

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



**ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN PI VE  
ADAPTİF KAYAN KİP GÜÇ KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HARİS ÇALGAN**

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2016**

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



**ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN PI VE**  
**ADAPTİF KAYAN KİP GÜÇ KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HARİS ÇALGAN**

**Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Metin DEMİRTAŞ (Tez Danışmanı)**

**Yrd. Doç. Dr. Bayram ESEN**

**Yrd. Doç. Dr. Tarık KUNDURACI**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

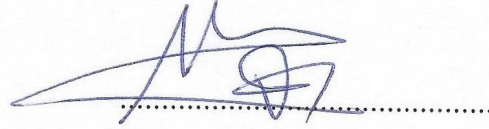
**Haris ÇALGAN** tarafından hazırlanan “**ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN PI ve ADAPTİF KAYAN KİP GÜÇ KONTROLÜ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 24.06.2016 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

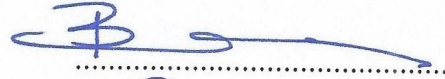
Danışman

Doç. Dr. Metin DEMİRTAŞ



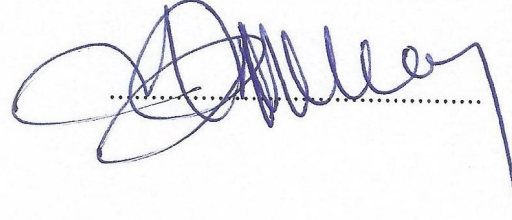
Üye

Yrd. Doç. Dr. Bayram ESEN



Üye

Yrd. Doç. Dr. Tarık KUNDURACI



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

**Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2016/141 nolu proje ile desteklenmiştir.**

## ÖZET

**ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN PI VE ADAPTİF KAYAN  
KİP GÜÇ KONTROLÜ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
HARİS ÇALGAN  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. METİN DEMİRTAŞ)  
BALIKESİR, HAZİRAN - 2016**

Değişken hızlı generatör çeşitlerinden biri olan çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG), zamanla azalan dönüştürücü maliyetleri, farklı rüzgâr hızlarında çalışabilme, birim güç faktörü kontrolü gibi avantajlarından dolayı rüzgâr türbinlerinde çokça tercih edilmektedir. Kullanılan generatörün performansı hem verimlilik, hem de istenen güç kalitesi açısından çok önemlidir. Dolayısıyla generatörün kontrolü türbin sistemlerinde büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmada ÇBAG'nin PI ve Adaptif Kayan Kip Kontrol ile güç kontrolü yapılmıştır.

Tezin giriş bölümünde, rüzgâr enerji dönüşüm sistemleri incelenmiştir. Rüzgârdan elde edilen aerodinamik enerjinin ifadeleri ve güç katsayısı hakkında bilgi verilmiştir. Rüzgâr türbini çeşitleri verilmiş, avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Türbinlerde kullanılan ÇBAG'nin özelliklerine vurgu yapılmıştır.

Tezin gelişme bölümünde, ÇBAG'nin dinamik davranışı ele alınarak matematiksel modeli çıkarılmıştır. Bu modele göre eşdeğer devresi elde edilmiştir. Eşdeğer devreye göre generatörün d-q eksen takımındaki aktif-reaktif güç denklemleri, mekanik ve elektromanyetik tork denklemleri ve hız denklemleri çıkarılmıştır. Stator akı yönlendirmesi yöntemiyle generatörün dolaylı ve dolaysız kontrolü hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca istenen aktif ve reaktif güç değerleri için referans rotor akımları elde edilmiştir. Kontrol sistemlerinin temel kavramları ve çeşitlerinden bahsedilerek, orantı, integral ve türev kontrol (PID) ile kayan kip kontrol (KKK) yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

Tezin son bölümünde, yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. LabVIEW ortamında simülasyon düzeneği oluşturulmuştur. ÇBAG'nin kontrolünde, çatırtı problemini gidermek için adaptif kayan kip kontrolör (AKKK) tasarımı ve simülasyonu yapılmıştır. Karşılaştırmalar sonucu AKKK yönteminde çatırtıların giderildiği, rotor uç gerilimleri kontrol edilerek, çıkış gücündeki dalgalanmaların azaldığı görülmüştür. AKKK'nin PI kontrolöre göre daha iyi bir performans gösterdiği gözlenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Adaptif kayan kip kontrol, aktif ve reaktif güç kontrolü, çift beslemeli asenkron generatör, LabVIEW, modelleme, PI kontrol, rüzgâr türbin sistemleri.

## **ABSTRACT**

### **PI AND ADAPTIVE SLIDING MODE POWER CONTROL OF DOUBLE FED INDUCTION GENERATOR**

**MSC THESIS**

**HARİS ÇALGAN**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING  
(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. METİN DEMİRTAŞ)**

**BALIKESİR, JUNE 2016**

Doubly fed induction generator (DFIG) which is variable speed generator type is much preferred in turbines because of its advantages such as reducing costs of converters, operating in different wind speed, controlling of unit power factor. The performance of the generator is very important in terms of both power quality and efficiency. Therefore, control of generator has a great importance in turbine systems. In this study, power of DFIG is controlled with PI and adaptive sliding mode control.

In the introduction of the thesis, wind energy conversion systems are investigated. The information about equation of aerodynamic power obtained from wind and power coefficient are given. Types of wind turbines, advantages and disadvantages of them are examined. Features of DFIG using in turbines are highlighted.

In the advances section of the thesis, mathematical models of the DFIG are extracted by considering dynamic behavior. According to this model, equivalent circuit is obtained. In the d-q reference frame, active-reactive power, torque and speed equations are examined by using this circuit. The information about direct and indirect control of the generator using stator flux orientation method is given. Moreover, for the desired active and reactive power values, reference rotor currents are obtained. By mentioning about basic concepts and types of control systems, information about proportional, integral and derivative control (PID) method and sliding mode control (SMC) method are given.

In the last section of the thesis, studies are mentioned. Simulation is created in LabVIEW environment. To eliminate the chattering problem in controlling of the DFIG, designing and simulation of adaptive sliding mode control (ASMC) are done. Comparative studies show that ASMC method eliminates chattering problem, and fluctuations on the output power are decreased by controlling rotor terminal voltages. It is observed that ASMC has shown better performance according to PI controller.

**KEYWORDS:** Active and reactive power control, adaptive sliding mode control, double fed induction generator, LabVIEW, modelling, PI control, wind turbine systems.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>iv</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. RÜZGÂR ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ</b> .....	<b>11</b>
2.1 Rüzgâr Enerjisi .....	11
2.2 Rüzgâr Türbin Sistemleri .....	13
2.2.1 Rüzgâr Türbin Çeşitleri .....	14
<b>3. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN MODELLENMESİ</b> .....	<b>18</b>
3.1 Çift Beslemeli Asenkron Generatör .....	18
3.2 Çift Beslemeli Asenkron Generatörün Matematiksel Modeli .....	20
<b>4. KONTROL SİSTEMLERİ</b> .....	<b>25</b>
4.1 Kontrol Sistemleri Temel Kavramları .....	25
4.2 Kontrol Sistemleri Çeşitleri .....	26
4.2.1 Açık Döngü Kontrol Sistemleri .....	26
4.2.2 Kapalı Döngü Kontrol Sistemleri .....	27
4.3 Orantı, İntegral ve Türev Kontrol.....	30
4.4 Kayan Kip Kontrol .....	31
4.4.1 Kayan Kip Kontrolüne Giriş.....	32
4.4.2 Kayan Kip Kontrolör Tasarımı .....	33
<b>5. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN KONTROLÜ</b> .....	<b>35</b>
5.1 Referans Düzlemi .....	35
5.2 Asenkron Generatörün Kontrolü .....	36
5.2.1 Rotor Tarafı Dönüştürücü Kontrolü .....	37
5.2.2 Doğrudan ve Dolaylı Vektör Kontrol .....	40
<b>6. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI</b> .....	<b>42</b>
6.1 LabVIEW Programının Yapısı .....	42
6.2 Simülasyon Düzenineğinin Oluşturulması .....	43
6.3 Adaptif Kayan Kip Kontrol ile ÇBAG'nin Aktif-Reaktif Güç Kontrolü .....	46
6.4 PI Kontrol ile ÇBAG'nin Aktif-Reaktif Güç Kontrolü.....	51
6.5 Simülasyon Sonuçları .....	51
6.5.1 Maksimum Güç Noktası Takipli Sistem.....	53
6.5.2 Maksimum Güç Noktası Takipsiz Sistem .....	63
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>71</b>
<b>8. KAYNAKLAR</b> .....	<b>73</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Rüzgâr türbin sisteminin genel yapısı. ....	13
Şekil 2.2: Asenkron (indüksiyon) generatörlü sabit hızlı rüzgâr türbini. ....	15
Şekil 2.3: Değişken hızlı rüzgâr türbin sisteminin yapısı. ....	16
Şekil 3.1: ÇBAG'li rüzgâr türbin sistemi blok diyagramı. ....	19
Şekil 3.2: ÇBAG'nin d-q eksen takımındaki eşdeğer devresi. ....	23
Şekil 4.1: Basit kontrol sistemi. ....	26
Şekil 4.2: Açık döngü kontrol sistemi blok diyagramı. ....	26
Şekil 4.3: Kapalı döngü kontrol sistemi blok diyagramı. ....	27
Şekil 4.4: Doğrusal kontrol sisteminin birim basamak cevabı. ....	30
Şekil 4.5: PID kontrollü sistemin blok diyagramı. ....	31
Şekil 5.1: Şebeke gerilimi ve stator akısı vektör diyagramı. ....	35
Şekil 5.2: Rotor tarafı dönüştürücü kontrolünün blok diyagramı. ....	38
Şekil 5.3: Aktif ve reaktif güç kontrolörleri. ....	38
Şekil 5.4: Akım kontrolörünün blok diyagramı. ....	40
Şekil 5.5: Doğrudan ve dolaylı vektör kontrol yönteminin esasları. ....	41
Şekil 6.1: Rüzgâr enerji dönüşüm sistemi LabVIEW ön panelinin görünümü. ....	43
Şekil 6.2: Rüzgâr enerji dönüşüm sistemi LabVIEW blok diyagramı. ....	44
Şekil 6.3: LabVIEW'de PI kontrolör ile açığa kontrol sistemi. ....	45
Şekil 6.4: Rüzgâr türbin bloğu. ....	45
Şekil 6.5: ÇBAG'nin AKKK'li kontrol blok diyagramı. ....	50
Şekil 6.6: ÇBAG'nin PI ile aktif-reaktif güç kontrolü. ....	51
Şekil 6.7: Rüzgâr hızının basamak değişimi. ....	53
Şekil 6.8: Kanat ucu hız oranı değişimi. ....	53
Şekil 6.9: Basamak değişimli rüzgâr hızındaki generatör hızı. ....	54
Şekil 6.10: Basamak değişimli rüzgâr hızındaki MGNT'den el edilen referans aktif güç değişimleri. ....	55
Şekil 6.11: Basamak değişimli rüzgâr hızındaki referans rotor akımları q bileşenleri. ....	56
Şekil 6.12: Basamak değişimli rüzgâr hızındaki rotor uç gerilimleri q bileşenleri. ....	57
Şekil 6.13: Basamak değişimli rüzgâr hızındaki aktif güç değerleri. ....	58
Şekil 6.14: Türbülanslı rüzgâr hızı. ....	59
Şekil 6.15: Türbülanslı rüzgârda kanat uç hızı oranı. ....	59
Şekil 6.16: Türbülanslı rüzgârda generatör hızı. ....	60
Şekil 6.17: Türbülanslı rüzgârda referans aktif güç değeri. ....	60
Şekil 6.18: Türbülanslı rüzgârda referans rotor akımları q bileşenleri. ....	61
Şekil 6.19: Türbülanslı rüzgârda rotor uç gerilimleri q bileşenleri. ....	62
Şekil 6.20: Türbülanslı rüzgârda aktif güç değerleri. ....	63
Şekil 6.21: Rotor uç gerilimlerinin kontrol edildiği sistem. ....	64
Şekil 6.22: KKKK ile aktif güç kontrolü. ....	65
Şekil 6.23: AKKK ile aktif güç kontrolü. ....	66
Şekil 6.24: KKKK ile reaktif güç kontrolü. ....	67
Şekil 6.25: AKKK ile reaktif güç kontrolü. ....	68
Şekil 6.26: AKKK'lı sistemin rotor akımları (a fazı). ....	69
Şekil 6.27: PI kontrolör ile aktif güç kontrolü. ....	69
Şekil 6.28: PI kontrolör ile reaktif güç kontrolü. ....	70



## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 6.1:</b> Türbin özellikleri .....	52
<b>Tablo 6.2:</b> Kullanılan türbin baz değerleri .....	52
<b>Tablo 6.3:</b> ÇBAG'nin parametreleri ve değerleri.....	52

## SEMBOL LİSTESİ

$m$	:	Rüzgar kütlesi
$v$	:	Rüzgar hızı
$P$	:	Rüzgârın gücü
$E$	:	Rüzgar kinetik enerjisi
$\rho$	:	Havanın yoğunluğu
$A$	:	Türbin alanı
$C_p$	:	Maksimum güç katsayısı
$w_s$	:	Stator açısal hızı
$w_m$	:	Mekaniksel hız
$w_r$	:	Rotor açısal hızı
$V_r$	:	Rotor uç gerilimi
$f_r$	:	Rotor frekansı
$V_s$	:	Stator gerilimi
$f_s$	:	Stator frekansı
$P_s$	:	Stator aktif gücü
$Q_s$	:	Stator reaktif gücü
$P_r$	:	Rotor aktif gücü
$g$	:	Kayma
$v_{sa,b,c}$	:	Stator faz gerilimleri
$v_{ra,b,c}$	:	Rotor faz gerilimleri
$i_{sa,b,c}$	:	Stator faz akımları
$i_{ra,b,c}$	:	Rotor faz akımları
$R_s$	:	Stator sargı dirençleri
$R_r$	:	Rotor sargı dirençleri
$\psi_{sa,b,c}$	:	Stator faz sargı akıları
$\psi_{ra,b,c}$	:	Rotor faz sargı akıları
$L_s$	:	Stator sargı endüktansı
$L_r$	:	Rotor sargı endüktansı
$L_m$	:	Stator ve rotor arasındaki ortak endüktans
$T_m$	:	Mekanik tork
$T_{em}$	:	Elektromanyetik tork
$F$	:	Viskoz sürtünme katsayısı
$V_{sd}, V_{sq}$	:	Stator geriliminin d-q bileşenleri
$V_{rd}, V_{rq}$	:	Rotor geriliminin d-q bileşenleri
$J$	:	Motor dönme atalet momenti
$\theta_r$	:	Rotor açısı
$\psi_{sd}, \psi_{sq}$	:	Stator akısının d-q bileşenleri
$\psi_{rd}, \psi_{rq}$	:	Rotor akısının d-q bileşenleri
$I_{sd}, I_{sq}$	:	Stator akımının d-q bileşenleri
$I_{rd}, I_{rq}$	:	Rotor akımının d-q bileşenleri
$E_s$	:	Şebeke gerilimi
$\psi_s$	:	Şebeke akısı
$I_{rq\_ref}$	:	Rotor akımının q bileşeni referans değeri
$I_{rd\_ref}$	:	Rotor akımının d bileşeni referans değeri
$P_{s\_ref}$	:	Stator aktif gücü referans değeri

$Q_{s\_ref}$	:	Stator reaktif gücü referans değeri
$e_d, e_q$	:	d-q eksen kuplaj gerilimleri
$e_f$	:	Rotora bağlı elektromotor kuvveti
$s$	:	Kayma yüzeyi
$u$	:	Kontrol işareti
$u_{eq}$	:	Eşdeğer kontrol parçası
$u_n$	:	Doğrusal olmayan kontrol parçası
<b>sgn</b>	:	Signum fonksiyonu
$n$	:	Kayma yüzeyi derecesi
$e_{1,2,3,4}$	:	Hata değerleri
$\Upsilon_{1,2,3,4}$	:	Ayarlanabilir kazanç katsayısı
$a_{1,2,3,4}$	:	Adaptasyon kazancı

## KISALTMALAR LİSTESİ

<b>AC</b>	:	Alternatif akım
<b>AKKK</b>	:	Adaptif kayan kip kontrolör
<b>ÇBAG</b>	:	Çift beslemeli asenkron generatör
<b>DC</b>	:	Doğru akım
<b>DGM</b>	:	Darbe genişlik modülasyonu
<b>KHO</b>	:	Kanat uç hızı oranı
<b>KKK</b>	:	Kayan kip kontrol
<b>KKKK</b>	:	Klasik kayan kip kontrolör
<b>MGNT</b>	:	Maksimum güç noktası takip
<b>RTD</b>	:	Rotor tarafı dönüştürücü
<b>ŞTD</b>	:	Şebeke tarafı dönüştürücü

## ÖNSÖZ

Tez çalışmamın gelişimi boyunca destekleriyle yanımda olan, emek ve bilgilerini benden esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Metin DEMİRTAŞ'a; manevi olarak yanımda olan eşim Elif ÇALGAN'a, babam Muhammet ÇALGAN'a, annem Fatma ÇALGAN'a, erkek kardeşim Hanifi ÇALGAN'a, kız kardeşim İsra ÇALGAN'a; projenin desteklenmesinde maddi katkı sağlayan Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne, ve öğrenim hayatım boyunca 2210-A genel yurtiçi lisansüstü burs programı kapsamında vermiş olduğu destekten dolayı TÜBİTAK' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

# 1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynakları, petrol kaynaklarının tüketiminin artması, enerji fiyatlarındaki yükselme, çevresel sorunlar göz önüne alındığında, son dönemlerde ilgi odağı haline gelmiştir. Özellikle önümüzdeki yıllarda, küresel enerji kullanımına bakıldığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji ekonomisinde büyük bir rolü olacağı öngörülmektedir. Global enerji üretiminin 2025 yılında iki katına çıkacağı, 2050 yılında ise üç katına çıkacağı uzmanlar tarafından bildirilmektedir. Enerji üretiminde, yenilenebilir enerji kaynaklarının oranına bakıldığında, 2025 yılında toplam üretimin %60 oranında olacağı tahmin edilmektedir. Böylece, sürekliliğe sahip, hiç bitmeyecek kaynak olarak görülen yenilenebilir enerji kaynaklarının, dünyanın kontrolsüz bir şekilde artan enerji ihtiyacını, ekonomik bir şekilde karşılaması beklenmektedir [1].

Evrensel kirliliğin büyümesi ve kullanılan petrol kaynaklarının bitecek olmasından dolayı birçok ülke, rüzgâr türbini, güneş enerjisi, küçük hidro-elektrik santrallerin kurulumu gibi yenilenebilir enerji planlarını uygulamaya başlamıştır. Diğer enerji kaynaklarıyla karşılaştırıldığında rüzgâr enerjisinin dünya çapında, enerji üretim sistemlerindeki varlığının giderek çoğaldığı görülmektedir. Diğer enerji üretim sistemlerinin aksine, rüzgâr türbinlerinin sık sık bakım görmemesi, devamlı personel çalışmaması, şebekeden bağımsız çalışabilmesi, kurulumunun ev, işyerleri veya ticari yapıları tehlikeye atmaması, çevre kirliliğine sebep olmaması, düşük maliyetli enerji üretimini sağlaması vb. sebeplerden ötürü yenilenebilir enerji kaynakları arasında popüleriteye sahip rüzgâr türbin sistemlerinin elektrik enerjisi üretimindeki payı gün geçtikçe artmaktadır.

Rüzgâr türbinleri, sabit hızlı (%1 rüzgâr hızı değişimi) ve değişken hızlı olmak üzere iki çeşit çalışma koşuluna sahiptir. Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılan asenkron generatör, doğrudan şebekeye bağlanır. Şebeke frekansı, kontrol edilemeyen bu hıza eşit olduğundan dolayı, rüzgâr hızındaki değişimler enerji olarak depolanamamaktadır. Bu yüzden rüzgârdaki bu türbülanslar, güç dalgalanmalarına sebep olmakta, dolayısıyla şebekenin güç kalitesine etki etmektedir. Generatörün güç

elektronik birimiyle kontrol edildiği değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde, rotor hızının kontrolü mümkün olduğundan dolayı, rüzgâr değişimlerinden kaynaklanan güç dalgalanmaları rotor hızı değiştirilerek giderilebilir. Böylece, rüzgâr dönüşümünden ve güç aktarım ünitesinden kaynaklanan güç dalgalanmaları azaltılabilir. Sonuç olarak, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin güç kalitesine olan etkisi, sabit hızlı rüzgâr türbinlerine oranla geliştirilebilir [2].

Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG), farklı hızlarda çalışabilir olması, dört bölgeli aktif-reaktif güç kabiliyeti, düşük dönüştürücü maliyetleri gibi avantajlarından dolayı son dönemlerde modern rüzgâr türbin sistemlerinde tercih edilmeye başlanmıştır. ÇBAG’de sabit hızlı asenkron generatörlere ve senkron generatörlere göre daha düşük güç kayıpları görülmektedir. ÇBAG’nin statoru şebekeye doğrudan bağlanıp, rotor sargıları ise stator terminallerinden kontrollü gerilim kaynaklı dönüştürücüler sayesinde geri beslenmektedir. Bu dönüştürücüler, ÇBAG’ye uyarım akımı vermektedir, bu yüzden kapasiteleri ÇBAG’nin toplam kapasitesinin %20-%25 kadarlık bir miktarına denk gelmektedir.

ÇBAG’nin türbin sistemlerinde kullanımının en önemli nedenleri arasında, yüksek enerji getirisi, mekanik yüklerin azalımı, daha kolay açı kontrol sisteminin uygulanabilirliği, aktif ve reaktif gücün geniş çaplı kontrolü ve çıkış gücündeki dalgalanmaların giderilmiş olmasıdır. Ancak, ÇBAG’nin performansı sadece asenkron makinaya bağlı olmayıp, aynı zamanda generatöre uygulanan d-q vektör kontrol yöntemine de bağlıdır. ÇBAG’de genellikle stator-akı ve stator-gerilim alan yönlendirmesi kullanılmaktadır. Stator-akı yönlendirmeli yöntem aktif-reaktif güç kontrolünde en çok kullanılan yöntemdir. Kapalı döngü d-q vektör kontrolüyle, ÇBAG’nin senkron hızın üstünde ve altında elektrik üretebilecek kapasitede çalıştığı bilinmektedir [3].

Literatürde gerçekleştirilen birçok çalışma, ÇBAG’nin aktif ve reaktif güç kontrolünü gerçekleştirerek, güç kalitesini arttırmayı amaçlamaktadır. Vektör kontrol yaklaşımı, ÇBAG’nin ayırık modeli ele alındığında, kullanılabilir en verimli yöntem olarak düşünüldüğü için klasik PI kontrolörle beraber araştırmalarda yer almıştır [4]. Aynı klasik kontrolörün, şebekede oluşan çökmelerde, dengesizliklerde ve hatalarda nasıl tepki verdiği ise yapılan çalışmalarla analiz edilmiştir [5-7].

Doğrusal olmayan durumlarda, vektör kontrol yaklaşımının, düşük performans ve daha az kararlılık gösterdiği bilinmektedir. Bu yüzden, doğrusal olmayan kontrol yöntemlerinden biri olan Kayan Kip Kontrol (KKK) Metodu, modellenmemiş değişkenlere, parametrelerin katsayılarının değişimine ve dış bozuculara karşı kararlılığından dolayı daha çok ilgi çekmektedir [8].

KKK tasarımı iki ana bölümden oluşmaktadır. İlk olarak istenen kapalı döngü performansını modellemeye yarayan kayan yüzey seçilir. İkinci olarak, sistemin durumlarını bu kayan yüzeye yönlendiren kontrol sinyali tasarlanır. Sistemin durum değişkenlerinin eğrisinin kayan yüzeye varış süresi erişim fazı olarak isimlendirilir. Sistemin dinamikleri erişim fazı süresince de belirsizliklerden etkilenmektedir. Teoride, ideal kontrolün yüksek frekanslarda gerçekleşmesi sağlanarak, sistemin durumlarının kayan yüzeyden sapması engellenmelidir, ancak pratikteki sistemlerin dinamik yapılarının yavaş olmasından dolayı bu sağlanamamaktadır. Bu yüzden kontrol esnasında istenmeyen çaptırtı problemleri meydana gelmektedir. Bu çaptırtı problemini gidermek için literatürde birçok çalışma yapılmıştır [9].

Lekhcine (2015) ve diğerleri yaptıkları çalışmada, ÇBAG'nin hız kontrolü için PI ve bulanık mantık kontrolörün performansını karşılaştırmıştır. Alan yönlendirmeli kontrol ve evirici geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada rotor akımı denetlenerek, motor hızının istenen seviyede tutulması sağlanmıştır. Bulanık mantık kontrolörün yük bozucularını giderdiği ve tepki süresinde daha iyi olduğu ifade edilmektedir [10].

Feng Yang (2012) ve diğerleri yaptıkları çalışmada, deniz üstü değişken hızlı ÇBAG'li rüzgâr türbininin maksimum güç elde edebilmesi ve verimliliğinin artırılması için, türbin hızı adaptif kayan kip kontrol metoduyla denetlenerek, ÇBAG torkunun kişiler tarafından doğrudan izlenebilmesi sağlanmıştır. Ayrıca çaptırtı sorunu için sürekli hiperbolik tanjant fonksiyonun kullanılması tavsiye edilmiştir. Düşünülen denetim tekniği NREL FAST ve TurboSim simülasyon ortamlarında test edilmiştir. Uygulanan adaptif kayan kip tekniğinin, literatürde uygulanan birçok tekniğe göre güç elde edilmesinde daha verimli olduğu ifade edilmiştir [11].

Xu (2007) ve diğerleri yaptıkları çalışmada, ideal olmayan şebeke şartlarındaki ÇBAG'li rüzgâr türbin sisteminin çalışmasını incelemiştir. Pozitif ve



negatif senkron referans düzlemine göre ÇBAG'nin modeli sunularak, stator aktif-reaktif güçlerindeki ve torktaki değişimler, akım ve gerilimin negatif bileşenleri tarafından tanımlanmıştır. İdeal olmayan şebekelerde, ÇBAG'nin stator akı yönlendirmeli, pozitif ve negatif referans düzlemindeki matematiksel modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde tork, aktif-reaktif güç, pozitif-negatif stator akısı ve rotor akımı arasındaki ilişki belirlenmiştir. Pozitif ve negatif düzlemlerde olmak üzere, iki adet rotor akım kontrolörü tasarlanmıştır. Önerilen kontrol sisteminin uygulanabilirliği, 2-MW gücündeki rüzgâr türbini üzerinde, EMTDC/PSCAD ortamında simülasyon çalışmaları yapılarak incelenmiştir [12].

Ghennam (2009) ve diğerleri yaptıkları çalışmada, Rüzgâr Enerjisinde kullanılan ÇBAG'lerin genel modelini ve bu modelin deneysel gerçekleştirilmesini göstermiştir. Şebeke tarafı dönüştürücünün d-q kontrolü teorik olarak açıklanmış ve ÇBAG'nin aktif-reaktif gücünün ve ÇBAG'nin rotor akımlarının d-q bileşenlerinin kontrolü gerçekleştirilmiştir. ÇBAG'nin rotor akımlarının q bileşeni aktif gücü kontrol ederken, d bileşeni reaktif gücü kontrol ettiği belirtilmektedir. Ayrıca sistemde akımın harmoniklerini azaltmak için filtre kullanılmıştır. Kontrol algoritmaları DSpace kartı kullanılarak uygulanmıştır. ÇBAG'nin performansı deneysel çalışmalarla analiz edilmiştir [13].

Jiabin Hu (2010) ve diğerleri yaptıkları çalışmada, şebeke bağlantılı, ÇBAG'li rüzgâr türbininin, doğrudan aktif-reaktif güç kontrolünü yapmışlardır. Önerilen doğrudan güç kontrol yöntemine göre herhangi bir senkron koordinat dönüşümüne gerek kalmadan, aktif-reaktif güçlerdeki anlık hataları gidermek amaçlanmıştır. Bunun için doğrusal olmayan kayan kip kontrol metodu kullanılarak, gerekli rotor kontrol gerilimi doğrudan hesaplanmıştır. Bu yüzden herhangi ekstra akım kontrol döngüsüne gerek kalmamış olup, sistem basitleştirilmiştir. Uzay vektör modülasyonu kullanılarak, dönüştürücünün sabit anahtarlama frekansı elde edilmiştir. Böylece güç dönüştürücüsünün ve AC harmonik filtresinin tasarımı kolaylaştırılmıştır. 2-MW şebeke bağlantılı ÇBAG sisteminin gerilim yönlendirmeli vektör kontrolü ve yaygın kullanılan çizelgeden bakma doğrudan güç kontrolü (LUT DPC) yöntemi kullanılarak yapılan benzetim çalışmalarının sonuçları karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmaları MATLAB/Simulink ortamında yapılmış, çalışmada DC bara gerilimi 1200V olarak ayarlanmıştır [14].

Feng Wu (2006) ve diğeri yaptıkları çalışmada, ÇBAG'li rüzgâr türbinlerinin detaylı modellenmesini yapılarak, ÇBAG'nin kontrolünün rüzgâr türbin sistemlerinin kararlılığını arttıracaklarını göstermişlerdir. Türetilen küçük sinyal kararlılığı modeli ile tasarlanan bu kontrolörün parametreleri Parçacık Sürü Optimizasyonları (PSO) kullanılarak elde edilmiştir. MATLAB/Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları sonucu optimize edilmiş parametreler kullanılarak yapılan kontrolör ile Rüzgâr Türbininin kararlılığı önemli ölçüde artırılmıştır [15].

Petersson (2005) ve diğeri yaptıkları çalışmada, ÇBAG'li rüzgâr türbinlerinin gerilim çökmelerine karşı dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Simetrik ve simetrik olmayan voltaj çökmelerinin tepkileri belirlenmiştir. Akı dinamiklerini içeren indirgenmiş mertebeli model ile tam mertebeli model benzetim çalışmalarında kullanılmıştır. Rotor akımları referans seviyeye koyulduğunda ÇBAG'nin temel dinamik davranışını koruyabileceği görülmüştür. Aynı zamanda güç kalitesinde iyi sonuçlar elde edilmiş ve toplam harmonik bozulmanın %5'in altında olduğu görülmüştür. Son olarak kırpışma katsayısının çok düşük olduğunu bulmuşlardır [16].

Lima (2009) ve diğeri yaptıkları çalışmada, rüzgâr türbinlerinde kullanılan ÇBAG'lerin basitleştirilmiş modeli üzerine çalışmışlardır. ÇBAG tabanlı, yeni bir dinamik modele sahip bu rüzgâr türbinlerinin şebekedeki kalıcı ve geçici hatalara karşı davranışlarını incelemişlerdir. Farklı koşullarda test edilen modelin performansı PSCAD/EMTDC benzetim programında analiz edilmiştir. Büyük çaplı rüzgâr türbinlerinde modellerinin kullanışlı oldukları sonucuna varmışlardır [17].

Babu (2010) ve diğeri yaptıkları çalışmada, rüzgâr türbini tarafından sürülen ÇBAG'nin şebekeye aktırdığı gücün modellenmesini ve benzetim çalışmasını sunmuşlardır. Kullanılan ÇBAG modeli, bütün asenkron generatör tiplerinde kullanılabilen, vektör dinamik yaklaşımına dayanan bir modeldir. Şebeke ve rotor arasındaki güç akışı kontrolü ise iki adet darbe genişlik modülasyonla sürülen back to back dönüştürücü tarafından sağlanmışlardır. Çalışmalarında evirici çıkış geriliminin toplam harmonik bozulma değerini IEEE 519-1992 standartlarına uygun olan hızlı Fourier dönüşümünü kullanarak elde etmişlerdir [18].

Ostadi (2009) ve diğeri yaptıkları çalışmada, iletim hattına seri kompanzasyonla bağlanan ÇBAG'li rüzgâr sistemlerini ele almışlardır. Geliştirdikleri doğrusal olmayan matematiksel model, ÇBAG akı gözlemleyicinin değişkenlerini, kilitli faz döngüsünü, güç elektronik dönüştürücülerinin kontrollerini ve rüzgâr türbinini dikkate almaktadır. Parametrelerin, kontrolörün ve rüzgâr hızının sistemin kararlılığına etkilerini tanımlamak için ise, öz değer ve katılım faktör analizi doğrusallaştırılmış modele eklenmiştir. Rotor tarafı akım kontrolünün sistem kararlılığında en büyük etkiye sahip olduğu sonucunu elde etmişlerdir [19].

Zhang (2009) ve Wang'ın yaptıkları çalışmada, rüzgâr türbin kontrol sisteminin her parçasının karakteristik analizi yapılmıştır. ÇBAG'nin aerodinamik ilkeleriyle beraber matematiksel modelini eksiksiz bir şekilde çıkarttıklarını belirten yazarlar, rüzgâr türbin modelini, sürücü sistem modelini, generatör modelini kullanmış olup farklı hızlar için farklı açı kontrol stratejisini öne sürmüşlerdir. MATLAB/Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları sonucu, modelin doğru sonuçlar verdiğini ve kontrol stratejilerinin geçerliliğini göstermişlerdir [20].

Zhang (2010) ve diğeri yaptıkları çalışmada, ÇBAG'nin sürekli durum karakteristiklerini matematiksel modele dayanarak detaylı bir şekilde analiz etmişlerdir. ÇBAG'nin, elektromanyetik gücünün analizleri sonucu, geniş bir kararlılık bölgesine ve kendine özgü bir kararlılığa sahip olduğunu kanıtlamışlardır. Stator akı yönlendirmeli ve stator gerilim yönlendirmeli sistemlerin, küçük sinyal doğrusallaştırma denklemleriyle ve öz değer analizleriyle araştırıldığı bu çalışmada, stator gerilim yönlendirmeli yöntemde kararlılığın rotor akımlarından bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır [21].

Alkandri (2011) ve diğeri yaptıkları çalışmada, ÇBAG'nin kalıcı durum analizlerini yapmışlardır. Makinenin miline monte edilmiş ilave rotor uyarıcısı sayesinde makine kayma frekansı akımıyla uyarılmıştır. Elde edilen manyetik alan senkron hızda dönmektedir. Yapılan benzetim çalışmalarıyla, makine sabit hızda dönerken, uygulanan uyarım akımının gerilim büyüklüğü ve açısının aktif ve reaktif güç üzerindeki etkileri incelenerek, bu değerlerin makinenin çalışma modunu kontrol ettiği sonucuna varmışlardır [22].

Sediki (2012) ve diğeri yaptıkları çalışmada, şebeke bağlantılı ÇBAM'nin birim güç faktörü çalıştırma durumunda kalıcı durum karakteristiklerini incelemişlerdir. Rotora uygulanan gerilimin, motorun hızına ve aktif gücüne olan etkisini göstermek için, kontrol kuralının senkronize edilmiş matematiksel modele dayanan analitik tespiti yapılmıştır. Popülerleşmeye başlayan küçük çaplı rüzgâr türbinlerinde uygulanan bu yöntemde, eşitliklerdeki stator direnci ihmal edilmemiştir. Son olarak, kalıcı durum modelinden türetilen analitik eşitliklerin ÇBAM'nin açık döngü kontrolüne olanak sağladığı gösterilmiş olup, önerilen kontrol tekniğinin herhangi bir sensöre ihtiyaç duymadığı belirtilmiştir [23].

Lei (2013) ve diğeri yaptıkları çalışmada, önce asenkron makinanın elektriksel eşitliklerini gözden geçirmişlerdir. Daha sonra ÇBAG'nin akı bağlantı değişkenlerini ihmal ederek, geçici analiz programlarında kullanılabilecek olan modeli elde etmişlerdir. İdeal frekans dönüştürücü varsayımıyla yapılan benzetim çalışmalarıyla, tork ve reaktif gücün denetimi yapılmıştır. Önerilen modelin performansının analizi için ise PSS/E ve DigSILENT programları kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır [24].

Poitiers (2009) ve diğeri yaptıkları çalışmada, rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde kullanılan ÇBAG'nin kontrolünü ele almışlardır. Eviricinin üç farklı teknikle kontrol edildiği bu çalışmada, analizler rüzgâr türbini benzetim ortamında yapılmıştır. Şebekeye bağlı ÇBAG'nin kullanıldığı çalışmada, ilk önce stator ile şebeke arasındaki aktif ve reaktif gücün kontrolü amaçlanmıştır. Doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki farklı kontrol metodu tanımlanarak uygulanan bu sistemlerde kontrolör olarak PI, polynomial RST ve Linear Quadratic Gaussian kullanılmıştır. Bu üç farklı kontrolörün performanslarının yakın bulunduğu bu çalışmada, ayrıca sağlamlık testide yapılmıştır [25].

Rouabhi (2015) ve diğeri yaptıkları çalışmada, açı kontrol sistemine sahip şebekeye bağlı rüzgâr türbininde kullanılan ÇBAG ele alınmıştır. Aktif ve reaktif güç kontrolünün amaçlandığı bu çalışmada, kayan kip kontrol metoduna dayanan kontrol algoritması düşünülmüştür. Türbinin mekaniğinden elde edilebilecek maksimum gücü referans alan sistemde, kullanılan kayan kip kontrol metodu, literatürde birçok çalışması bulunan PI kontrolörlü vektör kontrol metoduyla karşılaştırılmış ve düşünülen çalışmanın daha üstün olduğu sonucuna varılmıştır. Senkron altı hızlarda,

senkron hızlarda ve senkron üstü hızlarda yapılan testlerde alınan sonuçlar ile düşünülen KKK metodunun sadece güç akışındaki kalitesi değil, aynı zamanda birim güç faktörünü de sağladığı görülmüştür [26].

Ardjoun (2015) ve diğerleri yaptıkları çalışmada, değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG'nin aktif ve reaktif güç kontrollerini gerçekleştirmişlerdir. Bulanık kayan kip kontrol metodu ile dolaylı vektör kontrolün uygulandığı bu sistemde, çatırtı problemini azaltmayı amaçlamışlardır. Stator akı vektör yönlendirmesi kullanılan bu sistemde, aktif güç, reaktif güç ve rotor akımları olmak üzere toplam dört adet kontrolör geliştirilmiştir. Uygulanan sistemin farklı hızlarda, sağlamlık ve elde edilen gücün kalitesi bakımından dikkate değer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Kontrol parametrelerinin katsayılarının optimizasyonlarının yapılması sonucu sistemin kararlılığı geliştirilebilir [27].

Li (2009) ve diğerleri yaptıkları çalışmada, rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG'lerin aktif ve reaktif güç kontrollerini gerçekleştirmiş, stator gerilim ve stator akı yönlendirme metotlarını kullanarak performanslarını karşılaştırmışlardır. Senkron referans düzleminde sürekli durum ve geçici durum modellerini çıkartarak, stator gerilim düzlemi ve stator akı düzlemindeki d-q akım ve stator aktif-reaktif güç referans değerleri arasındaki genel ilişkiyi göstermişlerdir. 2 MW'lık ÇBAG'nin kullanıldığı sistemin benzetim çalışmaları sonucu, stator gerilim düzleminde ve stator akı düzleminde tasarlanacak kontrolörün performanslarının eşit olacağı görülmüştür. Ayrıca performans çalışmaları sonucu, stator akı uzay vektörünün pozisyonu, stator gerilim uzay vektörünün pozisyonuna  $-90^\circ$  eklenerek kolayca elde edileceğini göstermişlerdir [28].

Qiao (2009) ve diğerleri yaptıkları çalışmada, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılan ÇBAG'lerin iki farklı modelini geliştirmişlerdir. Bu modellerden biri genişçe detaylandırılmış anahtarlama seviyeli model, diğeri ise basitleştirilmiş temel frekans modelidir. Farklı şaft sistemlerinin, rüzgâr türbin generatörünün dinamik davranışı üzerindeki etkileri incelenip, burulmayla ilgili dalgalanmalar araştırılmıştır. Farklı şaft sistemlerine sahip bu iki modelin karşılaştırması için dinamik ve süreksiz benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucu her iki modelinde doğruluk bakımından aynı olduğu görülmüştür [29].

Kaseem (2013) ve diğerlerinin yaptıkları çalışmada, değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG için dinamik model oluşturma ve kontrol sistemi tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Şebeke bağlantılı rüzgâr türbin sisteminin d-q senkron referans düzleminde detaylı dinamik modellemesi gösterilerek, şebeke ile ÇBAG'nin statoru arasındaki güç akışının kontrolü için KKK kullanılmıştır. Kontrolörün performansının geliştirilmesi için, integral KKK kullanılmıştır. Kontrolörün makine parametre katsayılarının değişimlerine karşı davranışı, referans gücü izlemedeki hassasiyeti, senkron altı ve senkron üstü hızlardaki dayanıklılığı karşılaştırılmıştır. Ayrıca düşünülen integral kayan kip kontrolörün performansı geleneksel PI kontrolör ile karşılaştırılmıştır [30].

Bu çalışmada ÇBAG'li rüzgâr türbin sistemlerinin modellenmesi, PI ve Adaptif Kayan Kip Kontrolü yapılmıştır. Literatür taraması sonucu kontrolün uygulanabilmesi için en uygun matematiksel model çıkartılmıştır. Bu matematiksel modele göre eşdeğer devre çizilerek, generatörün hız, tork ve güç denklemleri elde edilmiştir. ÇBAG'nin aktif ve reaktif güç kontrolünde literatürde çokça tercih edilen PI- vektör kontrollü sistemin yerine, klasik kayan kip kontrol (KKKK) önerilmiştir. Ancak bu kontrolörün istenmeyen çattırtı problemleri mevcuttur. Bu problemleri gidermek, çıkış gücündeki dalgalanmaları azaltmak ve kontrolörün performansını arttırmak için adaptif kayan kip kontrolör (AKKK) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar PI kontrolör ile karşılaştırılmıştır.

Bölüm 2'de rüzgâr enerji dönüşüm sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine çeviren türbin sistemlerinin çeşitleri, avantajları ve dezavantajlarından bahsedilmiştir.

Bölüm 3'te rüzgâr türbin sistemlerinde son zamanlarda daha fazla tercih edilen ÇBAG'nin modellenmesi konusu ele alınmıştır. Generatörün özellikleri incelenerek, senkron altı ve senkron üstü hızlarda çalışma durumlarından bahsedilmiştir. Ayrıca generatörün güç eşitlikleri elde edilmiştir.

Bölüm 4'te kontrol sistemlerinin temel kavramları ve çeşitleri hakkında bilgiler verilmiştir. PID kontrolün genel özellikleri anlatılmıştır. KKK için ise, çattırtı problemi, KKKK tasarımı, KKK dayanıklılık özelliği açıklanmıştır.

Bölüm 5'te ÇBAG'nin kontrolü konusuna değinilmiştir. Literatürde ÇBAG'nin aktif ve reaktif güç kontrolü için genellikle kullanılan yöntemler ifade edilmiştir. Alan yönlendirme yöntemi, dolaylı-doğrudan kontrol gibi yöntemler anlatılmıştır.

Bölüm 6'da yapılan simülasyon çalışmaları anlatılmıştır. Rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin LabVIEW ortamında simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ÇBAG'nin aktif ve reaktif güç kontrolü için AKKK tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Elde edile sonuçlar KKKK ve PI kontrolör ile karşılaştırılarak, çatırtı problemi, çıkış gücündeki dalgalanmalar ve kontrolör performansı incelenmiştir.

Bölüm 7'de yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve öneriler sunulmuştur.

## 2. RÜZGÂR ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ

Rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjiyi kanatlar vasıtasıyla mekanik enerjiye, bu enerjiyi ise generatörler sayesinde elektrik enerjisine dönüştüren sistemlere rüzgâr türbin sistemleri denir. Bu bölümde rüzgâr enerjisinin tanımı yapılmış olup, rüzgâr enerjisinden elde edilecek maksimum verim hesaplamaları gösterilmiştir. Bunun yanında, rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan generatörler incelenmiş ve çift beslemeli asenkron generatörün diğer generatör türlerinden farkları belirtilmiştir.

### 2.1 Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr, yeryüzündeki hava hareketlerine verilen isimdir. Bu hava hareketlerini oluşturan en temel etken, yeryüzündeki farklı bölgelerin farklı derecede sıcaklıklara sahip olmasıdır. Hava doğrudan güneş radyasyonu ile ısınmayıp, yeryüzünün sıcaklığından emilen ısıdan beslenmektedir. Yeryüzündeki farklı noktalardaki (toprak, su, çöl orman vb.) sıcaklıkların farklı olmasından dolayı, havanın sıcaklıkları farklılık göstermektedir. Buda atmosfer sıcaklığında, yoğunluğunda ve basıncında farklılıklar görülmesine neden olmaktadır [31]. Bu farklılıklar, havanın bir noktadan başka bir noktaya hareket etmesine neden olarak rüzgâr oluşumunu sağlar. Ayrıca, dağlar ve vadiler gibi yeryüzünün farklı şekillerine sahip bölgeleri, rüzgârın hızını ve yönünü değiştirmesine neden olmaktadır [32].

Rüzgâr adı verilen hareket halindeki bu havanın, diğer akışkanlarda görüldüğü gibi, bir kinetik enerjisi vardır [33]. Sabit bir ivme altındaki  $m$  kütleli,  $v$  hızındaki bir cismin uyguladığı kuvvet  $F$  için  $x$  boyunca yaptığı iş olan  $W$ , eşitlik (2.1)'deki gibi hesaplanır.

$$W=F.x \quad (2.1)$$

Aynı kütlenin kinetik enerjisi ( $E$ ) ise eşitlik (2.2)'deki gibi bulunur.

$$E=\frac{1}{2}mv^2 \quad (2.2)$$



Rüzgârdaki güç ( $P$ ), enerjideki değişim oranı olarak hesaplandığına göre;

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} v^2 \frac{dm}{dt} \quad (2.3)$$

olarak karşımıza çıkar. Havanın yoğunluğu ( $\rho$ ) ve türbin kanat alanı ( $A$ ) için rüzgâr kütlelerinin akışı ise;

$$\frac{dm}{dt} = \rho A \frac{dx}{dt} \quad (2.4)$$

şeklinde bulunur. Buradaki  $\frac{dx}{dt}$  ifadesi, rüzgârın aldığı yolun zamana göre değişimi olduğundan dolayı  $v$  rüzgâr hızını vermektedir. Dolayısıyla rüzgâr kütlelerinin, zamana göre değişimi;

$$\frac{dm}{dt} = \rho A v \quad (2.5)$$

şeklinde gösterilir. Rüzgâr gücünün, eşitlik (2.3) ve (2.5)'ten türetilen değeri ise;

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.6)$$

şeklinde olur.

Rüzgârdaki kinetik enerjinin, rotoru döndüren mekanik enerjiye dönüşüm oranının %59,3 ten fazla olamayacağı, Alman fizikçi Albert Betz tarafından bulunmuştur. Betz Limiti veya Betz Kanunu olarak bilinen bu teori, herhangi bir rüzgâr türbin sisteminin verimliliğinin maksimum değerinin %59 olacağını belirtmektedir [34]. Güç katsayısı olarak bilinen bu değer  $C_p$  sembolüyle gösterilir.

$$C_{p_{\max}} = 0.59 \quad (2.7)$$

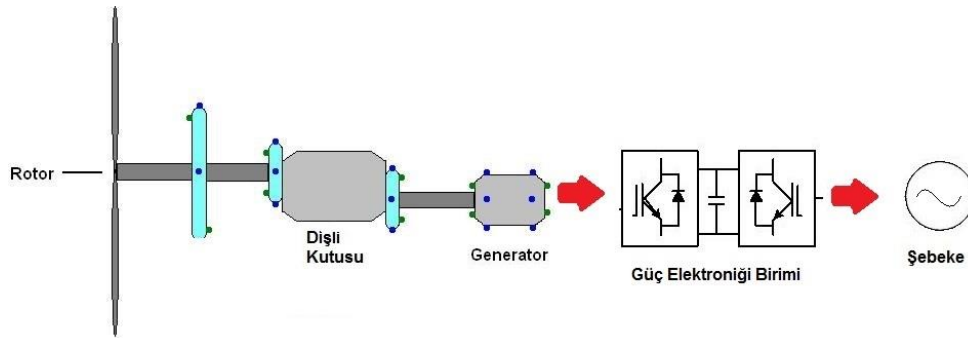
Betz tarafından bulunan bu katsayı, rüzgâr enerji dönüşüm sistemlerinde, türbin verimi, dişli kutusunun verimi, mekanik sisteminin verimi, generatör verimi gibi değerlere bakılarak bulunmuştur. Bu katsayının sonucunda eşitlik (2.6)'yı kullanarak rüzgâr gücünden elde edilebilecek maksimum gücü;

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_{p_{\max}} \quad (2.8)$$

eşitliğiyle bulabiliriz. Teoride bu şekilde hesaplanan maksimum güç değeri maalesef, gerçek hayatta aynı sonucu vermemektedir. Pratikte yapılan uygulamalar sonucu verimin yaklaşık olarak %45-%50 arasında değiştiği görülmektedir [35].

## 2.2 Rüzgâr Türbin Sistemleri

Son zamanlarda, artan enerji talebini karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarına rağbet yükselmiştir. Bu rağbet, yenilenebilir enerji santrallerinin sayısının giderek artmasına neden olmuştur [36]. Yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan rüzgâr enerjisi de ilgi odaklarından biri haline gelmiştir. Bunun sonucu olarak rüzgâr enerjisine ve rüzgâr santrallerine yapılan yatırımlar hızla artmaktadır. Rüzgârın hareketinden kaynaklanan kinetik enerjisini, kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürebilmek için öncelikle mekanik enerjiye çevirmek gereklidir. Daha sonra bu mekanik enerji, şebekeye aktarılmak üzere veya kullanılmak üzere elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Rüzgâr enerjisini önce mekanik enerjiye, daha sonra elektrik enerjisine çevirmesine neden olan, farklı güç elektroniği birimlerine sahip bu sistem rüzgâr türbin sistemi olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.1'de rüzgâr türbin sisteminin birimlerini içeren blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.1: Rüzgâr türbin sisteminin genel yapısı.

Rüzgârın sahip olduğu kinetik enerji, rotor kanatları vasıtasıyla mekanik enerjiye dönüştürülür. Elde edilen bu mekanik enerji generatörün milini döndürür. Generatörün çeşidine göre, dişli kutusu kullanılabilir veya doğrudan generatörün miline bağlantı yapılabilir. Generatör mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştürür. Elektrik enerjisi çeşitli güç elektroniği devreleri vasıtasıyla veya

doğrudan şebekeye aktarılabilir. Son yıllarda kurulan rüzgâr türbin sistemlerinin çoğunda güç elektroniği birimleri kullanılmaktadır. Böylece rüzgâr türbin sistemlerinin frekans, gerilim, reaktif ve aktif gücü, şebeke gereksinimlerine göre kontrol edilmektedir [37].

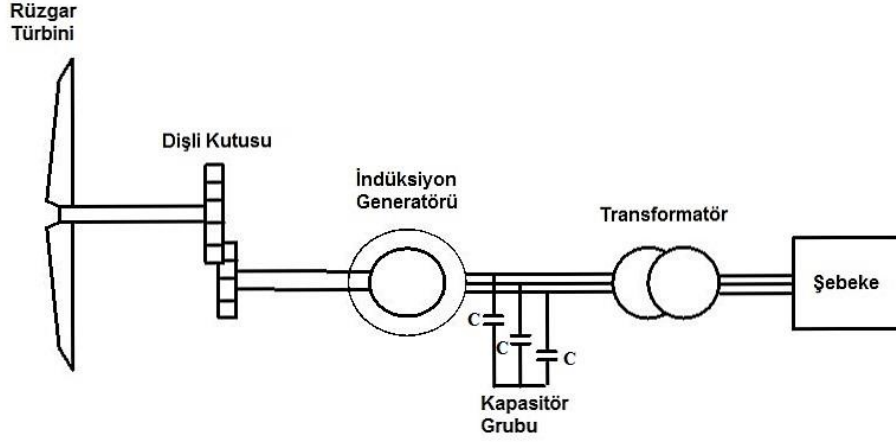
### **2.2.1 Rüzgâr Türbin Çeşitleri**

Rüzgâr Türbinleri, farklı rüzgâr hızlarında farklı çalışma karakteristiklerine bağlı olarak, sabit hızlı rüzgâr türbinleri ve değişken hızlı rüzgâr türbinleri olmak üzere iki grupta incelenir [38]. Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde generatör, doğrudan şebekeye bağlanır. Rotor hızı şebeke frekansını yakalayana kadar, rüzgârdan elde edilen enerjide kontrol edilemeyen dalgalanmalar oluşturur. Bu dalgalanmalar şebekenin güç kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir [39]. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde, güç elektroniği vasıtasıyla rotor hızı, dolayısıyla generatör kontrol edilebilir. Bu kontrol sayesinde rotor hızı değiştirilerek, rüzgâr değişimlerinden kaynaklanan güç dalgalanmaları minimize edilebilir [40]. Ayrıca düşük rüzgâr hızlarında, değişken hızlı rüzgâr türbinleri, sabit hızlı rüzgâr türbinlerine göre daha verimlidir.

Rüzgâr türbinlerinin dairesel hızı oldukça düşüktür ve bu yüzden elektriksel frekansa uydurulması gerekmektedir. Frekans ayarlama işlemi, dişli kutusuyla veya generatör kutup çifti sayısı ile ayarlanabilir. Çift kutup sayısı generatörün mekanik hızını elektriksel frekansa uydurur, dişli kutusu ise türbin rotor hızını, generatör mekanik hızına eşitler.

#### **2.2.1.1 Sabit Hızlı Rüzgâr Türbinleri**

1990'lı yılların başlarında, rüzgâr türbinlerinde rotor hızları şebekenin frekansına, dişli kutusu oranına ve generatör tasarımına göre sabitlenmişti. Sabit hızlı rüzgâr türbinleri, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi şebekeye doğrudan bağlı sincap kafesli veya rotoru sargılı asenkron (indüksiyon) generatör ve reaktif güç kompanzasyonunu sağlayan kapasitör ünitesinden oluşmaktadır.



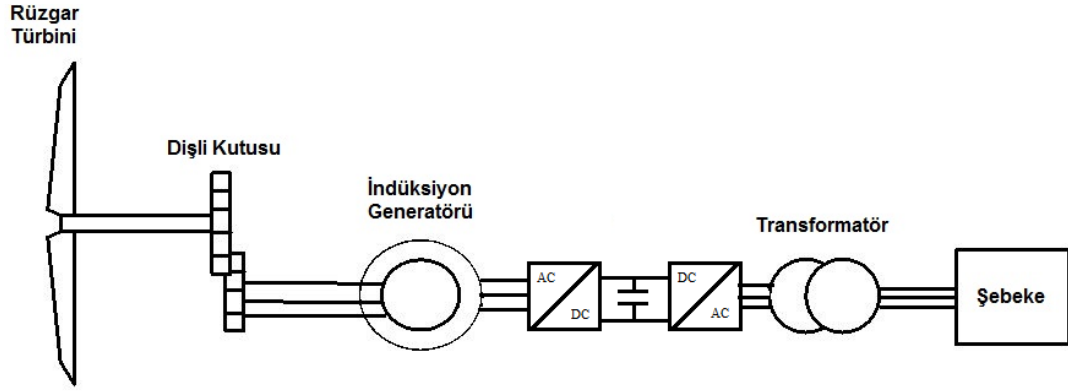
Şekil 2.2: Asenkron (indüksiyon) generatörlü sabit hızlı rüzgâr türbini.

Sabit hızlı rüzgâr türbin sistemlerinin generatörleri, belli aralıklarda değişen rüzgâr hızlarında maksimum verimliliği elde etmek için tasarlanmıştır. Güç üretimini arttırmak için, bazı generatör çeşitleri, iki farklı sarım şekline sahiptir. Bunlardan ilki düşük rüzgâr hızlarında (genellikle 8 kutuplu makineler), ikincisi ise orta ve yüksek rüzgâr hızlarında (4-6 kutuplu makineler) kullanılır.

Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinin basit, kullanışlı ve güven verici avantajları vardır. Elektriksel bölümünün maliyeti düşüktür. Dezavantajları ise reaktif güç tüketiminin kontrol edilemez oluşu ve güç kalite kontrolünün sınırlı olmasıdır. Rüzgâr hızına bağlı olduğundan dolayı, rüzgâr hızındaki herhangi bir dalgalanma, mekanik torkta dalgalanmalara, dolayısıyla şebekedeki elektriksel güçte dalgalanmalara yol açar. Ayrıca harmonikli şebekelerde bu dalgalanmalar, önemli kayıplara yol açabilecek yüksek gerilim dalgalanması olarak görülebilir.

### 2.2.1.2 Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri

Son birkaç yıldır, kurulan rüzgâr enerji santrallerinin çoğunda Şekil 2.3'te görülen değişken hızlı rüzgâr türbin tipi kullanılmaya başlanmıştır. Bu tip rüzgâr türbinleri değişken rüzgâr hızlarında, rotor hızını değiştirerek enerji kazanımını arttırmayı hedefler. Aynı zamanda, rüzgâr türbinindeki ani rüzgâr değişimi veya fırtınalardan kaynaklanan mekaniksel baskılar, tork sınırlamasıyla azaltılabilir. Bu işlem fırtınalı dönemlerde rüzgâr türbininin, rüzgâr hızına ayak uydurmasını kolaylaştırır.



Şekil 2.3: Değişken hızlı rüzgâr türbin sisteminin yapısı.

Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan generatörlerin ortak özellikleri olarak değişken hızlarda çalışabilmeleri ve şebeke bağlantısı için ara bağlantı birimine ihtiyaç duymaları olarak gösterilebilir. Böylece rüzgâr hızının ani veya düzgün değişim gösterdiği durumlarda bile sabit frekans ve genlikte elde edilebilir.

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin elektriksel sistemi sabit hızlı rüzgâr türbinlerine oranla daha karmaşıktır. Güç çevirici birimleriyle şebekeye bağlanan sistemde, asenkron veya senkron generatörler kullanılabilir. Güç dönüştürücüsü, generatör hızını kontrol ederek rüzgâr hızındaki değişimlerden kaynaklanan güç dalgalanmalarının giderimini sağlar.

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin avantajları arasında, enerji kazanımının büyük olması, aktif-reaktif güç kontrolünün yapılabilmesi, güç kalitesinin yüksek olması, rüzgâr türbinindeki mekanik baskıların düşük olması gösterilebilir. Dezavantajları arasında ise, güç elektroniği birimindeki kayıplar, fazla donanım kullanılması ve bu donanımların maliyetlerinin yüksek olması gösterilebilir. Ancak son yıllarda yarı iletken malzemelerin ucuzlaması ve güç elektroniğindeki teknolojik gelişmelerden dolayı kayıp ve maliyet değerleri düşmüştür. Bu durumda rüzgâr türbinindeki güç elektroniği biriminin maliyeti, tüm sistemin %7 maliyetine kadar düşmektedir [41].

Günümüzde birçok rüzgâr türbininde generatör tipi olarak, güç elektroniği dönüştürücüleri generatörün %25-30 gücünde olan, ÇBAG teknolojisi kullanılmaktadır [42, 43]. Bu tip generatörde rotor sargıları bilezikler vasıtasıyla

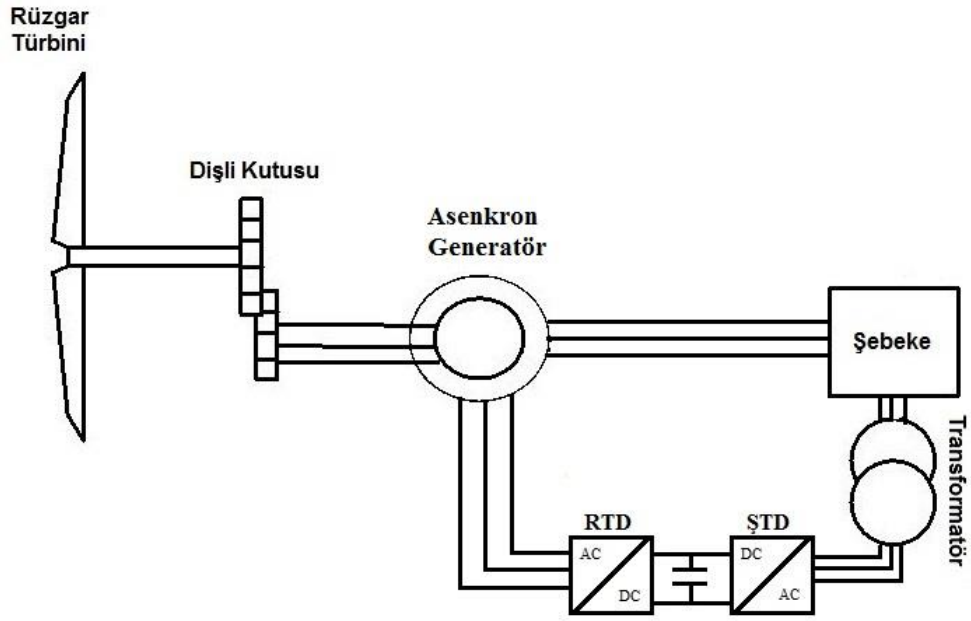
dönüştürücülere bağlanırken, stator sargıları doğrudan şebekeye bağlanmaktadır. Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde çok popüler olan bu sistem [17], bir sonraki bölüm olan Çift Beslemeli Asenkron Generatörün Modellenmesi başlığı altında detaylı olarak anlatılmaktadır.

### **3. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN MODELLENMESİ**

Bu bölümde tezde kullanılan ÇBAG detaylı haliyle ele alınmıştır. Matematiksel modeli çıkartılan ÇBAG'nin d-q eksen takımındaki eşdeğer devresi bulunmuştur. Bu devreye göre generatörün güç, tork ve açısal hız denklemleri elde edilmiştir.

#### **3.1 Çift Beslemeli Asenkron Generatör**

Şekil 3.1'de ÇBAG'li rüzgâr türbin sistemi görülmektedir. Bu sistemde, stator doğrudan şebekeye bağlanırken, rotor sargıları güç elektroniği dönüştürücüleri üzerinden şebekeye bağlanmaktadır. Bu dönüştürücüler, darbe genişlik modülasyonu (DGM) anahtarlama yapan, çift yönlü akım akışının olduğu gerilim kaynaklı iki eviriciden meydana gelmektedir. Rotor tarafındaki dönüştürücü (RTD) sayesinde elektromanyetik tork kontrolü yapılırken, şebeke tarafı dönüştürücüsüyle (ŞTD) de DC Bara gerilimi sabit tutulmaktadır. Aynı zamanda RTD, generatörün ihtiyacı olan reaktif gücü sağlayabilmektedir. Stator ve rotor devresinde üç faz sargılar bulunan ÇBAG'nin hem statorundan, hem de rotorundan enerji alınabilir veya verilebilir. Bunun yanında şebeke bağlantısı olmadan çalışabilmesi ve reaktif güç denetimine olanak sağlaması son zamanlarda tercih edilme nedenlerindedir.



Şekil 3.1: ÇBAG'li rüzgâr türbin sistemi blok diyagramı.

Şebekeye bağlı üç fazlı stator sargılarından sabit genlik ( $V_s$ ) ve sabit frekans ( $f_s$ ) değerinde enerji alınan ÇBAG'nin, rotor sargı uçlarına ise dönüştürücü birimler sayesinde değişken genlik ( $V_r$ ) ve değişken frekans ( $f_r$ ) değerlerine sahip enerji uygulanmaktadır veya bu sargı uçlarından da enerji alınmaktadır. ÇBAG'de mekanik hızın açısal değeri;

$$\omega_m = \omega_s \pm \omega_r \quad (3.1)$$

şeklinde gösterilebilir. Buradaki stator döner alan frekansı  $\omega_s$  ve rotor döner alan frekansı  $\omega_r$  ile temsil edilmektedir. ÇBAG'nin senkron altı hızlarda çalıştığı durumda eşitlik (3.1)'de  $\omega_r$ 'nin işareti negatif (-) ve  $\omega_m < \omega_s$  olmaktadır. ÇBAG'nin senkron üstü hızlarda çalıştığı durumda ise  $\omega_r$ 'nin işareti pozitif (+) ve  $\omega_m > \omega_s$  olmaktadır.

Senkron altı hızlarda, ÇBAG'nin rotoruna uygulanan gerilimin genliği ( $V_r$ ) ve frekansı ( $f_r$ ) hıza bağlı olarak değişmektedir. Güç dönüşüm birimlerinde sağlanan bu değişimin sonucu olarak, stator sargılarından elde edilen gerilimin genliği ve frekansı sabit tutulabilmektedir. Senkron altı hızlarda, rotor devresi üç fazlı alternatif akım kayma frekansında uyarıldığında senkron generatör gibi çalışabilmektedir.



Ancak, ÇBAG'de senkron generatörden farklı olarak,  $w_s \neq w_m$  durumunda, rotor devresinde, stator devresinden kaynaklanan bir gerilim indüklenmektedir.

ÇBAG genellikle kaymanın sıfırdan farklı ( $g \neq 0$ ) olduğu durumlarda çalıştırıldığı için klasik asenkron motor karakteristiğini taşımaktadır. Aktif gücün stator tarafından ( $P_s$ ) sağlanmasının yanında, senkron üstü hızlarda rotor sargı uçlarından da aktif güç ( $P_r$ ) alınabilmektedir. Böylelikle şebekeye aktarılan maksimum aktif güç ( $P_{\max}$ );

$$P_{\max} = P_s + P_{r,\max} = P_s + g_{\max} P_s \quad (3.2)$$

olarak ifade edilir.

### 3.2 Çift Beslemeli Asenkron Generatörün Matematiksel Modeli

ÇBAG, hem statorunda hem de rotorunda 3 fazlı sargılar bulunduran bilezikli asenkron makinadır. Rotor sargı uçları bilezikler ve bilezikler üzerinde çalışan sabit fırçalar yardımıyla dışarı çıkarılmıştır. Komütatör düzeneğinin olmaması nedeniyle rotorda oluşan alternatif akımlar doğrultulmadan bilezikler üzerinden dışarı alınabilmektedir. Dışarı alınan bu uçlar sayesinde makinanın kontrolü mümkün kılınmaktadır. Rotor faz sargıları genelde yıldız bağlanıp, stator sargılarında hem üçgen hem de yıldız bağlantı yapılabilmektedir.

Stator ve rotor fazlarına Kirchoff'un gerilim kanunu uygulanarak;

$$\begin{aligned} v_{sa} &= R_{sa} i_{sa} + \frac{d\psi_{sa}}{dt} & v_{ra} &= R_{ra} i_{ra} + \frac{d\psi_{ra}}{dt} \\ v_{sb} &= R_{sb} i_{sb} + \frac{d\psi_{sb}}{dt} & v_{rb} &= R_{rb} i_{rb} + \frac{d\psi_{rb}}{dt} \\ v_{sc} &= R_{sc} i_{sc} + \frac{d\psi_{sc}}{dt} & v_{rc} &= R_{rc} i_{rc} + \frac{d\psi_{rc}}{dt} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Buradaki  $v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}$  : Stator faz gerilimleri,  $v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}$  : Rotor faz gerilimleri,  $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  : Stator faz akımları,  $i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$  : Rotor faz akımları,  $R_{sa}, R_{sb}, R_{sc}$  : Stator sargı dirençleri,  $R_{ra}, R_{rb}, R_{rc}$  : Rotor sargı dirençleri,  $\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}$  : Stator faz

sargılarının toplam akıları,  $\psi_{ra}, \psi_{rb}, \psi_{rc}$  : Rotor faz sargılarının toplam akılarını göstermektedir. Ayrıca dengeli sistemlerde  $R_{sa} = R_{sb} = R_{sc} = R_s$  ,  $R_{ra} = R_{rb} = R_{rc} = R_r$  ve  $L_{sa} = L_{sb} = L_{sc} = L_s$  alınmaktadır.

$$[I_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}, \quad [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \text{ stator ve rotor akım vektörleri olarak alınır;} \quad (3.3)$$

Makinanın elektriksel kısımlarına ilişkin denklemleri matris formunda aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\begin{bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_s] & [0] \\ [0] & [R_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{s,r}(\theta)] \\ [M_{s,r}(\theta)]_T & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \right\} \quad (3.4)$$

Makinanın modelinde yer alan karşıt indüklemelerin değeri dönme açısına ( $\theta$ ) bağlı olduğundan dolayı model, katsayıları zamanla değişen bir modeldir. Bu sistemi katsayıları zamanla değişmeyen bir sisteme dönüştürmek için (a, b, c)'den (0, d, q)' ya dönüşüm sağlayan Park dönüşümleri kullanılmaktadır. Stator ve rotor akımları frekanslarının birbirinden farklı olması göz önünde bulundurularak yapılan bu dönüşümler sonucu makinanın akı-akım bağıntıları [17]:

$$\begin{aligned} \psi_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} & \psi_{rd} &= L_r i_{rd} + L_m i_{sd}, \\ \psi_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq} & \psi_{rq} &= L_s i_{rq} + L_m i_{sq}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

olarak tanımlanır. Bunun sonucu olarak makinanın akılar cinsinden eşitlikleri (3.6) ve (3.7)'deki gibi verilir.

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} \quad (3.6)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd}$$

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \omega_r \psi_{rq} \quad (3.7)$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + \omega_r \psi_{rd}$$

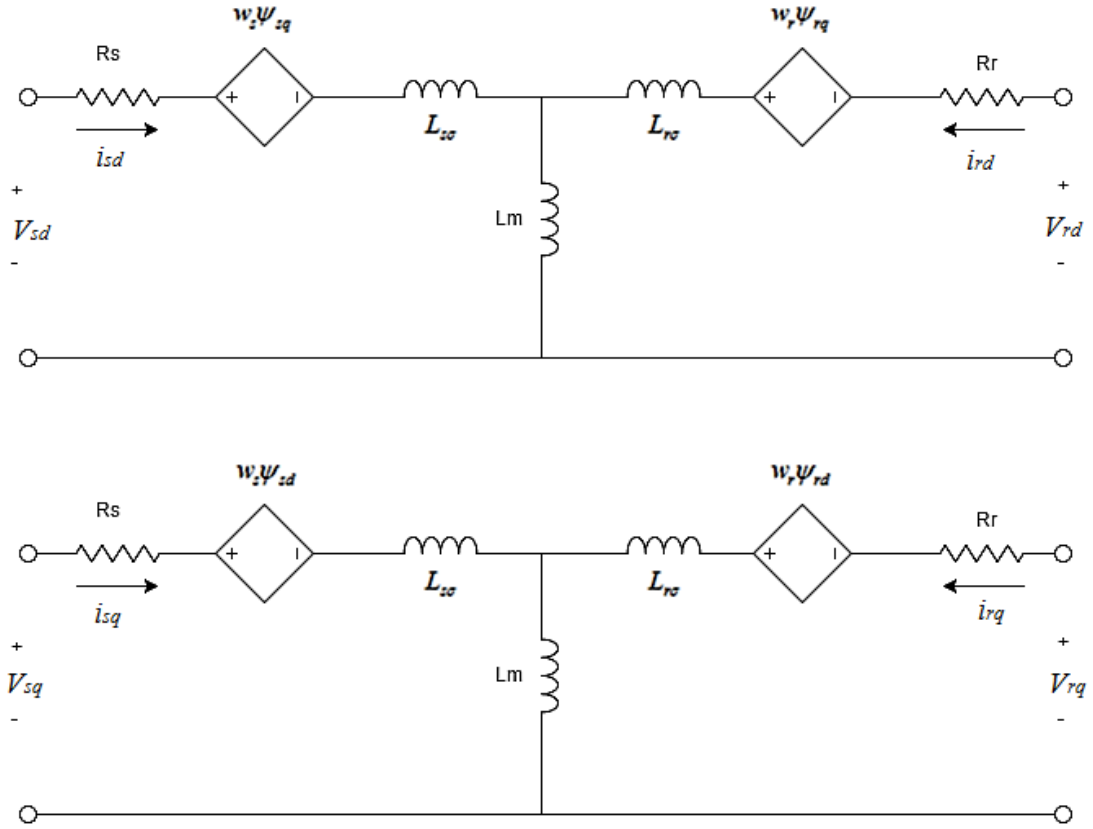
Eşitlik (3.5), (3.6) ve (3.7)'nin; (  $L_s = L_{s\sigma} + L_m$  ), (  $L_r = L_{r\sigma} + L_m$  ),  
(  $\psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq}$  ), (  $\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd}$  ), (  $\psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq}$  ), (  $\psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd}$  )  
koşulları altında düzenlenmesi sonucu gerilimlerin d ve q bileşenleri için;

$$\begin{aligned}
V_{sd} &= R_s i_{sd} + L_{s\sigma} \frac{di_{sd}}{dt} + L_m \left( \frac{di_{rd}}{dt} + \frac{di_{sd}}{dt} \right) - w_s \psi_{sq} \\
V_{sq} &= R_s i_{sq} + L_{s\sigma} \frac{di_{sq}}{dt} + L_m \left( \frac{di_{rq}}{dt} + \frac{di_{sq}}{dt} \right) + w_s \psi_{sd} \\
V_{rd} &= R_r i_{rd} + L_{r\sigma} \frac{di_{rd}}{dt} + L_m \left( \frac{di_{rd}}{dt} + \frac{di_{sd}}{dt} \right) - w_r \psi_{rq} \\
V_{rq} &= R_r i_{rq} + L_{r\sigma} \frac{di_{rq}}{dt} + L_m \left( \frac{di_{rq}}{dt} + \frac{di_{sq}}{dt} \right) + w_r \psi_{rd}
\end{aligned} \tag{3.8}$$

ifadeleri yazılabilir. Akımın d ve q bileşenleri için ise

$$\begin{aligned}
\psi_{sd} &= (L_{s\sigma} + L_m) I_{sd} + L_m I_{rd} \\
\psi_{sq} &= (L_{s\sigma} + L_m) I_{sq} + L_m I_{rq} \\
\psi_{rd} &= (L_{r\sigma} + L_m) I_{rd} + L_m I_{sd} \\
\psi_{rq} &= (L_{r\sigma} + L_m) I_{rq} + L_m I_{sq}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

denklemleri elde edilir. Bu eşitliklerden Şekil 3.2'de görülen ÇBAG'nin eşdeğer devresi çıkartılabilir.



Şekil 3.2: ÇBAG'nin d-q eksen takımındaki eşdeğer devresi.

Asenkron makinanın üreteceği aktif güç ( $P_s$ ) ve reaktif güç ( $Q_s$ ) değerleri eşitlik (3.10)'daki şekilde yazılabilir [13].

$$\begin{aligned} P_s &= V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s &= V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Rotorun açısal hızı ( $w_r$ ) için makinenin dinamik denklemi ise [13] :

$$T_m = T_{em} + F w_r + J \frac{dw_r}{dt} \quad (3.11)$$

şeklinde bulunur. Buradaki elektromanyetik tork ( $T_{em}$ ) şöyle ifade edilir:

$$T_{em} = N_p \frac{L_m}{L_s} (\psi_{sq} I_{rd} - \psi_{sd} I_{rq}) \quad (3.12)$$

Buradaki  $N_p$  makinenin kutup sayısı,  $J$  motorun dönme atalet moment katsayısı,  $T_m$  türbinin mekanik torku,  $F$  viskoz sürtünme katsayısı,  $T_{em}$  ise elektromanyetik tork değerlerini gösterir. Rotor açısı ( $\theta_r$ ) ise eşitlik (3.13)'te verilmiştir. Eşitlik (3.13)'teki  $\theta_{r0}$  rotorun açısal olarak başlangıç konumunu göstermektedir.

$$\theta_r = \int w_r dt + \theta_{r0} \quad (3.13)$$

Bir sonraki bölümde, kontrol sistemlerinin tanımı yapılmıştır. Kontrol sistemlerinin çeşitleri incelenerek, avantajları ve dezavantajları hakkında bilgi verilmiştir.

## 4. KONTROL SİSTEMLERİ

İnsanoğlunun, bulunduğu ortamı kontrol etme isteği ilk çağlardan beri bulunmaktadır. İlk zamanlarda birçok kontrol sisteminin örneği bulunmasına rağmen, 18. yüzyılın ortalarına kadar buharla kontrol edilen cihazlar geliştirilmemişti. İlk olarak bürokrat James Watt tarafından icat edilen bu aygıt, eşsiz hız kontrollü uçan balondur. 20. yüzyılın başlarına doğru gelindiğinde ise güç üretiminde, kimyasal üretimlerde, endüstride birçok kontrol sistemi gelişmeye başladı.

Nyquist'in kararlılık teorisindeki çalışmalarıyla, ikinci dünya savaşından önceki 25 yıl boyunca, elektronikte ve devre teorisinde hızlı gelişmeler yaşandı. Çok yönlü silah sistemlerinin, denizaltıların ve uçakların gereksinimi, savaştan önce ve sonra kontrol sistemleri üzerine çalışma dürtüsü oluşturdu. Analog bilgisayarın da icadıyla kontrol sistemleri yeni bir bilim haline geldi. Dijital bilgisayarların geliştirilmesiyle, mühendislere büyük ve karmaşık sistemlerde çalışma imkânı sunulmuş oldu. Böylelikle, bilgisayar kontrolü, veri kaydı, durum uzayı analizi veya modern analiz yöntemlerinin kapısı açılmış oldu.

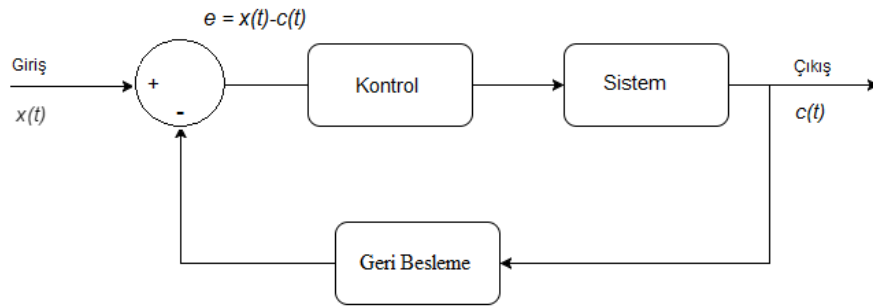
Günümüzde, kontrol sistemleri bilimi, günlük yaşamda önemli bir rol oynamaktadır. Birçok matematiksel ilerleme, optimal kontrol sistemlerine olan ilgiyle kazanılmıştır. Ayrıca günümüzde kontrol sistemleri alışılmış alanlarda kullanılmayıp, aynı zamanda şehir planlama, ekonometri, ulaşım, biyomedikal problemler, enerji analizleri gibi alanlarda da kullanılmaktadır.

### 4.1 Kontrol Sistemleri Temel Kavramları

Birbiriyle bağlantılı veya bir amaç için bir araya getirilmiş olan elemanlar bütününe sistem adı verilir. Sistemin devamlılığını denetleme, düzenleme, yönetme veya kumanda etme işlemine ise kontrol adı verilir. Kendisini veya başka bir sistemi düzenlemek veya yönetmek için uygun bir biçimde tasarlanmış olan kontrol

sistemleri, düzeni kontrol eden giriş sinyali ve sistemin çıkış işaretlerinden oluşmaktadır.

Kontrol sistemi analizi dinamik sistemlerin davranışları üzerine yapılan çalışmalar olarak düşünülebilir. Basit bir kontrol sistemi içeren Şekil 4.1'de çıkış sinyali ile giriş sinyali karşılaştırılır, bu iki sinyalin farkları fiziksel sistemi uyarıcı olarak görev yapar. Bu sistem tek giriş, tek çıkıştan oluşmuş basit bir kontrol sistemi olarak tanımlanabilir.



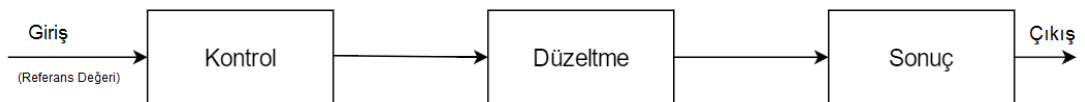
Şekil 4.1: Basit kontrol sistemi.

## 4.2 Kontrol Sistemleri Çeşitleri

Çıkış işaretinin denetlenmesi veya yönetilmesi açısından kontrol sistemleri ikiye ayrılmaktadır.

### 4.2.1 Açık Döngü Kontrol Sistemleri

Açık döngü kontrol sistemi terimi, istenilen sonucu verecek biçimde, bir önceki verinin temel alınarak, sisteme girilecek girdinin seçilebildiği sistemler için kullanılır. Şekil 4.2'de basit bir açık döngü sistemin blok diyagramı gösterilmektedir.



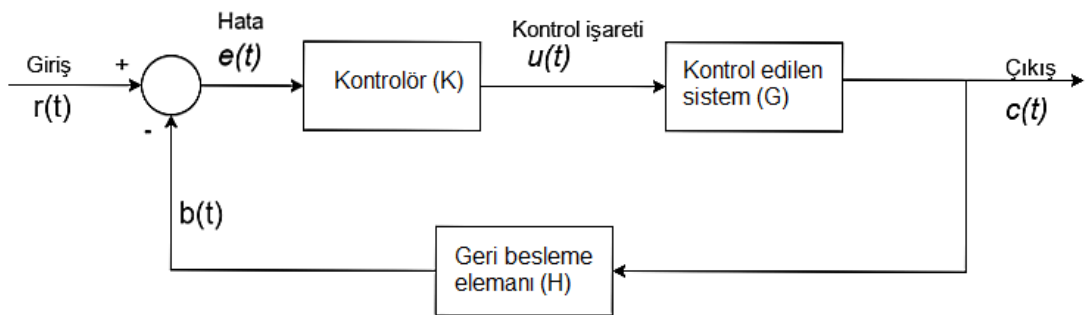
Şekil 4.2: Açık döngü kontrol sistemi blok diyagramı.

## 4.2.2 Kapalı Döngü Kontrol Sistemleri

Kapalı döngü kontrol sistemi terimi, kontrol edilen değişkenin geri beslendiği sistemler için kullanılır; bu nedenle sistemin girdisi, istenilen çıktıya ulaşmak için yeniden düzenlenebilir. Referans değer veya giriş işaretleri karşılaştırıcı veya kontrolöre girilir. Çıkış işaretleri ile giriş işaretleri arasındaki fark ise, kontrolör tarafından sisteme veya modele uygulanır. Model aynı zamanda dış bozucuları da içermektedir.

Örnek olarak zaman ayarlayıcı ile yanıp sönen, trafiğin düzenini sağlayan trafik ışıkları ele alınabilir. Belli bir  $t_k$  süresi boyunca kırmızı yanan ışık, trafiğin bir taraf için durmasını sağlar. Trafiğin diğer kısmında ise  $t_y$  zamanı boyunca yanan yeşil ışık trafiğin akmasını sağlar. Trafiğin yoğunluğuna veya yoldaki herhangi bir soruna bakılmaksızın işleyişi aynı şekilde devam eden bu trafik ışıkları, açık devre kontrol sistemi olarak düşünülebilir. Çünkü bu sisteminde, giriş işareti olarak  $(t_k, t_y)$  kırmızı ve yeşil ışık yanma süreleri, çıkış işareti ise trafiğin yoğunluğu olarak düşünülürse, yeşil ışığın yanma süresi ( $t_y$ ), trafiğin fazla akmasına imkân vermesi için uzatılamaz. Buradan anlaşılacağı üzere, kırmızı ve yeşil ışık yanma süreleri  $(t_k, t_y)$ , trafik yoğunluğundan bağımsız çalışmaktadır.

Trafik sisteminde, trafik yoğunluğu (sistem çıkışı) ölçülüp, başka bir referansla karşılaştırıcıya sokulup, aradaki hataya göre ışıkların yanma süreleri belirlenirse, kapalı döngü kontrol sistemi elde edilmiş olur.



Şekil 4.3: Kapalı döngü kontrol sistemi blok diyagramı.

Şekil 4.3'te blok diyagramı görülen kapalı döngü otomatik kontrol sisteminde geri besleme, giriş işareti ve çıkış işaretini karşılaştırıp, kontrol işaretini üretmek veya hatayı küçültmek amacıyla kullanılır. Bu kontrol sisteminde sabit büyüklük



olan kontrol elemanı kazancı (K), kontrol edilen sistemin kazancı (G), geri besleme kazancı (H) olarak düşünülürse, aşağıdaki bağlantılar elde edilir.

$$\left. \begin{aligned} e(t) &= r(t) - b(t) \\ u(t) &= Ke(t) \\ b(t) &= Hc(t) \\ c(t) &= Gu(t) \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Eşitlik (4.1)'in basit hesaplamalarla sadeleştirilmesi sonucu sistemin transfer fonksiyonu:

$$T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{KG(s)}{1 \pm KG(s)H(s)} \quad (4.2)$$

olarak elde edilir. Hatanın girişe oranı ise eşitlik (4.3)'teki ifadeyle gösterilir.

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 \pm KG(s)H(s)} \quad (4.3)$$

Eşitlik (4.1)'deki denklemin geri beslemeli sistemde ileri yol kazancı olduğu bilinmektedir. Ancak açık döngü kontrol devresinde  $b=0$  ve  $H=0$  olacağından dolayı, ileri yol kazancı sadece  $c/r = KG$  olacaktır. Ayrıca, bu denklemden görüleceği üzere, ileri yol kazancı  $1 \pm KGH$  faktörü ile bölünmektedir. Bu faktörün, birden büyük olması kazancın küçük olması, birden küçük olduğunda ise kazancın büyük olması sonucunu doğurur.  $KGH$ 'nin işaretinin (-) olması negatif geri besleme, (+) olması ise pozitif geri besleme olduğunu gösterir.

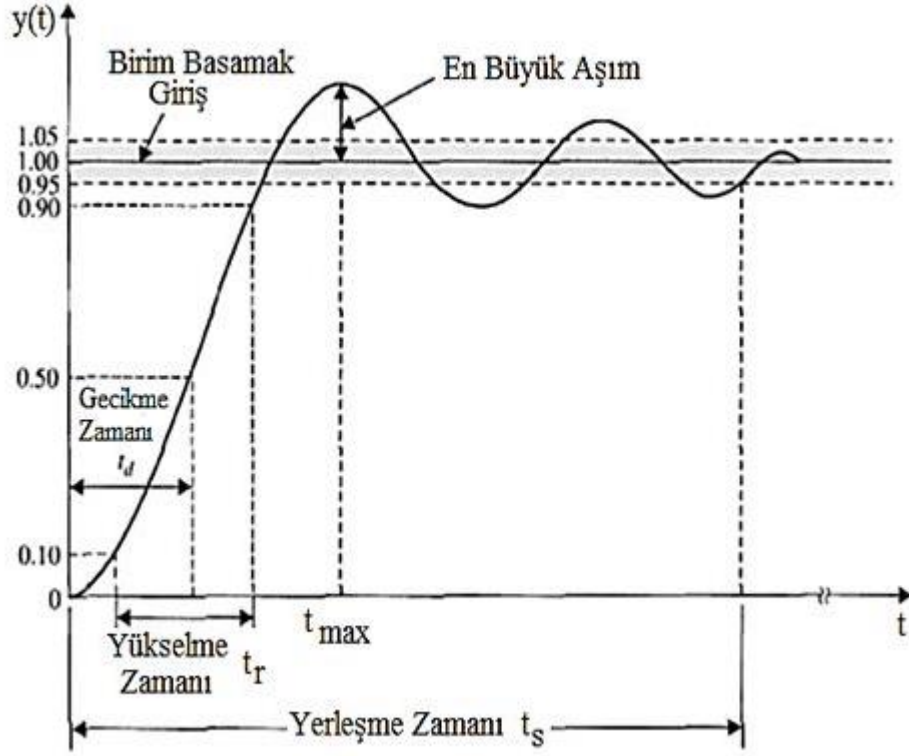
Transfer fonksiyonu denklemindeki paydanın sıfıra eşit olması sonucu çıkış/giriş oranının sonsuza yaklaşması anlamına gelir. Diğer bir ifadeyle, kontrol sistemine sınırlı bir  $r$  girişinin verilmesi sonucu çıkışta sınırlı kalmayan bir büyüklük elde ediliyorsa, sistemin kararlı olmayacağı anlamı çıkartılır. Pratik uygulamalarda, fiziksel sistemlerin parametrelerinin çevresel faktörlerle değişebileceği ve sabit kalma ihtimallerinin imkânsız olduğu bilinmelidir. Örnek olarak; elektrik makinalarının eşdeğer parametrelerinden bazıları sıcaklıkla, bazıları ise eskime ve yıpranma ile değişir. Dolayısıyla eşitlik (4.1)'de, herhangi bir parametrenin değerinin değişmesine göre, ileri yol kazancının değişimi belirlenebilir.  $1+KGH$  değeri büyütülerek duyarlılığın küçültülmesi sağlanır. Böylelikle herhangi

bir parametrenin değer değiştirmesi durumunda, kazanç değerinin değişmesi sağlanır.

Açık döngü kontrol sistemlerine göre kapalı döngü kontrol sistemlerini daha duyarlı hale getiren geri beslemenin özellikleri şöyle sıralanabilir:

- Sistemdeki parametrelerin dış ve iç etkiler nedeniyle değişiminin çıkış sinyali üzerindeki etkilerini azaltır.
- Bant genişliğini büyütür. Ancak buna karşılık, kazanç değişmesinin artmasıyla kararsızlıklar ve salınımlar meydana gelir.

Otomatik kontrol sistemi ile denetimi yapılan bir doğrusal sistemin birim basamak cevabı Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Şekilde gösterilen parametreler, sistemin geçici durumunu belirleyen parametrelerdir. Şekildeki gecikme zamanı ( $t_d$ ), cevabın son değerinin yarısına ilk defa ulaştığı ana kadar geçen zamanı; Yükselme zamanı ( $t_r$ ), cevabın son değerinin %10'dan %90'ına, %5'den %95'ine veya %0'dan %100'üne kadar ulaşması için geçen zamanı; Tepe zamanı ( $t_{max}$ ), cevabın ilk defa pik yaptığı noktaya erişmesi için geçen süreyi; Maksimum aşma ( $M_a$ ), cevap sinyalinin erişmesi gerektiği birim değerin üzerinde yaptığı maksimum aşma noktasıyla birim değer arasındaki farkı; oturma zamanı ( $t_s$ ) ise cevap eğrisinin müsaade edilebilir tolerans değer aralığında titreşim yapmaya başladığı ilk zamana kadar geçen süreyi gösterir.



Şekil 4.4: Doğrusal kontrol sisteminin birim basamak cevabı.

### 4.3 Orantı, İntegral ve Türev Kontrol

Üç temel kontrolün birleşiminden meydana gelen PID kontrolün transfer fonksiyonu şöyledir:

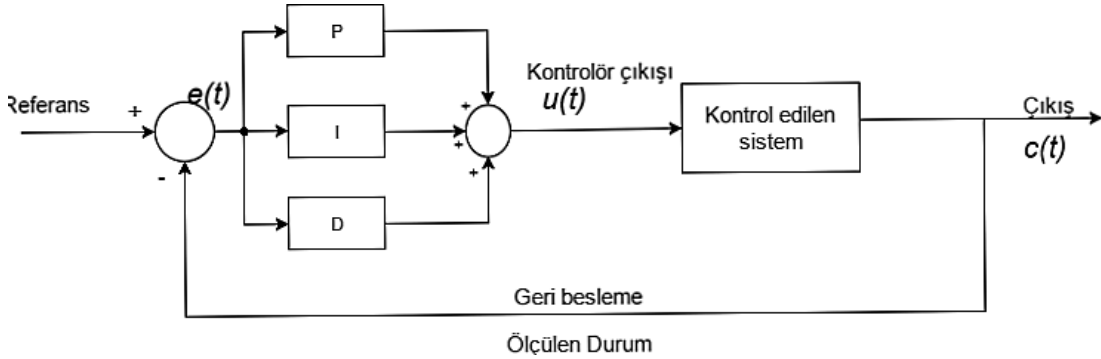
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + K_i \frac{1}{s} + K_d s \right) \quad (4.4)$$

PID kontrol çıkış işareti ise eşitlik (4.5)'te verilmiştir.

$$u(t) = K_p \left\{ e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (4.5)$$

Şekil 4.5'te blok diyagramı gösterilen, üç temel kontrolörün birleştiği PID kontrolde her parçanın ayrı ayrı üstünlükleri bulunmaktadır. İntegral kontrol, sistemdeki kalıcı-durum hataları giderirken, türev kontrol sistemin cevap hızını artırır. Böylelikle, düzgün bir şekilde ayarlanmış  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  katsayılarıyla, hızlı

cevap verebilen ve sıfır kalıcı-durum hatasına sahip düzgün bir kontrol organı elde edilmiş olur. Bu katsayıların yanlış ayarlanması sonucu, PID kontrolün diğerlerine kıyasla sahip olduğu üstün özellikleri kullanılmamış olacaktır.



Şekil 4.5: PID kontrollü sistemin blok diyagramı.

Aşağıda her bir kontrolde bazı detaylar maddeler halinde sıralanmıştır.

- P kontrolde orantı kazancı ( $K_p$ ) ayarlanarak, kontrol elemanının duyarlılığı arttırılabilir.
- PI kontrolde, denetlenen çıkış sinyalinde meydana gelebilecek kalıcı-durum hataları minimuma indirilebilir.
- PD kontrol kalıcı-durum hatasını sıfırlayamaz. Geçici-durum davranışını iyileştirebilir. Hata sinyalindeki ani değişimlere karşı hızlı cevap verme yeteneğine sahiptir. Fakat türev kontrolü sistemde ortaya çıkan parazitleri de kuvvetlendirir.
- PID kontrol, uzun ölü zaman gecikmelerini telafi edebilir. Bir taraftan kalıcı-durum hatasını sıfırlarken, diğer taraftan da sistemin geçici durum davranışını iyileştirmek için en hızlı cevabı verir.

#### 4.4 Kayan Kip Kontrol

Bu kısımda kayan kip kontrolün tanımı yapılmış, özellikleri incelenmiştir. ÇBAG'ye uygulanacak olan AKKK'nin temel yapısı incelenmiş ve kontrolör tasarımı yapılmıştır.

#### 4.4.1 Kayan Kip Kontrole Giriş

İlk olarak Rusya’da V.I. Utkin tarafından 1960’ların sonlarında çalışılmaya başlanan Variable Structure Control (VSC)’den türetilen KKK [44], doğrusal olmayan sistemin dinamiklerinin, kesikli bir şekilde anahtarlama ile yüksek hızlı, doğrusal olmayan geri beslemeyle önceden belirlenmiş kayan yüzey üzerinde tutulmasını sağlayan kontrol yöntemidir [45]. Dinamik sistemlerde, belirsiz parametrelere karşı kararlı duruşu, bozuculardan minimum etkilenme gibi davranışlarından dolayı, etkili bir sistem olarak görülmektedir [46, 47]. Pratik uygulamalarda çeşitli belirsizlikler oluşacağından dolayı, kontrol sisteminin dayanıklılığı çok önemlidir, bu yüzden kontrol sisteminde kararlılığı ve dayanıklılığı garantileyen KKK birçok doğrusal olmayan uygulamada tercih edilmektedir [48].

1970’lerin sonlarından itibaren KKK’nin ek özelliklerinin ortaya çıkması, kontrolör tasarımlarında önemli gelişmeler sağlanması sonucu, genel tasarım yöntemleri ortaya konmuştur. Ayrıca bu tasarımlar doğrusal olmayan, birden fazla giriş/çıkışlı, geniş ölçekli sistemlere uygulanmıştır [49]. Uzun süredir çalışmalarda kullanılan ve geliştirilmeye çalışılan KKK yöntemi son zamanlarda makine kontrollerinde başarılı sonuçlar almıştır [50–52]. Ancak, KKK’nin değişmezlik ve dayanıklılık gibi özelliklerinin yanında kontrolde çatırtı problemine yol açmaktadır [53]. Değişmezlik ifadesiyle sistemin parametrik belirsizliklere ve dış bozuculara karşı duyarsız olduğu anlatılmaktadır.

KKK yöntemi iki amaç üzerine temellendirilmiştir. İlk olarak sistem durumları kayma yüzeyi üzerine itilir ve daha sonra hatanın bu yüzeyde tutularak orijine gitmesi sağlanır. Kayma yüzeyine oturan sistem bundan sonra modelleme hataları veya dış bozuculardan etkilenmeyecektir. Kayma yüzeyi, durum değişkenlerinden türetilen bir fonksiyon olduğu için, durum değişkenleri kayma yüzeyi üzerinde doğrusal bağımlı hale gelirler. Bu durumda sistemin derecesi, bağımsız giriş sayısı kadar indirgenmiş olur ve derecesi indirgenmiş bir kontrol kuralı ile kontrol edilebilir. Giriş sayısı kendi derecesine eşit bir sistemde, sistem çıkışı birinci dereceden olur [54].

Kayan kip kontrolün birçok avantajının yanında bilinen iki adet sorunu vardır. Birincisi, çatırtı olarak adlandırılan, kontrol sinyalindeki yüksek frekanslı

salınımlardır. İkincisi ise eşdeğer kontrolün elde edilmesindeki zorluktur. Çünkü eşdeğer kontrol terimi hesaplanırken, kontrol edilecek sistemin tüm dinamiklerinin bu hesaba katılması gerekmektedir [55]. Kayan kip kontroldeki çatırtı problemini engellemek için literatürde birçok çalışma yapılmıştır. [56]'te bang-bang optimal kontrolünden etkilenen yazarlar ikinci derece kayan kip kontrolü uygulamışlardır. [57]'da anahtarlama yüzeyi etrafında sınırlandırma yapan yazarlar, bu sınırlar içerisinde bir kontrol sinyali uygulamışlardır. [58] ve [59]'da yazarlar adaptif bulanık kayan kip kontrolüyle çatırtı giderimini amaçlamışlardır. Eşdeğer kontrolü elde etmedeki zorluğa çözüm olarak ise en küçük kareler yöntemiyle kestirimler denenmiştir [60].

#### 4.4.2 Kayan Kip Kontrolör Tasarımı

Kontrol sisteminin tasarımında kullanılacak doğrusal olmayan sistemin durum vektörleri  $x \in \mathbb{R}^n$ , kontrol vektörü  $u \in \mathbb{R}^m$  ve  $f(x,t) \in \mathbb{R}^n$ ,  $B(x,t) \in \mathbb{R}^{n \times m}$  için eşitlik (4.6)'daki gibi gösterilir.

$$\dot{x}(t) = f(x,t) + B(x,t)u(x,t) \quad (4.6)$$

Bu sistemden, durum değişkenlerini ( $x$ ) içeren bir  $S$  dizi tanımlanabilir.

$$S = \{x(t) \mid \sigma(x,t) = 0\} \quad (4.7)$$

$$s(x,t) = [s_1(x,t), s_2(x,t), s_3(x,t), \dots, s_m(x,t)]^T \quad (4.8)$$

Durum değişkenlerinin kayan yüzeye ulaşması için eşitlik (4.9)'daki iki şartın sağlanması gerekmektedir [61].

$$\begin{aligned} s(x,t) &= 0 \\ \dot{s}(x,t) &= 0 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Bu şartlara göre tasarlanan kontrol kuralı ( $u$ ), eşdeğer bileşene ( $u_{eq}$ ) ve anahtarlama bileşenine ( $u_s$ ) sahip olacaktır.

$$u = u_{eq} + u_s \quad (4.10)$$

$$u_s = -k_f \operatorname{sgn}(s) \quad (4.11)$$
$$\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} 1, & s > 0 \\ 0, & s = 0 \\ -1, & s < 0 \end{cases}$$

Kontrol kuralındaki eşdeğer bileşen ( $u_{eq}$ ), kayma fonksiyonunun sıfıra ( $s = 0$ ) eşitlenmesiyle bulunur. Eşdeğer bileşen, durum değişkenlerinin kayma yüzeyine erişmesini, anahtarlama bileşeni ise yüzey üzerinde tutunmasını sağlar. Anahtarlama bileşenindeki  $k_f$  ise sabit bir pozitif katsayıdır.

Eşitlik (4.10)'da tanımlanan kontrol kuralı ( $u$ ), parametre katsayılarının değişimlerinden ve bozucularından etkilenmemesinden dolayı dayanıklıdır. Ancak, signum fonksiyonu içerdiği için kayma yüzeyinde yüksek frekansta anahtarlama görülecek ve istenmeyen çattırtı problemi oluşturacaktır. Literatürde bu çattırtı problemini gidermek amacıyla saturasyon, adaptasyon, hibrit kontrol yöntemleri gibi birçok çalışma yapılmıştır.

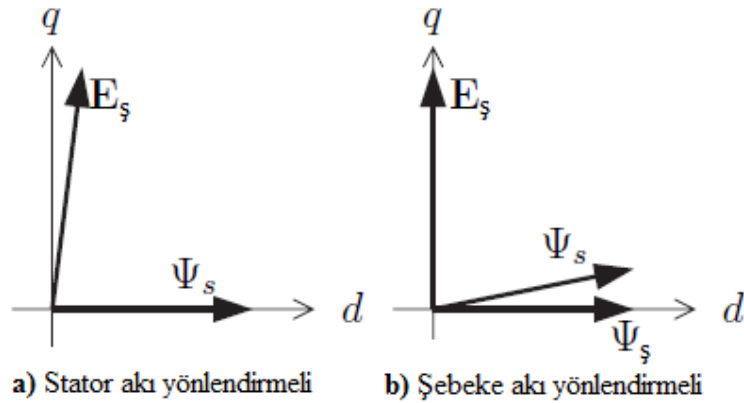
## 5. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN KONTROLÜ

Bu bölümde genel olarak ÇBAG için farklı kontrol sistemlerinin tasarımları ve uygulamalarından bahsedilmiştir. Stator akısı yönlendirme ve çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir. ÇBAG kontrolü için genel denklemler verilmiştir.

### 5.1 Referans Düzlemi

ÇBAG'nin rotor akımlarını vektör kontrol yöntemiyle kontrolü, referans düzleminin akı bağıntılarıyla aynı eksen üzerinde çakıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Yapılan birçok çalışmada, stator-akı alan yönlendirme [8] yöntemi veya şebeke-akı yönlendirme [21] yöntemi kullanılmıştır. Stator direncinin çok küçük olduğu düşünülürse, stator-akı yönlendirmesi, stator gerilimleriyle de gerçekleştirilir.

Senkron referans düzlemi stator akısıyla çakıştırılarak, rotor akımlarının statorun aktif ve reaktif güçleriyle doğrudan ilişkili olması sağlanır. Bu uyarlamayla rotor akımlarının kontrolüyle, stator ve şebeke arasındaki güç akışı kontrol sağlanır. Şekil 5.1'de şebeke gerilimi ( $E_s$ ) ile stator akı ( $\psi_s$ ) vektörleri örneği verilmiştir. Şekilde stator-akı ile şebeke-akı referans düzlemi karşılaştırıldığında şebeke gerilimi ile stator akısı arasında küçük bir açı olduğu görülmektedir.



Şekil 5.1: Şebeke gerilimi ve stator akısı vektör diyagramı.



## 5.2 Asenkron Generatörün Kontrolü

ÇBAG'de RTD ve ŞTD olmak üzere iki adet dönüştürücü bulunmaktadır. RTD'nin kontrolüyle statorun aktif ve reaktif güçlerini bağımsız bir şekilde denetlenmesini sağlarken, ŞTD'nin kontrolüyle de DC bara gerilimi rotor güçlerine bağlı olmaksızın sabit tutulabilmektedir. ŞTD aynı zamanda reaktif gücün ayarlanması için tasarlanabilir. RTD kontrolüyle rotor uç gerilimlerinin ve rotor frekansının istenen seviye aralığında tutulması sağlanır. Rüzgâr türbin kontrolörü ise kanatların açılarını kontrol ederek, türbinin rüzgârdan kazanacağı mekanik gücü belirleyebilmektedir.

ÇBAG'de kontrol işlemi, genellikle rotor akımlarını kontrol eden alan yönlendirmeli akı kontrol döngüsüyle sağlanmaktadır. Alan yönlendirme yöntemi olarak stator-akı veya şebeke-akı yönlendirme sistemlerinden biri kullanılabilir. Her iki referans düzleminde, rotor akımının  $q$  bileşeni üretilen torku veya aktif gücü belirlerken,  $d$  bileşeni ise stator terminal uçlarındaki reaktif gücü kontrol etmek için kullanılabilir.

Bu çalışmada, literatürde birçok çalışmada kullanılan stator akı yönlendirmeli sistem kullanılmıştır [8, 16]. Buna göre:

$$\begin{aligned}\psi_{sd} &= \psi_s \\ \psi_{sq} &= 0\end{aligned}\tag{5.1}$$

Eşitlik (5.1)'teki varsayım sonucu elektromanyetik tork denklemi (3.12), eşitlik (5.2)'deki şekli alacaktır.

$$T_{em} = N_p \frac{L_m}{L_s} \psi_{sd} I_{rq}\tag{5.2}$$

Stator akı denklemleri (3.5) ve (3.9) sadeleşerek şu şekli alır [27]:

$$\begin{aligned}\psi_{sd} &= L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ 0 &= L_s I_{sq} + L_m I_{rq}\end{aligned}\tag{5.3}$$

Şebekenin sabit gerilime sahip olduğu varsayılarak,  $\psi_s$  'nin sabit stator akısı olacağı kabul edilebilir. Ayrıca stator direnci, rüzgâr türbinlerinde genellikle ihmal edildiğinden dolayı [27];

$$V_{sd} = 0, V_{sq} = V_s, \psi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (5.4)$$

sonucuna ulaşılır. Eşitlik (5.3) kullanılarak, stator ve rotor akımları arasındaki bağıntı:

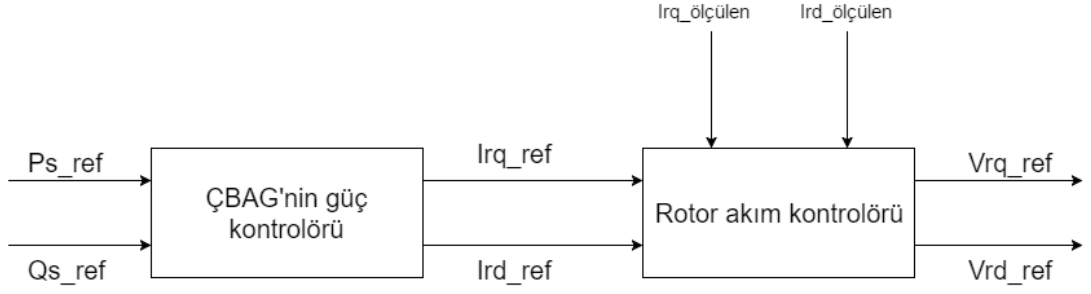
$$\begin{aligned} I_{sd} &= -\frac{L_m}{L_s} I_{rd} + \frac{\psi_s}{L_s} \\ I_{sq} &= -\frac{L_m}{L_s} I_{rq} \end{aligned} \quad (5.5)$$

şeklinde elde edilir. Stator aktif-reaktif güçleri eşitlik (5.3), (5.4) ve (3.10) kullanılarak eşitlik (5.6) elde edilir.

$$\begin{aligned} P_s &= -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s &= -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rd} + \frac{V_s \psi_s}{L_s} \end{aligned} \quad (5.6)$$

### 5.2.1 Rotor Tarafı Dönüştürücü Kontrolü

Generatörün rotor tarafındaki dönüştürücüleri statorun şebekeye verdiği aktif ve reaktif gücün kontrolünü sağlayan temel birimdir. Şekil 5.2'de blok diyagramı görülen RTD iki adet kontrolörden oluşmaktadır. ÇBAG'nin güç kontrolörü Şekil 5.2'nin ilk kısmında görüldüğü gibi rotor akımlarının  $d$  ve  $q$  referans değerlerini belirler.

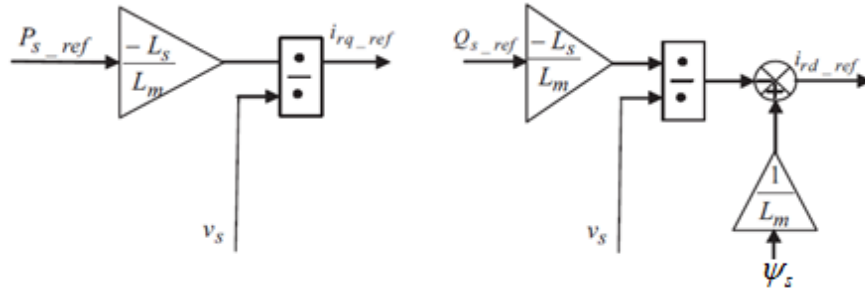


Şekil 5.2: Rotor tarafı dönüştürücü kontrolünün blok diyagramı.

Rotor kontrolü için referans akımlar eşitlik (5.6) kullanılarak, eşitlik (5.7)'deki gibi elde edilir.

$$\begin{cases} I_{rq\_ref} = -\frac{L_s}{V_s L_m} P_{s\_ref} \\ I_{rd\_ref} = \frac{\psi_s}{L_m} - \frac{L_s}{V_s L_m} Q_{s\_ref} \end{cases} \quad (5.7)$$

Eşitlik (5.7)'ye göre referans akımları belirleyen kontrolör blok diyagramı Şekil 5.3'te gösterilmiştir [13].



Şekil 5.3: Aktif ve reaktif güç kontrolörleri.

Şekil 5.2'nin ikinci kısmında görüldüğü üzere, senkron referans düzlemindeki rotor akımlarının  $q$  bileşeni aktif gücü kontrol ederken,  $d$  bileşeni ise reaktif gücü kontrol etmektedir. ÇBAG'nin kontrolünün düzgün bir şekilde yapılabilmesi için, rotor akımları ile rotor gerilimleri arasında bağıntı kurulması gerekmektedir [13]. Stator akımları denklemlerinin (eşitlik (5.5)), akı denklemleri eşitlik (3.5) ve eşitlik (3.9)'da yerine koyulması sonucu eşitlik (5.8) elde edilir.

$$\begin{aligned}\psi_{rd} &= (L_r - \frac{L_m^2}{L_s})I_{rd} + \frac{L_m V_s}{L_s \omega_s} \\ \psi_{rq} &= (L_r - \frac{L_m^2}{L_s})I_{rq}\end{aligned}\quad (5.8)$$

Eşitlik (5.8)'deki rotor akı denklemlerinin yerine eşitlik (3.9)'daki denklemler yazılırsa rotor gerilimleri (5.9)'daki gibi bulunacaktır.

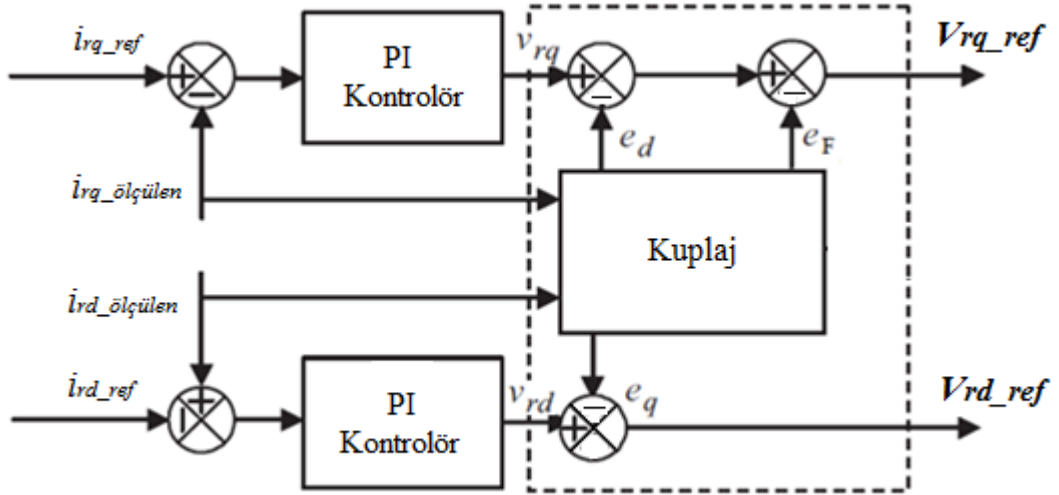
$$\begin{aligned}V_{rd} &= R_r I_{rd} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{dI_{rd}}{dt} - g(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \omega_s I_{rq} \\ V_{rq} &= R_r I_{rq} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} + g(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \omega_s I_{rd} + g \frac{L_m V_s}{L_s}\end{aligned}\quad (5.9)$$

Sürekli durum çalışmasında eşitlik (5.6) ve (5.9) kullanılarak eşitlik (5.10) elde edilir.

$$P_s = [V_{rq} - e_F - e_d] \left[ \frac{1}{R_r + N_p (L_r - \frac{L_m^2}{L_s})} (-\frac{L_m V_s}{L_s}) \right]\quad (5.10)$$

$$\begin{aligned}Q_s &= [V_{rd} - e_q] \left[ \frac{1}{R_r + N_p (L_r - \frac{L_m^2}{L_s})} (-\frac{L_m V_s}{L_s}) \right] \\ e_d &= g(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \omega_s I_{rd} \\ e_q &= g(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \omega_s I_{rq} \\ e_F &= g \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \omega_s \psi_{ds}\end{aligned}\quad (5.11)$$

Eşitlik (5.10)'daki  $e_d$  ve  $e_q$  ifadeleri  $d$ - $q$  eksenleri arasındaki bağıntı (kuplaj) terimleri olarak ifade edilebilir.  $e_F$  ise rotor hızına bağlı elektromotor kuvvetini göstermektedir. Bu terimler Şekil 5.4'deki gibi, blok halinde gösterilebilir.

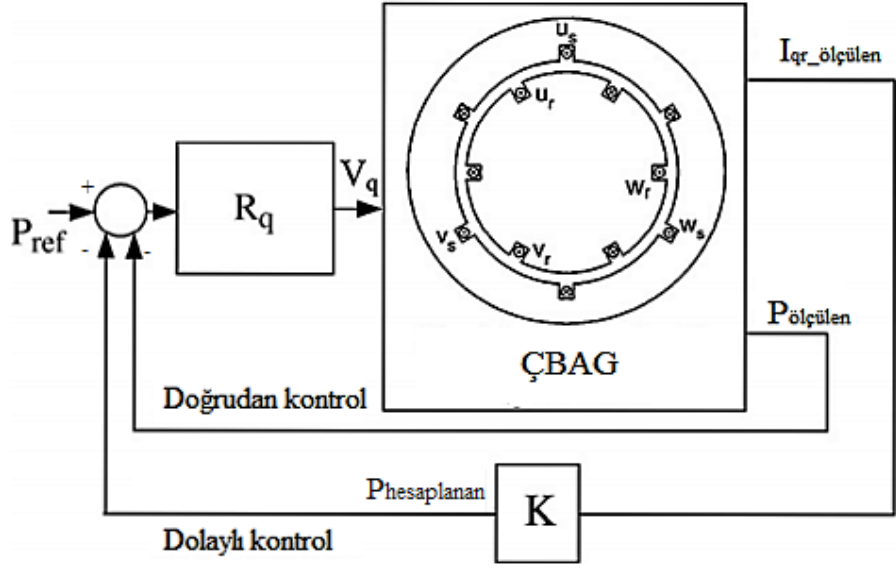


Şekil 5.4: Akım kontrolörünün blok diyagramı.

Rotor akımları (eşitlik (5.7)) ve rotor gerilimleri (eşitlik (5.9)) arasındaki bağıntıya göre, ÇBAG'nin güç değerlerinin iki PI kontrolör tarafından belirlendiği sistemin blok diyagramı Şekil 5.4'te verilmiştir.

### 5.2.2 Doğrudan ve Dolaylı Vektör Kontrol

Kontrolün amacı aktif ve reaktif güçleri, istenen referans değerlerine ulaştırmaktır. Rotor akımlarını hesaplamak için, dolaylı kontrol yöntemi kullanılabilir. Bu yöntem, referans aktif güç ( $P_{ref}$ ) ve referans reaktif güç ( $Q_{ref}$ ) değerlerini, sırasıyla  $-V_s(L_m/L_s)I_{rq}$  ve  $-V_s L_m I_{rd}/L_s + V_s^2/L_s \omega_s$  ile karşılaştırır (Eşitlik (5.6)). Şekil 5.5'te her iki yöntem için q ekseninin (aktif güç) kontrolü gösterilmiştir. Dolaylı kontrol yöntemi, rotor akımlarının hesaplanması ilkesine dayanır ve ÇBAG'nin kontrolünde daha iyi sonuçlar vermektedir [25].



Şekil 5.5: Doğrudan ve dolaylı vektör kontrol yönteminin esasları.

Şekil 5.5’de görüldüğü gibi doğrudan kontrol  $P_{ref}$  ile  $P_{ölçülen}$  değerini doğrudan karşılaştırıp referans gerilimi belirlemektedir. Fakat dolaylı kontrolde  $P_{ref}$  ile hesaplanan güç değeri ( $P_{hesaplanan}$ ) karşılaştırılmaktadır.  $P_{hesaplanan}$  değeri, ölçülen q akımından ( $I_{qr\_ölçülen}$ ) elde edilmektedir.

Bir sonraki bölümde, simülasyon çalışmaları hakkında bilgi verilmiştir.

## 6. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Otomatik kontrol yöntemlerinde PID ve KKK yaygın olarak tercih edilmektedir. Yapılan çalışmada ÇBAG'nin aktif ve reaktif güçlerinin kontrolü için PI kontrolör ve AKKK tasarımı yapılmıştır. LabVIEW ortamında simülasyon düzeneği hazırlanan bu çalışmada, gerekli kontrolör parametreleri kolayca değiştirilebilir ve parametrelerin sistem üzerindeki etkileri anlık olarak görülebilmektedir. Yapılan çalışmayla KKKK'ye göre AKKK'nin üstünlükleri araştırılmıştır. Birbirinden bağımsız iki adet kontrolörle ÇBAG'nin aktif ve reaktif güç kontrolündeki performansının artırılması amaçlanmıştır. Bu bölümde tasarlanan kontrolörün LabVIEW ortamındaki çizimleri ve işlevleri, ÇBAG'nin AKKK tasarımı ve PI yöntemi ile karşılaştırılması verilmiştir.

### 6.1 LabVIEW Programının Yapısı

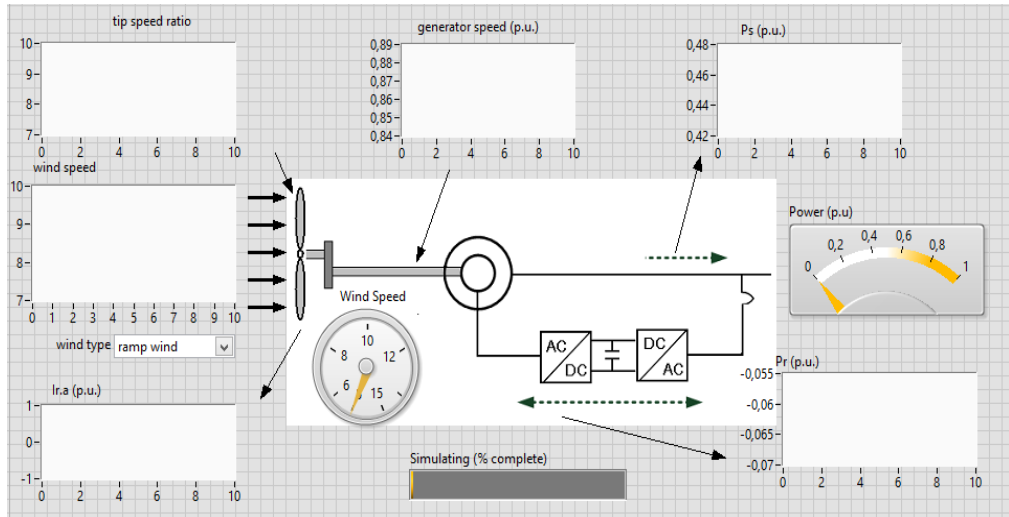
Yüksek hıza sahip, VHDL kodlaması veya board tasarımı yapılmadan, grafiksel kodlamayla sistem tasarımı yapılabilen [62], programlamada kolaylık ve tasarımda esneklik sağlamasından dolayı son zamanlarda tercih edilen National Instrument (NI) LabVIEW programı kontrol sistemlerinin tasarımında kullanılan en profesyonel gömülü yazılım/donanım platformlarından birisidir [63]. LabVIEW programıyla kullanıcı, gelişmiş sinyal işleme, robotik uygulamaları, gerçek zamanlı uygulamalar, kontrol sistemleri gibi yüksek hızlı donanım güvenilirliği isteyen uygulamaları kolaylıkla yapabilir [64, 65].

LabVIEW, komut satırları kullanılmasına izin veren bloğun yanında ikonların birbirlerine bağlanmasıyla uygulama oluşturulabilecek grafiksel bir programlama dilidir. Kolay kullanıma ve güçlü bir program geliştirme ortamına sahiptir. Kaynak kodu problemlerini çözmek için şematik ve akış diyagramına benzeyen blok diyagramı yaklaşımı kullanır. Genişletilmiş, özel uygulamalar yapabilmek için ekstradan eklenebilecek birçok yazılım araç kutuları eklentisi mevcuttur.

İki kısımdan oluşan LabVIEW programında, ön panel kullanıcı ara yüzüdür. Bu panelde, operatörün sisteme değerler girmesine ve çıktıları görmesine imkân sağlar. Blok paneli ise arka planda sanal enstrümanların çalıştırıldığı paneldir.

## 6.2 Simülasyon Düzenineğin Oluşturulması

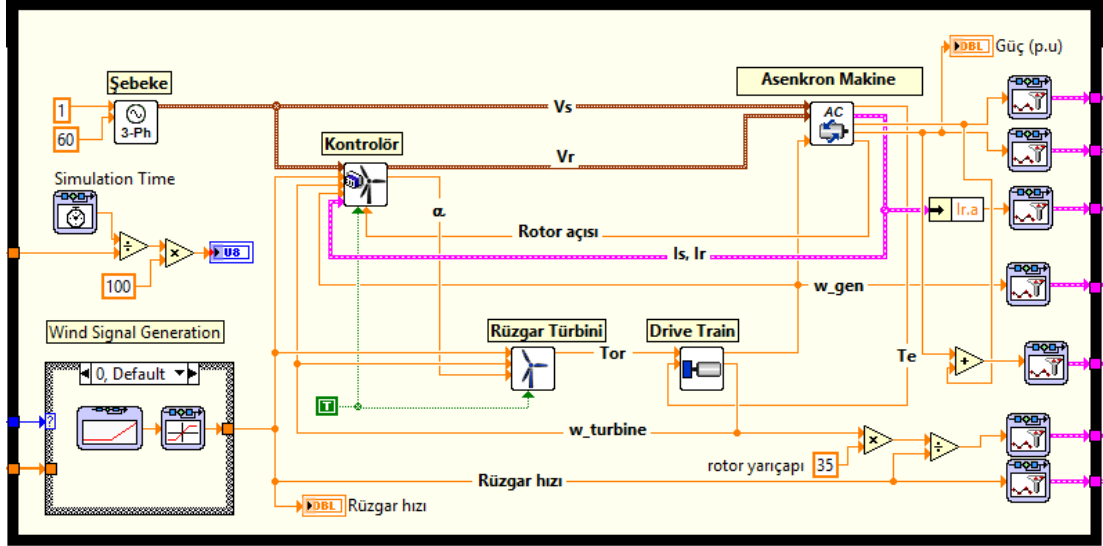
Bu çalışmada ele alınan ÇBAG'li rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin topolojisinden daha önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Bu sistemde, stator sargıları şebekeye bağlanırken, senkron altı hızlarda, iki adet dönüştürücüden oluşan güç elektroniği birimi ise şebeke ile makine arasındaki güç akışını sağlamaktadır. Düşünülen rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin LabVIEW ortamında hazırlanan simülasyon düzenineğinin kullanıcı arayüzü ön paneli Şekil 6.1' de verilmiştir.



Şekil 6.1: Rüzgâr enerji dönüşüm sistemi LabVIEW ön panelinin görünümü.

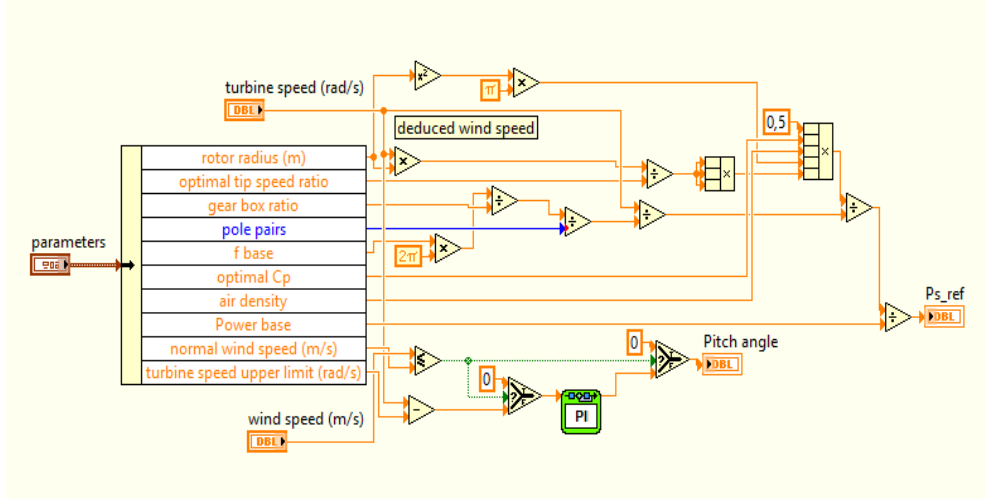
Sistemde bulunan rüzgâr türbini, dişli kutusu, asenkron makine ve kontrolör parçalarının LabVIEW blok diyagramında çizimi Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Bu çalışmada rüzgâr türbininden üretilen enerjinin kontrolünü kolaylaştırması nedeniyle bağımsız kontrol yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemle göre dönüştürücülerden sağlanan rotor uç gerilimleri ile stator aktif ve reaktif güçleri arasındaki eşitliklere göre bağıntı kurulmuştur [25]. Ayrıca sistemdeki dişli kutusu dairesel hızı veya torku azaltabilir veya arttırabilir.





Şekil 6.2: Rüzgâr enerji dönüşüm sistemi LabVIEW blok diyagramı.

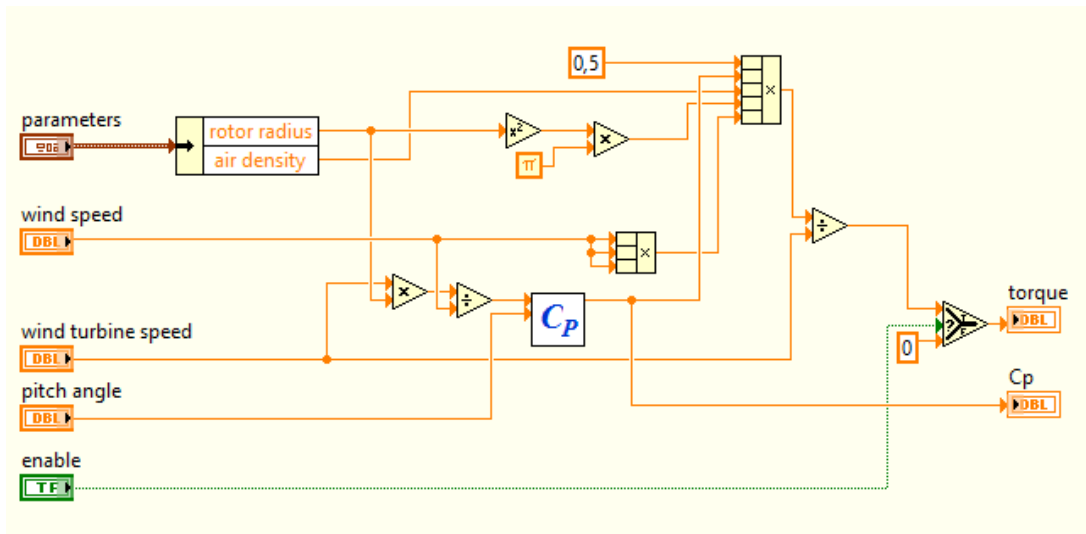
Rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin LabVIEW blok diyagramında görülen kontrolör bloğunda iki adet kontrolör bulunmaktadır. Bu kontrolörlerden ilki olan Master Kontrolör'ün tasarımında, literatürde çokça kullanılan, verilen rüzgâr hızında maksimum gücü üretecek, optimum rotasyonel hıza ulaşmak için maksimum güç noktası takip (MGNT) tekniği kullanılmıştır [66]. Üretici tarafından belirlenen türbin özelliklerine bağımlı olarak yapılan bu ayarlama, türbini her rotasyonel hızda maksimum güç üretimine yöneltecek şekilde tasarlanmaktadır. MGNT'den elde edilecek  $C_p$  katsayısı, rotor uç hızının rüzgâr hızıyla oranına ve türbin kanat açısına bağlıdır [34]. PI kontrolör ile tasarlanan açı kontrol sistemiyle de türbin hızının, üst limite ulaştığı anda türbin açısının değiştirilerek sistemin zarar görmesi engellenecektir, ayrıca optimum kanat uç hızı oranına ulaşılmış olacaktır. Şekil 6.3'de bu tasarımın blok diyagramı görülmektedir. Bloğun çıkışında türbinin üreteceği maksimum güç referansı elde edilmektedir.



Şekil 6.3: LabVIEW’de PI kontrolör ile açı kontrol sistemi.

Kontrolör bloğunun içerisindeki bir diğer kontrolör ise girdi olarak güç referanslarını alan, çıktı olarak ise rotor uç gerilimlerini belirleyen, yani sistemdeki asıl kontrol işlevini gören bloktur. Referans aktif güç değeri master kontrolörden alınan aktif güç değeri olmakla beraber, referans reaktif güç değeri ise kullanıcının el ile girebileceği sayısal girişten meydana gelmektedir. Alınan her iki girdiye göre rotorun referans akımları belirlenmektedir.

Rüzgar enerji dönüşüm sisteminde (Şekil 6.3) görülen rüzgar türbin bloğunun genişletilmiş hali Şekil 6.4’de görülmektedir.  $C_p$  katsayısı bu blok içerisinde hesaplanmaktadır.



Şekil 6.4: Rüzgâr türbin bloğu.

### 6.3 Adaptif Kayan Kip Kontrol ile ÇBAG'nin Aktif-Reaktif Güç Kontrolü

Literatürde ÇBAG'nin kontrolü için genellikle PI kontrolörle dolaylı vektör kontrol yöntemi kullanılmıştır. Pratik bir uygulama olmasından dolayı çokça tercih edilen bu yöntemde, dezavantaj olarak parametrelerin anlık değişimleri sonucu kontrolörün kararlılığını ve performansını kaybetmesi görülmektedir. Bu noktada devreye giren kayan kip kontrol, parametrelerdeki belirsizliklere ve hızdaki değişimlere karşı kararlı duruşundan dolayı tercih edilmiştir. Kayan kip kontrolün süreksiz kontrol parçasının istenmeyen çattırtı sorunu çıkartıyor olması, bu yöntemin en büyük dezavantajıdır. Bu çalışmada, çattırtı problemini gidermek, çıkış gücündeki dalgalanmaları azaltmak ve kontrolörün performansını artırmak için AKKK yöntemi uygulanmıştır.

ÇBAG'nin kontrolünün doğru bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için rotor akımlarıyla rotor gerilimleri arasında ilişki kurulmasının gerekliliği bölüm 5'te vurgulanmıştır. Ayrıca bu ilişkiler sonucu eşitlik (5.9)'daki gibi rotor uç gerilimlerinin, eşitlik (5.10)'daki gibi de aktif ve reaktif güç denklemlerinin elde edildiği belirtilmiştir.

ÇBAG'nin doğru bir şekilde kontrol edilebilmesi için, rotor akımlarıyla rotor uç gerilimleri arasındaki bağıntının kurulması gerekmektedir. Eşitlik (5.5) kullanılarak stator akımları ile rotor akımları arasında bağıntı kurulur ve stator akımlarının akı denklemlerinde yerlerine yazılması sonucu, eşitlik (6.1)'deki denklemler elde edilir.

$$\left. \begin{aligned} i_{sd} &= -\frac{L_m}{L_s} i_{rd} + \frac{\psi_s}{L_s} \\ i_{sq} &= -\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \\ \psi_{rd} &= \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_{rd} + \frac{L_m V_s}{L_s \omega_s} \\ \psi_{rq} &= \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_{rq} \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

KKKK yönteminde kontrol kuralının bir adet eşdeğer kontrol sinyali ( $u_{eq}$ ), bir adette anahtarlama kontrol parçasından ( $u_s$ ) oluştuğu bölüm 4.4'te detaylı bir şekilde anlatılmıştır ( $u = u_{eq} + u_s$ ). Bu kontrol kuralının tasarımında, kayma yüzeyleri referans giriş sinyalleriyle, hesaplanan çıkış sinyalleri arasındaki farka göre belirlenmiştir [48]. Aktif güç, reaktif güç, rotor akımının  $d$  ve  $q$  değerleri olmak üzere dört adet hata sinyali vardır.

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= P_{sref} - P_s \\ e_2 &= Q_{sref} - Q_s \\ e_3 &= i_{rq\_ref} - i_{rq} \\ e_4 &= i_{rd\_ref} - i_{rd} \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

$n=1$  için kayma yüzeyleri eşitlik (6.3)'teki şekli alır.

$$\begin{bmatrix} S(P) \\ S(Q) \\ S(i_{rq}) \\ S(i_{rd}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{sref} - P_s \\ Q_{sref} - Q_s \\ i_{rq\_ref} - i_{rq} \\ i_{rd\_ref} - i_{rd} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Kayan yüzeylerin türevleri alınıp güç denklemleri (5.6) yerine yazılırsa eşitlik (6.4)'deki denklemler elde edilir [27].

$$\begin{bmatrix} \dot{S}(P) \\ \dot{S}(Q) \\ \dot{S}(i_{rq}) \\ \dot{S}(i_{rd}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{P}_{sref} + v_s \frac{L_m}{L_s} \dot{i}_{rq} \\ \dot{Q}_{sref} + v_s \frac{L_m}{L_s} \dot{i}_{rd} - \frac{v_s^2}{L_s \omega_s} \\ \dot{i}_{rq\_ref} - \dot{i}_{rq} \\ \dot{i}_{rd\_ref} - \dot{i}_{rd} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Rotor uç gerilim denklemlerinden (eşitlik (5.9)) elde edilen d-q eksen akımlarının türevleri  $A = \frac{1}{\sigma} \frac{1}{T_r}$ ,  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$  için  $\dot{i}_{rq}$  ve  $\dot{i}_{rd}$  ifadeleri eşitlik (6.4)'de yerlerine yazılırsa eşitlik (6.5) elde edilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{S}(P) \\ \dot{S}(Q) \\ \dot{S}(i_{rq}) \\ \dot{S}(i_{rd}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{P}_{sref} + v_s \frac{L_m}{L_s} \left( -A(i_{eq}^{rq} + i_{rq}^n) - g\omega_s i_{rd} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{rq} - \frac{L_m g V_s}{L_s L_r \sigma} \right) \\ \dot{Q}_{sref} + v_s \frac{L_m}{L_s} \left( -\frac{1}{\sigma T_r} (i_{rd}^{eq} + i_{rd}^n) + g\omega_s i_{rq} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{rd} \right) - \frac{v_s^2}{L_s \omega_s} \\ \dot{i}_{rq\_ref} + A i_{rq} + g\omega_s i_{rd} - \frac{1}{\sigma L_r} (V_{rq}^{eq} + V_{rq}^n) + \frac{L_m g V_s}{L_s L_r \sigma} \\ \dot{i}_{rd\_ref} + \frac{1}{\sigma T_r} i_{rd} - g\omega_s i_{rq} - \frac{1}{\sigma L_r} (V_{rd}^{eq} + V_{rd}^n) \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Eşdeğer kontrol bulunurken sürekli durumda ve kayma sırasında, kayma yüzeyinin, kayma yüzeyi türevinin ve anahtarlama fonksiyonunun sıfıra eşitlenerek işlem yapıldığı bölüm 4.5.5'te anlatılmıştır. Kayma yüzeyleri vektörünün sıfıra eşitlenmesi sonucu ( $\dot{S} = 0$ ), eşdeğer kontrol vektörü şu şekilde elde edilir.

$$\begin{bmatrix} i_{eq}^{rq} \\ i_{eq}^{rd} \\ v_{eq}^{rq} \\ v_{rd}^{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_s}{AV_s L_m} \dot{P}_{sref} - \frac{g\omega_s}{A} i_{rd} + \frac{V_{rq}}{R_r} - \frac{L_m g V_s}{R_r L_s} \\ \dot{Q}_{sref} \frac{\sigma L_r L_s}{V_s R_r L_m} + g\omega_s \sigma L_r i_{rq} + \frac{T_r V_{rd}}{L_r} - \frac{\sigma T_r V_s}{L_m \omega_s} \\ \sigma L_r (\dot{i}_{rq\_ref} + A i_{rq} + g\omega_s i_{rd}) + \frac{L_m g V_s}{L_r} \\ \sigma L_r \left( \dot{i}_{rd\_ref} + \frac{1}{\sigma T_r} - g\omega_s i_{rq} \right) \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Erişim sırasında  $S(x)\dot{S}(x) \leq 0$  şartının sağlanması gerekmektedir. Bu koşulun sağlanması için takip eden eşitlik oluşturulmuştur.

$$\begin{bmatrix} \dot{S}(P) \\ \dot{S}(Q) \\ \dot{S}(i_{rq}) \\ \dot{S}(i_{rd}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{AL_m V_s}{L_s} i_{rq}^n \\ -\frac{L_m V_s}{\sigma T_r L_s} i_{rd}^n \\ -\frac{1}{\sigma L_r} V_{rq}^n \\ -\frac{1}{\sigma L_r} V_{rd}^n \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

Sonuç olarak anahtarlama fonksiyonlarının takip eden eşitlikteki gibi olacağı görülecektir.

$$\begin{bmatrix} i_{rq}^s \\ i_{rd}^s \\ V_{rq}^s \\ V_{rd}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 i_{rq} \text{sign}(S(P)) \\ K_2 i_{rd} \text{sign}(S(Q)) \\ K_3 V_{rq} \text{sign}(S(i_{rq})) \\ K_4 V_{rd} \text{sign}(S(i_{rd})) \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Buradaki signum anahtarlama fonksiyonunun eşitlik (6.9)'daki gibi olduğu bilinmektedir.

$$\text{sign}(s) = \begin{cases} 1, & \text{if } s > 0, \\ 0, & \text{if } s = 0, \\ -1, & \text{if } s < 0. \end{cases} \quad (6.9)$$

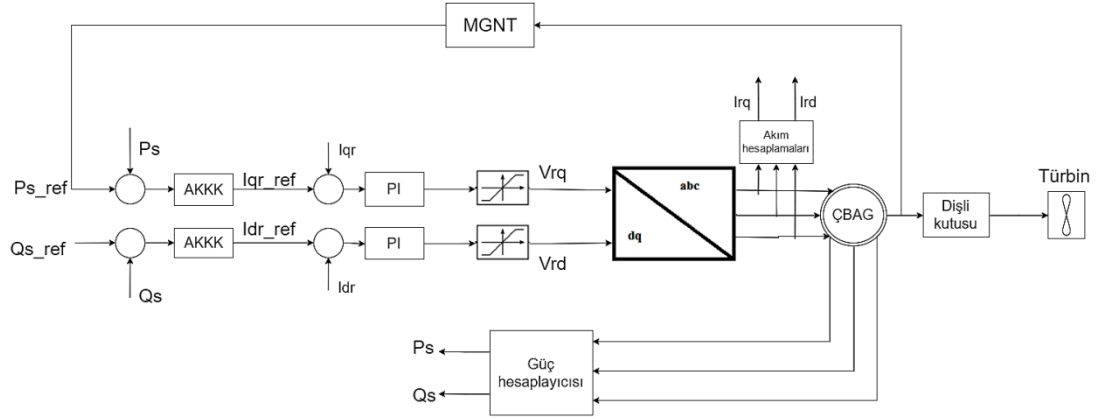
Klasik kayan kip kontrolde anahtarlama fonksiyonunun ( $u_s$ ) kazanç katsayısının ve üst limitinin doğru bulunması oldukça zor bir işlemdir. Çünkü bu katsayısı hem çatırtı problemini azaltma yetisine hem de performansa etkisi yönüyle oldukça önemlidir. Adaptif kayan kip kontrol yöntemiyle bu fonksiyon modifiye edilir. Böylelikle üst limit ve kazanç katsayısının bilinmesine gerek kalmadan, kontrol kazancına adaptasyon özelliği kazandırılmış olur. Modifiye edilmiş bu kontrol kuralında anahtarlama fonksiyonu  $u_s = u_{as}$  şeklinde tanımlanmaktadır [67].

$$\begin{bmatrix} i_{rq}^{as} \\ i_{rd}^{as} \\ V_{rq}^{as} \\ V_{rd}^{as} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \text{sign}(S(P)) \\ Y_2 \text{sign}(S(Q)) \\ Y_3 \text{sign}(S(i_{rq})) \\ Y_4 \text{sign}(S(i_{rd})) \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Buradaki ayarlanabilir kazanç katsayısı  $Y$  ile belirtilmiştir. Bu değer kayma yüzeyine ve adaptasyon kazancına bağlıdır. Adaptasyon kazancı katsayısı ( $\alpha$ ) eşitlik (6.11)'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha_1} |S(P)| \\ \frac{1}{\alpha_2} |S(Q)| \\ \frac{1}{\alpha_3} |S(i_{rq})| \\ \frac{1}{\alpha_4} |S(i_{rd})| \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

Adaptasyon kazancı  $\alpha > 0$  olduğu koşulu sağlanmalıdır. Adaptasyon hızı  $\Upsilon$ ,  $\alpha$  tarafından ayarlanmaktadır. Ayrıca uygun bir adaptasyon kazancı seçimiyle kontrol sinyalindeki çattırtılar giderilmekte ve performans arttırılmaktadır. Şekil 6.5’de referans akımları AKKK tarafından, rotor uç gerilimleri PI kontrolör tarafından belirlenen ÇBAG’li rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı verilmiştir.

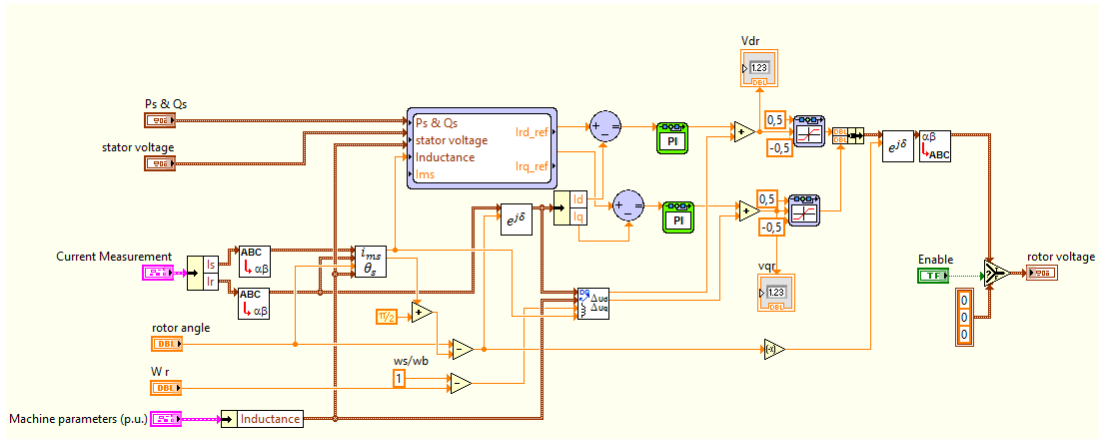


Şekil 6.5: ÇBAG’nin AKKK’li kontrol blok diyagramı.

Şekil 6.5’te blok diyagramı görülen sistemde MGNT bloğundan gelen referans maksimum aktif güç değeriyle anlık aktif güç değeri karşılaştırılarak AKKK kontrolöre girilir. Kontrolör çıkış sinyali olarak rotor referans akımları elde edilmiştir. Anlık akımlarla karşılaştırılan bu referans akımlar PI kontrolörle rotor uç gerilimlerine çevrilirler. Rotor uçlarında herhangi bir aşımı engellemek amacıyla bu gerilimler sınırlandırıcılardan geçirilir. Daha sonra dq\abc dönüşümü yapılarak rotora 3 faz gerilim uygulanmaktadır.

## 6.4 PI Kontrol ile ÇBAG'nin Aktif-Reaktif Güç Kontrolü

Bölüm 5.2'de ÇBAG'nin istenen güç değerlerine göre, referans akımların nasıl elde edileceği gösterilmişti. Aktif güç kontrolünde rotor akımının q bileşeni, reaktif güç kontrolünde ise rotor akımının d bileşeni etkilidir. Bu iki akımın ayrı ayrı denetlenerek, aktif ve reaktif gücün bağımsız kontrolü gerçekleştirilmiş olur. Şekil 6.6'de iki adet PI kontrolör ile gerçekleştirilen bu denetimde, MGNT'den gelen maksimum aktif güç değerine ve birim güç faktörüne göre referans akımlar belirlenmektedir. Bu referans akımları ile anlık rotor akımları farkları sonucu hatalar elde edilir. PI kontrolör ile düzeltilen bu hatalar gerilime dönüştürülür. Daha sonra kuplaj gerilimleriyle toplanarak rotora uygulanır. Ancak rotor uçlarına uygulanacak bu gerilimler, aşımaları engellemek amacıyla sınırlandırılmıştır.



Şekil 6.6: ÇBAG'nin PI ile aktif-reaktif güç kontrolü.

## 6.5 Simülasyon Sonuçları

Simülasyon çalışmaları gerçekleştirilirken ilk aşamada iki rüzgâr durumu ele alınmıştır. Her iki durumda, rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG için tasarlanmış kontrolörlerin performansları değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalarda AKKK yönteminin kullanılmasıyla çatırtı probleminin giderimi, çıkış gücündeki dalgalanmaların azaltılması, dolayısıyla kontrolör performansının artırımı amaçlanmıştır. Türbülanslı rüzgâr hızı ve adım değişimli rüzgâr hızlarında karşılaştırılan AKKK ile KKKK'nin sonuçları grafiklerle verilmiştir. Diğer bir çalışmayla ilk sistemde kullanılan MGNT devre dışı bırakılarak, referans güçlerin el



ile girilmesine olanak sağlanmıştır. Bu kısımda rotor uç gerilimlerinin değerleri AKKK ve KKKK tarafından belirlenmiştir. Her iki çalışmanın sonuçları elde edilerek PI kontrolörlü sistem ile karşılaştırılmıştır.

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminde baz değerler kullanılmıştır. Kullanılan baz değerleri, ÇBAG'nin parametreleri, türbin özellikleri takip eden tablolarda verilmiştir.

**Tablo 6.1:** Türbin özellikleri

Kanat yarıçapı	35 cm
Hava yoğunluğu	1,25 kg/m <sup>3</sup>
Türbin üst hız limiti	2,82 rad/sn
Optimal Cp	0,59
Dişli kutusu dönüştürme oranı	55

**Tablo 6.2:** Kullanılan türbin baz değerleri

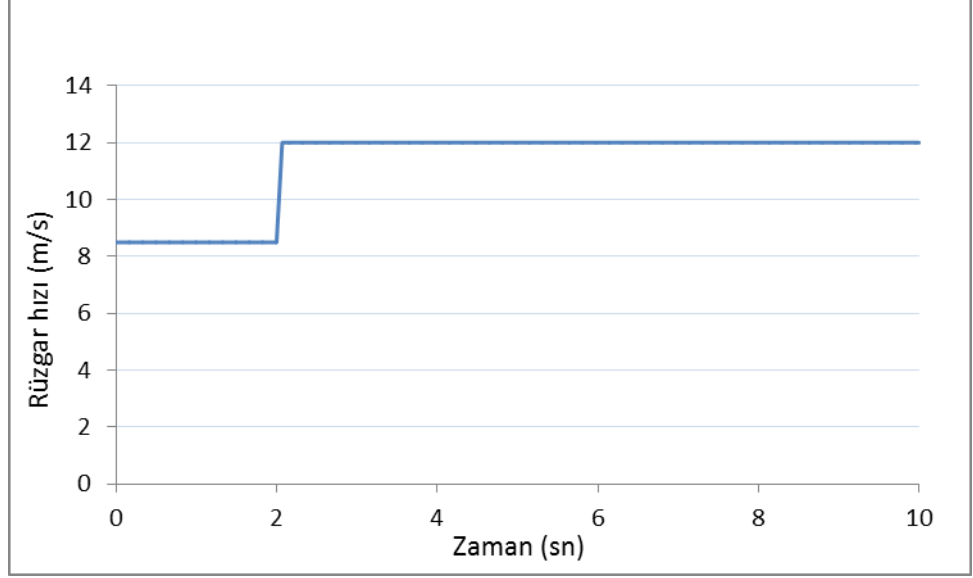
Parametre	Baz değeri
Güç	2227,5 W
f	60 Hz
Tork	1200 Nm

**Tablo 6.3:** ÇBAG'nin parametreleri ve değerleri

Parametre	Değer
Rs	0,435 $\Omega$
Rr	0,816 $\Omega$
Lm	0,06931 H
L <sub>ls</sub>	0,002 H
L <sub>lr</sub>	0,002 H
Np	3

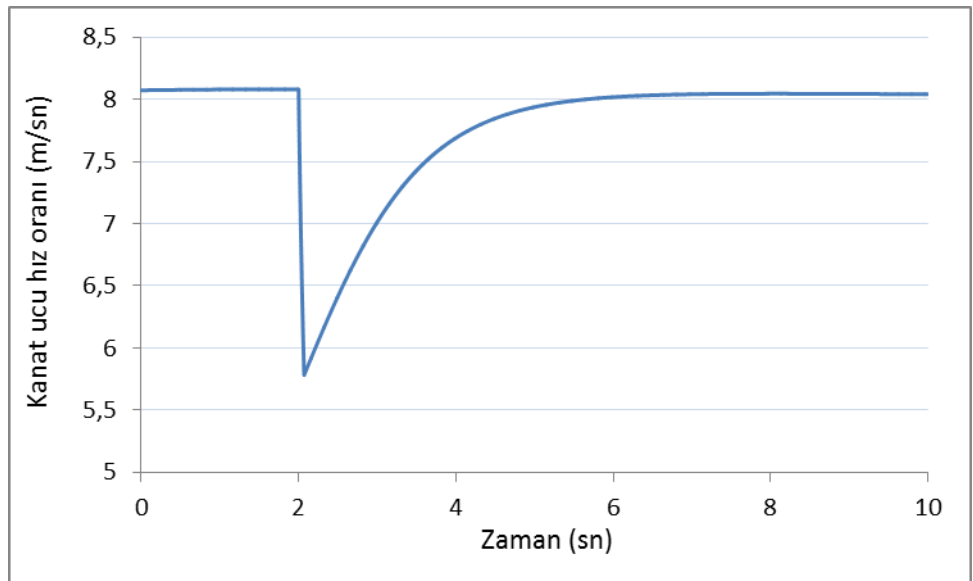
## 6.5.1 Maksimum Güç Noktası Takipli Sistem

*Durum I: Rüzgâr hızının basamak değişimi*



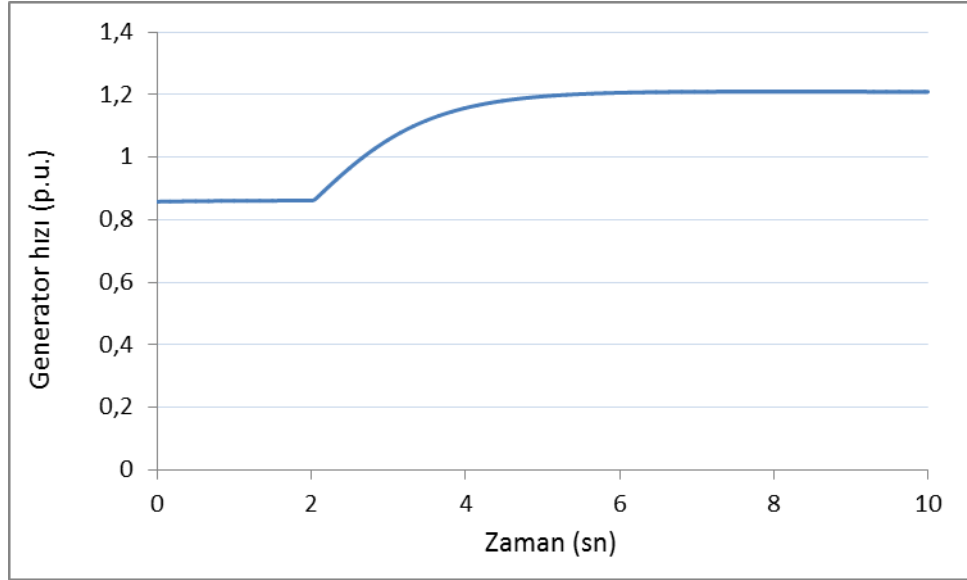
Şekil 6.7: Rüzgâr hızının basamak değişimi.

Şekil 6.7’de sabit hızdaki rüzgâr hızının grafiği verilmiştir. Sıfırinci ve ikinci saniyede arasında  $8,5\text{ m/s}$ ’lik hıza sahip rüzgâr, ikinci saniyeden sonra basamak şeklinde  $12\text{ m/s}$ ’lik hıza ulaşmaktadır. Bu rüzgâr koşulu altında yapılan simülasyon sonucu grafikler elde edilmiştir.



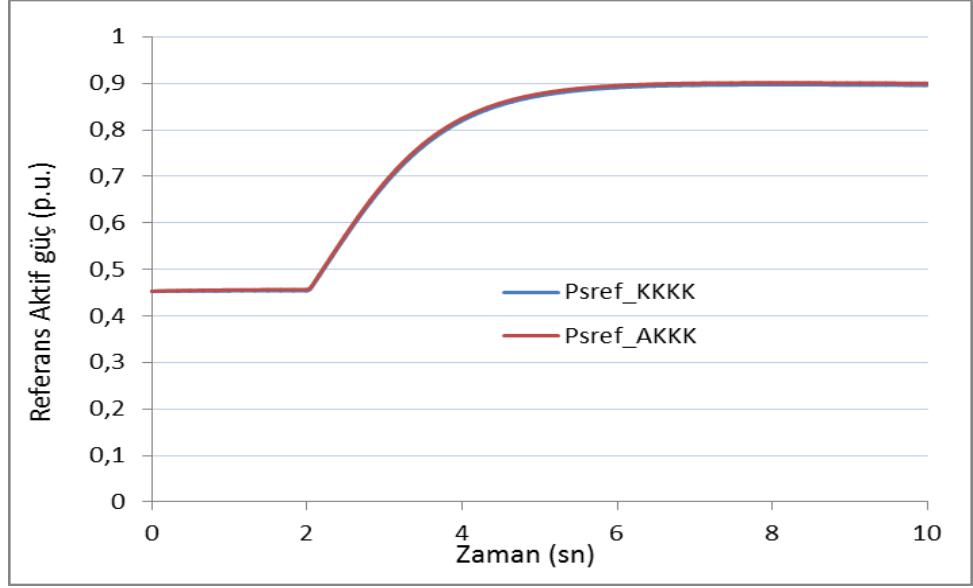
Şekil 6.8: Kanat ucu hız oranı değişimi.

Rüzgâr hızındaki ani artışla paralel olarak maksimum güç noktasını takip için kanat ucu hız oranının (KHO) optimum değeri olan  $8m/s$  'yi başarılı bir şekilde izlemiştir (Şekil 6.8). KHO'nun optimum değerini izlemesi için generatör hızı değiştirilerek, maksimum güç referansı elde edilmeye çalışılmıştır (Şekil 6.9).



**Şekil 6.9:** Basamak değişimli rüzgâr hızındaki generatör hızı.

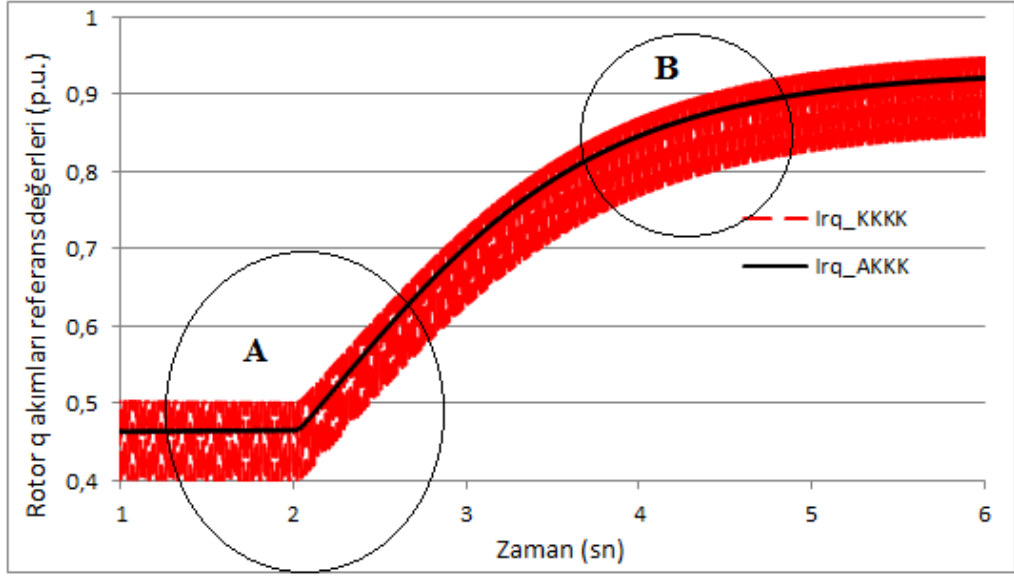
Belirtilen rüzgâr hızına göre, kanat uç oranına göre bulunan referans maksimum aktif güç değerleri, rüzgâr hızlarının ve MGNT için tasarlanan PI kontrolörün aynı olmasından dolayı, her iki kontrolör tipi için aynı çıkmıştır (Şekil 6.10).



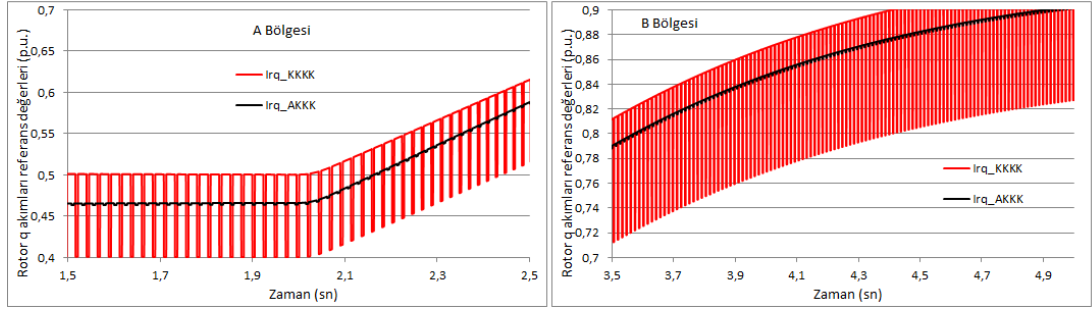
**Şekil 6.10:** Basamak değişimli rüzgâr hızındaki MGNT'den el edilen referans aktif güç değişimleri.

Rotor akımlarının q bileşeninin aktif gücü kontrol ettiği daha önceki bölümlerde verilmişti. Dolayısıyla referans aktif güç değerlerine göre KKKK ve AKKK tarafından belirlenen referans rotor q bileşeni akımlarının grafiği Şekil 6.11'deki gibi bulunmuştur.

Şekil 6.11a'da, gösterilen A bölgesinin büyütölmüş hali, Şekil 6.11b'de verilmiştir. Yine Şekil 6.11a'da gösterilen B bölgesinin büyütölmüş hali, Şekil 6.11c'de verilmiştir.



a) Rotor q akımları referans değerleri



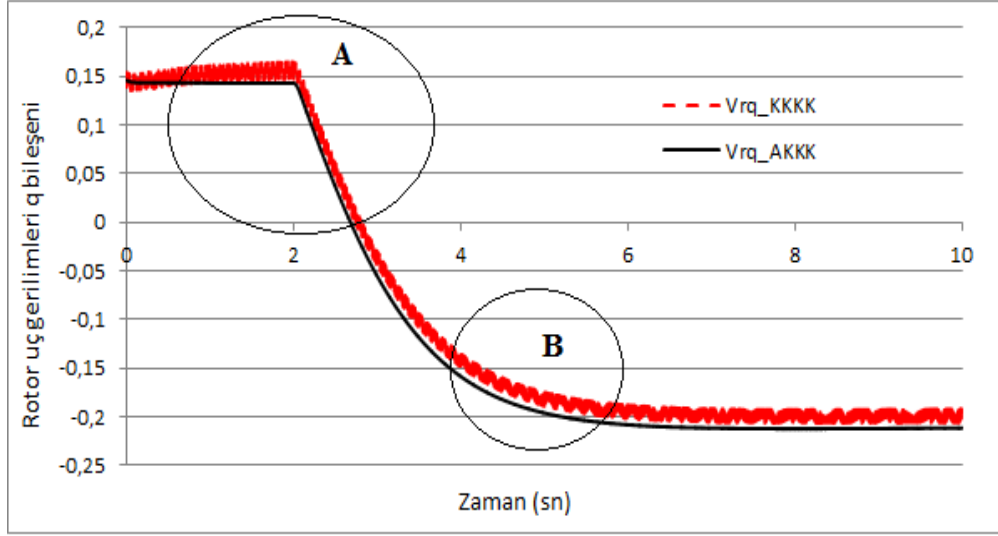
b) A bölgesi

c) B bölgesi

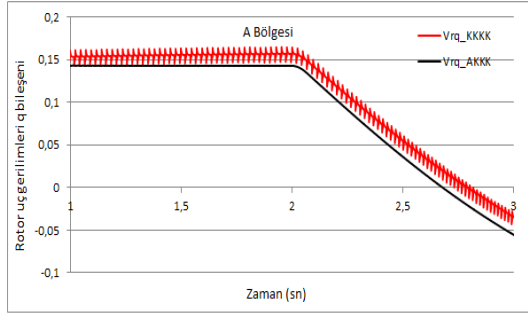
Şekil 6.11: Basamak değişimli rüzgâr hızındaki referans rotor akımları q bileşenleri.

KKKK ile elde edilen referans akımda, AKKK'ye göre çatırtı probleminin yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Belirlenen bu akımlara göre rotor terminal uç gerilimleri iki adet PI kontrolör tarafından belirlenmektedir.

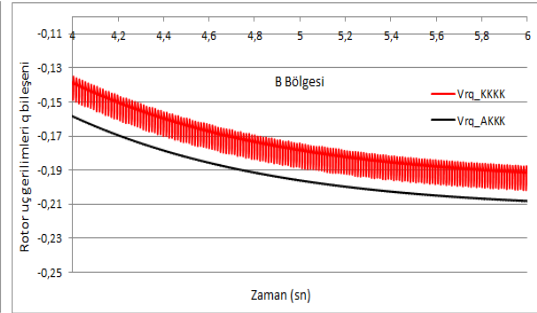
KKKK ve AKKK kontrol uygulamasında basamak değişimli rüzgâr hızındaki rotor uç gerilimlerinin q bileşenlerine ait veriler Şekil 6.12'de sunulmuştur. Şekildeki A ve B bölgelerinin büyütülmüş durumları Şekil 6.12b ve 6.12c'de verilmiştir. KKKK'de çatırtıların olduğu, AKKK'de ise çatırtıların giderildiği görülmektedir.



a) Rotor uç gerilimleri q bileşeni



b) A bölgesi

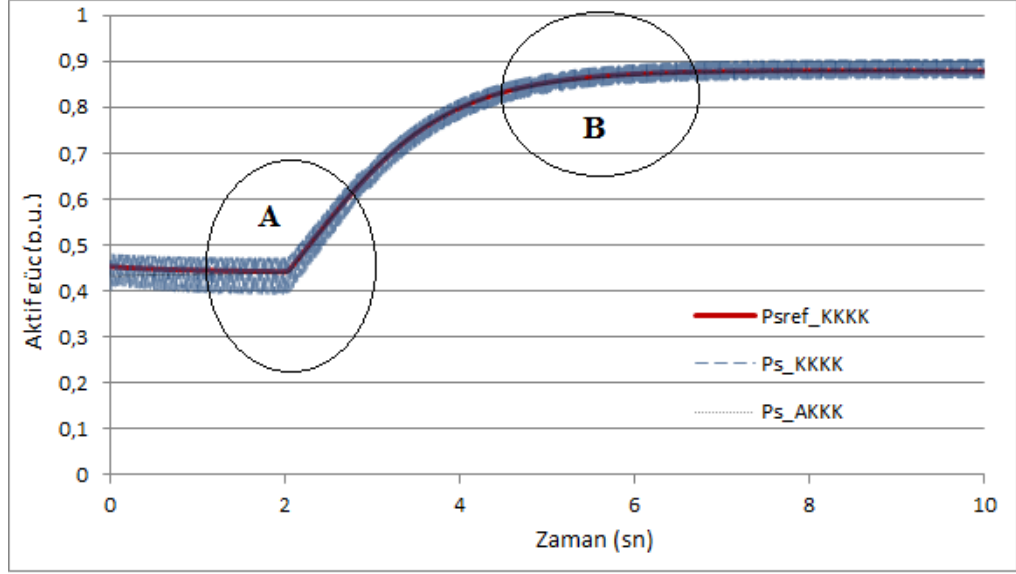


c) B bölgesi

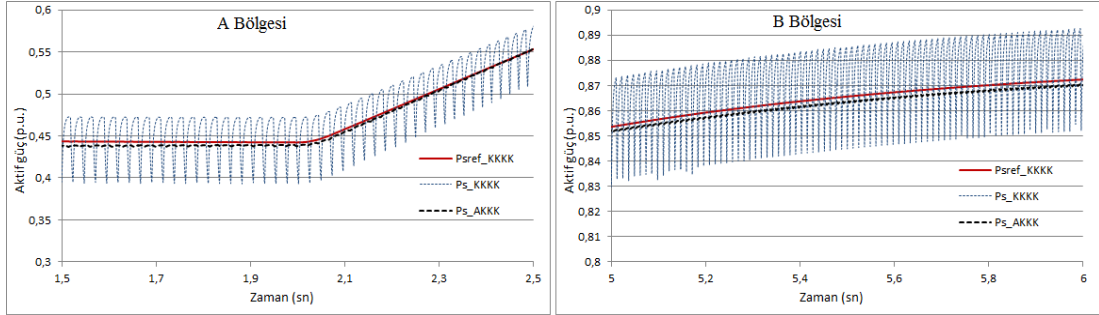
Şekil 6.12: Basamak değişimli rüzgâr hızındaki rotor uç gerilimleri q bileşenleri.

KKKK ve AKKK'nin basamak değişimli rüzgâr hızındaki aktif güç değerleri için elde edilen sonuçlar Şekil 6.13'te gösterilmiştir.

Elde edilen grafiklere göre basamak değişimli rüzgâr hızında, KKKK'li sistemdeki çatırtı probleminin AKKK kullanılarak giderildiği görülmektedir. Böylelikle çıkış güçlerindeki dalgalanmalar azaltılarak, kontrolörün performansı artırılmıştır.



a) Aktif güç



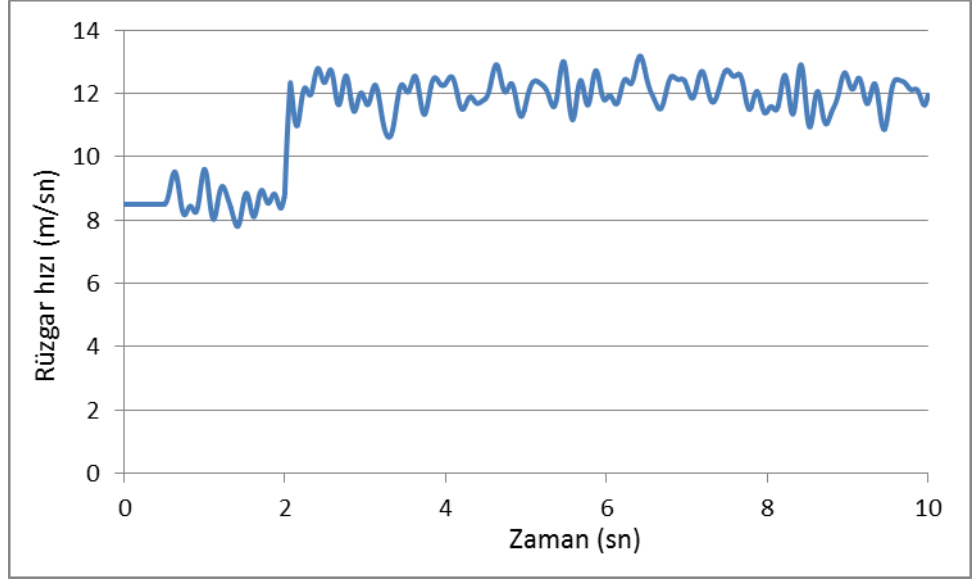
b) A bölgesi

c) B bölgesi

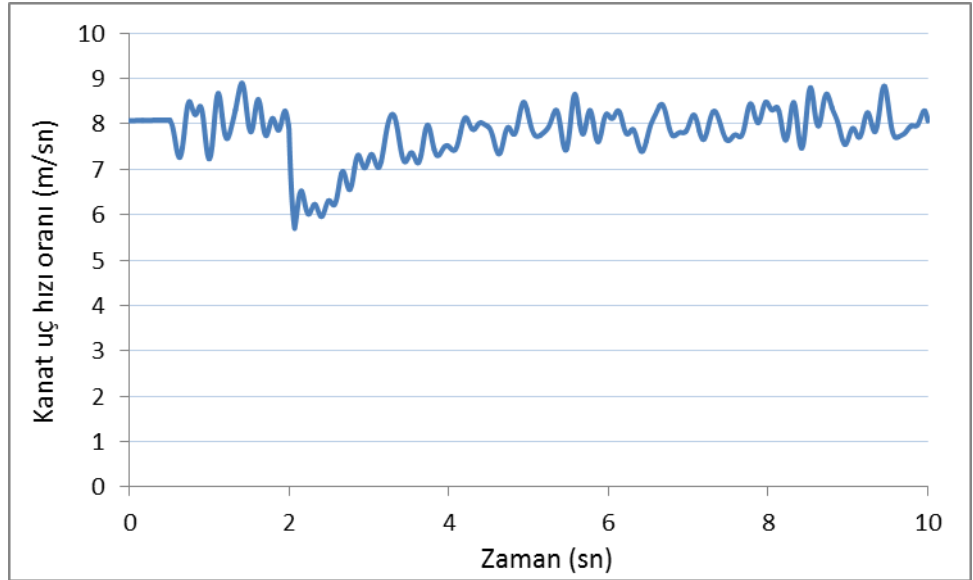
Şekil 6.13: Basamak değişimli rüzgâr hızındaki aktif güç değerleri.

### Durum II: Türbülanslı Rüzgâr Hızları

Bu kısımda, her iki kontrolörün türbülanslı rüzgâr koşullarındaki davranışları incelenmiş ve elde edilen grafikler verilmiştir. Türbülanslı rüzgâr hızlarında yine aynı seviyede basamak rüzgâr değişimi olmuştur. Şekil 6.14 rüzgâr hızını göstermektedir. Şekilde görüldüğü üzere, ikinci saniyeden sonra rüzgâr hızında belli bir miktar artma görülmektedir. Ayrıca türbülans hali devam etmektedir.



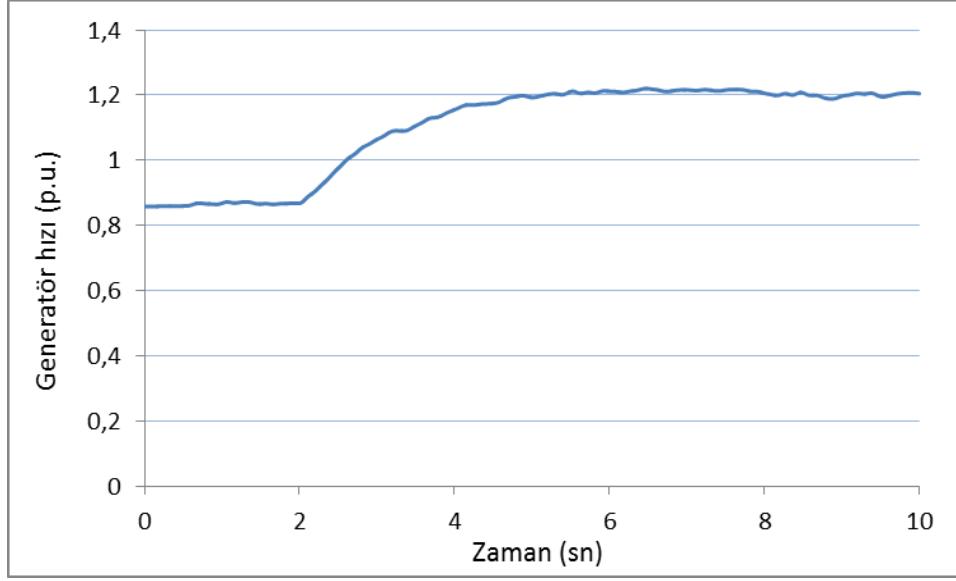
**Şekil 6.14:** Türbülanslı rüzgâr hızı.



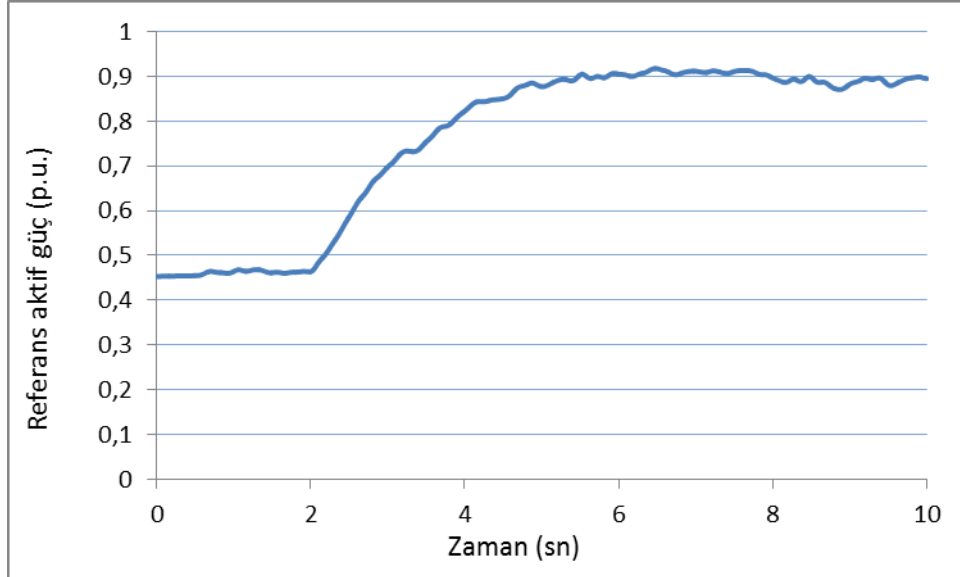
**Şekil 6.15:** Türbülanslı rüzgârda kanat uç hızı oranı.

Türbülanslı rüzgâr hızından maksimum gücü elde edebilmek için rotor hızının bu türbülanslara göre değişim göstermesi gerekmektedir. Türbinin türbülanslı rüzgâr altındaki KHO grafiği şekil 6.15'te görülmektedir. Optimum KHO değerinin elde edilebilmesi için generatörde oluşan hız değişim grafiği şekil 6.16'da verilmiştir.



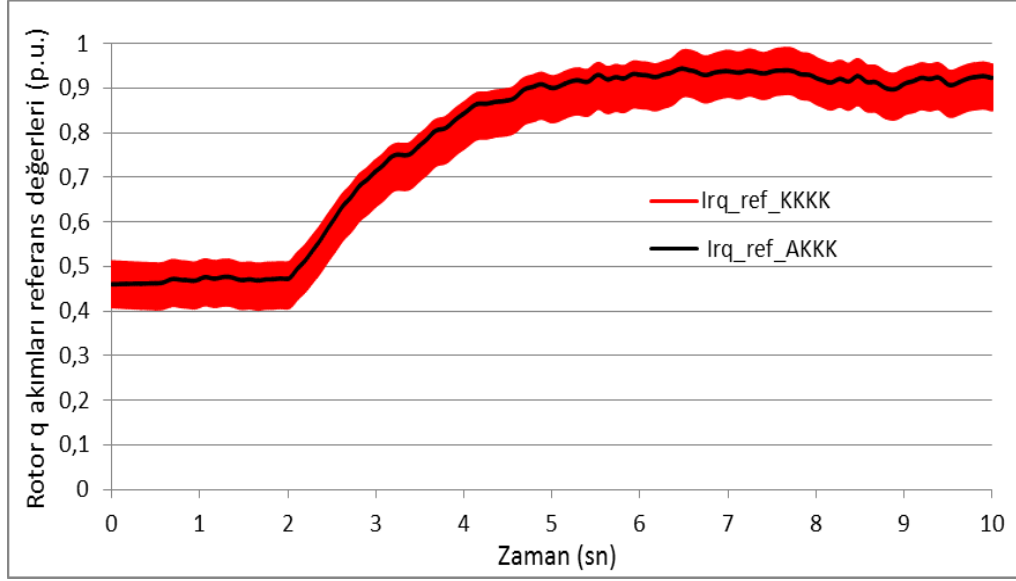


**Şekil 6.16:** Türbülanslı rüzgârda generatör hızı.

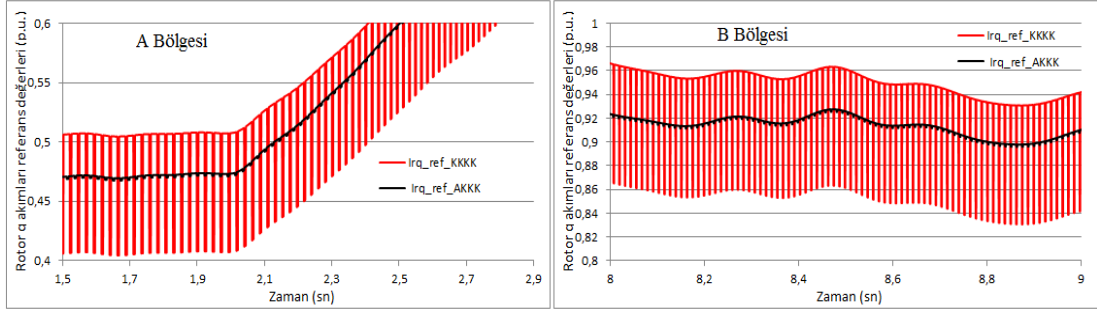


**Şekil 6.17:** Türbülanslı rüzgârda referans aktif güç değeri.

Şekil 6.17’de türbülanslı rüzgârda üretilebilecek maksimum aktif güç referansı görülmektedir. MGNT’den elde edilen bu grafik hem KKKK’li hem de AKKK’li sistemde referans olarak alınmıştır.



a) Rotor q akımları referans değerleri

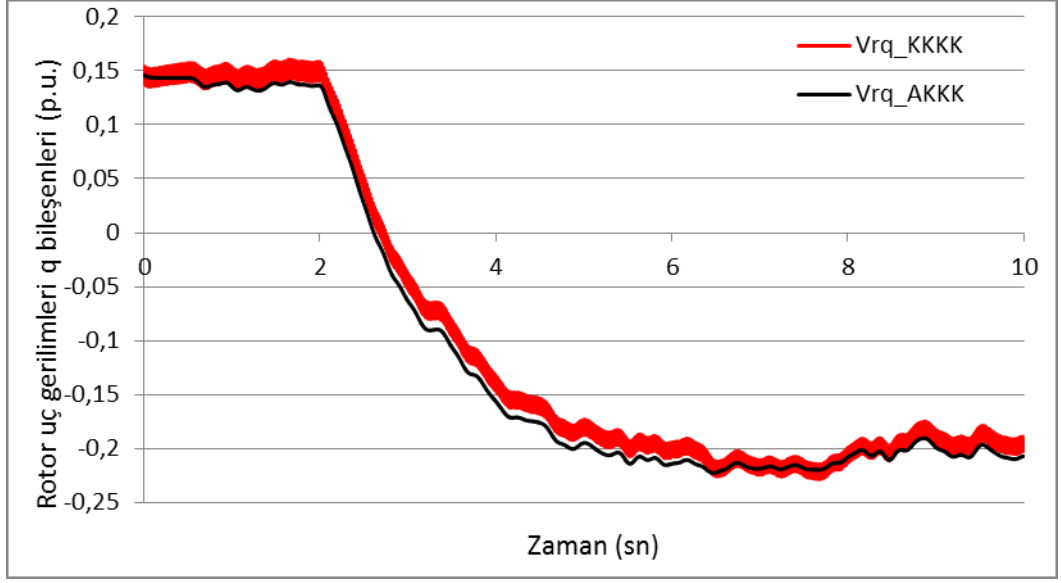


b) A bölgesi

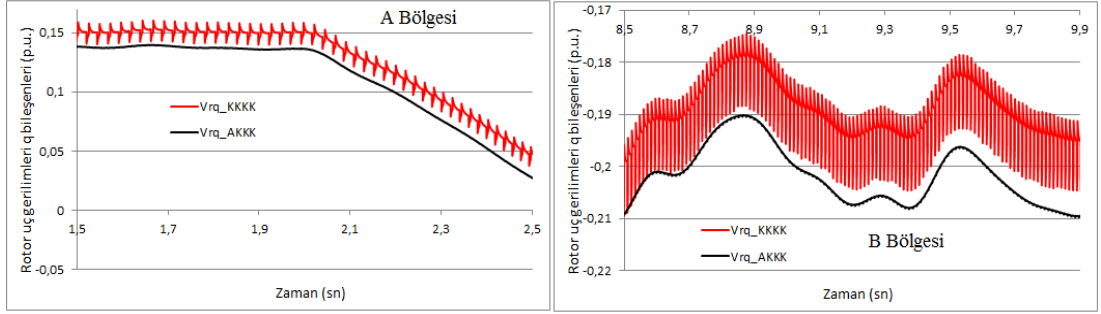
c) B bölgesi

Şekil 6.18: Türbülanslı rüzgârda referans rotor akımları q bileşenleri.

Şekil 6.18’de türbülanslı rüzgâr koşullarında, kontrolörler tarafında belirlenen referans rotor akımlarının q bileşenleri görülmektedir. A bölgesinin ve B bölgesinin incelenmesi sonucu KKKK’nin kontrol sinyalinde istenmeyen çattırtı probleminin olduğu, AKKK’li sistemde ise bu problemin giderildiği görülmektedir.



a) Rotor uç gerilimleri q bileşenleri

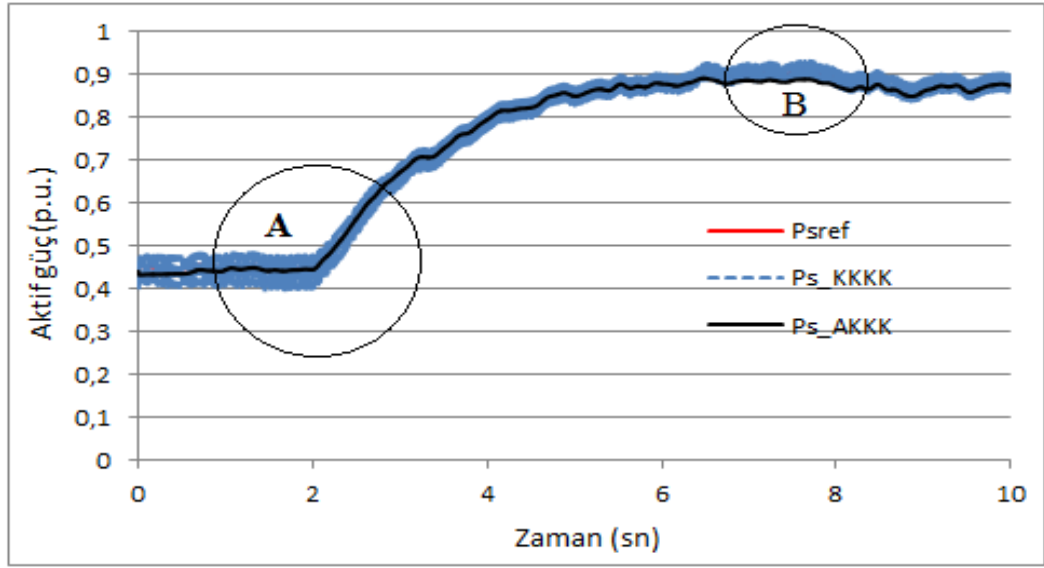


b) A bölgesi

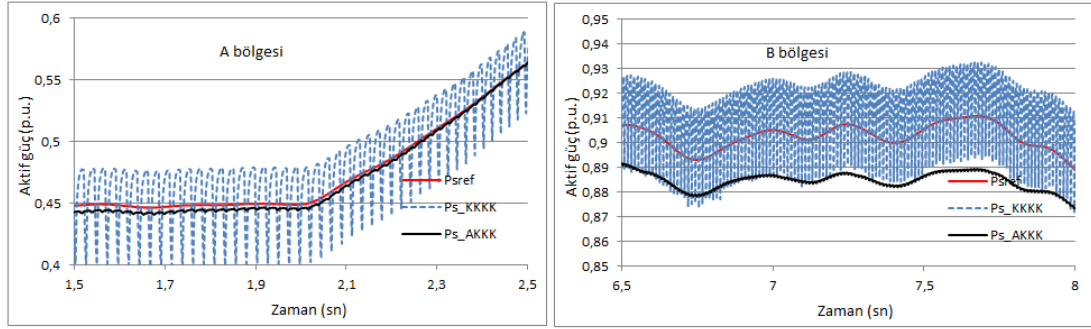
c) B bölgesi

**Şekil 6.19:** Türbülanslı rüzgârda rotor uç gerilimleri q bileşenleri.

Şekil 6.19’da türbülanslı rüzgâr şartlarında referans rotor akımlarına göre belirlenen rotor uç gerilimleri görülmektedir. Referans akım sinyallerindeki çattırtı probleminin gerilim değerlerine de yansıdığı görülmektedir.



a) Aktif güç



b) A bölgesi

c) B bölgesi

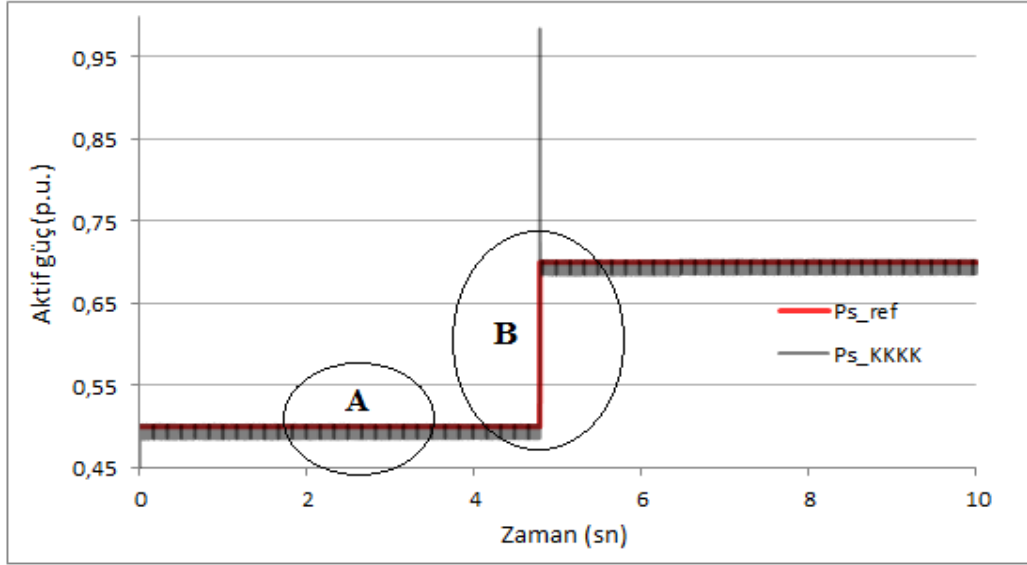
Şekil 6.20: Türbülanslı rüzgârda aktif güç değerleri.

Elde edilen grafiklere göre, türbülanslı rüzgâr hızlarında da AKKK ile sistemdeki çattırtı probleminin giderildiği, çıkış gücündeki dalgalanmaların azaldığı ve kontrolör performansının arttığı görülmektedir. MGNT ile belirlenen referans güç değerleri kontrolör tarafından düzgünce izlenmektedir.

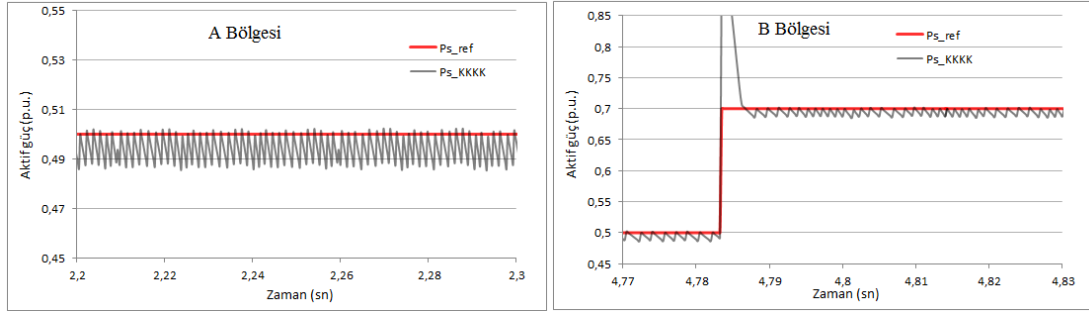
### 6.5.2 Maksimum Güç Noktası Takipsiz Sistem

Bu kısımda girilen referans aktif ve reaktif gücü izleyen AKKK, rotor uç geriliminin d-q bileşenlerini ayarlamaktadır. Aktif güç kontrolünde KKKK ve AKKK ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu referanslara göre elde edilen grafikler sırasıyla verilmiştir. Bu sistemde ilk çalışmadan farklı olarak MGNT sistemi kullanılmamıştır.





a) Aktif güç

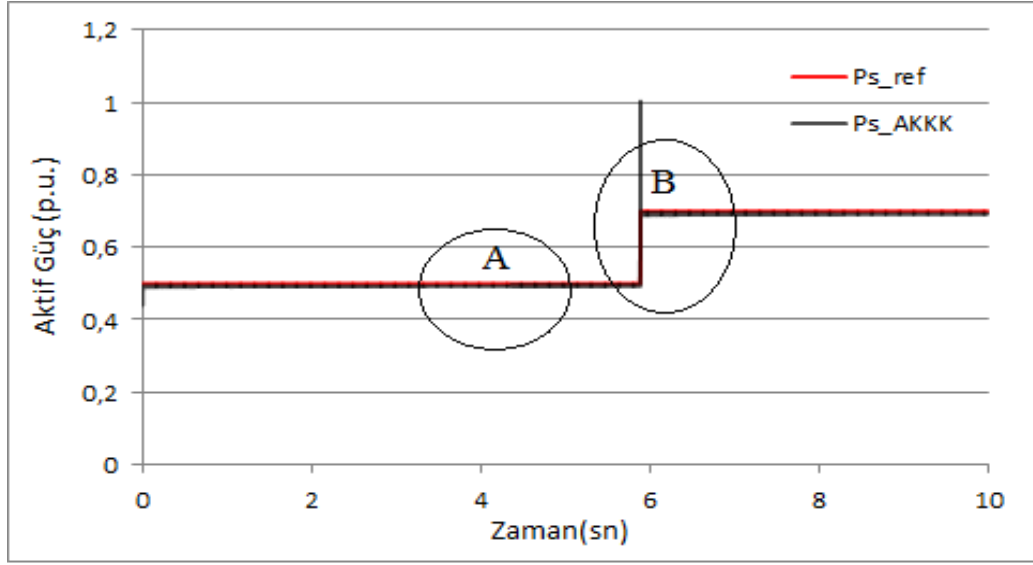


b) A bölgesi

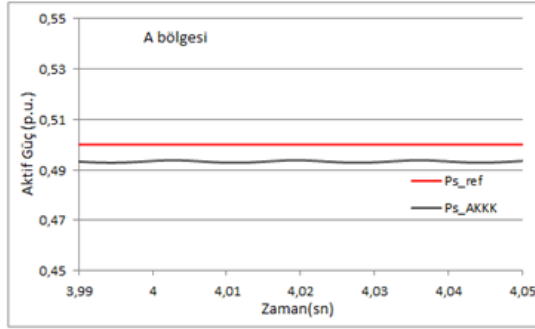
c) B bölgesi

Şekil 6.22: KKKK ile aktif güç kontrolü.

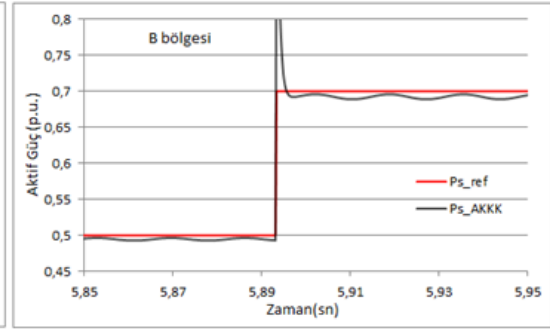
Şekil 6.22’de aktif güç grafiği görülen KKKK’li sistemde referans değeri 4.75’inci saniyede 0.7 birim değerine artırılmıştır. Referansı sorunsuz izleyen çıkış aktif güç grafiğinde, şekilde görüldüğü üzere dalgalanmalar oluşmaktadır.



a) Aktif güç



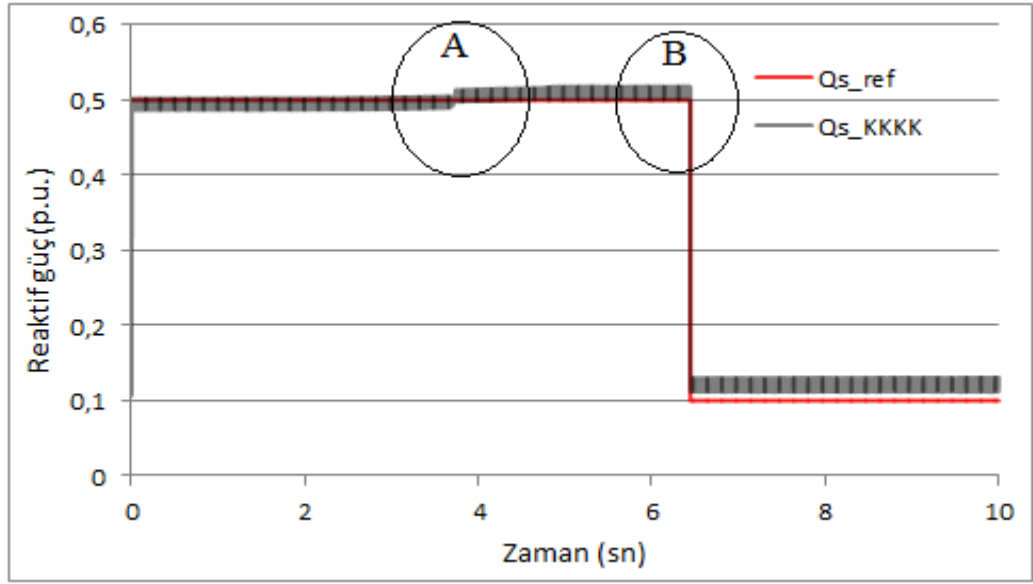
b) A bölgesi



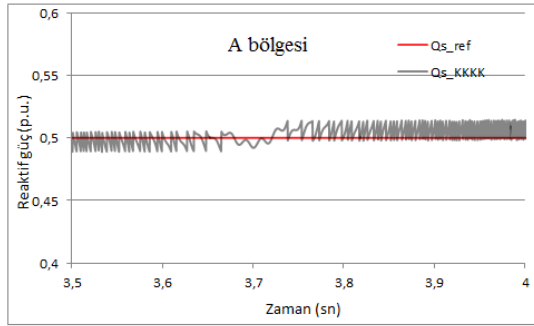
c) B bölgesi

Şekil 6.23: AKKB ile aktif güç kontrolü.

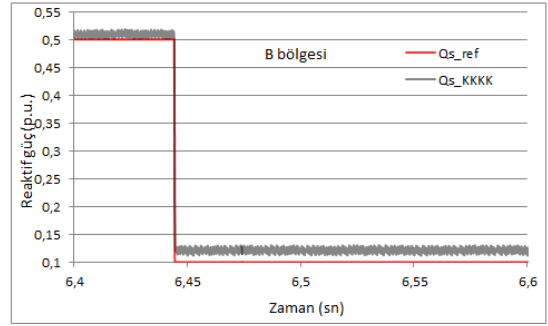
Şekil 6.23'te AKKB kullanılan sistemde referans değeri 5.89'dan sonra 0.7 birim değerine artırılmıştır. Referansı sorunsuz izleyen çıkış aktif güç grafiğinde, şekilde görüldüğü üzere dalgalanmalar giderilmiştir.



a) Reaktif güç



b) A bölgesi

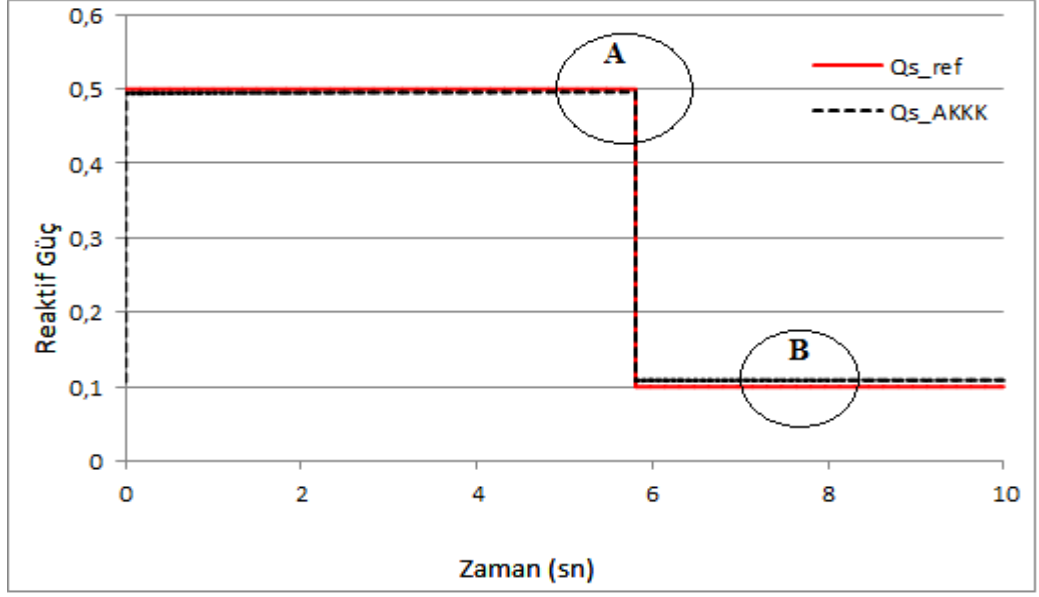


c) B bölgesi

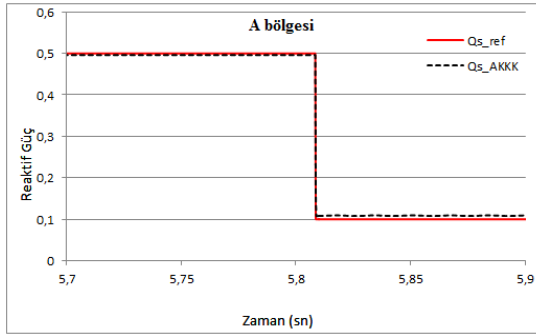
Şekil 6.24: KKKK ile reaktif güç kontrolü.

Reaktif güç kontrolünde ise (şekil 6.24), KKKK'e sahip sistemde 3.7'nci saniyede bozucuların etkisiyle reaktif güçte ufak sapmalar meydana gelmiştir. Referansın güzel bir şekilde izlenmesinin yanında, çıkış reaktif gücünde dalgalanmalar olduğu görülmektedir.

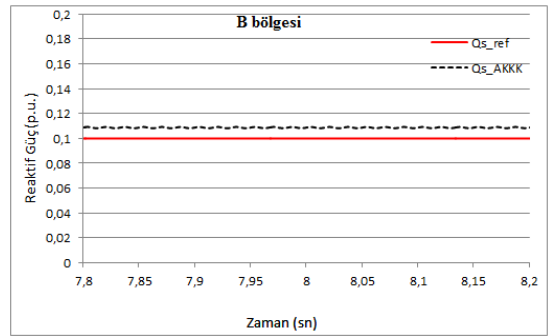




a) Reaktif güç



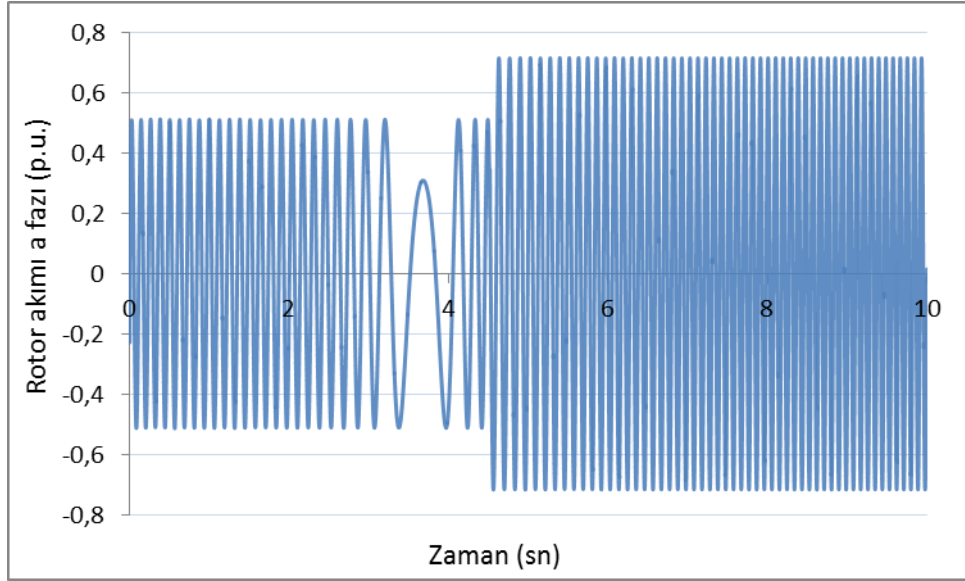
b) A bölgesi



c) B bölgesi

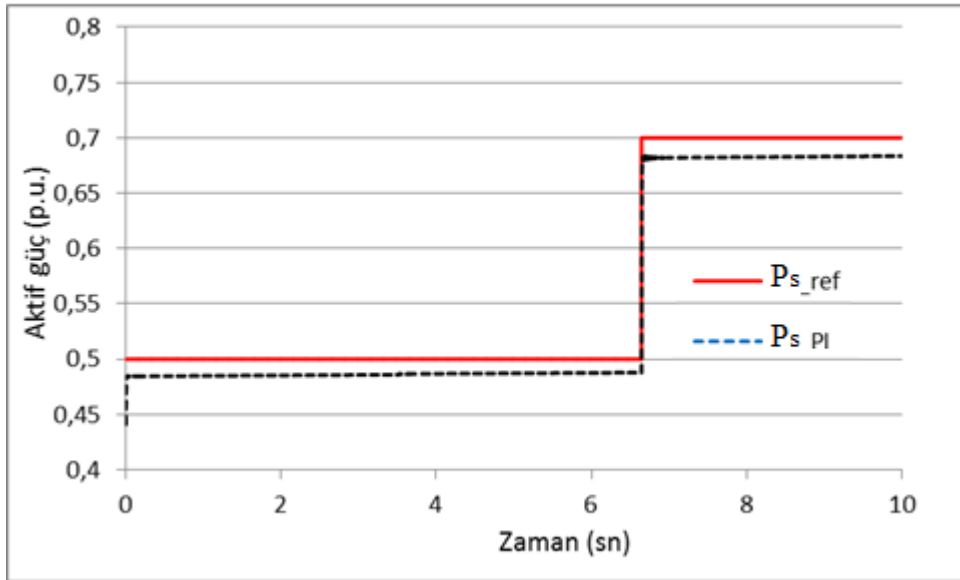
Şekil 6.25: AKKB ile reaktif güç kontrolü.

Şekil 6.25’de AKKB kullanılarak çıkış reaktif gücündeki dalgalanmaların giderildiği görülmektedir. Ayrıca referans reaktif gücün izlenmesi 0.01 birimlik bir kalıcı durum hatasıyla gerçekleşmektedir.

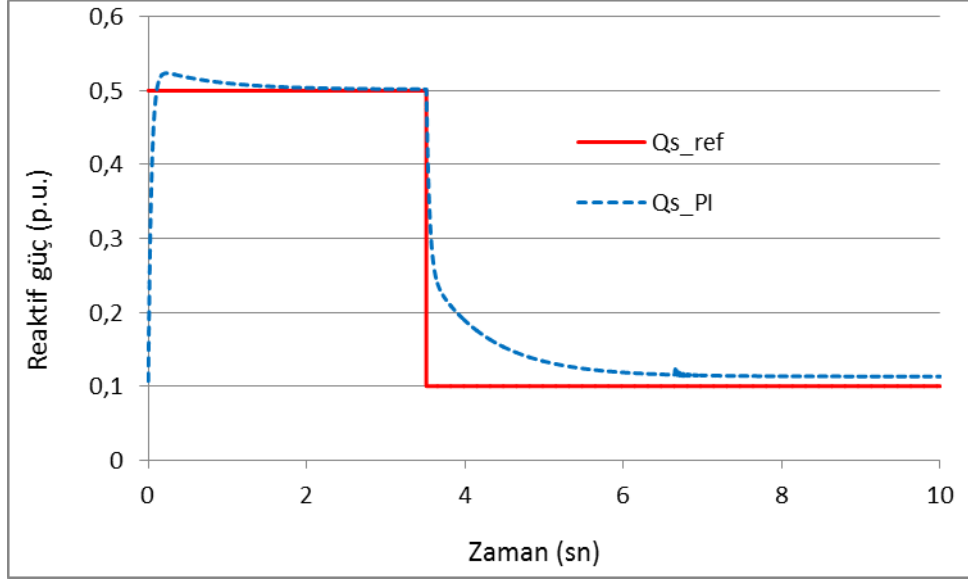


Şekil 6.26: AKKK'lı sistemin rotor akımları (a fazı).

Rotor uçlarına üç faz gerilim verildiğinden dolayı, şekil 6.26'da AKKK kullanılan sistemin rotor akımının a fazı grafiği verilmiştir.



Şekil 6.27: PI kontrolör ile aktif güç kontrolü.



**Şekil 6.28:** PI kontrolör ile reaktif güç kontrolü.

MGNT'siz sistemde simülasyonlardan elde edilen grafiklere bakıldığında, KKKK'nin çatırtı sorununa sahip olduğu ve önerilen AKKK yöntemiyle bu problemin giderildiği görülmektedir. Ayrıca, çıkış güçlerinde dalgalanmaların giderildiği görülmektedir. Böylelikle aktif güç ve reaktif güç kontrolünde AKKK yönteminin KKKK'ye göre daha üstün performans gösterdiği anlaşılmaktadır. Elde edilen sonuçlar PI kontrolör ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu, AKKK'nin ani referans değişimleri, rüzgâr değişimi gibi durumlarda daha üstün performans gösterdiği görülmektedir.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG ele alınmıştır. Matematiksel modeli çıkartılan ÇBAG'nin d-q referans düzleminde aktif-reaktif güç ve tork denklemleri elde edilmiştir. ÇBAG'nin kontrolü için literatürde kullanılan yöntemlere değinilerek, PID ve KKKK yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

ÇBAG'nin kontrolünün gerçekleştirebilmesi için LabVIEW ortamında rüzgâr türbin sistemi simülasyon tasarımı yapılmıştır. Dört ana kısımdan oluşan bu tasarımda MGNT, kontrolör, rüzgâr türbini, asenkron makine blokları kullanılmıştır. ÇBAG'nin kontrolünün kolaylaştırılabilmesi için gerilim kaynaklı dönüştürücü biriminin çıkış gerilimlerinin eşitlikleri kullanılmıştır. Tasarımdaki kontrolör bloğu da iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısmı maksimum güç referansını belirlerken, ikinci kısım bu referansa göre rotor akımlarını veya rotor uç gerilimlerini belirlemektedir.

ÇBAG'li rüzgâr türbin sistemi için literatürde çokça kullanılan PI kontrolör yerine, KKKK kullanılmıştır. Bu yöntemin tercih edilme nedeni, dinamik sistemlerde, belirsiz parametrelere karşı kararlı duruşu ve bozuculardan minimum düzeyde etkilenmesidir. Ancak bu yöntemde kontrol sinyalinde istenmeyen çattırtı problemlerini doğurması, bizi AKKK tasarımına yöneltmiştir. Böylelikle çattırtı problemi giderilmiş ve çıkış gücündeki dalgalanmalar azaltılmıştır.

Simülasyon çalışmalarında iki farklı düzenek ele alınmıştır. MGNT'li sistemde maksimum aktif gücü izleyen AKKK tasarımı ve simülasyonu yapılmıştır. Rotor akımlarını kontrol eden bu sistemde, PI kontrolör ile bu akımlar rotor uç terminallerine çevrilerek, ÇBAG'nin aktif ve reaktif güç kontrolü amaçlanmıştır. Basamak değişimli rüzgâr hızı ve türbülanslı rüzgâr hızı olmak üzere iki koşulda değerlendirilen AKKK'nin, KKKK'ye göre çattırtı probleminden arındırılmış olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, MGNT'li sistem düzgün bir şekilde çalışmakta ve çıkış aktif gücü maksimum güç referansını izlemektedir. İkinci düzenekte, MGNT sistemi devre dışı bırakılmıştır. Kullanıcıya hem aktif hem reaktif güç referansı için

sayısal giriş bloğu açılmıştır. Böylelikle sabit referans güçlerinde ve referans gücündeki basamak değişimlerinde kontrolörlerin performansları incelenebilecektir. Yapılan çalışma sonucu AKKK'nin kullanıldığı sistemin çıkış gücündeki dalgalanmalar büyük oranda giderilmiştir. Ayrıca PI kontrolöre göre performansının daha iyi olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada LabVIEW kullanılmasıyla, diğer programlama dillerine göre oldukça zaman alabilecek simülasyon düzeneği daha kolay bir şekilde ve daha az bir zamanda tasarlanmıştır.

Tezde kullanılan senkron referans düzlemi yerine negatif senkron referans düzlemi kullanılarak performansı incelenebilir. Ayrıca, doğrudan kontrol teknikleri geliştirilerek, akım kontrol döngüsüne gerek kalmadan sistem basitleştirilebilir.

## 8. KAYNAKLAR

- [1] Drennen, T. E., *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, vol. 23. (1994).
- [2] Larsson, Å. *The Power Qualities of Wind Turbines*. Chalmers University of Technology, (2000).
- [3] Müller, S., Deicke, M. and Rik Doncker, D. W., “Doubly fed induction generator systems for wind turbines,” *Ind. Appl. Mag. IEEE*, vol. 8, no. 3, 26–33, (2002).
- [4] Miki, I., Nagai, N., Nishiyama, S., and Yamada, T., “Vector control of induction motor with fuzzy PI controller,” in *Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1991 IEEE*, 1991, 341–346, (1991).
- [5] Brekken, T. and Mohan, N., “A novel doubly-fed induction wind generator control scheme for reactive power control and torque pulsation compensation under unbalanced grid voltage conditions,” in *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, PESC '03.*, 2003, vol. 2, 760–764, (2003).
- [6] Brekken, T. K. A. and Mohan, N., “Control of a doubly fed induction wind generator under unbalanced grid voltage conditions,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 1, 129–135, (2007).
- [7] Lopez, J., Sanchis, P., Roboam, X. and Marroyo, L., “Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 3, 709–717, (2007).
- [8] Xiao, D. and Rahman, M. F., “Direct torque control of an interior permanent magnet synchronous machine fed by a direct ac-ac converter,” in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC 2006. CES/IEEE 5th International*, vol. 3, 1–6, (2006).
- [9] Demirtas, M., “Alan yönlendirmeli asenkron motorun bulanık-kayan kip konum kontrolü”, Doktora, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü* (2002).

- [10] Lekhchine, S., Bahi, T. , Abadlia, I., Layate, Z. and Bouzeria, H., “Speed control of doubly fed induction motor,” in *Energy Procedia*, vol. 74, 575–586, (2015).
- [11] Yang, F., Li, S., Wang, L., Song, Y., Song, Q., Wang, Y. and Du, X., “Adaptive sliding mode control based on offshore doubly fed induction generator for wind turbines,” in *Proceedings of the 1st International Conference on Mechanical Engineering and Material Science*, (2012).
- [12] Xu, L. and Wang, Y., “Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under unbalanced network conditions,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, 314–323, (2007).
- [13] Ghennam, T., Berkouk, E. M. and Francois, B., “Modeling and control of a Doubly Fed Induction Generator (DFIG) based Wind Conversion System,” in *2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 507–512, (2009).
- [14] Hu, J., Nian, H., Hu, B., He, Y. and Zhu, Z. Q., “Direct active and reactive power regulation of DFIG using sliding-mode control approach,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 4, 1028–1039, (2010).
- [15] Wu, F., Zhang, X.-P., Godfrey, K. and Ju, P., “Modeling and control of wind turbine with doubly fed induction generator,” in *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE'06. 2006 IEEE PES*, 1404–1409, (2006).
- [16] Petersson, A. and Member, S., “Modeling and experimental verification of grid interaction of a dfig wind turbine,” *Ieee Trans. Energy Conversion*, Vol. 20, No. 4, December 2005, vol. 20, no. 4, 878–886, (2005).
- [17] Lima, F. K. A., Luna, A., Rodríguez, P., Watanabe, E. H. and Aredes, M., “Study of a simplified model for DFIG-based wind turbines,” in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2009*, 345–349, (2009).
- [18] Babu, B. C. and Mohanty, K. B., “Doubly-Fed induction generator for variable speed wind energy conversion systems-modeling & simulation,” *Int. J. Comput. Electr. Eng.*, vol. 2, no. 1, 141, (2010).

- [19] Ostadi, A., Yazdani, A. and Varma, R. K., “Modeling and stability analysis of a DFIG-based wind-power generator interfaced with a series-compensated line,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 3, 1504–1514, (2009).
- [20] Zhang, H. and Wang, Z., “Study on modeling and simulation of double-fed induction wind power generator control system,” in *1st International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN '09*, (2009).
- [21] Zhang, Y., Jia, J., Li, W., Wang, D. and Liu, J. “Steady state characteristic analysis and stability assessment of doubly fed induction generator based wind power generation System,” in *Power System Technology (POWERCON), International Conference on*, 2010, 1–5, (2010).
- [22] Alkandari, A. M., Soliman, S. A., Abdel-Rahman, M. H. and others, “Steady state analysis of a doubly fed induction generator,” *energy power Eng.*, vol. 3, 393, (2011).
- [23] Sediki, H., Abdeslam, D. O., Otmane-cherif, T., Bechouche, A. and Mesbah, K., “Steady-State analysis and control of double feed induction motor,” *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 61, (2012).
- [24] Lei, Y., Mullane, A., Lightbody, G. and Yacamini, R., “Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies,” *Energy*, vol. 21, no. 1, 257–264, (2006).
- [25] Poitiers, F., Bouaouiche, T. and Machmoum, M., “Advanced control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 7, 1085–1096, (2009).
- [26] Rouabhi, R., Abdessamed, R., Chouder, A. and Djerioui, A., “Power quality enhancement of grid connected doubly-fed induction generator using sliding mode control,” (2015).
- [27] ARDJOUN, S. I. D. A. E. L. M. and Abid, M., “Fuzzy sliding mode control applied to a doubly fed induction generator for wind turbines,” *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 23, no. 6, 1673–1686, (2015).



- [28] Li, S., Challoo, R. and Nemmers, M. J., “Comparative study of DFIG power control using stator-voltage and stator-flux oriented frames,” in *2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting, PES '09*, (2009).
- [29] Qiao, W., “Dynamic modeling and control of doubly fed induction generators driven by wind turbines,” in *Power Systems Conference and Exposition, PSCE '09. IEEE/PES*, 2009, 1–8, (2009).
- [30] Kassem, A. M., Hasaneen, K. M. and Yousef, A. M., “Dynamic modeling and robust power control of DFIG driven by wind turbine at infinite grid,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 44, no. 1, 375–382, (2013).
- [31] Tosun, M. M., “Investigation of aerodynamic effects on performance of wind turbine blades by using finite element method,” (2005).
- [32] DuPont, B. and Cagan, J., “Employing wind farm performance data for model validation and turbine layout/geometry optimization,” in *32nd ASME wind energy symposium*, (2014).
- [33] Manwell, J. F., McGowan, J. G. and Rogers, A. L., *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, (2010).
- [34] Ozgener, O., “A small wind turbine system (SWTS) application and its performance analysis,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 11, 1326–1337, (2006).
- [35] Herzog, A. V., Lipman, T. E. and Kammen, D. M., “Renewable energy sources,” *Encycl. Life Support Syst. (EOLSS). Forerunn. Vol. Overv. Life Support Syst. Sustain. Dev.*, (2001).
- [36] Carlin, P. W., Laxson, A. S. and Muljadi, E. B., “The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology,” *Wind Energy*, vol. 6, no. 2, 129–159, (2003).
- [37] Papadopoulos, M. P., Papathanassiou, S. A., Boulaxis, N. G. and Tentzerakis, S. T., “Voltage quality change by grid-connected wind turbines,” in *EWEC-CONFERENCE-*, 782–785, (1999).

- [38] Muljadi, E. and Butterfield, C. P., “Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation,” *Ind. Appl. IEEE Trans.*, vol. 37, no. 1, 240–246, (2001).
- [39] Grauers, A., “Efficiency of three wind energy generator systems,” *Energy Conversion, IEEE Trans.*, vol. 11, no. 3, 650–657, (1996).
- [40] Richardson, R. D. and Erdman, W. L., “Variable speed wind turbine.” Google Patents, (1992).
- [41] Carrasco, J. M., Franquelo, L. G., Bialasiewicz, J. T., Galván, E., Guisado, R. C. P., Prats, M. Á. M., León, J. I. and Moreno-Alfonso, N., “Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey,” *Ind. Electron. IEEE Trans.*, vol. 53, no. 4, 1002–1016, (2006).
- [42] Xu, L. and Cartwright, P. “Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation,” *Energy Conversion, IEEE Trans.*, vol. 21, no. 3, 750–758, (2006).
- [43] Hansen, L. H., Helle, L., Blaabjerg, F., Ritchie, E., Munk-Nielsen, S., Bindner, H. W., Sørensen, P. E. and Bak-Jensen, B., *Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines.* (2002).
- [44] Utkin, V., “Variable structure systems with sliding modes,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 22, no. 2, 212–222, (1977).
- [45] Almutairi, N. B. and Zribi, M., “Sliding mode control of coupled tanks,” *Mechatronics*, vol. 16, no. 7, 427–441, (2006).
- [46] Hung, J. Y., Gao, W. and Hung, J. C., “Variable structure control: a survey,” *Ind. Electron. IEEE Trans.*, vol. 40, no. 1, 2–22, (1993).
- [47] Young, K. D. V. I. Utkin, and Ozguner, U., “A control engineer’s guide to sliding mode control,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 7, no. 3, 328–342, (1999).
- [48] Utkin, V. I. and Chang, H. C., “Sliding mode control on electromechanical systems,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 8(4–5), 451–473, (2002).
- [49] Venkataramanan, R., Sabanovic, A. and Cuk, S., “Sliding mode control of DC-to-DC converters,” in *Proceedings IECON*, 251–258, 1985.

- [50] Foo, G. and Rahman, M. F., “Sensorless sliding-mode MTPA control of an IPM synchronous motor drive using a sliding-mode observer and HF signal injection,” *Ind. Electron. IEEE Trans.*, vol. 57, no. 4, 1270–1278, (2010).
- [51] Orłowska-Kowalska, T., Dybkowski, M. and Szabat, K., “Adaptive sliding-mode neuro-fuzzy control of the two-mass induction motor drive without mechanical sensors,” *Ind. Electron. IEEE Trans.*, vol. 57, no. 2, 553–564, (2010).
- [52] Beltran, B., El Hachemi Benbouzid, M. and Ahmed-Ali, T., “Second-order sliding mode control of a doubly fed induction generator driven wind turbine,” *Energy Conversion, IEEE Trans.*, vol. 27, no. 2, 261–269, (2012).
- [53] Senol, I., Demirtas, M., Rustemov, S. and Gumus, B., “Position control of induction motor a new-bounded fuzzy sliding mode controller,” *COMPEL-The Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 24, no. 1, 145–157, (2005).
- [54] Edwards, C. and Spurgeon, S., *Sliding mode control: theory and applications*. CRC Press, (1998).
- [55] Ferrara, A. and Utkin, V. I., “Sliding mode optimization in dynamic LTI systems,” *J. Optim. Theory Appl.*, vol. 115, no. 3, 727–740, (2002).
- [56] Bartolini, G., Ferrara, A. and Usai, E., “Chattering avoidance by second-order sliding mode control,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 43, no. 2, 241–246, (1998).
- [57] Kachroo, P. and Tomizuka, M., “Chattering reduction and error convergence in the sliding-mode control of a class of nonlinear systems,” *Autom. Control. IEEE Trans.*, vol. 41, no. 7, 1063–1068, (1996).
- [58] Ho, H. F., Wong, Y. K. and Rad, A. B., “Adaptive fuzzy sliding mode control with chattering elimination for nonlinear SISO systems,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 17, no. 7, 1199–1210, (2009).
- [59] Calgan, H. and Demirtas, M., “An adaptive sliding mode controller design for DFIG based wind turbine system on LABVIEW,” *J. Environ. Sci.*, vol. 5, 36–41, (2016).

- [60] Cho, Kato, Y. and Spilman, D., “Sliding mode and classical controllers in magnetic levitation systems,” *Control Syst. IEEE*, vol. 13, no. 1, 42–48, (1993).
- [61] Bekakra, Y. and Ben Attous, D., “A sliding mode speed and flux control of a doubly fed induction machine,” in *Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on*, I–174, (2009).
- [62] Dase, C., Falcon, J. S. and MacCleery, B., “Motorcycle control prototyping using an FPGA-based embedded control system,” *Control Syst. IEEE*, vol. 26, no. 5, 17–21, (2006).
- [63] Boubaker, O., “National Instruments LabVIEW: Ultimate software for engineering education,” in *Proc. International Conference on Frontiers in Education: Computer Science and Computer Engineering*, (2011).
- [64] Ali, F. H., Mahmood, H. M. and Ismael, S. “LabVIEW FPGA implementation of a PID controller for DC motor speed control,” in *Energy, Power and Control (EPC-IQ), 2010 1st International Conference on*, 139–144, (2010).
- [65] Akgul, A., Calgan, H., Koyuncu, I., Pehlivan, I., and Istanbulu, A., “Chaos-based engineering applications with a 3D chaotic system without equilibrium points,” *Nonlinear Dyn.*, 1–15, (2015).
- [66] Aguglia, D., “Conception globale des generateurs asynchrones double alimentation pour poliennes.” University Laval, (2010).
- [67] Huang, Y.-J., Kuo, T.-C. and Chang, S.-H., “Adaptive sliding-mode control for nonlinear systems with uncertain parameters,” *Syst. Man, Cybern. Part B Cybern. IEEE Trans.*, vol. 38, no. 2, 534–539, (2008).