 m/s ve üzerinde olan bölgelerde en az 5.000 MW, 7,0 m/s'nin üzerindeki bölgelerde ise en az 48.000 MW büyüklüğünde rüzgâr enerjisi potansiyeli bulunduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmaya göre rüzgar enerjisi açısından Bandırma, Antakya, Kumköy, Mardin, Sinop, Gökçeada, Çorlu ve Çanakkale zengin bölgeler olarak tespit edilmiştir. Ayrıca Bandırma, Bozcaada, Çeşme, Gökçeada, Çanakkale, Karadeniz Ereğlisi, Florya ve Siverek gibi bölgelerde yöresel potansiyel belirleme çalışmaları da yapılmıştır (Akpınar vd. 2008, İnt.Kay.5).

Türkiye'de 2008 yılının ilk yarısında rüzgar santrallerine yönelik ciddi yatırımlar yapılmasına yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Kurulu bulunan ve kurulması planan rüzgar santrallerinin gücü toplam 1.5 GW olarak hesaplanmıştır (İnt.Kyn.10).

## 2.2 Rüzgar Enerjisi İlgili Temel Kavramlar

### 2.2.1 Rüzgarın Oluşumu ve Temel Özellikleri

Rüzgar, genel olarak atmosfer içinde bulunan gazların bölgesel basınç farklarından kaynaklanan doğal akışı olarak tanımlanabilir. Hava hareketlerinin oluşmasının temel nedeni ise atmosfer basıncının bölgeler arasında farklılık göstermesidir. Rüzgar, yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru hareket eder. Basınç farkı büyüdükçe rüzgar hızı artmaktadır ve fark düştükçe hız azalmaktadır. Rüzgarın oluşmasında; basınç merkezleri arasındaki yatay uzaklık, dünyanın kendi eksenine etrafındaki hareketi, yer şekilleri ve basınç farkı etkili olmaktadır. Rüzgar, hızına göre fırtına, hortum, kasırga, tayfun vb. isimler alır. Rüzgarlar denizlerin dalgalanmasında, deniz akıntılarının oluşmasında ve karaların şekillenmesinde oldukça önemlidir. Ayrıca rüzgarlar bitkilerin çoğalmasında da önemli aşılama özelliği taşımaktadır (Öztürk 2008).

Gelgit enerjisi ve JE hariç tüm yenilenebilir enerji türleri ve fosil yakıtlar enerjilerini güneşten alır. Güneş yeryüzüne saatte yaklaşık  $1100 \text{ W} / \text{m}^2$  enerji gönderir ve dünyaya güç kazandırır. Güneşten dünyaya gelen enerjinin % 1-2'si rüzgâr enerjisine dönüşür. Bu, yeryüzündeki tüm bitkilerin biyolojik kütleye dönüştürdüğü enerjinin 50 - 100 katıdır (İnt.Kay.6). Rüzgar, geçmişte yelkenlilerin yüzdürülmesinde veya değirmenlerde kullanılmaktaydı. Rüzgar, türbinlerinde elektrik enerjisine çevirilebilmesinden veya  $\text{CO}_2$  emisyonunu azaltan yenilenebilir enerji olmasından daha önemli özellikleri bünyesinde barındırmaktadır. Polenleri doğaya yayar, akıntılarının oluşmasında dolayısıyla ısınma, soğuma ve deniz canlılığında önemli bir etkidir, yeryüzünü şekillendirir, bulutları yüzdürür, yağmurun yağmasına yardımcı olur, hava sıcaklığını dengeler vb. Yani hayatımızın devamı için varlığı kati surette lazım olan aslında mucizevi doğa olayıdır. Bunların yanında, rüzgar enerjisi geçmişte olduğu gibi hala yelkenlilerde ve değirmenlerde kullanılmaya devam etmektedir. Bunlar bize rüzgarın doğal hayatın oluşmasında ve dolayısıyla bizim yaşamımızı sürdürebilmemiz için ne denli önemli rolü olduğunu göstermektedir.

### **2.2.2 Rüzgar Enerjisi Tarihçesi**

İnsanlık medeniyet tarihinde rüzgar çok önemli bir rol oynamıştır. Rüzgar ilk kez 5000 yıl önce Mısır'da kayıkların yüzdürülmesinde kullanılmıştır. İlk rüzgar değirmeni M.Ö. 200'lü yıllarda antik Babylon'da inşa edilmiştir. M.S. 10. yy'a kadar doğu İran ve Afganistan'da 4,8 metrelik rüzgar yakalama kanatları ve 9 metre yüksekliği olan rüzgar değirmenlerinde tahıl öğütüldüğü bilinmektedir.

Çok pervaneli yeldegirmenleri 19. yy ikinci yarısında ABD'de icat edilmiştir. 1900'li yılların başında ABD'de bilinen 77 tane rüzgar değirmeni fabrikası vardı ve rüzgar değirmeni ihracatı ABD için en büyük ihracat kalemi olmuştu. 1930 ve 1940'lı yıllarda ABD'de yüzbinlerce elektrik üreten rüzgar türbini imal edildi. Bu türbinlerde elektrik generatörünü çalıştıran iki veya üç pervane vardı. Bu türbinler aküleri doldurmada, radyo alıcılarını çalıştırmada, aydınlatma vb. kullanıldılar. 1950'li yılların başlarında elektrik hatları yaygınlaşınca rüzgar türbinleri bir duraklama dönemine girdi.

1973 OPEC'in uyguladığı petrol ambargosunun ardından enerji fiyatlarındaki artış ve geleneksel enerji kaynaklarının sınırlılığı, rüzgar enerjisine olan ilgiyi tekrar artırmıştır. Teşvikler ve resmi araştırma çalışmaları sonucu bir çok yeni türbin tasarımı yapılmıştır. 1970'li yıllarda ABD'de rüzgar türbini sanayi yeniden canlanmış ve 50 tane rüzgar türbini imalatçısı tekrar piyasaya girmişti. Rüzgar sistemleri için yeni bir pazar olarak "rüzgar tarlaları" çalışmalarına 1980'lerde başladı. 1978 yılında ABD'de çıkarılan yasa ile rüzgar enerjisine getirilen teşvik ile elektrik dağıtım şirketleri rüzgar enerjisinden üretilen elektriği almak zorunlu hale getirildi. Günümüzde buna benzer yasalar ülkemizde de yürürlüğe girmiştir (İnt.Kay.7).

### **2.2.3 Rüzgar Türleri**

Dünyanın troposfer adı verilen hava tabakası rüzgar gücünü ve yönünü belirler. Tüm dinamik hava hareketleri bu tabaka içinde oluşur. Rüzgarın oluşum kaynağı küresel, bölgesel ve yerel olarak değişir. Küresel rüzgarın gücü ve hızı şu etmenlere bağlı olarak

değişir. Dünyanın dönme yönü, dünyanın dönme hızı, coriolis bükme kuvveti (Öztürk 2008). Bu etmenlere bağlı olarak sınıflandırılacak olan rüzgar türleri;

**Küresel Rüzgarlar:** Troposferin en dış halkasından yeryüzünün 1000 m yüksekliğine kadar esen rüzgarlardır (Öztürk 2008).

**Yüzey Rüzgarlar:** 100 m'den düşük yükseklikteki rüzgarlar, dünya yüzeyinin coğrafi yapısından çok etkilenirler. Yüzey pürüzlülüğü, engeller nedeniyle rüzgarı yavaşlatır ve rüzgar yönünde değişimler olur. Rüzgar türbinleri genelde 100 m'den daha az yükseklikte olduğundan, rüzgar güç sistemleri için yüzey rüzgarları önemlidir (Şen 2003).

**Deniz ve Kara Rüzgarları (Meltemler):** Karaların ve denizlerin farklı ısınıp soğuma karakteristiğine bağlı olarak kıyı meltemleri oluşur. Karalar denizlere göre daha çabuk ısındığından, ısınan hava yükselir ve yerinde alçak basınç merkezi oluşur, deniz üzeri henüz ısınma olmadığı için buradaki basınç karaya göre daha fazladır yani yüksek basınçtır. Gündüzleri denizden karaya, geceleri ise karadan denizlere doğru olan kıyı rüzgârları dünyanın değişik noktalarında değişik isimlerle adlandırılır. Ayrıca soğuk havanın hafif olup yükselme, sıcak havanın ağır olup çökme özelliklerine göre dağ, yamaç ve vadilerde de gece gündüz sıcaklık farkından dolayı rüzgar akışları oluşmaktadır (Çelik 2008).

#### **2.2.4 Rüzgarı Doğuran Etmenler**

Rüzgarı meydana getiren ve rüzgarın hızına etki eden, atmosfer içindeki başlıca kuvvetler şunlardır (Öztürk 2008).

##### **2.2.4.1 Gradyan Kuvveti**

Gradyan kuvveti havayı yüksek basınçtan alçak basınca doğru hareket ettirecek şekilde etki eder (Özgener 2002). Havayı yüksek basınçtan alçak basınca doğru yönlendirir. Gradyan kuvveti Denklem 2.1'deki gibi ifade edilir.

$$G = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{h} \quad (2.1)$$

$G$  basınç kuvveti (atm),  $\rho$  hava yoğunluğu ( $kg / m^3$ ),  $\Delta P$  izobarlar arası basınç farkı,  $h$  İzobarlar arası uzunluk (m) olarak ifade edilmektedir.

#### 2.2.4.2 Coriolis Kuvveti

Coriolis kuvvetine yer dönmesinin saptırıcı kuvveti adı verilmektedir. İki grupta incelemek mümkündür. Bunlar enlem dereceleri boyunca meydana gelen hareketler için yer dönmesi saptırıcı kuvveti ve ekvator dan kutuplara doğru veya ters yönde meydana gelen hareketler için yer dönmesi saptırıcı kuvvetidir. Kutuplar eksenini etrafında batıdan doğuya doğru dönen dünyanın, herhangi bir hava kütlesi, iki kuvvetin etkisindedir. Yerçekimi kuvveti, cismi yerin merkezine doğru çeker. Merkezkaç kuvveti ise cismi eksenenden uzaklaştırmak ister (Öztürk 2008).

#### 2.2.4.3 Merkezkaç Kuvveti

Özellikle girdap hareketi gösteren hava bölümlerinde rüzgarın yönü ve hızı üzerinde merkezkaç kuvvetinin etkisi olur. Bir basınç alanında basınç eğrileri ne kadar yuvarlak ise havanın girdap içindeki dönüş hareketi o kadar hızlı, merkezkaç etkisinde o oranda çok olur. Bu etki izobar eğrileri düzleştikçe azalır (Toklu 2002). Merkez kaç kuvveti;

$$a = \frac{V^2}{R} \quad (2.2)$$

$a$  , Merkezkaç kuvvetin birim kütleye etki eden ivmesi ( $m / sn^2$ ),

$V$  , Rüzgarın hızı (m/s),

$R$  , Rüzgarın döner yarıçapı (m) olarak ifade edilmektedir.

#### **2.2.4.4 Sürtünme Kuvveti**

Rüzgarın yeryüzeyine sürtünmesi nedeniyle oluşur. Bu nedenle rüzgar hızını yavaşlatmaya çalışır. Sürtünme kuvvetinin etkisi, yer yakınında en yüksek değerdedir. Rüzgarlar sürtünmenin etkisinde olup olmamasına göre iki gruba ayrılır. Bunlar: Yüksek seviye ve yeryüzü rüzgarlarıdır. Yüksek seviye rüzgarları, sürtünme kuvvetinin etkisinde değildir. Yeryüzü rüzgarları, sürtünme kuvvetinin etkisindedir (Öztürk 2008).

#### **2.2.5 Rüzgarın Hızı ve Yönü**

Sağlıklı bir ölçüm yapılabilmesi için ölçüm direğinde rüzgar hızı, rüzgar yönü, sıcaklık, nem ve basınç değişkenlerinin ölçülmesi gerekmektedir (Durak 2005). Türbinlerde en genel manada hız ölçüm aygıtı olarak anemometre kullanılmaktadır.

Anemometreler rüzgar hızını ölçmek için kullanılır ancak günümüzde işlevselliği arttırılan anemometreler rüzgar yönünü belirlemek içinde kullanılmaktadır. Ölçümlerde genellikle kap (cup) anemometresi kullanılır. Kap anemometresi düşey bir eksene ve 3 tane kaba sahiptir. Bu kaplarla rüzgar yakalanır ve ölçüm gerçekleştirilir. Ölçümler kontrolöre iletilerek türbinin mekanik frenleme sistemiyle çalışması veya durdurulması kontrol edilebilir. Bunun yanında rüzgar yönü belirlenerek saptırma mekanizmasıyla türbin rüzgara karşı döndürülür (Fıçıcı vd. 2007).

#### **2.2.6 Rüzgar Enerjisinin Avantaj ve Dezavantajları**

Rüzgar türbinlerinin genel olarak avantajları: hammadresi hava hareketleri olduğundan bedavadır, kurulumları diğer enerji kaynaklarının santral kurulumuna göre daha hızlıdır, temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarıdır, yerel olması sebebiyle dışa bağımlılığı azaltır, sera etkisini azaltır, maliyetlerinin gittikçe azalmaktadır, kuruldukları yerde tarım arazileri kullanılmaya devam edilebilir, soğutma suyu kullanılmadığı için en zararsız enerji kaynağıdır, yatırım maliyetini 3-4 sene çalışarak kendini amorti edebilir. Rüzgar çiftliğinin kurulması için alan ihtiyacının fazla olması, gürültü, görsel ve estetik

etkileri, doğal hayata etkileri, elektronmanyetik alanı bozucu etkisi, gölge ve etkileşimler başlıca dezavantajlarıdır. Ayrıca rüzgar meteorolojik olaylara bağlı olarak oluştuğundan enerji değişkenliği çok olduğundan kontrolü güçtür. Elektrik üretim güvenilirliğinin az olmasından dolayı yedek kapasite gerektirmektedir (Varınca 2005).

## 2.2.7 Rüzgar Enerjisi Sistemlerinde Yaygın Olarak Kullanılan Kavramlar

### 2.2.7.1 Hava Yoğunluğu

Rüzgar gücü, hava yoğunluğuyla doğrusal olarak değişir. 15° sıcaklıkta ve 1 atm basınçta hava yoğunluğu  $1.225 \text{ kg} / \text{m}^3$  (Masters 2004). İdeal gaz kanununa göre;

$$P.V = n.R.T \quad (2.3)$$

Bu denklemde P mutlak basınç (atm),  $R = 8.2056.10^{-5} .\text{m}^3 .\text{atm} .\text{K}^{-1} .\text{mol}^{-1}$  ideal gaz sabiti, V hacim ( $\text{m}^3$ ), n kütle (mol), T kelvin cinsinden mutlak sıcaklık, n ifadesi yerine havanın moleküler ağırlığı  $MW=28,97 \text{ (g/mol)}$  yazılacak olursa denklem;

$$\rho(\text{kg}/\text{m}^3) = \frac{n(\text{mol}).M.W(\text{g}/\text{mol}).10^{-3}(\text{kg}/\text{g})}{V(\text{m}^3)} \quad (2.4)$$

şeklinde olacaktır. Daha genel haliyle hava yoğunluğu Denklem (2.5)'de gösterilmiştir.

$$\rho = \frac{P \cdot MW \cdot 10^{-3}}{R \cdot T} \quad (2.5)$$

### 2.2.7.2 Rotorun Süpürdüğü Alan

Rüzgar türbini çıkış gücü rotorun süpürdüğü alanla doğrusal olarak değişir. Yatay eksenli türbin için, rotorun süpürdüğü alan denklem 2.6'da gösterilmiştir. Bu denklemde R metre cinsinden kanat yarıçapı olarak ifade edilmektedir (Patel 2006).

$$A = \frac{\pi}{4} R^2 \quad (2.6)$$

### 2.2.7.3 Rüzgardan Elde Edilebilecek Teorik Güç

Rüzgar türbinin aerodinamik güç modeli, rüzgar türbininden elde edilen mekanik güç ile rüzgar hızı arasındaki ilişkiyi vermesi bakımından önemlidir. Üretilen mekanik rüzgar güç, rüzgar hızının küpüyle orantılıdır. Bunun yanında elde edilebilecek güç hava yoğunluğu ve kanat yarıçapına bağlı olarak da değişir (Masters 2004). Teorik güç:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot C_p \cdot V^3 \quad (2.7)$$

Rüzgarda elde edilebilecek teorik maksimum güç sürtünmeden dolayı elde edilebilecek enerjiye sınırlandırma getirmektedir. Betz kanuna göre iletilebilecek maksimum rüzgar enerjisi toplam rüzgar enerjisinin 0,593 katsayısıyla sınırlıdır (Shepherd 2002).

Rüzgardan elde edilebilecek teorik tork ifadesi düşük hızlı milin açısal hızı ve rüzgar hızına bağlı olarak ifade edilebilir. Tork ve güç arasındaki ilişki:

$$T_w = \frac{P_w}{\omega_w} \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem 2.8'deki açısal hız ifadesi  $\omega$ , Denklem 2.9'daki gibi ifade edilip, Denklem 2.7 tekrar düzenlenirse Denklem 2.10 elde edilir. Denklem 2.10 rüzgardan elde edilebilecek teorik tork ifadesini vermektedir.

$$\omega = \frac{\lambda V_r}{R} \quad (2.9)$$

$$T_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \frac{C_p}{\lambda} \cdot V^2 \quad (2.10)$$

Tork ifadesinde bulunan performans katsayısı  $C_p$  ve kanat hız oranı  $\lambda$  arasındaki ilişki, tork ifadesine bağlı performans katsayısının  $C_T = C_p / \lambda$  şeklinde olarak ifade edilmesiyle yeniden yazmak mümkündür. Performans katsayısıyla ilgili detaylı açıklama Bölüm 2.2.7.5’de verilmiştir.

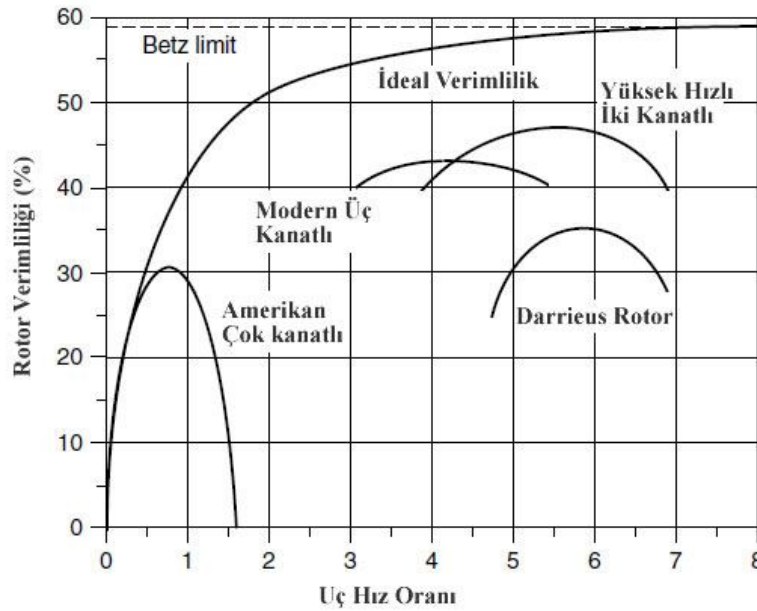
#### 2.2.7.4 Kanat Hız Oranı

Kanat hız oranı,  $V$  rüzgar hızına, kanatların açısal dönme hızına  $\omega$  ve kanat yarıçapına  $R$  bağlı olarak değişmektedir (Shepherd 2002). Bu ifade performans katsayısını belirleme açısından önemlidir. Kanat hız oranı Denklem 2.11’de ifade edilmiştir.

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (2.11)$$

Açısal hız, devir türünden ifade edilecek olursa;

$$\omega = \frac{2.\pi.N_w}{60} \quad (2.12)$$



**Resim 2.1** Kanat hız oranına bağlı olarak değişen rotor verimliliği (Shepherd 2002)

Farklı rotor tiplerinin rotor verimliliği Resim 2.1’de gösterilmektedir. Buna göre modern üç kanatlı ve yüksek hızlı iki kanatlı rotor tiplerinin daha yüksek verimlerde çalıştığı görülmektedir. Bununla birlikte Amerikan çok kanatlı rotor tipi düşük kanat hız oranları için daha verimlidir.

### 2.2.7.5 Performans Katsayısı

$C_p$  olarak gösterilen performans katsayısı kanat açısı  $\beta$  ve kanat hız oranına  $\lambda$  bağlı doğrusal olmayan bir fonksiyondur (Dusonchet et al. 2007). Performans katsayısı;

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1(C_2 / \lambda_i - C_3 \cdot \beta - C_4) \cdot e^{\frac{C_5}{\lambda}} + C_6 \lambda. \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.14)$$

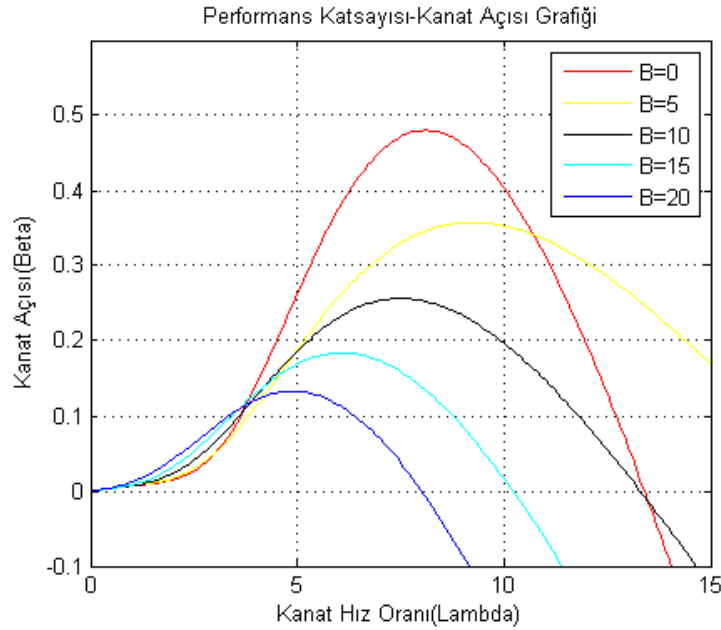
**Çizelge 2.4** Performans katsayısı sabitleri

| $C_1$  | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ | $C_6$  |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 0.5176 | 116   | 0.4   | 5     | 21    | 0.0068 |

Denklem (2.13)’de ifade edilen  $C_1$ ’den  $C_6$ ’ya kadar tüm katsayıların değerleri sırasıyla Çizelge 2.4’de belirtilmiştir. Farklı kanat açıları için, Şekil 2.4 grafiği incelenirse  $\beta = 0^\circ$  ve  $\lambda = 8.1$  iken performans katsayısı maksimum  $C_p = 0.48$  olduğu görülecektir. EK-3’de bu grafiğin oluşturulması için yazılan program bulunmaktadır. Tork denkleminde ait performans katsayısı  $C_T$  ;

$$C_t = C_p / \lambda \quad (2.15)$$

$C_p$  ve  $\lambda$  arasındaki ilişki  $C_p$ - $\lambda$  eğrileriyle tespit edilebilir. Bu eğri rüzgar türbini üreticileri tarafından tedarik edilen eğriler kullanarak yaklaşık olarak bulunabilir.



Şekil 2.4 Değişik  $\beta - \lambda$  değerlerine karşılık gelen performans katsayıları

#### 2.2.7.6 Rüzgar Hızı Dağılımı

Belli bir bölgenin rüzgar enerjisiyle ilgili yaklaşık bilgi sahibi olmak ve gerekli açılımları yapabilmek için belli dönemlere ait rüzgar hızı verileri kullanarak o bölgenin rüzgar enerjisi potansiyeli istatistiksel olarak belirlenebilir. Böylece bölge için uygun dağılımın belirlenmesi ile, en ekonomik sonuçlara ulaşmak mümkün olur. Bu amaçla literatürde gamma, log normal, rayleigh gibi farklı dağılım fonksiyonları kullanılmaktadır. Özellikle rayleigh ve son yıllarda sıkça tercih edilen weibull dağılımları ile bölgenin rüzgar hızı ve güç yoğunluğu tahmini yapılabilmektedir.

Weibull dağılımının çokça tercih edilme nedenleri: Rüzgar dağılımına çok iyi uyması, dağılımın esnek bir yapıya sahip olması, parametrelerinin belirlenmesindeki kolaylık, parametrelerin az olması, parametrelerin bir yükseklik için belirlenebilmesi ve farklı yükseklikler için tahmin edilebilmesidir. Bununla birlikte, rüzgar hızı dağılımının weibull dağılımı ile temsil edilemeyeceği, bölgeler de bulunmaktadır (Akdağ ve Güler

2008). Weibull dağılımı iki temel parametrenin bilinmesini gerektirmektedir. Bu parametreler Denklem 2.16'da görüldüğü gibi c ölçek parametresi ve k şekil parametresidir. Weibull dağılımı özellikle rüzgar hızının 4.5 m/s 'den az olduğu bölgeler için daha doğru yaklaşımlar sağlamakla birlikte tek parametrelili rayleigh dağılım fonksiyonu çoğu zaman yeterli olmaktadır (Kurban vd. 2007). Bu fonksiyon :

$$f_w(v) = \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \cdot e^{-\left( \frac{v}{c} \right)^k} \quad (2.16)$$

şeklinde gösterilir. Rayleigh dağılımı bünyesinde parametre olarak rüzgar hızı ve ölçek parametresini barındırmaktadır. Bu durumda rayleigh dağılım fonksiyonu :

$$f_r(v) = \left( \frac{2v}{c^2} \right) \cdot e^{-\left( \frac{v}{c} \right)^2} \quad (2.17)$$

#### 2.2.7.7 Yüksekliğe Bağlı Rüzgar Hızı Değişimi

Rüzgar hızı, ölçüm yapılan noktanın coğrafi koşullarına ve yüksekliğine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla, uygulamanın teorik esaslara oturtulabilmesi için rüzgar türbininin kurulacağı yükseklikteki rüzgar hız değerleri kullanılmalıdır (Dusonchet 2007).

$$V_m(z) = V_m(z_{ref}) \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (2.18)$$

Denklem (2.18) ifade edilen parametreler  $V_m(z_{ref})$  ölçülen rüzgar hızı (m/sn),  $z_{ref}$  rüzgar hızının ölçüldüğü yükseklik (m),  $V_m(z)$  bulunmak istenen rüzgar hızı (m/sn),  $z$  rüzgar hızının hesaplanacağı yükseklik (m),  $\alpha$  pürüzlük katsayısı (0,10 <  $\alpha$  < 0,40) olarak ifade edilmektedir.

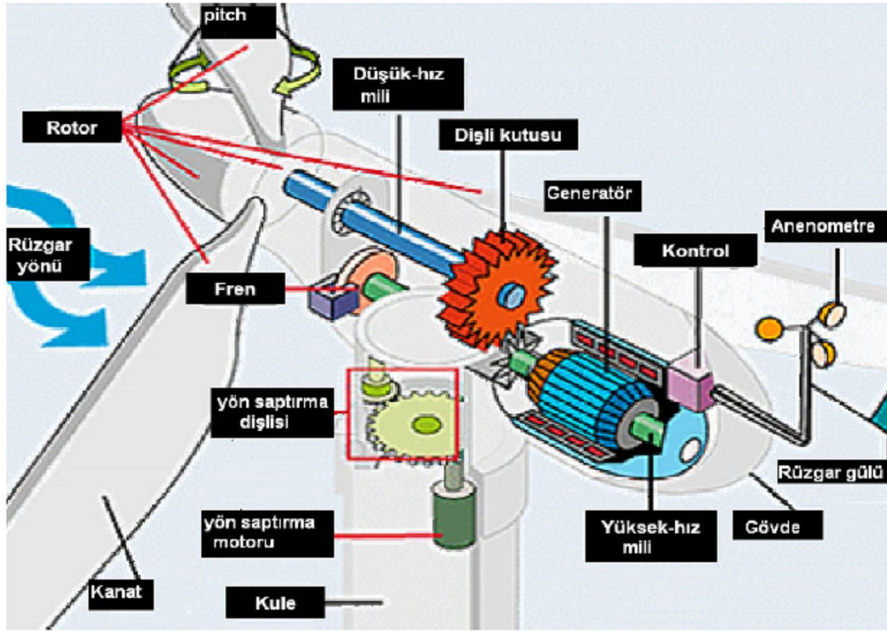
## 2.3 Rüzgar Türbinleri

Bir rüzgar türbini (RT), hareket eden havaya karşı koyan kanatların enerjiyi toplamasıyla çalışan bir türbindir. Modern RT'ler insanlık tarihinde su pompalamada, yağ elde etmek için tohumları ezmede, hububatları öğütme vb. uygulamalarda yüzlerce yıl kullanılan geleneksel yeldeğirmenlerine nazaran birçok avantaja sahiptir. Geçmişte kullanılan yeldeğirmenlerin aksine modern RT'ler rotorun göreceli olarak hızlı çalışmasıyla elektrik üretmek için kullanılır (Seyoum 2003). Rüzgardan elde edilen enerji temel olarak havanın aerodinamik kaldırmasına bağlıdır ve aerodinamik sürüklenme kullanılır. Yüksek hızlı RT'lerde kanatların hareketi kaldırma kuvvetine bağlıdır ve kanatların doğrusal hızı genelde birçok kez rüzgar hızından daha fazladır. Bununla birlikte; aerodinamik sürüklenmenin kullanıldığı RT'ler düşük hızlı rüzgar türbinleri olmalarından dolayı lineer hız, rüzgar hızını geçemez. Genelde rüzgar türbinleri yapılarına göre dikey ve yatay eksenli olarak ikiye ayrılırlar (Şen 2003).

Rüzgar türbinlerinin gücü: rüzgar hızı, kanat adedi, kanat uzunluğu, kanat geometrisi, performans katsayısı, kanat açısı vb. parametrelere bağlı olarak oluştuğu daha önceki bölümlerde ifade edilmişti. Rüzgar türbinlerinin bazı önemli özellikleri şunlardır: Modern rüzgar türbinleri 2 veya 3 kanatlıdır, Türbin kanat çapları yaklaşık olarak 30 metredir. Türbin ömürleri en az 20 yıldır. En ekonomik rüzgar türbini çıkış gücü 10-30 MW arasında değişir. Türbin sistemleri bilgisayarlar aracılığıyla denetlenebilir. İki rüzgar türbini arasındaki uzaklık yaklaşık 150-300 metre civarındadır. Bu nedenle, arazinin önemli bir bölümünde tarımcılık, hayvancılık veya diğer amaçlar için kullanılabilir. Rüzgar hızının yükseklikle artmasından dolayı rüzgardan elde edilen gücün birim maliyeti güç arttıkça düşmektedir. Rüzgar türbinleri denizlere, okyanuslara yada göllerin üzerine kurulabilmektedir (Seyoum 2003).

### 2.3.1 Rüzgar Türbini Parçaları

Türbinler, tasarım ve yapılarına göre farklı elemanlardan oluşabilir. Ancak her türbinde, özellikleri farklı da olsa aynı fonksiyonu yerine getiren benzer bileşenler vardır (Yerebakan 2001). Resim 2.2'de bir türbinin bileşenleri verilmiştir.



**Resim 2.2** Rüzgar türbini bileşenleri (Anonim)

Gövde (Nacelle): Makina yeri, rüzgâr türbininin dişli kutusu ve elektrik generatörü gibi türbinin en önemli bileşenlerini içerir (İnt.Kay.8).

Kanatlar (Rotor Blades): Türbin kanatları, rüzgârı yakalar ve rüzgârın gücünü türbin göbeğine aktarır. Genelde 2 veya 3 kanatlı olur. Kanatlar değişken açılı veya sabit açılı olabilirler. Kanat kontrol mekanizmaları, türbin verimini doğrudan etkiler. Türbinlerde üç tip kanat kontrol mekanizması vardır (Öztürk 2008). Bununla ilgili açıklama daha sonraki bölümlerde yapılacaktır.

Dişli Kutusu (Gearbox): Dişliler düşük hızlı mili yüksek hızlı mile bağlamaya ve böylece hız yükseltilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece 30-60 devirlik rotor hızı 1200-1550 d/dk yükseltilebilir (Yerebakan 2001).

Düşük Hızlı Mil (Low Speed Shaft): Kanatların bağlandığı mil olup dakikada 30-60 devirle döner.

Yüksek Hızlı Mil (High Speed Shaft): Mekanik frenli yüksek hız mili, 2 ktuplu bir indüksiyon generatörü için dakikada yaklaşık 1500 devirin biraz üstünde bir hızla döner ve elektrik generatörünü çalıştırır. Generatör miline hareket verir (Yerebakan 2001).

Farklı generatör tipleri ve kutup sayıları için makinanın generatör olarak çalışması farklı hızlarda gerçekleşmektedir.

**Elektrik Generatörü (Electric Machines):** Hareket enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlarlar. Elektrik generatörü, genelde bir senkron generatörü veya asenkron generatördür. Modern bir rüzgâr türbininde azami elektrik gücü genelde 500 - 1500 kW arasındadır. Rüzgar türbinlerinde üç çeşit jeneratör kullanılır: Bunlar; Doğru akım jeneratörü, senkron jeneratör ve asenkron jeneratördür. Rüzgar türbinlerinde, en ucuz ve güvenilir olarak asenkron jeneratör kullanılır. Bu tip jeneratörlerin üstünlükleri: Tesisi ucuzdur, dönen kontaklar yoktur, başlatma kolaydır, şebekeye bağlantısı kolaydır (Öztürk 2008).

**Elektronik Kontrol Edici (Electronic Controller):** Bu ünite, rüzgâr türbininin durumunu izleyen ve farklı mekanizmaları kontrol eden bir bilgisayar içermektedir (İnt.Kay.8).

**Kule (Tower):** Rüzgâr türbininin kulesi, makina yerini ve pervaneyi taşır. Genelde kulenin yüksek olması bir avantajdır, zira zeminden uzaklaştıkça rüzgâr hızları artar. Modern bir tipik 600 kW rüzgâr türbininde 40 - 60 metrelik bir kule bulunur. Kuleler, dairesel veya kafes biçiminde olabilir (İnt.Kay.8).

**Yön Saptırma Mekanizması (Yaw Mechanism):** Üç kanatlı türbinlerin rotoru rüzgarın esme yönüne göre ayarlanarak etkin güç toplama ve kontrol sağlanır. Bu ayarlama yön saptırma mekanizmasıyla yapılmaktadır (Öztürk 2008). Bunun yanında kanatların açısı kontrolünde türbinin nominal değerlerinde çalışması için önemlidir.

**Anemometre (Anemometer):** Rüzgâr hızını ve yönünü ölçüp kontrolöre iletir. Anemometre sinyalleri rüzgâr türbininin elektronik kontrol ünitesi tarafından rüzgâr türbinini döndürmek için veya türbini koruma amaçlı olarak kullanılabilir.

*Hidrolik Sistem,* Hidrolik sistem, türbininin aerodinamik frenlerini içerir (İnt.Kay.8).

**Kanat Hareket Eyleyici (Pitch Actuator):** Kanatların, aşırı yüksek veya düşük hızlarda dönüşünü kontrol eden döndürme mekanizmasıdır. Kanat hareket eyleyicisi kontrol edilerek, performans katsayısı ayarlanır ve aerodinamik güç kontrolü yapılabilir.

### **2.3.2 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması**

Rüzgar türbinleri için güç, dönme eksen, jeneratör düzeni ve kontrol sistemlerine göre farklı sınıflandırmalar yapılmaktadır. Güç sınıflandırmasına göre türbin türleri, alt bölümlerde anlatılmıştır.

#### **2.3.2.1 Güç Sınıflarına Göre Rüzgar Türbini Türleri**

Küçük güçlü türbinler 0-10 KW arası, orta güçlü türbinler 10-100 KW arası, büyük güçlü türbinler 100 KW'dan daha büyük olan türbinler ve megawatt türbinleri şeklinde bir sınıflandırma geliştirilmiştir (Yerebakan 2001).

##### **2.3.2.1.1 Mikro Türbinler**

Bu türbinler genel olarak 0-3 KW arasında değere sahiptir. Çoğu batarya şarj etme amaçlı kullanılır. İletişim sistemleri, elektrikli çitler, gezi tekneleri ve karavanlar için uygundur. Mikro türbinlerin % 90'ında sabit mıknatıslı generatörler kullanılmaktadır.

##### **2.3.2.1.2 Küçük Güçlü Rüzgar Türbinler**

Genel yapı itibarıyla bu türbinler doğrudan sürülmektedir. Doğrudan sürülmelerinin en önemli yararı çok az bakım gerektirmeleri ve yüksek güvenilirliğidir. Bu türbinlerde kurulum maliyeti ve verimi düşüktür. 30 kW değerinden daha küçükdürler.

##### **2.3.2.1.3 Büyük Güçlü Rüzgar Türbinleri**

Genel olarak 100 kW'dan MW seviyesine kadar güçte üretilen türbinlerdir. Düşük dişli maliyeti, kütle azalması ve kabin uzunluğunun küçülmesi ve dolayısıyla verimlilikte artış gibi bazı avantajları mevcuttur (Yerebakan 2001).

#### **2.3.2.1.4 Megawatt Türbinleri**

Rüzgar türbinlerinde MW seviyelerinde güç artışı için oldukça büyük yatırım gerektirmektedir buna rağmen hala birkaç MW'lık güç aşılamamıştır. Güç arttırıldıkça tasarım olumsuz etkilenmektedir.

#### **2.3.2.2 Eksen Tipine Göre Rüzgar Türbinleri**

##### **2.3.2.2.1 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri**

Bu tip türbinlerde dönme eksenini rüzgar yönüne paraleldir. Kanatları ise rüzgar yönüyle dik açı yaparlar. Ticari türbinler genellikle yatay eksenlidir. Rotor, rüzgarı en iyi alacak şekilde döner bir mekanizma üzerine yerleştirilmiştir (Şen 2003). Bu türbinler, rüzgarı önden veya arkadan almalarına göre ve kanat sayılarına göre farklı tasarlanırlar.

##### **2.3.2.2.1.1 Rüzgarı Önden Alan Rüzgar Türbinleri**

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin çoğu, rüzgarı önden alacak şekilde tasarlanır. Yaygın olarak kullanılan bu tip türbinlerde, rotor yönü rüzgara dönüktür. Kulenin arkasında oluşacak olan rüzgarın gölgeleme etkisine çok az maruz kalır. Üstünlüğüse kulenin oluşturduğu rüzgar gölgesinden etkilenmemesidir. Bu türbinlerin olumsuzluğu ise türbinin sürekli rüzgara dönmesi için yön saptırma mekanizmasının gerekmesidir. Kule, kanadın kule paralelinden her geçişinde, türbinin ürettiği güç miktarında salınımlar oluşur. Bu nedenle, kanatların sert malzemeden tasarlanması ve kuleden biraz uzağa yerleştirilmesi gerekir (Nurbay ve Çınar 2006).

##### **2.3.2.2.1.2 Rüzgarı Arkadan Alan Rüzgar Türbinleri**

Rüzgarı arkadan alan rüzgar türbinlerinde, eğer rotor ve gövde uygun şekilde tasarlanmışsa, yön saptırma mekanizmasına gerek kalmaz. Fakat büyük çaplı

türbinlerde rüzgarın arkadan gelmesi tercih edilmez. Bunun nedeni ise, serbestçe dönmeye bırakılan türbinin elektrik enerjisini taşıyan kabloları burmasıdır. 1000 amper gibi yüksek akımlarla çalışan bu sistemde, akımın mekanik sistemlerle toplanması sağlıklı değildir ancak küçük çaplı türbinlerde kolaylıkla uygulanabilirler (Şen 2003).

#### **2.3.2.2.2 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri**

Dikey eksenli rüzgar türbinlerinde rotor dikey ekseninde dairesel hareket yaparlar ve böylece herhangi bir yönden gelen rüzgarı karşılama zorluğu yoktur. Güç elde etmek daha kolaydır. Kuleye ihtiyaçları yoktur. dişli kutusu, jeneratör vb. türbin elemanları yere yerleştirilir. Rüzgarın estiği yönün önemi olmadığından rotoru çevirme mekanizmasında ihtiyaç yoktur. Rüzgar yere yakın mesafelerde düşük hızlara sahip olduğundan verimleri düşüktür. Makinayı tutmak için çelik tellere ihtiyaç duyulabilir (Uğuz 2005). Resim 2.3’de Darrieus ve Savonius tip dikey eksenli rüzgar türbinlerinin basit olarak oluşturulmuş yapıları gösterilmiştir. Milleri yere göre diktir.

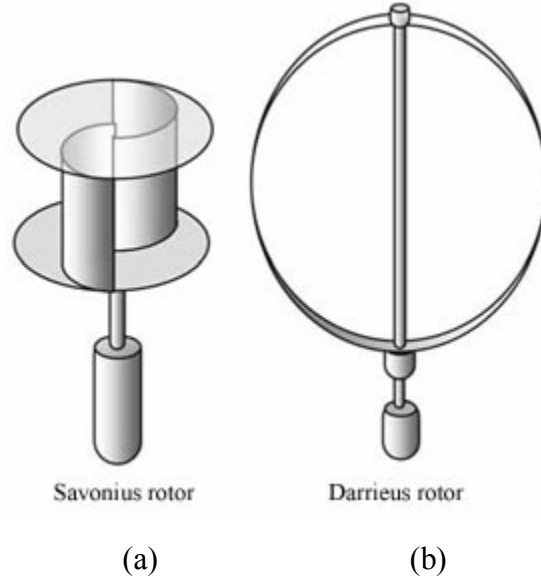
##### **2.3.2.2.2.1 Darrieus Rüzgar Türbinleri**

1931 yılında Fransız mühendis George J.M. Darrieus tarafından icat edilmiştir. 1970 ve 1980’lerde Amerika ve Kanada da Darrieus türbinlerinin kanat dizaynları üzerine geniş çalışmalar yapılmıştır. Kanatları geometrik formlu aerodinamik profile sahip olduğundan yüksek performanslıdır. Kanatlardaki hafif eğim sayesinde kanatlardaki çekme gerilimleri minimuma iner. Yüksek hızlarda çalışabilir ve türbinler. Genellikle 2 veya 3 kanatlı olur. İlk hareket için tahrik motoru gerekebilir (Nurbay ve Çınar 2006). Resim 2.3(b)’de bu türbinin basit yapısı gösterilmiştir.

##### **2.3.2.2.2.2 Savonius Rüzgar Türbinleri**

Savonius rüzgar türbini ilk olarak 1920’li yıllarda Sigurd Savonius tarafından icat edilmiştir. Yapısı basit ve kolaylıkla inşa etmek mümkündür. Savonius türbinlerinin

başlangıç torkları, aerodinamik yapıları gereği herhangi bir yönde esen rüzgarı alabilme özelliğinden dolayı yüksektir. Verimleri yatay eksenli rüzgar türbinlerine göre oldukça düşüktür. Bakımları ve işletmeleri oldukça basittir (Dursun vd. 2005). Resim 2.3(a)'da savonius rüzgar türbininin basit yapısı gösterilmiştir.



**Resim 2.3** Savonius rotor(a) ve Darrieus rotor(b)'a ait rotor yapıları (Anonim)

### 2.3.2.3 Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri

Dönme eksenleri düşeyle, rüzgar yönünde bir açı yapan RT'lerdir. Bu tip türbinlerin kanatları ile dönme eksenleri arasında belirli bir açı bulunmaktadır.

### 2.3.3 Rüzgar Türbinlerinin Birbirleri ile Karşılaştırılması

Rüzgar çiftlikleri kurulumunda, bölgenin rüzgar karakteristiği, kurulacak alanın uygunluğu ve ciddi kayıplardan kaçınmak için uygun türbinlerle ilgili özellikler bilinmelidir. Bölüm 2.3 ve alt bölümleri boyunca incelenen rüzgar türbinleri; kanat çeşitleri, rüzgarı alış yönleri, kullanım alanları vb. parametrelere bağlı olarak farklı özelliklerde imal edilebildiğinden ve birbirlerine göre üstünlükleri vardır. Çizelge 2.5, Çizelge 2.6 ve Çizelge 2.7'de rüzgar türbinlerinin birbirleri ile çeşitli özellikleri ve

tipleri dikkate alınarak kıyaslanması verilmiştir. Bu tablolarda; türbinin kullanım amacı, bölgedeki rüzgar ve maddi imkanlara göre nasıl bir türbin seçimi gerektiği veya kurulmak istenen türbinin özellikleri görülmektedir (Nurbay ve Çınar 2006).

**Çizelge 2.5** Rüzgarı alışı yönüne göre türbinlerin karşılaştırılması

|                         | <b>Döndürme mekanizması ihtiyacı</b> | <b>Kanat malzeme yapısı</b> | <b>Kulenin malzeme yapısı</b> | <b>Rüzgarın türbine verdiği zarar</b> |
|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| Rüzgarı önden alan RT   | Var                                  | Sert                        | Ağır                          | Az                                    |
| Rüzgarı arkadan alan RT | Yok                                  | Esnek                       | Hafif                         | Çok                                   |

**Çizelge 2.6** Büyüklüklerine göre türbinlerin karşılaştırılması

|              | <b>Kullanım Alanları</b> | <b>Türbin Gücü</b> | <b>Üretilen Enerjinin Kullanıldığı yer</b>                                     | <b>Akü ihtiyacı</b> | <b>Bakım Masrafı</b> | <b>Kurulum Masrafı</b> |
|--------------|--------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|
| Büyük RT'ler | Endüstriyel              | 50KW-2MW           | Şebeke                                                                         | Yok                 | Va                   | Yüksek                 |
| Küçük RT'ler | Kişisel                  | 50W-20KW           | Çiftlikler, Telekomünikasyon Alıcıları, Radyo kulesi, Seralar Acil telefonları | Var                 | Yok                  | Düşük                  |

**Çizelge 2.7** Rüzgarı alışı yönüne göre türbinlerin karşılaştırılması

|                              | <b>Yatay Eksenli RT</b> |                  |                  |                         | <b>Dikey Eksenli RT</b>    |                            |
|------------------------------|-------------------------|------------------|------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                              | <b>Tek kanatlı</b>      | <b>2 kanatlı</b> | <b>3 kanatlı</b> | <b>Çok kanatlı</b>      | <b>Savonius</b>            | <b>Darrierus</b>           |
| 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                  | Yüksek           | Yüksek           | Düşük                   | Düşük                      | Düşük                      |
| Kule İhtiyacı                | Var                     | Var              | Var              | Var                     | Yok                        | Yok                        |
| Kullanım Amacı               | Elektrik                | Elektrik         | Elektrik         | Elektrik & Su pompalama | Az elektrik & Su pompalama | Az elektrik & Su pompalama |
| Günümüzde Kullanımı          | Yok                     | Yok              | Var              | Var                     | Az                         | Az                         |
| Rotorun Dönmesi İçin Rüzgarı | Kaldırır                | Kaldırır         | Kaldırır         | Kaldırır & Sürükler     | Kaldırır & Sürükler        | Kaldırır & Sürükler        |

## **2.4 Rüzgar Türbini Sistemleri**

İki tip temel rüzgar türbini sistemi vardır. Bunlar; sabit hızlı rüzgar türbini sistemleri ve değişken hızlı rüzgar türbini sistemleridir. Sabit hızlı rüzgar türbinleri, Danimarka yaklaşımı olarak da bilinmektedir. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde rotor serbest olarak dönmektedir. Bu sistemler rüzgardan en uygun enerji elde etmek için farklı mekanizmaları bünyelerinde barındırmaktadır (Hui 2008).

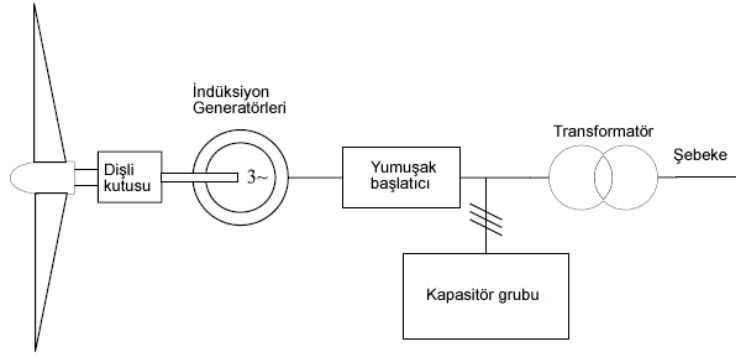
### **2.4.1 Rüzgar Türbin Sistemlerine Genel Bakış**

Rüzgar türbini sistemleri sabit ve değişken hızlı rüzgar türbin sistemleri olarak ikiye ayrılır. Alt bölümler boyunca bu türbin sistemlerinin yapısından bahsedilecektir.

#### **2.4.1.1 Sabit Hızlı Rüzgar Türbinleri**

Sabit hızlı rüzgar türbinleri düşük maliyetleri, az bakım gerektirmeleri, düşük işletme maliyeti, daha sağlam mekanik yapıya sahip olması gibi üstün özelliklerinden dolayı şebekeye direkt bağlı sincap kafesli asenkron generatörlerden oluşturulmaktadır. Kaymanın sebep olduğu rotor hızı değişimi, üretilen gücü değiştirmektedir. Bu değişim % 1-2 gibi oldukça küçük değerlerde olmasına rağmen bu generatörlerin olduğu sistemler sabit hızlı rüzgar türbini sistemleri olarak adlandırılmaktadır. Sabit hızlı sistemlerde rotor hızı değiştirilemediğinden rüzgar hızındaki değişimler doğrudan aktarma organlarına aktarılır buda değişken hızlı rüzgar türbinlerine göre daha fazla yapısal yüklenmelere sebep olmaktadır. Bu yüklenmelerde göreceli olarak daha ucuz rüzgar enerjisi sistemlerinin başarısına gölge düşürmektedir (Muyeen et al. 2008).

Sincap kafesli asenkron generatörler yapıları gereği döner manyetik oluşması için reaktif güç tüketirler. Bu özellikle zayıf ağlar ve güçlü türbinler için istenmeyen bir durumdur. Bu yüzden güç katsayısını düzeltmek için kapasitör grubu kullanılarak kompanzasyon yapılır. Resim 2.4’de sincap kafesli asenkron generatörün olduğu sabit hızlı rüzgar türbininin genel yapısı gösterilmiştir.



**Resim 2.4** Sabit hızlı rüzgar türbininin genel yapısı (Muyeen et al. 2008)

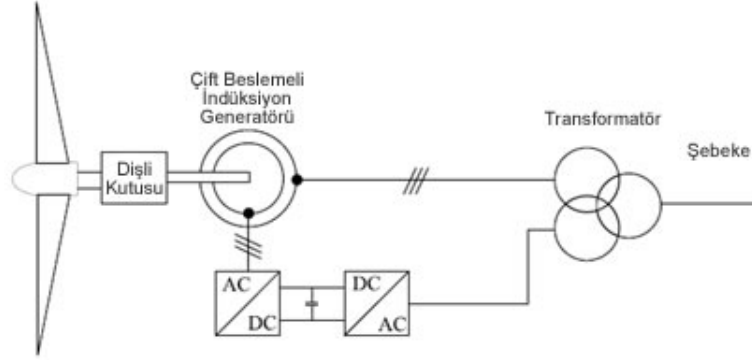
#### 2.4.1.2 Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri

Farklı bileşenlere sahip değişken hızlı rüzgar türbinleri vardır. Değişken hızlı rüzgar türbinleri yapı olarak oldukça eski olmakla birlikte sadece elektrik üretimindeki gelişmelerle yeni adımlar atılabilmektedir. Bu yenilikler genel olarak malzemelerin geliştirilmesi, elektriksel elemanların optimize edilmesi, kontrol sistemlerinde yeni yaklaşımların oluşması vb. etkenlere bağlıdır (Carlin et al. 2001). Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde asıl gelişim sabit hızlı rüzgar türbinlerinin gelişimiyle başlamıştır. Sonrasında rotoru sargılı asenkron generatörlü rüzgar türbinleri yaygınlaşmıştır. Rotor direncinin harici olarak ayarlanabildiği bu generatörlerde, toplam rotor direncinin ayarlanması sayesinde generatörün kayması kontrol edilebilmektedir (Ackerman 2005).

Rüzgar türbinlerinde en çok tercih edilen değişken hızlı rüzgar türbinlerinde genelde çift beslemeli asenkron generatörler ve doğrudan sürülen senkron generatörler kullanılmaktadır. Çift beslemeli asenkron generatörlerin kullanıldığı sistemlerde rüzgar türbini mili ve generatör arasında standart olarak dişli kutusu bulunur. Stator ise direkt olarak şebekeye bağlıdır. Anma hızının % 60-110 değerleri arasındaki hız değerleri enerji elde etmek mümkün olmaktadır. Enerji eldesini belli aralıklarda tutmak için kanat hız oranı ayarlanır (Polinder et al. 2004).

Güç dönüştürücüler, reaktif güç kontrolü sağlamada kullanılır. Güç konvertöründe aktif ve reaktif güç kontrolü birbirinden bağımsız olarak gerçekleştirilir. Bu yüzden gerilim

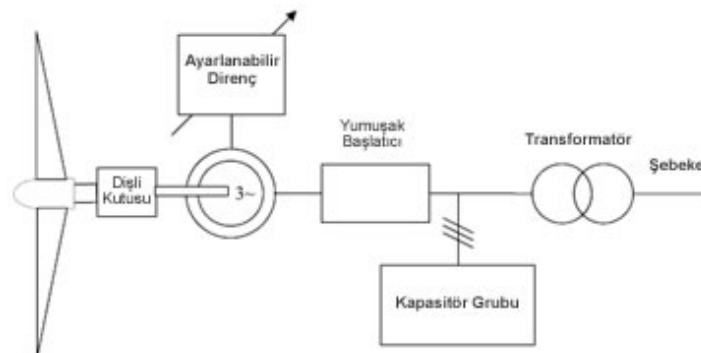
dalgalanmalarının olduğu zayıf ağlarda çift beslemeli asenkron generatör kullanmak çoğu zaman avantajlıdır (Antonakis 2005). Resim 2.5’de çift beslemeli asenkron generatörün kullanıldığı değişken hızlı rüzgar türbini yapısı gösterilmiştir.



**Resim 2.5** Değişken hızlı rüzgar türbininin genel yapısı (Muyeen et al. 2008)

Değişken hızlı rüzgar türbini generatör sistemlerinde dişli kutusuna gerek yoktur çünkü rotor 10-25 rpm gibi oldukça düşük hızlarda dönmektedir. Bu yüzden bu uygulamalarda standart generatörler kullanılamaz ve özel generatörler geliştirmek gerekmektedir. Bu türbinler, büyük torklar ürettiği için yapı itibarıyla oldukça büyüktürler.

Toplam türbin gücü bir evirici aracılığıyla şebeke frekansına uygun olacak şekilde ayarlanır ve güç şebekeye aktarılır. Rüzgar hızı anma hızının üstüne çıkınca kanatların açısı ayarlanarak güç azaltılır ve böylece ayarlama yapmak mümkün hale gelir (Polinder et al. 2004). Resim 2.6’da sınırlı değişken hızlı rüzgar türbini yapısının genel hali gösterilmiştir.



**Resim 2.6** Belirli sınırlar dahilinde değişken hızlı rüzgar türbininin genel yapısı (Muyeen et al. 2008)

## **2.4.2 Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler**

Temel olarak bir rüzgar türbinine asenkron, senkron ve doğru akım generatörlerinden herhangi biri bağlanabilir. Ancak generatörlerin birbirlerine göre farklı üstünlükleri olduğundan farklı yer ve uygulamalara göre değişik generatörler kullanılmaktadır.

### **2.4.2.1 Doğru Akım Generatörleri**

Doğru akım makinaları güvenilirliği düşüktür ve fazla bakım gerektirirler. Buna rağmen endüstride hız kontrollerinin kolay olmasından dolayı yaygın olarak kullanılırlar. Özellikle küçük kapasiteli, şebekeden bağımsız çalışan rüzgar türbinlerinde tercih edilmektedirler. Doğru akım makinalarının komitatör problemlerini önleyebilmek için bu motorlar son zamanlarda daimi mıknatıslı olarak tasarlanmaya başlamıştır. Fırçasız doğru akım makinaları olarakda bilinen bu makinalar çoğunlukla küçük güçlü rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadır (Uyar 2006).

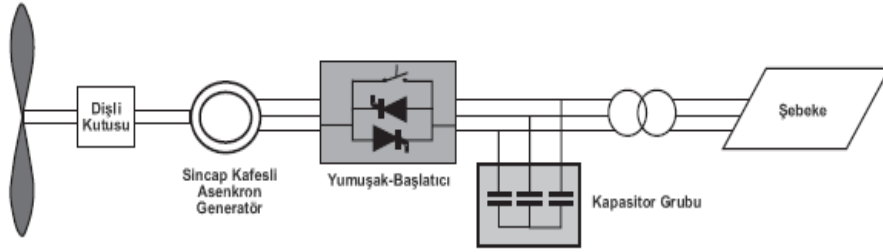
### **2.4.2.2 Asenkron Generatörler**

Asenkron generatörler rüzgar türbinlerinde en yaygın olarak kullanılan generatörlerdir. Sağlam, basit yapılı, büyük güçlü tasarımların yapılabilmesi, düşük maliyeti vb. avantajları vardır. İki tür asenkron generatör vardır: Bunlar sincap kafesli asenkron generatör ve rotoru sargılı asenkron generatördür (Dursun ve Binark 2008).

#### **2.4.2.2.1 Sincap Kafesli Asenkron Generatör**

Sincap kafesli asenkron generatörler basit mekanik yapıları, yüksek verimli olmaları ve düşük bakım maliyetlerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Resim 2.7’de şebekeye direkt bağlı sincap kafesli asenkron generatör düzeni görülmektedir. Bu generatörlerin hızı, rüzgar hızındaki değişimin sebep olduğu kaymadan dolayı yalnız %1-2 oranında değişmektedir. Bu yüzden bu generatörler sabit hızlı rüzgar türbinlerinde

kullanılırlar. Kanatların bağlı olduğu mil ve generatör birbirlerine bir dişli kutusu aracılığıyla bağlıdır. Bu yüzden rotor ve generatör hızları birbirine göre farklıdır.



**Resim 2.7** Şebekeye sincap kafesli indüksiyon generatörüyle bağlı RT düzeneği  
(Ackermann 2005)

Bu generatörlerin bulunduğu düzenekler bünyelerinde tipik olarak yumuşak başlatma mekanizması ve reaktif güç kompanzasyon ekipmanı bulundurulur. Sincap kafesli indüksiyon generatörleri, ani düşen ve artan tork-hız karakteristiğine sahiptirler bu yüzden rüzgar hızındaki değişimlerden şebeke direkt olarak etkilenmektedir. Bu özellikle şebekeye bağlı olarak çalışma esnasında normal çalışma akımının 7-8 katına kadar artmasına sebep olmaktadır buda şebeke için bozucu bir etkiyi sebep olur. Bu yüzden ani dalgalanmaları engelleyecek önlemler alınmalıdır (Ackermann 2005).

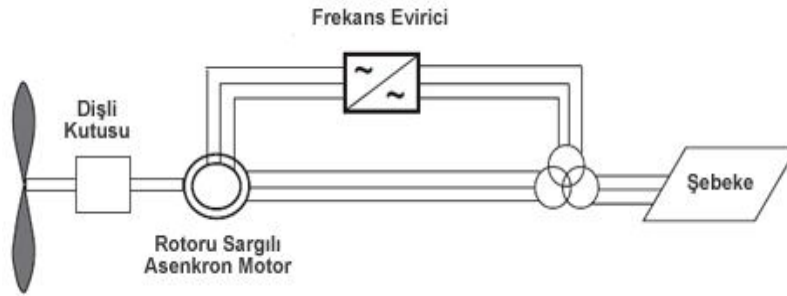
#### 2.4.2.2.2 Rotoru Sargılı İndüksiyon Generatörleri

Rotoru sargılı indüksiyon generatörün rotor sargı direnci dışardan değiştirilebilmektedir. Sargılı rotorun sargıları bileziklere bağlıdır. Bileziklere bağlı olan fırçalar yardımıyla rotor sargıları ayarlanabilir dirence veya dış kaynağa bağlanabilir. Böylece yol alma akımı sınırlandırılabilir ve hız ayarı yapılabilir. Bununla birlikte maliyeti yüksek ve sincap kafesli indüksiyon generatörler kadar sağlam değildirler (Dursun vd. 2008).

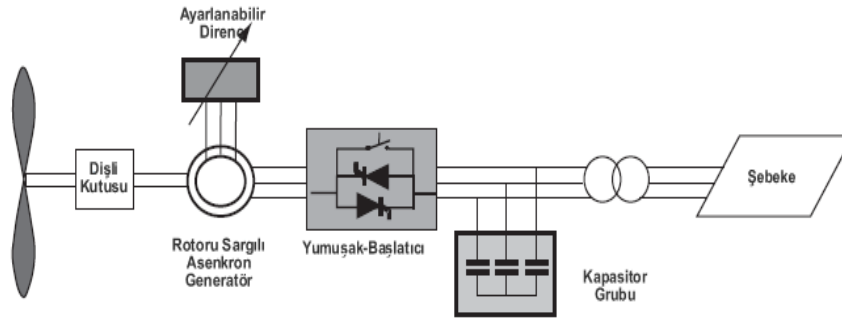
##### 2.4.2.2.2.1 Çift Beslemeli İndüksiyon Generatörleri

Çift besleme indüksiyon generatörün stator sargıları bir trafo aracılığıyla direkt şebekeye, rotor sargıları ise iki adet back-to-back konvertör aracılığıyla şebekeye bağlanmaktadır.

Rotor tarafındaki konvertör sistemi elektromanyetik torku bir seviyede tutar ve rotor mıknatıslanmasını sağlamak için reaktif güç sağlar. Konvertör sadece rotorun kayma kontrolünü sağlamak için kullanıldığından türbinin toplam gücünün %25 oranında konvertör gücü yeterli olmaktadır. Bu da maliyetin daha az olmasını sağlamaktadır. Harici bozucu etkilere karşı dayanıklılık ve kararlılık göstermektedir. Özellikle deniz üstü uygulamaları için tercih edilmektedir. Hız uygulamalarına çözüm sunabilmekle birlikte sınırlı olmaktadır. Bilezikli tertibatın bakıma ihtiyac duyması en büyük dezavantajdır (Uyar vd. 2006, Dursun ve Binark 2008). Resim 2.8, şebekeye yumuşak başlatıcı ile bağlı rotor sargılı indüksiyon generatör düzeneğini göstermektedir.



**Resim 2.8** Çift beslemeli indüksiyon generatörlü RT düzeneği (Ackermann 2005)



**Resim 2.9** Şebekeye rotor sargılı indüksiyon generatörüyle bağlı Rüzgar Türbini (Ackermann 2005)

#### 2.4.2.3 Senkron Generatör

Dünyanın elektrik üretim sektöründe en çok kullanılan, en temel elektrik makinalardan biri senkron generatörlerdir. Bu makinalar sabit kaynak frekansının gerektiği sabit hızlı

rüzgar türbini uygulamalarında çalışırlar. Bu yüzden güç elektroniği elemanlarının olmadığı değişken hızlı rüzgar türbinleri için uygun değildirler. Ayrıca, senkron generatörlerin rotor sargılarını tahrik etmek için DC akım gerektiğinden genel olarak rotor miline bağlı kayabilen karbon fırçalar kullanılır. Bu kullanım beraberinde bazı güvensizlikler doğurur.

Modern senkron makinaların rotoru kendini DC akımla tahrik edebilecek şekilde fırçasız olarak yapılmaktadır. Böylece fiyatlar azalırken güvenilirlik artar. DC akım ihtiyacı relüktans rotor kullanılarak giderilebilir. Relüktans makina güçleri 10 KW civarlarında sınırlı olmasına rağmen günümüzde küçük güçlü rüzgar generatörleri ile ilgili yatırımlar yapılmaya devam edilmektedir. Senkron generatörler özellikle termal santraller gibi sabit hızlı sistemler için uygundur. Şebekeye bağlı bir senkron makinanın indüksiyon makinasına göre bazı avantajları vardır. Senkron makinlar şebekeden reaktif güç çekmeye ihtiyaç duymazlar böylece şebeke daha kaliteli olur. Bu üstünlük daha önceleri kullanılan uzun, düşük gerilimli hatları besleyen rüzgar tarlalarında dahada belirgin hale gelmektedir.

Günümüzde rüzgar tarlaları büyük şebekelere kısa hatlarla bağlanmaktadır ve genel olarak indüksiyon generatörleri kullanılmaktadır. Senkron makinalar çoğunlukla dişli kutusuyla sürülen rüzgar sistemlerinde kullanılırlar. Bununla birlikte senkron generatörlerin düşük hızlı tasarlanmasıyla doğrudan sürülen değişken hızlı rüzgar türbinlerinde daha avantajlı olmuştur. Bu tarz bir tasarım söz konusu olduğunda generatör, statora bağlı güç elektroniği evirici voltaj kaynağıyla ve rotor kalıcı mıknatıs veya tahrik sargısının tahrikiyle şebekeden tamamen kopartılır (Patel 2006).

#### **2.4.2.4 Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörlerin Kıyaslanması**

Çizelge 2.8 farklı tip generatorlerin birbirlerine göre kıyaslamalarını göstermektedir. Bu kıyaslama sonucunda farklı tür rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörlerin birbirlerine göre üstünlükleri ve zayıflıkları olduğu gösterilmiştir (Amirat 2007).

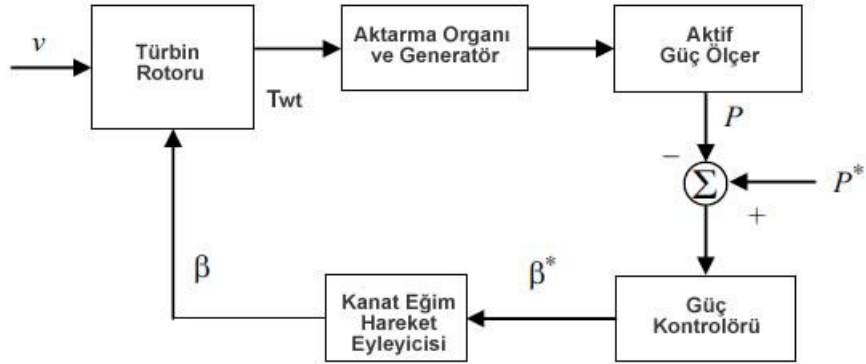
**Çizelge 2.8** Rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörlerin kıyaslanması

| Generatör Tipi                       | Avantajlar                                                                                                                                                                                                          | Dezavantajlar                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| İndüksiyon Generatörü                | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tüm hız aralığında çalışma</li> <li>✓ Fırçalara ihtiyaç yoktur.</li> <li>✓ Aktif ve reaktif gücün tam kontrolü</li> <li>✓ İspatlanmış Teknoloji</li> </ul>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Tam ölçekli güç eviricisi</li> <li>❖ Dişli kutusu ihtiyacı</li> </ul>                                                     |
| Senkron Generator                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tüm hız aralığında çalışma</li> <li>✓ Dişli kutusunu çıkarmak mümkündür</li> <li>✓ Aktif ve reaktif gücün tam kontrolü</li> </ul>                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Bazı uygulamalar için küçük evirici</li> <li>❖ Tam ölçekli güç eviricisi</li> </ul>                                       |
| Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generator  | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tüm hız aralığında çalışma</li> <li>✓ Dişli kutusunu çıkarmak mümkündür</li> <li>✓ Aktif ve reaktif gücün tam kontrolü</li> <li>✓ Fırçalar (Düşük bakım gideri)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Tam ölçekli güç eviricisi</li> <li>❖ Çok kutuplu generatör (Büyük ve ağır)</li> <li>❖ Kalıcı mıknatıs ihtiyacı</li> </ul> |
| Çift Beslemeli İndüksiyon Generatörü | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Senkron hızın <math>\pm 30</math> yakın hızlarda çalışma</li> <li>✓ Ucuz küçük kapasiteli PWM evirici</li> <li>✓ Aktif ve reaktif gücün tam kontrolü</li> </ul>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Halkaları bulunur</li> <li>❖ Dişli kutusuna ihtiyaç vardır.</li> </ul>                                                    |

### 2.4.3 Rüzgar Türbinlerinin Kontrolü

Rüzgar türbini kontrol sistemleri algılayıcı, kanat hareket mekanizması, kontrolör ve yazılım gibi temel parçalardan oluşmaktadır. Kontrol sisteminin girişi durumundaki algılayıcılar dış ortamın sinyallerini toplayıp kontrolöre gönderir. Bu sinyaller kontrolörde işlendikten sonra çıkışları yönlendirecek süreç geliştirilir. Algılayıcılar, anemometre, rüzgar gülü, rotor hız sensörü, wattmetre, kanat açısı konum sensörü, çeşitli amaçlarla kullanılan sınır anahtarları, titreşim sensörleri, sıcaklık göstergesi, sıvı seviye göstergeleri, hidrolik basınç sensörleri, butonlar, anahtarlar vb. olarak

örneklendirilebilir. Hareket mekanizmaları, elektrik motorları veya hidrolik kanat hareket mekanizması, mile bağlı frenler, rüzgara karşı çevirme mekanizması motoru vb. olabilirler. Kontrolörler, giriş sinyallerini işleyerek çıkışı kontrol eden genel olarak bilgisayar, mikrodenetleyici tabanlı kontrolörler veya programlanabilir lojik kontrolörler olabilir (Burton et al. 2001).



**Resim 2.10** Güç kontrolü blok diyagramı (Munteanu et al. 2008)

Resim 2.10 kanat açısı için genel güç kontrol yapısını göstermektedir. Ölçülen  $P$  aktif güç değeri referans  $P$  aktif gücüyle kıyaslanıp fark bulunduğundan sonra hata sinyali kontrolöre iletilir. Güç kontrolörü farklı yöntemler kullanarak referans beta değerini kontrol eder. Kontrol sinyali, hareket eyleyiciye iletilir ve nihai olarak sistemi kontrol etmemizi sağlayan beta sinyali üretilir (Munteanu et al. 2008). Bu kontrol sisteminde referans güç ve güç ölçüm değerinin farkı olarak ifade edilen hataya bağlı olarak kontrol gerçekleştirilir. Güç yerine sistemin rotor hızında referans alınabilir.

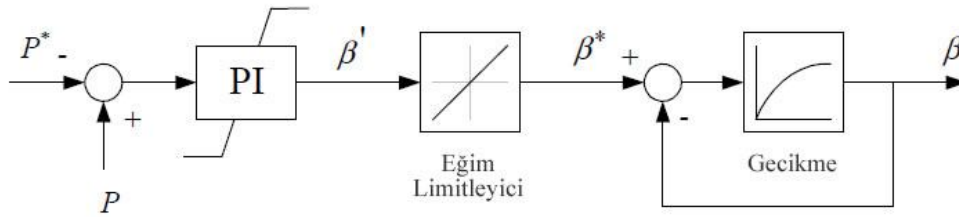
#### 2.4.3.1 Pasif Hız Kesme Kontrolü

Güç kontrolü yapılan rüzgar türbinlerinde en kolay kontrol yöntemi pasif hız kesme kontrolüdür. Pasif güç kontrolü, kanat geometrisinde herhangi bir değişim yapılmaksızın, rüzgar hızı arttığında çıkış değerinin en yüksek değere ulaşması için kaldırma katsayısını azaltma ve sürtünme katsayısı arttırma suretiyle yapılan bir kontrol yöntemidir. İstenen rüzgar hızında nominal veya maksimum güç değerine ulaşmak için sabit kanat açılı rüzgar türbini seçilir.

### 2.4.3.2 Aktif Hız Kesme Kontrolü

Aktif hız kesme kontrollü rüzgar türbinlerinin popülerliği son zamanlarda gittikçe artmaktadır. Prensipinde bu sistemler değişken kanat açılı hız-kesme türbinidir. Kullanılan generatör, şebekeye direkt bağlı sincap kafesli indüksiyon generatörüdür. Hız kesme (stall) ve aktif hız kesme (active stall) kontrolü arasındaki en önemli fark hız kesme etkisi kontrolüne izin veren değişken kanat açısının kontrolüdür (Iov et al. 2004).

Negatif kanat eğim açısı kontrolü olarak da adlandırılan aktif hız kesme kontrolünde kanat açısı değiştirilerek aerodinamik güç ayarlanır. Anma değerinde çıkış gücü sağlamak için kanat açısı belli aralıklarda kontrol edilir. Bu sayede aktif hız kesme kontrolü sağlanmaktadır (Munteanu et al. 2008). Bu kontrol sayesinde türbinin aktarma organının aşırı yüklenmeksizin her türlü çevresel durumda en uygun çıkış gücü elde edilmeye çalışılmaktadır. Resim 2.11 bu kontrolün blok diyagramı göstermektedir.

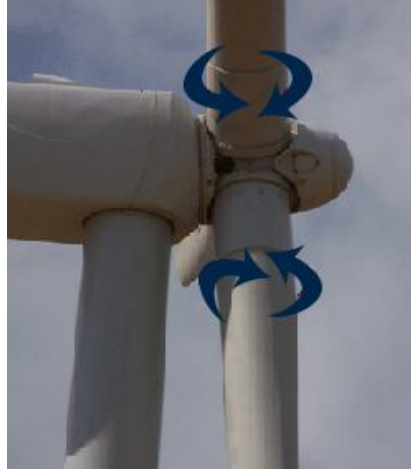


**Resim 2.11** Aktif durdurma kontrolü blok diyagramı (Munteanu et al. 2008)

### 2.4.3.3 Kanat Hareket Mekanizması Kontrolü

Kanat açısı kontrollü rüzgar türbininde, çıkış gücü belli periyotlarla sürekli olarak kontrolör tarafından kontrol edilmektedir. Çıkış gücü çok arttığı veya azaldığı zaman kontrolör kanat açısını ayarlayan mekanizmayı kontrol eder ve böylece rüzgar kanatlarının rüzgardan topladığı enerji arttırılmak veya azaltılmak suretiyle kontrol sağlanır. Bu tarz bir kontrolün sağlanabilmesi için Resim 2.12’de gösterildiği gibi rotor kanatlarının uzunlamasına etrafında dönebilir şekilde tasarlanması gerekmektedir. Normal çalışma süresince kanatlar belli sürede küçük hareketler yaparak konumuna oturur. Kanat açısı kontrolü tasarımı büyük oranda kanat açısının konumunun bilinmesine ihtiyaç duyar. Bu türbinlerde, kontrolörler genelde kanat açısını her

seferinde birkaç derece olacak şekilde ayarlar ve böylece toplanan enerji maksimum olacak şekilde kanatın en uygun açığı alması sağlanır. Kanatları çevirmek için genel olarak hidrolik pistonlar veya elektrik motorları kullanılır (İnt.Kay.11).



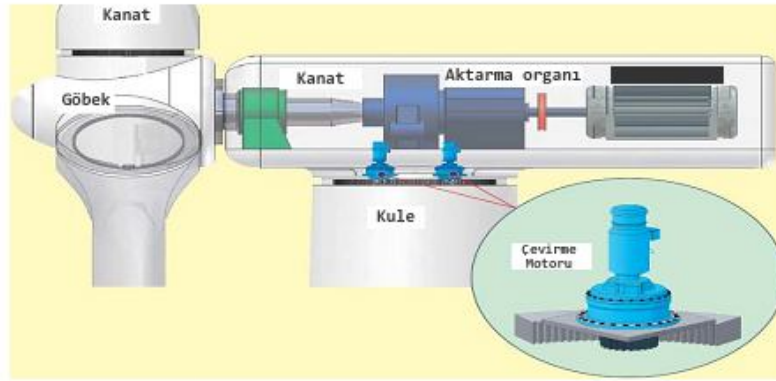
**Resim 2.12** Kanat eğim mekanizması hareketi (İnt.Kay.12)

#### **2.4.3.4 Rüzgara Karşı Çevirme Mekanizması Kontrolü**

Bu sistemlerde, türbini bir pozisyonda tutmak için frenler, çevirme mekanizması, çevirme mili, rüzgar yönü algılayıcısı, pozisyon algılayıcısı gibi alt parçaları bünyesinde bulundurulur. Bu kontrol sisteminin ana işlevi rotoru her zaman rüzgara karşı çevirmektir. Böylece türbin verimliliği arttırılabilecek ve daha güvenli çalışma sağlanabilecektir. Bu mekanizmanın basit bir yapısı Resim 2.13’de görülmektedir (Haiguo ve Zhixin 2007).

#### **2.4.4 Rüzgar Enerji Sistemlerinde Güç Elektroniği**

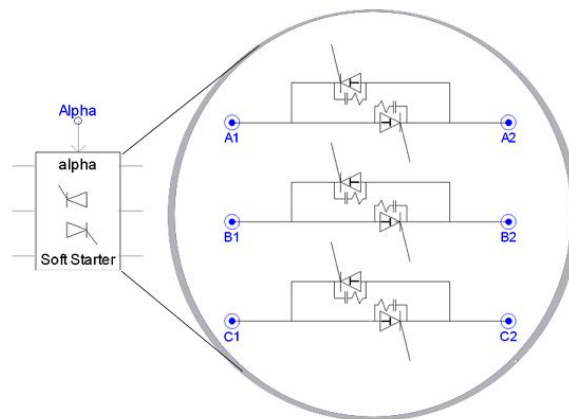
Güç elektroniği teknolojisi hızlı bir gelişim göstermektedir. Günümüzde güç elektroniği elemanları daha yüksek akım ve gerilim seviyelerinde çalışmaktadırlar. Bunun yanında güç kayıpları ise makul seviyelere düşmüştür. Bu aygıtların oldukça büyük güç seviyelerinde bile kontrolü oldukça kolaydır. Fiyat/güç oranları gün geçtikçe düşmekte ve bu sayede rüzgar türbinlerinin performansını geliştirmekte oldukça etkili olmaktadır. Bu bölümde rüzgar türbinlerinde kullanılan güç elektroniği topolojilerinden, avantaj ve dezavantajlarından bahsedilecektir (Hansen 2005).



**Resim 2.13** Rüzgara karşı çevirme mekanizması (Haiguo and Zhixin 2007)

#### 2.4.4.1 Yumuşak Başlatıcılar

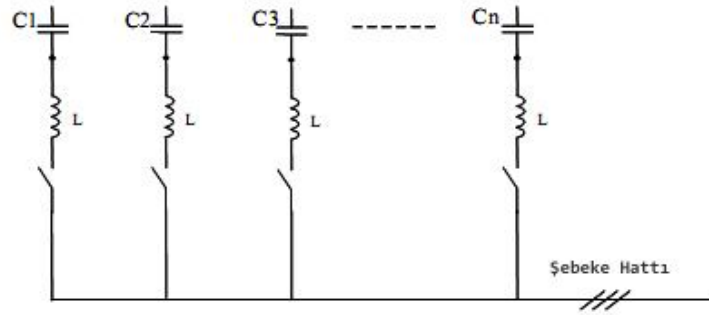
Yumuşak başlatıcılar generatörün şebekeye bağlanması veya kopması sırasında geçici rejimde oluşan akım dalgalanmalarını azaltmak için kullanılan güç elektroniği elemanlarıdır. Genellikle sabit hızlı rüzgar enerjisi sistemlerinde kullanılmaktadırlar (Rodriguez 2006). Yapıları basit ve ucuzdurlar. Yumuşak başlatıcılar olmaksızın akım değerleri 7-8 kat artar ve buda gerilimde dalgalanmalara sebep olur (Hansen 2005). Yumuşak başlatıcılarda tetikleme açısının kontrolü ile generatör şebekeye bağlanır ve gerilimdeki dalgalanmalar azaltılır. Resim 2.14’de görüldüğü üzere 6 tristörlü yapıdan oluşmaktadır. Bunlar her bir hat için back-to-back bağlantısı yapılmaktadır.



**Resim 2.14** Yumuşak başlatıcı güç devresi (Hansen 2005)

#### 2.4.4.2 Kapasitör Grubu

Kapasitör grubu sabit hızlı veya sınırlı değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılır (Hansen 2005). Generatörün güç katsayısı kompensasyonunu yapar. Normalde generatörler tüm güç aralığında kompanse edilir. Kapasitörlerin anahtarlanması, belli süreler boyunca reaktif güç ölçümünün ortalama değerinin bir fonksiyonu olarak yapılır. Resim 2.15 kapasitör grubu yapısını göstermektedir (Hansen et al. 2001).



**Resim 2.15** Kapasitör grubu şeması (Hansen et al. 2001)

#### 2.4.4.3 Doğrultucular ve Eviriciler

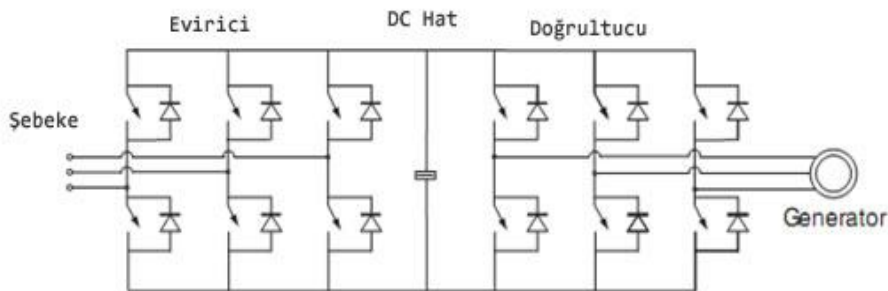
Ayarlanabilir hız sürücülerini olarakda adlandırılan frekans invertörleri: AC'nin DC'ye çevirildiği doğrultucular, kapasitörler, DC'nin AC'ye çevirildiği eviriciler kısımlarından oluşmaktadırlar. Doğrultma işlemi diyotlar kullanılarak yapılmaktadır. Evirme işleminde elektronik anahtarlama elemanları kullanılmaktadır. Diyotlu doğrultma işlemi basit, ucuz ve düşük kayıplı olduklarından dolayı çoğu uygulamada tercih edilmektedir. Doğrusal olmayan yapılarından dolayı harmonik akımları üretirler. Sadece bir yönlü güç akışına izin verirler. Generatör gerilimi ve akımını kontrol edemezler. Bu yüzden gerilimin ve akımın kontrol edildiği invertörlerle kullanılabilirler (Hansen 2005).

Tristörler ucuz, düşük kayıplı evirici çözümleri için uygundur. Ancak reaktif güç tüketirler ve büyük harmoniklere sebep olurlar. Güç kalitesini artırma çalışmaları tristörleri IGBT ve GTO gibi anahtarlama elemanlarına göre daha az çekici kılmıştır. GTO elemanları IGBT elemanlara göre daha fazla güçlerde çalışabilirler ancak IGBT elemanlarının gelişimi gelecekte bu farklı kapatacak düzeyde olacaktır. GTO elemanları

günümüzde daha çekici gibi gözüksede kontrolleri oldukça karışıktır. Doğrultucu ve generatör seçimi birlikte yapılırken evirici seçimi bunlardan bağımsız olarak yapılabilir. Senkron generatörlerde reaktif mıknatıslanma akımına ihtiyaç olmadığından diyotlu veya tristörlü doğrultma kullanılabilir. Ancak İndüksiyon generatörlerinde reaktif güç kontrolü gerektiği için GTO ve IGBT elemanlarının kullanılması zorunlu hale gelmektedir. Yüksek fiyat ve kayıplara rağmen IGBT'ler tüm çözümler içinde en çekici özelliklere sahiptir. Diyot ve tristörlerin kullanıldığı senkron generatörler benzeri güçteki IGBT'lerin kullanıldığı indüksiyon generatöre göre daha düşük maliyetlidirler.

#### 2.4.4.4 Frekans Eviricileri

Son yıllarda farklı evirici topolojileri geliştirilmiştir. Genelde eviricilerin back-to-back , çok seviyeli, birleşik, matrix ve resonant eviriciler olarak türleri vardır. Bu evirici topolojilerinin her biri ve bunların çalışma prensipleri birbirlerine göre bazı avantaj ve dezavantajları bünyesinde barındırır. Günümüzde rüzgar türbinlerinde back-to-back eviricilerin kullanımı oldukça yaygındır. Ancak matrix eviriciler ve çok seviyeli eviriciler back-to-back eviricilerle yarışacak duruma gelmiştir ve ileri aşamalarda çalışmalar daha da artacak ve daha yaygın hale geleceklerdir. Back-to-back eviriciler, geleneksel iki PWM gerilim kaynağı kontrollü eviriciden oluşan tek yönlü güç eviricileridir. Resim 2.16 back-to-back invertörünün genel yapısını göstermektedir. DC hat gerilimi, şebeke akımının tam kontrolünü sağlayabilmek için, şebeke hat-hat geriliminin genliğinden daha yüksek bir seviyeye yükseltilir. Doğrultma işleminden sonra kapasitör aracılığıyla gerilim düzeltme işlemi yapıldı ve anahtarlama işlemiyle evirici kontrol edilir (Hansen 2005).



**Resim 2.16** Back-to-back frekans invertörünün yapısı (Hansen 2005).

Yükseltme endüktansının varlığı şebekede istenemeyen durumlara karşı evirici için giriş koruma sağlar ve giriş harmonik filtresi ihtiyacını azaltır. Evirici ve doğrultucu arasındaki kapasitör diğer eviricileri etkilemeksizin şebeke ve generatör tarafındaki asimetrik kompanzasyona izin verir ve iki invertörün birbirinden ayrık kontrolünü olanaklı hale getirir. Şebeke tarafındaki evirici güç akışını DC hat gerilimini sabit tutarak kontrol eder. Generatör tarafındaki invertörün kontrolü mıknatıslanma ihtiyacını ve istenen rotor hızını uygun değerlere ayarlar (Hansen 2005).

### **3. MATERYAL ve METOT**

Bu bölüm boyunca bir rüzgar türbinini oluşturan bileşenlerin modellenmesi gerçekleştirilecektir. Türbin modelini oluşturmak için gerekli bileşenler; dinamik yapıya sahip rüzgar hızı modeli, rüzgardan elde edilen güç ve tork modeli, aktarma organı modeli, indüksiyon generatörü modeli, kanat eğim kontrolörü ve kanat eğim mekanizması modelidir.

Dinamik rüzgar hızı matematik modeli, bir bölgeye bağlı yükseklik, ortalama rüzgar hızı, hava basıncı, türbin kanat çapı, türbülans yoğunluğu vb. parametrelere bağlı olarak oluşturulmaktadır. Bölüm 3.1 boyunca modelleme işlemleri için gerekli teorik bilgiler anlatılmış ve matematiksel ifadeler gösterilmiştir.

Rüzgardan elde edilen güç ve tork modeli; daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi rüzgar hızının küpü, kanat yarıçapının karesi, performans katsayısı gibi parametrelere bağlıdır. Bölüm 3.2 rüzgardan elde edilen gücün belirlenmesi için gerekli modellerin oluşturulması ve simülasyonlarını göstermektedir.

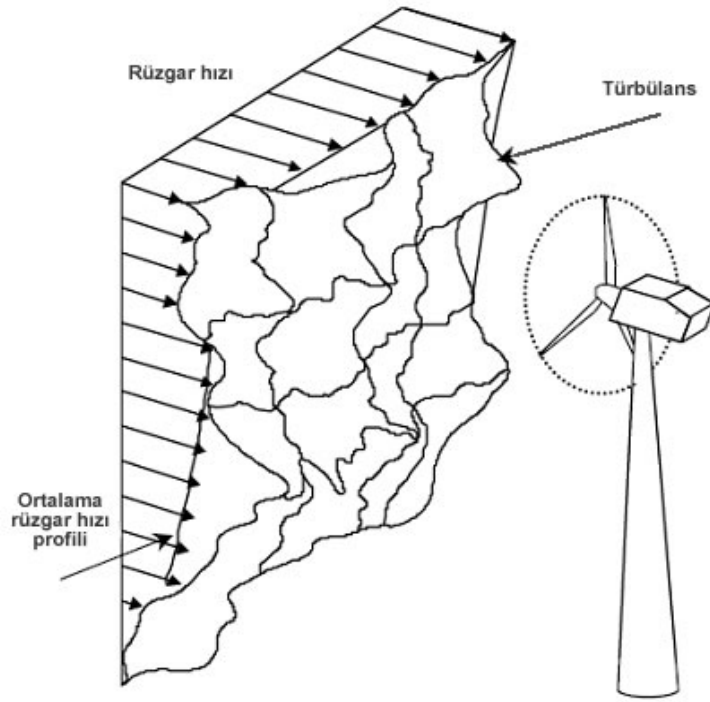
Literatürde altı, üç, iki, bir kütleli aktarma organları modelleri mevcut olmakla birlikte bölüm 3.3’de oluşturma kolaylığı ve kısa simülasyon zamanından dolayı bir kütleli aktarma organı modeli oluşturulmuştur. Daha doğru yaklaşımlar altı kütleli model için gerçekleştirilmekle birlikte modelin oluşturulması zorlaşmakta ve simülasyon zamanı uzamaktadır.

Bölüm 3.4’de gerekli teorik bilgilerden bahsedildikten sonra genel haliyle bir indüksiyon generatörünün matematiksel modeli gösterilmektedir. Kanat eğim mekanizması iki farklı yaklaşıma göre oluşturulmuş ve aralarındaki farklılıklar Bölüm 3.5’de anlatılmıştır. Ardından kanat eğim mekanizmasının kontrolünden bahsedilmiştir.

#### **3.1 Rüzgar Hızı Matematiksel Modeli**

Rüzgar türbinlerinde üretilen güç, rüzgarın zamanla değişen yapısından dolayı dalgalı olmaktadır. Birçok simülasyon uygulamasında sabit rüzgar hızı kullanılmaktadır ancak

simulasyonlarda bunun yerine dinamik rüzgar hızı matematik modelinin oluşturulması gerçeğe yakın sonuçlar almak için daha uygundur. Rüzgar hızı matematiksel modeli türbülans, kule gölgesi etkisi vb. parametrelere bağlı olarak oluşturulabilir. Şüphesiz ki döner durumdaki kanatlara rüzgarın etkisi durağan durumdaki rüzgar etkisinden farklıdır. Hatta her turda her bir kanata farklı rüzgar hızları etki etmektedir. Resim 3.1 incelenirse belli bir bölge için rüzgar hızı yapısının farklı olduğu açıkça gözükmemektedir (Rosas 2003).

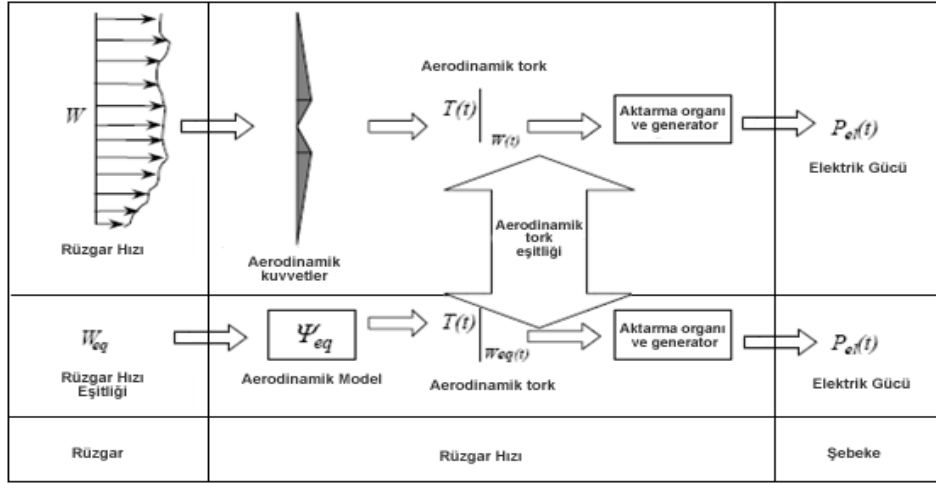


**Resim 3.1** Belli bir bölge için rüzgar hızı yapısı (Rosas 2003)

### 3.1.1 Rüzgar Hızı Matematiksel Modeli Eşitliği

Rüzgar hızı matematiksel modeli, deterministik ve stokastik bileşen olarak iki temel bileşenden oluşur. Rüzgar hızı model eşitliği prensip şeması Resim 3.2’de gösterilmektedir. Bu yapı rüzgar türbininde gücün nasıl üretildiğiyle ilgili kabaca bilgi vermektedir. Bilindiği üzere rüzgar hızı zamanla değişmekte ve bu değişim kanatlara etki etmektedir. Kanatların rüzgar gücüne bağlı olarak ürettiği aerodinamik kuvvet mekanik mil aracılığıyla dönme hareketine dönüştürülür. Mekanik güç generatörlerle

elektrik enerjisine dönüştürülür (Rosas 2003). Bu dönüşüm sonucunda üretilen elektrik enerjisi, şebekeyi besler veya şebekeden bağımsız olarak yüke aktarılır.



**Resim 3.2** Rüzgar enerjisi dönüşüm şeması (Rosas 2003)

Resim 3.2’de ilk kısmın çıkışı rüzgar hızı yapısını göstermektedir. İki temel rüzgar hızı modeli yaklaşımı vardır. İlk model yaklaşımına göre gerçek rüzgar hızı ölçümleri kullanılır. Böylece rüzgar türbini modeli için gereken aerodinamik tork, gerçek rüzgar hızı bilgilerinin ölçümüne bağlı olarak oluşturulur. Bununla birlikte sürekli rüzgar hızı ölçümü gerektirmesi ve bunun maliyetli oluşu dezavantajı olarak gösterilebilir. Daha esnek bir yaklaşım ise kullanıcı tarafından belirlenen parametrelere bağlı olarak oluşturulan rüzgar hızı modeliyle simulasyon yapmaktır. Literatürde rüzgar hızı aşağıdaki dört bileşenin toplamı olarak ifade edilmektedir (Ackerman 2005).

- Ortalama rüzgar hızı değeri,
- Rüzgar rampa hızı bileşeni,
- Ani rüzgar hızı bileşeni,
- Türbülans bileşeni,

Ortalama rüzgar hızı, rüzgar rampa hızı ve ani rüzgar hızı bileşenlerinin toplamı stokastik bileşen olarakda adlandırılmaktadır. Türbülans bileşeni ise deterministik bileşen olarak ifade edilmektedir. Rüzgar hızı modeli bu iki bileşenin toplamı olarak düşünülüp gerekli model oluşturulabilir (Martins et al. 2006). Rüzgar hızı;

$$V_w(t) = V_{det}(t) + V_{sto}(t) \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklemde  $v_{det}(t)$ , rüzgar hızının deterministik bileşeni,  $v_{sto}(t)$  rüzgar hızının stokastik bileşeni,  $t$  zaman olarak ifade edilmektedir. Daha genel haliyle bu denklem Denklem 3.2’de gösterilmiştir.

$$V_w(t) = V + V_{wr}(t) + V_{wg}(t) + V_{wt}(t) \quad (3.2)$$

Bu denklemde  $v_w(t)$  zamana bağlı rüzgar hızı,  $V$  rüzgar hızının ortalama değeri,  $v_{wr}(t)$  rüzgar rampa hızı bileşeni,  $v_{wg}(t)$  rüzgar ani hız bileşeni,  $v_{wt}(t)$  türbülans bileşeni olarak gösterilir. Rüzgar hızı saniyedeki metre türünden hız olarak ifade edilir.

### 3.1.2 Stokastik Bileşen

Stokastik bileşen ortalama rüzgar hızı, rüzgar rampa hızı (ramp), ani rüzgar hızı (gust) bileşeni, kule gölgesi (tower shadow) ve ani rüzgar yönü değişimi (wind shear) kısımlarından oluşur. Rüzgar kesmesi kanat yüklerinin analizi için önemlidir ancak elektriksel güce aktarılmadığından ihmal edilir (Tamaly et al. 2007 – Martins et al. 2006).

#### 3.1.2.1 Ortalama Rüzgar Hızı

Bir yerin olası potansiyel rüzgar hızını belirlemek, rüzgar enerjisinin ne düzeyde olduğunu hesaplamak için oldukça önemlidir. Bu veriler rüzgar türbinlerinin verimliliğini arttırmak ve çalışma devamlılığını sağlamak açısından da oldukça önemlidir. Uzun yıllar boyunca toplanan veriler aracılığıyla rüzgar hızı dağılım olasılığı kestirilebilir. Bu daha önceden belirtildiği gibi weibull, rayleigh gibi dağılımlar aracılığıyla deneysel olarak bulunabilir. Ortalama rüzgar hızı yüksekliğe, yeryüzü şekline bağlı olarak belirlenen bir fonksiyondur. Yer yüzeyinde engel olmaması durumunda dahi rüzgarı etkileyen engeller vardır (Bianchi 2007). Ortalama rüzgar hızı;

$$V_m(z) = \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^\alpha V_m(z_{ref}) \quad (3.3)$$

şeklinde tanımlanır.  $V_m(z_{ref})$ ,  $z_{ref}$  yüksekliğinde ölçülen ortalama rüzgar hızı,  $V_m(z)$ ,  $z$  seviyesindeki ortalama rüzgar hızı,  $\alpha$  0.16 ile 0.40 arasında değişen değerler alan üst olarak ifade edilir ve bölgelerin pürüzlülüğünü belirtmek için kullanılır. (Açık alan için  $\alpha=0.15$  büyük engellerin olduğu bölgeler için  $\alpha=0.4$ )

### 3.1.2.2 Rüzgar Rampa Hızı

Rüzgar rampa (ramp) hızı zamana bağlı olarak üç parametreyle belirlenir. Bunlar rüzgar rampa hızı genliği  $A_r$ , Rampa hızı başlangıç zamanı  $T_{sr}$ , rampa hızı bitiş zamanı  $T_{er}$ . Rüzgar rampa hızı Denklem (3.4)'le analitik olarak ifade edilebilir (Ackermann 2005).

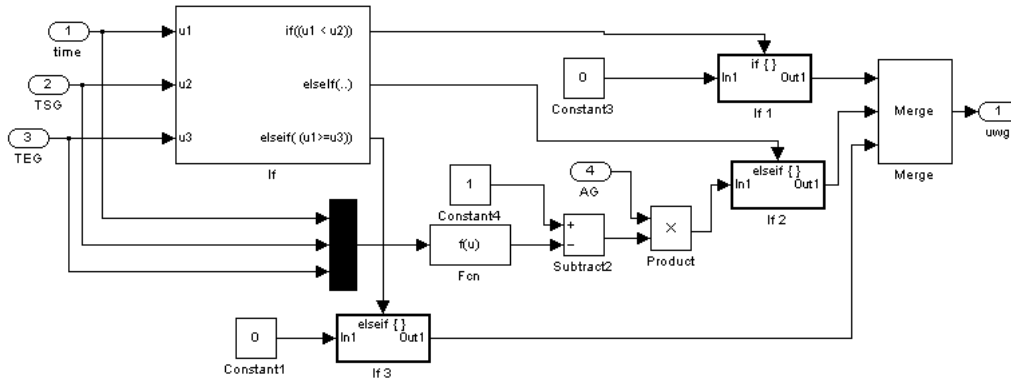
$$V_{wr}(t) = \left\{ \begin{array}{ll} t < T_{sr}, & v_{wr} = 0; \\ T_{sr} < t < T_{er}, & v_{wr} = A_r \frac{(t - T_{sr})}{(T_{er} - T_{sr})} \\ T_{er} > t, & v_{wr} = A_r; \end{array} \right. \quad (3.4)$$

Bu parçalı fonksiyon; 10 dakikalık standart simulasyonlar için uygundur. Ayrıca generatör ve türbin kontrolörlerinin analizi içinde kullanılabilir (Martins et al. 2006).

### 3.1.2.3 Rüzgar Ani Hızı

Rüzgar ani hızı (gust) belirlenen bir zaman aralığında anlık tepe rüzgar hızıdır. Rüzgar rampa hızı üç parametreyle ifade edilebilir. Bunlar rüzgar ani hızı genliği  $A_g$ , rüzgar ani hızı başlangıç zamanı  $T_{sg}$  ve rampa hızı bitiş  $T_{eg}$  zamanıdır. Rüzgar ani hızı Denklem (3.5)'deki gibi ifade edilebilir (Martins et al. 2006).





Şekil 3.2 Ani rüzgar hızı simulink blok diyagramı

### 3.1.3 Deterministik Bileşen

Deterministik bileşen zamana, ortalama rüzgar hızına ve rotor pozisyonuna bağlı olarak değişmektedir. Türbülans deterministik bileşeni oluşturmaktadır.

#### 3.1.3.1 Türbülans

Rotor alanında rüzgar davranışının zamanla değişen parçası türbülans olarak adlandırılır. Türbülans, saniyelerden dakikalara varan geniş aralıkta rüzgar hızı değişimlerinden kaynaklanmaktadır. Değişimler doğal rastgele davranışa sahiptirler ancak havanın dinamiği rüzgar hızı değişimlerini oluşturan ana etkindir. Türbülans bileşeni zamana ve rotor pozisyonuna bağlı olarak değişmektedir. Düşük frekanslı rüzgar değişimleri büyük genliklere, yüksek frekanslı rüzgar değişimleri ise küçük genliklere sahiptir (Rosas 2003). Türbülans, standart sapma ve ortalama rüzgar hızı arasındaki ilişkiyle açıklanmaktadır. Türbülans yoğunluğu;

$$I_u = \frac{\sigma}{V} \quad (3.6)$$

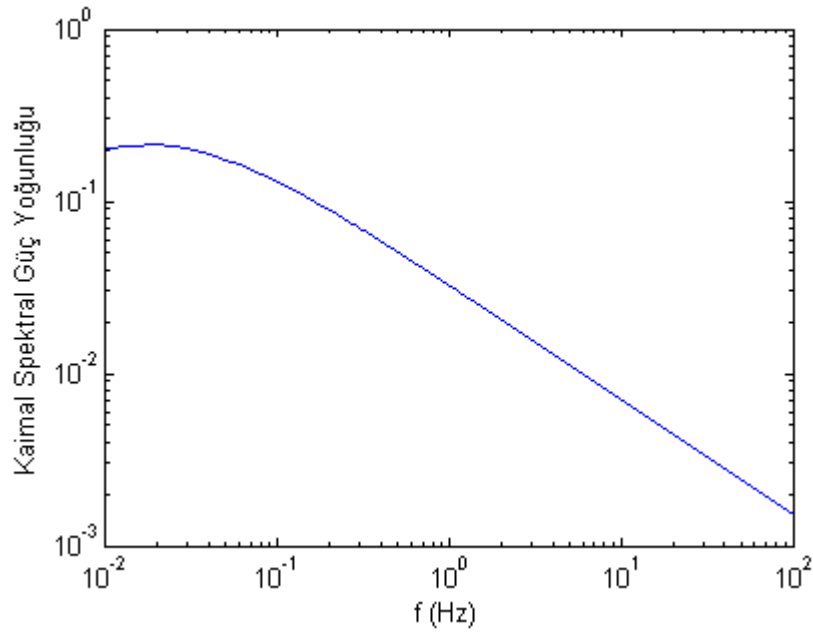
olarak gösterilir.  $I_u$  türbülans yoğunluğu,  $\sigma$  standart sapma,  $V$  ortalama rüzgar hızı olarak ifade edilmektedir.

### 3.1.3.1.1 Kaimal Spektrumu ve Spektral Güç Yoğunluğu

Spektral güç yoğunluğunu göstermek için farklı fonksiyonlar olmakla birlikte genel olarak birçok uygulama için kaimal spektral güç yoğunluğu yeterli olmaktadır. Kaimal spektrumu modeli diğer modeller gibi spektral güç yoğunluğu fonksiyonunu gösterir. Uzunlamasına rüzgar hızı bileşeni için model; frekans, uzunluk ölçüsü ve rüzgar hızı arasındaki ilişki kaimal ile tanımlanır (Burton 2001). Kaimal spektral güç yoğunluğu:

$$S_{kai}(f) = \sigma^2 \frac{4x_L / V}{(1 + 6fx_L / V)^{5/3}} \quad (3.7)$$

türbülans frekansı,  $x_L$  türbülans uzunluk ölçeği,  $\sigma$  standart sapma ve  $V$  ortalama rüzgar hızı olarak ifade edilir.



Şekil 3.3 Kaimal spektral güç yoğunluğu

Ortalama rüzgar hızı 10 m/s, türbülans yoğunluğu % 10 ve türbülans uzunluk ölçeği 600 m iken kaimal modelinin frekansa bağlı spektral güç yoğunluğu Şekil 3.3'deki grafik ile gösterilmiştir. Bu grafiğin çizdirilmesi için oluşturulan simulink modeli Ek-4'de verilmiştir.

### 3.1.3.1.2 0. ve 3. Harmonik Filtreleri

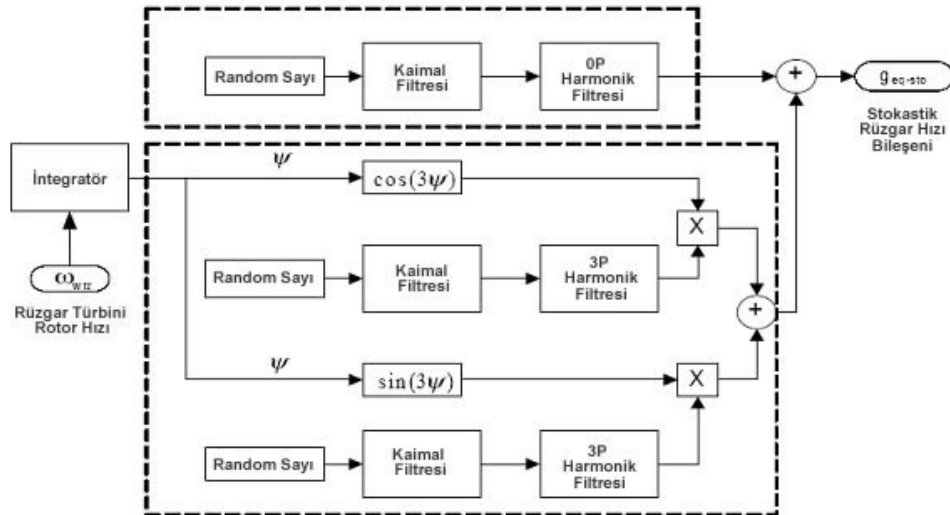
Deterministik bileşenin temel bileşenlerinden biri rüzgar hızı türbülansıdır. Rüzgar hızı türbülansı rastgele sayı üreticisine kaimal filtresi ve admittans filtesi uygulanarak elde edilebilir. Kaimal filtresinin çıkışına admitans fonksiyonu olarak adlandırılan bir filtre uygulanır. Bu fonksiyon 2. dereceden bir transfer fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Üç kanatlı rüzgar türbinleri için çoğunlukla 0. ve 3. çözümleri dikkate alınır (Rosas 2003). 0. harmonik bileşenine uygulanan filtre:

$$H_{adm\{0p\}} = \frac{4.7869.d_{tf}^2.s^2 + 0.9904}{7.6823.d_{tf}^2.s^2 + 7.3518.d_{tf}.s + 1} \quad (3.8)$$

3p harmonik bileşenine uygulanan filtre :

$$H_{adm\{3p\}} = \frac{0.2766.d_{tf}.s + 0.0307}{0.3691.d_{tf}^2.s^2 + 1.7722.d_{tf}.s + 1} \quad (3.9)$$

$d_{tf} = R / U_0$  normalizasyon parametresi R rüzgar türbinin çapı,  $U_0$  ortalama rüzgar hızı olarak ifade edilmektedir.



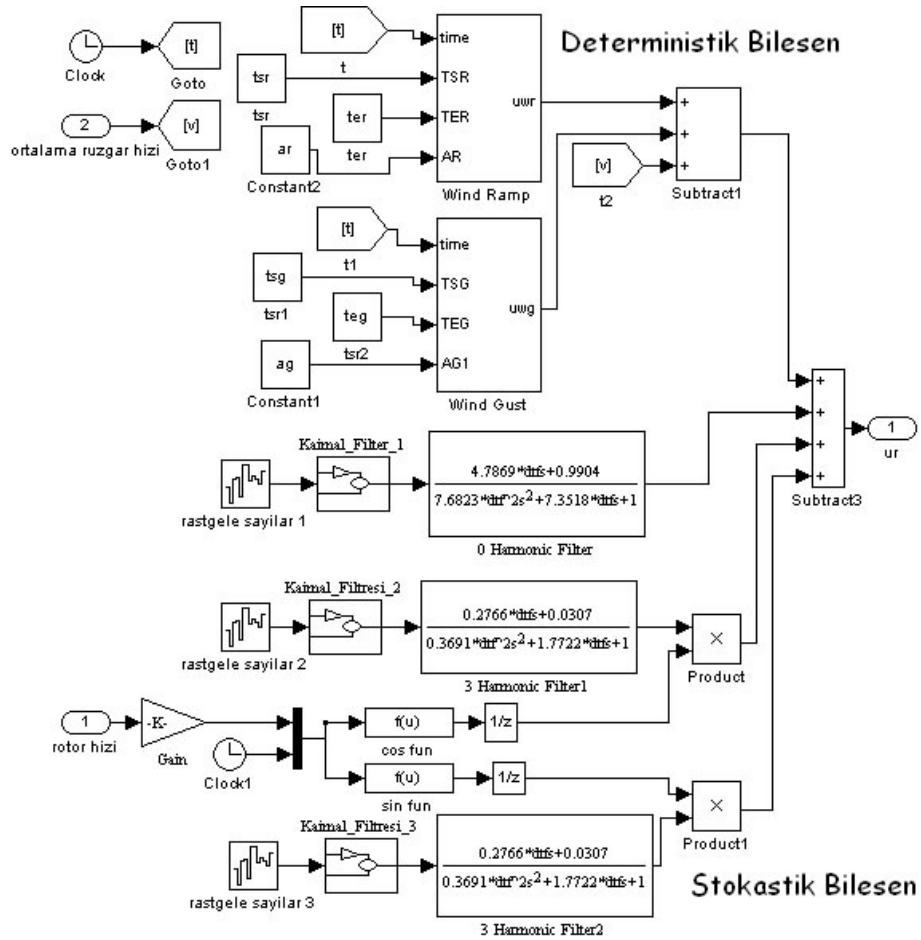
**Resim 3.3** Deterministik bileşen blok diyagramı (Tamaly 2007)

### 3.1.3.2 Deterministik Bileşen Blok Diyagramı

Resim 3.3’de deterministik bileşen olarakda adlandırılan türbülans; rotor pozisyonu, rastgele üretilen sayılar, kaimal filtresi, 0. ve 3. harmoniklerine bağlı olarak oluşturulan stokastik bileşen gösterilmiştir (Tamaly 2007).

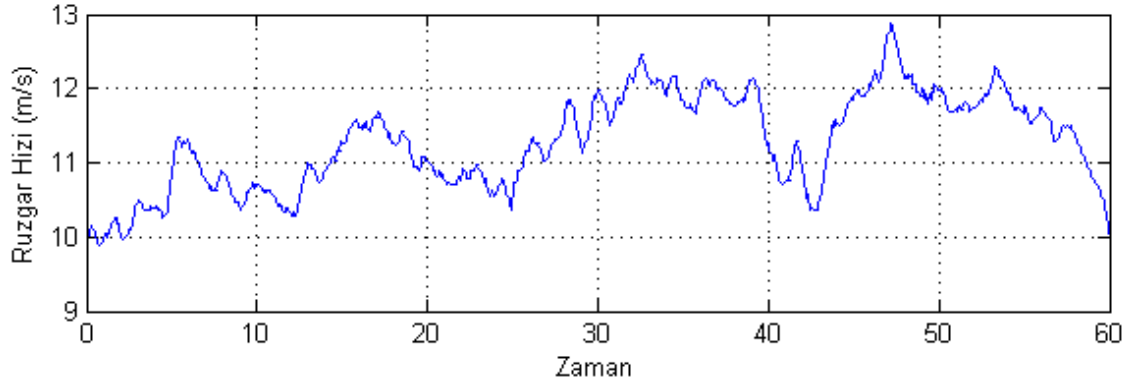
### 3.1.4 Toplam Rüzgar Hızı Simulink Modeli

Önceki bölümlerde ifade edilen deterministik ve stokastik bileşenler, alt bileşenleriyle birlikte Şekil 3.4’deki simulink modeliyle ifade edilmiştir.



Şekil 3.4 Toplam rüzgar hızı simulink modeli (Tamaly 2007)

Şekil 3.5, Ek-2’de verilen parametrelere göre oluşturulan rüzgar modeli grafiğini göstermektedir. Şekil 3.4 rüzgar ani hızı, rüzgar rampa hızı ve türbülans bileşenlerine bağlı olarak oluşturulan rüzgar hızı simülasyonu görülmektedir.



Şekil 3.5 Rüzgar hızı simülasyonu

### 3.2 Rüzgardan Elde Edilen Güç Modeli

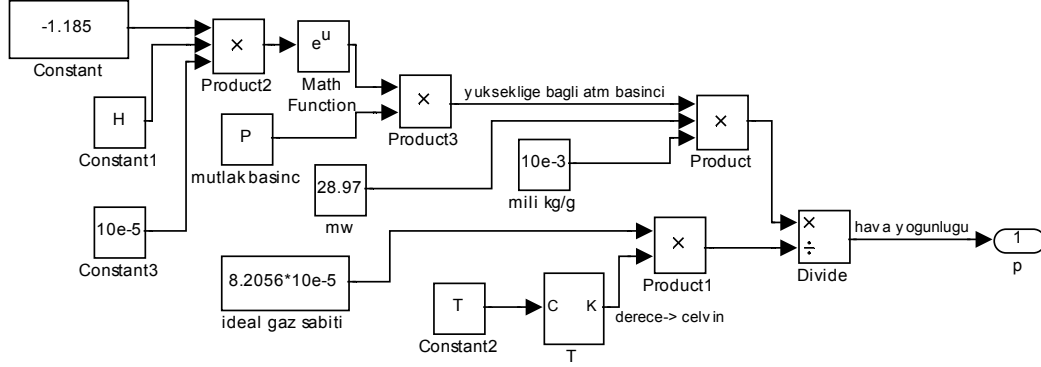
Rüzgardan elde edilen gücün modellenebilmesi için hava yoğunluğu, kanat hız oranı, performans katsayısı gibi büyüklüklerin hesaplanması gerekmektedir. Bu bölüm boyunca elde edilen güç ve tork için oluşturulan matematiksel modeller gösterilecektir.

#### 3.2.1 Hava Yoğunluğu Modeli

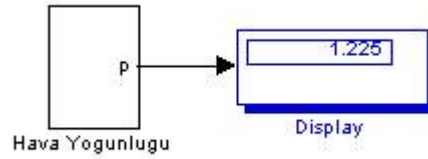
Rüzgar gücü kanatların süpürdüğü alanın hava yoğunluğuyla değişir. 15 derece sıcaklıkta ve 1 atm basınçta hava yoğunluğu  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ’dir ve uygulamalarda genel olarak hava yoğunluğu değeri 1.225 olarak seçilir ancak gerçekte bu bir kabüldür ve daha doğru bir yaklaşım için doğru modelin oluşturulması gerekmektedir. Daha önce bölüm 2.2.7.1’de ifade edilen hava yoğunluğu eşitliğine bağlı olarak oluşturulan simulink modeli Şekil 3.6’da verilmiştir.

Hava yoğunluğunun, deniz seviyesinde (0 metre), 1 atmosfer basıncı altında, 15 derece sıcaklıkta 1,225 olduğu ve bunun genel olarak kabul edildiğinden daha önce

bahsedilmiştir. Bu parametreler Şekil 3.6’da yerine konduğunda Şekil 3.7’de gösterilen göstergede 1.225 olduğu bulunmuştur.



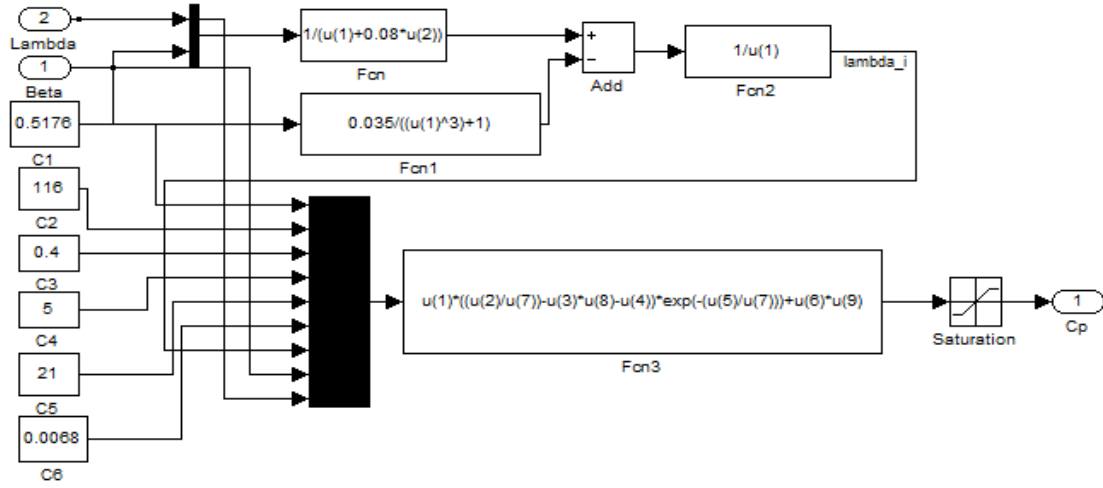
Şekil 3.6 Hava yoğunluğu simulink modeli



Şekil 3.7 1 Atm, 15° sıcaklıkta, deniz seviyesinde hava yoğunluğu değeri

### 3.2.2 Cp ve Ct Performans Katsayıları

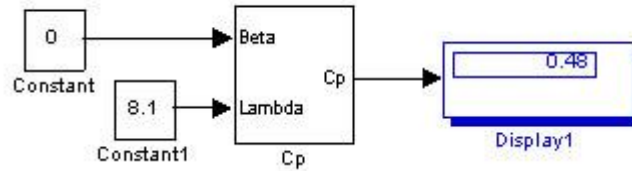
Cp parametresi derece türünden kanat açısı ( $\beta$ ) ve kanat kanat hız oranına ( $\lambda$ ) bağlı doğrusal olmayan bir fonksiyondur. Bir rüzgar türbini için Cp ayrıca kanat hız oranının bir fonksiyonudur (Kelouwani ve Agbossou 2004). Kanat açısı olarak ifade edilen beta girişi türbinlerde elde edilen gücün kontrolü için önemli bir kontrol girişi olarak kullanılmaktadır. Teorik olarak en yüksek performans katsayısı değeri 0.593’dür. Bu sınırlandırma modelin sağ tarafındaki doyum (saturation) bloğuyla gösterilmiştir. Modelin oluşturulması için gerekli ifadeler bölüm 2.2.7.5’de ifade edilmiştir. Şekil 3.8 performans katsayısının hesaplanması için oluşturulan simulink modelini göstermektedir.



Şekil 3.8 Performans katsayısı(  $C_p$  ) simulink modeli

$\beta = 0^\circ$  ve  $\lambda = 8.1$  iken maksimum performans katsayısı değeri  $C_p = 0,48$  olduğu daha öncede ifade edilmişti. Modelin doğruluğu bu değerler modelde giriş olarak atanınca  $C_p$  değerinin 0.48 olduğu Şekil 3.9’da oluşturulan basit modelle gösterilmiştir.

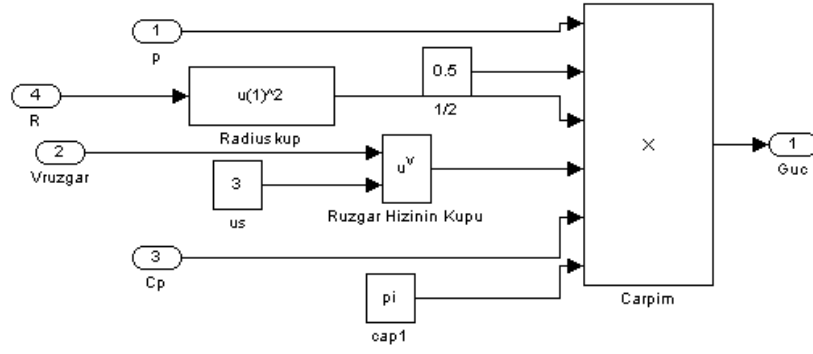
$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} \quad (3.10)$$



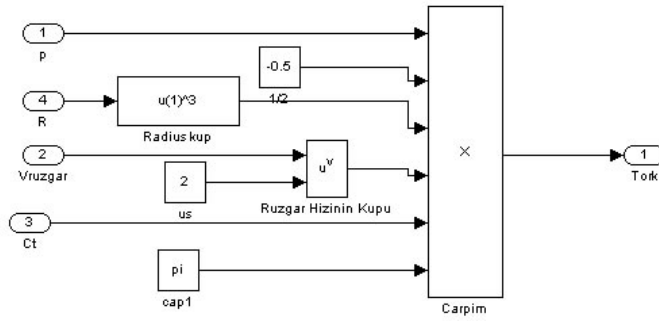
Şekil 3.9  $\beta = 0^\circ$  ve  $\lambda = 8.1$  değerleri için maksimum performans katsayısı değeri

### 3.2.3 Rüzgardan Elde Edilen Güç

Bölüm 2.2.7.3’de açıkça ifade edilen denklem, güç ile rüzgar hızı arasındaki ilişkiyi verdiğinden oldukça önemlidir. Elde edilecek güç rüzgar hızı, hava yoğunluğu, kanat çapı, rotor hızı ve performans katsayısı gibi parametrelere bağlıdır. Bu eşitliğin simulink modeli, Şekil 3.10’de gösterilmiştir. Şekil 3.10’deki model ise rüzgar gücünün mekaniksel torka dönüşümü sağlamaktadır.



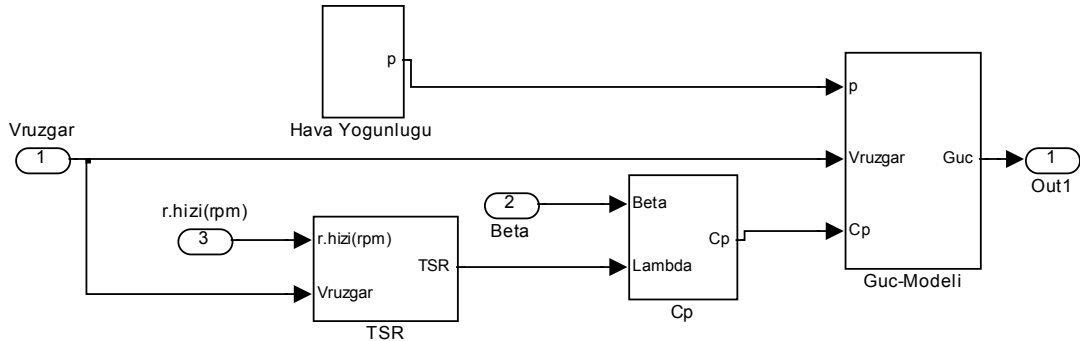
Şekil 3.10 Rüzgardan elde edilen aerodinamik gücün simulink modeli



Şekil 3.11 Rüzgardan elde edilen aerodinamik torkun simulink modeli

### 3.2.4 Rüzgardan Elde Edilebilecek Güç ve Torkun Toplam Modeli

Bölüm 3.2.1, Bölüm 3.2.2 ve Bölüm 3.2.3’de oluşturulan modellerin toplam simulink modeli Şekil 3.12’de gösterilmektedir.



Şekil 3.12 Rüzgardan elde edilen gücün toplam simulink modeli

### 3.3 Mekanik Dişli Kutusu Modeli

Rijitlik ve sönümlleme katsayıları ihmal edilirse iki elemanlı mekanik dişli kutusu modeline göre daha da basitleştirilmiş olan bir elemanlı mekanik dişli kutusu modeli elde edilebilir (Iov et al. 2001). Bir kütleli aktarma organı ifadesi:

$$T_{gen} - T'_{wtr} = J_{ech} \frac{d\omega_{gen}}{dt} \quad (3.11)$$

$T_{gen}$ , generatöre ait tork,  $T'_{wtr}$  düşük hızlı mil torkunun yüksek hızlı mil torkuna aktarılmış hali,  $J_{ech}$  elektromekanik kalkınma momenti,  $\Omega_{gen}$  yüksek hızlı mil hızıdır.

Atalet momenti eşitliği:

$$J_{ech} = J_{gen} + \frac{J_{wtr}}{k_{gear}^2} \quad (3.12)$$

$J_{gen}$ , generatöre ait atalet momenti,  $J_{wtr}$ , rüzgar türbinine ait atalet momenti,  $J_{ech}$  elektromekanik kalkınma momenti olarak ifade edilmektedir. Elektromekanik atalet momenti sistemin moment ifadelerinin toplamı olarak gösterilmektedir. Tork eşitliği:

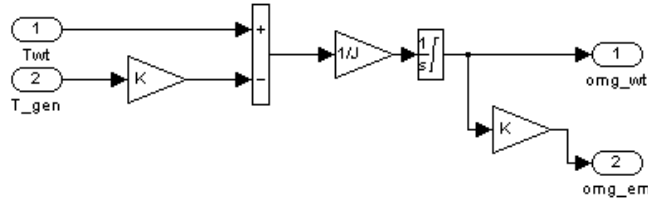
$$T'_{wtr} = \frac{T_{wtr}}{k_{gear}} \quad (3.13)$$

$T'_{wtr}$  yüksek hızlı milin torku ifadesidir yani düşük hızlı mile ait torkun yeni ifadesidir.

Rüzgar türbini hız eşitliği:

$$\omega_{wtr} = \frac{\omega_{gen}}{k_{gear}} \quad (3.14)$$

$\omega_{wtr}$ , rüzgar türbini hızı Şekil 3.13'de mekanik dişli kutusu simulink modeli gösterilmiştir. Görüldüğü üzere model mekanik ve elektromanyetik torkları giriş olarak almakta çıkışta ise mekanik ve elektromanyetik açısal hızlar elde edilmektedir.



**Şekil 3.13** Mekanik dişli kutusu simulink modeli

### 3.4 İndüksiyon Makinalarının Temelleri ve Modellenmesi

İndüksiyon makinalarının diğer makinalardan en önemli farkı harici gerilim kaynağına gerek kalmadan veya bir DC tahrik uygulanmaksızın trafolarda olduğu gibi sekonder akımların indüksiyon yoluyla oluşmasıdır. Ayrıca DC ve senkron generatorde olduğu gibi bileziklere veya komitatöre ihtiyaç yoktur. İndüksiyon makinalar çoğunlukla tek fazlı veya üç fazlı olarak tasarlanırlar (Seyoum 2005).  $2P$  çift kutuplu bir makinanın devir/dak türünden dönme hızı  $N_s$  ;

$$N_s = \frac{60f_s}{2P} \quad (3.15)$$

şeklinde gösterilir.  $f_s$  statora uygulanan gerilimin frekansı olarak ifade edilir. İndüksiyon makina senkron hızda dönerken rotorda herhangi bir endükleme olmayacağından tork üretilmez. Ancak  $N_s - N_r$  farkı olarak ifade edilen kayma hızı oluştuğunda rotorda akım endüklenir ve tork üretimi oluşur. Birim değer türünden kayma (s);

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_{kayma}}{\omega_s} \quad (3.16)$$

$N_s$  stator manyetik alanının dönme hızı olarak veya senkron hız olarak tanımlanmaktadır.  $N_r$  rotor hızı,  $\omega_s$  stator açısal hızı,  $\omega_r$  rotora ait açısal hız olarak ifade edilir.

### 3.4.1 Dq0 Dönüşümü

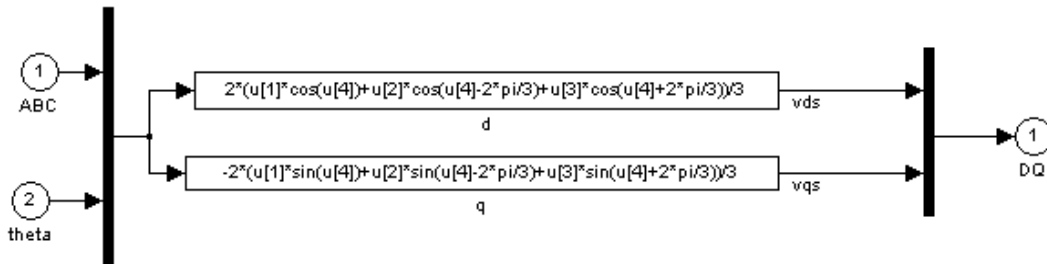
Elektrik mühendisliğinde üç fazlı devrelerin analizini basitleştirmek için dq0 dönüşümü denilen matematiksel bir dönüşüm kullanılmaktadır. Bu dönüşüm dengeli üç fazlı devrelerde, üç fazlı büyüklüğü iki fazlı büyüklüğe çevirmektedir. İki fazlı olarak daha basitçe yapılan çözümler daha sonra tekrar ters dönüşüm uygulanarak üç fazlı devreye dönüştürülebilir. İlk defa 1929 yılında R.H Park tarafından önerildiğinden Dq0 dönüşümü bazen Park dönüşümü olarakda adlandırılır (Ong 1998). Dq0 dönüşümüyle üç fazlı büyüklüğü iki fazlı büyüklüğe dönüştürmenin genel ifadesi;

$$f_{dq0} = [T_{dq0}(\theta)] \cdot f_{abc} \quad (3.17)$$

Denklem 3.17’de gösterilen matris genel olarak transfer matrisi olarak adlandırılır. Bu transfer matrisi üç fazlı abc gibi bir büyüklüğü dq0 eksenine dönüştürmektedir. Dq0 dönüşümünde 0 bileşeni çözüm için bir değer ifade etmemektedir.

$$[T_{dq0}(\theta)] = \frac{2}{3} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \times T_{abc} \quad (3.18)$$

Denklem 3.18’deki ifadenin simulink modeli Şekil 3.14’da gösterilmiştir.

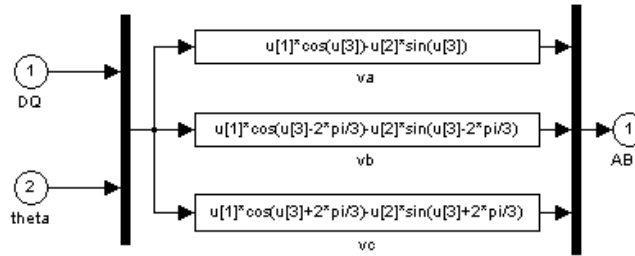


Şekil 3.14 ABC-Dq dönüşümü simulink modeli

İki fazlı dq0 ekseninden üç fazlı abc sistemine geçmek için transfer matrisinin tersi alınarak ters transfer matrisiyle bulunabilir. Denklem 5.18 ters dönüşüm matrisini

göstermektedir (Boldea ve Nasar 2006, Iov et al. 2004, Ong 1998). Generatörler rotor tiplerine göre adlandırılırlar. Rotor yapısına göre generatörler; rotoru sargılı ve sincap kafesli indüksiyon generatörleridir. Şekil 3.15, denklem 3.29 için oluşturulan simulink modelini göstermektedir.

$$\left[ T_{dq0}(\theta) \right]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$



Şekil 3.15 Dq-ABC dönüşümü simulink modeli

### 3.4.2 İndüksiyon Makinası Modeli

İndüksiyon makinanın elektriksel kısmı 4. dereceden durum uzay denklemiyle, mekaniksel denklemi ise 2. dereceden durum-uzay denklemiyle ifade edilebilir. Tüm elektriksel değişken ve parametreler için stator referans alınmıştır. Tüm stator ve rotor büyüklükleri iki eksenli (dq) referans düzleminde gösterilmiştir.

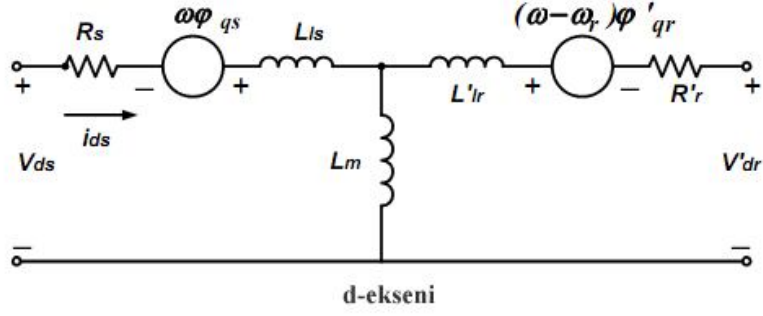
$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega \varphi_{ds} \quad (3.20)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} + \omega \varphi_{qs} \quad (3.21)$$

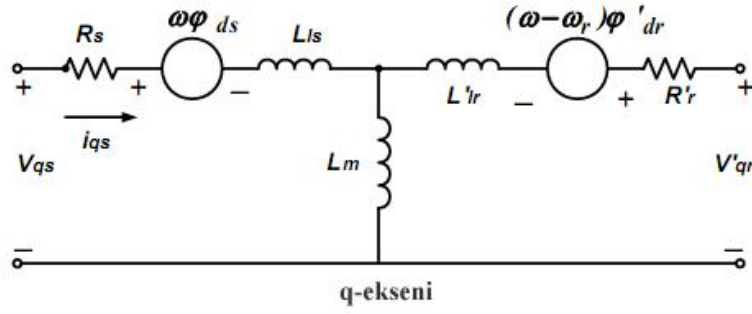
$$V'_{qr} = R'_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr} \quad (3.22)$$

$$V'_{dr} = R'_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr} \quad (3.23)$$

$$T_e = 1.5 p (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (3.24)$$



**Resim 3.4** İndüksiyon makinası d-ekseni eşitliği



**Resim 3.5** İndüksiyon makinası q-ekseni eşitliği

Mekaniksel eşitlikler :

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_m - T_m) \quad (3.25)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad (3.26)$$

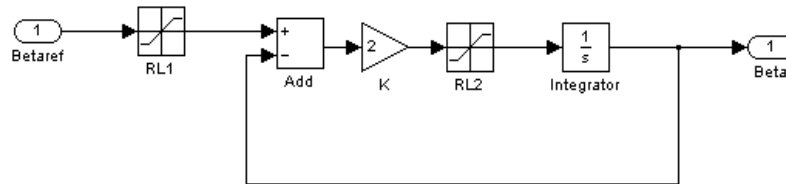
şeklinde gösterilir.

### 3.5 Kanat Hareket Mekanizması Modeli

#### 3.5.1 Doyum Sınırlarına Sahip İntegratörlü Kanat Hareket Mekanizması

Kanat eğim kontrolü esasında türbin mil torkunu tasarım sınırları içinde tutmak için aerodinamik gücü sınırlandırmada kullanılır. Sürücüyle ayarlanan kanatların ataleti büyüktür ve bu yüzden sınırlı hareket kapasitesine sahiptir. Kanat dinamiğinden dolayı kanat hareket mekanizması eğim açısı sınırına  $(+90^{\circ}, -3^{\circ})$  ve eğim hareket hızı sınırlamasına (yaklaşık  $8^{\circ} - 10^{\circ} .san^{-1}$ ) sahiptir (Kulka 2004). Kanat eğim hareket hızı sınırlaması kanatların saniyede hareket edebileceği derece cinsinden hızı ifade eder. Daha açık bir ifadeyle 90 derecelik bir hareket için 10 derece/saniye ile hareket eden bir kanat 0 derecelik referans noktasından 90 dereceye 10 saniye içinde oturacaktır

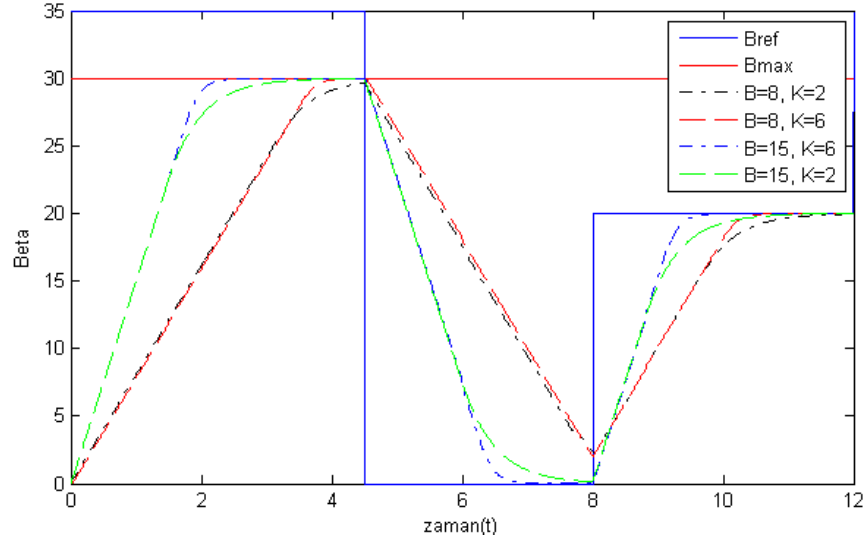
Bu bölümde sınırlamalar göz önüne alınarak kanat hareket mekanizması modeli oluşturulmuştur. Modelin oluşturması için sınırlandırıcı olarak integratörün kullanıldığı modelleme yapısı tercih edilmiştir. Bu model oldukça yaygın olarak kullanılması ve basit yapısından dolayı tercih edilmiştir. Şekil 3.16'da eğim mekanizmasının genel yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.16 Rüzgar türbini kanat eğim mekanizması

RL1 eğim açısı sınırlandırıcısı, RL2 kanat eğim hız sınırlandırıcısı, K sınıra yaklaşma yumuşaklık katsayısıdır. RL1 sınırlandırıcısı kanat açısının çok büyümesini engeller ve açığı belli sınırlar içinde tutar. İntegratörlü kapalı döngü birinci dereceden transfer fonksiyonuna benzer ancak eğim aralığı (RL2) sınırlaması vardır. Şekil 3.17 iki farklı K ve B katsayısı için basamak tepkisini göstermektedir. Mavi çizgi referans değerini, kırmızı çizgi kanat açısı sınır değerini göstermektedir. Görüldüğü üzere  $\beta$  yüksek

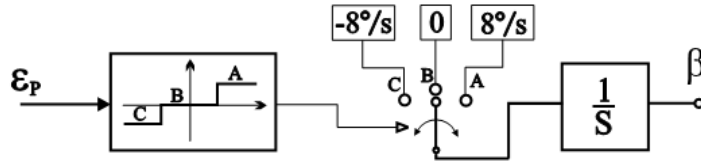
hızlarda referans sinyaline daha hızlı oturmaktadır. Grafiğin çizdirilmesi için oluşturulan model EK-5’de verilmiştir.



**Şekil 3.17** Farklı  $\beta$  ve K değerleri için kanat açısı grafiği

### 3.5.2 3 Eğim Oturtma Hız Seviyeli Kanat Hareket Mekanizması

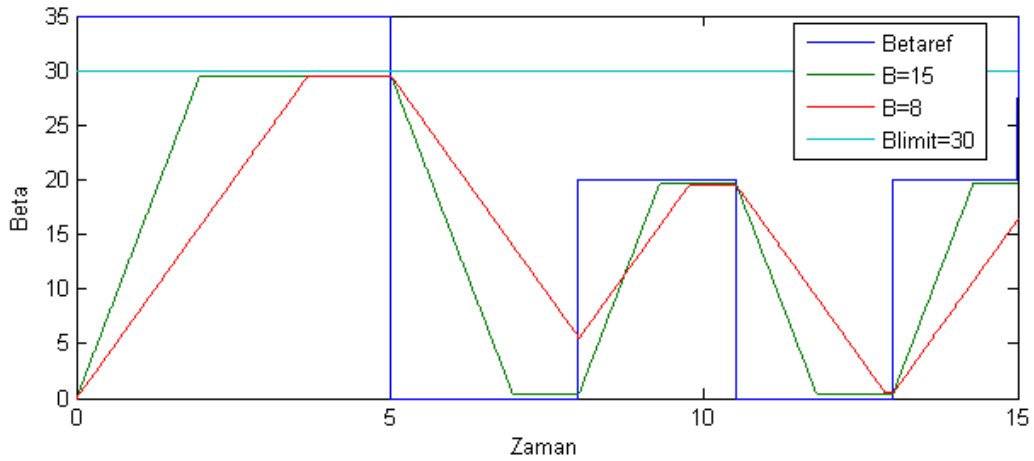
Bu hareket mekanizmasında üç eğim hız seviyesi kullanılmaktadır. Kanat açısı hareketi her iki yönde de sabit bir hızla yapılır veya sabit açıda kalır. Sinyal hatası tetikleyicinin önceden ayarlanan değerinden yüksek ise kanat hareketi sinyal sıfır olana veya sinyal tetikleyicinin değerinden daha aşağı düşene kadar sürer. Hata sıfır olduğunda kanat bir pozisyonda kalır ve hareket durur. Kontrolörün girişine bağlanan hata sinyali için genelde güç hatası sisteme giriş kabul edilir. Resim 3.6’de bu mekanizmayı göstermektedir (Kulka 2004).



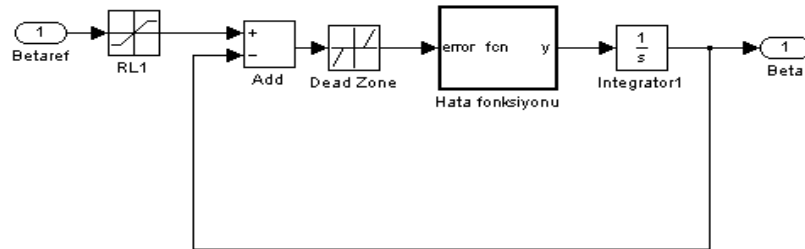
**Resim 3.6** Rüzgar türbini 3 hızlı kanat eğim mekanizması modeli (Kulka 2004)

Bu hareket mekanizması bir önceki bölümde bahsedilen modelden biraz daha farklıdır. Bu modelde belli bir değeri olmayan hata temel alınır. Kanat hareketi hata seviyesi, ölü bölge değerlerinin dışındayken aktiftir yoksa hareket mekanizması durağan kalır.

Pratik olarak bu modelin davranışı önceki modelin davranışından mekanik yapıyı çok zorlamaması, daha kısa hareketli kalma süresi, daha uzun süreli durağan hareket gibi özelliklerinden dolayı daha iyidir. Bu yüzden önceki modelde önerildiği gibi sürekli hareket olmamaktadır. Şekil 3.18’de görüldüğü üzere ölü bölge  $\pm 1$  olarak ayarlanmış ve referans değerini takip eden beta çıkış değeri gösterilmiştir. 3 Eğim oturtma hız seviyeli hareket mekanizması simulink modeli Şekil 3.19’de gösterilmiştir. Grafiğin çizdirilmesi için oluşturulan model EK-5’de verilmiştir.



Şekil 3.18 Farklı  $\beta$  değerleri için kanat açısı grafiği



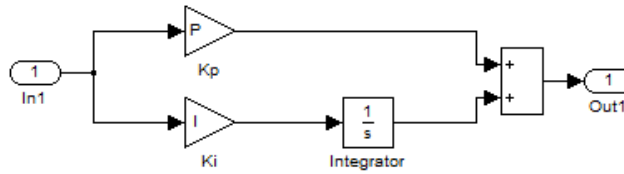
Şekil 3.19 3 Hızlı kanat hareket mekanizması simulink modeli

### 3.6 Hareket Mekanizması Kontrolü

Bir sistem, sistemin referans girişi ve çıkışı arasındaki fark olarak ifade edilen hata sinyalinin kazanç oranı ve integrali ifadelerinin toplamı olan PI (Proportional, Integral) kontrolörle kontrol edilebilir (Ledin 2004). PI kontrolör ifadesi ;

$$u = K_p e + K_I \int_0^t e dt \quad (3.27)$$

şeklindedir. Parantez içindeki ifadenin ilk kısmı, hata sinyalinin oransal kazancını, ikinci kısım hata sinyalinin integralini ifade etmektedir. PI kontrolörü tasarım parametreleri  $K_p$  ve  $K_i$  şeklinde sabitlere bağlıdır. Bu parametreler sırasıyla oransal sabit ve integral olarak ifade edilir. Şekil 3.20’de PI kontrolörü yapısı gösterilmektedir.

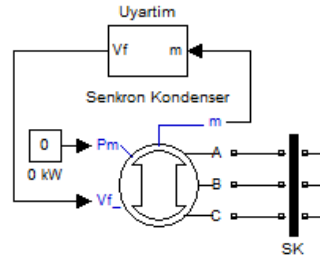


Şekil 3.20 PI kontrolörü simulink modeli

### 3.7 Senkron Kondenser

Güç sistemlerinde aktif gücün yanısıra yükün ve sistemin ihtiyacını karşılayabilmek için reaktif güç akışıda olmaktadır. Elektrik sisteminin ve yüklerin reaktif yük ihtiyacının belirli tekniklerle karşılanması ‘reaktif güç kompanzasyonu’ olarak adlandırılmaktadır. Reaktif güç kompanzasyonunun ihtiyaç duyulan yere yakın yapılması sistemin verimini arttırmak bakımından önemlidir. Reaktif güç kompanzasyonu için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde yüklerin ihtiyacı olan reaktif güçler, statik olarak kapasitör ve reaktörlerle, dinamik olarak senkron motorlarla karşılanmaktadır. Kondansatör gruplarının kullanılmasının yönteminde kondansatörler kademeli olarak devreye alınarak kompanzasyon yapılmaktadır. Bu yöntemde tam kompanzasyon her zaman mümkün değildir ayrıca gecikmeli olarak devreye giren kondansatör grupları bazen nakil hatlarının aşırı yüklenmesine sebep olabilmektedir. Senkron motor

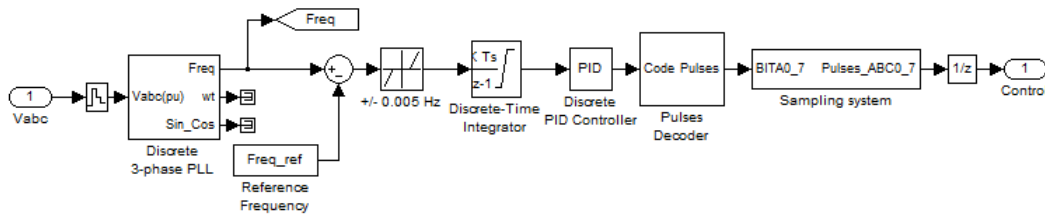
kullanılarak yapılan kompanzasyon uyartım akımının değiştirilerek motorun kapasitif veya endüktif olarak çalışmasıyla sağlanmaktadır. Ayrıca reaktif gücün miktarı uyartım akımıyla ayarlanabilmektedir. Bu tarz bir kompanzasyonda üzerinde herhangi bir yük yoksa kaynaktan çekeceği aktif güç sadece kayıpları karşılamak içindir (Ramazan vd. 2008). Modelleme esnasında generatör olarak dizel generatör kullanılmıştır. Ancak bu generatör temel olarak senkron kondenser olarak kullanılmıştır. Senkron kondenser sisteme aktif güç vermek yerine reaktif güç vermektedir. Senkron kondenser modeli için simulink simpowersystem kütüphanesinde bulunan senkron makina kullanılmıştır. Gerekli parametreler Ek-6'da verilmiştir. Senkron kondenserin uyartım sistemi şebeke geriliminin nominal değerine bağlı olarak kontrol edilmiştir (Milani 2006).



Şekil 3.21 Senkron kondenser ve uyartımı simulink modeli

### 3.8 Anahtarlama Direnç Grubuyla Gerilim Regülasyonu

Değişken harici yükler indüksiyon makinasının statoruna paralel bağlı 8 adet dirençle modellenir. Dirençlerin fazları 3 anahtarla kontrol edilir bu şekilde  $2^8-1$  farklı anahtarlama yapılabilir. Her basamak 1.75 KW değerindedir yani toplam  $255 \times 1.75 = 446.25$  KW'ya kadar yük kontrollü olarak devreye sokulabilmektedir. 8 direnç 1750, 3500, 7000, ..., 218750 KW yük değerlerine sahip olmaktadır. Önerilen kontrolör Şekil 3.22'de gösterilmiştir (Çalışkan 2005, MathWorks 2006).

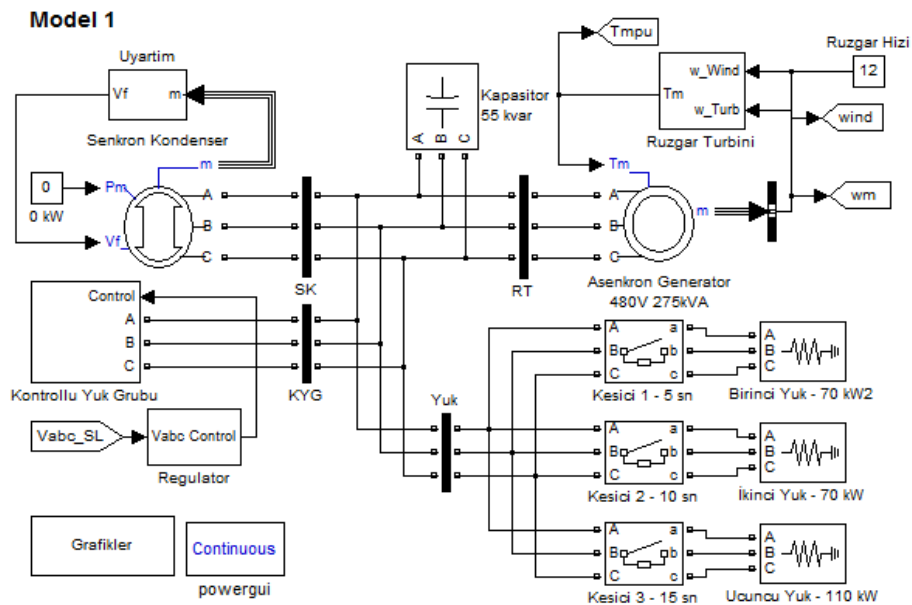


Şekil 3.22 Puls çözücülü PD tipi kontrolör

Frekans, ayırık frekans regülatör bloğu kullanılarak kontrol edilmektedir. Bu kontrolör sistem frekansını ölçmek için standart üç fazlı PLL (Phase Locked loop) sistemi kullanmaktadır. Ölçülen frekans, referans frekansla kıyaslanır ve frekans hatası elde edilir. Bu hata integre edilerek faz hatası elde edilir. Ardından faz hatası PD kontrolörün kontrollü y k grubunu kontrol etmesi için kullanılır. Bu hata sinyali, 8 anahtarın kontrolü için 8 bitlik dijital sinyale çevrilir ve nihai olarak anahtarlar farklı durumlara göre devreye alınır.

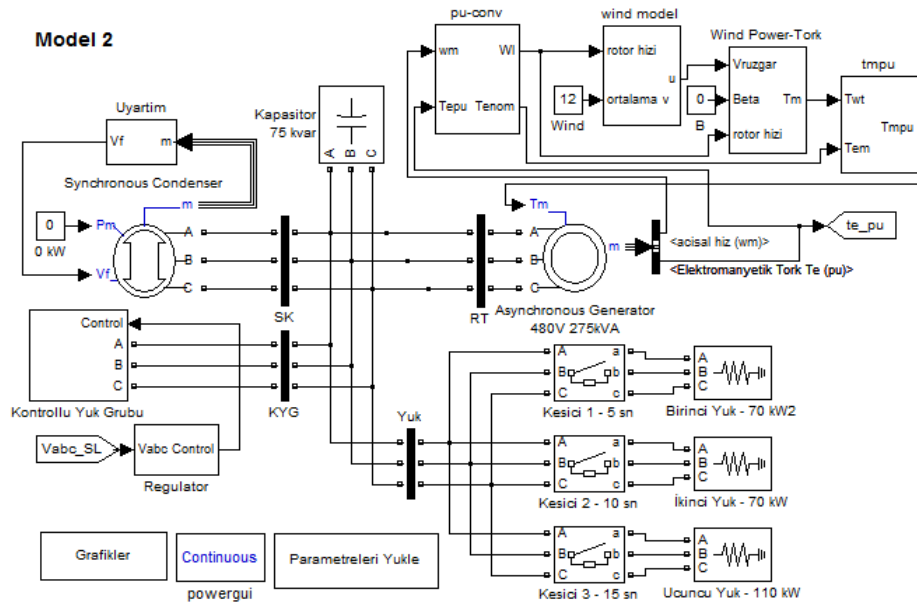
#### 4. SİMULASYON SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Şekil 4.1, Reid ve arkadaşlarının Matlab Simulink ortamında oluşturduğu “Wind Turbine Asynchronous Generator in Isolated Network” modeline (Reid 2006, Mathworks 2006) üç farklı yükün bağlanarak oluşturulan yeni halini göstermektedir. Bu model; şebekeden bağımsız, asenkron generatorün kullanıldığı sabit hızlı bir rüzgar türbini modelidir. Rüzgar türbini bloğu rüzgar hızına ve türbin dönme hızına bağlı olarak çıkış torkunu hesaplamaktadır. Kapasitör, güç katsayısının düzeltilmesini sağlamaktadır. Senkron kondenser, gerilimi regüle etmek için gerekli olan reaktif gücü üretir. Bağlanan üç farklı yükün sayesinde türbinin boşa, çeyrek, yarım ve tam yükte çalışma durumları incelenmiştir. Yükler sırasıyla 5. saniye, 10. saniye ve 15. saniyede devreye alınmış ve toplam 250 KW değerine ulaşmıştır. Türbin ilk 5 saniye yüksüz çalıştırılmıştır. Bu modelde rüzgar hızı girişi sabit kabul edilmiştir. Tüm modeller için yükler omik özelliktedir.

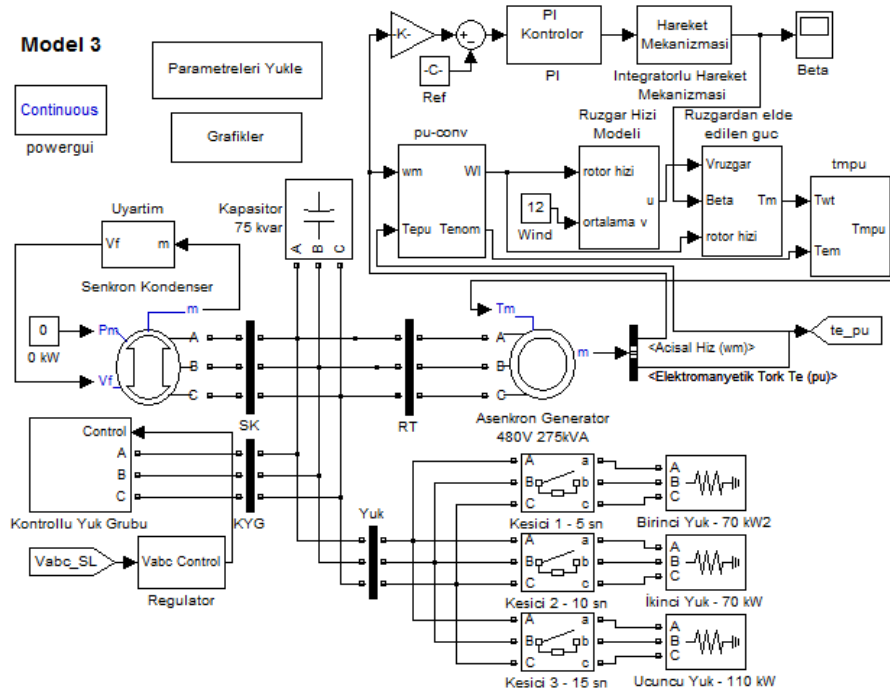


**Şekil 4.1** Sabit rüzgar hızlı rüzgar türbinini simulink modeli (Model-1)

Şekil 4.2’de gösterilen modelin (Model-2), Şekil 4.1’de gösterilen modelden (Model-1) farkı dinamik rüzgar hızı modelinin kullanılmasıdır. Rosas, Tamaly, Martins ve Ackermann’ın çalışmaları dikkate alınarak oluşturulan dinamik rüzgar hızı modeli, Şekil 4.2’de gösterilen modele göre daha gerçekçi sonuçların alınması bakımından önemlidir. Bu modelde kanat kontrol mekanizması kullanılmamıştır.



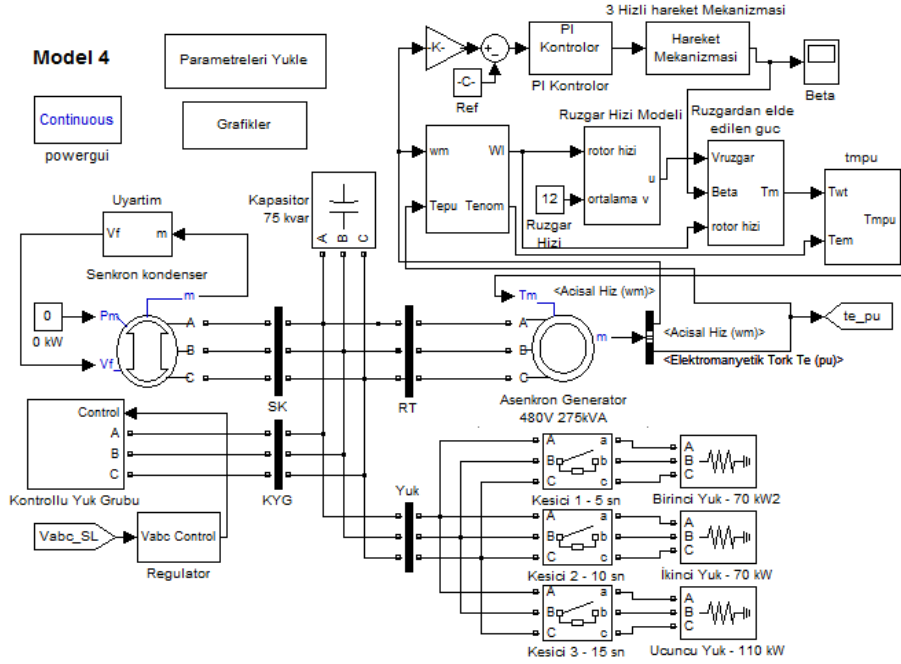
Şekil 4.2 Dinamik rüzgar hızlı rüzgar türbinini simulink modeli (Model-2)



Şekil 4.3 İntegratörlü hareket mekanizması modelinin kullanıldığı tork ve kanat açısı kontrolü simulink modeli (Model-3)

Şekil 4.3’de Kulka’nın çalışmasında kullandığı integratörlü kanat hareket mekanizması modelinin sisteme eklenmesi sonucunda oluşturulan yeni model (Model-3)

gösterilmiştir. Kanat kontrol mekanizması temel olarak; yüksek rüzgar hızlarında, gücü nominal değerlere yakın tutabilmek için kanatları kendi etrafında çevirmek ve performans katsayısını ayarlamak için kullanılır. Böylece tork kontrolü yapılmaktadır. Model-3’de kullanılan kanat kontrol mekanizması bir PI kontrolör ile kontrol edilmektedir. Modelde kullanılan diğer elemanlar önceki modelde kullanılan elemanlarla aynı özelliklere sahiptir.



**Şekil 4.4** 3 hızlı kanat hareket mekanizmasının kullanıldığı aerodinamik güç ve kanat açısı kontrolü simulink modeli (Model-4)

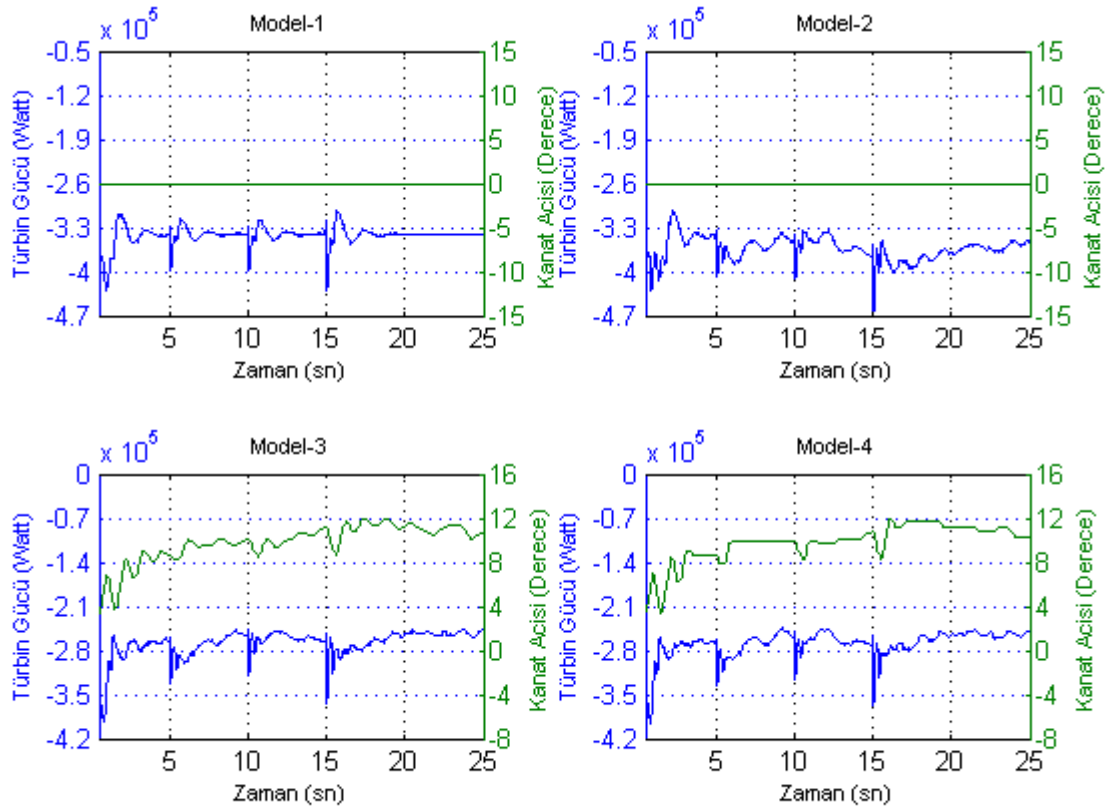
Şekil 4.4’de 3 hızlı hareket mekanizmasının kullanıldığı rüzgar türbini modeli (Model-4) gösterilmiştir. Model-3’de olduğu gibi hareket mekanizmasının kontrolü için PI kontrolör seçilmiştir. Bu model integratörlü hareket mekanizmasıyla hemen hemen aynı yapıya sahiptir. Kulka’nın integratörlü hareket mekanizmasının sürekli hareketini azaltmak için önerdiği bu model, kanat hareket süresini ve bu mekanizmanın devreye girip çıkma sayısını azaltmaktadır.

Model-1 çalışmamızın en temel ve yalın hali olup bu modelde kanat hareket mekanizması kullanılmadığı gibi rüzgar hızıda sabit kabul edilmiştir. Ancak sabit rüzgar hızının gerçek hayatta olmadığı göz önüne alınarak oluşturulan Model-2’de dinamik rüzgar hızının sisteme etkisi incelenmiştir. Bu modelde rüzgar hızının dinamik

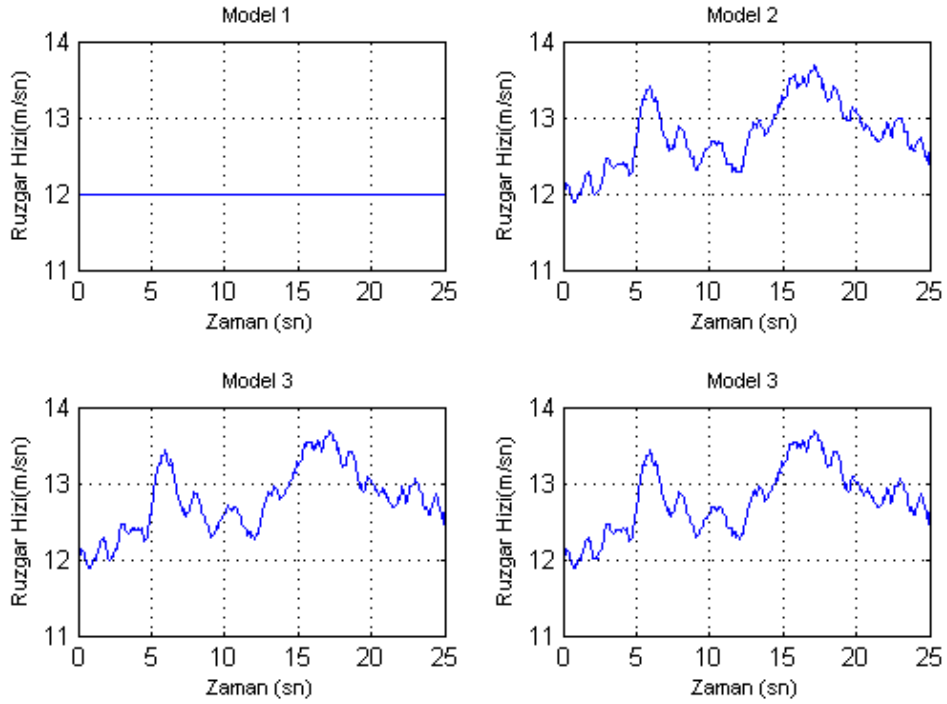
olmasının tork'da büyük salınımlara sebep olduğu gözlemlenmiştir. Güç salınımlarını azaltıp, generatörün nominal değerlerine yakın değerlerde güç üretmesini sağlamak için Model-3'de gösterilen integratörlü kanat hareket mekanizması Model-2'ye eklenmiştir. Bu hareket mekanizması kullanılmasıyla; yüksek rüzgar hızlarında güç katsayısı otomatik olarak ayarlanmış ve güç nominal değerlere çekilmiştir. Ancak bu durumda kanat hareket mekanizmasının sürekli hareket ettiği gözlemlenmiştir. Sürekli hareketi azaltmak için üç hızlı kanat hareket mekanizması, integratörlü kanat hareket mekanizmasıyla değiştirilerek Model-4 oluşturulmuştur.

Modeller için yapılan açıklamaların grafiksel gösterimi olan Şekil 4.5 oluşturulan tüm modeller için türbin çıkış gücünü ve kanat açısını göstermektedir. Kısaca bu grafikleri tekrar inceleyecek olursak; Model-1'de kanat hareket mekanizması kullanılmamış ve rüzgar hızının sabit olduğu kabul edilmiştir. Sabit rüzgar hızından dolayı güç salınımları sadece yükler devreye girdiği zamanlarda yaşanmaktadır. Tüm yükler devreye girdikten bir süre sonra salınımlar neredeyse tamamen durmuştur. Model-2'de dinamik rüzgar hızının etkisi görülmektedir. Bu model'de Model-1'e göre salınımların daha fazla olduğu ve nominal değerden fazla güç üretildiği görülmektedir. Salınımı azaltmak ve gücü nominal değerlere çekmek için kullanılan kanat mekanizmasının açısal değişimi ve tork grafiği ise Model-3'de görülmektedir. Ancak bu modelde dikkatle incelenmesi gereken husus kanat hareket mekanizmasının sürekli hareket etmesidir. Sürekli hareketi engellemek için geliştirilen Model-4'de kanatlardaki açısal değişimlerin nispeten azaldığı ve gücün nominal değerlere yakın olduğu gözlemlenmiştir. Rüzgar türbini, kanat hareket mekanizması ve PI kontrolör parametreleri EK-6.d ve EK-6.h'da verilmiştir. Asenkron generatör ve kapasitör parametreleri ise EK-6.a'da ve EK-6.c'de verilmiştir.

Şekil 4.6 oluşturulan farklı modeller için rüzgar hızlarını göstermektedir. Model 1'e ait rüzgar hızı sabit kabul edilirken Model 2, Model 3 ve Model 4'de rüzgar hızları dinamik bir yapıya sahiptir. Dinamik rüzgar hızı modeli, Reid ve arkadaşlarının oluşturduğu modelde sabit rüzgar hızına göre daha gerçekçi sonuçların alınması için kullanılmıştır. Dinamik rüzgar hızı modelinin oluşturulmasıyla ilgili gerekli detaylar Bölüm 3.1'de Rüzgar hızı modeli bölümünde anlatılmıştır. Rüzgar hızı matematiksel modeli parametreleri EK-2'de verilmiştir.

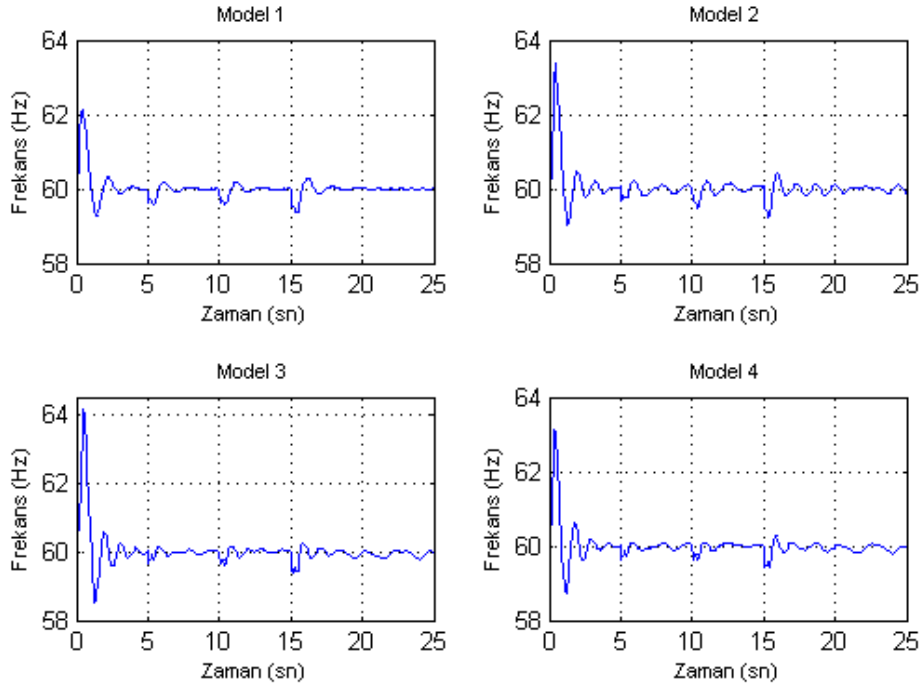


Şekil 4.5 Tüm modeller için Türbin Gücü – Kanat Açısı grafikleri



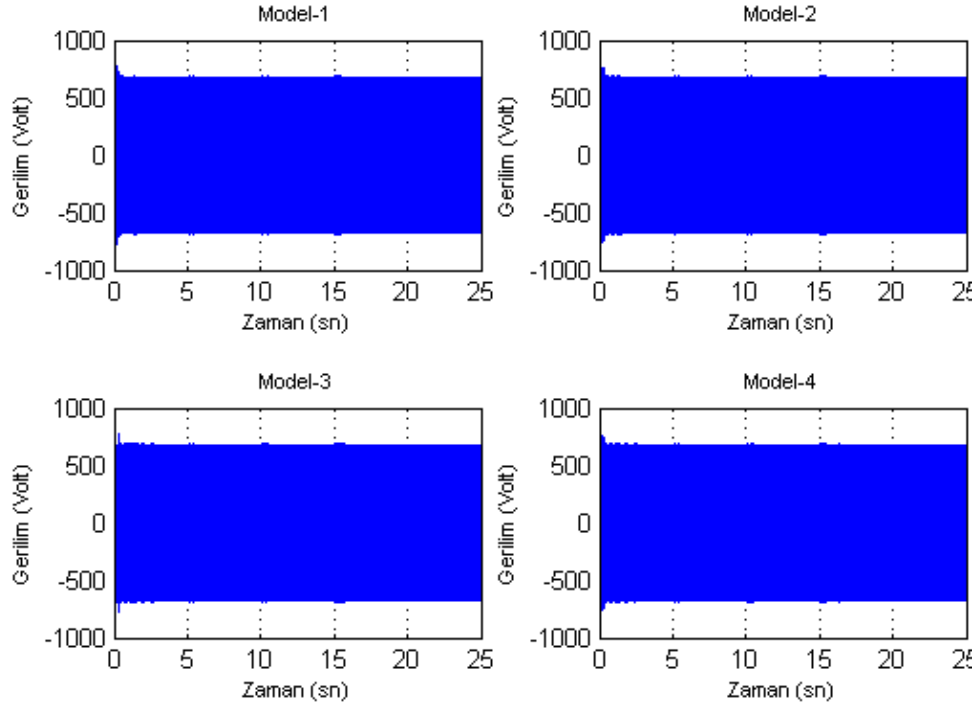
Şekil 4.6 Tüm modeller için rüzgar hızları

Şekil 4.7 tüm modeller için frekans grafiklerini göstermektedir. Model 1'e ait frekans grafiğinde tüm yükler devreye girdikten bir süre sonra frekansdaki salınımın oldukça azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi rüzgar hızının sabit kabul edilmesidir. Halbuki gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek için dinamik rüzgar hızının sisteme etkisi incelenmelidir. Bu noktada Model 2'ye ait frekans incelendiğinde dinamik rüzgar hızının frekansa etkisi gözlemlenebilir. Şekil 4.7'e ait Model-3 ve Model-4, integratörlü ve 3 hızlı kanat eğim mekanizmalarının sisteme eklenmesi sonrasında elde edilen frekans grafikleri gösterilmektedir. Görüldüğü üzere kontrol mekanizmalarının kullanımı sonrasında frekans değerleri normal sayılabilecek düzeydedir.

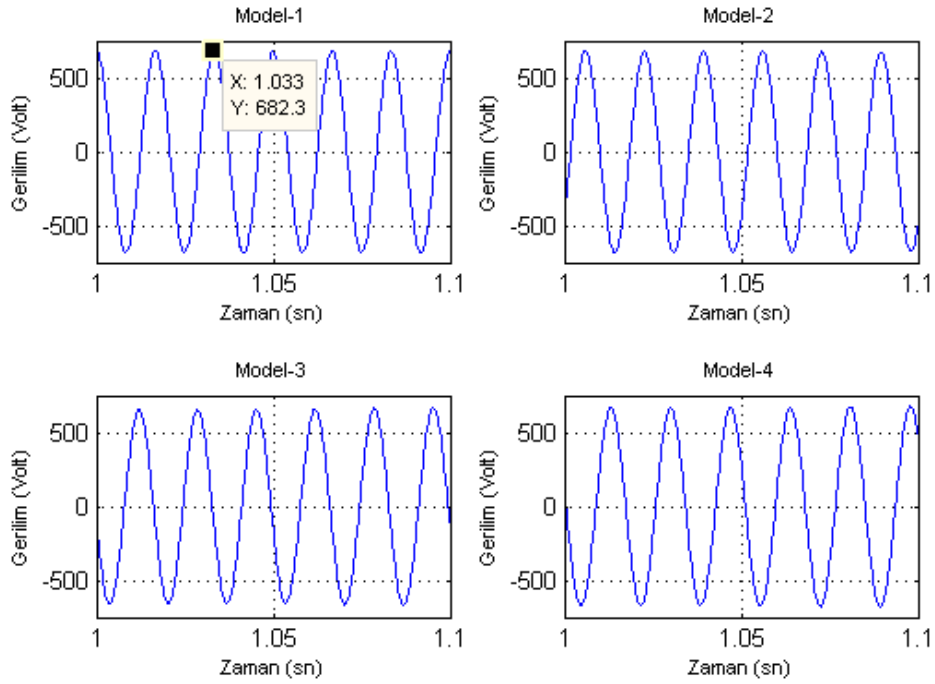


**Şekil 4.7** Tüm modeller için frekans grafikleri

Şekil 4.8 oluşturulan modellere ait gerilim grafiklerini göstermektedir. Senkron kondenslerin ürettiği reaktif güç sayesinde gerilim, yüklerin devreye girdiği durumlar dışında neredeyse sabittir. Şekil 4.10, Şekil 4.9'da gösterilen gerilim grafiğinin 1-1.1 saniye aralıklarında detaylandırılmış şeklidir. 682 V değeri 480 V'luk RMS gerilim değerinin maksimum değerini göstermektedir. Bilindiği üzere RMS sinyalin maksimum değeri o sinyalin  $\sqrt{2}$  katıdır.



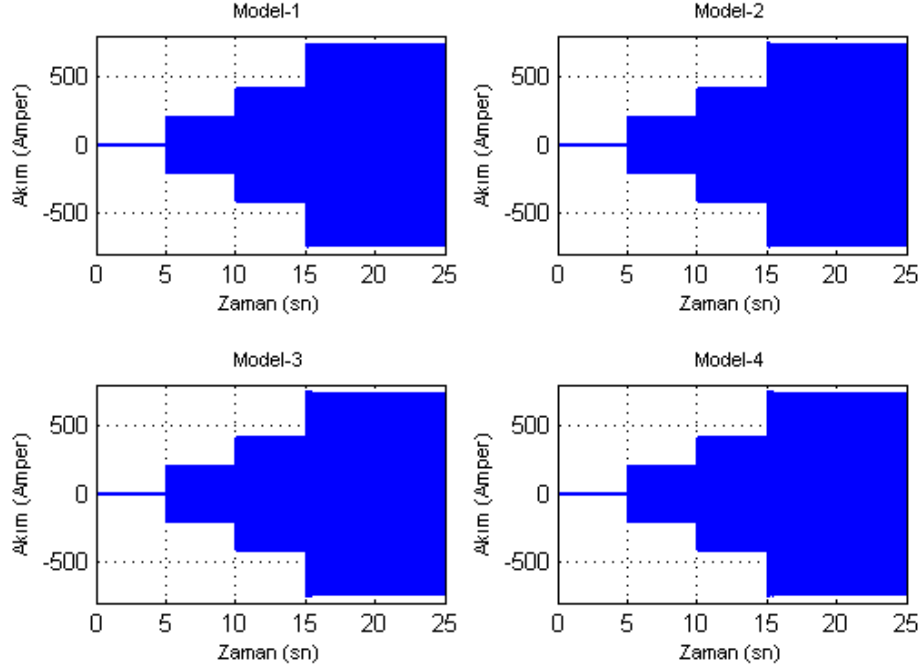
**Şekil 4.8** Tüm modeller için gerilim grafikleri



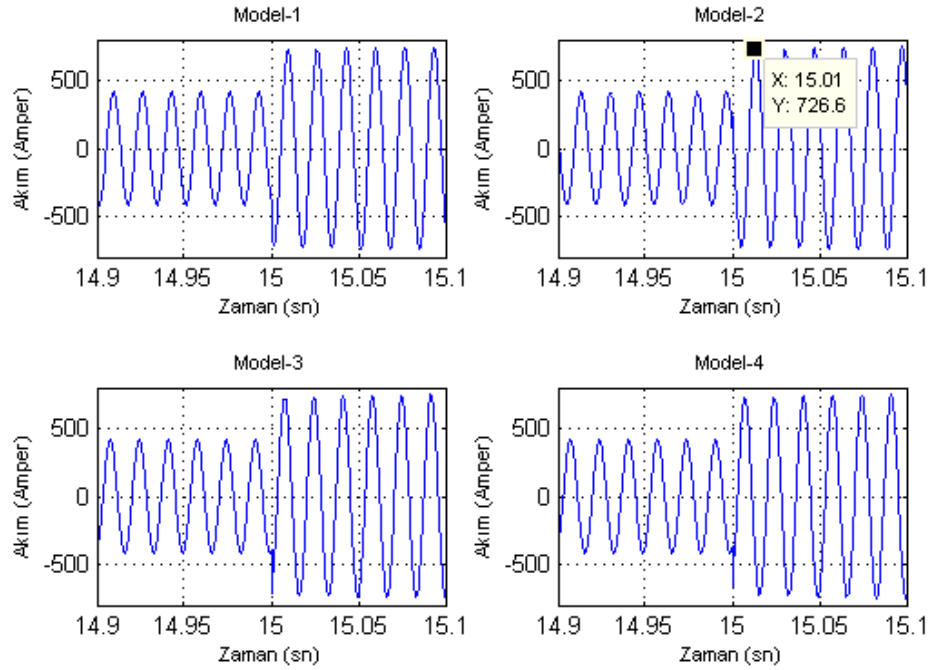
**Şekil 4.9** Tüm modeller için belli zaman aralığında detaylandırılmış gerilim grafikleri

Şekil 4.10'da yükler devreye girdikçe çekilen akımın maksimum değerini göstermektedir. Grafiklerin neredeyse aynı çıkmalarının sebebi yük güçlerinin aynı olması ve dolayısıyla devreye girdiklerinde aynı akımı çekmeleridir. Şekil 4.11

oluşturulan akım grafikleri için 14.9-15.1 saniye aralığındaki akım durumunu göstermektedir. Akımın maksimum olduğu noktalar RMS akım değerinin  $\sqrt{2}$  katıdır.

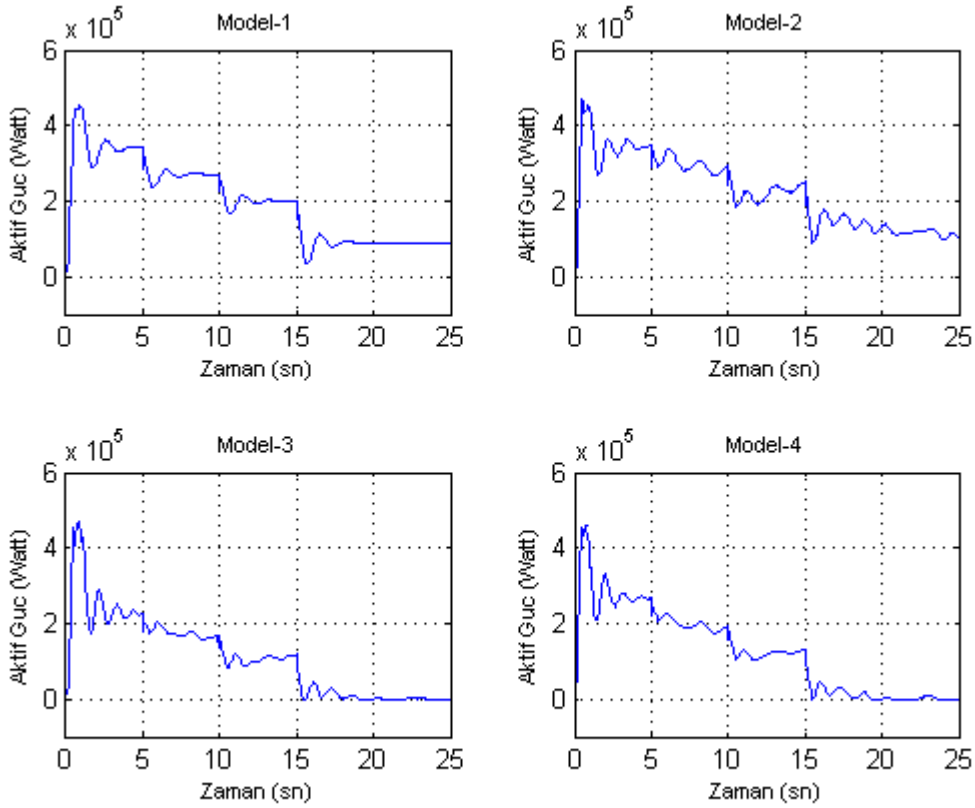


Şekil 4.10 Tüm modeller için akım grafikleri



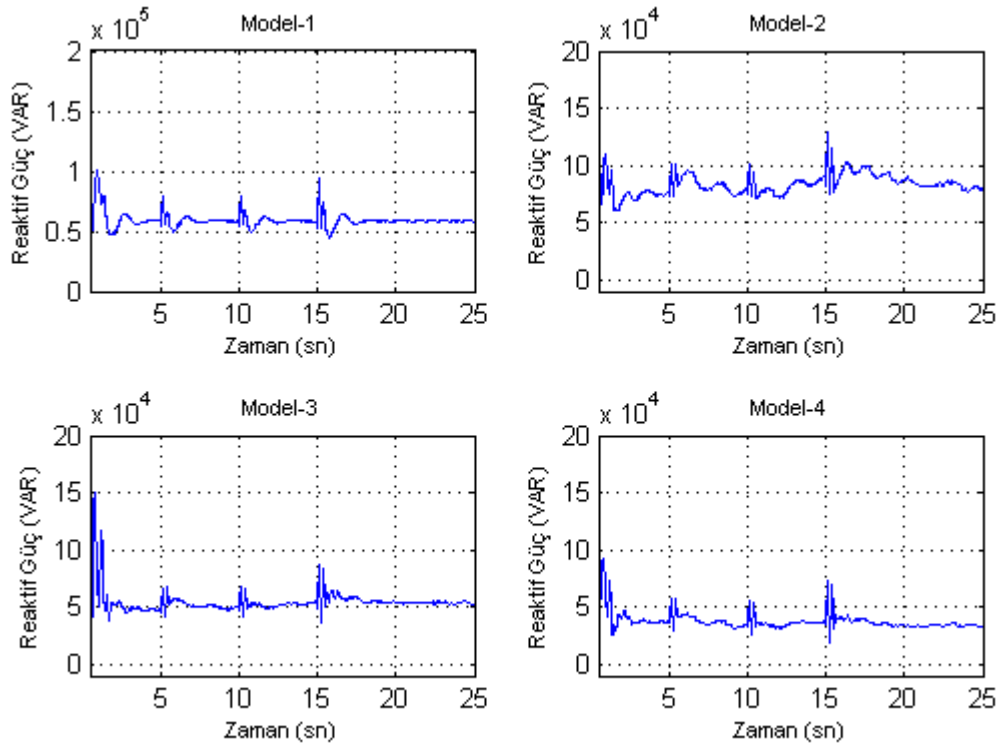
Şekil 4.11 Tüm modeller için belli zaman aralığında detaylandırılmış akım grafikleri

Şekil 4.12 kontrollü yük gruplarının devreye girerek çekilen gücü göstermektedir. Kontrollü yük grupları frekansın sabit tutulmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Şekil 4.12'e ait Model-1 incelendiğinde türbinin fazla güç ürettiği dolayısıyla devreye giren 250 KW'lık gücü karşılamamanın yanısıra üretilen yaklaşık 90 KW'lık gücün kontrollü yük grubu tarafından harcandığı gözükmemektedir. Böylelikle çekilen güç, üretilen güce yaklaşık olarak eşit olmakta ve frekans değeri kabul edilen sınırlar içerisinde kalmaktadır. Model-2, Model-1 için yapılan izahlarla aynı niteliğe sahiptir ancak rüzgar hızının dinamik olması sebebiyle üretilen gücü karşılamak için farklı büyüklükte yükler devreye alınmaktadır. Model-3 ve Model-4 kanat kontrol mekanizmalarının kullanılması sonrasında devreye alınan yüklerin grafiğini göstermektedir. Türbin çıkış gücünün 275 KW'lık ideal değerlerine yakın olmasından ve devreye giren yüklerin 250 KW civarında olmasından dolayı üretilen fazla gücü karşılamak için daha az yük devreye alınmaktadır. Kontrollü yük grubunun ve regülatörün parametreleri EK-6.f'de verilmiştir.



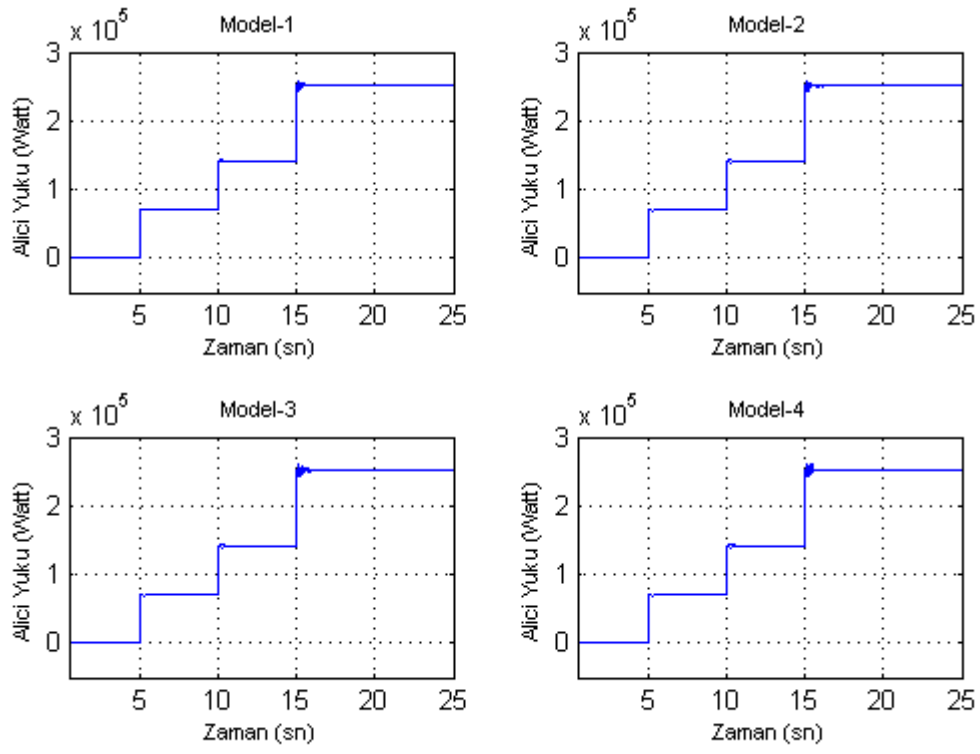
**Şekil 4.12** Kontrollü yük gruplarının oluşturulan 4 model için çektikleri güç

Şekil 4.13, oluşturulan 4 model için senkron kondenserlerin çektiği reaktif güç grafiklerini göstermektedir. Senkron kondenser daha önce belirtildiği üzere reaktif güç üretmektedir. Model-1 ve Model-2’de kanat kontrol mekanizmasının kullanılmadığı durumda reaktif gücün yüksek değerlerde olduğu ve salınımın fazla olduğu gözlenmiştir. Model-3 ve Model-4’de salınım azalmış ve reaktif güç üretimi nominal değerlere düşmüştür. Simulasyonda kullanılan senkron kondenserin parametreleri EK-6.e’de verilmiştir.



**Şekil 4.13** Senkron kondenser reaktif güç grafikleri

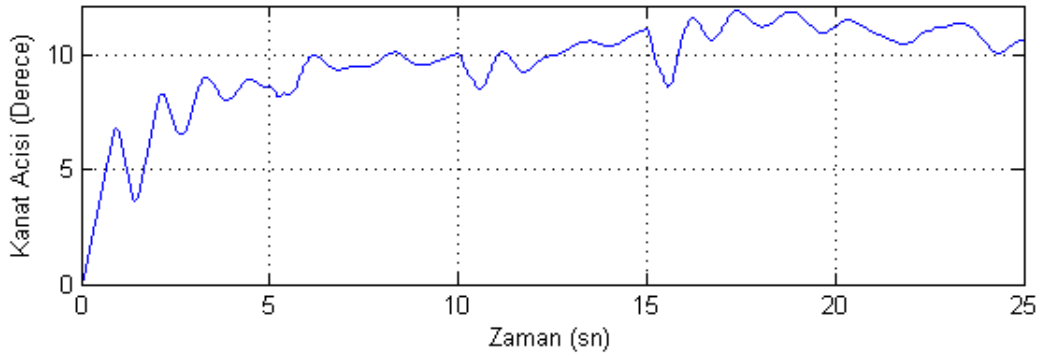
Şekil 4.14 kesicilerin 5.,10. ve 15. saniyelerde sırasıyla devreye giren 70 KW, 70KW ve 110KW’lık yüklerin türbinden çektiği güçleri göstermektedir. Toplamda 250 KW güce ulaşan alıcı tarafındaki yükler kesiciler aracılığıyla devreye alınmaktadır. Frekansın kontrolünü sağlamak için yükler devreye girdikçe kontrollü yük grubunun gücü kademeli olarak devreden çıkarılmaktadır. Modellerde kullanılan kesicilerin parametreleri EK-6.g’de verilmiştir. Devreye giren yüklerin parametreleri ise EK-6.b’de verilmiştir. Çalışmamız boyunca yükler omik yük olarak ele alınmıştır.



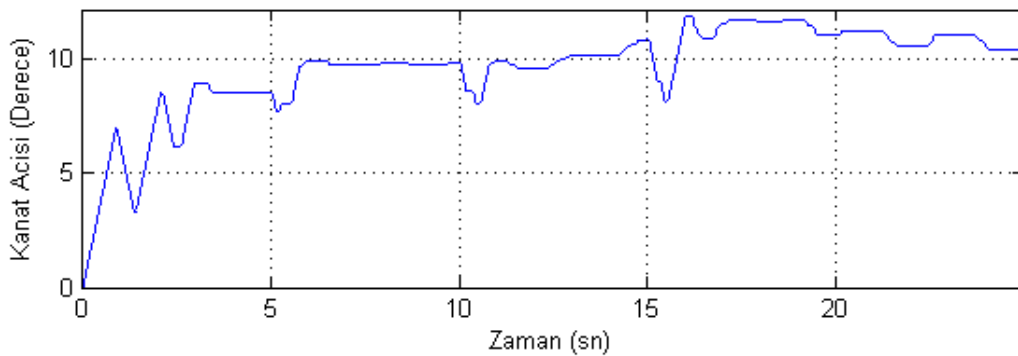
Şekil 4.14 Senkron kondenser reaktif güç grafikleri

## 5. SONUÇLAR

Bu tezin amacı kanat açısının ayarlanmasıyla türbinin yüksek rüzgar hızlarında bile nominal değerlerde güç üretebilmesini sağlamaktır. Bunun için Simulasyon Sonuçları ve Tartışma bölümünde anlatılan dört farklı model oluşturulmuş ve elde edilen grafikler incelenmiştir. Model-1’de rüzgar hızı sabit alınmıştır. Bu modelin gerçek uygulamalar için esnek değildir çünkü rüzgar sürekli sabit hızda esmemektedir. Model-2’de dinamik rüzgar hızı kullanılmış ve daha gerçekçi modelleme yapılmıştır. Bununla birlikte kanat kontrol mekanizmasının olmadığı için rüzgar hızındaki değişimlerin güç üretiminde salınımlara sebep olduğu gözlemlenmiştir. Model-3’de integratörlü kanat hareket mekanizması kullanılmış ve bu sayede aerodinamik güç ve kanat açısı kontrolünün gerçekleştirilmiştir. Güç belli seviyelerde kontrol edilmiş ancak Şekil 5.1’de gösterildiği gibi kanatların sürekli hareketi durumu ortaya çıkmıştır. Model-4’de kanatların sürekli hareketini azaltmak için önerilen 3 eğim hız seviyeli kanat hareket mekanizması, Şekil.5.2’deki grafikten anlaşılacağı üzere sürekli olan hareket azaltılmıştır.



Şekil 5.1 İntegratörlü kanat mekanizmasının zamanla açısal olarak değişen hareketi



Şekil 5.2 3 hız seviyeli kanat mekanizmasının zamanla açısal olarak değişen hareketi

**Çizelge 5.1** İki kanat hareket mekanizmasının performansının kıyaslanması

| Kanat Hareket Mekanizması | Aktif Kalma Zamanı (%) | Anahtarlama sayısı |
|---------------------------|------------------------|--------------------|
| İntegratörlü              | % 100                  | 44                 |
| 3 Hız seviyeli            | $\approx$ % 45         | 32                 |

Çizelge 5.1 incelenirse 3 hız seviyeli kanat hareket mekanizmasının integratörlü kanat hareket mekanizmasından yaklaşık % 55 daha az aktif kaldığı belirlenmiştir. Yani 25 sn'lik simulasyon için yaklaşık 9 sn'lik bir çalışma gerçekleşmiştir. Anahtarlama sayısı kanat hareket mekanizmasının devreye girme çıkma sayısını belirtmektedir. İntegratörlü kanat mekanizması için anahtarlama sayısı 44 iken 3 hız seviyeli hareket mekanizması için anahtarlama sayısı 32 olmuştur. İntegratörlü hareket mekanizmasının hassas olduğu ve bu yüzden kanat hareketinin sürekli olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte 3 hızlı mekanizma modelini daha az aktif kalma zamanına sahip olduğu ve anahtarlama sayısını azalttığı belirlenmiştir. Böylece kanatlardaki mekanik yüklenmeler ve güç salınımları azaltılmıştır. Bu şekilde üretilen gücü daha kaliteli olacak ve türbin ömrü uzayacaktır.

Sonraki çalışmalarda kanat hareket mekanizmasının PI kontrolör ile kontrol etmek yerine Bulanık Mantık Kontrolörü ile kontrol edilebilir veya farklı kontrol yöntemleri kullanılabilir. En uygun PI parametrelerini belirlemek için çalışma yapılabilir. Çalışma boyunca sabit olan kapasitör değeri kontrol edilerek daha düzgün çalışma sağlanabilir. Sadece omik yükler yerine omik-endüktif yükler bağlanarak çalışma tekrar analiz edilebilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Abdollahi, S.E., Vahedi, A.. 2005. Dynamic Modelling of Micro-Turbine Generation Systems Using Matlab/Simulink. ICREPQ' 05 International Conference On Renewable Energies And Power Quality, 16-18 Mart, Zaragoza
- Acar, E., Doğan, A. 2008. Türkiye'nin Rüzgar ve Hidroelektrik Potansiyeli ve Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi. VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu (UTES), 17-19 Aralık, ss.675-682.
- Ackermann, T. 2005. Wind Power in Power Systems. John Wiley & Sons, West Sussex, England
- Akdağ, S. A., Güler Ö. 2008. Weibull Dağılım Parametrelerini Belirleme Metodlarının Karşılaştırılması. VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu (UTES), ss.707-714.
- Akpınar, A., Kömürcü, M., Filiz, M. 2008. Türkiye'nin Enerji Kaynakları ve Çevre, Sürdürülebilir kalkınma Ve Temiz Enerji Kaynakları. VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu (UTES), 17-19 Aralık, ss.12-22.
- Amirat, Y., Benbouzid, M. E. H., Bensaker, B., Wamkeue, R. 2007. Generators for Wind Energy Conversion Systems: State of the Art and Coming Attractions. Journal of Electrical Systems 3-1, pp.26-38.
- Anderson, P.M. ve Fouad, A.A. 1994. Power System Control and Stability. IEEE Press, New York.
- Antonakis, K. 2005. Analysis of the Maximum Wind Energy Penetration in the Island of Crete. Yüksek Lisans, University of Strathclyde, Glasgow.
- Arslan, V. 2009. Enerji Kaynaklarında Güvenilirlik ve Kömürün Yeri. TMMOB İzmir Kent Sempozyumu, www.maden.org.tr, İzmir.
- Bayraç, H.N. 2007. Uluslararası Petrol Piyasasının Ekonomik Analizi. Dış Ticaret Dergisi , Sayı: 15, Yıl: 4, Ekim 1999, 1-29.

- Bayındır, R., Demirbaş, Ş, Sesveren, Ö., 2008. Reaktif Güç Kompanzasyonu için Zeki Bir Simülator Tasarımı Ve Gerçekleştirilmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. Cilt 23, No: 3, s.681-688. Ankara.
- Bianchi, F. D., Battista, H. D., Mantz, R. J. 2007. Wind Turbine Control Systems - Principles, Modelling and Gain Scheduling Design. Springer, London.
- Boldea, I., Nasar, S. A. 2002. The Induction Machine Handbook. CRC Press, Boca Raton, Florida
- Bose, B. K. 2002. Modern Power Electronics and AC Drives. Prentice Hall PTR, USA
- Burton, T., Sharpe D., Jenkins, N., Bossanyi, E. 2001. Wind Energy Handbook. John Wiley & Sons, West Sussex, Chichester, England.
- Carlin, P.W., Laxson A.S., Muljadi E.B. 2001. The History and State of the Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, America.
- Chapman, S. J. 2004. Electric Machinery Fundamentals. Fourth Edition, McGraw Hill.
- Çelik. S. 2008. İlköğretim Öğrencileri İçin Meteoroloji. Telekomünikasyon Şube Müdürlüğü, Ankara.
- Çukurçayır, M. A., Sağır, H.. 2009. Enerji Sorunu, Çevre ve Alternatif Enerji Kaynakları. Selçuk Üniversitesi. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Konya
- Dolan, D. S. L., Lehn, P. W. 2006. Simulation Model of Wind Turbine 3p Torque Oscillations due to Wind Shear and Tower Shadow. IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol.21, No.3, September.
- DPT. 2000. İklim Değişikliği Özel İhtisas Komisyonu Raporu. Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara
- Durak, M. 2005. Rüzgar Ölçümlerinde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar. <http://www.ruzgarenerjisibirli.org.tr/>

- Dursun, B., Gökçöl C., Ertürk E. 2005. Gyte Üç Katli Savonius Rüzgar Türbini Mekanik Tasarımı. III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu.
- Dursun, E., Binark, A. K. 2008. Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler. VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu (UTES), 17-19 Aralık, ss.667-674.
- Dusonchet, L., Massaro, F., Telaretti, E. 2007. Transient Stability Simulation of a Fixed Speed Wind Turbine by Matlab/Simulink. International Conference Clean Electrical Power ICCEP 2007, University of Palermo. ss.651-655. Palermo.
- El-Tamaly, H. H., Wahab, M. A. A., Kasem, A. H. 2007. Simulation of Directly Grid-Connected Wind Turbines for Voltage Fluctuation Evaluation. International Journal of Applied Engineering Research, Vol.2, No.1, ss. 15–30.
- El-Tous Y. 2008. Pitch Angle Control of Variable Speed Wind Turbine. American J. of Engineering and Applied Sciences 1: ss. 118-120.
- Fıçıcı, F., Dursun B., Gökçöl C. 2007. Rüzgâr Enerji Sistemlerinden Kaynaklanan Gürültünün İncelenmesi. SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi, 1. Sayı, 11. Cilt, ss.54-62.
- Güler, Ö. 2005. Dünyada ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi. V. Enerji Sempozyumu, 21-23 Aralık, ss.161-167, Ankara.
- Gültekin, A. H., Örgün Y. 1993. Doğalgaz ve Çevre. Çevre Dergisi. Sayı 9, s.37-41.
- Haiguo, P., Zhixin, W. 2007. “Simulation Research of Fuzzy-PID Synthesis Yaw Vector Control System of Wind Turbine. World Scientific and Engineering Academy and Society Transactions (WSEAS) on Systems and Control, Sayı 10, Cilt 2, Wisconsin, USA.
- Hau, E. 2005. Wind Turbines - Fundamentals, technologies, application, economics. Second Edition, Springer, Verlag, Berlin
- Estanqueiro, A. I. 2007. A Dynamic Wind Generation Model for Power Systems Studies. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.22, No.3, August

- Freris, L., Infield D. 2008. Renewable Energy in Power Systems. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, West Sussex, United Kingdom
- Hansen, A. D. 2005. Generators and Power Electronics for Wind Turbines. Chapter 4 of Wind Power of Power Systems, JohnWiley & Sons, West Sussex, England.
- Hansen, L. H., Helle, L., Blaabjerg, F., Ritchie, E., Nielsen, S. M., Bindner, H., Sorensen, P. Bak-Jensen, B. 2001. Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines. RISØ National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- Hui, J. 2008. An Adaptive Control Algorithm for Maximum Power Point Tracking for Wind Energy Conversion Systems. Yüksek Lisans, Queen's University, Canada.
- IEO. 2008. International Energy Outlook. Energy Information Administration, September, Washington, USA.
- Iov, F., Hansen A. D., Sørensen, P., Blaabjerg, F., 2004, "Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink", Aalborg University and RISØ National Laboratory, Denmark.
- Iov, F., Hansen, A. D., Sørensen, P., Blaabjerg F. 2004. Simulation Platform to Model, Optimize and Design Wind Turbines. Aalborg University and RISØ National Laboratory, March, Denmark.
- Johnsen, K. ve Eliasson, B. 2004. Simulink Implementation of Wind Farm Model for use in Power System Studies. Nordic Wind Power Conference, 1-2 Mart, Chalmers University of Technology
- Kélouwani S., Agbossou K. 2004. Nonlinear Model Identification of Wind Turbine With a Neural Network. IEEE Transactions On Energy Conversion, Sayı 3, Cilt 19, University du Quebec a Trois-Rivieres, Canada.
- Kulka, A. 2004. Pitch and Torque Control of Variable Speed Wind Turbines. Electric Power Engineering, Chalmers University Of Technology, Goteborg, Sweden.

- Kurban, M., Kantar, Y. M., Hoccoğlu, F. O. 2005. Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Araştırılmasında Weibull ve Rayleigh Dağılımlarının Kullanılması. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı:1, Cilt:10, ss.14-21.
- Ledin, Jim. 2004. Embedded Control Systems in C/C++: An Introduction for Software Developers Using MATLAB. CMP Books, San Francisco, USA
- The MathWorks, 2006, MATLAB 7.8 and Simulink for Technical Computing, Simpower Toolbox Help Files, Wind Turbines.
- Manwell J.F., Mcgowan J.G., Rogers A.L. 2002. Wind Energy Explained – Theory, Design and Application. John Wiley & Sons, England,.
- Martins, A. P., Costa, P. C., Carvalho, A. S. 2006. Coherence and Wakes in Wind Models for Electromechanical and Power Systems Standard Simulations. European Wind Energy Conference and Exhibition (EWEC), BL3.375, Athens
- Masters, G. M. 2004. Renewable and Efficient Electric Power Systems. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Mathew, S. 2006. Wind Energy - Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Springer, Verlag, Berlin
- Milani, N.P. 2006. Performance Optimization of a Hybrid Wind Turbine - Diesel Microgrid Power System. Yüksek Lisans Tezi. North Carolina State University. Raleigh, North Carolina
- Muljadi, E. ve Butterfield, C.P. 1999. Pitch Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generator. IEEE-IAS Industry Applications Society Annual, vol.1, ss.323–330.
- Munteanu, I., Nicolaos, A. I. B., Cutululis, A., Ceangă, E. 2008. Optimal Control of Wind Energy Systems - Towards a Global Approach. Springer, London
- Muyeen, S.M., Tamura, J., Murata T. 2009. Stability Augmentation of a Grid-connected Wind Farm. Springer, London

- Muyeen, S.M., Ali, M.H., Takahashi, R., Murata, T., Tamura, J., Tomaki, Y., Sakahara, A., Sasano, E. 2007. A comparative study on transient stability analysis of wind turbine generator system using different drive train models. IET-Proceedings on Renewable Power Generation, Vol.1, No.2, s.131 – 141.
- Nurbay, N., Çınar, A. 2005. Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması. EMO 3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Mersin Üniversitesi, Mersin.
- Oğulata R.T. 2003. Energy Sector and Wind Energy Potential in Turkey. Renewable and Sustainable Energy Reviews 7, ss.469–484.
- Ong, C. M. 1998. Dynamic Simulation of Electric Machinery – Using Matlab/Simulink. Prentice Hall Ptr, Upper Saddle River, New Jersey
- Reid, R., Saulnier, B., Gagnon, R., 2006 “Wind-Turbine Asynchronous Generator in Isolated Network”, Matlab/Simulink Help Files
- Sharma, H., Pryor, T., Islam S. 2001. Effect of Pitch Control and Power Conditioning on Power System Quality of Variable Speed Wind Turbine Generators. Murdoch University Energy Research Institute (MUERI), Murdoch University, WA.
- Soter, S., Wegener, R. 2007. Development of Induction Machines in Wind Power Technology. IEMDC'07 Electric Machines & Drives Conference, Cilt:2, 3-5 Mayıs, ss.1490 - 1495
- Özgener, Ö. 2002. Türkiye’de ve Dünya’da Rüzgar Enerjisi Kullanımı. EÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Sayı 3,Cilt 4, ss159-173.
- Öztürk, H. H. 2008. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Kullanımı. Teknik Yayınevi, Ankara.
- Patel, M. R. 2006. Wind and Solar Power Systems. CRC Press, Boca Raton, Second Edition, London.

- Polinder, H., Haan S. W. H., Dubois, M. R., Slootweg J. G. 2004. Basic Operation Principles and Electrical Conversion Systems of Wind Turbines. Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE), Trondheim, Norway.
- Popa, L. M., Blaabjerg, F., Boldea I. 2004. Wind Turbine Generator Modeling and Simulation Where Rotational Speed is the Controlled Variable. IEEE Transactionson Industry Applications, Sayı.40, No.1.
- REGSR. 2007. Renewables 2007 - Energy Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), Paris.
- REGSR Update. 2009. Renewables Energy 2009 Update - Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), Paris.
- Rodriguez, A. A. G. 2006. Improvement of a Fixed-Speed Wind Turbine Soft-Starter Based on a Sliding-Mode Controller, Doktora Tezi. Departamento de Ingenieria Electronica, Universidad de Sevilla, Spain.
- Rosas, P. 2003. Dynamic Influences Of Wind Power On The Power System. Doktora Tezi, Ørsted Institute. Risø National Laboratory & Brazilian Wind Energy Centre, Denmark.
- Seyoum, D. 2003. The Dynamic Analysis And Control Of A Self-Excited Induction Generator By A Wind Turbine. Doktora Tezi, School of Electrical Engineering and Telecominacations, The University of New South Wales, Wales.
- Sharma, S., Sandhu, K. S. 2008. Sandhu, Role of Reactive Power Source on Power Quality of Three-Phase Self-Excited Induction Generator. WSEAS Transactions on Power Systems, Sayı: 3, Cilt: 4, s.216-225.
- Shepherd, W., Shepherd, D. W. 2003. Energy Studies. Imperial College Press, Second Edition, London.

- Sorensen, P., Hansen, A. D., Pedro, A. R. C. 2002. Wind models for simulation of power fluctuations from wind farms. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic,. s.1381–1402
- Soter, S. ve Wegener, R. 2007. Development of Induction Machines in Wind Power Technology. IEMDC'07 International Electric Machines & Drives Conference, Cilt:2, 3-5 Mayıs, ss.1490 - 1495
- Şen, Ç. 2003. Gökçeada'nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi İle Karşılanması. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağustos, İzmir.
- TEİAŞ. 2008. Türkiye Elektrik Enerjisi 10 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2008 – 2017). Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Genel Müdürlüğü Apk Dairesi Başkanlığı.
- Toklu, M. 2002. Rüzgar Enerjisi ve Elazığ Şartlarında Bir Rüzgar Santrali Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Uğuz, S. 2005. Rüzgar Enerjisi İle Elektrik Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Uyar, M., Gencoğlu, M. T., Yildirim, S. 2006. Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri İçin Generatör Sistemleri. EMO 3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Mersin Üniversitesi, Mersin.
- Varınca, K. B., Varank. G.. 2005. Rüzgar Kaynaklı Enerji Üretim Sistemlerinde Çevresel Etkilerin Değerlendirilmesi Ve Çözüm Önerileri. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları / Enerji Yönetim Sempozyumu, 3-4 Haziran, Kayseri.
- Vestergaard J., Brandstrup L., Goddard R. D. 2004. A Brief History of the Wind Turbine Industries in Denmark and the United States. Academy of International Business (Southeast USA Chapter) Conference, Kasım, s.322-327

Yih-Huei W. ve Brian K. P. 1993. Factors Relevant to Utility Integration of Intermittent Renewable Technologies, NREL Report NREL/TP-463-4953, Colorado, USA, August.

WBGU. 2003. World in transition – Toward Sustainable Energy Systems. German Advisory Council on Global Changes, s. 63.

Yerebakan, M. 2001. Rüzgar Enerjisi. İstanbul Ticaret Odası, Yayın No:2001–33.

Zhang, J., Cheng M., Chen Z., Fu X. 2008. Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines. Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DPRT), Nisan, s. 46–56

## 6.1 İnternet Kaynakları

## Erişim Tarihi

|                                                                                                                                                                                              |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1- <a href="http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&amp;sf=webpages&amp;b=hidrolik">www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&amp;sf=webpages&amp;b=hidrolik</a> .                                | 27.08.2009 |
| 2- <a href="http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&amp;sf=webpages&amp;b=biyoyakit">www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&amp;sf=webpages&amp;b=biyoyakit</a> .                              | 27.08.2009 |
| 3- <a href="http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&amp;sf=webpages&amp;b=gunes">www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&amp;sf=webpages&amp;b=gunes</a> .                                      | 27.08.2009 |
| 4- <a href="http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&amp;sf=webpages&amp;b=jeotermal">www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&amp;sf=webpages&amp;b=jeotermal</a> .                              | 27.08.2009 |
| 5- <a href="http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&amp;sf=webpages&amp;b=rüzgar">www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&amp;sf=webpages&amp;b=rüzgar</a> .                                    | 27.08.2009 |
| 6- <a href="http://tr.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCzgar_enerjisi">http://tr.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCzgar_enerjisi</a> .                                                                       | 14.10.2009 |
| 7- <a href="http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/rüzgar/rüzgar_en_hak.html">http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/rüzgar/rüzgar_en_hak.html</a> .                                                     | 10.10.2009 |
| 8- <a href="http://tr.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCzg%C3%A2r_enerjisi">http://tr.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCzg%C3%A2r_enerjisi</a> .                                                             | 14.10.2009 |
| 9- <a href="http://www.teias.gov.tr/ist2007/13.xls">http://www.teias.gov.tr/ist2007/13.xls</a> .                                                                                             | 26.08.2009 |
| 10- <a href="http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/rüzgar/TURKiYE_RES_20090204.doc">www.eie.gov.tr/turkce/YEK/rüzgar/TURKiYE_RES_20090204.doc</a> .                                               | 28.08.2009 |
| 11- <a href="http://www.windpower.org/en/tour/wtrb/powerreg.htm">http://www.windpower.org/en/tour/wtrb/powerreg.htm</a> .                                                                    | 14.10.2009 |
| 12- <a href="http://www.mls-tech.cc/aboutblademls.html">http://www.mls-tech.cc/aboutblademls.html</a> .                                                                                      | 14.10.2009 |
| 13- <a href="http://www.turbowinds.com/activestall.html">http://www.turbowinds.com/activestall.html</a> .                                                                                    | 14.10.2009 |
| 14- <a href="http://science.howstuffworks.com/wind-power4.htm">http://science.howstuffworks.com/wind-power4.htm</a> .                                                                        | 14.10.2009 |
| 15- <a href="http://tonto.eia.doe.gov">http://tonto.eia.doe.gov</a> .                                                                                                                        | 23.10.2009 |
| 16- <a href="http://www.mathworks.com/access/helpdesk_r13/help/pdf_doc/physmod/powersys/powersys.pdf">www.mathworks.com/access/helpdesk_r13/help/pdf_doc/physmod/powersys/powersys.pdf</a> . | 21.04.2010 |

## 7. ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Şehmus FİDAN  
D. Yeri : Üsküdar / İSTANBUL  
Doğum Tarihi : 01 / 01 / 1981  
E-Mail : sehmus.fidan@gmail.com  
Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yılı)

Lise : Haydarpaşa Endüstri Meslek Lisesi (Elektrik), 1995 – 1998  
Yüksek Okul : Fırat Üniversitesi T.B.M.Y.O (Elektrik), 1999 – 2001  
Lisans : Gazi Üniversitesi T.E.F (Elektrik Öğretmenliği), 2002 – 2006  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü – Elektrik  
Ana Bilim Dalı, 2007-2009

### Çalışılan Kurum/Kurumlar, Yıl aralığı ve Görevi

Gensan Elektrik - Elektronik Ltd. Şti. Suadiye / İSTANBUL, Şubat - Eylül 2002  
Güvenlik sistemleri montaj ve bakım teknisyeni

Schneider Electric A.Ş. Bakkalköy / İSTANBUL, Eylül 2006–Ekim 2007  
OEM Technical Support Team (OTSC) departmanında uygulama geliştirme  
uzmanlığı yapıldı. Fabrikalarda teknik eğitimler ve programcılık eğitimleri  
verildi.

Batman Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Şubat 2009-?  
Araştırma Görevlisi

## **EKLER**

### **EK-1 OECD Üye olan ve olmayan ülkeler**

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development- Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü) bir ekonomi örgütüdür. OECD, 14 Aralık 1960 tarihinde imzalanan Paris Sözleşmesi'ne dayanılarak kurulmuştur ve Avrupadaki savaş yıkıntılarının belli planlar çerçevesinde yeniden yapılanması amacıyla kurulmuştur. Avustralya, Avusturya, Belçika, Kanada, Çek Cumhuriyeti, Danimarka, Finlandiya, Fransa, Almanya, Yunanistan, Macaristan, İzlanda, İrlanda, İtalya, Japonya, Kore, Luksemburg, Meksika, Hollanda, Yeni Zelanda, Norveç, Polonya, Portekiz, Slovakya, İspanya, İsveç, İsviçre, Türkiye, İngiltere, Amerika Birleşik Devletleri. Bu 30 ülke dışındaki ülkeler OECD'ye üye olmayan ülkeler olarak adlandırılmaktadır.

### **EK-2 Rüzgar Hızı Modeli Parametreleri**

%Rüzgar modeli parametreleri

clear all variables

R=32;

U0=11;

%0P ve 3P harmonik filtresi

dtf=R/U0;%normalizasyon parametresi

%ramp büyüklükleri

tsr=5;%time start ramp

ter=35;%time end ramp

ar=1;%amplitude ramp

%gust büyüklükleri

tsg=15;%time start gust

teg=25;%time end gust

ag=-10;%amplitude gust

%türbülans büyüklükleri

%Kaimal PSD fonksiyon parametreleri

ti=0.12;% PSD intensity

txl=600;% PSD türbülans length

tfr=5;%turbine frekans

tv=ti\*U0;%turbulence variance

### EK-3 Kanat Açısına ve Kanat Hız Oranına Bağlı Performans Katsayısı

```
clc
clear all, close all
c1 = 0.5176; c2 = 116; c3 = 0.4;
c4 = 5; c5 = 21; c6 = 0.0068;

Beta = 0 ; % Kanat açısı
i=0:0.1:15;
Lambda=i;
a = (1./ (Lambda+0.08*Beta)) - (0.035/ (Beta^3+1));
Lambdai = 1./a;
Cp1 = c1.*((c2./Lambdai)-(c3.*Beta)-c4).*exp(-(c5./Lambdai))+c6.*Lambda;

Beta = 5 ; % Kanat açısı
i=0:0.1:15;
Lambda=i;
a = (1./ (Lambda+0.08*Beta)) - (0.035/ (Beta^3+1));
Lambdai = 1./a;
Cp2 = c1.*((c2./Lambdai)-(c3.*Beta)-c4).*exp(-(c5./Lambdai))+c6.*Lambda;

Beta = 10 ; % Kanat açısı
i=0:0.1:15;
Lambda=i;
a = (1./ (Lambda+0.08*Beta)) - (0.035/ (Beta^3+1));
Lambdai = 1./a;
Cp3 = c1.*((c2./Lambdai)-(c3.*Beta)-c4).*exp(-(c5./Lambdai))+c6.*Lambda;

Beta = 15 ; % Kanat açısı
i=0:0.1:15;
Lambda=i;
a = (1./ (Lambda+0.08*Beta)) - (0.035/ (Beta^3+1));
Lambdai = 1./a;
Cp4 = c1.*((c2./Lambdai)-(c3.*Beta)-c4).*exp(-(c5./Lambdai))+c6.*Lambda;

Beta = 20 ; % Kanat açısı
i=0:0.1:15;
Lambda=i;
a = (1./ (Lambda+0.08*Beta)) - (0.035/ (Beta^3+1));
Lambdai = 1./a;
```

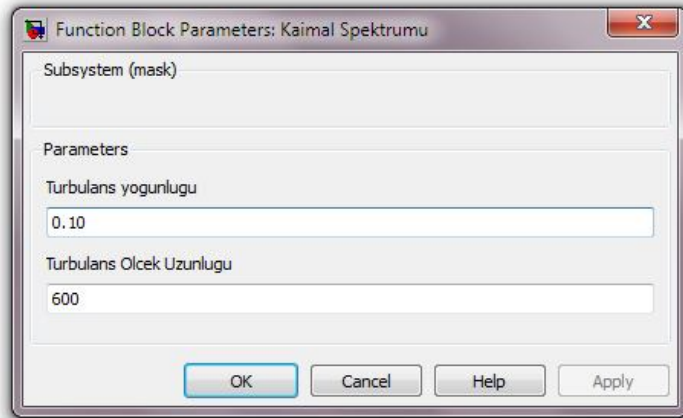
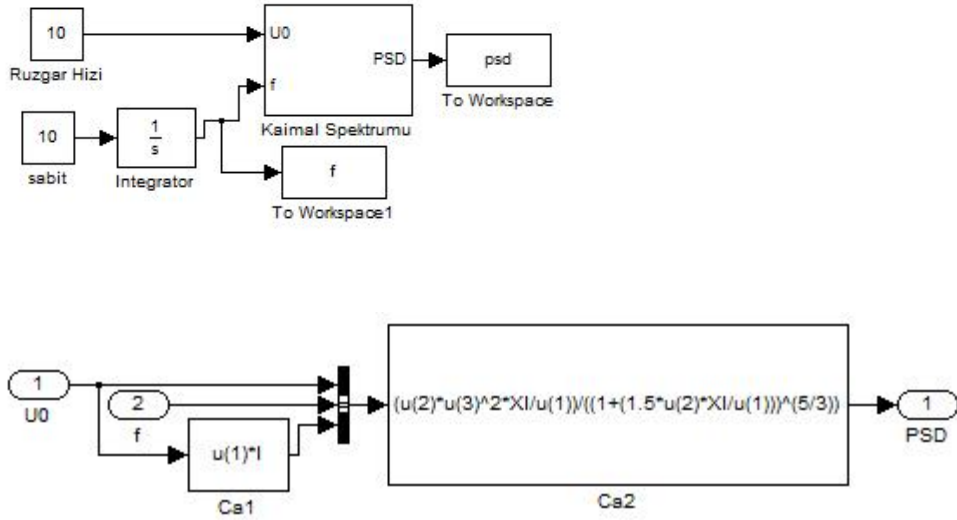
```

Cp5 = c1.*((c2./Lambdai)-(c3.*Beta)-c4).*exp(-(c5./Lambdai))+c6.*Lambda;

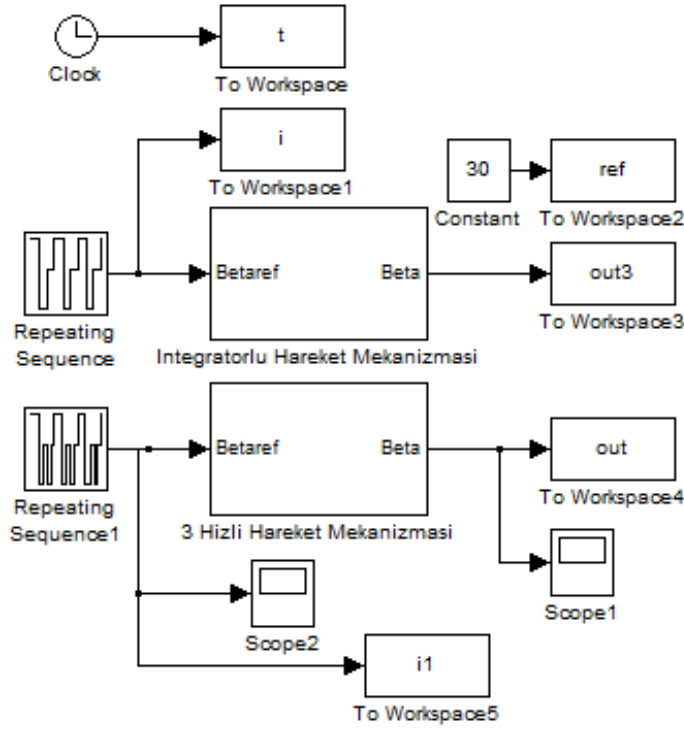
plot(i,Cp1,'r',i,Cp2,'y',i,Cp3,'k',i,Cp4,'c',i,Cp5,'b')
title('Performans Katsayısı-Kanat Açısı Grafiği')
xlabel('Kanat Hız Oranı(Lambda)')
Ylabel('Kanat Açısı(Beta)')
legend('B=0','B=5','B=10','B=15','B=20');
axis([0 15 -0.1 0.6])

```

#### EK-4 Kaimal Spektral Güç Yoğunluğu



## EK-5 Hareket Mekanizması Modelleri



## EK-6 Simulasyon Parametreleri

### a. İndüksiyon Generatör Parametreleri

|                        |                               |
|------------------------|-------------------------------|
| Generatör Tipi         | 3 fazlı indüksiyon generatörü |
| Rotor Tipi             | Sincap Kafesli                |
| Referens Düzlemi       | Rotor                         |
| Nominal Güç            | 275 KVA                       |
| Gerilim (hat-hat)      | 480 V                         |
| Frekans                | 50 Hz                         |
| Stator direnci (pu)    | 0.016                         |
| Stator indüktansı (pu) | 0.06                          |
| Rotor direnci (pu)     | 0.015                         |
| Rotor indüktansı (pu)  | 0.06                          |
| Ortak indüktans (pu)   | 3.5                           |
| Atalet sabiti          | 2                             |
| Sürtünme faktörü       | 0                             |
| Çift kutup sayısı      | 2                             |

**b. Yük Parametreleri**

|                   |                         |
|-------------------|-------------------------|
| Yük Tipi          | 3 fazlı 3 adet omik yük |
| 1. Yük            | 70 KW                   |
| 2. Yük            | 70 KW                   |
| 3. Yük            | 150 KW                  |
| Gerilim (hat-hat) | 480 V                   |
| Frekans           | 50 Hz                   |
| Bağlantı Őekli    | Yıldız                  |

**c. Kondansatör**

|                   |         |
|-------------------|---------|
| Kapasitör Değeri  | 55 KVAR |
| Gerilim (hat-hat) | 480 V   |
| Frekans           | 50 Hz   |
| Baęlantı Őekli    | gen   |

**d. Türbin Parametreleri**

|                    |           |
|--------------------|-----------|
| Rotor apı         | 30 Metre  |
| Atmosfer Basıncı   | 1 Atm     |
| Mutlak Sıcaklık    | 15 Derece |
| Yükseklik          | 25 Metre  |
| Dişli Kutusu Oranı | 23.75     |

**e. Senkron Kondenser Parametreleri**

|                     |                           |
|---------------------|---------------------------|
| Makina Tipi         | 3 fazlı Senkron Kondenser |
| Rotor Tipi          | ıkık Kutuplu             |
| Nominal Görünür G | 300 KVA                   |
| Gerilim (hat-hat)   | 480 V                     |
| Frekans             | 50 Hz                     |
| $X_d$ (pu)          | 3.23                      |
| $X_d'$ (pu)         | 0.21                      |
| $X_d''$ (pu)        | 0.15                      |
| $X_q$ (pu)          | 2.79                      |
| $X_q'$ (pu)         | 0.37                      |
| $X_l$               | 0.09                      |
| Stator Direnci      | 0.017                     |
| ift kutup sayısı   | 2                         |

#### f. Kontrollü yük grubu ve kontrolör parametreleri

|                            |             |
|----------------------------|-------------|
| Referans Frekans           | 50 Hz       |
| Regulör Kazançları [Kp Kd] | [255 30]    |
| Faz Gerilimi               | 480 Volt    |
| Her bir bit için güç       | 1.75e3 Watt |
| Başlangıç Gücü             | 50e3 Watt   |

#### g. Kesici Parametreleri

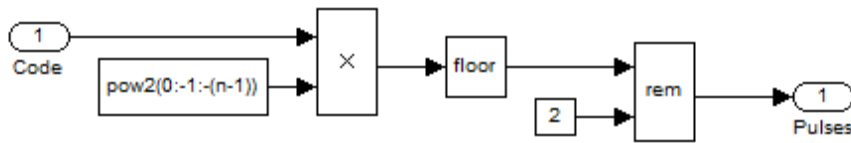
|                                             |                         |
|---------------------------------------------|-------------------------|
| Kesici [1 2 3] devreye girme zamanları (sn) | [5 10 15]               |
| Kesici Dirençleri [1 2 3]                   | [0.001 0.001 0.001] ohm |
| Snubber Dirençleri [1 2 3]                  | [1e6 1e6 1e6] ohm       |

#### h. Hareket Mekanizması ve PI Kontrolör Parametreleri

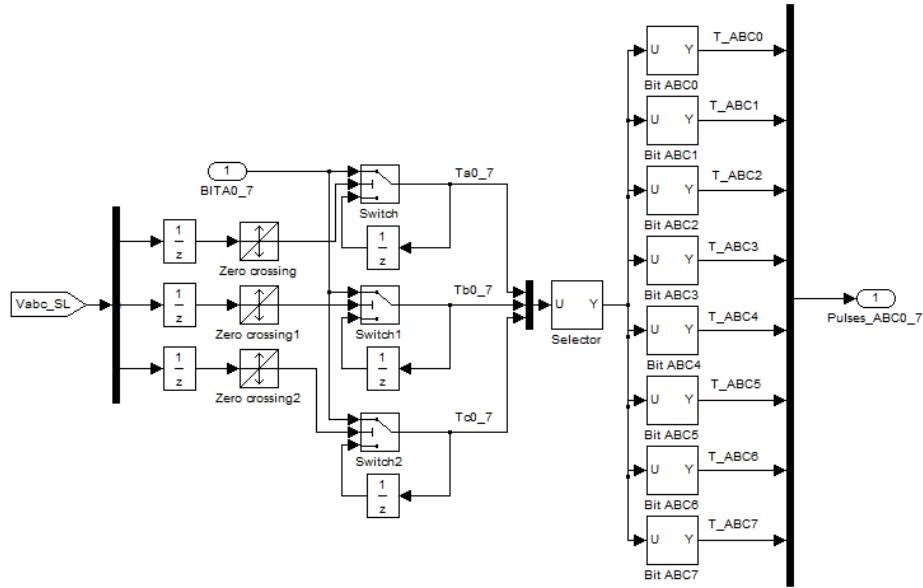
|                       |                     |
|-----------------------|---------------------|
| P Parametresi         | 3                   |
| I Parametresi         | 1.6                 |
| Kanat Açısı Limitleri | 0, 42 Derece        |
| Oturma Hızı Limiti    | 8, -8 Derece/Saniye |

### EK-7 Frekans Regülatörü Simulink Modeli

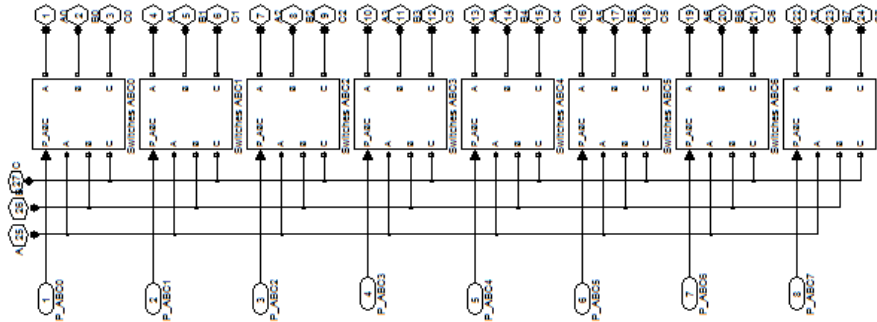
#### a. Puls Çözücü



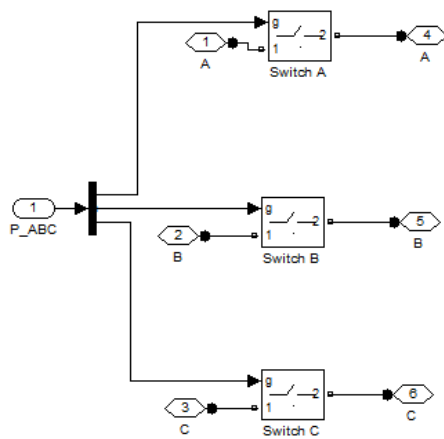
## b. Örnekleme Sistemi



## c. Anahtarlama Elemanı Grubu



## d. 3 Fazlı İdeal Anahtarlama Elemanı



e. Yük Grubu

