ÇANKIRI KARATEKİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON JENERATÖRLÜ RÜZGÂR TÜRBİNİ PI KONTROLCÜ YAPISINDAKİ DEĞİŞİKLİKLERİN GÜÇ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Muhittin Enes KALE

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇANKIRI
2022

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Muhittin Enes KALE tarafından hazırlanan **"Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörlü Rüzgâr Türbini PI Kontrolcü Yapısındaki Değişikliklerin Güç Üzerindeki Etkisi"** adlı tez çalışması 10/02/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman **:** Doç. Dr. Fatih KORKMAZ

Jüri Üyeleri **:**

Başkan **:** Doç. Dr. Hayati MAMUR
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Üye **:** Doç. Dr. Fatih KORKMAZ
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Üye **:** Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TEKE
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Çankırı Karatekin Üniversitesi

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ

Enstitü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğine göre hazırlamış olduğum "**Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörlü Rüzgâr Türbini PI Kontrolcü Yapısındaki Değişikliklerin Güç Üzerindeki Etkisi**" konulu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, tezin Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nden başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve bu çalışmanın Çankırı Karatekin Üniversitesi tarafından kullanılan "Bilimsel İntihal Tespit Programı'yla tarandığını, "intihal içermediğini" beyan ederim. Çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması halinde ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm. Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim (10/02/2022).

Muhittin Enes KALE

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON JENERATÖRLÜ RÜZGÂR TÜRBİNİ PI KONTROLCÜ YAPISINDAKİ DEĞİŞİKLİKLERİN GÜÇ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Muhittin Enes KALE

Çankırı Karatekin Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih KORKMAZ

Teknolojinin gelişmesi ile elektrik ihtiyacı gün geçtikçe daha da çok artmaktadır. Artan bu talebe karşılık elektrik üretiminin sınırlı kaynaklarla karşılanması ve bu kaynakların belirli bir ömrü olması sebebi ile yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi her geçen gün daha da artmaktadır. Bu çalışmada rüzgâr enerjisinin üretiminde kullanılan Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörlü Rüzgâr Türbini kontrol yapısı Matlab Simulink ile modellenmiştir. Matematiksel ve elektriksel formları çıkarılan çift beslemeli asenkron jeneratörü kontrol diyagramı üzerinde yapılan 3 farklı varyasyon oluşturulmuştur. Bu çalışmanın sonucunda PI kontrolcünün güç üzerindeki etkisi ortaya konmuştur.

2022, 69 sayfa

ANAHTAR KELİMELER: Çift beslemeli asenkron jeneratör, Rüzgâr türbini PI kontrolcü, Rüzgâr türbini kontrolcü, Çift beslemeli asenkron jeneratörlü rüzgâr türbini

ABSTRACT

Master of Science Thesis

EFFECT OF CHANGES IN PI CONTROLLER STRUCTURE ON POWER OF WIND TURBINE WITH DUAL FEED INDUCTION GENERATOR

Muhittin Enes KALE

Çankırı Karatekin University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical-Electronics Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih KORKMAZ

With the development of technology, the need for electricity is increasing day by day. In response to this increasing demand, the interest in renewable energy sources is increasing day by day, since electricity production is met with limited resources and these resources have a certain lifespan. In this study, the control structure of the Wind Turbine with Double Feed Induction Generator used in the production of wind energy is modeled with Matlab Simulink. Three different variations have been created on the double feed asynchronous generator control diagram, whose mathematical and electrical forms have been extracted. As a result of this study, the effect of PI controller on power has been revealed.

2022, 69 pages

Keywords: Double feed asynchronous generator, Wind turbine PI controller, Wind turbine controller, Double feed asynchronous generator wind turbine

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

“Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörlü Rüzgâr Türbini PI Kontrolcü Yapısındaki Değişikliklerin Güç Üzerindeki Etkisi” adlı çalışma 2019-2021 yılları arasında hazırlanarak Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne “Yüksek Lisans Tezi” olarak sunulmuştur. Bu çalışmanın amacı PI kontrolcü yapısındaki yapılacak değişiklikler ile Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörün gücündeki değişimleri ortaya koymaktır.

Çalışmalarımın her safhasında yakın ilgi ve alaka ile beni destekleyerek bu çalışmanın ortaya çıkmasını sağlayan değerli danışmanım Doç. Dr. Fatih KORKMAZ’a şükranlarımı sunarım. Çalışmamın ilerlemesinde her türlü maddi manevi desteğini esirgemeyen sevgili babam Muhsin KALE ve annem Aliye KALE’ye teşekkür ederim. Çalışmam esnasında her türlü yardımlarını esirgemeyen kardeşim Nilay KURÇER ve eşi Orkut KURÇER’e teşekkür ederim. Bu yoğun çalışma sürecimde her türlü yanımda olan ve beni destekleyen eşim Tuğba KALE’ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Muhittin Enes KALE
Çankırı, Ocak 2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
SİMGELER DİZİNİ vi
KISALTMALAR DİZİNİ vii
ŞEKİLLER DİZİNİ viii
ÇİZELGELER DİZİNİ x
1. GİRİŞ 1
2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ 8
2.1 Rüzgâr Enerjisi 8
2.1.1 Dünya'daki rüzgâr enerjisi durumu 10
2.1.2 Türkiye'deki rüzgâr enerji durumu 11
2.2 Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması 12
2.2.1 Yatay eksenli türbinler 13
2.2.2 Düşey eksenli rüzgâr türbinleri 15
2.3 Rüzgâr Türbinlerinin Elemanları 16
3. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN JENERATÖRLER 19
3.1 Asenkron Jeneratörler 20
3.1.1 Rotor sargılı asenkron jeneratör 20
3.1.2 Çift beslemeli asenkron jeneratörler 21
3.1.3 Optislıp indüksiyon jeneratörler 22
3.1.4 Sincap kafesli asenkron jeneratör 22
3.2 Senkron Jeneratörler 23
3.2.1 Alan sargılı senkron jeneratör 23
3.2.2 Daimî mıknatıslı senkron jeneratör 24
3.3 Doğru Akım Jeneratörler 25
4. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON JENERATÖRLÜ RÜZGÂR TÜRBİNİN MATEMATİKSEL MODELİ 27
4.1 Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör Yapısı ve Elektrik Konfigürasyonu 27
4.2 Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörün Elektriksel Denklemleri 28

4.3 Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörün Dinamik Modelleme 33
4.3.1 $\alpha\beta$ modeli 33
4.3.2 dq modeli 36
4.4 AC / DC / AC Dönüştürücü Kullanarak ÇBAG'nin Vektör Kontrolü 37
4.4.1 Rotor akımı kontrol döngüleri 38
4.4.2 Güç ve hız kontrol döngüleri 40
4.5 Rüzgâr Türbini Aerodinamik Model 41
5. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON JENERATÖR MATLAB SİMULİNKDE MODELLENMESİ 43
5.1 Parametreler 43
5.2 Matlab Simulink Simülasyonu 45
6. SONUÇ 58
KAYNAKLAR 60
EKLER 64
ÖZGEÇMİŞ 69

SİMGELER DİZİNİ

%	Yüzde
Ø	Akı
E’rs	Rotorda indüklenen emf
Emf	Elektromanyetik alan
Es	Statorda indüklenen emf
GW	Gigawatt
H	Henry
I’r	Rotor akımı
Is	Stator akımı
I	Akım
L′σr	Rotor kaçak endüktans (H)
Lm	Endüktans (H)
Lσs	Stator kaçak endüktans (H)
MW	Megawatt
n	Dönme hızı
Ns ,Nr	Stator, rotor sargıları, faz başına dönüş sayısı
P	Güç
p	Kutup çifti
Pu	Per-Unit
r	Rotor bileşeni
R	Direnç
R’r	Rotor direnci (Ω)
RPM	Dakikadaki devir sayısı
Rs	Stator direnci (Ω)
s	Stator bileşeni
Tem	Elektromekanik tork
TWh	Terawatt saat
V	Gerilim
V’r	Rotor voltajı
Vs	Stator voltajı
W	Watt
Xm	Mıknatıslanma induktansı
Xr	Rotor induktans
Xs	Stator induktans
ω	Açısal hız
Ω	Ohm
ω_m	Mil hızı
ω_r	Rotor hızı
ω_s	Senkron hız

KISALTMALAR DİZİNİ

AC	Alternatif akım
ÇBAG	Çift beslemesi asenkron jeneratör
DC	Doğru akım
DFIM	Çift beslemesi asenkron makine
DMSG	Daimî mıknatıslı senkron jeneratör
M.Ö.	Milattan önce
M.S.	Milattan sonra

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Dünya rüzgâr enerjisi (53000 TWh/yıl)..... 10
Şekil 2.2 Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyel atlası (Anonim 2021) 11
Şekil 2.3 Türkiye yıllara göre rüzgâr türbini kurulu gücü 12
Şekil 2.4 Yatay eksenli rüzgâr türbini..... 14
Şekil 2.5 Yatay eksenli düşük hızlarda çalışan rüzgâr türbini 14
Şekil 2.6 Düşey eksenli rüzgâr türbinleri..... 15
Şekil 2.7 Rüzgâr türbin elemanları..... 18
Şekil 3.1 Rotoru sargılı asenkron jeneratör ve şebeke bağlantısı..... 21
Şekil 3.2 Çift beslemeli asenkron jeneratör şebeke bağlantısı..... 22
Şekil 3.3 Alan sargılı senkron jeneratör şebeke bağlantısı 24
Şekil 3.4 DGM konvektörden beslenen daimî mıknatıslı senkron jeneratör 25
Şekil 4.1 ÇBAG şebeke bağlantı şeması (Abu-Rub *et al.* 2014) 28
Şekil 4.2 ÇBAG 'nin tek fazlı sabit durum eşdeğer elektrik devresi..... 29
Şekil 4.3 ÇBAG'nin rotor parametreleri, akım ve gerilimler statora indirgenmiş tek fazlı sabit durum eşdeğer elektrik devresi 31
Şekil 4.4 Statora atıfta bulunulan ÇBAG'nin tek fazlı sabit durum eşdeğer elektrik devresi..... 32
Şekil 4.5 Bir multi-megawatt ÇBAG'nin Qs> 0'ında jeneratör modunda fazör diyagramı 32
Şekil 4.6 ÇBAG'nin uzay vektörlerini temsil eden farklı referans çerçeveleri 34
Şekil 4.7 αβ referans çerçevesinde ÇBAG modeli..... 35
Şekil 4.8 dq referans çerçevesinde ÇBAG modeli 37
Şekil 4.9 Stator lüks uzay vektörü ile hizalanmış senkronize dönen dq referans çerçevesi 38
Şekil 4.10 ÇBAG'nin mevcut kontrol döngüleri (Abu-Rub *et al.* 2014) 39
Şekil 4.11 PI regülatörleri ile eşdeğer ikinci derece kapalı döngü akım kontrolü sistemi (Abu-Rub *et al.* 2014)..... 40
Şekil 4.12 ÇBAG'nin tam vektör kontrolü (Abu-Rub *et al.* 2014)..... 41
Şekil 5.1 Çift beslemeli asenkron jeneratör Matlab Simulink bağlantı şeması..... 45
Şekil 5.2 Stator voltaj bloğu..... 46
Şekil 5.3 Kontrol bloğu..... 46
Şekil 5.4 Rüzgâr türbini modeli 47
Şekil 5.5 PI kontrol bloğu 47
Şekil 5.6 abc dq dönüşümü 48
Şekil 5.7 abc--->D/Q modeli..... 48
Şekil 5.8 DQ--->d/q modeli 49
Şekil 5.9 dq--->3.harmonik..... 49
Şekil 5.10 d/q--->DQ 49
Şekil 5.11 DQ--->abc..... 50

Şekil 5.12 Tau(n)= 0,1/4 Hız grafiği 51
Şekil 5.13 Tau(n)= 0,1/4 Tork grafiği 51
Şekil 5.14 Tau(n)=0,1/4 Güç grafiği 52
Şekil 5.15 Tau(n)=0,5/4 Hız grafiği 53
Şekil 5.16 Tau(n)=0,5/4 Tork grafiği 53
Şekil 5.17 Tau(n)=0,5/4 Güç grafiği 54
Şekil 5.18 Tau(n)=0,05/4 Hız grafiği 55
Şekil 5.19 Tau(n)=0,05/4 Tork grafiği 55
Şekil 5.20 Tau(n)=0,05/4 Güç grafiği 56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Dünya yenilenebilir enerji kurulu gücündeki değişim (Anonymous 2021)...2
Çizelge 2.1 Rüzgâr türbin sınıfları.....13
Çizelge 5.1 Stator tarafına göre rotor parametreleri.....44
Çizelge 5.2 PI parametreleri.....44

1. GİRİŞ

Son zamanlarda dünya geneli nüfusun artması, teknolojide kaydedilen ilerleme ve sanayileşmenin artmasıyla birlikte enerjiye olan ihtiyaç önemli ölçüde artmıştır. Ancak iklimde bulunan değişiklikler, yüksek miktarda enerjinin tüketimi ve kömür, petrol, doğalgaz vb. mineral kaynakların azalması gibi ekolojik ve ekonomik gelişmelerle birlikte yeni yenilenebilir enerji kaynakları arayışı kaçınılmaz hale gelmiştir.

Dünya enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılayan fosil yakıtların kısıtlı kullanım sürelerinin olması ve enerjinin elde edilmesi sırasında doğada tahribat bırakması sebebi ile yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi daha da artmıştır. Bu kaynakların daha yaygın ve etkin bir şekilde kullanımı teknolojik gelişmelerle mümkündür. İlk etapta göz önünde bulundurulması gereken yenilenebilir enerji kaynağı rüzgâr enerjisidir (Anonim 2021).

Rüzgâr enerjisinin kullanımı eski yıllardan beri devam etmektedir. Düşünülenin aksine Asya uygarlıklarında ilk kez Hindistan, Çin, Afganistan, Tibet ve İran'da kullanıldığı bilinmektedir. Perslerin MÖ 700 yıllarında dikey eksenli rüzgâr türbinleri kullandıkları da kanıtlanmıştır (Durak 2000).

Karadağ (2009), tarafından yapılan çalışmada, enerji-çevre ilişkisi için kapsamlı bir konu sağlar ve çalışma sonucunda Rüzgâr enerjisinin ülkemiz için uygun olduğunu belirlemiştir.

Fosil kaynaklar son yıllarda hızla azalması nedeniyle ve nüfusun hızla artması ile buna bağlı olarak teknolojik gelişme sonucu enerjiye olan talep artmıştır (Kaldellis *et al.* 2011, Islam *et al.* 2013, Bilgili *et al.* 2015, Emmanouil *et al.* 2016, Anonymous 2021). Artan bu talebe karşılık yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru yönelme hızlanmıştır. Çizelge 1.1'de Dünya yenilenebilir enerji kurulu gücündeki 2019-2020 arasındaki değerler verilmiştir (Anonymous 2021). Bu rapora göre yenilenebilir enerji kaynaklarının 1 yıl içerisinde kurulu gücünde artış olduğu görülmektedir. 2020 yılında hidrolik enerji yenilenebilir enerji kaynaklarının %41,21 Rüzgâr enerjisi ise %26,17 sini oluşturmuştur.

Rüzgâr enerjisinin payını her yıl artırdığı bu rapora bakarak görülebilmektedir. Bu rapora göre rüzgâr enerjisinin 2019 yılında payı %25,20 iken 2020 yılında %26,17 ye arttığı görülmektedir. Bu doğrultuda ülkelerin ekonomik ve endüstriyel gelişmeyle birlikte enerji politikalarının da bu yönde geliştirmekte olduğundan kaynaklıdır.

Çizelge 1.1 Dünya yenilenebilir enerji kurulu gücündeki değişim (Anonymous 2021)

Enerji		2019	2020
Hidroelektrik kapasitesi	GW	1,150	1,170
Güneş PV kapasitesi	GW	621	760
Rüzgâr gücü kapasitesi	GW	650	743
Biyo-güç kapasitesi	GW	137	145
Jeotermal güç kapasitesi	GW	14.0	14.1
Konsantre güneş enerjisi (CSP) kapasitesi	GW	6.1	6.2
Okyanus güç kapasitesi	GW	0.5	0.5

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisinin en çok gelecek vadeden teknolojilerden birisi olmasının sebepleri şöyle açıklanabilir (Apaydın vd. 2009).

- Temiz olması
- Çevre kirliliği yaratmaması
- Karbondioksit salınımının azalması
- Kaynağı güneş olduğundan tükenmez ve dışa bağımlılık göstermez
- Rüzgâr enerjisi tesisleri kuruldukları alanın %1'lik kısmını kullanırlar.
- Rüzgâr türbinleri kuruluşu sırasında harcanan enerjinin çok kısa bir sürede üretilebilmesi önemli bir faktördür.

Şenel ve Koç (2015) tarafından yayınlanan "Dünyada ve Türkiye'de rüzgâr enerjisi durumu-genel değerlendirme" adlı bu bildiride, rüzgâr enerjisinin dünya ve ülkemizdeki durumu analiz edilmiştir. Rüzgâr enerjisi alanında öncü olan ülkelerin rüzgâr enerjisi kurulu gücüyle ülkemiz rüzgâr enerjisi kurulu gücü karşılaştırılarak yıllar içerisinde meydana gelen gelişmeler incelenmiş ve rüzgâr enerjisinin yenilenebilir enerji kaynakları içerisindeki payı değerlendirilmiştir. Ayrıca, ülkemizde işletme, inşaat ve lisans

aşamasındaki rüzgâr enerji santrallerinin kurulu gücü hakkında bilgiler verilmiş ve bu kurulu gücün arttırılmasına yönelik önerilerde bulunulmuştur.

Rüzgâr türbinleri, rüzgârın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan makinelerdir. Rüzgâr türbinlerinin çalışma şekillerine göre sabit hızlı ve değişken hızlı olmak üzere ikiye ayrılır. Rüzgârın kinetik enerjisi sabit olmadığı değişken olduğu için günümüzde kullanılan rüzgâr türbinlerinin çoğu değişken hızlarda üretilmektedir. Bu nedenle, rüzgâr kullanımı maksimize edilerek rüzgâr türbinin verimliliği artırılır. Senkron hızın ± %30'u aralığında çalışması ve kullanılan güç elektroniği dönüştürücünün gücünün jeneratör gücünün yaklaşık %25'i kadar olması avantajlarından dolayı, çift beslemeli asenkron jeneratörler (ÇBAG) değişken hızlı rüzgarlarda son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Petersson 2005, Blaabjerg *et al.* 2006).

Rüzgâr enerji sistemlerinde kullanılan Rüzgâr türbinlerinde en çok kullanılan jeneratör tipi çift beslemeli asenkron jeneratör olduğu Hansen vd. (2004) tarafından yapılan araştırmalarda ortaya konmuştur. Literatürde çift beslemeli asenkron jeneratörün avantajları hakkında çalışmalar yapılmış ve bu avantajlar detaylı bir şekilde ortaya konmuştur (Pena *et al.* 1996, Muller *et al.* 2002, Hansen *et al.* 2004, Burton *et al.* 2011).

Cengiz vd. (2016) tarafından yayınlanan "Küçük rüzgâr türbini güç sistemi modellemesi" adlı makalede Muğla'daki üç ayrı noktadaki rüzgâr hızı verilerine göre 4,6 kW gücündeki rüzgâr türbini Matlab / Simulink modellemesi yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada modelleme sonuçları ile Muğla'daki üç ayrı noktadaki elektrik enerjisi üretimi değerlerini karşılaştırmışlardır (Cengiz vd. 2016).

Dhanuka (2013) tarafından yapılan "Modelling of doubly fed induction generator based wind turbine" adlı çalışmada, MATLAB-SIMULINK kullanılarak çeşitli rüzgâr türbini özelliklerinin modellenmesi ve simülasyonu ile, güç-hız karakteristikleri ve tork-hız karakteristikleri ile rüzgâr elektrik sistemlerinin temellerini incelenmiştir (Dhanuka 2013).

ÇBAG'nin türbin sistemlerinde kullanılmasının en önemli nedenlerinden biri, yüksek enerji çıkışı, azaltılmış mekanik yük, daha basit açı kontrol sistemi, geniş aktif ve reaktif güç kontrol aralığı, çıkış gücü dalgalanmalarını ortadan kaldırmasıdır. Ancak, ÇBAG'nin performansı sadece asenkron motora değil, aynı zamanda jeneratöre uygulanan d-q vektör kontrol yöntemine de bağlıdır. Genellikle çift beslemeli makinelerde stator akısı ve stator gerilimi alan yönlendirmesi kullanılır. Stator akı yönlendirme yöntemi, aktif-reaktif güç kontrolünde en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Genel olarak bilindiği üzere, kapalı döngü d-q vektör kontrolü ile ÇBAG, senkron hızdan daha yüksek ve daha düşük elektrik üretebilir (Muller *et al.* 2002).

Literatürdeki birçok çalışma, aktif güç ve reaktif gücün kontrol yoluyla güç kalitesinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. ÇBAG ayrık modeli düşünüldüğünde kullanılabilecek en etkili yöntemin klasik PI denetleyici olduğu araştırmalarda yer verilmiştir (Miki *et al.* 1991).

Literatürde çift beslemeli asenkron jeneratör sisteminde kullanılan birçok kontrol sistemi bulunmaktadır. Rüzgâr enerjisi doğrusal olmayan bir karakteristik yapıya sahip olduğu için ve önceden tahmin edilmesi mümkün olmayan bu sistemlerde kontrol yapısı olarak Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantık denetleyiciler çok iyi performans göstermiştir (Mashaly *et al.* 1994, Heier 1998, Galdi *et al.* 2008).

Bayhan (2012) yaptığı çalışmada Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörün farklı hız ve yük şartlarında aktif güç denetimi gerçekleştirmişlerdir. PI denetleyici tarafından jeneratörün çıkış gerilimi kontrol edilmiştir. Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörün aktif güç kontrolü kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyicisi ile kontrolü sağlanmıştır. Yapılan çalışmada farklı hız ve yük durumlarında daha verimli çalıştığı elde edilmiştir (Bayhan 2012).

Lekhchine vd. (2015), çift beslemeli motorların hız kontrolü için PI ve bulanık mantık denetleyicilerinin performansını karşılaştırmıştır. Geliştirilmiş alan odaklı kontrol ve inverter çalışmada rotor akımı kontrol edilerek motor hızı istenilen seviyede tutulmuştur.

Bulanık mantık denetleyicinin yük bozulmalarını ortadan kaldırdığı ve daha iyi tepki süresine sahip olduğu söylenmektedir (Lekhchine *et al.* 2015).

Akyazı (2015), araştırmasında değişken hızlı rüzgâr türbini sistemlerinde güç kalitesi sorunlarının azaltılması ve enerji kullanımının iyileştirilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu araştırmada kontrolör olarak PI ve bulanık mantık kontrolörleri kullanılmıştır. Denetleyicinin performansını iyileştirmek için, denetleyici parametrelerinin performans standartlarına göre iyileştirme için parçacık sürüsü optimizasyonu ve genetik algoritma teknolojileri kullanmışlardır. Simülasyonlar farklı koşullar altında gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir (Akyazı 2015).

Wu vd. (2006) rüzgâr türbinini detaylı bir şekilde modelleyerek, çift beslemeli makinenin kontrolünün rüzgâr türbini sisteminin stabilizesini artıracağını göstermişlerdir. Denetleyicinin parametreleri, türetilmiş bir küçük sinyal kararlılık modeli kullanılarak tasarlanmış ve parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) kullanılarak elde edilmiştir. MATLAB/Simulink ortamında simülasyon araştırmaları sayesinde optimize edilmiş parametrelerle yapılan kontrolör rüzgâr türbininin kararlılığını önemli ölçüde iyileştirmiştir (Wu et al 2006).

Zhang ve Wang (2009) araştırmasında, rüzgâr türbininde kullanılan kontrol sisteminin her bir parçasının özellikleri incelenmiştir. Yazar, ÇBAG'nin matematiksel modelini rüzgâr türbini modelleri, tahrik sistemi modelleri ve jeneratör modelleri kullanarak aerodinamik ilkeleriyle tamamen birleştirdiklerini ve farklı hızlar için farklı açı kontrol stratejileri önerdiklerini belirtmiştir. MATLAB/Simulink ortamında yaptıkları simülasyon çalışması sonucunda modelin doğru sonuçlar verdiğini ve kontrol stratejisinin etkili olduğunu göstermişlerdir (Zhang and Wang 2009).

Poitiers vd. (2009) araştırmasında, rüzgâr enerjisi dönüşümü sistemlerinde kullanılan ÇBAG'nin kontrol sistemlerini araştırmışlardır. Bu çalışmada inverter üç farklı teknoloji ile kontrol edilmiş ve analiz rüzgâr türbini simülasyon ortamında gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada, stator ile şebeke arasındaki aktif ve reaktif gücü kontrol etmek için ilk olarak

şebeke bağlantılı çift beslemeli jeneratör kullanılmıştır. Bu sistemlerde kontrolör olarak PI, polinom RST ve lineer kuadratik Gauss kullanmışlardır. Doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki farklı kontrol yöntemi tanımlanarak uygulanmıştır. Bu çalışmada, bu üç farklı kontrolörün performansları birbirine yakın olduğu bulunmuştur. Ayrıca sağlamlık testi de gerçekleştirmişlerdir (Poitiers *et al.* 2009)

Hui-qun vd. (2014) yapmış olduğu çalışmada Kamal spektrumuna bağlı olan rüzgâr hızı simülasyonunun, bulanık kendinden uyarlamalı kontrol tarafından kullanılan PID kontrolör ile karşılaştırılması yapılmıştır. Kritik rüzgâr gücünü düşük nominal rüzgâr hızında tutmak için PID kontrolünü kullanımını önermişlerdir (Hui-qun *et al.* 2014).

Kassem vd. (2013) çalışmasında değişken hızlı rüzgâr türbini sistemlerinde kullanılan çift beslemeli asenkron jeneratörünün dinamik modellemesi ve kontrol sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şebekeye bağlı rüzgâr türbini sisteminin ayrıntılı dinamik modellemesini d-q senkron düzleminde görüntüleyerek, kayan modlu denetleyici, şebeke ile çift beslemeli jeneratörün statoru arasındaki güç akışını kontrol etmek için kullanılmıştır. Kontrolörün performansını iyileştirmek için integral kayan modlu denetleyici kullanılmıştır. Kontrolör, makine parametre katsayısı değişikliklerinin davranışını, referans gücünü izleme hassasiyetini karşılaştırılmıştır. Ayrıca çalışmada PI denetleyici ile entegre kayan modlu denetleyici karşılaştırılmıştır (Kassem *et al.* 2013).

Hızlı bir gelişim gösteren rüzgâr enerjisi çevreye negatif etkisi az olan rüzgâr türbinleri ile üretilmektedir. Bu çalışmada rüzgâr enerjisinin üretiminde kullanılan Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörlü Rüzgâr Türbini kontrol yapısı Matlab Simulink ile modellenmiştir. Modellenen bu yapı üzerinde PI denetleyicisi yapısındaki kontrol değerleri değiştirilerek Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörünün gücü gözlemlenmiştir. Gözlemlenen bu değerler ile rüzgâr türbinin hızı ve güç grafikleri çıkartılarak PI denetleyici için en uygun değer aralığı tespit edilmeye çalışılmıştır.

1.1 Tezin Ana Hatları

Bu tez çalışması, aşağıdaki noktalarla açıklanan altı bölümden oluşmaktadır.

- Bölümde 1 de tezin amacı, kapsamı ve literatür araştırması hakkında bilgi verilmiştir.
- Bölümde 2 de rüzgâr enerjisi Dünya ve Türkiye'deki rüzgâr enerjisi ve rüzgâr türbinleri hakkında bilgi verilmiş ve bölümde rüzgâr türbinlerinin sınıflandırılması hakkında detaylı araştırma yapılmıştır.
- Bölüm 3 de rüzgâr türbinlerinde kullanılan jeneratörler incelenip karşılaştırmalar yapılmıştır.
- Bölüm 4 de Çift beslemeli asenkron jeneratörün yapısı ele alınmıştır. Çift beslemeli asenkron jeneratörün matematiksel ve elektriksel denklemleri çıkarılarak eş değer devresinden yola çıkarak kontrol sistemi için dinamik denklemleri oluşturulmuştur.
- Bölüm 5 de Çift beslemeli asenkron jeneratör ve kontrol sistemi Matlab Simulink de modellenmiştir. 4. bölümde çıkartılan eş değer devresi ve kontrol döngüleri yardımıyla simülasyon için Matlab Simulink ortamına aktarılmıştır. Simülasyon sonucunda elde edilen verilere yer verilmiştir.
- Bölüm 6 da yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar ve gelecek yöntemlere yer verilmiştir.

2. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ

Rüzgâr atmosferdeki havanın yer yüzeyindeki çoğunlukla yatay hareketinden meydana gelen doğa olayına denir. Rüzgâr türbinleri rüzgârdan oluşan kinetik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren makinalardır.

2.1 Rüzgâr Enerjisi

Hava hareketlerinin temeli daima yüksek basınç bölgesinden alçak basınç bölgesine doğru hareket eder. İki bölge arasındaki basınç farkı ne kadar yüksek belirgin olursa oluşan hava akımı o kadar hızlı ve fazla olur. Bu basınç bölgesi eşitlendiğinde rüzgâr durur.

Rüzgâr hızı periyotlar halinde değişim gösterir. Bu değişimin hızı hava ve yeryüzü şekillerine bağlı olmuştur.

Rüzgâr türbinlerinin en iyi yerleşimi yüksek tepeler ve sırtları olmuştur. Tepelerde rüzgâr hızları alçak noktalara göre daha hızlıdır. Engebeli arazi koşullarında türbülans olayı yükseklik göstermiştir. Bu engebeleri ağaçlar binalar oluşturabilir. Türbülans düzensiz rüzgâr hızına denmektedir. Rüzgâr türbinlerinin kulelerinin yüksek olmasının sebebi bu türbülanstan kaçınmak ve daha yüksek rüzgâr hızlarına ulaşabilmektir. Kara koşullarına göre denizlerde türbülans daha azdır. Bu nedenle karaya göre denize kurulan rüzgâr türbinleri daha uzun ömürlü olmuştur.

Rüzgâr enerjisi rüzgârın hareketi sonucu sahip olduğu kinetik enerjiye denir. Rüzgâr enerjisinin ana parametresi rüzgâr tarafından taşınan hava miktarı ve hızı oluşturur. Hızı ve miktarı yüksek olan hava yüksek rüzgâr enerjisi içerir.

Rüzgâr enerjisi kullanımı M.Ö 2800 yıllarda Babil Kralı Hammurabi[1] döneminde Mezopotamya' da sulama amacıyla kullanılan rüzgâr enerjisi aynı dönemde Çin'de de kullanıldığı belirtilmektedir. Yel değirmenleri ise ilk olarak İskenderiye yakınlarında kurulmuştur. Persler, M.S. yedinci yüzyılın ortalarında rüzgâr türbinlerini yoğun bir şekilde kullanmışlardır. Bu ilk üretilen makinalar büyük boyutlu kaba ve verimsiz olmasına rağmen oldukça yoğun kullanıldığı ve yüzyıllardır bu makineler geliştirilerek kullanılmaya devam edilmiştir.

Rüzgâr Enerjisinin genel bir tarihi sıralamasına bakılacak olursa:

- Rüzgâr enerjisinin mekanik enerjiye çevrilip kullanılması M.Ö. 5000'lere denk gelir. İlk başlarda Deniz ulaşımında gemilerde kullanılmıştır. (Mısır)
- M.Ö.2000 dolaylarında un öğütme gibi işlemlerde kullanılan makinalar inşa edilmiştir. (Pers – Çin)
- Rüzgâr türbinleri M.S.1000'lere doğru daha gelişmiş makinalarla tarım endüstrisinde su pompalama, öğütme işlemleri ve testere gibi fonksiyonlar için kullanılmıştır.
- Rüzgâr enerjisinin ilk elektrik üretiminde kullanılan makinalar 1890'larda Danimarka'da kullanılmıştır. Rüzgâr enerjisinden ilk elektik üreten türbin ise 1891'de Danimarka'da Paul la Cour tarafından inşa edilmiştir (Musial and Ram 2010)
- İlk Mega Watt (MW) seviyesinde üretim 1941'de alınmıştır (Smith-Putnam wind turbine)
- 1970'lerden sonra rüzgâr türbinleri bugünkü halini almaya başlamıştır.

Dünya rüzgâr enerjisi genel tarih sıralaması yukarıdaki noktalar ile verilmiştir.

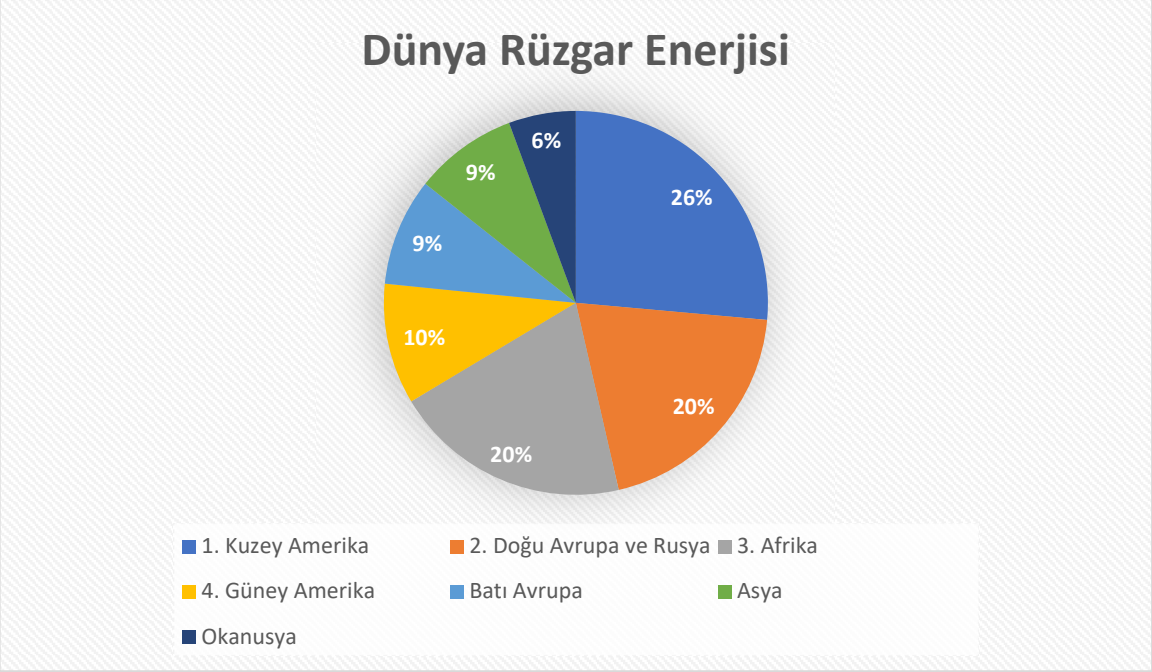
[1] Hammurabi (y. MÖ 1810 – y. MÖ 1750), Amori kökenli Birinci Babil Hanedanlığının altıncı kralıdır. Orta kronolojiye göre y. MÖ 1792'den y. MÖ 1750'ye kadar hüküm sürmüştür. Hammurabi'den önce, sağlığı bozulduğu için tahttan feragat eden babası Sin-Muballit hükümdarlık yapmıştır. Hammurabi, hükümdarlığı sırasında Elam bölgesiyle Larsa, Eşnunna ve Mari şehir devletlerini fethetmiştir. Asur Kralı I. İşme-Dagan'ı devirip İşme-Dagan'ın oğlu Mut-Aşkur'u haraç ödemeye zorlayarak neredeyse Mezopotamya'nın tamamını Babil egemenliği altına almıştır (Wikipedia 2021).

2.1.1 Dünya'daki rüzgâr enerjisi durumu

Rüzgâr enerjisi günümüzde oldukça kullanılan potansiyeli yüksek yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından dünya da enerji potansiyelini ölçmek için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Yapılan araştırmalarda, bölgede rüzgâr kapasitesi 5,1 m/s üzerinde, toplumsal kısıtlar ve uygulamaya dönük olarak %4 ü kullanıldığı hesaplamalara göre, Dünyada rüzgâr potansiyeli teknik olarak 53000 TWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Rüzgâr enerjisinde potansiyeli yüksek olan bölgeler sırasıyla:

Kuzey Amerika (14000TWh/yıl), Doğu Avrupa ve Rusya (10600 TWh/yıl), Afrika (10600 TWh/yıl), Güney Amerika (5400 TWh/yıl), Batı Avrupa (4800 TWh/yıl), Asya (4600 TWh/yıl) ve Okyanusya (3000 TWh/yıl) şeklindedir. Rüzgâr potansiyeli yüksek olan bölgeler Şekil 2.1'de verilmiştir.

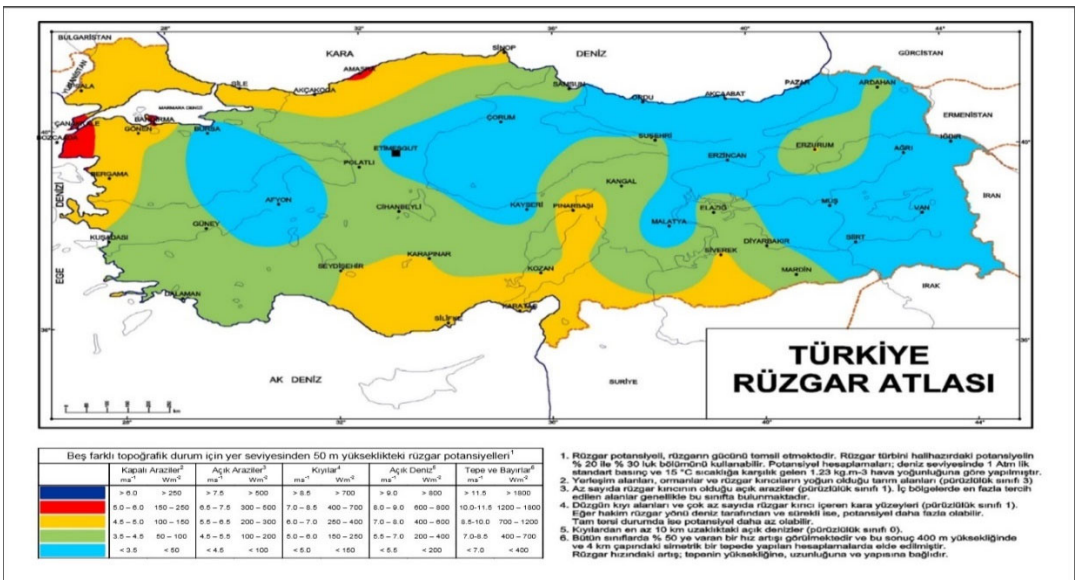
Ortaya çıkan bu verilere dayanarak rüzgâr enerji potansiyelinin %66'sına Kuzey Amerika, Doğu Avrupa Rusya ve Afrika sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 2.1 Dünya rüzgâr enerjisi (53000 TWh/yıl)

2.1.2 Türkiye'deki rüzgâr enerji durumu

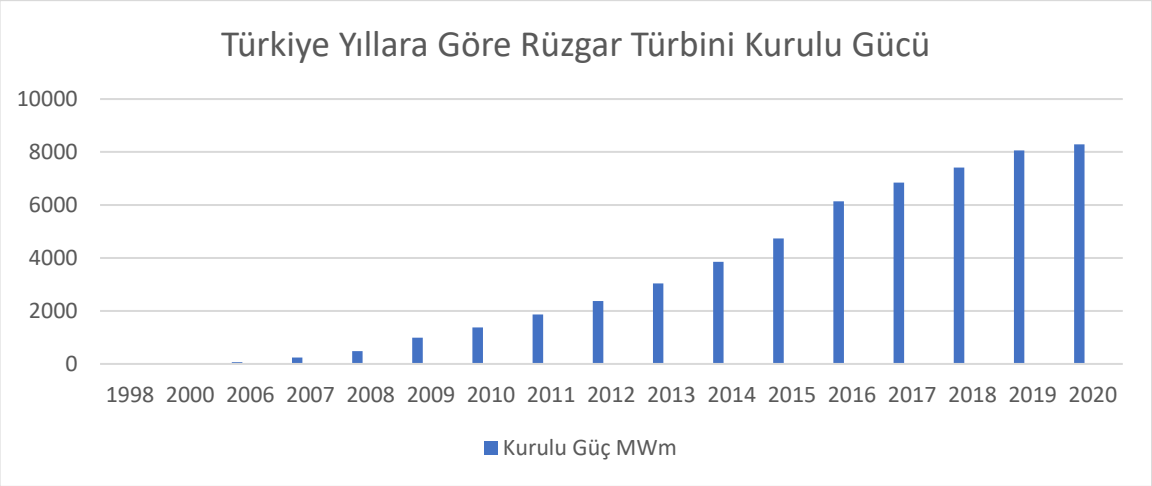
Türkiye'deki enerji potansiyelini belirlemek amacı ile rüzgâr ölçümleri ve diğer meteorolojik ölçümleri Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır. Türkiye de ilk rüzgâr enerjisi bilimsel araştırmaları 1960'lar da Ankara Üniversitesi, 1970'ler de Ege Üniversitesi daha sonra ODTÜ tarafından yapılmış 1980'li yıllarda TUBİTAK-MAM bünyesinde yapılmıştır. MAM tarafından ilk rüzgâr enerji atlası çalışması başlatılmıştır. Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyel atlası (REPA), Türkiye rüzgâr kaynaklarının karakteristiklerini ve dağılımını belirlemek amacıyla Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından 2006 yılında üretilmiştir. Bu atlasta verilen detaylı rüzgâr kaynağı haritaları ve diğer bilgiler rüzgâr enerjisinden elektrik üretimine aday bölgelerin belirlenmesinde kullanılabilecek bir altyapı sağlamaktadır. Yıllık ortalama değer alındığında, Türkiye'nin en iyi rüzgâr kaynağı alanları, kıyı şeritleri, yüksek bayırlar ve dağların tepesinde ya da açık alanların yakınında bulunmaktadır. Açık alan yakınlarındaki en şiddetli yıllık ortalama rüzgâr hızları Türkiye'nin batı kıyıları boyunca, Marmara denizi çevresinde ve Antakya yakınında küçük bir bölgede meydana gelmektedir. Orta şiddetteki rüzgâr hızına sahip geniş bölgeler ve rüzgâr gücü yoğunluğu Türkiye'nin orta kesimleri boyunca mevcuttur (Altuntaşoğlu 2012). Türkiye geneli 50 m yükseklikte ortalama rüzgâr hız dağılımı Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyel atlası (Anonim 2021)

Türkiye de kurulu bulunan rüzgâr enerji santrallerinin toplam kurulu gücü 8.288 MWm dir. Türkiye de kurulu olan toplam santral ve türbin sayısı MGM tarafından toplam santral sayısı 197 ve türbin sayısı 3351 adet olarak belirtilmiştir EİE tarafından yürütülen araştırmada, Türkiye'deki rüzgâr enerjisi bakımından zengin olan bölgeler Bandırma, Antakya, Kumköy, Mardin, Sinop, Gökçeada, Çorlu ve Çanakkale olarak belirlenmiştir (Anonim 2021). Türkiye rüzgâr enerjisi bakımından elverişli bir coğrafya ya sahip olması sebebi ile her yıl kurulu rüzgâr gücü Şekil 2.3'te görüldüğü gibi artmıştır.

Türkiye'de ilk rüzgâr santrali 1998 yılında Çeşme-İzmir de kurularak enerji üretimi için devreye alınmıştır. Ülkemizde bulunan rüzgâr türbinlerinin yıllara göre kurulu güç grafiği Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 Türkiye yıllara göre rüzgâr türbini kurulu gücü

Şekil 2.3'te görülen grafikte Türkiye'nin yıllara göre rüzgâr türbini kurulu gücü verilmiştir. Şekil 2.3'e bakıldığında her yıl diğer yıla göre rüzgâr türbini kurulu gücünde artış olduğu görülmektedir.

2.2 Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgâr türbinleri rüzgârın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren makinelerdir. Çizelge 2.1'de genellikle kullanılan rüzgâr türbinleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 Rüzgâr türbin sınıfları

Rotor Tipi	RPM	Tork	Kullanım Alanı
Pervane	Yüksek	Alçak	Elektrik Üretimi
Darrıeus	Yüksek	Alçak	Elektrik Üretimi
Cylogıro	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya Su Pompası
Çok Kanatlı	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya Su Pompası
Yeleken Kanat	Orta	Orta	Elektrik Üretimi veya Su Pompası
Fan	Orta	Orta	Su Pompası
Savonıus	Alçak	Yüksek	Su Pompası
Hollanda	Alçak	Yüksek	Su Pompası ve Değirmen

Rüzgâr türbinleri rotor konumlarına göre iki şekilde sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmalardan biri yatay eksenli diğeri ise dikey eksenli rüzgâr türbinleridir.

2.2.1 Yatay eksenli türbinler

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde dönme ekseni ile rüzgâr paralel, kanatlar ise rüzgâr yönüne göre diktir. Kanatların rüzgâr yönüne dik olması ile rüzgâr enerjisini türbinin rotoru tarafından maksimum tutulması planlanmıştır. Ticari türbinlerin genel bir çoğunluğu yatay eksenli türbinler olmuştur. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerin de rüzgârı önden alacak şekilde döner bir tabla üzerine yerleştirilir. Bu tip türbinlerin iki çeşidi vardır. Bunlardan biri rüzgârı arkadan alan diğer bir türü ise rüzgârı önden gören çeşididir. Yatay eksendeki hareketi rüzgâra yönelik yapılarda arkada bir kuyruk eşlik eder rüzgârı arkadan alan çeşidinde konik yapı ile bu dönme hareketi oluşturulur. Şekil 2.4'te yatay eksenli bir rüzgâr türbin örneği verilmiştir.



Şekil 2.4 Yatay eksenli rüzgâr türbini

Yatay eksenli türbinlerin bir başka sınıflandırması ise yavaş hızlarda çalışan ve yüksek hızlarda çalışan olarak ikiye ayrılırlar.

Yavaş hızlarda çalışan yatay eksenli rüzgâr türbinleri genellikle elektrik üretimi için verimli sistemler değillerdir. 3-7 m/sn. aralığında değişen rüzgâr hızlarında çalışırlar. Bu tip yavaş hızda çalışan rüzgâr türbinleri genellikle su pompası sistemlerinde kullanılır. Şekil 2.5'te yavaş hızlarda çalışan bir rüzgâr türbini örneği verilmiştir.



Şekil 2.5 Yatay eksenli düşük hızlarda çalışan rüzgâr türbini

Yüksek hızlarda çalışan rüzgâr türbinleri ise 1-4 arası kanatlardan oluşur. Genel yaygın kullanılan tip 3 kanatlı türüdür. Yüksek hızlarda çalışan rüzgâr türbinlerinde kanat sayısı artıkça verim daha çok artar. Fakat 3 kanattan daha fazla kanat maliyeti artırdığından genellikle 3 kanatlı türbinler tercih edilir. Ayrıca 1 ve 2 kanatlı türbinler yüksek hızlarda 3 kanatlı türbinlere göre daha fazla gürültü yapmasından ve verimi 3 kanatlı türbinlere göre daha az olmasından dolayı genel olarak 3 kanatlı türbinler tercih sebebi olmuştur.

2.2.2 Düşey eksenli rüzgâr türbinleri

Dönme eksenleri rüzgâr yönüne göre dik ve düşey olan bu türbinlerin kanatları düşeydir. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri rüzgârı her yönden kabul edebilme kabiliyetine sahiptirler. Harekete ilk geçişleri güvenilir değildirler ve verimliliği %35 civarında çalışırlar. Kanat sayıları çok fazla olma sebebiyle ağırlıkları artar ve yüksek hızlarda verimliliği düşmektedir. Genelde düşük rüzgâr hızlarında ve az miktarda su pompalamak için tasarlanmışlardır. Rüzgârı her yönde almaları sebebiyle yüksek kulelere ihtiyaçları bulunmayan bir rüzgâr türbin modelidir. Şekil 2.6'da düşey eksenli rüzgâr türbini görülmektedir.



Şekil 2.6 Düşey eksenli rüzgâr türbinleri

Savonious Rüzgâr Türbinleri: Savonius RT, 1925 yılında Finlandiyalı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından keşfedilmiştir. İki yatay disk arasına yerleştirilmiş ve merkezleri birbirine göre simetrik olarak kaydırılmış, "kanat" adı verilen iki yarım silindirden oluşmaktadır. Belirli bir hızla gelen rüzgârın etkisiyle, çarkı oluşturan silindirin iç kısmında pozitif ve dış kısmında negatif bir momentin olmaktadır. Pozitif moment, negatif momentten daha büyük olduğundan, dönme hareketi pozitif moment yönünde sağlanır (Ushiyama and Nagai 1988)

Darrieus Rüzgâr Türbinleri: 1931 yılında Fransız mühendis olan George J.M. Darrieus tarafından icat edilmiştir. Kanatların denklem yapısı aerodinamik yapıya sahip olduğu

için yüksek performanslı bir düşey eksenli rüzgâr türbin modelidir. İlk hareketi için bir tahrik motoru veya Savonius RT gerekmektedir.

H-Darrieus Rüzgâr Türbinleri: Darrieus Rüzgâr Türbinin geliştirilmesi ile ortaya çıkmış bir modeldir. Darrieus Rüzgâr Türbin yapısının daha karmaşık bir modelidir. Kanatlarda pitch kontrol uygulanması ve aerodinamik profilinden dolayı Darrieus Rüzgâr Türbini modelinden ayrılmaktadır.

2.3 Rüzgâr Türbinlerinin Elemanları

Rüzgâr Türbinleri önce kinetik enerjiyi mekanik enerjiye daha sonra da mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bir rüzgâr türbini temel olarak kule, jeneratör, hız dönüştürücüleri (dişli kutusu), elektrik elektronik elemanlar ve pervaneden oluşur.

Pervane kanatları: Kanatların üzerinde esen rüzgâr kanatların kaldırıp dönmesini sağlar genelde rüzgâr türbinlerinde 3 kanat bulunmaktadır. Rüzgâr türbinin modeline göre bu kanat sayıları azalabilir veya daha çok olabilir.

Tower (Kule): Pervane ve motor bölümlerinin yerden daha yüksek bir seviyede çalışmasını sağlayan yapıdır. Kuleler genellikle tüp şeklinde çelik, kafes yapılı veya betonarme olarak yapılır.

Fren sistemi: Rüzgâr türbinin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayan sistemlerdir. Güvenli rüzgâr hızı geçildiğinde frenleme sistemi yardımıyla rüzgâr türbininin hızı kontrol altına almaya yaramaktadır.

Jeneratör sistemi: Rüzgâr türbini jeneratörleri mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren yapılardır. Rüzgâr türbinlerinde 3 tip jeneratör kullanılmaktadır. Bunlar doğru akım jeneratörleri, senkron jeneratörler ve asenkron jeneratörlerdir.

Rüzgâr ölçer (Anemometre): Rüzgâr hızını ölçerek kontrol ünitesine iletmekle görevli elemandır.

Yüksek hız mili (Şaft): Rüzgâr türbin jeneratörünü süren yapıdır.

Düşük hız mili: Rotor tarafında düşük hızların oluşmasını sağlar.

Sapma sürücüsü (Yaw Drive): Rüzgârın yönüne doğru çalışan rüzgâr türbinlerinde rüzgârın yönüne doğru rotorun sürekli olarak rüzgârın yönüne doğru dönük olmasını sağlar.

Sapma motoru (Yaw Engine): Sapma sürücüsüne güç sağlayan motordur.

Makine bölümü (Nacelle): Rüzgâr türbin kulesinin en tepesinde bulunan yapılardır. Makine bölümünün içerisinde vites kutusunu, düşük ve yüksek hız millerini, jeneratörü, kontrol ünitesini ve freni bulundurur.

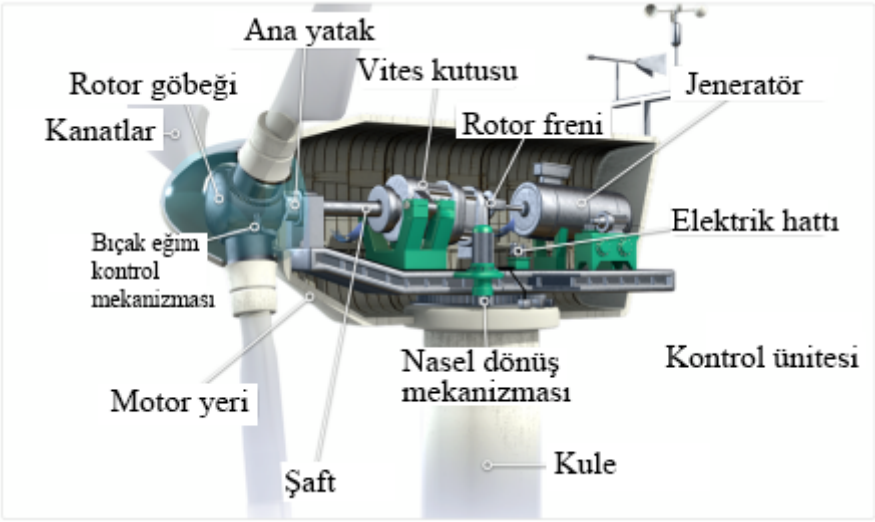
Vites kutusu (Dişli Kutusu, Gear Box): Vites kutuları düşük hız milini, yüksek hız miline bağlayarak dönüş hızını elektrik üretmek için gerekli olan dönüş hızına çeviren yapılardır.

Rotor: Rüzgâr türbinlerinde pervane kanatları ve göbek kısmının arasında kalan bölgeye denir.

Yelkovan: Rüzgâr yönünü ölçerek ölçtüğü bilgiyi sapma sürücüsüne iletir. Bu sayede rüzgâr yönüne doğru rüzgâr türbinin dönmesi sağlanır.

Kontrol ünitesi: Kontrol ünitesi rüzgârın hızındaki değişiklikleri analiz ederek rüzgâr türbinin devreye girme veya devreden çıkma sistemlerini kontrol eden yapılardır.

Şekil 2.7’de rüzgâr türbini elemanlarını oluşturan genel yapı görülmektedir.



Şekil 2.7 Rüzgâr türbin elemanları

3. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN JENERATÖRLER

Jeneratörler mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren elemanlardır. Bu jeneratörler rüzgâr türbininde rüzgârın kanatları döndürmesi ile oluşan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine döndürmede kullanılırlar. Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmek için rüzgâr türbinlerinde genel olarak 3 tip jeneratör yapısı kullanılmaktadır. Bunlar:

1) Doğru akım jeneratörü,

2) Senkron jeneratör,

3) Asenkron jeneratör.

Küçük ve güçlü sistemlerde eskiden genel olarak doğru akım jeneratörleri kullanılmıştır. Doğru akım jeneratörleri doğru akımı alternatif akıma çeviren elektronik konvektörler yardımıyla kullanılmaktadır. Şebeke sistemine konvektörler yardımıyla bağlanan doğru akım jeneratörleri yerine günümüzde daha çok senkron ve asenkron jeneratörler kullanılmaya başlanmıştır. Senkron ve Asenkron jeneratörler daha çok orta ve güçlü sistemlerde tercih edilen jeneratör tipleri olmuştur. Günümüzde rüzgâr türbinlerinde genellikle senkron ve asenkron türünde jeneratörlerin kullanıldığı görülmektedir. Bu jeneratörler de içlerinde avantaj ve dezavantajları bakımından türlere ayrılmaktadır. Bunlar:

Asenkron Jeneratör

a) Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör (SKAG)

b) Rotoru Sargılı Asenkron Jeneratör (RSAG)

- Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör (ÇBAG)

- OptiSlip® Jeneratör (OSG)

Senkron Jeneratör

a) Rotoru Sargılı (Alan Sargılı) Senkron Jeneratör (RSSG)

b) Sürekli Mıknatıslı Senkron Jeneratör (SMSG)

Doğru Akım Jeneratörü

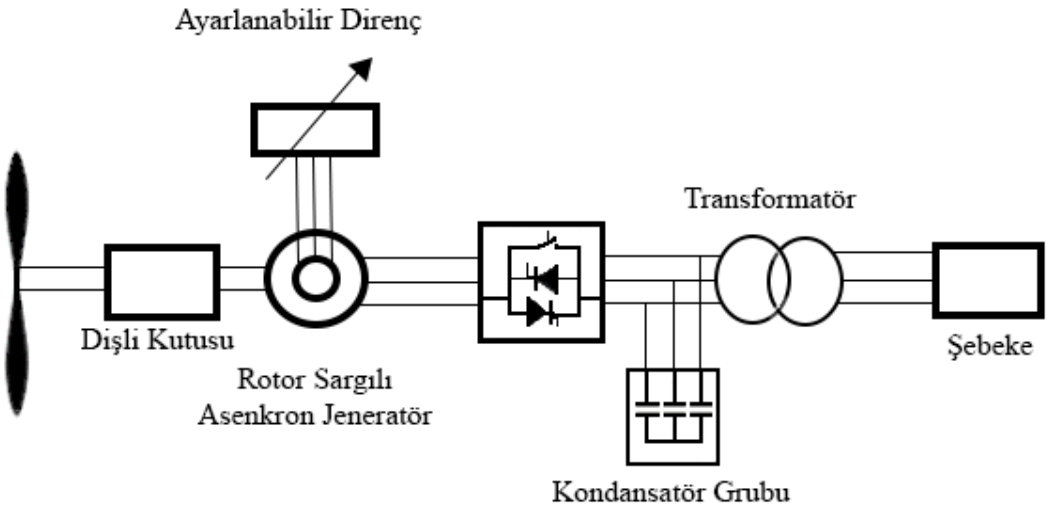
Anahtarlı Relüktans Jeneratör (ARG)

3.1 Asenkron Jeneratörler

Rüzgâr Türbinlerin de alternatif akım üretmek için 3 fazlı asenkron jeneratörü veya indüksiyon jeneratörü olarak adlandırılan jeneratör tipi kullanılmaktadır. Bu jeneratör rüzgâr türbini sistemlerinde genellikle kullanılan jeneratör tipidir. Küçük sistemler hariç orta ve büyük ölçekli sistemlerde genellikle asenkron jeneratör tercih edilmektedir. Bu jeneratörlerin tercih edilme sebebi güvenlik emniyetlerinin iyi olması ve maliyetlerinin düşük olmasından kaynaklıdır. Asenkron jeneratörler rüzgâr türbinlerinde genellikle karşımıza rotoru sargılı ve sincap kafesli olarak iki tip şeklinde çıkmaktadır.

3.1.1 Rotor sargılı asenkron jeneratör

Rotor sargılı asenkron jeneratör elektriksel özellikleri dışarıdan kontrol edilebilir bir yapıya sahiptir. Böylece rotor gerilimi dışardan değiştirilebilir. Rotor sargı uçları rotor ile dönen bileziklere bağlıdır. Bilezikler üzerinde sabit duran fırçalar yardımıyla rotor sargıları dış kaynağa veya üç fazlı yol verme direncine bağlanabilir. Bu bağlantılar sayesinde yol alma akımı sınırlandırılabildiği gibi hız ayarlamaları da yapılmasına olanak verir. Şekil 3.1’de rotor sargılı asenkron jeneratör şebeke bağlantı blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.1 Rotoru sargılı asenkron jeneratör ve şebeke bağlantısı

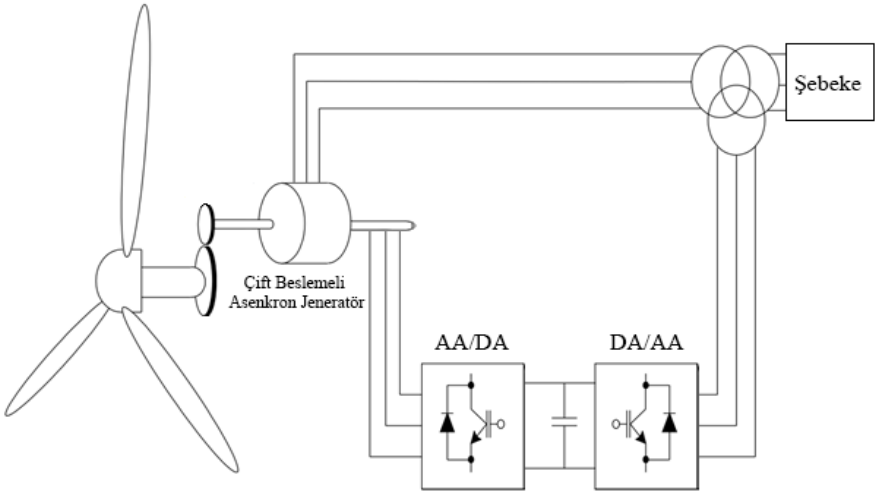
3.1.2 Çift beslemeli asenkron jeneratörler

Şekil 3.2'de çift beslemeli asenkron jeneratörünün şebeke bağlantısı verilmiştir. Bu şekilde verilen çift beslemeli asenkron jeneratörün stator sargısı doğrudan şebekeye bağlanmış ve rotor sargısı 2 back-to-back inverterden oluşan dört bölgeli güç konvektörü üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Genel olarak rotor tarafına bağlanan güç konvektörleri kontrol sistemi için kullanılır. Şebeke tarafındaki kontrol sistemi ise doğru akımı düzenlemekte kullanılan konvektörler tarafından sağlanır. Çift beslemeli asenkron jeneratörün senkron jeneratörlere göre bazı avantajları vardır.

Bunlar:

- İnverter maliyeti daha düşüktür. Konvektör sistemine sahip olduğu için toplam gücün %25 kadar inverter kullanılmaktadır. Bundan dolayı da inverter maliyeti senkron jeneratörlere göre daha düşüktür.
- İnverter filtre maliyeti azdır. Sistemde kullanılan filtreler toplam sistem gücünün 0,25 pu'luk kısmı için gerekli olduğu için filtre maliyeti azdır.
- Bir başka avantajı ise çift beslemeli asenkron jeneratörler harici bozucu etkilere göre dayanıklılık ve kararlılık göstermektedir.

Bu çalışmada Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.2 Çift beslemeli asenkron jeneratör şebeke bağlantısı

3.1.3 Optislip indüksiyon jeneratörler

Rüzgâr hızının ani ve sert esmesi sırasında güç elektroniği elemanlarını kullanarak minimuma indiren yapıya sahip jeneratör tipidir. Danimarkalı şirket Vestas® tarafından geliştirilmiştir. Optislip indüksiyon jeneratör rotor sargılı jeneratör ile ayarlanabilir rotora yerleştirilmiş harici rotor dirençlerden oluşur. Bilezik yapısına ihtiyaç duymamaktadır. Jeneratör kayması rotor tarafına yerleştirilen konvektör ile toplam rotor direncinin değiştirilmesi ile düzenlenir. Bu düzenleme rüzgâr hızının değişimine bağlı olarak elektronik devre elemanları yardımı ile %1 ile %10 arasında değişmektedir. Bu yapı sayesinde ani rüzgâr değişiminden kaynaklı dalgalanmaları minimuma indirilmesi planlanmış yapılardaki jeneratörlerdir. Optislip indüksiyon jeneratörünün dezavantajı ise reaktif güç kontrolünün zayıf kalmasıdır (Nicolás *et al.* 2002).

3.1.4 Sincap kafesli asenkron jeneratör

Sabit hızlı ve değişken hızlarda kullanılır. Manyetik gürültüyü azaltmak için ayrıca iyi bir kalkınma momenti elde etmek için rotor da kullanılan çubuklar mile paralel değil mil ile

belli bir açı yapacak şekilde ayarlanmıştır. Sincap kafesli asenkron jeneratör sağlam yapısı ve ekonomik nedenlerden dolayı tercih sebebi olmuş bir jeneratördür (Nicolás *et al.* 2002).

Rüzgâr türbinlerin de sıklıkla kullanılan bu jeneratör yapı olarak arıza yapacak parçaların azlığı, uygun fiyatlı olması ve uyartım için doğru akım kaynağına ihtiyaç duymaması rüzgâr türbinlerinde avantajlı konuma getirmiştir. Rüzgâr türbinlerinde şebekeye bağlı veya şebekeden ayrı olarak kullanılabilen bu yapılar şebekeden ayrı olarak bir yapıyı beslemek için de kullanılabilir (Bansal 2005).

3.2 Senkron Jeneratörler

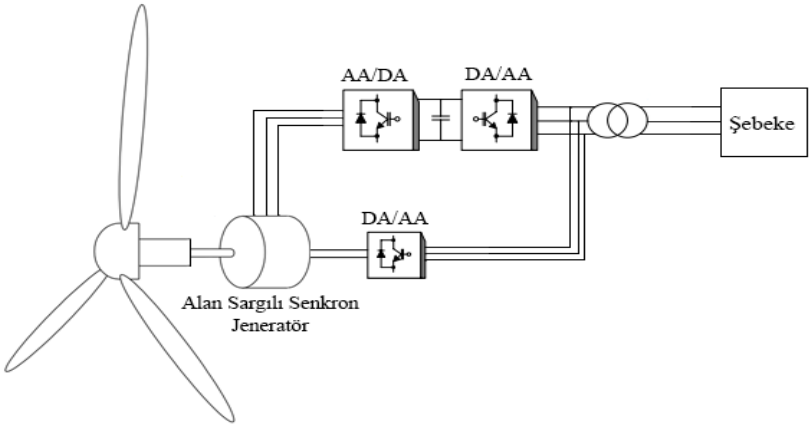
Bir senkron jeneratörün rotor sargısına bir DA uygulanır. Bu akım ile bir rotor manyetik alanı oluşturulur. Oluşan bu manyetik alan sonucunda jeneratörün rotoru bir hareket kaynağı ile döndürülür. Bu hareket kaynağı rüzgâr türbinlerinde rüzgâr enerjisi sayesinde oluşmaktadır. Böylece makine içinde dönen bir manyetik alan üretilmiş olur. Bu manyetik alanlar stator sargıları üzerinde üç fazlı enerji indükler.

Senkron jeneratörler de kullanılan senkron kelimesinin bu jeneratörlerle birlikte kullanılmasının sebebi elektriksel frekansın, mekanik dönme hızı ile senkron olması veya kilitli olmasından dolayıdır. Bir senkron jeneratörünün rotoru, doğru akımla beslenen bir elektromıknatıstan oluşur. Rotorun manyetik alanı rotorun hangi yönde döneceğini de gösterir.

3.2.1 Alan sargılı senkron jeneratör

Alan sargılı senkron jeneratörü (ASSG) stator sargısı, dalga genişlik modülasyonu (DGM) yöntemine göre anahtarlama yapabilen, çift taraflı akım akışının olabildiği (back-to-back) gerilim kaynaklı iki güç çeviriciden meydana gelmiş, dört bölgeli bir güç konverteri üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Stator tarafındaki konverter elektromanyetik torku, şebeke tarafındaki konverter ise bu sistemin oluşturduğu aktif ve reaktif gücü regüle eder (Hansen *et al.* 2001).

Şekil 3.3'te alan sargılı senkron jeneratör için şebeke bağlantısı blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.3 Alan sargılı senkron jeneratör şebeke bağlantısı

Rotorda sargı devresinin bulunması daimî mıknatıslı senkron jeneratör (DMSG) ile kıyaslandığında bir dezavantajdır. Ayrıca üretilen aktif ve reaktif gücü regüle etmek için, nominal rüzgâr gücünün 1,2 katı büyüklüğünde konvektörler kullanılması gerekmektedir.

3.2.2 Daimî mıknatıslı senkron jeneratör

Üç fazlı doğrultucuyu takip eden, yükseltici DA-DA kıyıcısı ile bağlantısı sağlanmış, daimî mıknatıslı senkron jeneratöre (DMSG) ait rüzgâr güç sistemi görülmektedir. Burada yükseltici DA-DA kıyıcısı elektromanyetik torku kontrol etmektedir. Şebeke tarafındaki konvektör ise, girişin güç faktörünü kontrol ettiği gibi, aynı zamanda DA link gerilimini de regüle etmektedir. Genellikle bu konfigürasyon küçük güçlü (50 kW 'tan küçük) rüzgâr güç sistemleri için tercih edilmektedir (Nicolás *et al.* 2002).

DMSG'nin dezavantajları şunlardır:

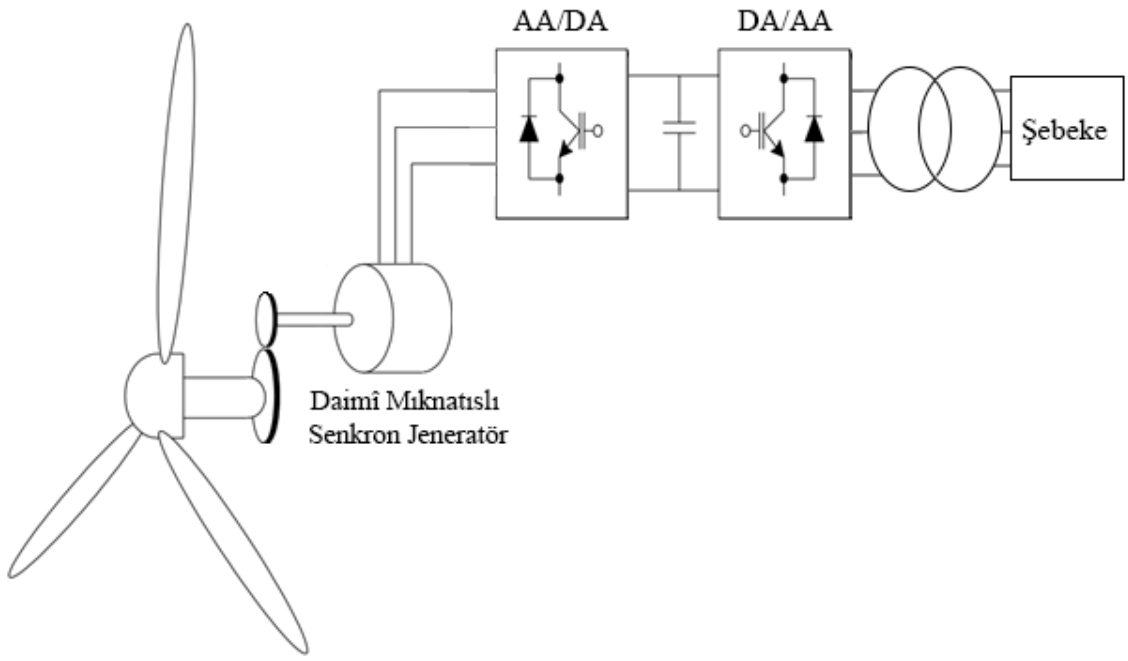
• Makinanın fiyatını arttıran daimî mıknatısların maliyeti yüksektir.

• Akımın genliğini arttıran diyotlu doğrultucular kullanılmaktadır.

• Mıknatıs malzemesinin manyetikliği bozulabilmektedir.

• Makinanın güç faktörünün kontrol edilmesi mümkün değildir.

Şekil 3.4'te daimî mıknatıslı senkron jeneratör için şebeke bağlantı blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.4 DGM konvektörden beslenen daimî mıknatıslı senkron jeneratör

3.3 Doğru Akım Jeneratörler

Doğru akım jeneratörler, düşük güvenilirlik ve bakım gerektirmesi gibi dezavantajlarına rağmen hız kontrollerinin kolay olması nedeniyle endüstride yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Doğru akım jeneratörleri küçük kapasiteli rüzgâr türbinlerinde, özellikle elektriğin şebekeden bağımsız olarak kullanıldığı yerlerde tercih edilmiştir. Son yıllarda mekaniksel komütatörlü Doğru Akım jeneratör, komütatörü elimine etmek için daimî mıknatıslı olarak tasarlanmaya başlanmıştır. Bu tertibatta üretilen alternatif akım yarı iletken doğrultucular yardımıyla doğru akıma dönüştürülür. Fırçasız doğru akım jeneratör

olarak da isimlendirilen bu makinalar, daimî mıknatısların kapasitelerinin ve güçlerinin sınırlı olması nedeniyle, küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde kullanılmaktadır (Patel 1999).

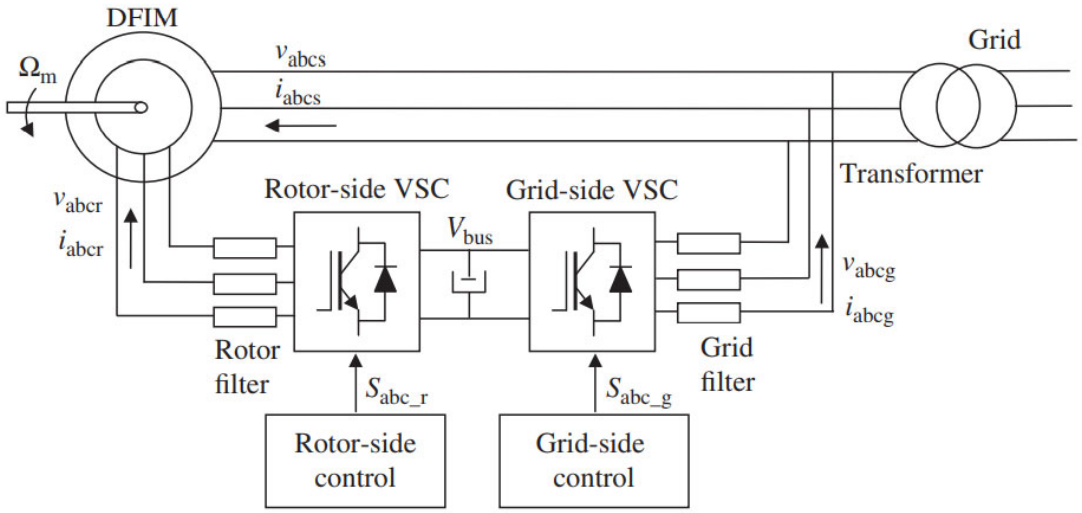
4. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON JENERATÖRLÜ RÜZGÂR TÜRBİNİN MATEMATİKSEL MODELİ

Bu çalışmada Çift beslemeli asenkron jeneratör kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada çift beslemeli asenkron jeneratörlerde kullanılan kontrol denetleyicilerinden PI kontrol denetleyicisi tercih edilmiştir.

4.1 Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör Yapısı ve Elektrik Konfigürasyonu

Çift beslemeli asenkron makinesi (ÇBAG) genellikle megavat güç aralığında ve aynı zamanda yıllardır çeşitli uygulamalarda kullanılan bir elektrikli makineyi tanımlamak için yaygın olarak kullanılan terimlerdir. Bu makine konsepti, daha yaygın olan asenkron ve senkron makinelere bir alternatiftir. Sınırlı bir hız aralığına sahip uygulamalarda avantajlı olabilir ve örneğin, değişken hızlı üretim, su pompalama vb. gibi besleme gücü elektroniği dönüştürücüsünün boyutunda bir azalmaya izin verir.

ÇBAG'nin tipik şebeke bağlantı yapısı Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Stator, stator manyetik alanını oluşturarak, sabit genlik ve frekansta doğrudan şebekeden üç fazlı gerilimler tarafından beslenir. Rotor ayrıca, makinenin farklı çalışma koşullarına (hız, tork vb.) ulaşmak için sabit durumda farklı bir genlik ve frekans alan üç fazlı gerilimlerle beslenir. Bu, şekildeki basit şemada gösterildiği gibi, arka arkaya üç fazlı bir dönüştürücü kullanılarak elde edilir. Bu dönüştürücü, uygun kontrol stratejisi ile, genel ÇBAG çalışma noktasını kontrol etmek ve rotordan şebekeye güç değişimini gerçekleştirmek için gerekli rotor AC voltajlarını uygulamaktan sorumludur. Bir voltaj kaynağı dönüştürücü gösterilmesine rağmen, farklı yapılandırmalar veya dönüştürücü topolojileri kullanılabilir.



Şekil 4.1 ÇBAG şebeke bağlantı şeması (Abu-Rub *et al.* 2014)

4.2 Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörün Elektriksel Denklemleri

Makinenin farklı frekansları arasındaki ilişkiler, ÇBAG'nin elektrik denklemlerin çıkarılmasından önce bilinmesi gereken temel bilgilerdir. Bu nedenle, ω_s (stator gerilim ve akımlarının frekansı), ω_r (rotor gerilim ve akımlarının frekansı) ve ω_m (rotor elektrik hızı) ile ilgili Denklem (4.1) gibidir:

$$\omega_s = \omega_r + \omega_m \tag{4.1}$$

Milin mekanik hızı Ω_m ile elektrik hızı arasındaki ilişki, makinenin kutup çiftlerine bağlıdır:

$$\omega_m = p\Omega_m \tag{4.2}$$

Bu iki denklemin birimleri rad/s cinsinden verilmiştir. Makinenin kayma s şu şekilde tanımlanır:

$$s = \frac{\omega s - \omega m}{\omega s} = \frac{\omega r}{\omega s} \tag{4.3}$$

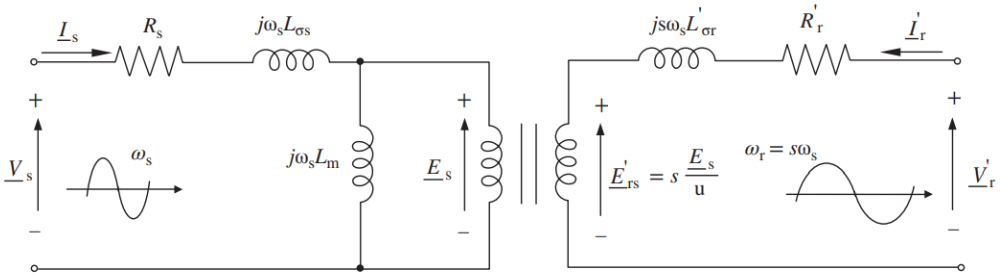
Önceki ilişkiler, örneğin Hz. veya devir/dakika gibi farklı birimlerde temsil edildiğinde de geçerlidir. Çoğu uygulamada, stator sargıları doğrudan ızgaraya bağlıdır ve bu nedenle ω_s sabittir. Bu aynı zamanda senkron frekans olarak da bilinir. Bununla birlikte, ω_r, açık bir şekilde şaftın elektrik hızına ω_m bağlıdır, bu da hıza bağlı olarak makinenin üç farklı çalışma moduna yol açar:

$$\omega_m < \omega_s \Rightarrow \omega_r > 0 \Rightarrow s > 0 \Rightarrow \text{Subsynchronous mod} \quad (4.4)$$

$$\omega_m > \omega_s \Rightarrow \omega_r < 0 \Rightarrow s < 0 \Rightarrow \text{Hypersynchronous mod} \quad (4.5)$$

$$\omega_m = \omega_s \Rightarrow \omega_r = 0 \Rightarrow s = 0 \Rightarrow \text{Synchronous mod} \quad (4.6)$$

Bu noktaya ulaştıktan sonra, Şekil 4.2'de bir ÇBAG'nin eşdeğer sabit durum devresini göstermektedir. Stator ve rotorun sadece bir fazının temsil edildiği idealleştirilmiş bir modeldir. Makinadaki simetri sayesinde diğer iki faz esas itibariyle eşit olarak modellenmiştir. Makinenin yapısında simetrik ve dengeli olduğu ve manyetizasyonun lineer olduğu varsayılmıştır.



Şekil 4.2 ÇBAG 'nin tek fazlı sabit durum eşdeğer elektrik devresi

Daha önce belirtildiği gibi, stator sargılarının doğrudan şebekeden üç fazlı gerilimlerle beslendiği, rotorun da üç fazlı gerilimlerle ancak stator gerilimlerinden bağımsız olarak beslendiği varsayılmaktadır. Modelin en temsili elektrik büyüklüğü ve parametreleri aşağıdaki gibidir:

Stator ve rotorun elektriksel büyüklükleri (fazörler):

$\underline{V}_s$: Stator voltajı
$\underline{V}'_r$: Rotor voltajı
$\underline{I}_s$: Stator akımı
$\underline{I}'_r$: Rotor akımı
$\underline{E}_s$: Statorda indüklenen emf
$\underline{E}'_{rs}$: Rotorda indüklenen emf

Stator ve rotorun elektrik parametreleri:

R_s : Stator direnci (Ω)
R'_r : Rotor direnci (Ω)
L_m : Endüktans (H)
$L_{\sigma s}$: Stator kaçak endüktans (H)
$L'_{\sigma r}$: Rotor kaçak endüktans (H)
N_s ,N_r : Stator, rotor sargıları, faz başına dönüş sayısı

Stator devresinin frekansı ω_s iken rotor frekansı, ifade (4.1) ile ortaya konduğu gibi dönme hızına bağlıdır. Stator ve rotorun kaçak empedansları, stator ve rotorun karşılık gelen frekansına göre hesaplanır. Her faz için stator ve rotor dönüşleri arasındaki ilişki *u* katsayısı ile sağlanır:

$$u = \frac{Ns}{Nr} \tag{4.7}$$

Bazı varyasyonlar bu katsayıyı etkileyebilirken, indüklenen stator ve rotor emfleri ile ilişkilidir.

$$E'rs = s\frac{Es}{u} \tag{4.8}$$

Genliklerin ilişkisinin kaymaya (veya dönme hızına) bağlı olduğuna dikkat edilmelidir, oysa u = 1 ve makine hareketsizken (s = 1) özel durum için hem indüklenen stator hem de rotor emfleri eşittir.

$$R_r = R'_r u^2 \tag{4.9}$$

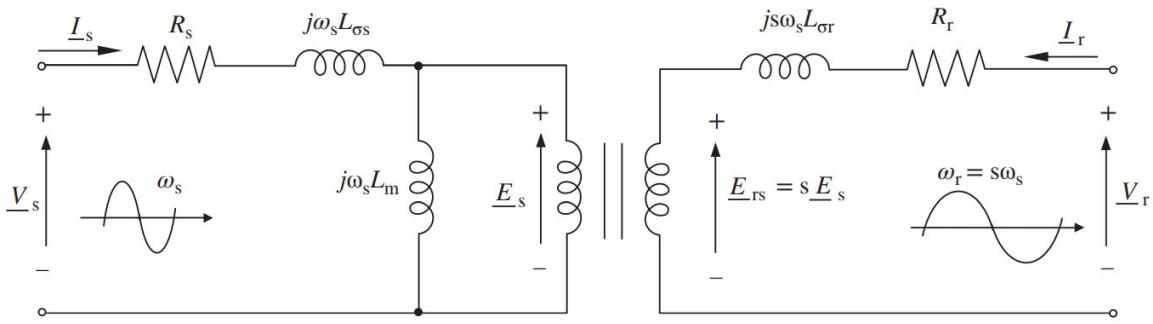
$$L_{\sigma r} = L'_{\sigma r} u^2 \tag{4.10}$$

$$I_r = \frac{I'r}{u} \tag{4.11}$$

$$V_r = V'_r u \tag{4.12}$$

$$E_{rs} = E'_{rs} u \tag{4.13}$$

Benimsenen gösterim, gerçek rotor büyüklüklerini ve parametrelerini asal üst simge (′) ile belirtirken, stator ile azaltılmış olanlar birinci üst simge (′) olmadandır. Bu Şekil 4.3'ün eşdeğer faz devresini sağlamıştır.



Şekil 4.3 ÇBAG'nin rotor parametreleri, akım ve gerilimler statora indirgenmiş tek fazlı sabit durum eşdeğer elektrik devresi

Pratik analiz için hem stator hem de rotor devrelerinin aynı frekansları sunması daha uygun bulunmuştur. Böylece, rotor devresi, basitçe Denklem (4.14) yapılarak stator frekansı ωs'e dönüştürülmüştür:

$$\underline{V}_r - s\underline{E}_s = (R_r + Js\omega_s L_{\sigma r})\underline{I}_r \quad \Rightarrow \quad \frac{Vr}{s} - \underline{E}_s = (\frac{Rr}{s} + J\omega_s L\sigma r)\,\underline{I}_r \tag{4.14}$$

Bu nedenle, nihai eşdeğer devre, tüm büyüklüklerin aynı frekansta olduğu Şekil 4.4'te gösterildiği gibi, rotorun statora başvurmasıyla elde edilmiştir.

Stator ve rotor lüksleri dahil olmak üzere bu eşdeğer sabit durum devresinin elektrik denklemleri aşağıdaki Denklem (4.15) – Denklem (4.18) ile özetlenmiştir:

Voltaj:

$$\underline{V_s} = R_s\underline{I_s} + j\omega_s L_{\sigma s}\underline{I_s} + j\omega_s L_m(\underline{I_s} + \underline{I_r}) \tag{4.15}$$

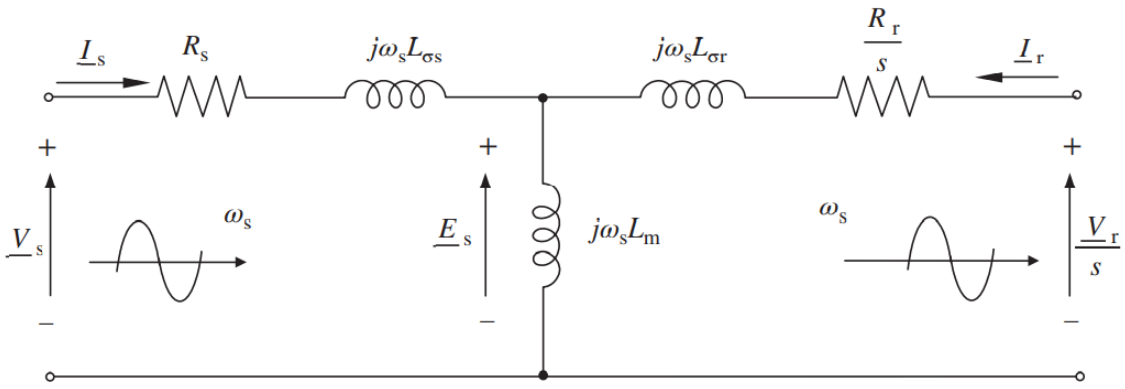
$$\frac{\underline{V_r}}{s} = \frac{R_r}{s}\underline{I_r} + j\omega_s L_{\sigma s}\underline{I_r} + j\omega_s L_m\left(\underline{I_s} + \underline{I_r}\right) \tag{4.16}$$

Lüksler:

$$\underline{\Psi_s} = L_m\left(\underline{I_s} + \underline{I_r}\right) + L_{\sigma s}\underline{I_s} = L_s\underline{I_s} \tag{4.17}$$

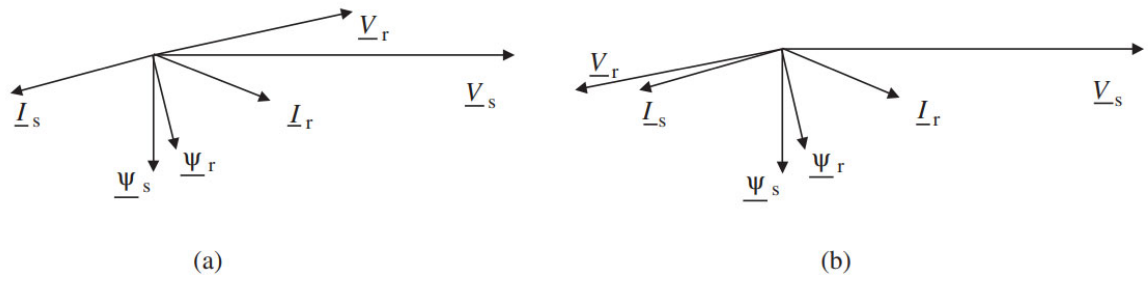
$$\underline{\Psi_r} = L_m\left(\underline{I_s} + \underline{I_r}\right) + L_{\sigma r}\underline{I_r} = L_r\underline{I_r} \tag{4.18}$$

Denklem (4.17) ve Denklem (4.18) de bulunan denklemlerde $L_s = L_m + L_{\sigma r}$ stator ve $L_r = L_m + L_{\sigma r}$ rotor endüktansıdır. Tüm bu elektrik denklemlerinde, herhangi bir çalışma koşulu için fazör diyagramını türetmek mümkün olmuştur.



Şekil 4.4 Statora atıfta bulunulan ÇBAG'nin tek fazlı sabit durum eşdeğer elektrik devresi

Jeneratörün Şekil 4.5'te eş zamansız ve hiper eşzamanlı hızlarda çalışan çok megavatlık bir ÇBAG örneğini göstermektedir.



Şekil 4.5 Bir multi-megawatt ÇBAG'nin Qs> 0'ında jeneratör modunda fazör diyagramı

(a) $s > 0\ ve\ s < 0$[1]

4.3 Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörün Dinamik Modelleme

Bu çalışmada çift beslemeli asenkron jeneratörün dinamik modellemesi geliştirilirken temel elektrik denklemlerinden ve uzay vektör teorisinden yararlanılarak çıkartılmıştır.

4.3.1 $\alpha\beta$ modeli

ÇBAG'nin dinamik $\alpha\beta$ modelinin geliştirilmesinde, makinanın temel elektrik denklemlerine uzay vektör teorisi uygulanır ve yine dikkate alınan kararlı durum modelinde olduğu gibi makinenin hem ideal hem de doğrusal olduğu varsayılmıştır. Şekil 4.6 ÇBAG'nin uzay vektörü tabanlı modellerini geliştirmek için tipik olarak kullanılan üç farklı dönen referans çerçevesini göstermektedir. Stator referans çerçevesi $(\alpha - \beta)$, sabit bir referans çerçevesidir, rotor referans çerçevesi (DQ) ωm'de döner ve eşzamanlı referans çerçevesi (dq) ωs 'de döner. "s","r" ve "a" alt simgeleri, bir uzay vektörünün sırasıyla stator, rotor ve eşzamanlı referans çerçevelerine referans olduğunu belirtmek için kullanılır. Doğrudan ve ters dönüş dönüşümü kullanılarak, bu çerçevelerin herhangi birinde bir uzay vektörü gösterilebilir (Marques *et al.* 2003).

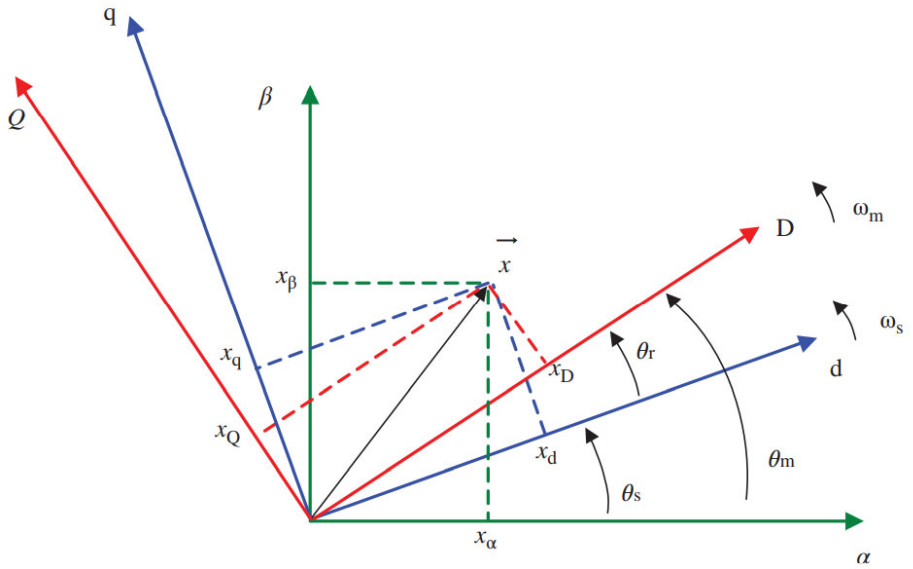
Bu nedenle, stator ve rotorun üç bobini, uzay vektör teorisi kullanılarak ayrı ayrı, stator için iki sabit αβ bobini ve rotor için iki döner bobin DQ ile temsil edilebilir ve Denklem (4.19) ve Denklem (4.20)'de verilmiş olan voltaj denklemlerini sağlar:

$$\vec{v}_s^s = R_s \vec{i}_s^s + \frac{d\vec{\Psi}_s^s}{dt} \tag{4.19}$$

$$\vec{v}_r^r = R_r \vec{i}_r^r + \frac{d\vec{\Psi}_r^r}{dt} \tag{4.20}$$

Her iki voltaj denklemi sabit referans çerçevesi αβ'de temsil ediliyorsa, rotor denklemi e^{jQ_m} ile çarpılmalıdır, bu da Denklem (4.21) setini verir:

$$\vec{v}_s^s = R_s\vec{i}_s^s + \frac{d\vec{\Psi}_s^s}{dt} \Rightarrow \begin{cases} v_{\alpha s} &= R_i i_{\alpha s} + \frac{d\Psi_{\alpha s}}{dt} \\ v_{\beta s} &= R_s i_{\beta s} + \frac{d\Psi_{\beta s}}{dt} \end{cases} \tag{4.21}$$



Şekil 4.6 ÇBAG'nin uzay vektörlerini temsil eden farklı referans çerçeveleri

$$\vec{v}_r^s = R_r\vec{i}_r^s + \frac{d\vec{\Psi}_r^s}{dt} - j\omega_m\vec{\Psi}_r^s \Rightarrow \begin{cases} v_{\alpha r} &= R_r i_{\alpha r} + \frac{d\Psi_{\alpha r}}{dt} + \omega_m\Psi_{\beta r} \\ v_{\beta r} &= R_r i_{\beta r} + \frac{d\Psi_{\beta r}}{dt} - \omega_m\Psi_{\alpha r} \end{cases} \tag{4.22}$$

Benzer şekilde, stator ve rotor lux ifadelerini sabit bir referans çerçevesinde uzay vektör formunda türetmek mümkündür:

$$\vec{\Psi}_s^s = L_s\vec{i}_s^s + L_m\vec{i}_r^s \Rightarrow \begin{cases} \Psi_{\alpha s} = L_s i_{\alpha s} + L_m i_{\alpha s} \\ \Psi_{\beta s} = L_s i_{\beta s} + L_m i_{\beta s} \end{cases} \tag{4.23}$$

$$\vec{\Psi}_r^s = L_m\vec{i}_s^s + L_r\vec{i}_r^s \Rightarrow \begin{cases} \Psi_{\alpha r} = L_m i_{\alpha r} + L_r i_{\alpha r} \\ \Psi_{\beta r} = L_m i_{\beta s} + L_r i_{\beta r} \end{cases} \tag{4.24}$$

Bu nedenle, türetilen denklem setinden, AB eşdeğer devresi Şekil 4.7'de gösterildiği gibi geliştirilir. Her bir $\alpha\beta$ koordinatı için, tüm gerilim, akım ve lüks büyüklüklerin ws frekansıyla sinüzoidal olduğu bir eşdeğer devre vardır.

Öte yandan stator ve rotor taraflarının aktif ve reaktif güçleri, Denklem (4.25)-Denklem (4.28)'de verilen denklemlere göre hesaplanabilir:

$$P_s = \frac{3}{2}(v_{\alpha s} i_{\alpha s} + v_{\beta s} i_{\beta s}) \tag{4.25}$$

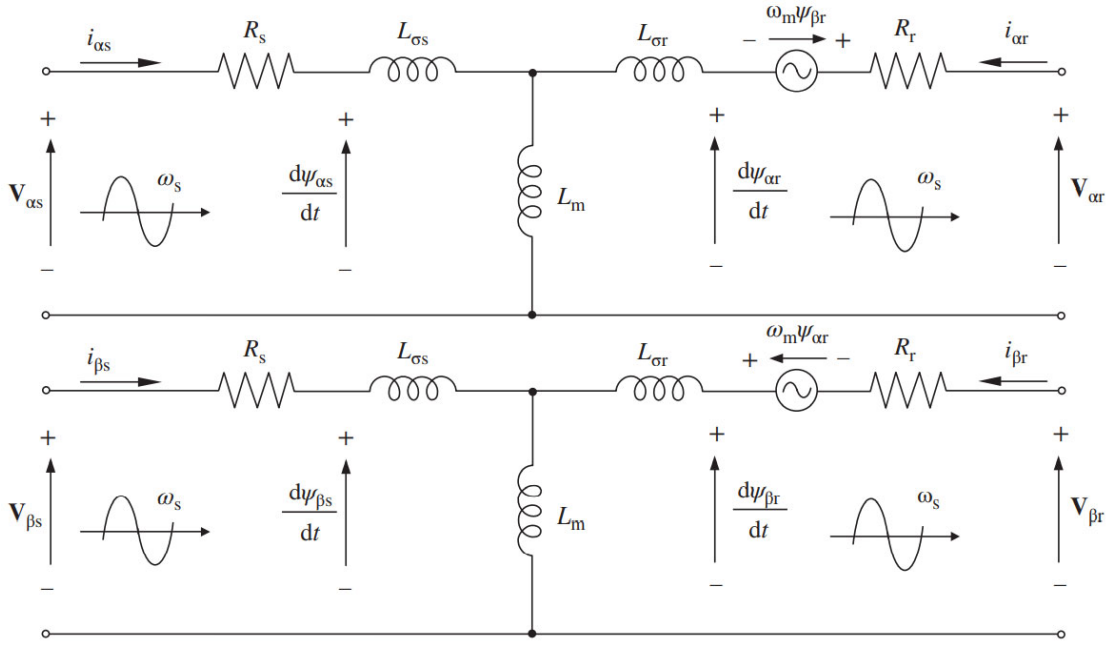
$$P_r = \frac{3}{2}(v_{\alpha r} i_{\alpha r} + v_{\beta r} i_{\beta r}) \tag{4.26}$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(v_{\beta s} i_{\alpha s} - v_{\alpha s} i_{\beta s}) \tag{4.27}$$

$$Q_r = \frac{3}{2}(v_{\beta r} i_{\alpha r} - v_{\alpha r} i_{\beta r}) \tag{4.28}$$

ÇBAG tarafından oluşturulan elektromanyetik tork Denklem (4.29) yer alan eşdeğer ifadeyle hesaplanabilir:

$$T_{em} = \frac{3}{2} pIm\{\vec{\Psi}_r \vec{\imath}_r^*\} = \frac{3}{2} p(\Psi_{\beta r} i_{\alpha r} - \Psi_{\alpha r} i_{\beta r}) \tag{4.29}$$



Şekil 4.7 αβ referans çerçevesinde ÇBAG modeli

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} Im\{\vec{\Psi}_s \vec{\imath}_r^*\} = \frac{3}{2} pIm\left\{\vec{\Psi}_s^* \vec{\imath}_s\right\} = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} pIm\left\{\vec{\Psi}_r^* \vec{\imath}_s\right\} = \frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} pIm\left\{\vec{\Psi}_r^* \vec{\Psi}_s\right\} = \frac{3}{2} L_m pIm\{\vec{\imath}_s^* \vec{\imath}_r\} \tag{4.30}$$

Böylece, Denklem (4.26) – Denklem (4.29) ifadelerini yeniden düzenleyerek, örneğin simülasyon veya analiz amaçları için yararlı olan ÇBAG'nin çeşitli durum-uzay temsillerini geliştirilebilir. Denklem (4.31)'de durum uzayı vektörünün stator ve rotor lükslerinden oluştuğunu göstermektedir:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\vec{\Psi}_s^s\\ \vec{\Psi}_r^s\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-\frac{R_s}{\sigma L_s} & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r}\\ \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & -\frac{R_r}{\sigma L_r} + j\omega_m\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\vec{\Psi}_s^s\\ \vec{\Psi}_r^s\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\vec{v}_s^s\\ \vec{v}_r^s\end{bmatrix} \tag{4.31}$$

Bu nedenle, rotor hızı davranışını tanımlayan mekanik hareket denklemini ekleyerek:

$$T_{em} - T_{load} = \frac{Jd\Omega_m}{dt} \tag{4.32}$$

Şafta uygulanan yük torku J, rotorun ataleti ve T_{load} ile bilgisayar tabanlı simülasyonlar için de kullanılabilecek bir ÇBAG modeli oluşturulmuştur.

4.3.2 dq modeli

ÇBAG'nin uzay vektör modeli, eşzamanlı olarak dönen bir çerçevede de temsil edilebilir. Bu amaçla, voltaj ifadelerini Denklem (4.31)'de sırasıyla e^{-JQ_s} ve e^{-JQ_r} ile çarparak, dq voltaj denklemleri elde edilmiştir:

$$\vec{v}_s^a = R_s\vec{i}_s^a + \frac{d\vec{\Psi}_s^a}{dt} + j\omega_s\vec{\Psi}_s^a \Rightarrow \begin{cases} v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_m\Psi_{qs}\\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_s\Psi_{ds}\end{cases} \tag{4.33}$$

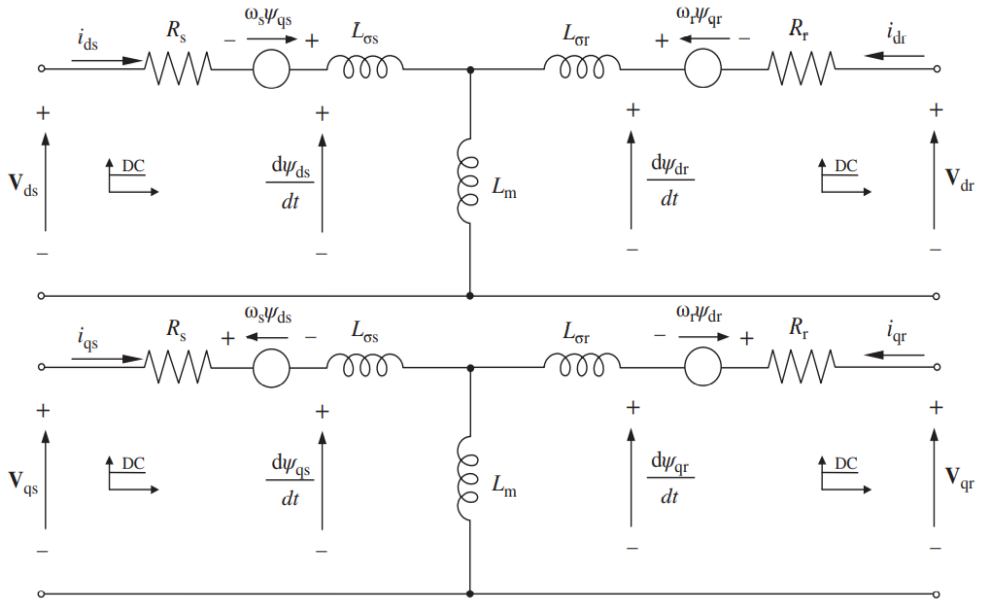
$$\vec{v}_r^a = R_r\vec{i}_r^a + \frac{d\vec{\Psi}_r^a}{dt} + j\omega_r\vec{\Psi}_r^a \Rightarrow \begin{cases} v_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - \omega_r\Psi_{qr}\\ v_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} + \omega_r\Psi_{dr}\end{cases} \tag{4.34}$$

Lüks verimleri:

$$\vec{\Psi}_s^a = L_s\vec{i}_s^a + L_m\vec{i}_r^a \Rightarrow \begin{cases}\Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}\end{cases} \tag{4.35}$$

$$\vec{\Psi}_r^a = L_m\vec{i}_s^a + L_r\vec{i}_r^a \Rightarrow \begin{cases}\Psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \Psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr}\end{cases} \tag{4.36}$$

Dolayısıyla, Denklem (4.33) – Denklem (4.36) denklemlerinden, Şekil 4.8'de görüldüğü gibi, dq cinsinden eşdeğer elektrik devresi elde edilebilir. Bununla birlikte, αβ modelinde olduğu gibi güç ve torkun eşdeğer ifadeleriyle bu model gösterimi ve bilgisayar tabanlı simülasyon modeli daha da geliştirilebilir.



Şekil 4.8 dq referans çerçevesinde ÇBAG modeli

4.4 AC / DC / AC Dönüştürücü Kullanarak ÇBAG'nin Vektör Kontrolü

Çift beslemeli asenkron jeneratör kontrol yöntemleri arasında bu çalışmada vektörel kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Bu bölümde ÇBAG'in kontrol döngüleri çıkartılarak vektörel kontrol yapısı oluşturulmuştur.

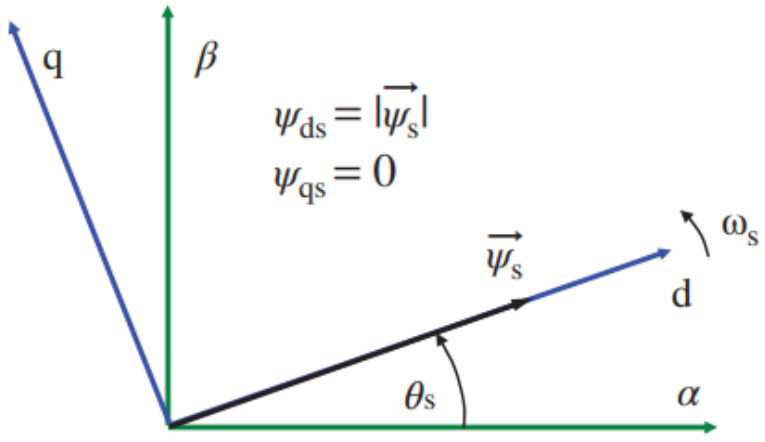
4.4.1 Rotor akımı kontrol döngüleri

ÇBAG için geliştirilen farklı alternatif kontrol yöntemleri arasında, en genişletilmiş ve yerleşik olanı kontrol metodu olan vektör kontrol tekniğidir. Bu bölümde ilk olarak, mevcut kontrol döngülerinden rotor akımı kontrol döngüsü incelenmiştir.

Diğer farklı makinelerin klasik vektör kontrol tekniklerine eşdeğer bir şekilde, ÇBAG'nin vektör kontrolü, d-ekseni ile hizalandığı eşzamanlı olarak dönen bir dq çerçevesinde gerçekleştirilir. Şekil 4.9'da gösterildiği gibi stator lux uzay vektörü bu hizalama seçimi sayesinde, daha sonra doğrudan rotor akımının stator reaktif gücü ile orantılı olduğu ve karesel rotor akımının tork veya aktif stator gücü ile orantılı olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle, senkron bir referans çerçevesindeki ÇBAG modelinden, Denklem (4.35) ve Denklem (4.36) 'yı rotor voltaj Denklem (4.34) ile değiştirerek, rotor voltajını rotor akımlarının ve stator lüksünün bir fonksiyonu olarak elde edilir (not $\Psi_{qs} = 0$):

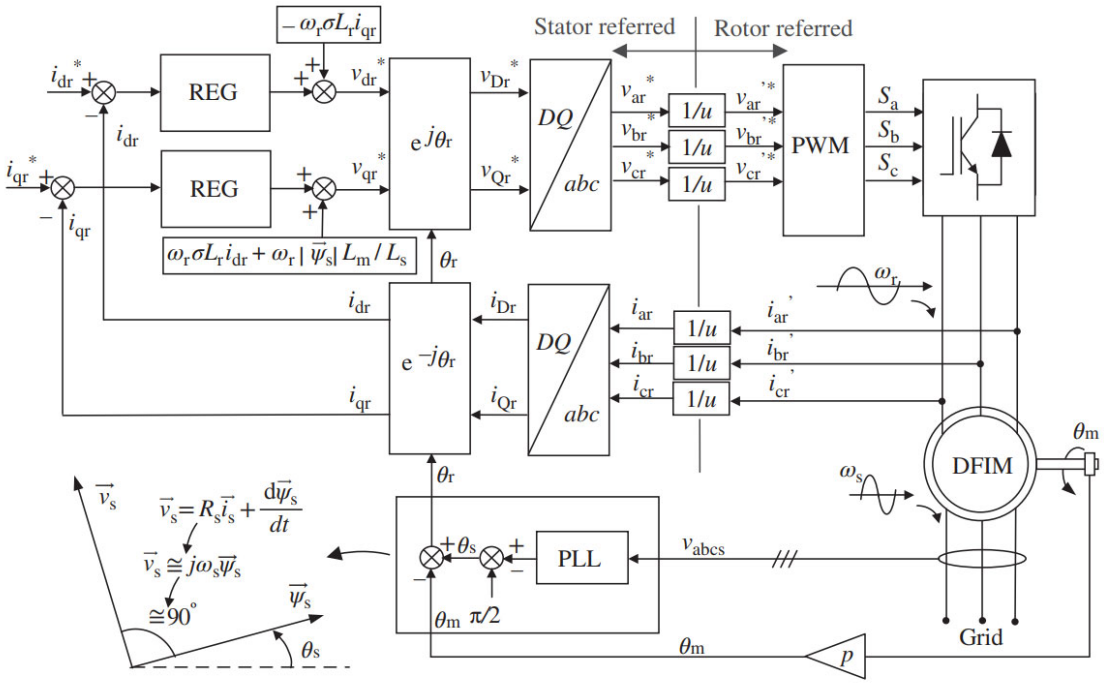
$$v_{dr} = \mathrm{R}_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{dr} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \left|\vec{\Psi}_s\right| \tag{4.37}$$

$$v_{qr} = \mathrm{R}_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{qr} + \omega_r \sigma L_r i_{dr} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \left|\vec{\Psi}_s\right| \tag{4.38}$$



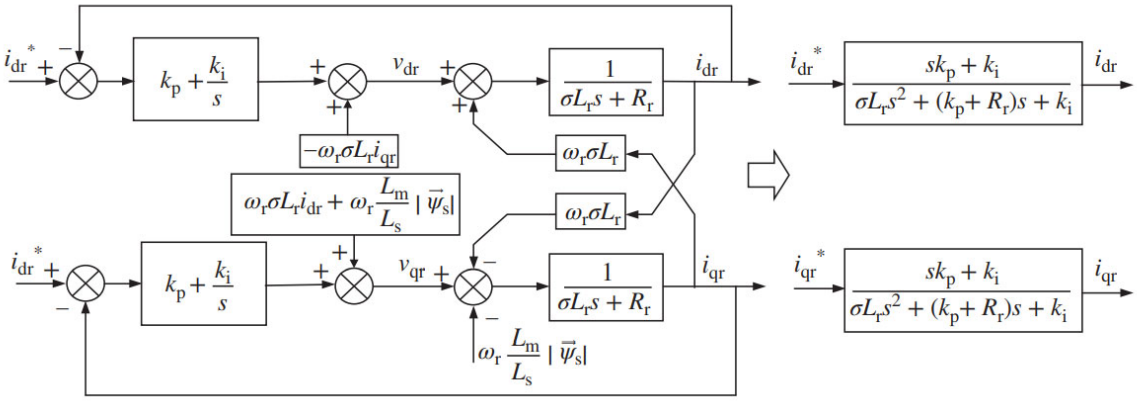
Şekil 4.9 Stator lüks uzay vektörü ile hizalanmış senkronize dönen dq referans çerçevesi

Denklem (4.21) 'den, örneğin, stator direncindeki voltaj düşüşünün küçük olduğunu varsayarsak, stator lüksü sabittir çünkü stator, sabit AC voltajında doğrudan şebekeye bağlıdır; sonuç olarak, $d|\vec{\Psi}_s|/dt$ terimi sıfırdır. Bu son iki denklem, Şekil 4.10'da gösterildiği gibi, her bir akım bileşeni için basitçe bir regülatör kullanarak dq rotor akım kontrolü gerçekleştirmenin mümkün olduğunu ortaya koymaktadır. Regülatöre yardımcı olmak için her bir regülatörün çıkışına çapraz Denklem (4.37)'de eklenebilir. Stator lux ve ω_r'nin bu amaç için tahmin edilmesi gerekmektedir; ancak, bu basittir ve fazla zorluk getirmemektedir. Referans çerçeve dönüşümü için Qr açısı tahmin edilmelidir. Kontrol dq koordinatlarında gerçekleştirilmelidir, ancak daha sonra rotor voltajı ve akımları DQ koordinatlarına dönüştürülmelidir. İlk olarak, stator voltaj uzay vektörünün açısını elde etmek, ardından bu tahmini açıdan 90 çıkarmak ve böylece Qs elde etmek mümkündür. Stator voltaj şebekesi senkronizasyonunu gerçekleştirmek için basit bir faz kilitli döngü (PLL) kullanılabilir, bu da tahmin için sağlamlık ve küçük bozuklukların veya harmoniklerin reddedilmesini sağlar. Kullanılan ÇBAG, stator ve rotorda farklı bir dönüş oranı gösteriyorsa, bunun kontrol aşamasında dikkate alınması gerekmektedir. Şekil 4.10'da ÇBAG'nin kontrol şeması görülmektedir.



Şekil 4.10 ÇBAG'nin mevcut kontrol döngüleri (Abu-Rub *et al.* 2014)

Bununla birlikte, Şekil 4.11'de her iki döngü için eşit orantılı integral (PI) düzenleyiciler seçerken, çapraz terimlerin telafisini kullanarak ve voltaj kaynağı dönüştürücüsünün etkisini ve hesaplamadaki veya ölçümlerdeki olası gecikmeler ihmal edilerek, eşdeğer kapalı döngü gösterilmiştir. Her iki akım döngüsünün sistemleri, PI regülatörlerinin uygun kazançlarını seçen klasik kontrol teorisi tarafından yerleştirilebilen iki kutuplu ve sıfırlı ikinci dereceden bir sisteme eşittir.



Şekil 4.11 PI regülatörleri ile eşdeğer ikinci derece kapalı döngü akım kontrolü sistemi (Abu-Rub *et al.* 2014)

4.4.2 Güç ve hız kontrol döngüleri

Mevcut kontrol döngüleri ve lüks açısı hesaplaması incelendikten sonra, tüm kontrol sistemi tanımlanabilir. Referans çerçevesinin d ekseni, stator lüks uzay vektörü ile hizalandığından, dq çerçevesindeki tork ifadesi Denklem (4.39)'daki gibi basitleştirilmiştir:

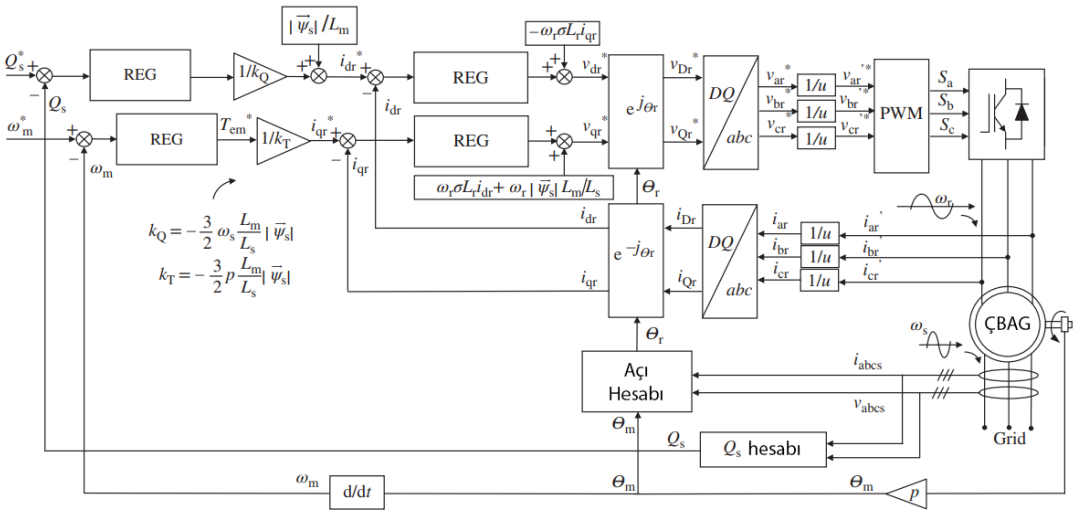
$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} \left(\Psi_{qs} i_{dr} - \Psi_{ds} i_{qr} \right) \Rightarrow \; T_{em} = -\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} \left| \vec{\Psi}_s \right| i_{qr} \Rightarrow \; T_{em} = K_T i_{qr} \quad (4.39)$$

Denklem (4.39), q rotor akımı bileşeninin torkla orantılı olduğu anlamına gelmektedir, yani i_{qr} ile tork ve makinenin hızı kontrol edilebilir. Benzer şekilde, dq çerçevesinde stator reaktif güç ifadesini geliştirerek, i_{qr}'nin Q_s'den sorumlu olduğunu ortaya koyan kompakt bir ifade elde edilebilir.

$$Q_s = \frac{3}{2}\left(V_{qs} i_{ds} - \mathrm{V}_{ds} i_{qs}\right) \Rightarrow\ Q_s = \ -\frac{3}{2}\omega_s \frac{L_m}{L_s}\ \left|\vec{\Psi}_s\right|\left(i_{dr} - \frac{\left|\vec{\Psi}_s\right|}{L_m}\right)$$

$$\Rightarrow Q_s = \ K_Q\left(i_{dr} - \frac{\left|\vec{\Psi}_s\right|}{L_m}\right) \qquad (4.40)$$

Seçilen oryantasyon nedeniyle, her iki rotor akımı bileşeninin de bağımsız olarak torku ve reaktif stator gücünü kontrol edilmesine izin verdiği görülebilir. Bu şekilde, bu ifadelere dayalı olarak, Şekil 4.12'de, ÇBAG'nin tam vektör kontrolünü göstermektedir. Şekil 4.10'da yer alan akım döngüleri korunarak, bir hız döngüsü ve bir stator reaktif güç döngüsü eklenmiştir. Hız regülasyonu gerekliliği, bu makinenin kullanıldığı uygulamaya bağlıdır ve ÇBAG 'nin sadece bir elektromanyetik tork T_{em} uygularken, şaftın hızı diğer elemanlar tarafından kontrol edilebilir.



Şekil 4.12 ÇBAG'nin tam vektör kontrolü (Abu-Rub *et al.* 2014)

4.5 Rüzgâr Türbini Aerodinamik Model

Aerodinamik model, kanatlardaki hava akışının bir fonksiyonu olarak mekanik torku hesaplayarak rotorun güç çıkışını temsil eder. Rüzgâr hızı, düşük hızlı akslarda ortalama torku değerlendirmek amacıyla kanatlar tarafından süpürülen alan olarak ifade edilmiştir (Abad *et al.* 2001).

Rotor tarafından üretilen tork Denklem (4.41)'deki ifade ile tanımlanmıştır:

$$T_t = \frac{1}{2} p\pi R^3 V_v^2 C_t \tag{4.41}$$

Tork ve güç katsayısı Cp'yi temsil etmenin yolu, uç adım oranının (λ) ve hatve açısının (β) bir fonksiyonu olarak analitik ifadeler aracılığıyla yapılabilir. Yaygın olarak kullanılan ifade Denklem (4.42) ve Denklem (4.43) te verilmiştir:

$$C_p = k1(\frac{k_2}{\lambda_i} - k_3\beta - k_4\beta^{k_5} - k_6)(e^{k_7/\lambda_i}) \tag{4.42}$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + k_8} \tag{4.43}$$

Uç adım oranı ile,

$$\lambda_i = \frac{R\Omega_t}{V_v} \tag{4.44}$$

Aerodinamik model ile oluşturulmuş olan rüzgâr türbin sisteminin rüzgâr hızı modellenmesinde kullanılmıştır. Matlab Simulink ortamına aktarılan model çift beslemeli asenkron jeneratörü için rüzgâr simülasyonu görevi görmüştür.

5. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON JENERATÖR MATLAB SİMULİNKDE MODELLENMESİ

Bu çalışmada modelleme ve simülasyon için, çok alanlı simülasyon ve model tabanlı tasarım için bir blok diyagram ortamı sağlayan Matlab Simulink tercih edilmiştir. Matlab Simulink ile çift beslemeli asenkron jeneratörü için kontrol sistemi ve rüzgâr türbini modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan kontrol sisteminde PI denetleyicisi kullanılmıştır. Kullanılan PI denetleyicisi üzerinden Matlab ortamında parametreler değiştirilerek çift beslemeli asenkron jeneratörünün çıkışları kontrol edilmiştir.

Matlab Simulink blokları oluşturulurken dördüncü bölümde yer alan denklemler yardımı ile çıkarılmıştır. Çıkarılan modeller ile bir rüzgâr türbini ortamı oluşturularak kontrol sistemi yardımı ile rüzgâr türbininde kullanılan çift beslemesi asenkron jeneratör kontrol edilmiştir. Kontrol sistemi tasarlanırken dördüncü bölümde yer alan Şekil 4.10'daki kontrol diyagramından yararlanılarak çıkarılmıştır. Kontrol sistemi olarak PI denetleyicisi dördüncü bölümde yer alan Şekil 4.11'deki denklemler ile formüle edilmiştir.

Formüle edilen değerler yardımı ile Matlab Simulink ortamında parametreler oluşturulmuştur. Oluşturulan parametrelerin kullanacağı bloklar Simulink yardımı ile oluşturularak simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

5.1 Parametreler

Çift beslemeli asenkron jeneratörün kontrol sisteminin modellenmesi için gerekli olan matematiksel hesaplar ve denklemler Simulink ortamına aktarılmıştır. Matlab Simulink de oluşturulan modeller ve Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de verilen parametreler sayesinde simülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

ÇBAG'nin ve PI parametreleri Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Stator tarafına göre rotor parametreleri

Frekans	f	50 (HZ)
Anma Stator Gücü	Ps	2e6 (W)
Anma Dönme Hızı	n	1500 (devir/dk)
Anma Stator Gerilimi	Vs	690 (V)
Anma Stator Akımı	Is	1760 (A)
Tork	Tem	12732 (N.m)
Kutup Çifti	p	2
Stator / rotor dönüş oranı	u	1/3
Nominal rotor voltajı	Vr	2070 (V)
Maksimum kayma	smax	1/3
Statora göre anma rotor voltajı	Vr_stator	(Vr*smax)*u (V)
Stator direnci	Rs	2,6e-3 (ohm)
Kaçak endüktans (Stator ve Rotor)	Lsi	0,087e-3 (H)
Mıknatıslanma / Karşılıklı endüktans	Lm	2,5e-3 (H)
Rotor direnci	Rr	2,9e-3 (ohm)
Stator endüktansı	Ls	Lm + Lsi (H)
Rotor endüktansı	Lr	Lm + Lsi (H)
Statora bağlı DC de bus voltajı	Vbus	Vr_stator*sqrt(2) (V)
	sigma	1 - Lm^2/(Ls*Lr)
Stator Akısı (yaklaşık)	Fs	Vs*sqrt(2/3)/(2*pi*f) (Wb)
Eylemsizlik kuvveti	J	127/2
Sürtünme çifti	D	1e-3
	fsw	4e3
	Ts	1/fsw/50

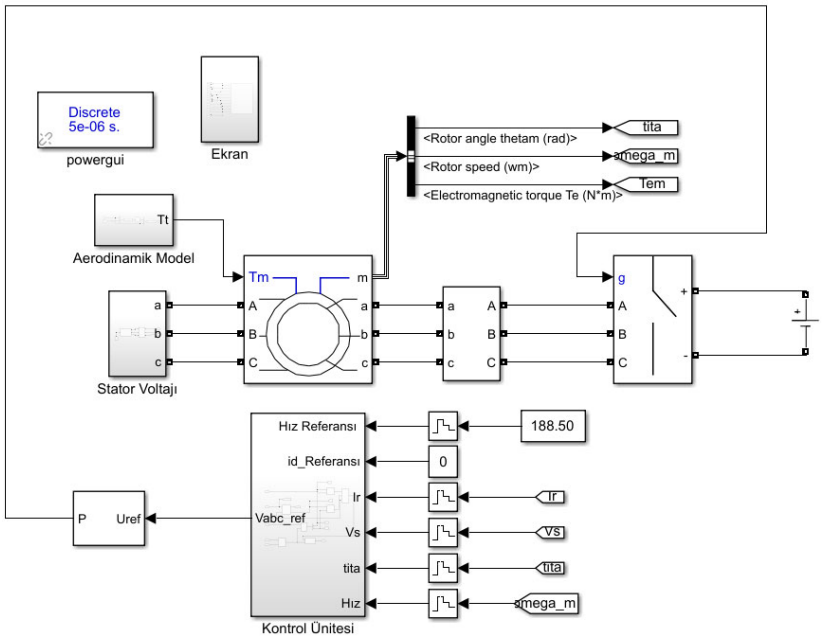
Çizelge 5.2 PI parametreleri

tau_i	(sigma*Lr)/Rr
tau_n	0,005/4
wni	100*(1/tau_i)
wnn	1/tau_n
kp_id	(2*wni*sigma*Lr)-Rr
kp_iq	kp_id
ki_id	(wni^2)*Lr*sigma
ki_iq	ki_id
kp_n	(2*wnn*J)/p
ki_n	((wnn^2)*J)/p

5.2 Matlab Simulink Simülasyonu

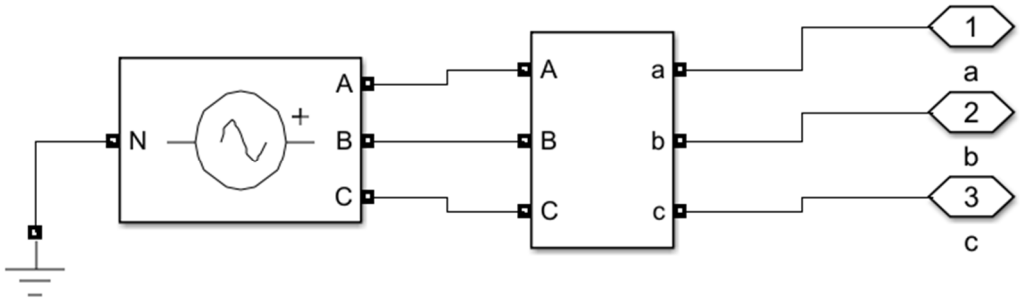
Matlab Simulink tarafından kullanılacak gerekli matematiksel hesaplamalar ve parametreleri Matlab de çift beslemeli asenkron jeneratörün matematiksel denklemlerine göre oluşturulmuştur. Oluşturulan bu parametreler Matlab Simulink tarafından kullanılarak simülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.1'de Matlab Simulink ortamında hazırlanmış çift beslemeli asenkron jeneratörün bağlantıları ve kontrolcü bloğu gösterilmiştir.



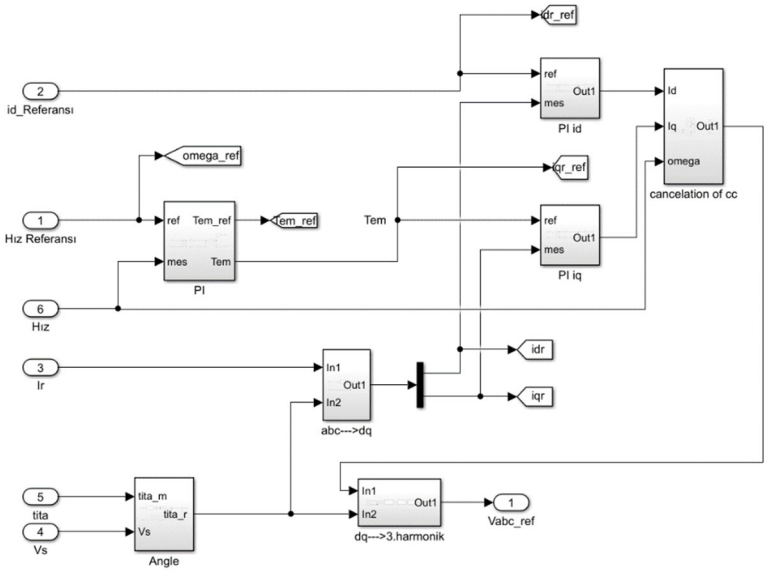
Şekil 5.1 Çift beslemeli asenkron jeneratör Matlab Simulink bağlantı şeması

Şekil 5.1'de gösterilen Matlab Simulink blok şemasında rüzgâr türbinin Aerodinamik bloğu ile modellenmiştir. Ekran bloğu ile simülasyon sonuçları gözlemlenmiştir. Kontrol bloğu içerisinde PI denetleyicisi yardımı ile çift beslemeli asenkron jeneratörünün kontrolü gerçekleştirilmiştir. Stator voltaj bloğu jeneratörün stator kısmındaki gerilimleri ifade etmektedir. Blok içeriği Şekil 5.2'de verilmiştir. Model de kontrol rotor tarafında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2 Stator voltaj bloğu

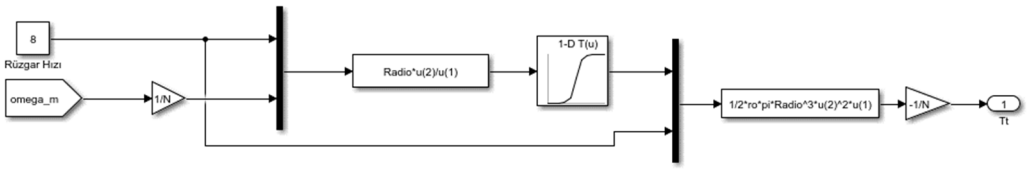
Şekil 5.3'te gösterilen kontrol bloğu verilen referans değerine göre jeneratörden alınan değer PI denetleyicisi ile karşılaştırılarak verilen referans değerinde tutulmaya çalışılmıştır. Yapılan bu çalışma ile önceden belirlenmiş referans değerine göre jeneratörün kontrolü gerçekleşmesi sağlanmıştır.



Şekil 5.3 Kontrol bloğu

Şekil 5.4'te simülasyon için 4MW'lık bir rüzgâr türbin modeli kullanılmıştır. Bu model çıkartılırken dördüncü bölümde yer alan rüzgâr türbini aerodinamik modellenmesindeki

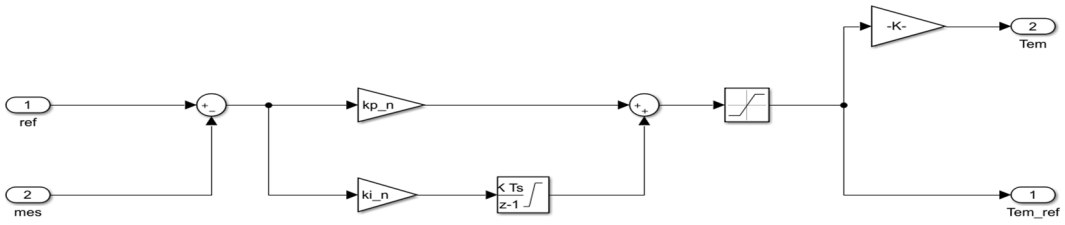
denklemlerden yararlanılmıştır. Girdi olarak rüzgâr hızı sabit olarak alınmıştır. Bir diğer girdi olan omega_m jeneratörden açısal hız çekilmiştir. Girdiler alınarak rüzgâr türbinin aerodinamik modelindeki denklemler yardımı ile oluşturulmuştur. Çıktı değerler jeneratör de kullanılacağı için sonucun negatif ile çarparak asenkron makina modelinde mekanik girişine bağlanmıştır. Bu sayede rüzgâr türbini için model oluşturulmuştur.



Şekil 5.4 Rüzgâr türbini modeli

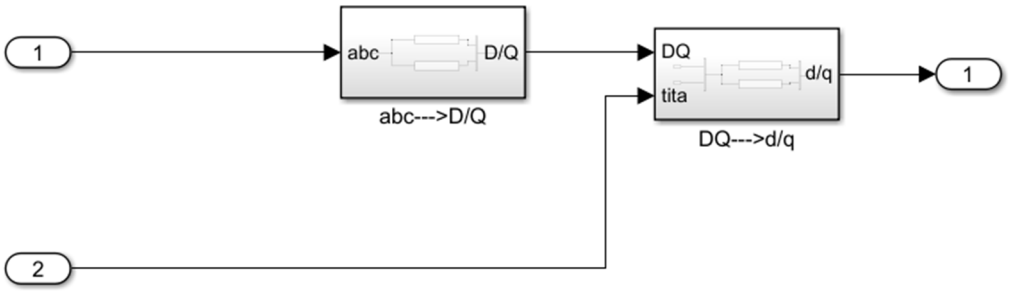
Simülasyonda kullanılan rüzgâr türbini için sabit rüzgâr hızı 8m/sn. olarak ayarlanmıştır. Bu değer Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan rüzgâr atlasına bakılarak ortalama rüzgâr hızı alınmıştır (Anonim 2021). Bu sayede rüzgâr türbini model için gerekli değerler modellenerek simülasyona hazır hale getirilmiştir.

Kontrol bloğu içerisinde PI ve dinamik modellerden oluşmaktadır. PI modeli oluşturulurken Şekil 4.11'de verilen PI regülatörleri ile eşdeğer ikinci derece kapalı döngü akım kontrolü sistemi sayesinde oluşturulmuştur. Oluşturulmuş olan bu model Şekil 5.5'te verilmiştir.



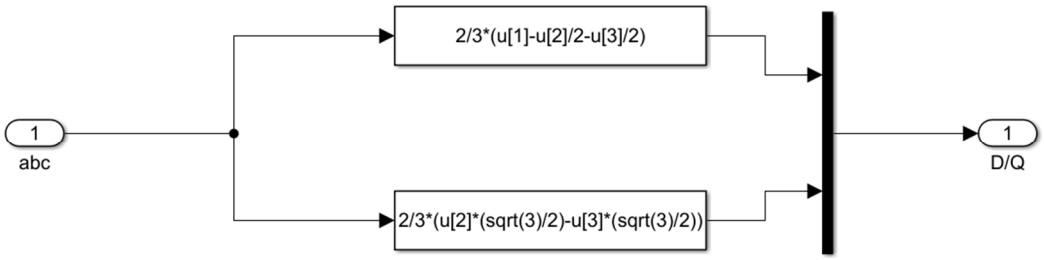
Şekil 5.5 PI kontrol bloğu

Çift beslemeli asenkron jeneratöründe kullanılmış olan dinamik modeller bölüm 4'teki dinamik modellerin oluşturulmasından yararlanılarak oluşturulmuştur. Şekil 5.3'te görünen abc--->dq modeli rotor akımını dinamik modele çevirmekte kullanılmıştır. Bu sayede asenkron jeneratörünün davranışı incelenmesi sağlanmıştır. Şekil 5.6'da dinamik model yapısı verilmiştir.

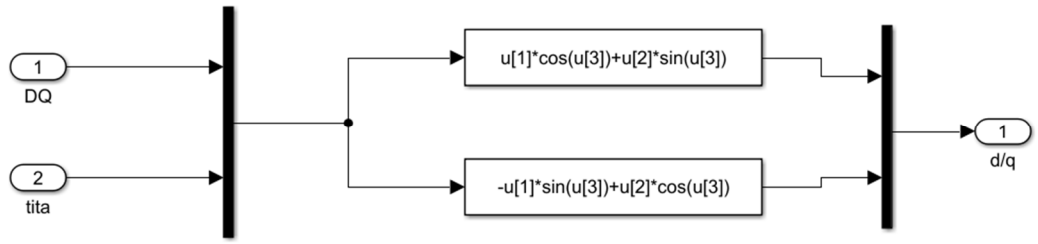


Şekil 5.6 abc dq dönüşümü

Dinamik model yapısında kullanılan abc--->D/Q dönüşümü ve DQ--->d/q dönüşüm modelleri Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 de verilmiştir. Bu dönüşümler sayesinde asenkron jeneratörümüz için rotor akımını dinamik model için dönüştürülmüştür.



Şekil 5.7 abc--->D/Q modeli

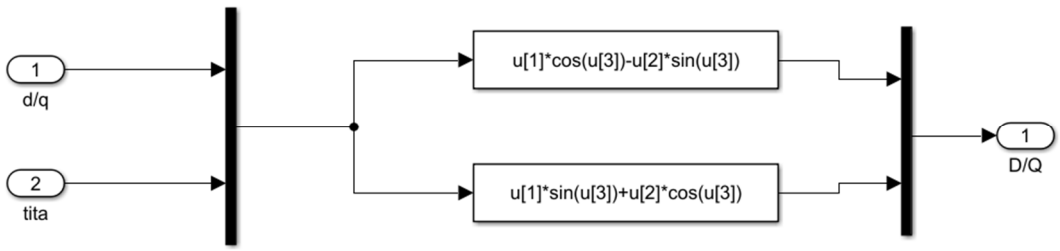


Şekil 5.8 DQ--->d/q modeli

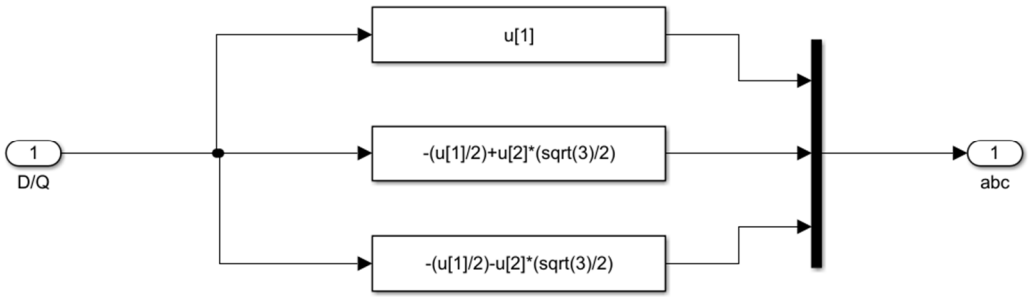
Dq--->3.harmonik dinamik modeli tekrar jeneratör de rotor kısmını kontrol etmek için standart forma çeviren modeldir. Model içerisinde dq--->abc dönüşümü bulunmaktadır. Bu dönüşüm modelleri Şekil 5.9 – Şekil 5.10 arasında verilmiştir.



Şekil 5.9 dq--->3.harmonik



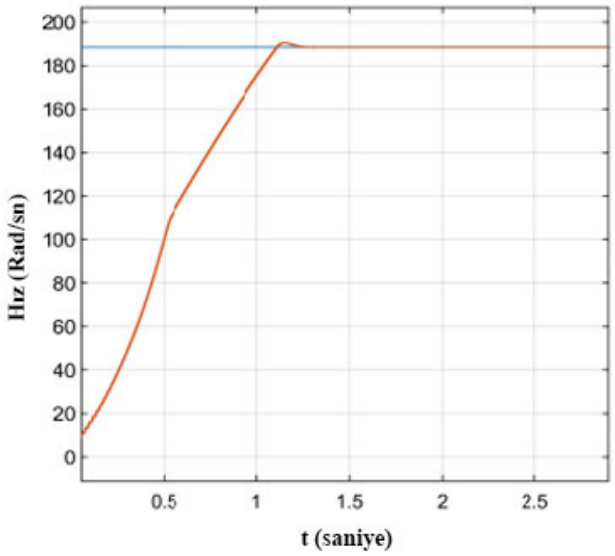
Şekil 5.10 d/q--->DQ



Şekil 5.11 DQ--->abc

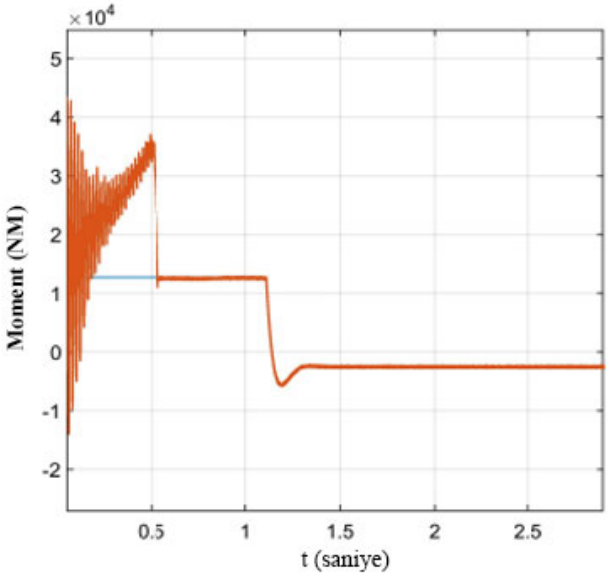
Oluşturulan Matlab Simulink modeli üzerinde kontrol bloğunda yapılan parametre değişiklikleri ile simülasyon sonucundaki ortaya çıkan güç grafiğindeki değişimler izlenmiştir. PI denetleyicisi üzerinde Matlab ortamında kullanılan denklemler den tau(n) fonksiyonu değeri değiştirilerek sonuçlar izlenmiştir. İzlenen bu değişimler ile çift beslemeli asenkron jeneratörünün güç üzerindeki etkisi grafikler ile ifade edilmiştir. PI denetleyicisinde tau(n) fonksiyonun çift beslemeli asenkron jeneratöründeki güç üzerindeki değişimleri üç varyasyon ile Şekil 5.12-Şekil 5.20 aralığında verilmiştir.

Şekil 5.12'de Tau(n) fonksiyonu 0,1 durumu için hız grafiği görülmektedir. Referans değeri 188,5 rad/sn olan referans değerine ulaşması 1,2 saniye sürmüştür. Şekil 5.12'de görüldüğü gibi jeneratör hızı referans değerini geçerek 190 rad/sn değerine kısa bir salınım yaparak referans değerine oturduğu ve kararlı duruma geçtiği görülmektedir.



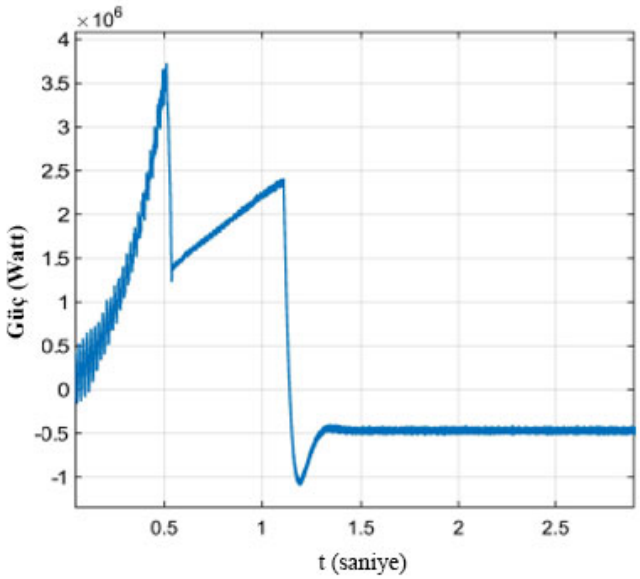
Şekil 5.12 Tau(n)= 0,1/4 Hız grafiği

Şekil 5.13'te Tau(n) fonksiyonu 0,1 için Tork grafiği görülmektedir. Şekil 5.13 incelendiğinde jeneratörün referans değerine ulaştığı 1,2 saniyesinde salınım yaparak jeneratörün kararlı duruma geçtiği görülmektedir.



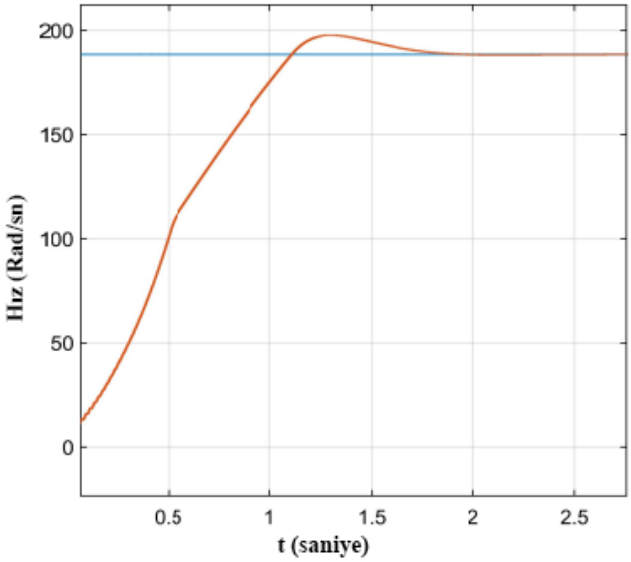
Şekil 5.13 Tau(n)= 0,1/4 Tork grafiği

Şekil 5.14'te Tau(n) fonksiyonu 0,1 için güç grafiği görülmektedir. Şekil 5.14 incelendiğinde jeneratör referans hız değerine ulaştığında kararlı duruma geçerek küçük salınımlar ile karalı durumunu koruduğu görülmektedir.



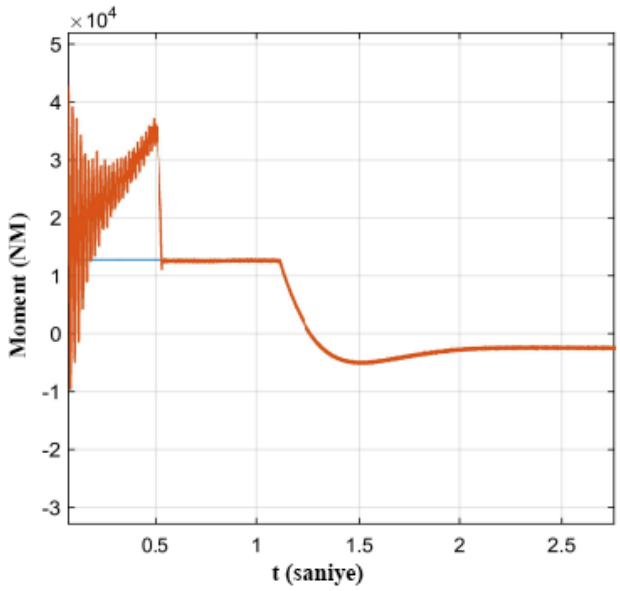
Şekil 5.14 Tau(n)=0,1/4 Güç grafiği

Şekil 5.15'te Tau(n) fonksiyonu 0,5 için hız grafiği görülmektedir. Şekil 5.15 incelendiğinde jeneratörün kontrolcü için girilen referans değerini Şekil 5.12'e göre daha fazla geçtiği yaklaşık 200 rad/sn gelerek yumuşak bir geçiş ile referans değer olan 188,5 rad/sn geldiği görülmektedir. Referans değere gelme süresi 2 saniyeye kadar bulmuştur.



Şekil 5.15 Tau(n)=0,5/4 Hız grafiği

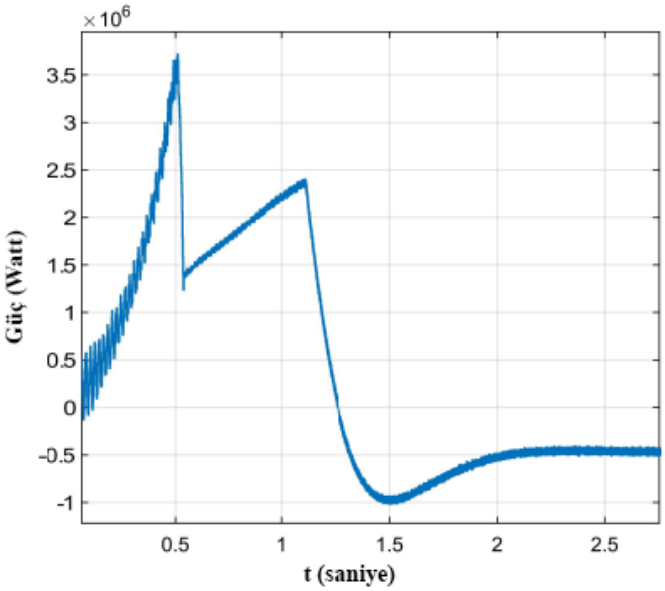
Şekil 5.16'de Tau(n) fonksiyonu 0,5 için Tork grafiği görülmektedir. Şekil 5.16 incelendiğinde Şekil 5.13'e göre daha yumuşak bir geçiş yaptığı görülmektedir.



Şekil 5.16 Tau(n)=0,5/4 Tork grafiği

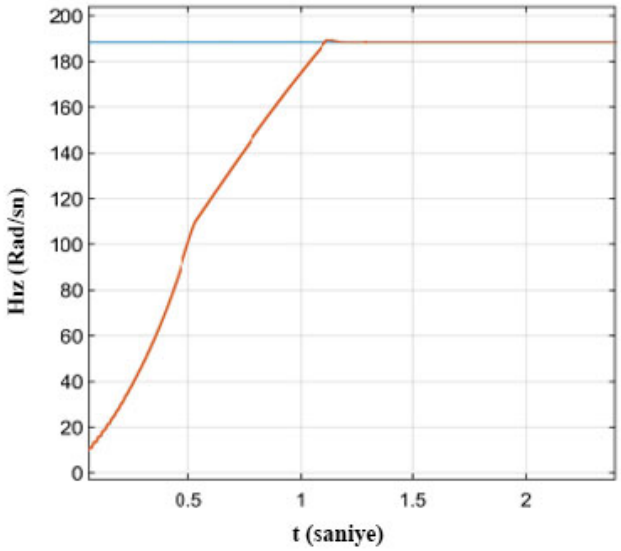
Şekil 5.17'da Tau(n) fonksiyonu 0,5 için güç grafiği görülmektedir. Tau(n) fonksiyonu 0,1 iken oluşan Şekil 5.14'te verilen güç grafiğinde daha keskin yapı izleyen jeneratör durumu Şekil 5.17'da verilmiş olan grafikte daha yumuşak bir geçiş ile kararlı duruma

geldiği görülmektedir. Ayrıca karalı durumda jeneratörün salınım aralığı artığı görülmektedir.



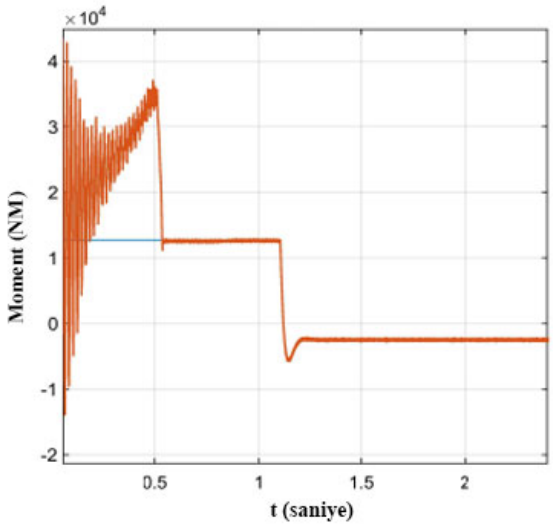
Şekil 5.17 Tau(n)=0,5/4 Güç grafiği

Şekil 5.18'de Tau(n) fonksiyonu 0,05 için hız grafiği görülmektedir. Şekil 5.18 incelendiğinde referans değerine 1,1 saniyede ulaşıldığı görülmektedir. Ayrıca referans değeri olan 188,5 rad/sn yi diğer durumlara göre daha keskin bir yapı izleyerek geldiği ve 190 rad/sn ulaşıp kararlı duruma geçtiği Şekil 5.18'de görülmektedir.



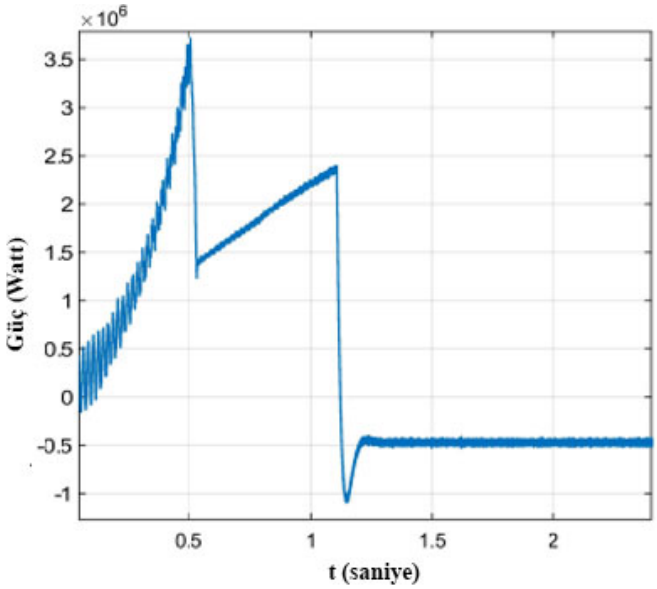
Şekil 5.18 Tau(n)=0,05/4 Hız grafiği

Şekil 5.19'da Tau(n) fonksiyonu 0,05 için Tork grafiği görülmektedir. Grafik incelendiğinde tork grafiğinin diğer durumlara göre daha keskin ve salınımlarının daha kısa olduğu görülmektedir.



Şekil 5.19 Tau(n)=0,05/4 Tork grafiği

Şekil 5.20'de Tau(n) fonksiyonu 0,05 için güç grafiği görülmektedir. Şekil 5.20 incelendiğinde salınım aralarının kısaldığı ve referans değere geçişte daha keskin yapı izlediği görülmektedir.



Şekil 5.20 Tau(n)=0,05/4 Güç grafiği

Yapılan simülasyon sonucunda çift beslemeli asenkron jeneratörün Hız, Tork ve Güç eğrileri Şekil 5.12 ve Şekil 5.20 aralığında verilmiştir. Grafik eğrilerinde sırası ile gözlemlenmiştir.

Tau(n) fonksiyonu 0,5/4 olarak alındığı durum simülasyon gerçekleştirildiğinde Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17 grafikleri oluşmuştur. Tau(n) 0,5/4 durumu için çift beslemeli asenkron jeneratörün güç grafiğine bakıldığında kararlı duruma gelmesin de yumuşak bir yapı izlemiştir. Aynı sekilde Hız ve Tork da 2,2 saniye de kararlı yapıya ulaşmıştır. Ayrıca hız grafiğinde de görüldüğü gibi belirlenen referans hız değeri olan 188,5 rad/sn bu simülasyon da geçilerek 200 ran/sn değerine kadar çıkarak daha sonra referans değerine oturmuştur. Bu gecikmeden dolayı da güç üzerinden jeneratörün kararlı duruma geçmesinde 1 – 1,1 saniyelik gecikmeler yaşandığı grafiklerde görülmüştür.

Tau(n) fonksiyonu 0,05/4 olarak alındığı durum simülasyon gerçekleştirildiğinde Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20 grafikleri oluşmuştur. Simülasyon sonucu 0,5/4 sonuçlarına göre çok daha keskin bir yapı izlemiştir. Şekil 5.20'de verilen güç grafiğine bakıldığında görüldüğü gibi kararlı duruma gelmesi 1,1 saniyede ulaşıldığı görülmektedir. Aynı şekilde hız grafiğine bakıldığında ise referans değeri 188,5 rad/sn'i çok geçmeyip keskin

bir yapı ile maksimum 190 ran/sn çıkarak referans değere daha hızlı bir şekilde geldiği görülmüştür.

Tau(n) fonksiyonu 0,1/4 olarak alındığı durum simülasyon gerçekleştirildiğinde Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 grafikleri oluşmuştur. Grafikler incelendiğinde görüldüğü gibi Tau(n) fonksiyonu 0,05/4 durumuna yakın bir davranış izlemiştir. Tau(n) fonksiyonu 0,05/4 eğrilerine göre biraz daha yumuşak olan geçişler Tau(n) fonksiyonu 0,5/4'e göre daha keskin bir yapı çizdiği görülmüştür.

Bu grafikler incelendiğinde Tau(n) fonksiyonundaki değişimin çift beslemeli asenkron jeneratörün üzerindeki etkisi olduğuna ulaşılmıştır. Grafikler detaylı incelediğinde Tau(n) fonksiyonu 0,5/4 iken jeneratörün kararlı duruma daha yumuşak bir geçişle ulaştığı net bir şekilde görülmüştür. Ayrıca tam kararlı duruma ulaşma süresi 2,2 saniye olduğu görülmüştür. Tau(n) fonksiyonundaki değer azaldığında jeneratör kararlı duruma gelmesinde daha keskin bir yapı izlemiştir ayrıca Jeneratörün tam kararlı duruma gelme süresine 1 saniye daha hızlı ulaştığı görülmüştür.

6. SONUÇ

Son zamanlarda dünya nüfusunun artması, teknolojik ilerleme ve sanayileşme ile enerjiye olan talep önemli ölçüde artmıştır. Ancak iklim değişikliği, enerji ve yüksek kömür, petrol, doğalgaz vb. maden kaynaklarının azalması gibi ekolojik ekonominin gelişmesiyle birlikte yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının bulunması kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisi hem çevreye etkileri hem de enerji üretimi sayesinde öne çıkmaktadır. Rüzgâr türbinleri kontrol yapıları iyileştirilerek enerji üretimindeki verim daha da artırılabilir. Daha stabil çalışan rüzgâr türbinleri ile enerji üretimi daha çok artabilir.

Bu yazıda, çift beslemeli asenkron jeneratör tabanlı değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin kontrolü incelenmiştir. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan jeneratör çeşitleri ve çift beslemeli asenkron jeneratör tabanlı rüzgâr türbini sistemlerinin diğer rüzgâr türbini sistemlerine göre avantajları incelenmiştir. Çift beslemeli asenkron jeneratörünün matematiksel analizi yapılmıştır ve dq eksen grubunun matematiksel modeli ve modeldeki değişkenler oluşturulmuştur.

Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör tabanlı değişken hızlı rüzgâr türbini için kontrol yapısı olarak PI denetleyicisi seçilmiştir. PI denetleyicisinin seçilmesindeki amaç daha stabil yapılarda olması ve genel olarak rüzgâr türbinlerinde iyi performans göstermesinden dolayı tercih edilmiştir.

Bu çalışmada Çift Beslemeli asenkron jeneratörlü rüzgâr türbin modeli Matlab Simulink ortamında tasarlanmıştır. Tasarlanan bu modelde jeneratör olarak çift beslemeli asenkron jeneratör kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda jeneratörün PI denetleyicisi ile kontrolünde tau(n) fonksiyonunun değerlerinin değiştirilmesi sonucu 5. bölümde simülasyon gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucu Şekil 5.12 ve Şekil 5.20 aralığında verilmiş olan grafik eğrilerine göre PI kontrolcü yapısındaki tau(n) fonksiyon değişikliğinin çift beslemeli asenkron jeneratörün üzerindeki etkisi olduğuna ulaşılmıştır. Ulaşılan sonuç eğrilerine göre Tau(n) fonksiyonundaki değer azaldığında jeneratör kararlı duruma daha keskin bir yapı ile ve daha hızlı gelmiştir.

Bu çalışmada kullanılan Matlab komutları Ekler kısmında verilmiştir. Ekler kısmında verilen komutlar bölüm 4'ten yararlanılarak oluşturulmuştur. Matlab komutlarında oluşturulan parametreler 4 MW lık rüzgâr türbini modelinde kullanılan PLL Parametreleri, Mekanik parametreler, PI parametreleri ve rüzgâr türbini aerodinamik model parametreleridir. Bu parametrelerden PI denetleyicisi tarafından kullanılacak olan PI parametreleri tau(n) fonksiyonu bu parametreler içerisinde verilmiştir.

Bu çalışma ile çift beslemeli asenkron jeneratör tabanlı rüzgâr türbinleri için gelecek çalışmalara öncülük ederek PI kontrolör kullanan sistemlerde tau(n) fonksiyonu otomatik kontrolü ile jeneratördeki ani değişikliklerde güç üzerinde daha kararlı yapılara ulaşılabilecektir. Bu sayede PI denetleyici kullanan çift beslemeli asenkron jeneratör tabanlı rüzgâr türbinleri daha stabil hale getirilebilir.

KAYNAKLAR

Abad, G., Lo´pez J., Rodrı´guez, M. A., Marroyo L. and Iwanski G. 2001. Doubly Fed Inductıon Machıne Modelıng And Control For Wınd Energy Generatıon. John Wiley & Sons, 625 p., Canada.

Abu-Rub, H., Malinowski, M. and Al-Haddad, K. 2014. Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications. John Wiley & Sons, 823 p., United Kingdom.

Akyazı, Ö. 2015. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri için Tasarlanan Güç Elektroniği Sisteminin Akıllı Kontrolü. Doktora tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 133 s., Trabzon.

Altuntaşoğlu, Z. T. 2012. Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi, Mevcut Durum, Sorunlar. Mühendis ve Makine Dergisi, 52(617):56-63.

Anonim. 1998. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. Web sitesi. https://mgm.gov.tr/. Erişim Tarihi: 02.10.2021.

Anonymous. 2021. Renewables 2021 Global Status Report, 371 p., Paris.

Apaydın, M., Üstün, A.K., Kurban, M. ve Filik, Ü.B. 2009. Rüzgâr Enerjisinde kullanılan asenkron jeneratörler. Anadolu Üniversitesi İki Eylül Kampüsü, Eskişehir.

Bansal, R.C. 2005. Three-Phase Self Excited Induction Generators: An Overview. IEEE Transactions on Energy Conversion., 20(2): 292-299.

Bayhan, S. 2012. Çift beslemeli asenkron generatör için etkin bir kontrolcü tasarımı. Doktora tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 132 s., Ankara.

Bilgili, M., Ozbek, A., Sahin, B. and Kahraman, A. 2015. An overview of renewable electric power capacity and progress in new technologies in the World. Renewable and Sustainable Energy Reviews., 49(1): 323–334.

Blaabjerg F. and Chen Z. 2006. Power Electronic for Modern Wind Turbines, Synthesis Lectures on Power Electronics. Aalborg University, 68 p., Denmark.

Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D. and Bossanyi, E. 2011. Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, 780 p., United Kingdom.

Cengiz K., Çetin N. ve Er E. 2016. Küçük rüzgâr türbini güç sistemi modellemesi. Küresel Mühendislik Çalışmaları Dergisi., 3(1): 82-92.

Dhanuka, R. 2013. Modelling of doubly fed induction generator based wind türbine. Master Thesis, NIT Rourkela University, 68 p., India.

Durak, M. 2000. Dünya'da ve Türkiye'de Rüzgâr Enerjisinin Durumu. Çevre Teknolojileri Sempozyumu, s.437-444, İstanbul.

Emmanouil, G., Galanis, G., Kalogeri, C., Zodiatis, G. and Kallos, G. 2016. 10-year high resolution study of wind, sea waves and wave energy assessment in the Greek offshore areas. Renewable Energy, 90(1): 399-419.

Galdi, V., Piccolo A. and Siano, P. 2008. Designing an Adaptive Fuzzy Controller for Maximum Wind Energy Extraction. IEE Trans. on Energy conv., 23(2): 559-569.

Hansen, A. D., Sorensen, P., Iov, F. and Blaabjerg, F. 2004. Control of Variable Speed Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generators. Wind Engineering, 28(4): 411-434.

Hansen, L.H., Madsen, P.H., Blaabjerg, F., Christensen, H.C., Lindhard, U. and Eskildsen, K. 2001. Generators and Power Electronics Technology For Wind Turbines. IECON, pp. 2000-2005, USA.

Heier S. 1998. Grid Integrtion of Wind Energy Conversion System 2nd ed. John Wiley and Sons Ltd, pp 106-116, 54-65, 230-245, United Kindom.

Hui-qun, Y., Yang, G. and Hao, Z. 2014. Fuzzy self-adaptive PID control of the variable speed constant frequency variable-pitch wind turbine system. In System Science and Engineering (ICSSE). 2014 IEEE International Conference, pp. 124-127, China.

Islam M.R., Mekhilef S. and Saidur R. 2013. Progress and recent trends of wind energy technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews., 21(1): 456-468.

Kaldellis J.K. and Zafirakis D. 2011. The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. Renewable Energy, 36(1): 1887-1901.

Karadağ, H. İ. 2009. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Rüzgâr Enerjisinin Önemi ve Rüzgâr Türbini Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 144 s., İstanbul.

Kassem, A. M., Hasaneen, K. M. and Yousef, A. M. 2013. Dynamic modeling and robust power control of DFIG driven by wind turbine at infinite grid. Int. J. Electr. Power Energy Syst., 44(1): 375–382.

Lekhchine, S., Bahi, T., Abadlia, I., Layate, Z. and Bouzeria, H. 2015. Speed control of doubly fed ınduction motor. Energy Procedia., 74(1): 575–586.

Marques, J., Pinheiro, H., Gründling, A., Pinheiro, J.R. and Hey, H.L. 2003. A Survey on Variable-Speed Wind Turbine System. Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência - COBEP'03., 1(1):732-738, Fortaleza, Brazil.

Mashaly, H. M., Sharaf, A. M., El-Sttar, A.A. and Mansour, M. M. 1994. Implementation of Fuzzy Logic Controller for Wind Energy Induction Generator D.C. Link Scheme. 3rd IEEE-CCA, pp. 978-982, USA.

Miki, I., Nagai, N., Nishiyama, S., and Yamada, T. 1991. Vector control of induction motor with fuzzy PI controller. Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1991 IEEE, pp. 341–346.

Muller, S., Deicke, M. and De Doncker, R. W. 2002. Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines. IEEE Industry Applications Magazine, 8(3): 26-33.

Musial, W. and Ram, B. 2010. Large-Scale Offshore Wind Power in the United States. U.S. National Renewable Energy Laboratory, 240 p., USA.

Nicolás, C.V., Lafoz, M. and Iglesias, J. 2002. Guidelines For the Design and Control of Electrical Generator Systems for New Grid Connected Wind Turbine Generator. IECON, pp. 3317-3325, Spain.

Patel, M.R. 1999. Wind and Solar Power Systems. CRC Press, Boca Raton, 350 p., London, New York, Washington.

Pena, R., Clare, J. C. and Asher, G. N. 1996. Doubly Fed Induction Generator Using back-to-back PWM Converters and its Application to Variable-Speed Wind-Energy Generation. IEE Proceedings on Electric Power Applications, 143(3): 231-241.

Petersson A. 2005. Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for wind Turbines, PHD thesis, Chalmers University of Technology, 165 p., Göteborg, İsveç.

Poitiers, F., Bouaouiche, T. and Machmoum, M. 2009. Advanced control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion. Electr. Power Syst. Res., 79(7): 1085–1096.

Şenel M. C. ve Koç E. 2015. Dünyada ve Türkiye'de rüzgâr enerjisi durumu-genel değerlendirme. Mühendis ve Makine Dergisi, 56(663): 46-56.

Ushiyama, I. and Nagai, H., 1988. Optimum Design Configurations and Performance of Savonius Rotors. Wind Engineering, 12(1): 59-75.

Wikipedia. Web sitesi. https://tr.wikipedia.org/wiki/Hammurabi. Erişim Tarihi: 20.04.2021

Wu, F., Zhang, X.-P., Godfrey, K. and Ju, P. 2006. Modeling and control of wind turbine with doubly fed induction generator. Power Systems Conference and Exposition, pp. 1404–1409.

Zhang, H. and Wang, Z. 2009. Study on modeling and simulation of double-fed induction wind power generator control system. 1st International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, pp. 1-5.

EKLER

EK 1. PLL Parametreleri

EK 2. Mekanik Parametreler

EK 3. PI Parametreleri

EK 4. Rüzgâr Türbini Parametreleri

EK 1. PLL Parametreleri

```
f = 50;                          % Stator Frekansı (Hz)
Ps = 2e6;                        % Anma stator gücü (W)
n = 1500;                        % Anma dönüş hızı (rev/min)
Vs = 690;                        % Anma stator gerilimi (V)
Is = 1760;                       % Anma stator akımı (A)
Tem = 12732;                     %Tork (N.m)
p=2;                             % Kutup çifti
u = 1/3;                         % Stator/rotor dönüş oranı
Vr = 2070;                       % Nominal rotor voltajı (V)
smax = 1/3;                      % Maksimum kayma
Vr_stator = (Vr*smax)*u;         % Stator için belirtilen nominal rotor voltajı (V)
Rs = 2.6e-3;                     % Stator direnci (ohm)
Lsi = 0.087e-3;                  % Kaçak endüktans (stator ve rotor) (H)
Lm = 2.5e-3;                     % Mıknatıslanma / Karşılıklı endüktans (H)
Rr = 2.9e-3;                     % Statora atıfta bulunulan rotor direnci (ohm)
Ls = Lm + Lsi;                   % Stator endüktansı (H)
Lr = Lm + Lsi;                   % Rotor endüktansı (H)
Vbus = Vr_stator*sqrt(2);        % Stator için belirtilen DC de bus gerilimi (V)
sigma = 1 - Lm^2/(Ls*Lr);
Fs = Vs*sqrt(2/3)/(2*pi*f);      % Stator Akı (yaklaşık) (Wb)
```

EK 2. Mekanik Parametreler

```
J = 127;                % Atalet kuvveti
D = 1e-3;               % Sürtünme çifti
fsw = 4e3;
Ts = 1/fsw/50;
```

EK 3. PI Parametreleri

```
tau_i = (sigma*Lr)/Rr;

tau_n = 0.1/4  ;

wni = 100*(1/tau_i);

wnn = 1/tau_n;

kp_id = (2*wni*sigma*Lr)-Rr;

kp_iq = kp_id;

ki_id = (wni^2)*Lr*sigma;

ki_iq = ki_id;

kp_n = (2*wnn*J)/p;

ki_n =((wnn^2)*J)/p;

N = 100;

Radio = 42;

ro = 1.225;

beta = 0;

ind2 = 1;

for lambda=0.1:0.01:11.8

lambdai(ind2) = (1./((1./(lambda-0.02.*beta)+(0.003./(beta^3+1)))));

 Cp(ind2) = 0.73.*(151./lambdai(ind2)-0.58.*beta-0.002.*beta^2.14-13.2).*(exp(-
18.4./lambdai(ind2)));
 Ct(ind2)=Cp(ind2)/lambda;

ind2=ind2+1;
end
tab_lambda = [0.1:0.01:11.8];
```

EK 4. Rüzgâr Türbini Parametreleri

```
Cp_max = 0.44;
lambda_opt = 7.2;
Kopt = ((0.5*ro*pi*(Radio^5)*Cp_max)/(lambda_opt^3));
% Power curve in fucntion of wind speed
P = 1.0e+06 * [0,0,0,0,0,0,0,0.0472,0.1097,0.1815,0.2568,0.3418,...
      0.4437,0.5642,0.7046,0.8667,1.0518,1.2616,1.4976,1.7613,2.0534,...
      2.3513,2.4024,2.4024,2.4024,2.4024,2.4024,2.4024];
V = [0.0000,0.5556,1.1111,1.6667,2.2222,2.7778,3.3333,3.8889,4.4444,...
   5.0000,5.5556,6.1111,6.6667,7.2222,7.7778,8.3333,8.8889,9.4444,...
   10.0000,10.5556,11.1111,11.6667,12.2222,12.7778,13.3333,13.8889,...
   14.4444,15.0000];
```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı ve Soyadı : Muhittin Enes KALE

Eğitim

Yüksek Lisans	Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı	2018-Halen
Lisans	Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2014-2018
Önlisans	Çankırı Karatekin Üniversitesi Meslek Yüksekokulu Elektronik Haberleşme Teknolojileri	2011-2013

İş Deneyimi

Yıl	**Kurum**	**Görev**
2020-2022	Raptor Teknoloji ve Mühendislik	Yazılım Mühendisi
2022-Halen	Raptor Teknoloji ve Mühendislik	Müdür