

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE**  
**ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON JENERATÖR DENETİMİ**

**Muhammed Fatih KILIÇASLAN**

**OCAK 2015**

**Elektrik Elektronik Anabilim Dalında** Muhammed Fatih KILIÇASLAN tarafından hazırlanan rüzgâr türbinlerinde çift beslemeli asenkron jeneratör denetimli Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ediz POLAT

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ  
Danışman

*Jüri Üyeleri*

Başkan : Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM  
Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ  
Üye : Yrd. Doç. Murat LÜY

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

09/01/2015

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*M. Talha'ya...*

*A. Şamil'e...*

## ÖZET

### RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON JENERATÖR DENETİMİ

KILIÇASLAN, M. Fatih

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ

Ocak 2015, 94 sayfa

Rüzgâr enerji sistemleri için çift beslemeli asenkron jeneratör, çeşitli rüzgâr rejimlerine ve şebeke hatalarına etkin cevap verebilmesi nedeniyle oldukça avantajlı bir seçenektir. Ancak karmaşık modeli ve çok sayıda parametreye sahip olması nedeniyle kontrol edilmesi oldukça zordur. Tezde, kontrolde kullanılan temel bazı yöntemler ve ara işlemler anlatılmıştır. Sonra çift beslemeli asenkron jeneratör kontrolünde kullanılan belli başlı yöntemlerden bahsedilmiştir. Kullanılan çoğu yöntemde çift beslemeli asenkron jeneratörün statoru doğrudan şebekeye bağlı olup, kontrol girişleri rotordan bir konvertör aracılığıyla uygulanır. Bu tezde de bu yapı kullanılmış, ancak yaygın olarak kullanılan alan yönlendirmeli kontrolden oldukça farklı bir kontrol yöntemi önerilmiştir. Burada farklı olarak tork ile stator akısı tam olarak ayrıştırılmış biçimde kontrol edilmektedir. Ayrıca rüzgâr için bir modelleme kabul edilip, rüzgâr parametreleri en küçük kareler yöntemiyle tahmin edilmiştir. Yöntemin esasları açıklanmış ve kullanılan çift beslemeli asenkron jeneratör modeline simülasyon olarak uygulanmıştır.

Çift beslemeli asenkron jeneratörün sürekli ve kesikli rüzgâr rejimi durumlarında kontrolü sağlanmış, rüzgâr kesildiğinde uygulanabilecek en verimli devreden çıkarma seçeneği araştırılmıştır. Bu bağlamda 3 farklı durum simülasyon sonuçlarıyla açıklanmış ve aralarında kıyas yapılmıştır. Rüzgârın sergilediği

karakteristiğe bağlı olarak hangisini kullanılabileceğine dair önerilerde bulunulmuştur.

Son olarak tezde uygulanan yöntemin MATLAB kodları konuyla ilgilenen araştırmacılara faydalı olması adına ekte sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör (ÇBAJ), rüzgâr enerji sistemleri, rüzgâr parametrelerinin tahmini, ayrıştırılmış ÇBAJ kontrolü

## ABSTRACT

### DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR CONTROL IN WIND TURBINES

KILIÇASLAN, M. Fatih

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronic Eng., M. Sc. Thesis

Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ

January 2015, 94 pages

The doubly fed induction generators are very adventegous choice for the wind energy systems becuase of responding for various wind regimes and grid faults effectively. However, its control is quite hard because of its comlex model and the high number of the parameters in the structure. In this thesis, some basic methods used in control and intermediate computations are explained. Then, prominent methods are mentioned used in control of doubly fed induction generators. In most of the control methods, the stator is directly connected to the grid and control inputs are applied from the rotor through a converter. This structure has also been used in this thesis but a control method which is quite different from widely used field oriented control has been suggested. As a difference, the torque and stator flux are controlled as completely decoupled. In addition, a wind model is assumed and its parameters have been estimated with the least squares method. Basics of the method have been explained and simulated on the useddoubly fed induction generator model.

The control of doubly fed induction generators is provided in continious and discontinious wind regimes. The most efficient turn-off choice has been studied in no wind case. In this context three different modes have been explained with their simulation results and compared. According to the characteristics of the wind, some suggestions are given about which one should be used.

Lastly in this thesis, the MATLAB codes of the method used in this thesis are attached to be helpful for researchers.

**Keywords:** Doubly fed induction generators control (DFIG), wind energy systems, estimation of wind parameters, decoupled DFIG control

## TEŞEKKÜR

Bu tez konusunu bana öneren, tezimin hazırlanması esnasında kıymetli zamanını, yardımını, bilgisini ve imkânlarını esirgemeyen değerli hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Öğrenim hayatıma başladığımdan bu yana öğrenme ve araştırma hususunda beni sürekli destekleyen, dahası teşvik edip bu uğurda hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan babam Galip KILIÇASLAN'a, sevgi ve desteklerini sürekli yanımda hissettiğim annem ve kardeşlerime, yetişip bu günlere gelmemde maddi, manevi katkıları olan amcam M. Ali KILIÇASLAN'a şükranlarımı sunarım.

Son olarak, bu çalışma süresince anlayışı, özellikle çocuklarla ilgilenerik sağladığı çalışma ortamı ve desteği için sevgili eşim Hatice KILIÇASLAN'a yürekten teşekkür ederim.



# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
<b>ÖZET</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	vii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	viii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xii
<b>SİMGELER DİZİNİ</b> .....	xv
<b>1 GİRİŞ</b> .....	1
1.1 Amaç .....	1
1.2 Literatür Özeti .....	4
1.3 Tezin Ana Hatları .....	11
<b>2 ÖN BİLGİLER</b> .....	12
2.1 Sabit 4 adım Runga-Kutta metodu .....	12
2.2 PID Kontrolörler.....	13
2.3 Ziegler-Nichols Frekans Tepkisi Metodu.....	15
2.4 Üç Fazlı Sistemden İki Fazlı Sisteme Geçiş .....	17
2.4.1 Güç Denkliği Standardı.....	19
2.4.2 Genlik Denkliği Standardı .....	19
2.4.3 Ters Clarke Dönüşümü .....	20
2.4.4 Park ve Ters Park Dönüşümü.....	21
2.4.5 Clarke ve Park Dönüşümlerinin Bir Arada Kullanılması .....	22
2.5 Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör Modeli .....	22
2.6 Vektör Kontrolü .....	23
2.6.1 Doğrudan Vektör Kontrolü .....	25
2.6.2 Dolaylı Vektör Kontrolü .....	27
2.6.3 Doğrudan Tork Kontrolü.....	28
<b>3 ARAŞTIRMA VE BULGULAR</b> .....	29
3.1 Rotoru Şebekeye Bağlı Yöntem .....	31
3.2 Şebekeye Bağlı Akı Oryantasyonlu Kontrol .....	33
3.3 Şebeke Bağlantısız Rotor Akısıyla Ayrıştırılmış Kontrol .....	35
3.4 Tezde uygulanan yöntem.....	37

3.4.1	Güç Devresi ve Ölçümler.....	37
3.4.2	Dönüşümler Bloğu .....	39
3.4.3	Hız kontrol sistemi .....	40
3.4.4	Akı kontrol sistemi.....	40
3.4.5	Tork kontrol sistemi .....	41
3.4.6	Rüzgâr modeli ve tahmini .....	41
3.5	Uygulanan Yöntemin Simülasyon Sonuçları .....	43
3.5.1	Sabit Rüzgâr Rejimi .....	44
3.5.2	Kesikli Rüzgâr Rejimi.....	52
3.5.2.1	Rotorun Kısa Devre Edilmesi.....	64
3.5.2.2	Rotor ve Statorun Açık Devre Edilmesi Durumu.....	68
3.5.2.3	Rotorun Kısa Devre Statorun Açık Devre Edilmesi Durumu.....	71
3.5.3	Yorum .....	64
<b>4</b>	<b>SONUÇ</b> .....	<b>65</b>
4.1	Genel Sonuçlar .....	65
4.2	Gelecek Çalışma.....	65
	<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>66</b>
	<b>EKLER</b> .....	<b>76</b>
	Ek-A Tezde Uygulanan ÇBAJ'ın Matematiksel Modeli .....	76
	Ek-B Tezde Uygulanan Yöntemin Sabit Hız Durumundaki Kodları .....	77
	Ek-C Tezde Uygulanan Yöntemin Sabit Rüzgar Rejimi Durumundaki Kodları..	86

## ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE	Sayfa
2.1 Ziegler-Nichols Metodu Kazançları.....	20

## ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	Sayfa
2.1	PID Kontrolör Blok Diyagramı .....17
2.2	3 Fazdan 2 Faza Dönüşüm Vektörel Gösterimi.....22
2.3	$\alpha\beta$ ve $dq$ eksenlerinin birbirine göre durumu.....26
2.4	Doğrudan Vektör Kontrolü yönteminde rotor akısının durumu.....32
3.1	ÇBAJ Genel Prensip Şeması.....35
3.2	Rotoru Şebekeye Bağlı Yöntemin Blok Diyagramı.....37
3.3	Tezde Uygulanan Yöntemin Blok Diyagramı.....44
3.4	Güç Devresi Blok Diyagramı.....45
3.5	Stator Tarafı Dönüşümleri Blok Diyagramı.....46
3.6	Rotor Tarafı Dönüşümleri Blok Diyagramı.....47
3.7	$dq-\alpha\beta$ Dönüşümü Blok Diyagramı.....48
3.8	Asenkron Makine hız-akı Karakteristiği.....52
3.10-a	Sabit Rüzgârda Jeneratörün Hızı.....54
3.10-b	Sabit Rüzgârda Jeneratör Hızının Geçici ve Kalıcı Durumu.....54
3.10-c	Sabit Rüzgârda Aktif, Reaktif ve Rüzgardan Alınan Güç.....55
3.10-d	Sabit Rüzgârda Aktif, Reaktif ve Rüzgârdan Alınan Güç.....55
3.10-e	Sabit Rüzgârda Rotor ve Stator Akımları.....56
3.10-f	Sabit Rüzgârda Rotor ve Stator Akımları ( $i_{sd}, i_{sq}$ ve $i_{rd}, i_{rq}$ ).....56
3.10-g	Rüzgâr tahmini parametrelerinin operasyon boyunca durumu $kT_1, kT_1^{tahmin}$ .....57
3.10-h	Rüzgâr tahmini $kT_1, kT_1^{tahmin}$ değerleri.....57
3.10-i	Rüzgâr tahmini parametrelerinin operasyon boyunca durumu $kT_2, kT_2^{tahmin}$ değerleri.....58
3.10-j	Rüzgâr tahmini $kT_2, kT_2^{tahmin}$ değerleri.....58
3.10-k	Operasyon boyunca durumu tork ve tork tahmini değerleri.....59
3.10-l	Tork ve tork tahmini değerleri.....59

<b>3.11-a</b> Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Stator Şebekeye Bağlı	
Durumda Hız.....	61
<b>3.11-b</b> Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Stator Şebekeye Bağlı	
Durumda Hızın bir Periyottaki Durumu.....	61
<b>3.11-c</b> Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Stator Şebekeye Bağlı	
Durumda Rotor ve Stator Akımları ( $i_{sd}$ , $i_{sq}$ ve $i_{rd}$ , $i_{rq}$ ).....	62
<b>3.11-d</b> Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Stator Şebekeye Bağlı Durumda	
Rotor ve Stator Akımlarının 1 Periyottaki Durumu ( $i_{sd}$ , $i_{sq}$ ve $i_{rd}$ , $i_{rq}$ ).....	63
<b>3.11-e</b> Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Stator Şebekeye Bağlı Durumda	
Aktif, Reaktif ve Rüzgârdan Alınan Güç.....	63
<b>3.11-f</b> Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Stator Şebekeye Bağlı Durumda 1	
periyottaki Aktif, Reaktif ve Rüzgârdan Alınan Güç.....	63
<b>3.12-a</b> Değişken Rüzgârda Rotor ve Stator Kısa Devre Durumda Hız .....	64
<b>3.12-b</b> Değişken Rüzgârda Rotor ve Stator Kısa Devre Durumda Hızın bir	
Periyottaki Durumu.....	65
<b>3.12-c</b> Değişken Rüzgârda Rotor ve Stator Kısa Devre Durumda Hızın Rüzgâr	
Değişimine tepkisi.....	65
<b>3.12-d</b> Değişken Rüzgârda Rotor ve Stator Kısa Devre Durumda Rotor ve	
Stator Akımları ( $i_{sd}$ , $i_{sq}$ ve $i_{rd}$ , $i_{rq}$ ).....	66
<b>3.12-e</b> Değişken Rüzgârda Rotor ve Stator Kısa Devre Durumda Rotor ve Stator	
Akımlarının bir Periyottaki Durumu ( $i_{sd}$ , $i_{sq}$ ve $i_{rd}$ , $i_{rq}$ ).....	67
<b>3.13-a</b> Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Statoru Açık Devre Durumda	
Hız .....	69
<b>3.13-b</b> Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Statoru Açık Devre Durumda	
Hızın Bir Periyottaki Durumu.....	70
<b>3.13-c</b> Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Statoru Açık Devre Durumda	
Hızın Referans Değere Oturması.....	70
<b>3.13-d</b> Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Statoru Açık Devre Durumda	
Rotor ve Stator Akımları ( $i_{sd}$ , $i_{sq}$ ve $i_{rd}$ , $i_{rq}$ ).....	71
<b>3.13-e</b> Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Statoru Açık Devre Durumda	
Bir Periyottaki Durumu ( $i_{sd}$ , $i_{sq}$ ve $i_{rd}$ , $i_{rq}$ ).....	71

## SİMGELER DİZİNİ

$\alpha - \beta$	Sabit referans eksenleri
$d - q$	Döner referans eksenleri
$b_f$	Sürtünme katsayısı
$i_{sd}, i_{sq}$	Stator akımının $d$ ve $q$ eksen bileşenleri
$i_r$	Rotor akım vektörü
$i_s$	Stator akım vektörü
$J$	Toplam eylemsizlik momenti
$L_r$	Rotorun toplam endüktansı
$L_s$	Statorun toplam endüktansı
$M$	Rotor ve stator sargılarının ortak endüktansı
$n_p$	Kutup çifti sayısı
$p$	Laplace dönüşüm değişkeni
$R_r$	Rotor direnci
$R_s$	Stator direnci
$s$	Kayma değişkeni
$T_e$	Elektromekanik moment
$T_L$	Yük momenti
$\tau_r$	Rotor zaman sabiti
$\tau_s$	Stator zaman sabiti
$u$	Sistemin kontrol girişi
$v_s$	Stator voltaj vektörü
$v_{sd}, v_{sq}$	Stator voltajının $d$ ve $q$ eksen bileşenleri
$\omega_g$	Genel referans çerçevesi elektriksel hızı
$\omega_r$	Elektriksel rotor hızı
$\omega_s$	Elektriksel senkron hız
$x$	Sistem çıkışı
$\mathbf{x}$	Sistem durum vektörü
$\psi_{rd}, \psi_{rq}$	Rotor akısının $d$ ve $q$ eksen bileşenleri
$\psi_r$	Rotor akısı
$\psi_s$	Stator akısı

$\theta_s$	Rotor akı vektörüyle $\alpha$ eksenindeki açı
$\sigma$	Kaçak sabiti
*	Referans değerleri belirtir

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Amaç

II. Dünya Savaşı ve Soğuk Savaş dönemlerinin ardından dünya hızlı bir küreselleşme sürecine girmiş, buna paralel olarak yarı-iletken teknolojisindeki gelişmeler, elektronik cihazları insan hayatında daha çok kullanılabilir kılmıştır. İletişimden iklimlendirmeye, şehirleşmeden nüfus artışına kadar birçok sebep insanların enerji ihtiyacını arttırmış, dünyanın enerji ihtiyacının her 14 yılda 2 katına çıkacağı öngörülmüştür[1]. Bu durum günümüzde enerji kaynaklarını hiç olmadığı kadar önemli kılmıştır. Bu bağlamda enerji kaynağının çeşidi, sürdürülebilirliği, üretim maliyeti, çevreye etkisi vb. hususlar önem arz etmektedir. Enerji elde etmek için yakın geçmişe kadar, su kaynakları bir kenara bırakılırsa fosil kaynaklı yakıtlar yegâne seçenek olarak kullanılmıştır. Ancak bilimsel çalışmalar fosil yakıtların yakın gelecekte tükeneceğini öngörmektedir. Yaklaşık olarak petrolün 50 yıl, kömürün 150 yıl ve doğalgazın 100 yıl ömrü kaldığı düşünülmektedir. Ayrıca fosil yakıtların çevre kirliliği, sera gazı salınımı vb. çevresel zararı da mevcuttur. Tüm bu sebeplerden dolayı insanoğlu yakın zamanda alternatif, sürdürülebilir, temiz enerji kaynakları arayışına girmiştir.

Bu arayış; eski çağlardan bu yana farklı yöntemlerle de olsa kullanılan suyun yanında, nükleer enerji, jeotermal, biyokütle, güneş ve rüzgâr gibi yeni enerji kaynakları kullanımına neden olmuştur. Bu kaynaklar temiz enerji kaynakları olup gerekli özen gösterildiğinde ve düzenli bakım yapıldığında oldukça uzun ömürlü ve sürdürülebilir olmaktadır.

Güneş enerji sistemleri ele alındığında ilk yatırım maliyetleri yüksek olsa da iyi bakılması kaydıyla 15-30 yıl etkin bir şekilde enerji üretebilmektedir. Ancak güneş panelleri ve invertörlerin büyük oranda yurt dışı kaynaklı olması ve ödenen faiz giderleri düşünüldüğünde, özellikle ülkemiz açısından sistemin yatırım maliyetini karşılama süresinin oldukça uzun olması önemli bir dezavantajdır. Rüzgâr enerji sistemleri ise oldukça karmaşık sistemlerdir. Kontrol edilebilmeleri de en az yapısı kadar zor ve karmaşıktır. Ancak rüzgâr ölçümü yapılmış, doğru bölgelerde kurulmuş



rüzgâr enerji santralleri enerji üretiminde oldukça başarılı olabilmektedir. Ayrıca süresini dolduran rüzgâr türbinlerinin hurdaları da değerli olup, geri dönüşümü sağlanabilmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından, fotovoltaik panellerle güneşten elektrik üretimini bir kenara bırakırsak diğer tüm yöntemlerde elektrik üretimi için bir jeneratöre ihtiyaç duyulmaktadır. Yani kaynak değişse de enerji sistemlerinin en önemli parçalarından biri jeneratörlerdir. Dolayısıyla jeneratörlerin verimli ve amaca hizmet edecek şekilde kontrol edilmesi de çok önemlidir.

Nükleer santraller ve termik santraller gibi buhar vasıtasıyla elektrik üretilen sistemlerde genellikle sabit ve istenen miktarda buhar gücü elde edilir. Bu sayede enerji üretiminde türbin ve jeneratör kararlı değerler üzerinden üretim yapabilir. Rüzgâr enerji sistemlerini düşündüğümüzde durum biraz farklıdır. Rüzgâr enerji sistemlerinin kurulacağı bölgeye karar vermeden önce rüzgâr ölçümü yapılsa da hiçbir zaman ve dünyanın hiçbir yerinde sabit bir rüzgâr hızı görülmemektedir. Genellikle ilgili yerin rüzgâr hızı 8 - 15 m/s şeklinde bir aralıkla ifade edilmekte olup, bu rejim belirsizlikleri yüzünden rüzgâr, maliyetsiz ve temiz bir kaynak olmasına rağmen enerji üretimi açısından oldukça zor bir kaynaktır. Rüzgârın bu dinamik haline uyum sağlayabilecek bir elektrik üretim sistemi gerekmektedir. Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörler (ÇBAJ) değişimlere oldukça hızlı tepki verebilmeleri sayesinde rüzgâr enerji sistemleri için kullanışlı bir çözüm olmuşlardır.

ÇBAJ'ların amaca uygun kontrol edilebilmeleri önemli olup, karmaşık yapılarının getirdiği kontrol zorluğunu aşmak için DC makinelerin kontrol edilebilme özelliği örnek alınmıştır. DC makinelerin hız kontrolü kolaylıkla yapılabildiğinden sanayide uzun yıllar boyunca yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak DC makinelerin sağladığı bu kolaylıklar yanında; periyodik bakım gerektirmeleri, fırça-kollektör teması sırasında olası ark ve kıvılcımlar nedeniyle parlayıcı-patlayıcı ortamlarda iş sağlığı ve güvenliği açısından tehlike oluşturması, yüksek devir ve güçlere çıkamaması vb. dezavantajları vardır. Bu problemlerden dolayı asenkron makineler alternatif olarak kullanılmaya başlanmıştır. Asenkron makineler sağlam ve fazla bakım gerektirmeyen yapıları, her türlü ortam şartında kullanılabilmesi, istenen devir ve güçlere çıkabilmesi vb. avantajlar bakımından oldukça faydalı olmuşlardır. Ancak asenkron makineler de doğrusal olmayan, bilakis oldukça karmaşık yapıları nedeniyle yüksek mertebeli matematiksel modeller ve karmaşık kontrol algoritmaları

gerektirmektedir. Son yıllarda yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, yüksek hız ve güçlerde çalışabilen anahtarlama elemanları geliştirilmiş, bu şartlara cevap verebilen mikroişlemciler ve kontrol yöntemleri tasarlanabilmiş, bu sayede asenkron makineler de sanayinin birçok dalında yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır.

Asenkron makinelerin kontrolü, DC makinelere benzetilerek yapılmaktadır. Doğrusallık akının sabit tutulduğu durumda tork ile akımın bir tork bileşeni arasındadır. DC makinelere akı sabit tutularak, momenti oluşturan akım bileşeni ile kontrol doğrusal olarak sağlanabilmektedir. Asenkron makinelerin de DC makinelere benzer şekilde kontrol edilebilmeleri için, sistemin matematiksel modeli çıkartılırken ve kontrol algoritmaları hazırlanırken üç fazlı sistemden iki fazlı sisteme geçiş yapılmalıdır.

Bu tezin amacı rüzgâr enerji sistemleri vb. yenilenebilir enerji sistemlerinde sıklıkla kullanılan ÇBAJ'ların etkin ve verimli bir şekilde kontrol edilmesi üzerine çalışmak, başlıca kontrol yöntemlerinden bahsetmek, statoru doğrudan şebekeye bağlı örnek bir çalışma üzerinde kontrol çalışması yapmak ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunmaktır.

## 1.2 Literatür Özeti

ÇBAJ'lar üzerine yapılan çalışmalar genellikle, statoru doğrudan şebekeye, rotoru konvertöre bağlı, değişken hız, sabit frekans modunda olan tasarımlar üzerine yapılmıştır. Bu çalışmalarda bazen rotor voltajının  $q$  bileşeni ile tork ve aktif güç,  $d$  bileşeni ile de reaktif güç ayrıştırılmış olarak kontrol edilmiş, bazen de rotor tarafı konvertöründe vektör kontrolü marifetiyle stator frekansı ve rotor hızından, aktif ve reaktif güç kontrolü yapılmıştır. Rotor akımının ortogonal bileşenleriyle reaktif güç ve torkun ayrıştırılmış olarak kontrol edildiği çalışmalar da olmuştur. Söz konusu çalışmaların çoğunda aktif ve reaktif gücün ayrıştırılmış kontrolü yapılmıştır. Bu genel şartlar altında; ÇBAJ'ın olası şebeke hatası durumlarında daha kararlı kalabilmeler için pek çok çalışma yapılmıştır. ÇBAJ'ların sergiledikleri kısa devre karakteristikleri üzerinde durulmuştur. D. F. Howard vd. tarafından[2] yeni bir kısa devre modeli önerilmiştir. Bu model kısa devre halinde rotor tarafı konvertörü (RSC-Rotor Side Converter)ve şebeke tarafı konvertörü (GSC-Grid Side Converter), akım kaynakları yardımıyla kontrol edilmiş, işlem sırasında ÇBAJ terminalindeki voltaj hataları % 50'den küçük tutulmuştur. RSC, açısal hız  $\omega$  ile, GSC ise  $v_{dc}$  ile kontrol edilmektedir. Simülasyon sonuçlarından, önerilen yöntemin geçici bölgede iyi ve gerçekçi sonuçlar verdiği, ayrıca rotor ve stator sargılarının ortak endüktansı  $M$ 'nin kısa devre akımlarının genliklerinden önemli seviyede etkilendiği ifade edilmiştir. Ledesma vd. [3] tarafından ÇBAJ'larda minimum voltaj koruması üzerine çalışılmıştır. İspanya'da uyguladıkları sisteme göre, üretilen güç nominal gücün %85'inin altına inmesi durumunda rüzgâr sistemi devreden çıkartılarak şebeke gücünün zayıflamasının önüne geçildiği, sistem kararlılığının sağlandığı ve üretilen gücün kalitesinin istenen limitler içinde kaldığı ifade edilmiştir. D.D. Li vd.[4] tarafından benzer bir çalışma yapılmış; kısa devre akımlarının, jeneratörün kısa devreden önceki duruma, aktif ve reaktif güçler, kayma vb. durumlara bağlı olduğu ortaya konmuştur. Yöntemin mühendislik uygulamaları için çok karmaşık olduğu ifade edilmiştir. J. Ma vd.[5] tarafından yapılan çalışmada ÇBAJ'ın stator ve rotor akılarının geçici durumları üzerinde durulmuştur. Simülasyon sonuçlarıyla aktif ve reaktif güçteki küçük artışların kısa devre akımlarında da artışa neden olduğu gösterilmiştir. H. Karimi-Davijani vd.[6] tarafından ÇBAJ şebekeye bağlıken değişken rüzgâr hızlarına ÇBAJ'ın dinamik cevap verdiği ve kısa devre

durumlarında[7,8] kararlı kaldığı gösterilmiştir. E. Tremblay vd. tarafından[9] şebeke tarafı konvertörünü kontrol etmek için çalışılmıştır. Sonuçlar, çalışmanın harmonikleri kompanze etmede, reaktif gücün ayarlamada ve güç faktörünü kararlı tutmada[10,11] başarılı olduğunu göstermiştir.

W. Qiao vd.[12] tarafından ÇBAJ'ın rotor tarafı konvertörü için optimal PI kontrolör yöntemi önerilmiştir. Parçacık toplama optimizasyonu (Particle Swarm Optimization) adını verdikleri bu yöntem, kuşların beslenmeleri esnasındaki ibikleme hareketinden esinlenilmiştir. Çalışma sonucunda önerilen yöntemin, PI kontrolör kazançlarını optimum seviyede hesaplayabildiği ve sistemin geçici bölgeden kısa sürede çıkmasını sağladığı ifade edilmiştir. Benzer şekilde X. Ancheng vd.[13] tarafından da ÇBAJ'larda kullanılan PI kontrolörlerin parametrelerinin hesaplanabilmesi üzerinde çalışılmıştır. S. Bhattacharya vd.[14] tarafından önerilen doğrusal kontrolörün konvansiyonel kontrolörlerle kıyaslanması sonucu; stator akımı ve DC-Link voltajının toplam harmonik distorsiyonunun konvansiyonel kontrolörlere göre daha düşük olduğu ifade edilmiştir.

ÇBAJ kontrolünde genellikle alan yönlendirmeli kontrol (FOC) kullanılsa da, Doğrudan Tork Kontrolü (DTC) de zaman zaman kullanılmaktadır. S. Seman vd.[15,16] tarafından 2 MW'lık bir ÇBAJ üzerinde simetrik olmayan şebeke durumları simüle edilmiş olup kontrol yöntemi olarak doğrudan tork kontrolü (DTC) kullanılmıştır. Önerilen yöntemin, sistemdeki gerilimlerin optimizasyonu ve kararlılığı açısından faydalı sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Benzer şekilde; B.B. Pimple vd.[17], S. Z. Chen vd.[18] tarafından, ÇBAJ üzerinde DTC çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca HG. Jeong vd.[19] tarafından yapılan çalışmada ÇBAJ'a kayma kipli kontrol ve uzay vektör modülasyonu uygulanmıştır. Simülasyon sonuçlarında önerilen yöntemin aktif vereaktif güç, rotor hızı ve DC-Link voltaj konvertörü kontrolünde başarılı sonuçlar verdiği görülmüş, ancak üretilen güçteki dalgalanmaları artırdığı belirtilmiştir.

A. P. Tennakoon vd.[20] tarafından rotor pozisyonunun takibi vasıtasıyla ÇBAJ kontrolü yoluna gidilmiştir. Rotor açısı takibi için herhangi bir makine parametresi kullanılmamakta olup ölçülen stator voltajı ve rotor hızından hesaplanmaktadır. Önerilen sistemin makine parametrelerinden bağımsız oluşu, daha az karmaşık yapısı, kararlı ve hızlı takip imkânı sağlaması vb. faydalar sağladığı gösterilmiştir. ÇBAJ'lar genellikle stator akısının oryantasyonuyla kontrol

edilmektedir. Ancak stator voltajı oryantasyonu da kullanılmaktadır. Bu bağlamda G. D. Marques vd.[21] tarafından önerilen yöntemin akım bozulmalarının zayıflatılmasıyla ilgili güzel sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Benzer şekilde Cartwright vd. tarafından[22] stator voltajının  $d$  bileşeni sıfırlanmak suretiyle hat geriliminin stator voltajının  $q$  bileşenine eşit olması sağlanmıştır. Önerilen yöntemin dinamik reaktif güç kontrolü[16] ve AC voltaj kontrolünde başarı sağladığı belirtilmiştir.

Shen vd.[24,25] tarafından yapılan çalışmada, rotor voltaj eksenleri  $dq$ referans çerçevesine kilitlemek suretiyle rotor hızı ve açısı sensörsüz olarak tahmin edilmiş, buradan elde edilen verilerle ayrıştırılmış güç kontrolü sağlanmıştır. Benzer bir çalışma da I. Erlich vd.[26] tarafından yapılmış, ÇBAJ'lar için uzay-fazör gösterimli bir model geliştirilmiş, pervane bıçak açısı ve hız kontrolü yapılmıştır. Ayrıca 3 fazında kısa devre olması hali de test edilmiştir. Sonuçta, önerilen yöntemin konvansiyonel yöntemlere göre ÇBAJ'ın kararlılığını arttırdığı belirtilmiştir. Khatounian vd. tarafından[27,28] yapılan çalışmada, çıkıştaki harmonikler minimize edilmiş ve geniş bir çalışma aralığında voltaj genliğinin ve frekansın ayarlanabilir olmasının sağlandığı belirtilmiştir. Rabelo vd. [29] tarafından önerilen yöntemde reaktif gücün parçalı olarak ele alınıp, ortadan kaldırılması ve güç faktörünü 0,9'da tutulması amaçlanmıştır. Ancak bu yöntemde rotor devresinin aşırı ısındığı, bu durumun reaktif güce sebep olduğu ifade edilmiş olup makinenin uygun bir şekilde tasarlanması halinde bunun önüne geçilebileceği belirtilmiştir. El Aïmani vd.[30] tarafından 1MW'lık yüksek güçlü bir ÇBAJ eşdeğer modelinde iki farklı yöntem üzerinde durulmuştur. Her iki stratejide de stator akısının  $q$  bileşeni sıfır kabul edilmiş olup  $d$  bileşeni sabit bir değer olarak stator akısına eşit kabul edilmiş, bu sayede ayrıştırılmış kontrol sağlanmıştır.

Rüzgâr enerji sistemlerinde konvertörler üzerinden çift yönlü bir güç akışı olmaktadır ve bu çift yönlü akan güç toplam gücün yaklaşık %25'ne eşittir. H.Ma vd.[31] tarafından ÇBAJ'lar için bir IGBT modüllü AC-DC-AC konvertör modeli önerilmiştir. Önerilen konvertörün yüksek güç kalitesi, iyi performans ve düşük maliyet sağladığı, rüzgâr enerji sistemleri için uygun olduğu belirtilmiştir. M. Yin vd. tarafından[38] ÇBAJ için mekanik model, jeneratör modeli ve PWM voltaj kaynağı konvertör modeli çıkartılmıştır. Rotor tarafı konvertörü sistemde hız ve reaktif gücün bağımsız [33] bir şekilde kontrolü sağlanmıştır. J. Shu vd.[34] tarafından ÇBAJ'ın,

rüzgâr ölçümü yapılmadan (daha doğrusu rüzgâr ölçümü yapılmamış, ancak varsayılan rüzgâr belli limitlerle sınırlanmış) kontrolü yapılabilmektedir LI Lan vd. tarafından yapılan çalışmada, güç kontrolünün donanım olarak daha ekonomik bir devreyle sağlandığı ifade edilmiştir. V. Verma vd.[35] tarafından RSC vasıtasıyla dolaylı akım kontrolü önerilmiş, bu yöntemle rotor devresindeki güç akışı ve güç faktörünün kontrol edilmesi sağlanmıştır. Simülasyon sonuçları önerilen yöntemin konvansiyonel yöntemlere göre daha etkin, hızlı, enerji verimliliği yüksek olduğu ve daha az donanıma gereksinim duyduğu belirtilmiştir. YS Kim vd.[36] tarafından çalışmada ÇBAJ için titreşim azaltıcı bir yöntem üzerinde çalışılmıştır. Önerilen yöntem diğer titreşim azaltma yöntemleriyle karşılaştırılmış ve diğerlerine göre daha başarılı ve etkin olduğu ifade edilmiştir.

E. Tremblay vd. [3,37] tarafından dengesiz durumdaki bir şebekeye bağlı ÇBAJ üzerinde çalışılmış, güç faktörü üzerinde oynayarak şebeke hatalarının giderilmesi üzerinde çalışılmıştır. Önerilen yöntemde şebeke tarafı konvertörü üzerinden reaktif güç kompanzasyonu sağlanmış olup şebeke hatalarının giderildiği belirtilmiştir. I. Esendi vd.[38] tarafından önerilen yöntemle eklenen üretici manivela ekipmanının sistemden çıkarılması durumunda güç üretiminin uzun süre kontrol edilemediği görülmüş, ekipmanın sisteme dâhil edilmesi sonucu şebeke bozulmalarının 10 ms gibi kısa bir sürede normale döndüğü görülmüştür. Önerilen yöntem üretilen voltajın kararlı olması vb. avantajlar sağlanmıştır. Pannell vd.[39-42] tarafından ÇBAJ'ın dengeli ve dengesiz şebekelerde, şebeke hatası durumuna maruz kalması ve bu duruma verdiği tepkiler üzerine çalışmışlardır. Tasarlanan kontrolörün sistemi şebeke hatalarına karşı daha kararlı hale getirdiği belirtilmiştir. Ancak önerilen yöntemin ÇBAJ'daki konvertörlerin kararlılığını bozması gibi temel bazı donanımsal problemleri gideremediği görülmüştür.

H. Nian vd. tarafından[43] ÇBAJ'ın şebeke gürültüsü altında doğrudan güç kontrolü yapılmıştır. Çalışmada deneysel olarak 1 kW'lık bir ÇBAJ'ın dinamik durum analizleri yapılmış, sonuç olarak % 0,85 oranında 5. harmonik, % 0,34 oranında 7. harmonik olduğu gösterilmiştir. Sistemde VPI ( Vector Proportional Integrated ) regülatörler kullanılmış, aktif-reaktif güçler neredeyse harmoniksiz üretilmiştir. D. G. Giaourakis vd.[44,45,46] tarafından ÇBAJ'ların değişken şebeke bozulmaları karşısındaki davranışları incelenmiştir. Şebeke bozulmaları simetrik ve asimetrik olmak üzere 2 kısımda değerlendirilmiş, ÇBAJ'lara en kötü etkiyi

asimetrik bozulmaların yaptığı gösterilmiştir. Çalışmada, tek faz, faz-faz kısa devre, asimetrik voltaj bozulmaları ve üç faz kısa devre durumları incelenmiştir. Bu çalışmaların iki önemli dezavantajı, sistemin gerçekleştirilebilmesi için sağlam bir işlemsel maliyete sahip olması ve rotor-stator faz akımlarının ölçülebilmesi için fazlardan donanım gerektirmesidir. K. E. Okedu vd.[47-50] tarafından ÇBAJ şebeke hatası durumunda çalıştırılmış, önerilen yöntem sayesinde ÇBAJ ağır stres altında aktif ve reaktif gücün ayrıştırılmış kontrolünü senkronizasyonu kaybetmeden sağlamıştır.

Holdsworth vd. tarafından[51], 2MW'lik bir rüzgâr santralinde enerji üretimi için kullanılan sincap kafesli asenkron jeneratörle ÇBAJ karşılaştırmıştır. Jeneratörler zayıf ve güçlü şebeke koşullarında denenmiştir. Sincap kafesli asenkron jeneratörde, üç faz hataları ve kontrolsüz bir ivme ortaya çıkmış olmasına rağmen istenen güç faktörü değeri sağlanmıştır. ÇBAJ'da normal çalışma durumunda, sistemin kısa devre durumlarında bile hız, güç faktörü kontrolü ve sistem kararlılığı sağladığı belirtilmiştir. O. Anaya-Lara vd.[52,53] tarafından bir rüzgâr uygulamasında ÇBAJ için güç sistem stabilizörü (GSS) tasarlanmıştır. Sonuç olarak yüksek dinamik performans ve geçici sürede azalma olduğu belirtilmiştir.

L. M. Fernandez vd.[54] tarafından indirgenmiş yeni bir ÇBAJ modeli önerilmiş olup, bu model ile sistemin voltaj ve açı yönünden kararlılığı amaçlanmıştır. Yapılan çalışma rüzgâr sahasında birden fazla rüzgâr türbini öngörmekte ve bunların her birini modellemek yerine hepsini içeren tümleşik ve indirgenmiş, her bir jeneratörün ve rüzgâr sahasının özelliklerini içeren bir model öngörmüştür. Simülasyon sonuçları üzerinde çalışılan eşdeğer modelin asıl modelle aynı sonuçları vermiş olup önerilen eşdeğer modelin daha basit bir yazılımla aynı işi yaptığı belirtilmiştir. Xiang vd. tarafından[55,56] yüksek voltajlı DC-link ile ÇBAJ'ın kontrolü üzerine bir çalışma yapmıştır. Önerilen çalışma sonucunda, yüksek seviyeli DC link ile sistem frekansının ve dolaylı olarak da voltaj genliğinin kontrol edildiği gösterilmiştir.

Y. Zhang vd. tarafından[57] ÇBAJ kontrolü için rotorun hız bilgisini tahmin eden[58,59] bir yöntem önerilmiştir. Sonuç olarak sistem uygulandığında anahtarlama frekansının % 48,6 oranında düştüğü ifade edilmiştir.

ÇBAJ'lar sadece rüzgâr uygulamalarında kullanılmamış olup başka yenilenebilir enerji sistemleri için de kullanılabilceği üzerine çalışmalar yapılmıştır.

D. Ramuz vd.[60] tarafından Fransa Guayana'sında bir nehir üzerine kurulmuş olan hidroelektrik sistem üzerinde çalışılmış olup nehrin düzensiz debisini kompanze edebilmesi, kararlı ve kalitesi yüksek enerji üretebilmesi nedeniyle bir ÇBAJ kullanılmıştır. ÇBAJ'ın rotor sargıları bu çalışmada fotovoltaiik güneş panelleriyle sağlanmıştır. Çalışma sonucu kararlı ve kaliteli enerji elde edildiği belirtilmiştir. Q. Jiageng vd.[61] tarafından MW mertebesinde hibrid (dizel-ÇBAJ)bir sistem üzerinde çalışılmıştır. Dizel jeneratör sistem verimliliğini arttırmaktadır. Sistem değişikliklere oldukça başarılı tepkiler vermiş, dizel jeneratörün terminal voltajının ve oluşan reaktif gücün üst limitinin değişen şartlar karşısında sistem kararlılığı ve veriminin optimize edilmesi için oldukça önemli olduğu gösterilmiştir.

Ayrıca ÇBAJ'larla alternatif jeneratör tasarımları arasında karşılaştırmalı çalışmalar da yapılmıştır. B. Badrzahed vd.[62] tarafından ayarlanmış hızlı asenkron jeneratör (FSIJ) ile ÇBAJ, şebekenin osilasyon durumlarındaki performansları karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda MW mertebesinde bir sistemde FSIJ'e göre ÇBAJ'ın, şebekedeki osilasyon durumlarında daha kontrol edilebilir ve kontrol stratejisine daha olumlu katkı verdiği gösterilmiştir.

ÇBAJ'ların en çok kullanılan tasarım şekli statoru doğrudan şebekeye bağlı sistemdir. Ancak bazı farklı tasarımlar üzerinde de çalışılmıştır. N. David vd.[63] tarafından bilinen ÇBAJ bağlantısının tersine yeni bir bağlantı yöntemi önerilmiştir. Bilinen yöntemde stator doğrudan şebekeye bağlıyken önerilen yöntemde rotoru doğrudan şebekeye bağlı bir yapı öngörülmüştür. Stator ise güç konvertörüne bağlıdır. Rotoru şebekeye bağlı yeni tasarımın statoru şebekeye bağlı sistemlere bir alternatif olabileceği ifade edilmiştir.

R. Pena vd.[64,65] tarafından dengesiz 3 fazlı bir yükü besleyen ve şebeke bağlantısız[66] bir ÇBAJ üzerinde çalışılmıştır. Çalışmada uygulanan metod, stator voltajını ve tork darbelerini dengelemiş, tecrübî sonuçlara göre önerilen yöntemin konvansiyonel yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

ÇBAJ'ların kontrolünde genellikle PI kontrolörler kullanılsa da farklı kontrolörlerin kullanıldığı çalışmalar da yapılmıştır. S. Le-Peng, W. Debiao vd.[67] tarafından ÇBAJ'lar, rüzgâr enerjisini yakalayabilmek için ÇBAJ'ın temel bağıntıları kullanılmış olup, gücün kontrolünde PI kontrolör yerine bulanık mantık kontrol sistemi kullanılmıştır. Geleneksel kontrol metotlarıyla karşılaştırıldığında, önerilen sistemin iyi dinamik ve statik performans sağladığı, rüzgâr dalgalanmalarına karşı



kararlı kaldığı ve başarılı bir sonuç sergilediği ifade edilmiştir. J. Yan, J. Chen vd.[68] tarafından rüzgâr sistemlerinde sabit hızlı jeneratör, değişken hızlı jeneratör, sabit mıknatıslı jeneratör ve çift beslemeli asenkron jeneratörler üzerinde durulmuş, jeneratörlerin elektriksel kontrolünde bulanık mantıkkontrol ve yapay sinir ağları kontrol sistemleri uygulanmıştır. Sonuç olarak; rüzgâr sistemleri verimlilik ve maliyet açısından ele alındığında, en uygun ve yaygın kullanılan tipin ÇBAJ olacağı ifade edilmiştir.

T. Guojun vd.[69] tarafından yumuşak şebeke bağlantısı (SGC-Soft Grid Connection) adını verdikleri bir yöntem önerilmiş olup yumuşak şebeke bağlantısı stator akı oryantasyonuyla sağlanmaktadır. Önerilen yöntemin bağlantı esnasında akım artışının olmadığı da gözlenmiş olup yöntemin ÇBAJ'lar için uygun olduğu ifade edilmiştir. R. A. Mc Mahon vd.[70] tarafından 250 kW'lık fırçasız bir ÇBAJ üzerinde çalışılmıştır. Tecrübî veriler ışığında yapılan tasarım üzerinde sistemin dinamik performansı üzerinde durulmuştur. Ayrıca sistemde 2 aşamalı bir vites kutusu kullanılmış, fırçasız tasarımın normal ÇBAJ'a göre daha uygun ve maliyetinin daha düşük olduğu ifade edilmiştir.

Gaillard A., Karimi S. vd.[71] tarafından ÇBAJ üzerinde hata toleransı üzerine çalışılmıştır. Simülasyon sonuçları önerilen yöntemin, hatanın oluşmasıyla tespit edilmesi arasındaki süreyi düşürdüğü, 10µs'lik kısa bir sürede hata tespitinin yapılabildiğini göstermiştir.

Tüm bu çalışmalar ÇBAJ kontrolünde FOC ve çeşitlerinin ne kadar kullanışlı ve önemli olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada ise ÇBAJ kontrolünde tork ve akının ayrıştırılmış kontrolü üzerinde durulacak, başarılı bir kontrol için FOC kullanmanın şart olmadığı gösterilecektir.

### 1.3 Tezin Ana Hatları

Birinci bölümde tezin amacı ve literatür çalışması aktarılmış, ikinci bölümde genelde asenkron makinelerin, özelde ise ÇBAJ'ların kontrolünde ara işlem olarak kullanılan başlıca yöntemlerden bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde ise ÇBAJ'ın şebekeye çeşitli bağlantı şekillerinden ve bu durumda kullanılan kontrol yönteminden bahsedilmiştir. Sonrasında statoru şebekeye bağlı bir ÇBAJ'ın hız, akı ve torkun esas alındığı bir yöntem anlatılmış ve uygulanmıştır. Uygulama sonuçları grafiklerle detaylı olarak anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde çalışma sonucunda elde edilen kazanımlar anlatılmış ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

Ekte ise konuya ilgi duyan çalışmacılara yardımcı olması adına tezde uygulanan yöntemin ve ÇBAJ'ın MATLAB kodları verilmiştir.

## 2 ÖN BİLGİLER

Bu bölümde genel olarak tezin konusu olan, rüzgâr enerji santrallerinde ÇBAJ'ların kontrolünden ve bu kontrol sürecinin basamaklarından bahsedilecektir. Bu kapsamda, kullanılan matematiksel modelin simule edilmesini sağlayan 4 Adım Runga-Kutta metodundan bahsedilmiş, sistemin kontrolü açısından oldukça önemli olan PID kontrolörler ve bunların kazançlarını belirlemede kullanılan Ziegler-Nichols Frekans Tepkisi yönteminden kısaca bahsedilmiştir. Sistemin kontrolünde kolaylık sağlayan üç fazlı sistemden iki fazlı sisteme geçiş ve dönen referans çerçevesine dönüşüm anlatılmıştır. Sonrasında tezde kullanılan ÇBAJ'ın matematiksel modeli çıkartılarak beşinci mertebeden denklemleri verilmiştir.

Son olarak ÇBAJ'ların kontrolünde başlıca yöntemlerden olan alan yönlendirmeli kontrolden (FOC) ve çeşitlerinden (Doğrudan FOC ve Dolaylı FOC) bahsedilmiş olup alternatif bir yöntem olan doğrudan tork kontrolü (DTC) ile bölüm bitirilmiştir.

### 2.1 Sabit 4 adım Runga-Kutta metodu

4 adım Runga-Kutta metodu teorik çalışmalarda, sistemin matematiksel modeline ait diferansiyel denklemleri çözmek için kullanılan bir nümerik analiz metodudur. Çoğu diferansiyel denklem takımı gibi tezde ilgileneceğimiz model denklemleri de yeterli sayıda ( $n$ ) durum değişkeni tanımıyla  $n$  adet 1. mertebeden diferansiyel denklemden oluşan şu vektörel diferansiyel denklem biçimine getirilebilir:

$$\dot{x} = f(t, x) \quad (2.1)$$

Burada  $x \in \mathbb{R}^n$  durum değişken vektörü,  $t \in \mathbb{R}$  zaman,  $f: \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  vektör fonksiyondur. Nümerik çözüm, başlangıçtan ileriye doğru tercihen çok küçük  $d_t$  adımlarla şöyle yapılabilir:

Anlık değerleri birer diziyeye kaydedilen  $t$ 'nin  $i$ . andaki değeri  $t(i)$ ,  $x$  vektörünün o andaki değeri de  $x(:, i)$  olsun. Bu vektörün meselâ 3. değişkenininin

değeri ise  $x(3,i)$  demektir.  $x$ 'teki bir adımlık değişim  $d_x$  ve yeni değerlerle değişkenlerin güncellenmesi şöyle bulunur:

$$k_1 = f(t(i), x(:, i))d_t \quad (2.2)$$

$$k_2 = f\left(t(i) + \frac{d_t}{2}, x(:, i) + \frac{k_1}{2}\right) d_t \quad (2.3)$$

$$k_3 = f\left(t(i) + \frac{d_t}{2}, x(:, i) + \frac{k_2}{2}\right) d_t \quad (2.4)$$

$$k_4 = f(t(i) + d_t, x(:, i) + k_3)d_t \quad (2.5)$$

$$d_x = \frac{k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4}{6} \quad (2.6)$$

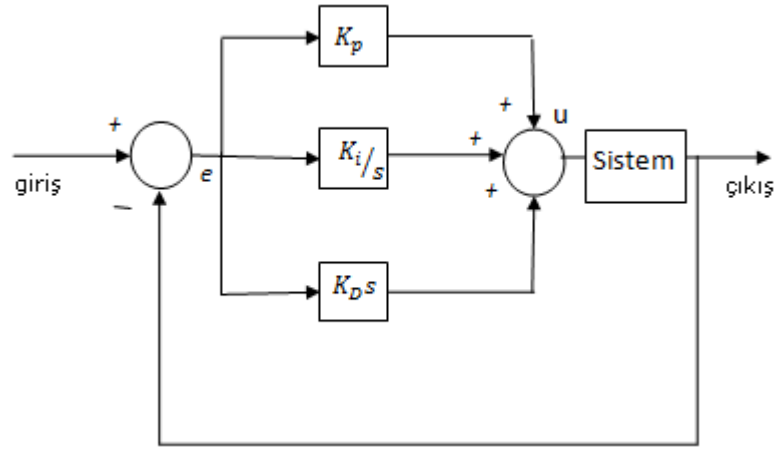
$$x(:, i + 1) = x(:, i) + d_x \quad (2.7)$$

$$t(i + 1) = t(i) + d_t \quad (2.8)$$

Bu metot yüksek hassasiyet gerektiren durumlarda[72] kullanılır. Daha kaba olan Euler metodu ise buradaki  $d_x$  yerine sadece  $k_1$ 'i kullanır. Bu tezde 4 adım Runge-Kutta metodu, kullanılan ÇBAJ'ın matematiksel modelinin nümerik çözümünde kullanılmıştır.

## 2.2 PID Kontrolörler

PID kontrolörler, geri beslemeli kontrol sistemleri için sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır. Geri beslemeli sistemlerde, sistemden ölçülen değerle referans değerinin farkından bir hata değeri elde edilmekte olup PID kontrolörler kazançları ayarlanmak kaydıyla bu hata değerini minimize etmeye çalışır. Şekil 2.1'de PID kontrolörlerin kullanım şekli genel olarak gösterilmektedir.



**Şekil 2.1** PID Kontrolör Blok Diyagramı

PID kontrolörler temel olarak 3 kısımdan oluşmaktadır. P oransal (Proportional), I integral, D türevsel (Derivative) kontrolörlerdir. P, I ve D kontrolörlerin matematiksel denklemleri sırasıyla;

$$u_p = K_p \cdot e \quad (2.9)$$

$$u_I = \int K_I e \cdot dt \quad (2.10)$$

$$u_D = K_D \cdot \frac{de}{dt} \quad (2.11)$$

şeklindedir. Burada  $u_p, u_I, u_D$  sırasıyla oransal, integral ve türevsel kontrolörlerin çıkışları,  $K_p, K_I, K_D$  sırasıyla oransal, integral ve türevsel kontrolörlerin kazançlarıdır. Bu çıkış sinyalleri sistem için kontrol sinyalleri olup PID kontrolörün çıkış sinyali sistemin giriş sinyalidir.

P (Oransal) kontrolörler karşılaştırmacı çıkışındaki hata sinyaliyle ( $e(t)$ ) orantılı bir etki yaparlar. Genellikle P kontrolörün kazancı arttıkça hata azalmakta olup kazanç değeri çok yükseltirse çıkışta osilasyonlara sebep olur. Bu yüzden kazanç değeri osilasyonla, minimum hata değeri arasında optimum bir değere ayarlanmalıdır. P kontrolör, yük değişiminden kaynaklanan hatayı tamamen yok edememesi nedeniyle genellikle tek başına kullanılmaz[73]. Basit yapısı itibarıyla bazı durumlarda kalıcı hatabırakabilmesi nedeniyle genellikle küçük kapasiteli, basit sistemlerde kullanılır.

I kontrolörler hatanın integrali ile orantılı kontrol sinyali üretir. Bu, hata artıysa artan, eksiye azalan, sıfırda sabit bir sinyaldir. Denetim esnasında osilasyonlara sebep olabilmektedir. I kontrolörler genellikle P kontrolörlerle birlikte (PI kontrolör) kullanılır[73,74]. Ayrıca P denetimin dezavantajlarından dolayı oluşan kalıcı durum hatasını integral yaklaşımıyla giderebildiği için PI kontrolörler sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır.

D kontrolörler ise hatanın türevi ile orantılı kontrol sinyali üretirler. Bu yüzden çıkışın hızlı değiştiği sistemlerde hatanın daha çabuk azalmasını sağlarlar. Ancak türev alıcılar gürültüyü artırıcı etki yaptıkları için çok istenmezler. Sadece gerçekten ihtiyaç duyulduğunda ve genellikle küçük kazanç değerleriyle kullanılması tercih edilir. [73,74,75]

Bu kontrolörler tek tek kullanıldıkları gibi hepsi birlikte PID kontrolör şeklinde de kullanılabilirler. I bileşeni hatayı azaltırken, D bileşeni de hatadaki değişimi önceden sezebilmeyi ve osilasyonu azaltıcı etkiyi sağlar. Kazançları uygun şekilde ayarlandığında, üç bileşenin toplamından oluşan kontrol sinyali ile sistem, talep edilen çıkış değerini vermeye zorlanır.[73,74,75] En yaygın olarak kullanılan biçimi PI kontrolördür. Bu tezde uygulanan kontrol yönteminde de PI kontrolörler kullanılacaktır.

### **2.3 Ziegler-Nichols Frekans Tepkisi Metodu**

PID kontrolörler oldukça başarılı sonuçlar vermekte ve basit yapıları nedeniyle tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu kontrolörlerin kazançlarının iyi ayarlanması etkin bir kontrol sağlanabilmesi için çok önemlidir. Ancak uygun kazançların deneme yanılmalarla bulunması çok zaman alabilmekte ve masraflı olabilmektedir. En iyi kazançların sistemli biçimde belirlenmesi için ortaya atılan başlıca yöntemlerin ilki Ziegler-Nichols yöntemidir[76]. Bunun matematiksel bir ispatı olmayıp tecrübelerdayanılarak ortaya atılmıştır. Bunlardan birisi frekans tepkisi yöntemi, diğeri de basamak tepkisi yöntemidir. Burada sadece bu çalışmada kullanılan frekans tepkisi yöntemi anlatılacaktır.

Önce  $K_i$  ve  $K_D$  sifira eşitlenip,  $K_p$  için çeşitli yüksek değerler denenir.  $K_p$  değerinin çok artırılması genellikle çıkışta salınımaya yol açar. Bazı değerlerde sönümlü olan bu salınımlar,  $K_p$  daha da artırılırsa kararsızlaşır. İşte bu salınının sabit genlikli elde edildiği kritik  $K_p$  kazanç değerine  $K_u$ , oluşan sabit genlikli salınının periyoduna da  $T_u$  dersek, kontrolör türüne göre;

**Çizelge 2.1** Ziegler-Nichols metodu kazançları

Kontrolör	$K_p$	$K_i$	$K_d$
$P$	$0.5K_u$	-	-
$PI$	$0.45K_u$	$1.2K_p/T_u$	-
$PD$	$0.8 K_u$	-	$K_p T_u/8$
$PID$	$0.6K_u$	$2K_p/T_u$	$K_p T_u/8$

formüllerinden önerilen kazançlar hesaplanır. Hesaplanan bu kazançlar kontrolör için genellikle en uygun kazançlardır. Ancak yöntem tecrübî olduğundan bu kazanç değerlerinin en uygun olması garanti değildir. Birkaç deneme yanılma ile uygunluğuna bakılması, gerekirse biraz değiştirilmesi yerinde olur.

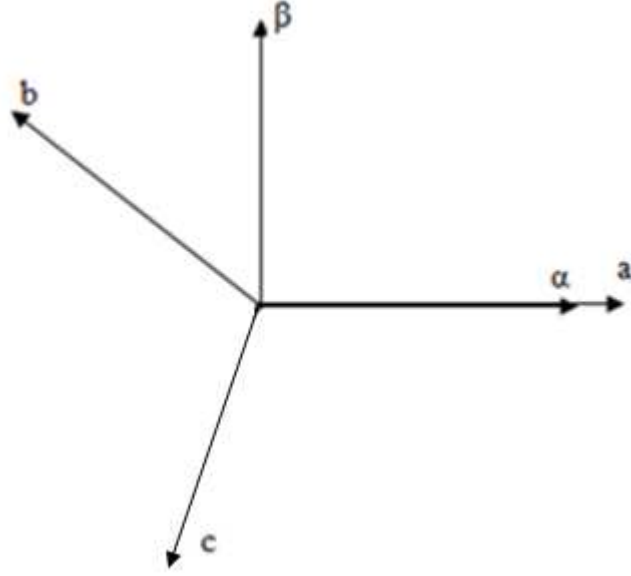
Çoklu kontrol blokları içeren sistemlerde; yöntem kısım kısım uygulanır. Örneğin hız, akım, gerilim vb. kontrol bloklarından seçilen sıradaki biri hariç, kontrol sinyallerinin yerine sabit değerler girmek suretiyle iptal edilir ve seçilen blok için en uygun kazanç değerleri hesaplanır. Tüm bloklar için en uygun kazançlar hesaplandıktan sonra bu değerler tüm sisteme aynı anda uygulanarak ve ilave birkaç deneme-yanılma ile sistem için en uygun kazançlar değerleri belirlenir.

## 2.4 Üç Fazlı Sistemden İki Fazlı Sisteme Geçiş

İki fazlı sistemlerin, tek fazlı asenkron motorların kalkışlarındaki geçici ve kabaca uygulanması dışında pratikteki kullanımı pek yaygın değildir. Ancak AC veya DC elektrik makinelerinin modellemelerinde ve teorik analizlerinde önemli kolaylıklar sağladığı için sıklıkla kullanılırlar. 3 faza ait vektörlerin düzlemsel olmasından dolayı bunların 3 eksenle ifade edilmesi fazlalık olup 2 eksen kullanımı yeterli olduğu gibi, 2 eksenli vektörlerin karmaşık sayılarla da ifade edilebilmesi büyük kolaylıktır. Ayrıca kontrol algoritmalarında da gereksiz boyut fazlalığı indirgenmiş olur. 2 fazlıdan 3 fazlı sisteme tersine dönüşümlerin mümkün olabilmesi için 2 fazlı gösterime eşlik eden ve dengesizliği ifade eden 3. bir eksen daha tanımlanır. Ancak bu, 3 faza ait vektörlerin de içinde bulunduğu normal çalışma düzlemine dik olup çoğu kez işlemlere katılmadığından hesapları zorlaştırmaz.

AC makinelerde aynı düzlemdeki 3 fazın manyetik alan vektörleri veya akı fazörleri uzaysal vektör toplamı şeklinde bileşke oluştururlar. 3 fazdan 2 faza dönüşüm, bu bileşkenin 2 boyutla ifadesidir. Ancak bu analizin uzaysal sayılamayacak voltaj ve akım gibi herhangi bir fazör türüne de aynı hesap yöntemiyle uygulanabileceği görülmüştür. Yani 3 faza ait akım, voltaj, manyetik alan veya manyetik akı gibi herhangi bir türdeki 3 faz vektörlerinin tıpkı uzaysal vektörler gibi bileşkesi alınabilir. Böyle bir bileşke vektöre  $X$  dersek, bunun 3 eksenli gösterimi  $X_{abc} = [X_a \ X_b \ X_c]^T$  ile 2 eksenli gösterimi  $X_{\alpha\beta} = [X_\alpha \ X_\beta]^T$  arasındaki geçişler, sırasıyla  $\alpha$  ve  $\beta$  eksenlerine  $a$ ,  $b$  ve  $c$  fazlarının izdüşüm katkılarıyla şöyle bulunur:





**Şekil 2.2** 3 Fazdan 2 Faza Dönüşüm Vektörel Gösterimi

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = k \cdot \begin{bmatrix} \cos 0^\circ & \cos 120^\circ & \cos 240^\circ \\ \sin 0^\circ & \sin 120^\circ & \sin 240^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

buradaki k sabitini açıklamadan önce, tersine dönüşümün mümkün olması için  $X_o$  sembolüyle dengesizlik eksenini 3 faz değerlerinin toplamıyla orantılı olarak tanımlayalım. Böylece dengeli durumda  $X_o = 0$  olacaktır. Buna göre düzenlenmiş gösterimle dönüşüm:

$$X_{\alpha\beta o} = k \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ k_1 & k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

olur. Buna Clarke dönüşümü denir.  $k_1$  sıfırdan farklı herhangi bir sabit olabilir.  $k$  sabiti ise 2 ayrı standarttan birine göre seçilir ve sonraki analizlerde de formüllerin seçilen bu standarda uygun kalmasına özen gösterilir.

### 2.4.1 Güç Denkliği Standardı

Dengeli veya dengesiz,  $a$ ,  $b$  ve  $c$  fazları üzerinden hesaplanan toplam anlık gücün, eşdeğeri olan  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $o$  fazları üzerinden hesaplanan toplam anlık güce eşit olacak şekilde  $k$  ve  $k_1$  sabitlerinin belirlendiği standarttır. Gerilimi  $v$ , akımı  $i$  ile gösterip, (2.14) formülündeki dönüşüm matrisine  $k$  çarpanıyla birlikte  $R$  dersek;

$$V_{abc}^T i_{abc} = (R v_{\alpha\beta o})^T (R i_{\alpha\beta o})^T = v_{\alpha\beta o}^T R^T R i_{\alpha\beta o} = v_{\alpha\beta o}^T i_{\alpha\beta o} \quad (2.15)$$

eşitliğinin sağlanması için  $R^T R$  birim matris olmalıdır. Yani bu standartta  $R$  ortogonal bir matristir. Bu da  $k = \sqrt{\frac{2}{3}}$  ve  $k_1 = 1/\sqrt{2}$  seçilmesiyle sağlanır. Akım veya gerilimden birisinin 3 faz bileşenlerinin toplamı sıfır ise, yani  $v_o i_o$  sıfır ise, meselâ nötr hattı kullanılmamış ( $i_a + i_b + i_c = 0$ ) ise,  $k_1$  için sıfırdan farklı herhangi bir değer ile de bu şart sağlanır. Ama hem gerilim hem de akım dengesiz ise güç denkliği standardı için mutlaka  $k_1 = 1/\sqrt{2}$  alınmalıdır.

Güç denkliği standardına göre  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $o$  fazları üzerinden hesaplanan aktif, reaktif ve görünür güçler ile elektromekanik tork, ayrıca bir katsayı olmaksızın 3 fazın toplam değerlerine eşittir. Ancak  $a$ ,  $b$  ve  $c$  fazlarına ait akım, gerilim, akı gibi büyüklüklerin gerçek değerleri  $\alpha$  ve  $\beta$  fazları üzerinden hesaplanan değerlerin  $\sqrt{2/3}$  katıdır.

### 2.4.2 Genlik Denkliği Standardı

Dengeli bir çalışmada fiziksel olarak  $a$ ,  $b$  veya  $c$  fazlarındaki akım veya gerilim gibi büyüklüklerin genliğinin, 2 fazlı eşdeğerindeki  $\alpha$  veya  $\beta$  faz akım veya gerilim genliğiyle aynı olacak şekilde  $k$  sabitinin belirlendiği standarttır. Meselâ akım için düşünersek; her fazı dengeli, akımların genliği  $I$ , bileşke vektörü saatin tersi yönde dönen üç fazlı akımlar;

$$i_a = I \cos \omega t \quad (2.16)$$

$$i_b = I \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (2.17)$$

$$i_c = I \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \quad (2.18)$$

olup bunların geometrik bileşkesinin büyüklüğünü  $\omega t = 0$ 'da ( $a$  yani  $\alpha$  eksenini hızında iken) hesaplırsak  $3I/2$  buluruz. Hâlbuki aynı akım genliğine sahip  $\alpha\beta$  eksenlerindeki 2 fazlı karşılığı;

$$i_\alpha = I \cos \omega t \quad (2.19)$$

$$i_\beta = I \sin \omega t \quad (2.20)$$

olup  $\omega t = 0$ 'daki bileşkesi  $I$  büyüklüğünde ve yine  $\alpha$  ( $a$ ) yönündedir. Dolayısıyla  $k = 2/3$  için genlik denkliği sağlanmaktadır. Bu tezde genlik denkliği esas alınmıştır.

Genlik denkliği standardında hangi  $k_1 \neq 0$  değeri alındığının önemi yoktur. Ayrıca genlik denkliği standardında 2 faz üzerinden hesaplanan aktif, reaktif ve görünür güçler ile elektromekanik tork ifadeleri  $3/2$  ile çarpılarak toplam değerleri bulunur. Ayrıca dengesizlik de varsa, bu çarpımdan sonra  $v_o i_o$  eklenerek toplam güç ve bu ilaveli güç ile toplam tork bulunur.

### 2.4.3 Ters Clarke Dönüşümü

Ters Clarke dönüşümü  $R$  matrisinin tersiyle yapılır:

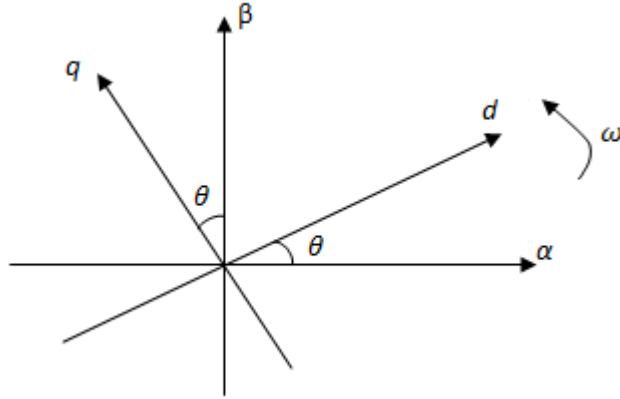
$$X_{abc} = k_2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & k_1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & k_1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & k_1 \end{bmatrix} X_{\alpha\beta 0} \quad (2.21)$$

Genlik denkliği standardında  $k_2 = 1$ , güç denkliği standardında  $k_2 = \sqrt{\frac{2}{3}}$  alınır.

#### 2.4.4 Park ve Ters Park Dönüşümü

$\alpha\beta$  eksenleri AC makinelerde sargı konumlarına göre durgun olup sinüzoidal olarak hızlı değişen değerlere sahiptir. AC makine kontrolünde veya tork gibi bazı hesaplamalarında vektörlerin birbirine göre durumu önemli olup birini durgun varsayan bir referans çerçevesine göre bu analizler basitleşebilmektedir. Ayrıca yavaş değişen değerlerle simülasyon yapmak da daha kolaydır. Bu gibi nedenlerle  $\alpha\beta$  eksen takımına göre genellikle senkron hızda veya herhangi bir hızda dönen orijinleri ve o eksenleri çakışık  $dq$  eksen takımı tanımlanır.

Şekildeki 2.3'teki gibi  $d$  ekseninin  $\alpha$  eksenine göre  $\theta$  kadar ileride olduğu bir an için bir  $X$  vektörünün  $\alpha\beta$  eksen takımındaki gösterimi  $X_{\alpha\beta}$  ile  $dq$  eksen takımındaki gösterimi  $X_{dq} = [X_d \ X_q]^T$  arasındaki geçişler, sırasıyla  $d$  ve  $q$  eksenlerine  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarının izdüşüm katkılarıyla şöyle bulunur:



Şekil 2.3  $\alpha\beta$  ve  $dq$  eksenlerinin birbirine göre durumu

$$X_{dq} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} X_{\alpha\beta} \quad (2.22)$$

BunaPark dönüşümü denir. Buradaki dönüşüm matrisi de ortogonal olduğundan ters Park dönüşümünde bu matrisin transpozu kullanılır:

$$X_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} X_{dq} \quad (2.22)$$

#### 2.4.5 Clarke ve Park Dönüşümlerinin Bir Arada Kullanılması

$abc$  eksen takımından  $dqo$  eksen takımına doğrudan geçiş Clarke ve Park dönüşümlerinin bir arada uygulanmış olduğu şu formülle yapılabilir.

$$X_{dqo} = k \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(120 - \theta) & \cos(240 - \theta) \\ \sin(-\theta) & \sin(120 - \theta) & \sin(240 - \theta) \\ k_1 & k_1 & k_1 \end{bmatrix} X_{abc} \quad (2.23)$$

Ters Park ve ters Clarke dönüşümlerinin bir arada uygulanmış olduğu ise şöyledir:

$$X_{abc} = k_2 \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin(-\theta) & k_1 \\ \cos(120 - \theta) & \sin(120 - \theta) & k_1 \\ \cos(240 - \theta) & \sin(240 - \theta) & k_1 \end{bmatrix} X_{dqo} \quad (2.25)$$

#### 2.5 Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör Modeli

ÇBAG'ın  $\omega_g$  açısal hızında dönen genel bir referans çerçevesine göre matematiksel denklemleri şöyledir:

$$V_s = R_s i_s + j\omega_g \psi_s + \dot{\psi}_s \quad (2.24)$$

$$V_r = R_r i_r + j(\omega_g - \omega_r) \psi_r + \dot{\psi}_r \quad (2.25)$$

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\psi_s \times i_s) = J \dot{\omega}_r + f_d \omega_r + T_L \quad (2.26)$$

Ayrıca rotor akısı ile stator akısı arasında şöyle bir ilişki söz konusudur:

$$\psi_s = L_s i_s + M i_r \quad (2.27)$$

$$\psi_r = L_r i_r + M i_s \quad (2.28)$$

Denklem (2.24-2.28)'dan,  $dq$  referans çerçevesine göre beşinci mertebeden, durum değişkenleri stator akımının  $d$  ve  $q$  bileşenleri, rotor akısının  $d$  ve  $q$  bileşenlerine hızolan ÇBAJ'ın matematiksel modeli[77] şu şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{i}_{sd} = \left( -\frac{M^2}{\sigma L_r L_s} \omega - \omega_g \right) i_{sd} - \frac{1}{\sigma T_s} i_{sq} - \frac{M}{\sigma L_s} \omega_r i_{rd} + \frac{M}{\sigma L_s T_r} i_{rq} + \left( \sigma L_s - \frac{M}{\sigma L_r L_s} \right) v_{sd} \quad (2.30)$$

$$\dot{i}_{sq} = -\frac{1}{\sigma T_s} i_{sd} + \left( \omega_g + \frac{M^2}{\sigma L_r L_s} \right) i_{sq} \omega_r + \frac{M}{\sigma L_s T_r} i_{rd} + \frac{M}{\sigma L_s} \omega_r i_{rq} + \left( \sigma L_s - \frac{M}{\sigma L_r L_s} \right) v_{sq} \quad (2.31)$$

$$\dot{i}_{rd} = \frac{M}{\sigma L_r T_s} i_{sd} - \frac{M}{\sigma L_r} i_{sq} \omega_r - \frac{1}{\sigma T_r} i_{rd} + \frac{1}{\sigma} (\omega_g - \omega) i_{rq} + \left( -\frac{M}{\sigma L_r L_s} + \frac{1}{\sigma L_r} \right) v_{rd} \quad (2.31)$$

$$\dot{i}_{rq} = \frac{M}{\sigma L_r} \omega i_{sd} + \frac{M}{\sigma L_r T_s} i_{sq} - \omega_g i_{rd} + \frac{1}{\sigma} \omega i_{rq} - \frac{1}{\sigma T_r} i_{rq} + \left( -\frac{M}{\sigma L_r L_s} + \frac{1}{\sigma L_r} \right) v_{rd} \quad (2.32)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{3}{2} n_p^2 \frac{M}{J} (i_{sq} \cdot i_{rd} - i_{sd} \cdot i_{rq}) - \frac{B_f}{J} \omega - \frac{n_p}{J} T_L \quad (2.33)$$

Bu denklemlerde  $L_r$  ve  $L_s$  rotor ve stator endüktansları,  $M$  rotor ve stator sargılarının ortak endüktansı,  $R_r$  ve  $R_s$  rotor ve stator dirençleri,  $i_r$  ve  $i_s$  rotor ve stator akımları,  $\psi_r$  ve  $\psi_s$  rotor ve stator akıları,  $v_r$  ve  $v_s$  rotor ve stator gerilimleri,  $\omega_r$  rototrun elektriksel açısal hızı,  $n_p$  kutup çifti sayısı,  $J$  eylemsizlik momenti,  $f_d$  sürtünme katsayısı,  $T_L$  ve  $T_e$  yük momenti ve elektromekanik momenttir.

## 2.6 Vektör Kontrolü

Asenkron makinelerin kontrol edilebilmesi için, DC makinelerin tersine oldukça karmaşık kontrol algoritmaları ve dönüşüm yöntemleri gerekmektedir. DC makinelerde akı uyarım akımıyla yaklaşık doğru orantılı, tork ise hem akıyla hem de armatür akımıyla doğru orantılıdır. Bu yüzden akı kontrolü uyarım akımıyla, akının sabit tutulması durumunda tork kontrolü de armatür akımıyla yapılabilir. DC makineler bu özellikleri sayesinde torktaki değişikliklere çok hızlı cevap verebilirler. Bir DC makinenin matematiksel modeli şu şekildedir[78];

$$v_f = R_f \cdot i_f + L_f \cdot \frac{di_f}{dt} \quad (2.34)$$

$$v_a = R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + e_b \quad (2.35)$$

$$\dot{\omega} = \frac{K}{J} \cdot i_f \cdot i_a - \frac{B_f \omega}{J} - \frac{1}{J} \cdot T_L \quad (2.36)$$

$$e_b = K \cdot i_f \cdot \omega \quad (2.37)$$

Burada sırasıyla  $v_f, R_f, i_f, L_f$ , uyarımsargısı gerilimi, direnci, akımı ve endüktansı,  $v_a, R_a, i_a, L_a$ , armatür gerilimi, direnci, akımı ve endüktansıdır.  $K$  zıt emk veya tork sabiti,  $e_b$  ise ters elektromotor kuvvettir. DC makinenin tork denklemi;

$$T_e = K_a \cdot \phi \cdot i_a = k \cdot i_f \cdot i_a \quad (2.38)$$

olur. Burada  $K_a$  armatür sabiti,  $i_f$  uyarım akımı,  $\Psi$  uyarım akısı,  $i_a$  ise torku üreten endüvi akımı,  $k$  da başka bir sabittir. Denklem (2.39)'dan da anlaşılacağı gibi uyarı ve endüvi akımlarından herhangi biri sabit tutularak diğeri ile doğrusal kontrol sağlanabilir. Asenkron makinelerde ise bu şekilde kontrol sağlayabilecek bileşenler DC makinelerdeki kadar aşikâr değildir. Asenkron makinelerde bu kontrolü sağlayacak bileşenler genellikle genlik, frekans ve faz değerlerini içeren vektörlerdir. Dolayısıyla asenkron makinelere benzer şekilde uygulanankontrol yöntemine “*vektör kontrolü*” denmektedir.

Asenkron makineleri DC makinelere benzer olarak kontrol edebilmek için stator akımını biri torku diğeri de akıyı kontrol edecek şekilde iki bileşene ayırmak gerekir. Akıyı kontrol eden bileşenin sabit tutulması durumunda tork, akımın tork bileşeni ile doğrusal olarak kontrol edilebilir ve DC makinelerdeki gibi tork değişimlerine hızlı cevaplar verebilir. Asenkron makineye ait tüm değişkenleri  $dq$  eksen takımında ifade etmek, işlem, yorum ve simülasyon kolaylığı sağlar. Burada yapılması gereken kritik bir işlem daha vardır.  $d$  ekseninin, durgun  $\alpha$  eksenine göre açısı, vektörlerden biriesas alınarak yapılır. Vektör kontrolünde çoğunlukla  $d$  eksen rotor akısına kilitlenecek şekilde alınır. Buna “*rotor akısına oryantaston*” [78]denir. Rotor akısı  $d$  eksen ile çakışık seçilirse,  $\psi_{rq} = 0$  ve  $\psi_{rd} = \psi_r$  olur. Diğertüm değişkenler ve dolayısıyla stator akımı bu eksenlerinde bileşenlerine ayrılmış olur.

Stator akımının  $d$  bileşeni ile akı,  $q$  bileşeni ile de tork kontrol edildiği ve kontrolün oldukça basitleştiği görülecektir. Bu yeni durumda tork ifadesi;

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} i_{sq} \psi_{rd} \quad (2.40)$$

olur. Bu yeni tork ifadesinin denklem(2.41) ile ne kadar benzeştiği görülecektir. Rotor akısının  $d$  bileşeninin aslında rotor akısının tamamı olduğu zaten ifade edilmiş olup bu akının denklem (2.42)'daki  $i_f$  ile orantılı olan DC motor akısına, stator akımının  $q$  bileşeninin de  $i_a$  'ya karşılık geldiği görülecektir.

Asenkron makinelerin kontrolünün bu şekilde basitleştirilmesini sağlayan rotor akı oryantasyonu şartlarının oluşması, yani rotor akısının  $d$  eksenine üzerine kilitlemesi durumunun devam etmesi, sisteme uygulanacak giriş değerlerinin dikkatlice hesaplanmasına bağlıdır.

Başlıca vektör kontrol yöntemleri şunlardır:

- a) Doğrudan Vektör Kontrolü
- b) Dolaylı Vektör Kontrolü
- c) Doğrudan Tork kontrolü

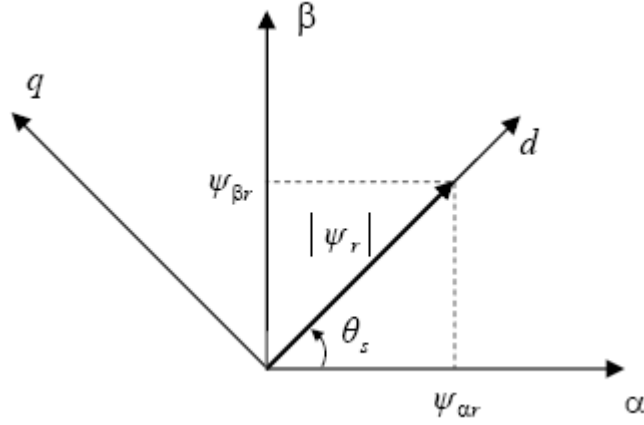
Doğrudan ve dolaylı vektör kontrol yöntemlerinde rotor akı oryantasyonu kullanılırken, doğrudan tork kontrolünde ise stator akı oryantasyonu kullanılmaktadır. Rotor akısı oryantasyonu kullanılan vektör kontrolü yönteminde rotor akısının genliği ve açısı hesaplanmalıdır. Özellikle açısı, 3 fazdan 2 faza ve 2 fazdan 3 faza dönüşümlerde kullanılmak için gerekmektedir. Doğrudan ve dolaylı vektör kontrol yöntemlerinin birbirinden farkı da bu değerlerin elde edilme tarzından kaynaklanmaktadır.

### 2.6.1 Doğrudan Vektör Kontrolü

Bu yöntem ilk defa Blaschke[79] tarafından önerilmiş olup rotor akısı, statora birbirine dik olacak şekilde yerleştirilen sensörlerin hava aralığı akısını ölçülmesi sayesinde hesaplanmaktadır. Sensörler  $\alpha\beta$  eksenlerine çakışık olacak şekilde konumlandırılmıştır[77]. Bunun yanında 3 faz akımlarının da ölçülerek  $\alpha\beta$



eksenlerindeki değerleri de hesaplanmalıdır. Bu yöntemde, rotor akısı  $d$  eksenine çakışık seçilmektedir. Bu durum şekil 2.4’de gösterilmektedir;



**Şekil 2.4** Doğrudan Vektör Kontrolü yönteminde rotor akısının durumu

Bu durumda  $\psi_{rq} = 0$  ve  $\psi_{rd} = \psi_r$  olur ki  $\theta_s$  açısı da  $\psi_{\beta r}$  ve  $\psi_{\alpha r}$ ’den rahatlıkla hesaplanabilmektedir. Yöntemin sensör gerektirmesi ve sensörlerin konumlandırıldığı yerler vb. hususlardan dolayı pek kullanışlı olmadığı görülmüştür. Bunun yanında sensör yerine,  $\alpha\beta$  eksenlerine sadece ölçüm için kullanılmak üzere sargılar konumlandırılarak uygulanan bir çeşidi de mevcuttur. Sargılar üzerinde indüklenen gerilimden akı değerine geçilmektedir. Bahsedilen bu yöntemler kullanım zorlukları nedeniyle fazla kullanılmamaktadır. İfade edilen zorluklardan kurtulmak için sistemde gözleyici kullanmak suretiyle, ölçülebilen değerlerden akının genliği, açısı vb. büyüklüklerin hesaplanması yoluna gidilmiştir.

$$\psi_{s\alpha} = \int (u_{s\alpha} - R_s \cdot i_{s\alpha}) dt \quad (2.41)$$

$$\psi_{s\beta} = \int (u_{s\beta} - R_s \cdot i_{s\beta}) dt \quad (2.42)$$

$$\psi_{r\alpha} = \frac{M}{L_s} \psi_{s\alpha} + \sigma L_r i_{r\alpha} \quad (2.43)$$

$$\psi_{r\beta} = \frac{M}{L_s} \psi_{s\beta} + \sigma L_r i_{r\beta} \quad (2.44)$$

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s} \quad (2.45)$$

Bu anlatılanlardan sonra stator ve rotor akılarının genliği;

$$|\psi_s| = \sqrt{\psi_{s\alpha}^2 + \psi_{s\beta}^2} \quad (2.46)$$

$$|\psi_r| = \sqrt{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} \quad (2.47)$$

pozisyonu (açısı);

$$\arctg\left(\frac{\psi_{s\beta}}{\psi_{s\alpha}}\right) \quad (2.48)$$

$$\arctg\left(\frac{\psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}}\right) \quad (2.49)$$

Ancak bu yöntem, makinenin matematiksel modeline bağlı olarak gözlemcilerin tasarlanması, doğrusal olmayan yapıları ve parametrelerinin hızlı değişmesi gibi nedenlerden dolayı oldukça zor ve hataya açıktır. Tüm bu sebeplerden dolayı makinenin yapısına etki etmeyen yöntemler daha çok tercih edilmektedir.[77,78]

## 2.6.2 Dolaylı Vektör Kontrolü

Bu yöntemde yaygın olarak rotor akı oryantasyonu kullanılmaktadır.  $d$  eksenini başlangıçta rastgele belirlenir. Daha sonra kayma komutunun uygun bir şekilde seçilmesiyle  $\psi_{rq}$  sönümlü hale getirilir.  $\psi_{rq}$  'nun sifıra gitmeye zorlamasıyla akı vektörünün  $d$  eksenine üzerine kilitlenmesi sağlanır. Bu yöntem uygulanabilirlik açısından oldukça basittir. Ancak yöntemin uygulanabilmesi için makine hızının ölçülmesi ya da hassas bir şekilde tahmin edilmesi gerekir. Oryantasyonun alt yapısını oluşturan referans işaretlerin makine parametrelerine bağlı olması da önemli bir dezavantajdır.

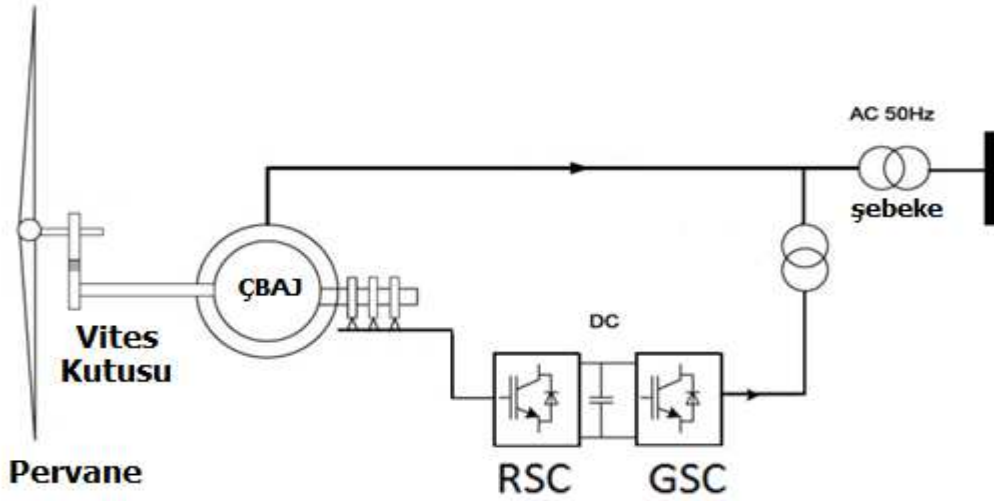
### 2.6.3 Doğrudan Tork Kontrolü

Doğrudan tork kontrolünde amaç, motorun ihtiyaç duyduğu tork ve akının gerçek değerlerden büyük veya küçük olmasına göre, tork ve statoraki fazörünün büyüklüğünü ve açısını, artırıcı ya da azaltıcı temel anahtarlamalara karşılık gelen voltaj vektörü hangisiyse doğrudan onu anahtarlamaktır. Zira temel vektörler, akının genliğini ve açısını ya azaltıcı, ya artırıcı; torku ise ya azaltıcı, ya artırıcı, ya da sabit tutucu yönde akıyı değiştirirler.

### 3 ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgâr ülkemizde son yıllarda elektrik üretiminde önemli bir kaynak haline dönüşmüştür[80,81,82]. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün verilerine göre 2014 yılının ilk altı aylık diliminde rüzgârdan enerji üretim kapasitesi %16 artmıştır[81]. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından Türkiye'nin rüzgâr haritası çıkartılmış olup, bu haritaya göre elverişli yerlere rüzgâr enerji santralleri kurulmuş, rüzgâr enerji santrallerinin toplam kurulu gücü 2013,2 MW'a ulaşmıştır[82]. Rüzgâr enerji santrallerinde, değişken rüzgâr hızlarına çabuk ve etkin bir şekilde cevap verebilen yapısı nedeniyle ÇBAJ'lar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bağlı bulunduğu şebekedeki dengesizlikler karşısında kararlı kalabilmesi de ÇBAJ'ları rüzgârdan enerji üreten sistemler için oldukça uygun bir seçenek haline getirmiştir.

ÇBAJ kullanılan rüzgârenerji santrallerinin kontrol prensibi, blok diyagram halinde Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 ÇBAJ Genel Prensip Şeması

Sistemde kullanılan ÇBAJ kalkış anında ve sonrasında belirli bir süre motor modunda çalışır. Çünkü asenkron makineler senkron hızın altında motor modundadırlar. Makinenin doğrudan şebekeye bağlı olması avantajdır. Çünkü kalkışta ihtiyaç duyduğu yüksek akım şebekeden çekilir. Daha sonra hız arttırılarak senkron hızın üstüne çıkılır ve jeneratör moduna geçilerek güç üretimine başlanır. Rüzgâr kuvveti, pervane ve bir dişli grubu vasıtasıyla jeneratöre aktarılır[83]. Bu sayede rüzgârın dalgalı kuvveti, kısmen kararlı hale getirilerek sistemdeki jeneratörün şaftına iletilir. Şebekeye doğrudan bağlı olan ÇBAJ'ların sargılarının düzenlenmesine göre 1 veya 2 hızlı türleri mevcuttur. Kutup sayısı sabit olan jeneratörler sadece bir senkron hıza sahiptirler[78]. Bu tezde kullanılan ÇBAJ 2 kutuplu olup, rüzgârdan alınan kinetik enerji, vites kutusu üzerinden jeneratöre ulaştırılmaktadır. Kutup sayısı sabit olan tek hızlı bir tasarım kullanılmıştır. Ancak değişken hızlı tasarımların verimi rüzgâr şartları ve tasarım parametrelerine bağlı olmak kaydıyla, sabit hızlılara göre % 3-%28 daha yüksek olabilmektedir[84]. Özellikle düşük güçlü uygulamalarda tek hızlı tasarımlar başarıyla kullanılabilenekte olup rüzgârın değişken doğasından kaynaklanan şebeke frekansının değişmesi vb. etkiler mekanik kısım yani vites kutusu üzerinden çözülmektedir[85].

Rüzgâr hızına göre maksimum güç çıkışı şu şekilde ifade edilir [63] :

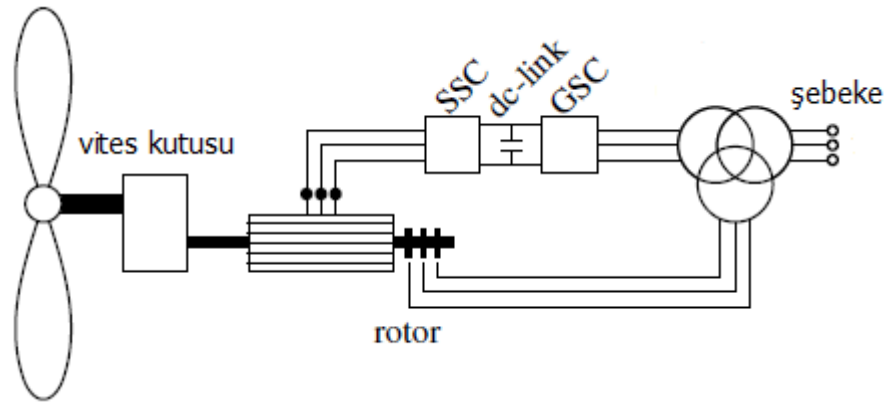
$$P(v_m) = \frac{1}{2} \rho C_p A v_m^3 \quad (3.1)$$

Burada  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$  havanın özkütlesi,  $C_p = 0,45$  performans katsayısı,  $A$  bıçakların süpürme alanı,  $v_m$  gelen rüzgârın hızıdır.

Bu tezde; statoru doğrudan şebekeye bağlı bir ÇBAJ'ın hız, akı ve tork kontrolü üzerinde durulmuştur. Öncelikle yaygın olarak kullanılan yöntemlerden bahsedilecek, sonrasında da bu teze konu olan yöntem, simülasyon sonuçlarıyla detaylı olarak anlatılacaktır.

### 3.1 Rotoru Şebekeye Bağlı Yöntem

ÇBAJ'lar genellikle, stator sargıları doğrudan şebekeye bağlanan, rotor sargıları da bir güç konvertörüne bağlı yöntemle kullanılır. Ancak N. David vd. tarafından bilinen bağlantı şekillerine alternatif olacak şekilde rotoru şebekeye bağlı bir sistem geliştirilmiştir[63]. Şekil 3.2'de gösterilen bu yöntemde rotor sargıları doğrudan şebekeye bağlanmış, stator sargıları ise güç konvertörüne bağlanmıştır.



Şekil 3.2 Rotoru Şebekeye Bağlı Yöntemin Blok Diyagramı

Güç konvertörü, SSC (Stator Side Converter), DC-Link, GSC (Grid Side Converter)'den oluşmaktadır.  $\omega_s$  statorun açısal frekansı,  $\omega_r$  rotorun elektriksel açısal hızı,  $s$  kayma,  $f$  frekans olup:

$$\omega_s = \omega_r + 2\pi f \quad (3.2)$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{2\pi f}{\omega_r + 2\pi f} \quad (3.3)$$

Ayrıca;

$$P_s \approx -\frac{1}{1-s} P_m \quad (3.4)$$

$$P_r \approx -s P_s \quad (3.5)$$

olur. Rotoru şebekeye bağlı tasarım, kaymanın  $s \geq 1$ ,  $0 < s < 1$  ve  $s < 0$  durumları için denenmekte olup,  $s \geq 1$  durumunda  $\omega_r$ ,  $-2\pi f$  ile 0 aralığında bir değer alır. Bu şartlarda stator güç çekerken rotor güç üretmektedir. Rotor hızının  $\omega_r = -2\pi f$  rad/s olduğu durumda kayma  $+\infty$ 'a giderken stator terminal voltajı da sıfıra gitmektedir. Dolayısıyla tüm gücü rotor taşımakta olup güç durumu şu şekildedir:

$$|P_r| > |P_s| \quad (3.6)$$

Bu durum statoru şebekeye bağlı ÇBAJ'ın senkron altı çalışmasına benzemektedir.[46]

Kayma komutunun  $0 < s < 1$  aralığında kaldığı durumda  $\omega_r > 0$  olup, rotor güç çekmekte, stator ise güç üretmektedir. Güçlerin durumu:

$$|P_s| > |P_r| \quad (3.7)$$

olur.  $s < 0$  durumunda ise rotor hızı  $-\infty < \omega_r < -2\pi f$  aralığındadır. Bu durumda hem stator hem de rotor güç üretmekte olup statoru şebekeye bağlı bir ÇBAJ'ın konvansiyonel tasarımının senkron üstü çalışma durumuna benzemektedir.

Denklem (3.3) ve (3.4)'ten görüleceği gibi, kayma değeri -2'nin ( $\omega_r = -3\pi 60$  rad/s ki bu en büyük rotor hızıdır) altına inemezken, 2'nin ( $\omega_r = -\pi 60$  rad/s bu da en küçük rotor hızıdır) üstüne de çıkamaz. Bu rotor hızı  $-3\pi f \leq \omega_r \leq -\pi f$  rad/s aralığındadır. Bu yöntemde rotor voltajının ve frekansının şebekeye doğrudan bağlı olduğu için, şebekeye belirlenmiş ayarlı (fixed) olduğu kabul edilmiş, sargılarda oluşan vb. kayıplar ise ihmal edilmiştir.

Önerilen bu yöntemin aynı şartlar altında, klasik statoru şebekeye bağlı tasarımla benzer performansı gösterdiği görülmüştür. Bu konuda yapılan çalışmalar önerilen yöntemin enerji verimliliği sağladığını göstermiştir[63].

### 3.2 Şebekeye Bağlı Akı Oryantasyonlu Kontrol

Bu yöntemde şebeke bağlantılı bir ÇBAJ'ın şebeke hatası durumundaki kontrolü amaçlanmakta olup stator akı kontrolü için 2 farklı yaklaşım uygulanmıştır:

a) Senkron Yaklaşım

b) Asenkron Yaklaşım

Rotor akım bileşenlerinden biriyle elektromanyetik tork, diğeri ile stator reaktif gücü kontrol edilmektedir.

Bu yöntemde elektromanyetik torkun ayrıştırılmış kontrolü için;

$$\psi_{sq} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{d\psi_{sq}}{dt} = 0 \quad (3.9)$$

$$\psi_{sd} = \psi_s = \text{sabit} \quad (3.10)$$

kabulleri yapılmıştır. Bu kabuller altında tork denklemini şöyle basitleştir;

$$T_e = \psi_{sd} \cdot i_{sq} \quad (3.11)$$

Stator voltaj ve akıları ise şu şekilde olur;

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} \quad (3.12)$$

$$v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \omega_s \cdot \psi_{sd} \quad (3.13)$$

$$\psi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \quad (3.14)$$

$$0 = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \quad (3.15)$$

Önerilen yöntemde, stator direnci çok küçük olduğundan  $v_{sq} = 0$  olmaya zorlanır. Bu durumda çıkış voltajının frekansı sabit bir değer alırken;

$$\theta_r = \int \omega_r \cdot t + \theta_{r_0} \quad (3.16)$$

$$T_e = -\psi_{sd} \frac{M}{L_s} i_{rq} \quad (3.17)$$

$$P_s = \omega_s \cdot \psi_{sd} \cdot i_{sq} \quad (3.18)$$



statorakısının genliği, hat geriliminin frekansının sabit tutulması nedeniyle yaklaşık sabittir. Dolayısıyla tork eşitliği rotor akımının  $q$  bileşeni ile orantılı hale gelir. Bu ise  $i_{rq}$  ile tork kontrolü yapılabilmesini sağlar.

Yine bu oryantasyon şartları altında ve stator voltajının  $d$  bileşeni ihmal edildiğinde stator reaktif gücü şu şekilde basitleşir;

$$Q_s = v_{sq} \cdot i_{sd} = \omega_s \cdot \psi_{sd} \cdot i_{sd} \quad (3.19)$$

Burada  $\psi_{sd}$ 'nin sabit olduğu ve  $i_{sd}$ 'nin de  $i_{rd}$  tarafından kontrol edilebileceği görülecektir. Ayrıca rotor akımının  $d$  bileşeni ile de statorun reaktif gücünün kontrol edilebileceği görülmektedir.

Önerilen yöntemde akı kontrolü için 2 yaklaşım benimsenmektedir:

a) Senkron Yaklaşım:

Bu yaklaşımda rotor akımının  $d$  bileşeni ile gereken reaktif gücün üretilmesi amaçlanmış olup bu durumda rotor akımının referans değeri;

$$i_{rdref} = \frac{M \cdot R_s^2}{R_s^2 \cdot M^2 + R_r^2 \cdot L_s^2} \cdot \psi_{ref} \quad (3.20)$$

b) Asenkron Yaklaşım:

Bu yaklaşımda ise stator akısının kontrolünde kapalı döngü kontrol mantığı üzerinde durulmuştur. Rotor akımının referans değeri;

$$i_{rdref} = C_\phi \cdot (\psi_{ref} - \phi_{sd}^{tahmin}) \quad (3.21)$$

şeklinde oluşur. Burada  $C_\phi$  akı sabiti,  $\psi_{sd}^{tahmin}$  rotor ve stator akımlarının ölçülen değerlerinden tahmin edilmektedir.

Asenkron durum üretilen akımların genliğinin büyük değerler alması sonucunu doğurmuştur. Diğer yandan senkron yaklaşım neticesinde de statorda oluşan e.m.k genliğinde düşüş olmuş, bu durum geçici durumdaki stator akımlarının genliğini arttırmış, stator akı değerini ise düşürmüştür.

### 3.3 Şebeke Bağlantısız Rotor Akısıyla Ayrıştırılmış Kontrol

Önerilen bu yöntemde, rüzgâr enerji sisteminde kullanılan bir ÇBAJ'ın şebeke bağlantısı olmadan izole bir yükü beslemesi üzerinde durulmuştur. Bu bağlamda rotor akımının  $d$  bileşeniyle stator akısının  $d$  bileşeninin doğrudan kontrolü amaçlanmaktadır. Bu kontrol ayrıştırılmış bir alan yönlendirme tekniği ile sağlanmıştır. Sistem denklemleri şu şekildedir;

$$\psi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} = M \cdot i_{ms} \quad (3.22)$$

$$\psi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \quad (3.23)$$

$$\psi_{dr} = M \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dr} \quad (3.24)$$

$$\psi_{qr} = M \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qr} \quad (3.25)$$

$$v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \psi_{qs} \quad (3.26)$$

$$v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \psi_{ds} \quad (3.27)$$

$$v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \psi_{qr} \quad (3.28)$$

$$v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \psi_{dr} \quad (3.29)$$

burada  $i_{ms}$  stator mıknatıslanma akımıdır. Kontrolde kullanılan referans çerçevenin  $d$  eksenini stator akı vektörüyle çakıştırılırsa;

$$i_{qr} = -\frac{L_s}{M} \cdot i_{qs} \quad (3.30)$$

olur. Bu şartlar altında, rotor akı oryantasyonunu da sağlamak için stator akısının  $q$  bileşenini yok etmek gerekir.  $\psi_{qs} = 0$  için;

$$T_{ms} \cdot \frac{di_{ms}}{dt} + i_{ms} = i_{dr} + \frac{1+\sigma_s}{R_s} \cdot v_{ds} \quad (3.31)$$

$$T_{ms} \cdot i_{ms} \cdot \omega_R = i_{qr} + \frac{1+\sigma_s}{R_s} \cdot v_{ds} \quad (3.32)$$

$$T_{ms} = \frac{L_s}{R_s} \quad (3.33)$$

Denklemler (3.32)'den de görüleceği üzere  $v_{ds}$ 'nin etkisi düşük tutulursa  $i_{ms}$  doğrudan  $i_{dr}$  ile kontrol edilebilir. Dolayısıyla denklem (3.22) üzerinden  $\psi_{ds}$ 'nin  $i_{dr}$  tarafından kontrol edildiği görülecektir. Böylece oryantasyon şartları sağlanmaktadır. Burada akıyı kontrol eden akımın referans değeri şöyledir:

$$i_{rqrref}^* = -\frac{L_s}{M} \cdot i_{qs} \quad (3.34)$$

Denklem (3.30)'daki oryantasyon koşulu altında stator akısının açısını stator voltajından elde etme zorunluluğu yoktur. Bu açı talep edilen stator voltaj frekansı  $\omega_s^*$ 'dan da türetilebilir. Bu durum oryantasyon işlemini ölçme gürültülerinden ve stator voltaj harmoniklerinden korumak için tercih edilmiştir. Burada kayma açısı;

$$\theta_{kayma} = \theta_s - \theta_r = \int \omega_s^* \cdot dt - \theta_r \quad (3.35)$$

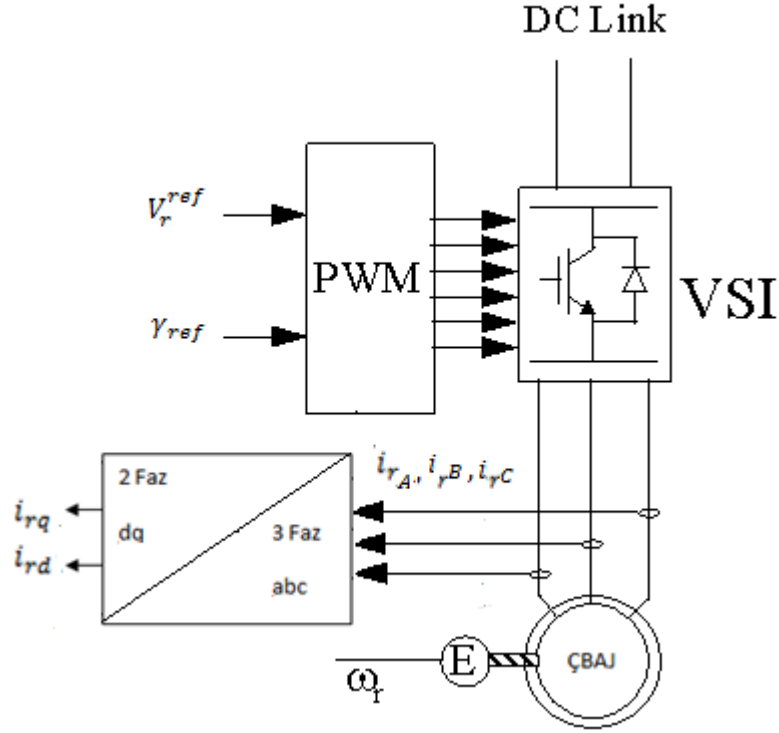
Bu yöntemde stator tarafı konvertör kontrolü, stator akı vektörünün pozisyonuna oryantasyon uygulanmasıyla sağlanmaktadır. Stator tarafı konvertör akımı  $i_{sd}$ 'nin rotor gücü ile orantılı olması sağlanmıştır. Ayrıca DC-Link voltaj kontrol döngüsünde de kullanılmaktadır. Stator tarafı konvertör akımı  $i_{sq}$  ile de reaktif güç kontrol edilmiştir. Bu yöntemde reaktif gücü sağlayan  $i_q^*$  referans akımının sıfır olduğu kabul edilmiştir. Oryantasyonda rotor akımı kullanılmış olması, düşük oryantasyon akımı, reaktif güç kontrolü, senkron altı ve senkron üstü uygulama rahatlığı sağlamaktadır. Ayrıca dolaylı oryantasyon uygulanması sayesinde sistem harmoniklerden korunmuştur.

Jeneratörler türbin tarafından sürüldüklerinde elektriksel/mekanik güç kayıpları ve izole yüke karşılık gelen tüm yükü karşılamaya çalışır. Optimum güçleri ile izole edilmiş yük arasındaki farkı ortadan kaldırmak için türbinlere yardımcı bir yük gerekmektedir. Bu yardımcı yük, jeneratörü optimum güç seviyesinde tutmaktadır.

Bu yöntemde torkun referans değeri shaftın hızındaki değişikliklere göre yeniden hesaplanmaktadır:

$$T_e^* = K_{opt} \omega_r^2 - B \omega_r \quad (3.36)$$



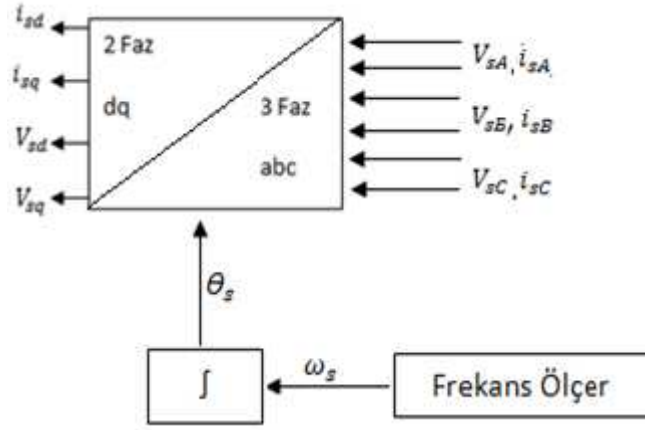


**Şekil 3.4** Güç Devresi Blok Diyagramı

Şekil 3.4'teki blok diyagramda görülen jeneratöre, rüzgâr pervanesi bir dişli grubu üzerinden bağlıdır. Bu dişli grubunun da ÇBAJ'ın şaftına hemen hemen kararlı bir döner hareket ilettiği varsayılmıştır. Kontrol sisteminden elde edilen rotor voltaj komutunun açısı  $\gamma_{ref}$  ve genliği  $V_r^{ref}$  Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation- PWM) bloğuna uygulanır ve buradan ÇBAJ için anahtarlama sinyalleri üretilir. Bu anahtarlama sinyalleri yardımıyla ÇBAJ rotoruna referans rotor voltajını verecek anahtarlama uygulanır. Jeneratörün rotor hızı encoder yardımıyla ölçülmekte olup bu değer üzerinden “En küçük hata kareleri algoritması” yardımıyla, yaklaşık rüzgâr modelinin[54] alt parametreleri olan  $k_{T1}$ ,  $k_{T2}$  tahmin edilmektedir. Bu parametreler ile maksimum güç kazanımı için ideal bir referans hız ( $\omega_{ref}$ ) belirlenir. Ayrıca ÇBAJ'a uygulanan üç faz akım ve gerilimlerinden ölçümler ve dönüşümler bloğu sayesinde statorun dönen referans çerçevedeki akım ve gerilimleri hesaplanır.

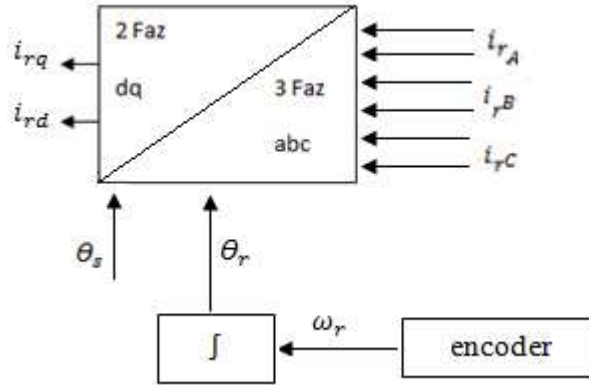
### 3.4.2 Dönüşümler Bloğu

Bu çalışmada, sistemde kullanılan parametrelerin 3 faz değerleri yerine  $dq$  eksenindeki değerleri kullanılmıştır. Dolayısıyla bir dizi dönüşüm yapılması gerekmektedir. Şekil 3.5'teki blokta ÇBAJ'dan ölçülen stator frekansından ( $\omega_s$ ) stator açısı  $\theta_s$  hesaplanır. Ölçülen 3 faz akım ve gerilimleri ile  $\theta_s$  kullanılarak stator akım ve gerilimlerinin  $dq$  eksen takımındaki değerleri formül (2.24)'den hesaplanır.



Şekil 3.5 Stator Tarafı Dönüşümleri Blok Diyagramı

Şekil 3.6'daki blokta ise benzer şekilde encoder yardımıyla ölçülen rotor hızından ( $\omega_r$ ) rotor açısı  $\theta_r$  hesaplanır. Yine formül (2.24) yardımıyla bu defa rotor akımlarının  $dq$  eksen takımındaki değerleri hesaplanır.

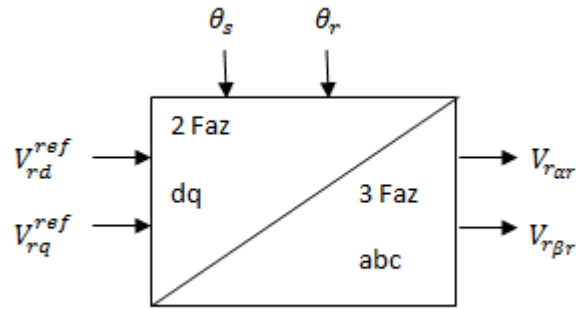


**Şekil 3.6** Rotor Tarafı Dönüşümleri Blok Diyagramı

Sistemde sürücüde kullanılacak rotor voltajları şu şekilde hesaplanır;

$$v_{rd} = \left( \frac{2 \sigma L_r L_s}{3 n_p M} \psi_{sq} \cdot uT + \frac{1}{2} \psi_{sd} \cdot u_{\psi^2} \right) / |\psi_s|^2$$
$$v_{rq} = \left( -\frac{2 \sigma L_r L_s}{3 n_p M} \psi_{sd} \cdot uT + \frac{1}{2} \psi_{sq} \cdot u_{\psi^2} \right) / |\psi_s|^2$$

Şekil 3.7'deki blok daha önce hesaplanmış olan  $\theta_r$  ve  $\theta_s$  açıları ile rotor gerilimleri vasıtasıyla, rotora göre durgun olan  $\alpha_r$  ve  $\beta_r$  eksenlerinde  $V_{r\alpha r}$  ve  $V_{r\beta r}$  değerleri hesaplanır. Bu değerler çalışma esnasında hesaplanan ara değerlerdir.



**Şekil 3.7**  $dq$ - $\alpha\beta$  Dönüşümü Blok Diyagramı

### 3.4.3 Hız kontrol sistemi

ÇBAJ'dan ölçülen  $\omega_r$  ile ideal hız bloğu üzerinden tespit edilen  $\omega_{ref}$  bir karşılaştırıcıdan geçirilmektedir. Ortaya çıkan hata değeri  $e_\omega$  'den bir PI kontrolör vasıtasıyla torkun referans değeri olan  $T_{ref}$  belirlenmektedir.

### 3.4.4 Akı kontrol sistemi

“ $T_e$  hesabı” bloku yardımıyla  $i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$  akımlarından tork hesap edilir. Yine bu akımlardan “akı hesabı” bloğunda önce  $\psi_{sd}$  ve  $\psi_{sq}$ , sonra;

$$|\psi_s|^2 = \psi_{sq}^2 + \psi_{sd}^2 \quad (3.38)$$

hesaplanır. Bu  $|\psi_s|^2$ , referans değer olan  $|\psi_s|^2_{ref}$  ile karşılaştırılıp oluşan hatanın PI kontrol üzerinden geçirilmesi suretiyle ayarlanmış kontrol sinyali  $u_{\psi^2}$  hesaplanır:

$$u_{\psi^2} = 2(\psi_{sd}v_{rd} + \psi_{sq}v_{rq}) \quad (3.40)$$

Bu değer PWM bloğuna uygulanmak üzere ayarıştırıcı bloğuna gönderilir.

### 3.4.5 Tork kontrol sistemi

3 fazdan 2 faza dönüştürücü bloğundan elde edilen akımlardan “ $T_e$  hesabı” bloğu vasıtasıyla tork hesaplanmış, bu değer torkun referans değeriyle karşılaştırılmış ve elde edilen hata değerinden PI kontrolör marifetiyle ayarlanmış kontrol sinyali  $u_T$  hesaplanır:

$$u_T = \frac{3}{2} \frac{n_p M}{\sigma L_r L_s} (\psi_{sq}v_{rd} - \psi_{sd}v_{rq}) \quad (3.41)$$

Bu değer de PWM bloğuna uygulanmak üzere ayarıştırıcı bloğuna gönderilir.

### 3.4.6 Rüzgâr modeli ve tahmini

Rüzgâr modeli olarak, yelkenli gibi rüzgâra ve kendi hızına göre kuvvet olarak çizgisel hareket eden bir sistemin, dönen sistemlere benzetimi esas alınmıştır. Rüzgârla çizgisel hareket eden bir yelkenlinin hızı belirli bir değere yaklaştıkça rüzgârdan aldığı kuvvet azalır ve tam rüzgâr hızına ulaşırsa sıfır olur. Rüzgâr hızını bir şekilde geçmiş olsa, rüzgâr kuvveti onu yavaşlatacak yönde olur. Rüzgârdan en büyük kuvveti aldığı durum hızının ( $v$ ) sıfır olduğu durumdur (rüzgâra karşı ilerleme hariç). Buna göre tek yönlü rüzgâr ve çizgisel harekette  $k_{F1}$  ve  $k_{F2}$ , rüzgâr ile yelkenli



ilşkisini gösteren iki sabit olmak üzere, rüzgârın yelkenliye uyguladığı kuvvet şöyle olur:

$$F = k_{F1} - k_{F2}v \quad (3.42)$$

Ancak bizim için önemli olan rüzgârdan en büyük kuvveti değil, en büyük gücü almaktır ki güç de kuvvet ile hızın çarpımıdır.  $b_f$  hızla orantılı sürtünme kuvvetine ilişkin sürtünme katsayısı olmak üzere, sürtünme kaybı düşüldükten sonra alınan (net) güç:

$$P = k_{F1}v - (k_{F2} + b_f)v^2 \quad (3.43)$$

Bunu da en büyük yapan hız değeri şudur:

$$v^* = \frac{k_{F1}}{2(k_{F2} + b_f)} \quad (3.44)$$

Bu modelleme ve en büyük güç için hız bulma yöntemini dönüş hareketine uyarlamak için,  $v$  yerine açısal hız  $\omega_r$ ,  $F$  yerine yük torkunun negatifi  $-T_L$ ,  $k_{F1}$  ve  $k_{F2}$  yerine ise rüzgâr rejimi ve türbin kanatları arasındaki ilişkiyi gösteren  $k_{T1}$  ve  $k_{T2}$  diyeceğimiz katsayılar gelir. Yani sabit rüzgâr rejimi için yük torku (sayısal değeri negatif) şöyle olur:

$$T_L = -k_{T1} + k_{T2}\omega_r \quad (3.45)$$

$b_f$  yerine de  $B_f$  geldiği için, sürtünme kaybı düşülerek alınabilecek en büyük elektromekanik güç, şu hızda olur:

$$\omega_r^* = \frac{k_{T1}}{2(k_{T2} + B_f)} \quad (3.46)$$

Bu tezde uygulanan yöntemde referans hız olarak bu hız kullanılmaktadır. Ancak bunun için rüzgâra ait  $k_{T1}$  ve  $k_{T2}$  parametreleri yerine bunların tahminleri  $\hat{k}_{T1}$  ve  $\hat{k}_{T2}$  kullanılmaktadır. Bu tahminler ise  $T_e$ 'nin hesaplanan değerinden en küçük kareler yöntemiyle [37] şöyle bulunmaktadır:

$$\zeta = [\omega_r(i) \quad T_e(i) \quad 1]^T \quad (3.47)$$

$$\lambda = \Gamma_i \zeta \quad (3.48)$$

$$\eta = 0,99 + \zeta^T \lambda \quad (3.49)$$

$$\kappa(i+1) = \kappa(i) + \frac{\lambda(\omega_r(i+1) - \zeta^T \kappa(i))}{\eta} \quad (3.50)$$

$$\Gamma_{i+1} = \Gamma_i - \frac{\lambda \lambda^T}{\eta} \quad (3.51)$$

$$\hat{\kappa}_{T1}(i+1) = \frac{\kappa_3(i+1)}{\kappa_2(i+1)} \quad (3.52)$$

$$\hat{\kappa}_{T2}(i+1) = (1 - \kappa_1(i+1)) \frac{J}{d_t} - B_f \quad (3.53)$$

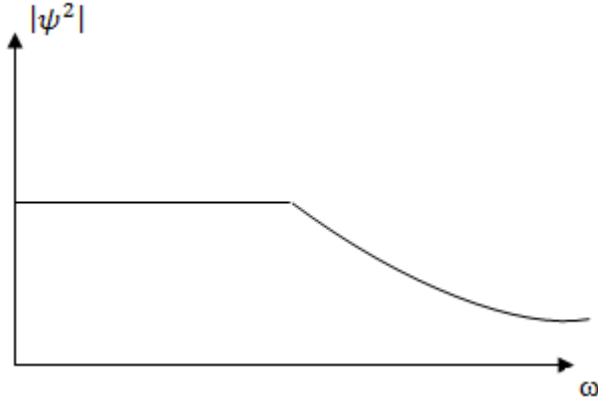
### 3.5 Uygulanan Yöntemin Simülasyon Sonuçları

Bu tezde kullanılan ÇBAJ'ın parametreleri şu şekildedir; rotor ve stator dirençleri  $R_r=0.9233$ ,  $R_s=1.28333$ , Rotor, stator ve karşılıklı endüktanslar  $L_r=0.1430333$ ,  $L_s=0.1418333$ ,  $M=0.1373333$ , kutup sayısı, dişli oranı, sürtünme katsayısı, eylemsizlik momenti sırasıyla,  $n_p=2$ ,  $n_d=10$ ,  $B_f=0.005$ ,  $J=0.1 \cdot n_d$ , Rüzgâr tahmin parametreleri,  $kT_1=90$ ;  $kT_2=0.25$ , stator açısız frekansı, stator voltajı;  $\omega_s=100 \cdot \pi$ ,  $V_{s\text{genlik}}=220$ , hız kontrol bloğuna ait PI kontrolör parametreleri;  $K_{pw}=50$ ;  $K_{iw}=500$ ;  $T_{\max}=90$  şeklindedir.

Ayrıca kullanılan ÇBAJ'ın matematiksel modeli  $d_t$  0,1ms sabit adımlarla Runge-Kutta ile yöntem ile çözülmektedir.

Rüzgâr türbinlerinde çoğunlukla kullanılan ÇBAJ'ların kontrolünde, FOC en çok tercih edilen yöntemdir. Ancak bu tezde hız, tork ve akının mutlak karesi doğrudan kontrol edilmiştir. Bu yöntem kontrolde oldukça düzgün sonuçlar vermektedir. Akı ya da karesi belli bir sabite eşitlenirse tork karakteristiği de düzgün çıkmaktadır. Yani tork kontrolünün sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi sağlanır. Tork kontrolünün düzgün, rotor akımına göre doğrusal olabilmesi için akı sabit tutulmaktadır. Torkla rotor akısı arasında doğrusallık aranmasının sebebi, detayları önbilgiler bölümünde anlatılan, ÇBAJ'ın kontrolünün DC makinelerle benzetilerek basitleştirilmesidir. Akının mutlak karesinin referans değeri genellikle 0,6-0,8 Wb

arasında uygun bir değerde seçilir. Bu değer tecrübî olup yüksek hızlara çıkmak için şekil 3.8’da verilen grafikteki prensiplere göre zayıflatılması gerekmektedir.



**Şekil 3.8** Asenkron Makine hız-akı Karakteristiği

Bunun sebebi;

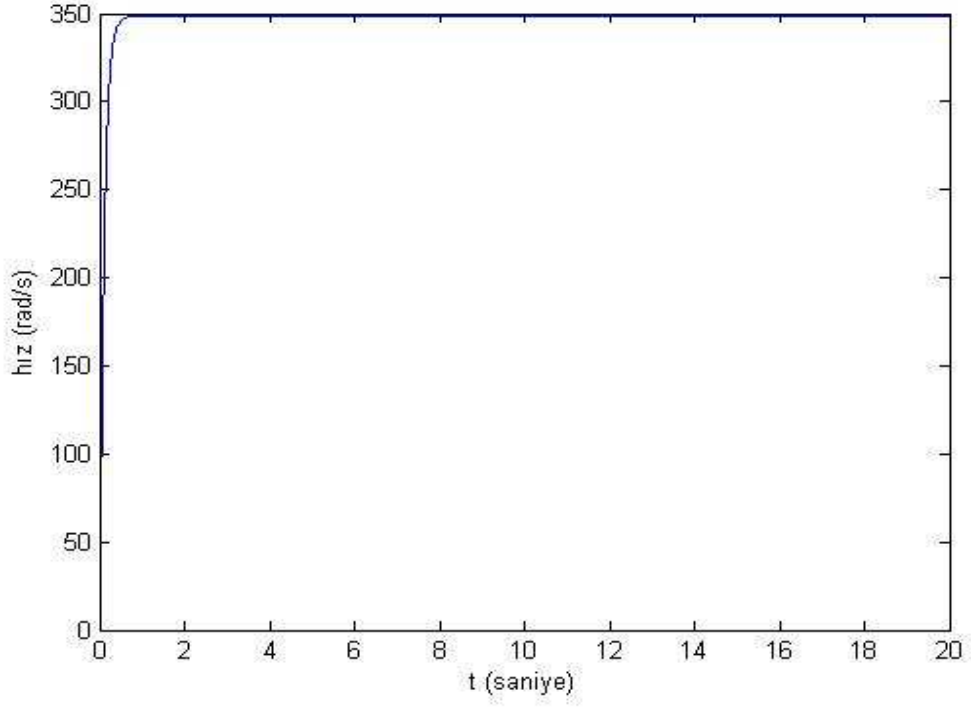
$$E = \sqrt{2} \cdot N \cdot \psi \cdot \omega \quad (3.54)$$

formülüyle açıklanabilir. Endüklenen e.m.k.’nin hem akı hem de frekansla doğru orantılı olduğu görülecektir. Voltaj yaklaşık belli olduğundan yüksek hızlara çıkmak için frekansın yükselmesi ve dolayısıyla akının zayıflatılması gerekmektedir.

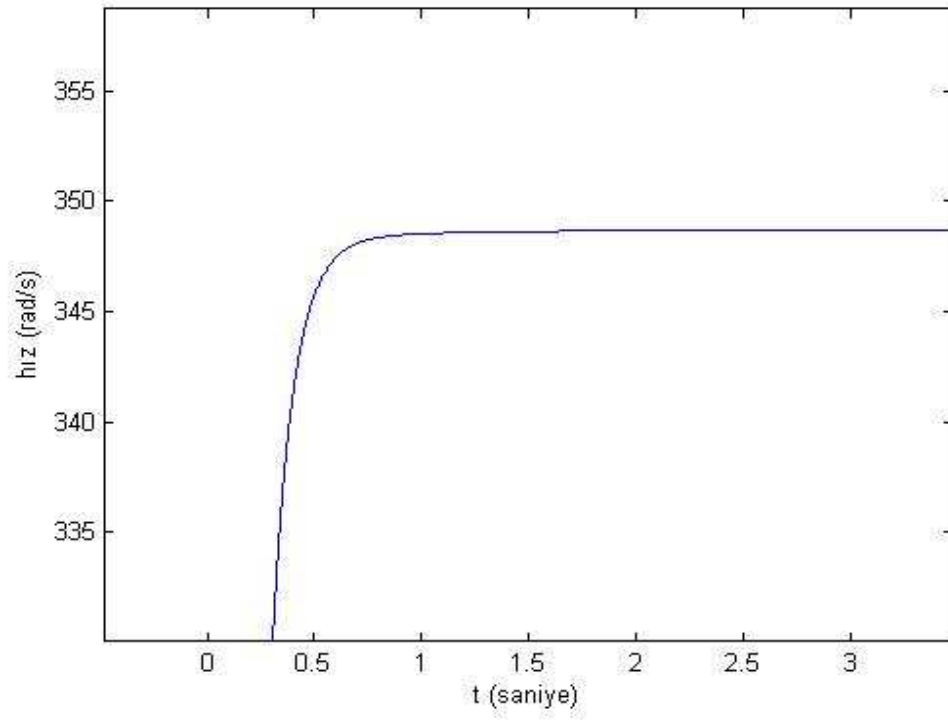
Rüzgâr türbinleri genel olarak 3 m/s’nin altında (cut-in) ve 25 m/s’nin üstünde durdurulurlar. Nominal çalışmadaki rüzgâr değeri ise 8-15 m/s arasındır[86]. Rüzgâr hızının cut-in değerinin altına düşmesiyle cut-out değerinin üzerine çıkması arasında uygulanan kontrol mantığı açısından (her iki durumda da pervane durdurulduğu için) fark yoktur. Rüzgâr durumuna göre oluşan şartlar, kontrol mantığı ve sonuçları gösteren grafikler şu şekildedir.

### 3.5.1 Sabit Rüzgâr Rejimi

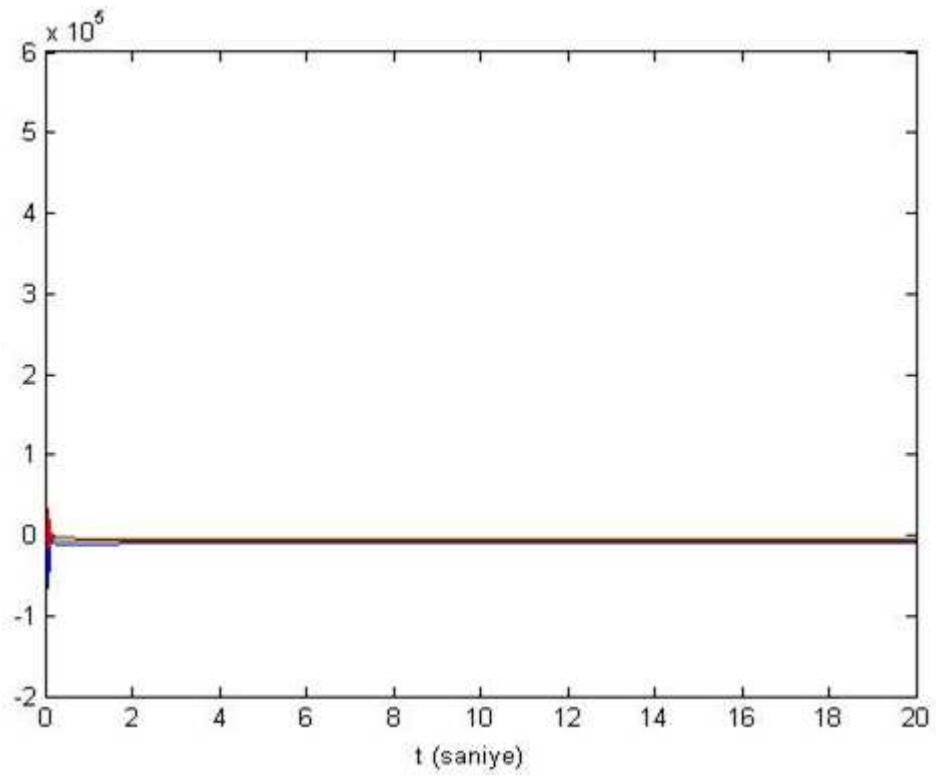
Rüzgârdan alınan tork hıza bağlı olsa da sabit hızda ve bir denge durumunda mümkün olan en yüksek güç alınmaktadır. Türbin parametreleri ve referans hız bu hıza göre ayarlanmıştır. Sabit rüzgar rejimindeki durumu ifade eden simülasyon sonuçları şekil (3.10-a,b,c,d,e,f) 'de gösterilmiştir:



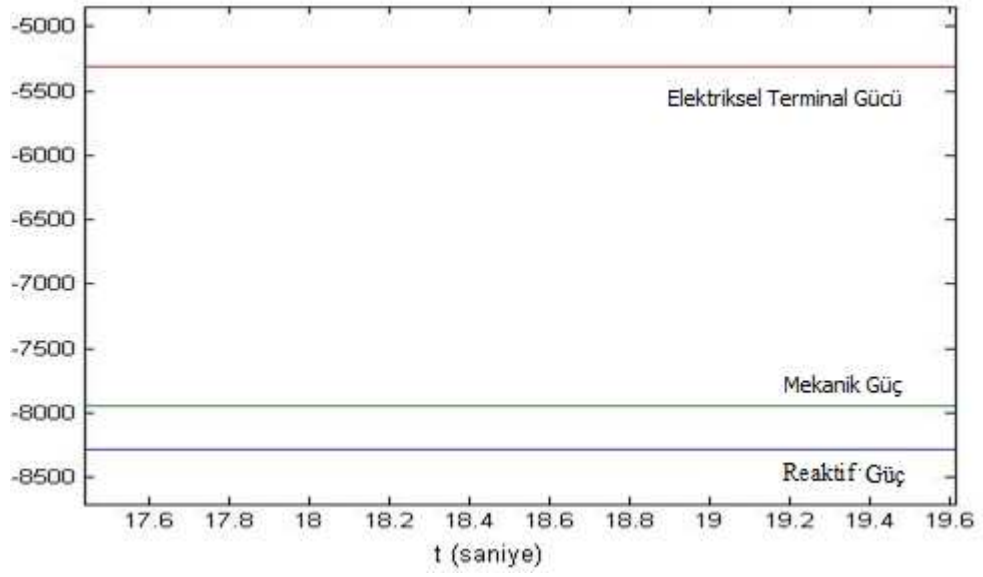
**Şekil 3.10-a** Sabit Rüzgârda Jeneratörün Hızı



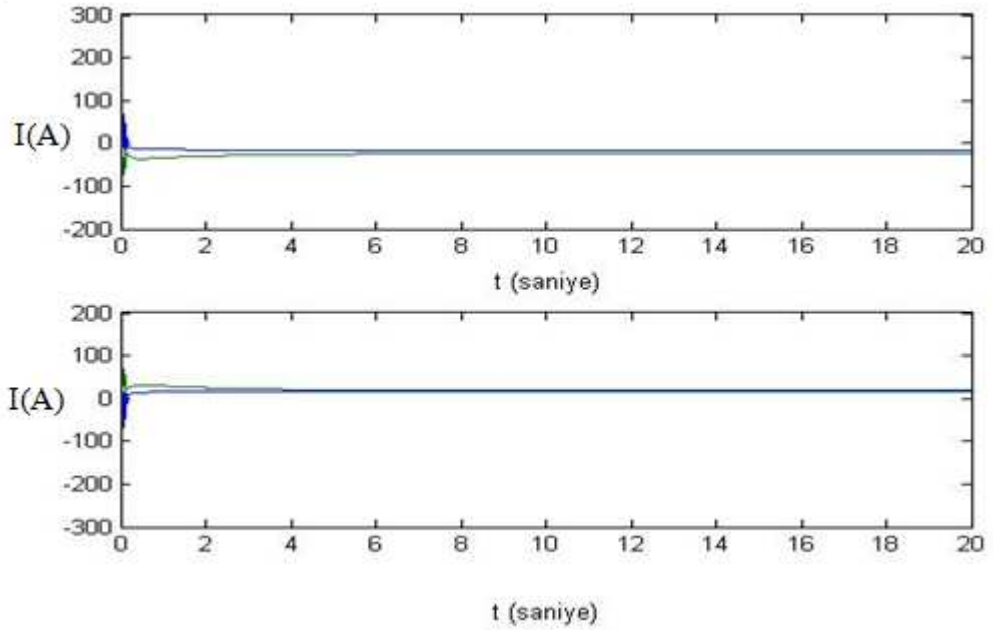
**Şekil 3.10-b** Sabit Rüzgârda Jeneratör Hızının Transient ve Kalıcı Durumu



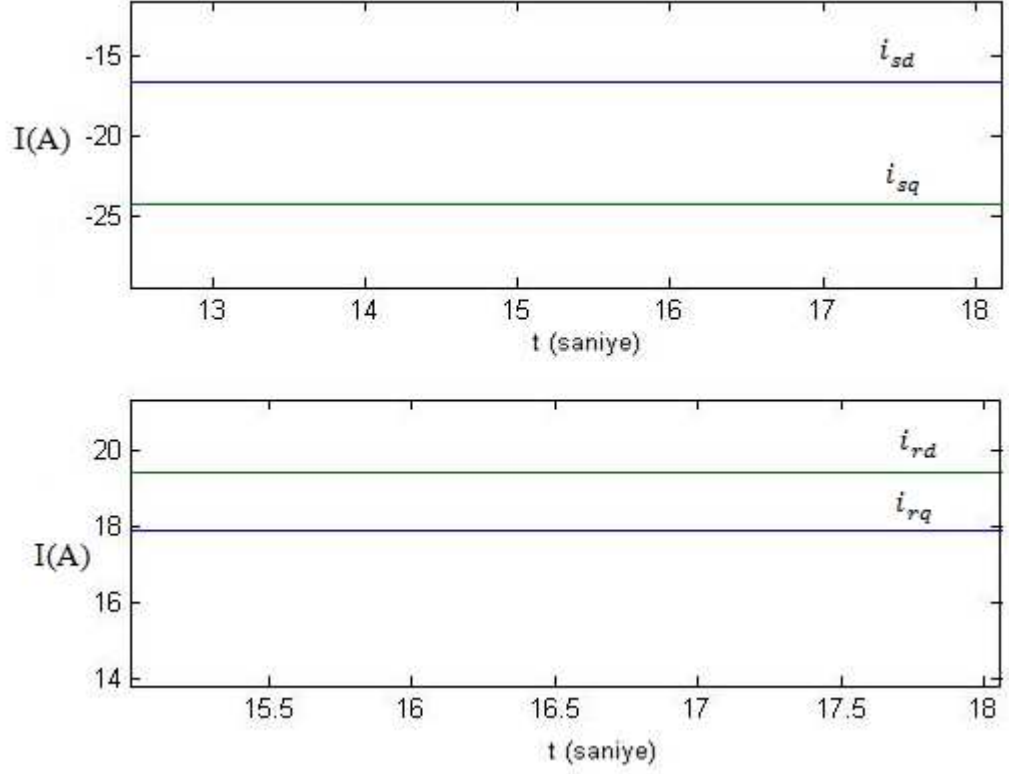
**Şekil 3.10-c** Sabit Rüzgârda Aktif, Reaktif ve Rüzgârdan Alınan Güç



**Şekil 3.10-d** Sabit Rüzgârda Aktif, Reaktif ve Rüzgârdan Alınan Güç



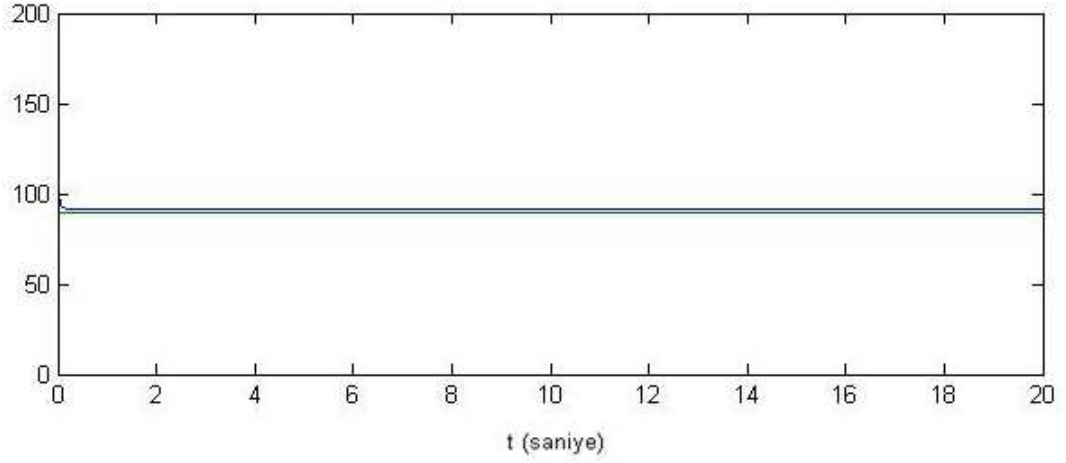
**Şekil 3.10-e** Sabit Rüzgârda Rotor ve Stator Akımları



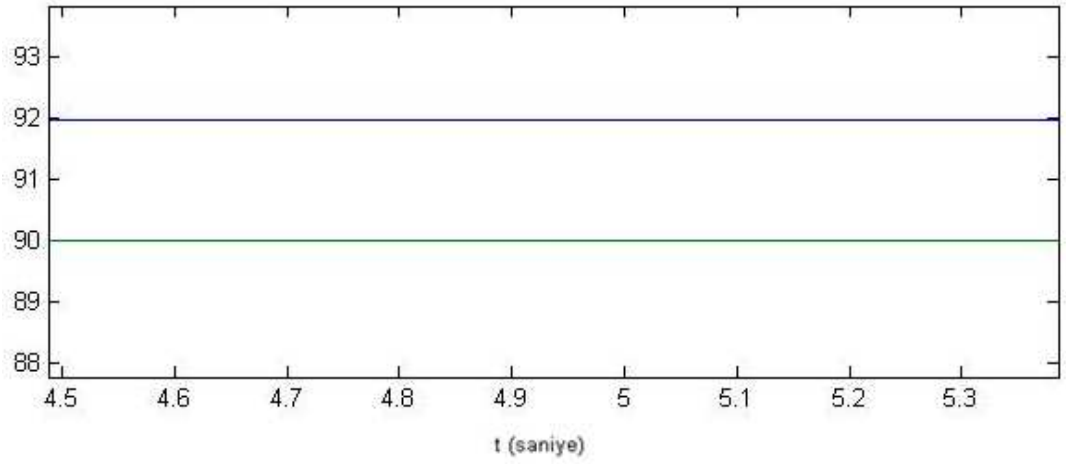
**Şekil 3.10-f** Sabit Rüzgârda Rotor ve Stator Akımları ( $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  ve  $i_{rd}$ ,  $i_{rq}$ )

Grafikler incelendiğinde ÇBAJ'ın rotor hızınının 0,5 sn gibi kısa bir sürede kararlı hale geldiği ve işlem boyunca kararlı kaldığı görülmektedir. Burada küçük boyutta bir türbin düşünüldüğü için hız bu kadar çabuk dengeye gelmektedir. Sabit rüzgâr rejiminde ÇBAJ'ın sürekli durumundaki güçlerin ortalaması üzerinden yapılan hesaplamalar neticesinde % 65'lik bir verimle çalıştığı görülmüştür.

Bu tezdeki rüzgâr modeline ait parametreler ve tork değeri şu şekilde oluşmaktadır:



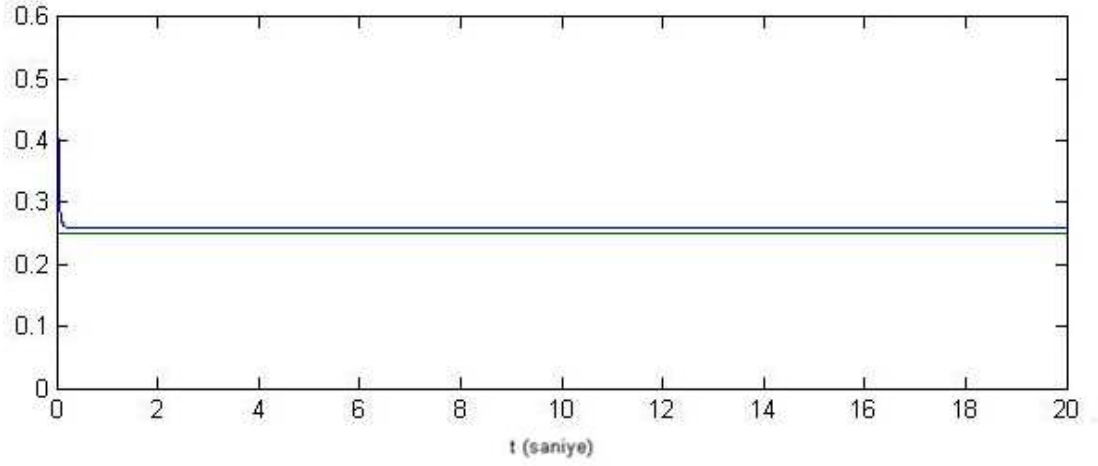
**Şekil 3.10-g** Rüzgâr tahmini parametrelerinin operasyon boyunca durumu  
 $kT_1, kT_1^{tahmin}$



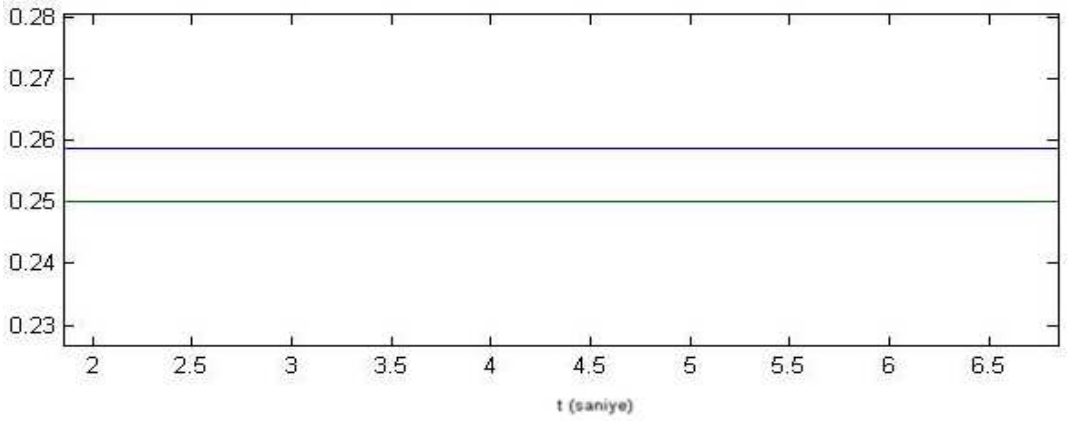
**Şekil 3.10-h** Rüzgâr tahmini  $kT_1, kT_1^{tahmin}$  değerleri

Şekillerden de görüleceği gibi  $kT_1$  %2'lik bir hata ile tespit edilmiştir.



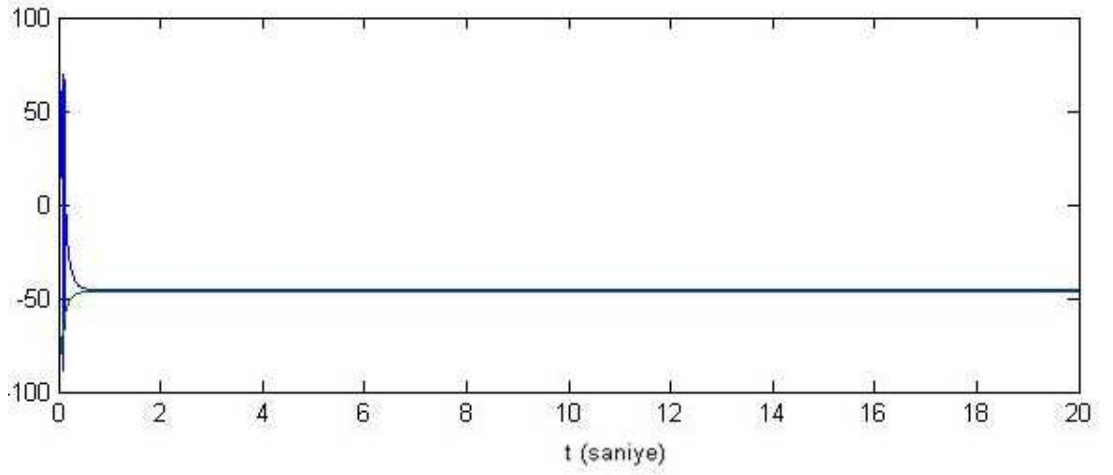


**Şekil 3.10-i** Rüzgâr tahmini parametrelerinin operasyon boyunca durumu  
 $kt_2, kt_2^{tahmin}$  değerleri

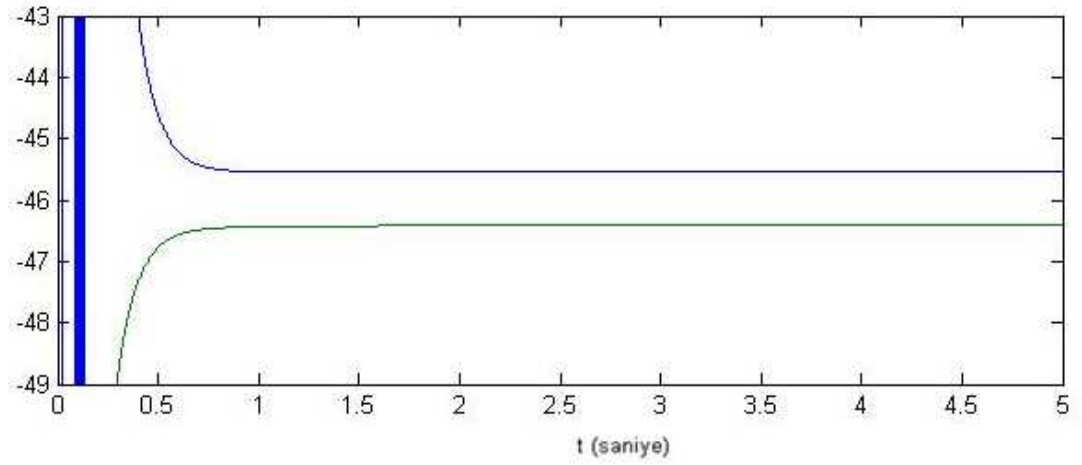


**Şekil 3.10-j** Rüzgâr tahmini  $kt_2, kt_2^{tahmin}$  değerleri

Şekillerden  $kt_2$  'nin %4'lük bir hata ile tespit edildiği görülecektir.



**Şekil 3.10-k** Operasyon boyunca tork ve tork tahmini değerleri



**Şekil 3.10-l** Tork ve tork tahmini değerleri

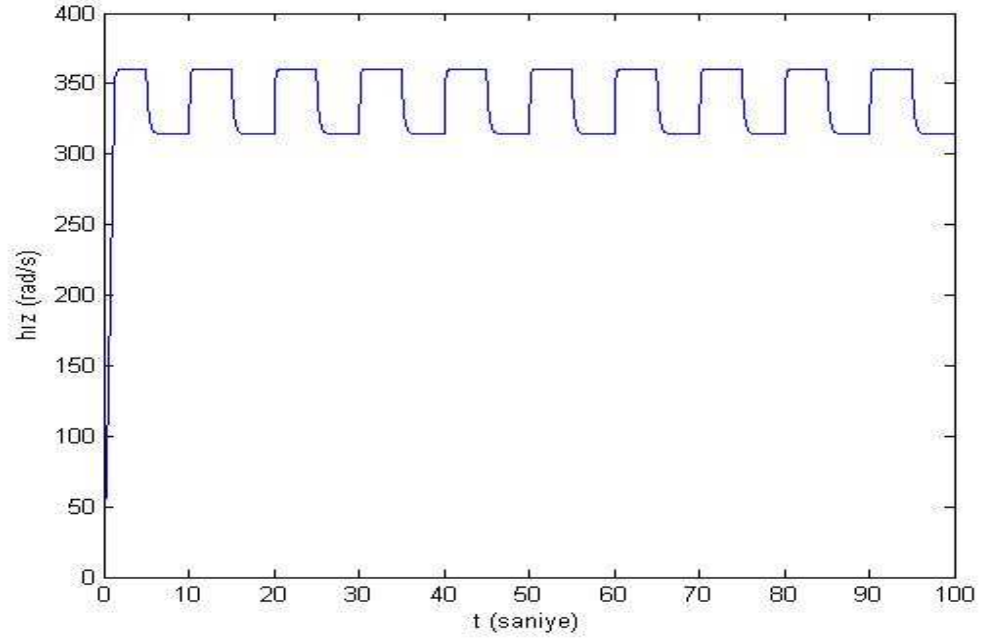
Tahmin edilen tork değeri de yaklaşık %4'lük hata payı ile tespit edilmiştir.

### **3.5.2 Kesikli Rüzgâr Rejimi**

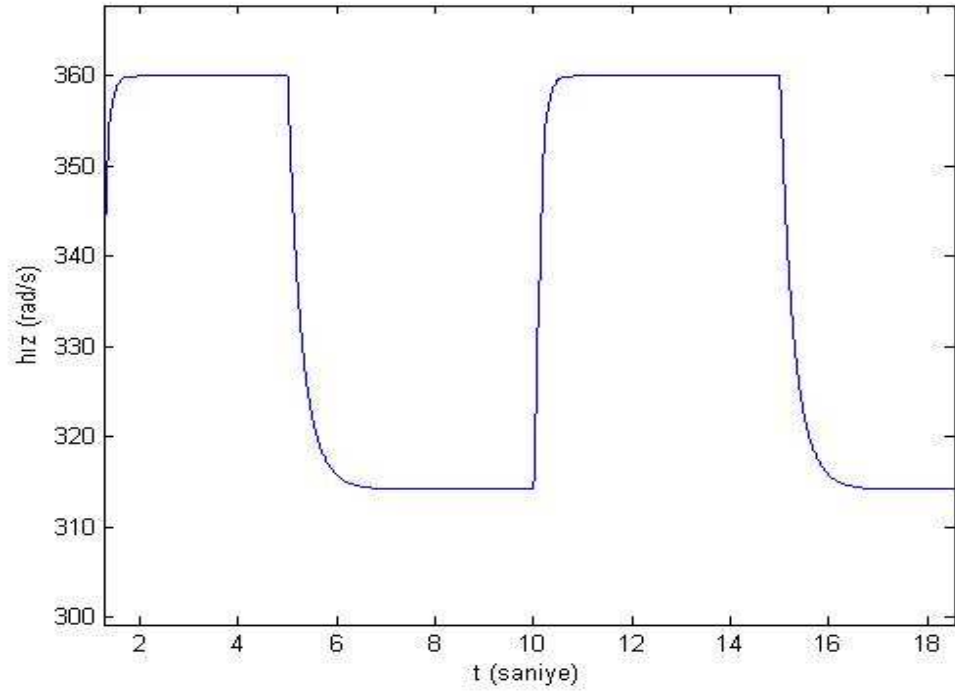
Bu kısımda rüzgârın bazen olduğu bazen olmadığı durumlar üzerinde durulmuştur. Bu durum kendi içinde 2 farklı durum barındırmaktadır. 1. durum rüzgârın olması durumudur ki şartlar bölüm 3.5.1.'de anlatılmıştır. 2. durum ise rüzgârın olmadığı veya cut-in, cut-out sınırlarının dışında kaldığı yani pervanenin durduğu durumlardır. Bu tezde kullanılan ÇBAJ'ın statoru doğrudan şebekeye bağlıdır. Rüzgârın kesilmesi halinde jeneratörün tüketici moduna geçme riskinin ortadan kaldırılması için şebeke ile bağlantısı kesilmelidir. Ancak ÇBAJ'ın, rüzgârın sürekli kesik olduğu durum haricinde, kesikli bir rejim göstermesi durumunda şebekeden ayrılırken sistem verimini düşürmeden ayrılması önemlidir. Bu bağlamda ÇBAJ'ı şebekeden ayırmak için 3 farklı durum uygulanabilir.

#### **3.5.2.1 Rotorun Kısa Devre Edilmesi:**

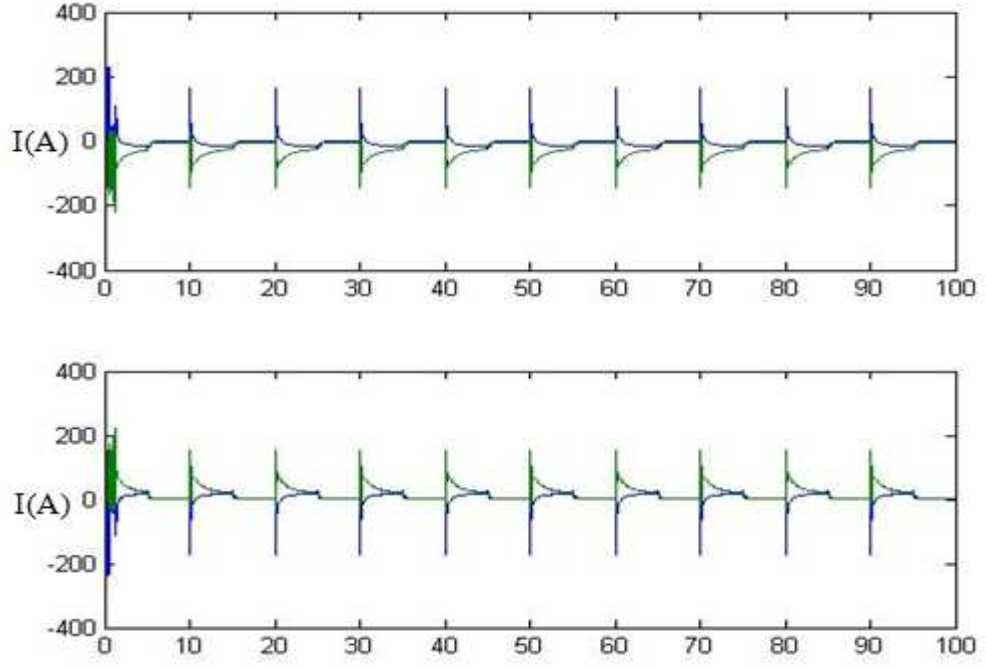
Rüzgârın olmadığı durumlarda ÇBAJ'ın tüketici moduna geçmesi ve sisteme gelebilecek olası zararlar, statorun şebekeye bağlı kalmasına rağmen rotorun kısa devre edilerek sincap kafesli asenkron jeneratöre benzetilmesiyle önlenmiştir[51,87]. Bu durumu test edebilmek için rüzgâr hızı yerine 5sn rüzgârlı, 5sn de rüzgârsız olacak şekilde bir kare dalga uygulanmıştır. Bu şartlara ilişkin simülasyon sonuçları şekil(3.11-a,b,c,d,e)'de verilmiştir.



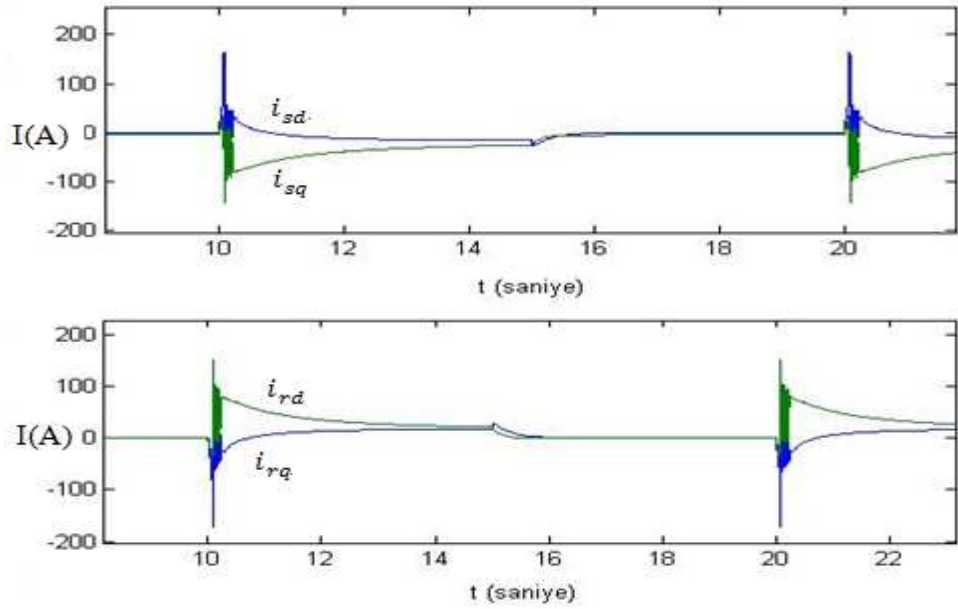
**Şekil 3.11-a** Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Stator Şebekeye Bağlı Durumda Hız



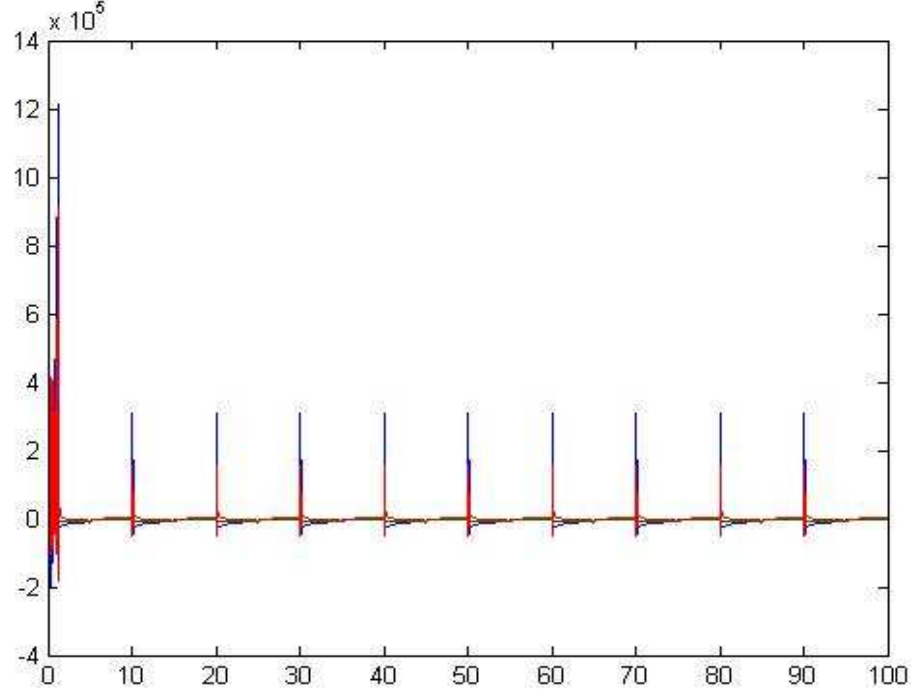
**Şekil 3.11-b** Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Stator Şebekeye Bağlı Durumda Hızın 1 Periyottaki Durumu



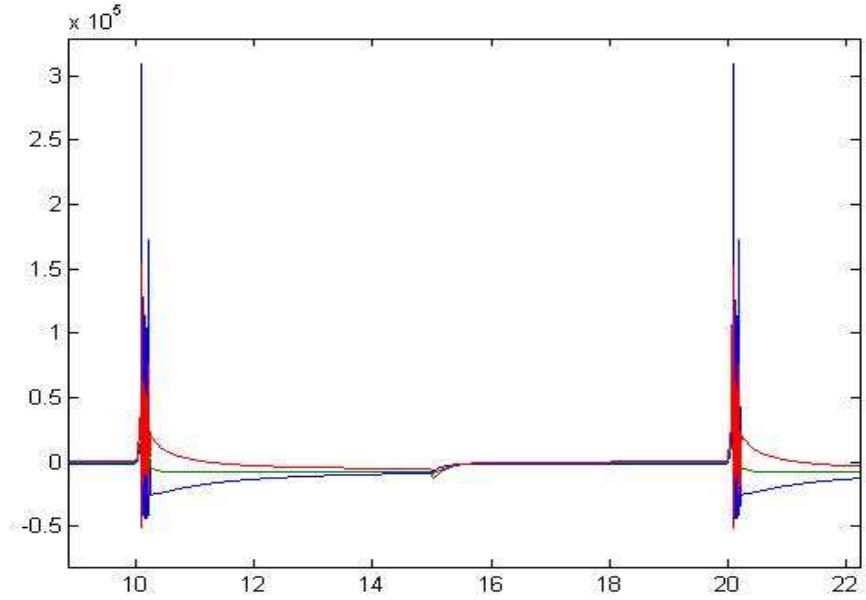
**Şekil 3.11-c** Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Stator Şebekeye Bağlı Durumda Rotor ve Stator Akımları ( $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  ve  $i_{rd}$ ,  $i_{rq}$ )



**Şekil 3.11-d** Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Stator Şebekeye Bağlı Durumda Rotor ve Stator Akımlarının 1 Periyottaki Durumu ( $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  ve  $i_{rd}$ ,  $i_{rq}$ )



**Şekil 3.11-e** Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Stator Şebekeye Bağlı Durumda Aktif, Reaktif ve Rüzgârdan Alınan Güç

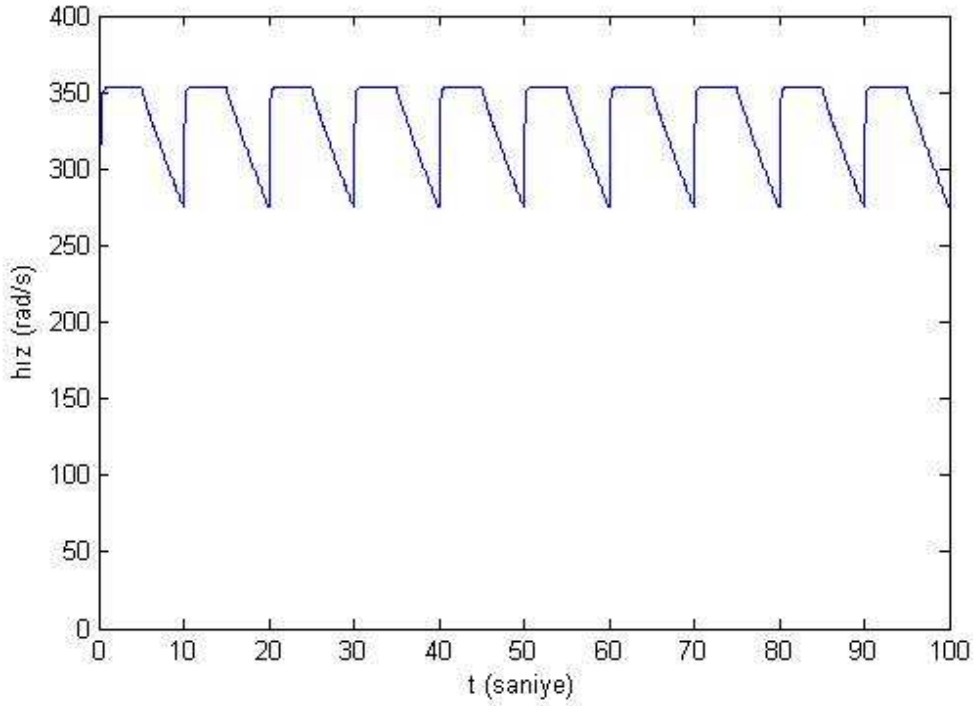


**Şekil 3.11-f** Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Stator Şebekeye Bağlı Durumda 1 periyottaki Aktif, Reaktif ve Rüzgârdan Alınan Güç

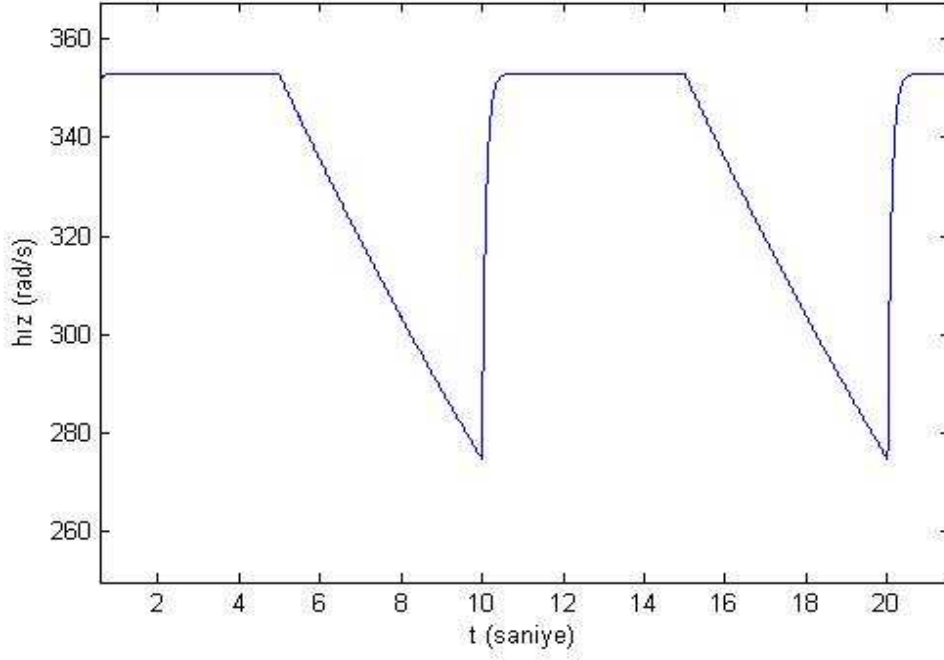
Grafikler incelendiğinde ÇBAJ'ın rotor hızının rüzgârın kesilmesi durumunda 1,5 sn gibi kısa bir sürede senkron hıza indiği ve kararlı hale geldiği ve kararlı kaldığı görülmektedir. Kesikli rüzgâr rejiminde ÇBAJ'ın şebekeden ayrılması için sadece rotorun kısa devre edilmesi yöntemi tercih edilirse, güçlerin ortalaması üzerinden yapılan hesaplamalar neticesinde verimin % 20'lere kadar düştüğü görülmüştür.

### 3.5.2.2 Rotor ve Statorun Açık Devre Edilmesi Durumu

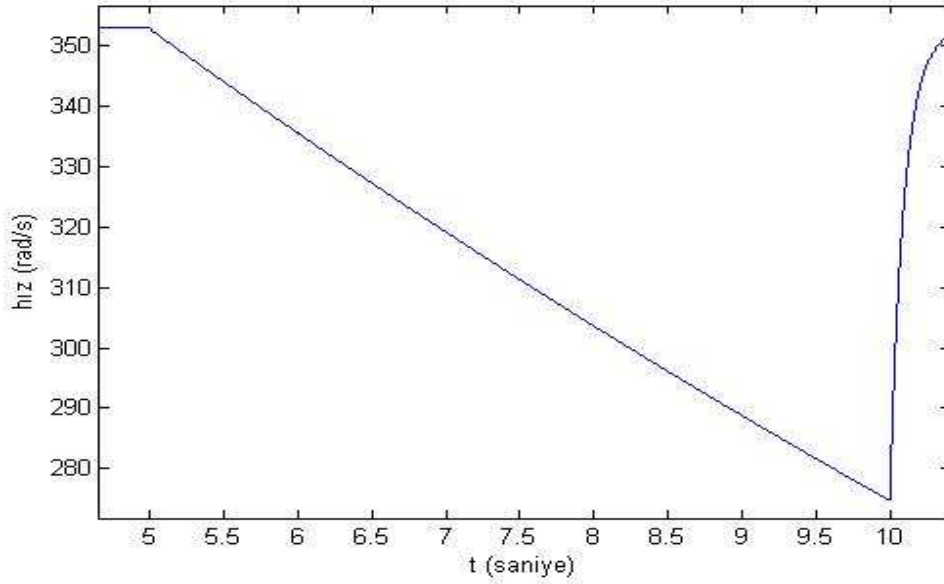
Bu durumda rotor ve statorun her ikisi de açık devre edilmiş olup simülasyon sonuçları şekil (3.12-a,b,c,d,e)'de verilmiştir.



**Şekil 3.12-a** Değişken Rüzgârda Rotor ve Stator Kısa Devre Durumda Hız

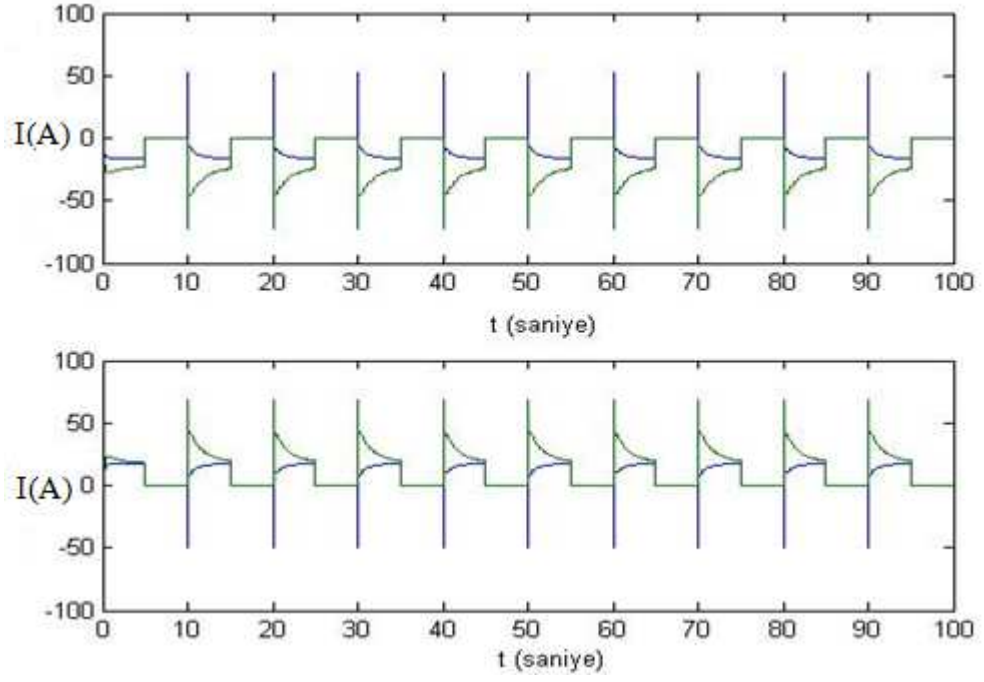


**Şekil 3.12-b** Değişken Rüzgârda Rotor ve Stator Kısa Devre Durumda Hızın 1 Periyottaki Durumu

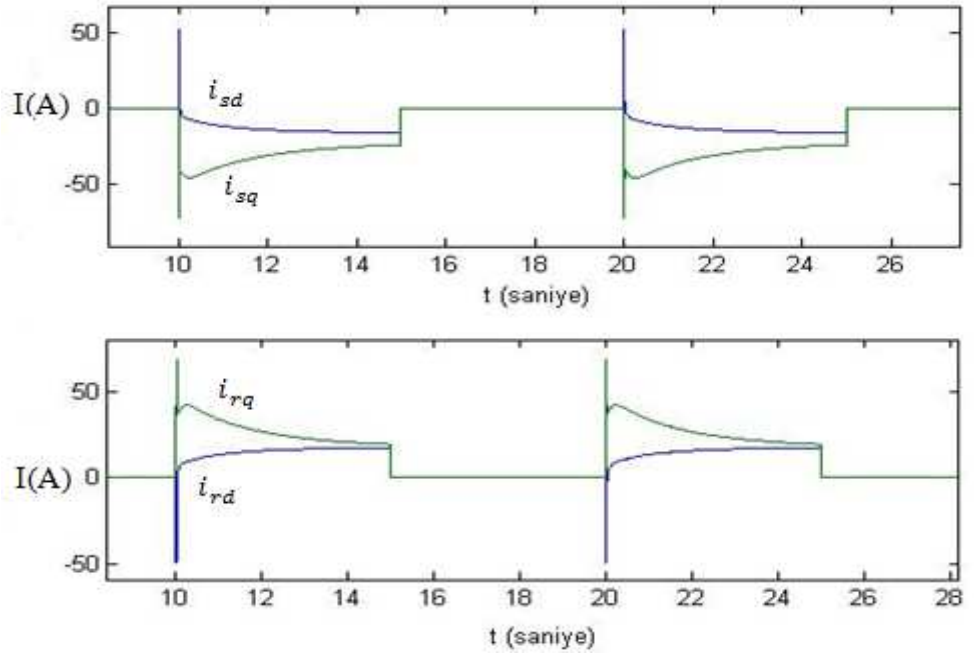


**Şekil 3.12-c** Değişken Rüzgârda Rotor ve Stator Kısa Devre Durumda Hızın Rüzgâr Değişimine tepkisi

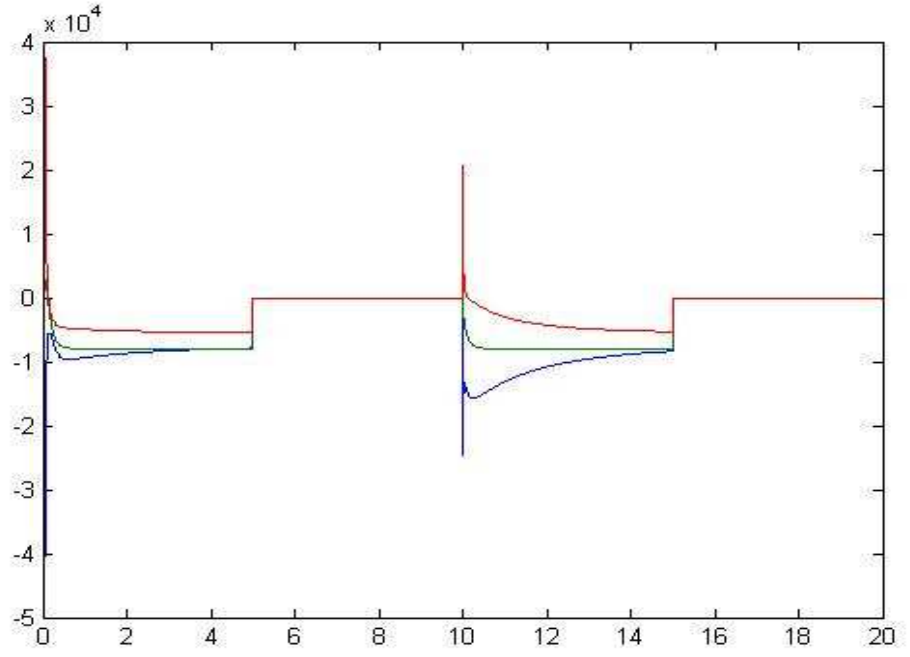




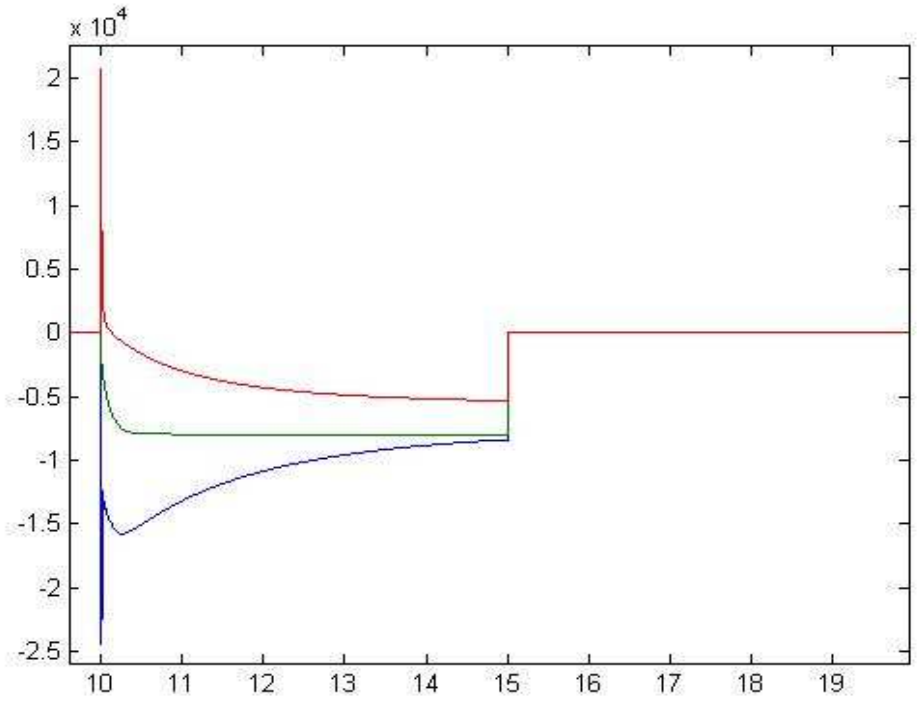
**Şekil 3.12-d** Değişken Rüzgârda Rotor ve Stator Kısa Devre Durumda Rotor ve Stator Akımları ( $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  ve  $i_{rd}$ ,  $i_{rq}$ )



**Şekil 3.12-e** Değişken Rüzgârda Rotor ve Stator Kısa Devre Durumda Rotor ve Stator Akımlarının 1 Periyottaki Durumu ( $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  ve  $i_{rd}$ ,  $i_{rq}$ )



**Şekil 3.12-f** Değişken Rüzgârda Rotor ve Stator Kısa Devre Durumda Aktif, Reaktif ve Rüzgârdan Alınan Güç

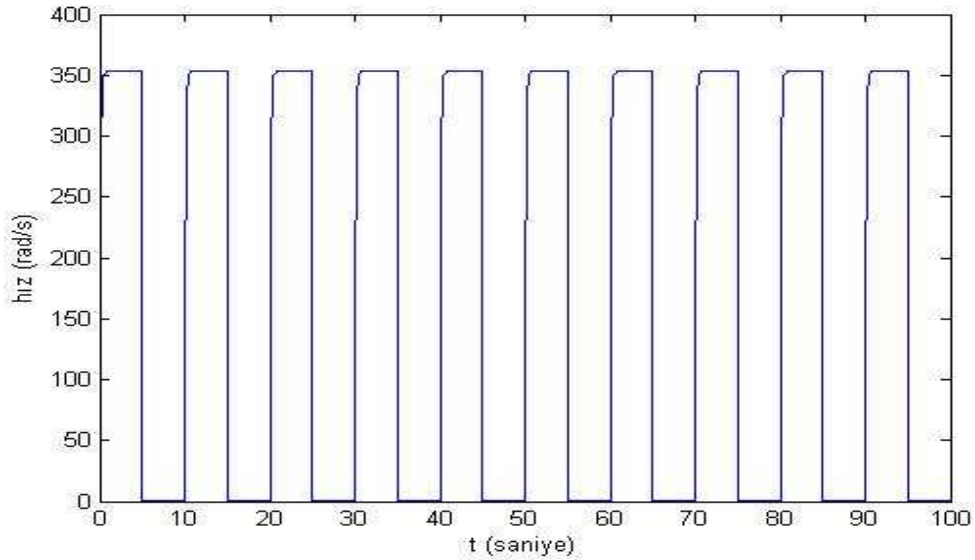


**Şekil 3.12-g** Değişken Rüzgârda Rotor ve Stator Kısa Devre Durumda 1 periyottaki Aktif, Reaktif ve Rüzgârdan Alınan Güç

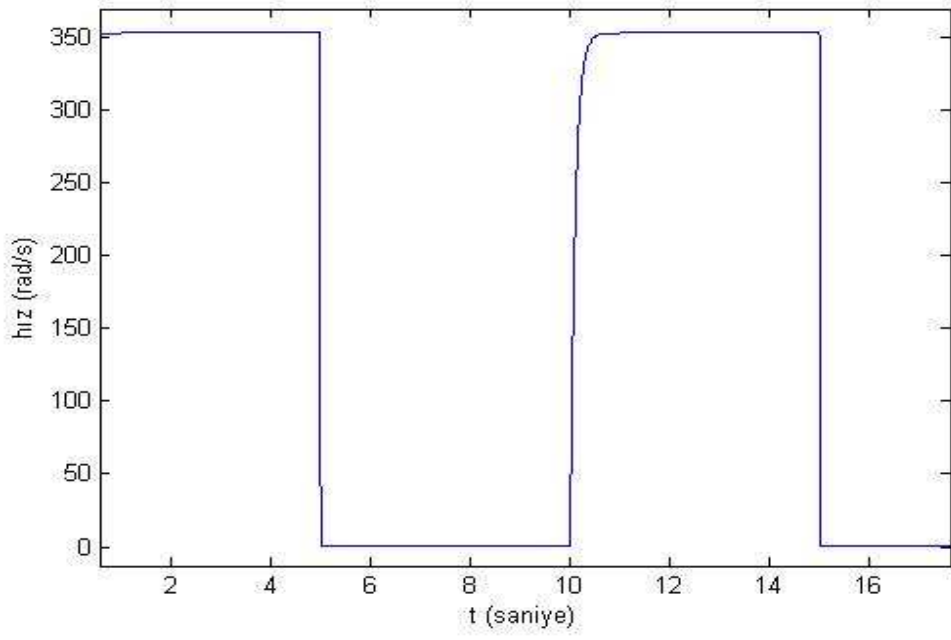
Grafikler incelendiğinde ÇBAJ'ın rotor hızının rüzgârın kesilmesi durumunda ÇBAJ rotor hızının 5 sn'de senkron hıza indiği ve kararlı hale geldiği ve kararlı kaldığı görülmektedir. Rüzgârın kesilmesi durumunda ÇBAJ hızının yumuşak bir geçişle azaldığı görülmektedir. Kesikli rüzgâr rejiminde ÇBAJ'ın şebekeden ayrılması için sadece rotor ve statorun her ikisinin birden açık devre edilmesi yöntemi tercih edilirse, güçlerin ortalaması üzerinden yapılan hesaplamalar neticesinde verimin % 50 olduğu görülmüştür.

### 3.5.2.3 Rotorun Kısa Devre Statorun Açık Devre Edilmesi Durumu:

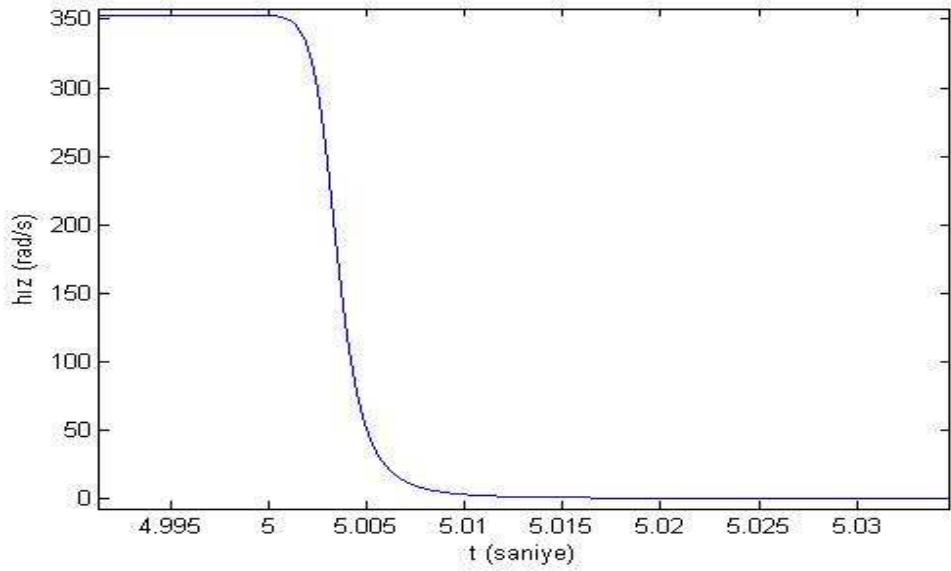
Bu durumda rotor kısa devre[51,87], stator ise açık devre edilmiş olup simülasyon sonuçları şekil (3.13-a,b,c,d,e)'de verilmiştir:



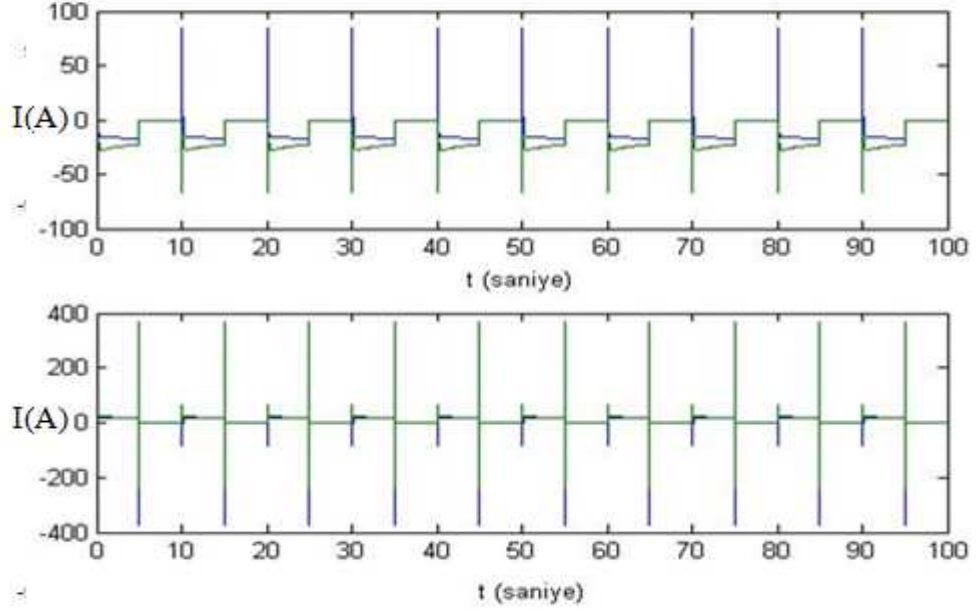
**Şekil 3.13-a** Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Statoru Açık Devre Durumda Hız



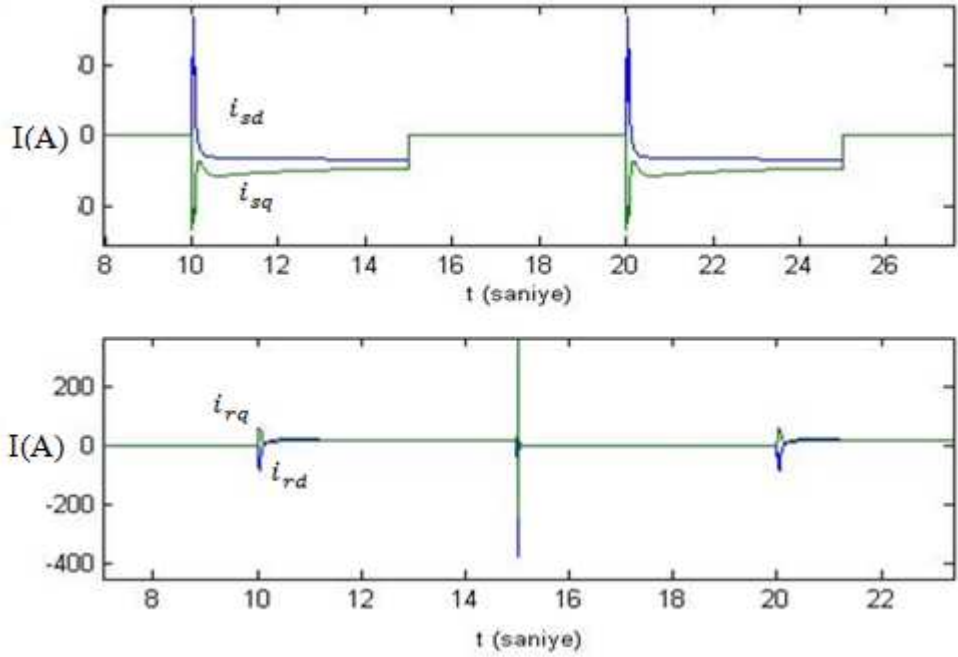
**Şekil 3.13-b** Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Statoru Açık Devre Durumda Hızın 1 Periyottaki Durumu



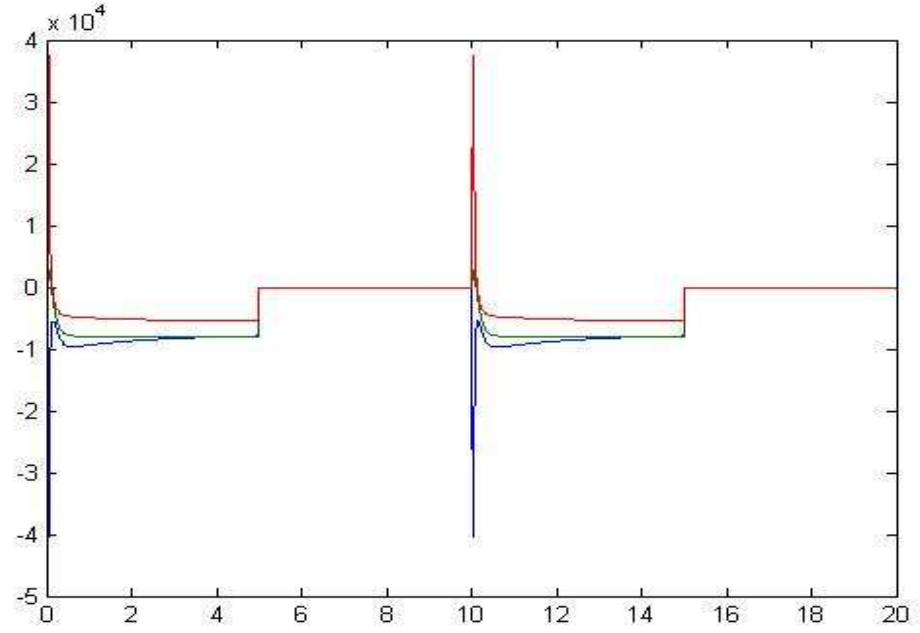
**Şekil 3.13-c** Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Statoru Açık Devre Durumda Hızın Set Değere Oturması



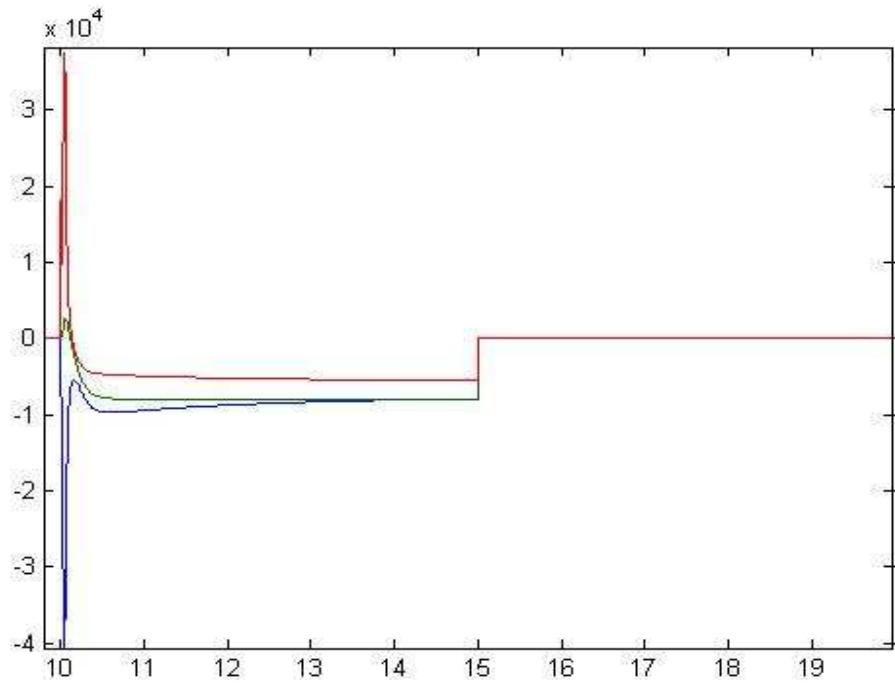
**Şekil 3.13-d** Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Statoru Açık Devre Durumunda Rotor ve Stator Akımları ( $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  ve  $i_{rd}$ ,  $i_{rq}$ )



**Şekil 3.13-e** Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Statoru Açık Devre Durumunda 1 Periyottaki Rotor ve Stator Akımları ( $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  ve  $i_{rd}$ ,  $i_{rq}$ )



**Şekil 3.13-f** Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Statoru Açık Devre Durumda Aktif, Reaktif ve Rüzgârdan Alınan Güç



**Şekil 3.13-g** Değişken Rüzgârda Rotor Kısa Devre ve Statoru Açık Devre Durumda 1 Periyottaki Aktif, Reaktif ve Rüzgârdan Alınan Güç

Grafikler incelendiğinde ÇBAJ'ın rotor hızının rüzgârın kesilmesi durumunda 0.15 sn'lik kısa bir sürede sıfıra indiği ve kararlı hale geldiği, diğer tüm durumlar karşısında kararlı kaldığı görülmektedir. Ancak rüzgârın kesilmesi durumunda ÇBAJ hızının çok kısa sürede ve sert bir geçişle azaldığı görülmektedir. Kesikli rüzgâr rejiminde ÇBAJ'ın şebekeden ayrılması için rotorun kısa ve statorun açık devre edilmesi yöntemi tercih edilirse, güçlerin ortalaması üzerinden yapılan hesaplamalar neticesinde verimin % 57 olduğu görülmüştür.

### 3.5.3 Yorum

Her 3 yöntem ele alındığında, stator şebekeye bağlı olduğu halde sadece rotoru kısa devre ederek ÇBAJ'ın enerji tüketimini kısıtlama yoluna gitmek verimin % 65'ten % 20'lere kadar düşmesi nedeniyle verimli görünmemektedir. Rotorun kısa devre, statorun açık devre edilmesi durumunda ise ÇBAJ'ın verimi % 65'ten %57'ye düşmektedir ki bu değer kesikli rüzgâr rejimi için oldukça başarılı görünmektedir. Ancak bu yöntemde rüzgârın kesilmesi halinde rotor hızının çok kısa bir sürede sıfıra düşmesi mekanik riskler içermektedir. Rotor ve statorun her ikisinin de açık devre edilmesi durumunda verim % 65'ten % 50'ye düşmekte olup, rüzgâr kesintisi halinde sistem 5 sn gibi makul bir sürede daha yumuşak bir geçişle senkron hıza inmektedir. Her ne kadar 3. yöntem daha yüksek bir verim sunmuş olsa da rotor ve statorun her ikisinin de açık devre edilmesi durumu optimum seçenek olarak görünmektedir.

## 4 SONUÇ

### 4.1 Genel Sonuçlar

Tezde ÇBAJ'ın tork ve akısı ayrıştırılmış olarak başarıyla kontrol edilmiştir. Alan yönlendirmeli kontrolün(FOC) ÇBAJ kontrolünde vazgeçilmez olmadığı ortaya konmuştur. Nitekim FOC'de tork ve akı ayrıştırılmış olarak yapılamamaktadır. Birini kontrol eden giriş değiştiğinde diğer giriş de değişmek zorunda kalmaktadır. Dolayısıyla kontrol edilen diğer büyüklükte değişimden etkilenmektedir.

Rüzgâr için önerilen model parametreleri en küçük hata kareleri yöntemiyle başarılı bir şekilde tahmin etmiştir.

Rüzgârın kesikli bir rejim sergilediği durumlarda ÇBAJ'ın enerji tüketimini kısıtlayıcı yöntemler içerisinde en uygun olanın stator ve rotorun her ikisinin de açık devre edildiği yöntem olduğu görülmüştür.

### 4.2 Gelecek Çalışma

Bu tezde önerilen hız, akı ve torkun esas alınması suretiyle gerçekleştirilen kontrol yöntemi diğer AC makineler ve motor modu için de uygulanabilir.

Ayrıca önerilen yöntem aktif ve reaktif gücün ayrıştırılmış kontrolü eklemek suretiyle kapsam genişletilebilir.

Son olarak, statoru doğrudan şebekeye bağlı bir ÇBAJ üzerinde, şebeke bozulmaları durumları için kontrol çalışmaları yapılabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] P.E. Hodgson, " Nuclear Power and Energy Crisis", Modern Age 50, 2008.
- [2] D. F. Howard , " Short-Circuit Modelling of Doubly Fed Induction Generators with Uninterrupted Control", IEEE Power Electronics, USA, 2014
- [3] E. Tremblay," Study of Grid-Side Converter Control for Grid-Connected Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines under Unbalanced Load Condition", IEEE, Canada, 2006.
- [4] D.D. Li," Analysis of Short Circuit Current of Wind Turbine-Doubly Fed Induction Generator ", IEEE, 2006.
- [5] J. Ma, " Short Circuit Current Calculation of Doubly Fed Induction Generator", China, 2012
- [6] H. Karimi-Davijani, " Active and Reactive Power Control of Doubly Fed Induction Generator Using SVPWM Converter", 2008
- [7] H F.Wu," Modeling and Control of Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator", IEEE, UK, 2006.
- [8] J. Shi," Impact of Doubly Fed Induction Generator Wind Power On Power System Small Signal Stability", IEEE, China, 2013
- [9] E. Tremblay, " Grid-Side Converter Control of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines to Enhance Power Quality of Distribution Network", IEEE, Canada, 2006
- [10] T. Ghennam , " Modelling and Control of a Doubly Fed Induction Generator Based Wind Conversion System " ,Powereng 2009, Lisbon,2009, İstanbul, 1998

- [11] P. M. Balaji, “ Decoupled Control of Real and Reactive Power by Limiting The DC-Link Fluctuation for Doubly Fed Induction Generator “, SEISCON, India, 2011
- [12] W. Qiao, “ Design of Optimal PI Controllers for Doubly Fed Induction Generator Driven by Wind Turbines Using Particle Swarm Optimization “, IEEE, Canada, 2006
- [13] X. Ancheng,” A New Method to Coordinate The PI Controllers’ Parameters of Doubly Fed Induction Generator”,Hefei, China,2012.
- [14] S. Bhattacharya, P. K. Saha” A Novel Linear Controller For Grid Connected Doubly Fed Induction Generator”, IEEE, India,2012
- [15] S. Seman,”Ride-Through Analysis of Doubly Fed Induction Wind Power Generator Under Asymmetrical Network Disturbance”, IEEE Transpower, Finland,2006
- [16] S. Seman,”Performance Study of a Doubly Fed Wind-Power Induction Generator Under Network Disturbances”, IEEE Trans.,Helsinki, 2006.
- [17] B.B. Pimple, “ A New Direct Torque Control of ,Doubly Fed Induction Generator For Wind Power Generation “, India, 2011
- [18] S. Z. Chen, “ Integral Variable Structure Direct Torque Control of Doubly Fed Induction Generator “, IET Renewable Power Generation, China, 2010
- [19] HG. Jeong, “ A Sliding-Mode Approach to Control the Active and Reactive Powers for A Doubly Fed Induction Generator in Wind Turbines “, IEEE, South Korea, 2008

- [20] A. P. Tennakoon, A. Arulampalam, “ Tracking of Rotor Angle for Controlling Doubly Fed Induction Generator in Wind Power Applications “, ICIIS, Sri Lanka, 2007
- [21] G. D. Marques, “ Analysis of a dq Stator Flux Stabilization Method for the Doubly Fed Induction Generator “, IEEE, Lisbon, 2008
- [22] P. Cartwright, “ Co-ordinated Voltage Control Strategy for a Doubly Fed Induction Generator - based Wind Farm”, IEEE, UK, 2004.
- [23] K. S. Rongve, “ Overview of Torque Control of a Doubly Fed Induction Generator”, IEEE, Italy, 2003.
- [24] B. Shen, “ Novel Sensorless Decoupled P-Q Control of Doubly Fed Induction Generator Based on Phase Locking to  $\gamma$ - $\delta$  Frame”, IEEE, Canada, 2005.
- [25] J Ning, “ Decoupled Control of Doubly Fed Induction Generator for Wind Power System “, IEEE, USA, 2008
- [26] I. Erlich, “Modeling of Wind Turbines Equipped with Doubly-Fed Induction Machines for Power System Stability Studies”, IEEE, Germany, 2006.
- [27] F. Khatounian, “ Control of a Doubly Fed Induction Generator for Aircraft Application”, IEEE, France, 2003.
- [28] M. Machmoum, “ Dynamic Performances of a Doubly Fed Induction Machine For A Variable Speed Wind Energy Generation”, IEEE, France, 2002.
- [29] B. Rabelo, “Optimal Active and Reactive Power Control with the Doubly Fed Induction Generator In The MW-Class Wind Turbines”, IEEE, Indonesia, 2001.

- [30] S. EL Amani,” Dynamic Behaviour of Two Stator Flux Control System of a Doubly Fed Induction GeneratorBased Grid Connected Wind Turbine During Voltage Dips”, CIRED 18<sup>th</sup> Int. Conf. On Electricity Distribution, Belgium, 2005.
- [31] H. Ma, “ Research on AC-DC-AC Converter For Doubly Fed Induction Generator”, IEEE, China, 2005.
- [32] M. Yin, “ Study on the Control of Doubly Fed Induction Generator and Its Responses to Grid Disturbances” , IEEE, China, 2006
- [33] LI Lan, “ Power Control of Variable- Speed ConstantFrequency Doubly Fed Wind Power Generators”, International Symp. On Control and Automation, China, 2010
- [34] J. Shu, “ Doubly Fed Induction Wind Generator Model and Its Operation Investigations “, China, 2009
- [35] V. Verma, “ Decoupled Indirect Current Control of Doubly Fed Induction Generatorfor Wind Energy Application“, IEEE, India, 2011
- [36] YS Kim, “ Miligation of the Flicker Level of a Doubly Fed Induction Generator Using Power Factor Angle Control “, IEEE, South Korea, 2009
- [37] H. Jiabing,”The Internal Model Current Control for Wind Turbine Driven Doubly-Fed Induction Generator”, IEEE, China, 2006.
- [38] I. Esendi,” Alternative Protection System for Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator”, IEEE, Lisbon, 2009
- [39] G.Pannell, “Doubly Fed Induction Generator Control Performance Under Fault Conditions For Offshore Wind Applications”, CIRED 18<sup>th</sup> Int. Conf. On Electricity Distribution, 2005.

- [40] H. Yikang, “ Modelling and Control of Wind Turbine Used Doubly Fed Induction Generator Under Network Fault Conditions”, Project Supported by the National Technology Research and Development of China,China, 2005
- [41] S. C. Vegunta, “ Sensitivity of Active Front-end ASDs and Doubly Fed Induction Generators to Voltage Sags and Short Interruptions”, United Kingdom , 2005.
- [42] M. El Moursi, “ Optimal Tracking Secondary Voltage Control for the Doubly Fed Induction GeneratorWind Turbines “, IEEE, Canada, 2006
- [43] H. Nian, “Direct Power Control of Doubly Fed Induction Generator Under Distorted Grid Voltage”,IEEE, China, 2014.
- [44] C. Zhan, “ Fault Ride-through Capability Investigation of a Doubly Fed Induction Generator with an Additional Series-Connected Voltage Source Converter”, AREVA T8D Power ElectronicAction Box 27, UK, 2006
- [45] D. G. Giaourakis, “ Wind Energy Conversion System Equipped With Doubly Fed Induction Generator Under Various Grid Faults” , Greece,2013.
- [46] M. Wang,” A New Method For Doubly Fed Induction Generator Fault Ride Through Using Resistance And Capacity Crowbar Circuit”, IEEE, China, 2013
- [47] J.Kretschmann , “Enhanced Reduced Order Model of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator for Power System Stability Studies “, First International Power and Energy Conferance , Malaysia, 2006.
- [48] G. YUAN, “ Vector Control and Synchronization of Doubly Fed Induction Wind Generator System”, IEEE, China, 2005.
- [49] K. E. Okedu, “ Comparative Study Between Two Protection Schemes for Doubly FedInduction Generator Based Wind Generator “, Abu Dhabi, 2010

- [50] X. Zhang, “ Response and Protection of Doubly Fed Induction Generator System Under Grid Fault “, China, 2010
- [51] L. Holdsworth, “ Comparison of Fixed Speed Doubly Fed Induction Wind Turbines During Power System Disturbances”, IEE Proc.- Gener. Trans. Distrib., Vol.150, No. 3 s.343-352, May 2003.
- [52] O. Anaya-Lara, “Power System Stabiliser for a Generic Doubly Fed Induction Generator –based Wind Turbine Controller”, UK, 2005.
- [53] F. M. Hughes, “ A Power System Stabilizer for Doubly Fed Induction Generator -Based Wind Generators”, IEEE Trans. Power Systems, UK, 2006
- [54] L. M. Fernandez , “ Reduced Model of Doubly Fed Induction Generators Wind Farms Using Aggregation of Wind Turbines and Equivalent Wind “, IEEE Melecon, Spain, 2006
- [55] D. Xiang,”Coordinated Control of an HVDC Link and Doubly Fed Induction Generators in a Large Offshore Wind Farm”, IEEE Volume 21 No: 1, 2006
- [56] F. Xiaoxu, “ Modelling and Simulation of the Variable Frequency Excitation Power Supply Served for the Wind Power Doubly Fed Induction Generator “,IEEE, Beijing, 2008
- [57] Y. Zhang, “ Three-Vectors-Based Predictive Direct Power Control of the Doubly Fed Induction Generator for Wind Energy Application”, IEEE, China, 2014.
- [58] N. Patin,” Predictive Control of a Doubly Fed Induction Generator Connected to an Isolated Grid”, IEEE, France, 2006.
- [59] Z. Xin-Fang,” Predictive Functional Control of Doubly Fed Induction Generator For Variable Speed Wind Turbines”, IEEE, China, 2004.

- [60] D. Ramuz, “Modelling and Simulation of a Doubly Fed Induction Generator in standalone Variable Speed Hydro Turbine”, EPE, Germany, 2005.
- [61] Q. Jiageng, “Research on Isolated Diesel-Wind Power System Equipped with Doubly Fed Induction Generator”, China, 2005.
- [62] B. Badrzahed, “Performance Comparison of Fixed-Speed and Doubly-Fed Induction Generator under Torsional Oscillations”, UK, 2005.
- [63] N. David, “Doubly Fed Induction Generator with Grid-Connected Rotor for Wind Energy Conversion System “, IEEE, USA, 2013
- [64] R. Pena, “ Control System for Unbalanced Operation of Stand Alone Doubly Fed Induction Generator”, IEEE, Chile, 2007
- [65] M. S. Camara, M. B. Camara, “ Modelling and Control of the Offshore Wind Energy System Based on 5 MW Doubly Fed Induction Generator Connected to Grid“, IEEE, Le Havre, 2007
- [66] N. Mendis, K. M. Muttaqi, “ Power Generation in Isolated and Regional Communities: Application of a Doubly Fed Induction Generator Based Wind Turbine “, Australia, 2009
- [67] J. Yan, J. Chen “ The Survey of Electrical Control System of Wind Turbine Generators“, China, 2009
- [68] S. Le-peng, W. Debiao, “ Simulation for Strategy of Maximal Wind Energy Capture of Doubly fed Induction Generator ”, China, 2010
- [69] T. Guojun, “ Research on Grid Connection Control For Doubly Fed Win Power System“, China, 2011

- [70] R. A. Mc Mahon, E. Abdi, “ Design and Testing of a 250 kW Medium-Speed Brushless Doubly Fed Induction Generator”, UK, 2012
- [71] Gaillard A. , Karimi S., “ A Fault Tolerant Converter Topology for Wind Energy Conversion System with Doubly Fed Induction Generator“, Nancy, 2007
- [72] H. Bayıroğlu, “ Sayısal Yöntemler Kitabı”, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2006
- [73] Milli Eğitim Bakanlığı, “ Endüstriyel Otomasyon Teknolojileri ”, MEGEP, Ankara, 2009
- [74] İ. Yüksel, “ Otomatik Kontrol Sistem Dinamiđi ve Denetim Sistemleri”, Uludađ Üniversitesi, Bursa, 1997
- [75] N. Özdaş, A. T. Dinibütün, A. Kuzucu, “ Otomatik Kontrol Temelleri”, İTÜ, İstanbul, 1998
- [76] J. B. Ziegler, N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers,"ASME Transactions, v64 (1942), pp. 759-768
- [77] A. Sevinç, “Speed Sensorless Control of Induction Motors. PhD Thesis.”,University of Bristol, Bristol, 2001
- [78] M. K. Sarıoğlu, M. Gökaşan, S. Bođosyan, “ Asenkron Makineler ve Kontrolü”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2003
- [79] Blaschke, F. “ The principle of field orientation as applied to the new transvektor closed-loop control system for rotating field machines.“, Germany, 1972.



- [80] TUREB, “ RES’ler 3,5 milyon evi aydınlattı”, TRT HABER, <http://www.trthaber.com/haber/ekonomi/35-milyon-evi-aydinlatti-142481.html>, (01.09.2014)
- [81] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “ Rüzgârdan 1,3 Milyar Liralık Elektrik“, TRTHABER , <http://www.trthaber.com/haber/ekonomi/ruzgardan-13-milyar-liralik-elektrik-141533.html> (25.08.2014)
- [82] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, “Türkiye Geneli RES Toplam Kurulu Gücü ”, [http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/document/Turkiye\\_Isletmedeki\\_RES\\_Temmuz\(2012\).pdf](http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/document/Turkiye_Isletmedeki_RES_Temmuz(2012).pdf) (21.10.2014)
- [83] Slootweg, J.G.Polinder, H. King, ” Dynamic Modelling of a Wind Turbine With DFIG ”.
- [84] A. Petersson, “Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines”, PhD.,Division of Electric Power Engineering Department of Energy and Environment, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Sweden, 2005.
- [85] Y. UYAROĞLU, “Rüzgar Türbinlerinin Dağıtım Şebekelerine Bağlanması Ve Dinamik Simülasyonu” Sakarya Üniversitesi, Elk-Elekt. Müh. Bölümü
- [86] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü,[http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/ruzgar-ruzgar\\_enerjisi.aspx](http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/ruzgar-ruzgar_enerjisi.aspx)
- [87] Ö. S. MUTLU, E. AKPINAR,“Şebeke Kesintilerinin Asenkron Jeneratörlü Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemi Üzerinde Etkisi” Dokuz Eylül Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
- [88] P. Ledesma, “Minimum Voltage Protections In Variable Speed Wind Farms”, IEEE, Portugal, 2001.

[89] Uluslar arası Enerji Ajansı (IEA) ,” Güneş ve Rüzgârın Elektrik Üretimindeki Payı“, TRTHABER, <http://www.trthaber.com/haber/ekonomi/gunes-ve-ruzgarin-elektrik-uretimindeki-payi-artti-142617.html>(02.09.2014)

## EKLER

### Ek-A Tezde Uygulanan ÇBAJ'ın Matematiksel Modeli

```
function [ xd ] = dfasenkron_turevi( t,x )
%ASENKRON_TUREVI
global a11 a12 a13 a14 a31 a33 a41 bbsigma a51 a5T b11 b13 b33 Bf_J
wg w vsan vran TL i dt Rs Rr Ls Lr M Bf J np pdeport;
% isd=x(1); isq=x(2); ird=x(3); irq=x(4); w=x(5) (rotor hızı elk);
% sigma=1-M^2/(Ls*Lr); Ts=Ls/Rs; Tr=Lr/Rr;
% a11=1/(sigma*Ts);      a12=M^2/(sigma*Lr*Ls)
% a13=M/(sigma*Ls*Tr);  a14=M/(sigma*Ls)
% a31=M/(sigma*Lr*Ts); a41=M/(sigma*Lr);
a33=1/(sigma*Tr);bbsigma=1/sigma;
% b11=1/(sigma*Ls);  b13=M/(sigma*Lr*Ls);  b33=1/(sigma*Lr);
% a51=1.5*np^2*M/J;  a5T=np/J; Bf_J=Bf/J;

xd=[-a11          a12*x(5)+wg          a13          a14*x(5);
    -a12*x(5)-wg  -a11          -a14*x(5)          a13;
    a31          -a41*x(5)          -a33          wg-bbsigma*x(5);
    a41*x(5)          a31          -wg+bbsigma*x(5)          -a33
]*x(1:4) + [ b11  0  -b13  0;
0  b11  0  -b13;

-b13  0  b33  0;

0  -b13  0  b33]*[vsan;vran];
xd=[xd;
    a51*(x(2)*x(3)-x(1)*x(4))-Bf_J*x(5)-a5T*TL(i)];
% if t>5,[xd(5) a51*(x(2)*x(3)-x(1)*x(4))-Bf_J*x(5) -a5T*TL(i)],end
```

## Ek-B Tezde Uygulanan Yöntemin Sabit Hız Durumundaki Kodları

```
clear all, close all, baslangic='enbas'; % t0'dan başlar.
% baslangic='devam'; % i 'nin kaldığı yerden başlar.
global a11 a12 a13 a14 a31 a33 a41 bbsigma a51 a5T b11 b13 b33 Bf_J
wg w vsan vran TL i dt Rs Rr Ls Lr M Bf J np pdeport;

% Simülasyon parametreleri
%load t0x04s
t0=0; x0=[0;0;0;0;0]; % [isal;isbt;iral;irbt;wr] vektörünün
başlangıç şartları
ts_dt=[5 20; % Üst satır zaman sınırları, alt satır dt değerleri.
1e-4 1e-4 ];% Zaman aralıklarına göre dt değişebilir.
% Devam edilecekse silinmemeli, ama yana eklenebilir.
nciz=20000; % Kaç noktada bir çizdirileceği

% Motor parametreleri
Rs=1.28333; Rr=0.9233; Ls=0.1418333; Lr=0.1430333; M=0.1373333;np=2;
Bf=0.005; J=0.1; kT1=90; kT2=0.25;
% Rs=8; Rr=0.717; Ls=0.363; Lr=0.0338; M=0.9*sqrt(Ls*Lr); np=2;
J=0.02; Bf=0.001;

% Kontrol parametreleri
ws=100*pi; Vsgenlik=220; fazvs=0;
Kp_T=1000; Ki_T=3e4;
Kp_fi=100; Ki_fi=1e3; vr_max=inf;
Kp_w=50; Ki_w=500; T_max=90;
wg=ws; yon=1; dwref=1e-4;
```

```

% Hesaplanmış parametreler

sigma=1-M^2/(Ls*Lr); Ts=Ls/Rs; Tr=Lr/Rr;

a11=1/(sigma*Ts);      a12=M^2/(sigma*Lr*Ls);
a13=M/(sigma*Ls*Tr);  a14=M/(sigma*Ls);
a31=M/(sigma*Lr*Ts);  a41=M/(sigma*Lr); a33=1/(sigma*Tr);
bbsigma=1/sigma;

b11=1/(sigma*Ls);    b13=M/(sigma*Lr*Ls);    b33=1/(sigma*Lr);
a51=1.5*np^2*M/J;    a5T=np/J; Bf_J=Bf/J; afi= M/Lr; asigma= sigma*Lr;
c0=1.5*np*M; c1=1.5*np*M/(sigma*Lr*Ls); c2=1/c1;

% Boyutlandırma

nts=size(ts_dt,2);
t=[t0]; nt=length(t);

for in=1:nts,
t=[t t(nt)+ts_dt(2,in):ts_dt(2,in):ts_dt(1,in)];
    nt=length(t);
end

if [(baslangic=='devam') (i>1)],
    nonceki=length(vsd);
if nt > nonceki,
    nek=nt-nonceki;
    vsal=[vsal zeros(1,nek)]; vsbt=[vsbt zeros(1,nek)];
    vral=[vral zeros(1,nek)]; vrbt=[vrbt zeros(1,nek)];
    vsd=[vsd zeros(1,nek)]; vsq=[vsq zeros(1,nek)];
    vrd=[vrd zeros(1,nek)]; vrq=[vrq zeros(1,nek)];
    isd=[isd zeros(1,nek)]; isq=[isq zeros(1,nek)];
    ird=[ird zeros(1,nek)]; irq=[irq zeros(1,nek)];
    fisd=[fisd zeros(1,nek)]; fisq=[fisq zeros(1,nek)];
    fis2=[fis2 zeros(1,nek)]; Te=[Te zeros(1,nek)];
%     fird=[fird zeros(1,nek)]; firq=[firq zeros(1,nek)];

```

```

th=[th zeros(1,nek)]; thvs=[thvs zeros(1,nek)]; thg=[thg
zeros(1,nek)];
w=[w zeros(1,nek)]; TL=[TL zeros(1,nek)]; x=[x, zeros(5,nek)];
pv=[pv zeros(1,nek)]; pR=[pR zeros(1,nek)]; pf=[pf
zeros(1,nek)];
pT=[pT zeros(1,nek)]; Edepo=[Edepo zeros(1,nek)]; q=[q
zeros(1,nek)];
kT1c=[kT1c zeros(1,nek)]; kT2c=[kT2c zeros(1,nek)];
T_integ=T_integ_eski; fi_integ=fi_integ_eski;
w_integ=w_integ_eski;
end
else
vsal=t;vsbt=t; vral=t;vrbt=t; th=t;thg=t; vsd=t;vsq=t;
vrd=t; vrq=t; TL=t; w=t; % şimdilik t ile aynı olsunlar (satır)
vsan=[0;0]; vran=[0;0];
isd=t; isq=t; ird=t; irq=t;
fisd=t; fisd=t; fis2=t; Te=t;
% fird=t; firq=t;
x=[t;t;t;t;t]; thvs=t; % şimdilik t ile aynı olsun (i. sütunu
t(i) anının [isd;isq;ird;irq;w] vektörü)
pv=t; pR=t; pf=t; pT=t; Edepo=t; q=t;
kT1c=t; kT2c=t; param=[1;1;1]; parmat=eye(3);
% Başlangıç değerleri
x(:,1)=x0; thvs(1)=fazvs; i=1;
[vsal(1),vsbt(1)]=pol2cart(thvs(1),Vsgenlik);
wg=ws; th(1)=0; wgs=0; wref=1.2*ws;
cs=cos(th(1)); sn=sin(th(1));
vsd(1)=vsal(1)*cs+vsbt(1)*sn;
vsq(1)=-vsal(1)*sn+vsbt(1)*cs;

```

```

isd(1)=x(1,1)*cs+x(2,1)*sn;
isq(1)=-x(1,1)*sn+x(2,1)*cs;
ird(1)=x(3,1)*cs+x(4,1)*sn;
irq(1)=-x(3,1)*sn+x(4,1)*cs;
fisd(1)=Ls*isd(1)+M*ird(1); fisq(1)=Ls*isq(1)+M*irq(1);
kT1c(1)=param(2)/(200*(t(2)-t(1)))-Te(1);
kT2c(1)=(1-param(1))*J/(np*(t(2)-t(1)))-Bf/np;

T_integ=0; fi_integ=0; w_integ=0; peski=1e10;
end
[thvr,vr]=cart2pol(vrd(i),vrq(i));
figure(1),hold off,set(1,'Name','Stator ve rotor akımları isdq ve
irdq'); b=1:i;
subplot(2,1,1),plot(t(b),[isd(b);isq(b)]), xlim([t(1) t(nt)]), zoom
on, hold on,
subplot(2,1,2),plot(t(b),[ird(b);irq(b)]), xlim([t(1) t(nt)]), zoom
on, hold on,
set(1,'Position',[10 280 560 420])
figure(2),hold off,plot(t(b),x(5,b)), xlim([t(1) t(nt)]), zoom on,
hold on,
set(2,'Name','Elektriksel açısal hız'), zoom on
xlabel('t (saniye)'); ylabel('hız (rad/s)')
set(2,'Position',[693 280 560 420])
figure(3), zoom on, set(3,'Name','Reaktif güç(verilen), mekanik güç
ve elektriksel terminal gücü'),
set(3,'Position',[700 10 560 420]),
hold off,plot(t(b),q(b),t(b),Te(b).*w(b)/np,t(b),pv(b)), xlim([t(1)
t(nt)]), zoom on, hold on,pause(0.2),
ionceki=i; disp('Döngü başladı')

```

```

for i=ionceki:nt-1
% Runga Kutta
    [vsan(1), vsan(2)] = pol2cart(thvs(i) - thg(i), Vsgenlik);
    [vran(1), vran(2)] = pol2cart(thvr + th(i), vr);
    dt = t(i+1) - t(i);
    k1 = dfasenkron_turevi(t(i), x(:, i)) * dt;
    k2 = dfasenkron_turevi(t(i) + dt/2, x(:, i) + k1/2) * dt;
    k3 = dfasenkron_turevi(t(i) + dt/2, x(:, i) + k2/2) * dt;
    k4 = dfasenkron_turevi(t(i) + dt, x(:, i) + k3) * dt;
    x(:, i+1) = x(:, i) + (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4) / 6;

% Ölçümler
w(i+1) = x(5, i+1); isd(i+1) = x(1, i+1); isq(i+1) = x(2, i+1);
    ird(i+1) = x(3, i+1); irq(i+1) = x(4, i+1);
    fisd(i+1) = Ls * isd(i+1) + M * ird(i+1);
    fisq(i+1) = Ls * isq(i+1) + M * irq(i+1);
    fis2(i+1) = fisd(i+1)^2 + fisq(i+1)^2;
if fis2(i+1) < 0.01, fis2(i+1) = 0.01; end % Akı paydaya geldiği için
    Te(i+1) = c0 * (isq(i+1) * ird(i+1) - isd(i+1) * irq(i+1));

    thg(i+1) = thg(i) + wg * dt;
if thg(i+1) > pi, thg(i+1) = thg(i+1) - 2*pi; end
if thg(i+1) < -pi, thg(i+1) = thg(i+1) + 2*pi; end

    thvs(i+1) = thvs(i) + ws * dt;
if thvs(i+1) > pi, thvs(i+1) = thvs(i+1) - 2*pi; end
if thvs(i+1) < -pi, thvs(i+1) = thvs(i+1) + 2*pi; end

```



```

% Denge var mı?

pv(i+1)=1.5*(vsd(i)*isd(i+1)+vsq(i)*isq(i+1)+vrd(i)*ird(i+1)+vrq(i)*
irq(i+1));

pR(i+1)=1.5*Rs*(isd(i)*isd(i+1)+isq(i)*isq(i+1))+1.5*Rr*(ird(i)*ird(
i+1)+irq(i)*irq(i+1));

    pf(i+1)=Bf*(w(i)*w(i+1)/np^2);
    pT(i+1)=-TL(i)*(w(i+1)/np);

    Edepo(i+1)=1.5*Ls*isd(i+1)*(isd(i+1)-
isd(i))+1.5*Ls*isq(i+1)*(isq(i+1)-isq(i));

    Edepo(i+1)=Edepo(i+1)+1.5*Lr*ird(i+1)*(ird(i+1)-
ird(i))+1.5*Lr*irq(i+1)*(irq(i+1)-irq(i));

    Edepo(i+1)=Edepo(i+1)+1.5*M*isd(i+1)*(ird(i+1)-
ird(i))+1.5*M*isq(i+1)*(irq(i+1)-irq(i));

    Edepo(i+1)=Edepo(i+1)+1.5*M*ird(i+1)*(isd(i+1)-
isd(i))+1.5*M*irq(i+1)*(isq(i+1)-isq(i));

    Edepo(i+1)=Edepo(i+1)+J/np^2*w(i+1)*(w(i+1)-w(i));

    pdepo=(Edepo(i+1)-Edepo(i))/(t(i+1)-t(i));

    pdenge=pv(i+1)+pT(i+1)-pR(i+1)-pf(i+1)-pdepo;

q(i+1)=1.5*(vsd(i)*isq(i+1)-vsq(i)*isd(i+1)+vrd(i)*irq(i+1)-
vrq(i)*ird(i+1));

% Rüzgâr tahmini

    degisken=[w(i) Te(i) 1]';

    carpim=paramat*degisken;

payda=(0.99+degisken'*carpim);

param=param+carpim*(w(i+1)-degisken'*param)/payda;

    paramat=(paramat-carpim*carpim'/payda);

    kT1c(i+1)=param(3)/param(2);

```

```

    kT2c(i+1)=(1-param(1))*J/dt-Bf;

% KONTROL

    TL(i+1)=-kT1+kT2*w(i+1)/np;

% Hız kontrolü

    wref=np*kT1c(i)/2/(Bf+kT2c(i));
    if wref<314, wref=314; end
    if wref>400, wref=400; end
    hata=(wref-w(i));
    oransal_w=Kp_w*hata;
    w_integ=w_integ+Ki_w*hata*dt;
    Tref=oransal_w+w_integ;
    if Tref > T_max, Tref=T_max;
    elseif Tref < -T_max, Tref=-T_max;
    end
    w_integ=Tref-oransal_w;

% Tork kontrolü (uT ile)

    hata=Tref-Te(i);
    oransal_T=Kp_T*hata;
    T_integ=T_integ+Ki_T*hata*dt;
    uT=oransal_T+T_integ;

% Akı (fis2) kontrolü (ufi ile)

    fis2ref=0.6;
    hata=fis2ref-fis2(i);
    oransal_fi=Kp_fi*hata;
    fi_integ=fi_integ+Ki_fi*hata*dt;

```

```

    ufi=oransal_fi+fi_integ;

    th(i+1)=th(i)+wgs*dt;
    if th(i+1) > pi, th(i+1)=th(i+1)-2*pi; end
    if th(i+1)<-pi, th(i+1)=th(i+1)+2*pi; end
    [vsd(i+1),vsq(i+1)]=pol2cart(thvs(i+1)-th(i+1)-
    thg(i+1),Vsgenlik);

% Şimdi vrd, vrq belirlenecek
    vrd(i+1)=(c2*fisq(i+1)*uT+0.5*fisd(i+1)*ufi)/fis2(i+1);
    vrq(i+1)=(-c2*fisd(i+1)*uT+0.5*fisq(i+1)*ufi)/fis2(i+1);
% vr sınırlama
    [thvr,vr]=cart2pol(vrd(i+1),vrq(i+1));
    if vr > vr_max,
        vr=vr_max;
        [vrd(i+1),vrq(i+1)]=pol2cart(thvr,vr);
    end
% uT ile ufi güncellensin ki integraller de güncellensin (wind up
effect)
    uT=c1*(fisq(i+1)*vrd(i+1)-fisd(i+1)*vrq(i+1));
    ufi=2*(fisd(i+1)*vrd(i+1)+fisq(i+1)*vrq(i+1));
    T_integ=uT-oransal_T; % integraller de güncelleniyor
    fi_integ=ufi-oransal_fi;

    [vral(i+1),vrbt(i+1)]=pol2cart(thvr+th(i+1)+thg(i+1),vr);
    [vsal(i+1),vsbt(i+1)]=pol2cart(thvs(i+1),Vsgenlik);

    if isnan(uT), disp('NaN var Ctrl+C ile programı durudurun'),
    disp(i), pause, end

```

```

    T_integ_eski=T_integ; fi_integ_eski=fi_integ;
w_integ_eski=w_integ;

if floor(i/nciz)*nciz==i,
    bc=floor(i/nciz)*nciz-nciz+1:i+1;
    figure(1),subplot(2,1,1),plot(t(bc),[isd(bc);isq(bc)]),
    figure(1),subplot(2,1,2),plot(t(bc),[ird(bc);irq(bc)]),
    figure(2),plot(t(bc),x(5,bc)),
b=bc(2):i+1;
% figure(3),plot(t(b),pdenge),set(3,'Name','Aktif güç, verilen')

figure(3),plot(t(bc),q(bc),t(bc),Te(bc).*w(bc)/np,t(bc),pv(bc)),
% figure(5),plot(t(b),pdenge)
    pause(0.1)
    pyeni=mean(pv(bc));
if pyeni > peski, yon=-yon; end
%     wref=wref+yon*dwref; [wref pyeni]
    peski=pyeni;[wref pyeni]
end
end
disp('Döngü bitti')
% b=2:nt;
% figure(3),plot(t(b),pdenge),set(3,'Name','Aktif güç, verilen')
% figure(3),plot(t,q,t,pv-pR-pf+pT),set(3,'Name','Reaktif
güç(verilen) ve pdenge')
% set(3,'Position',[700 27 560 420])
% figure(5),plot(t(b),pdenge)

```

## Ek-C Tezde Uygulanan Yöntemin Sabit Rüzgâr Rejimi Durumundaki Kodları

```
clear all, close all, baslangic='enbas'; % t0'dan başlar.
% baslangic='devam'; % i 'nin kaldığı yerden başlar.
global a11 a12 a13 a14 a31 a33 a41 bbsigma a51 a5T b11 b13 b33 Bf_J
wg w vsan vran TL i dt Rs Rr Ls Lr M Bf J np pdeport;

% Simülasyon parametreleri

t0=0; x0=[0;0;0;0;0]; % [isal;isbt;iral;irbt;wr] vektörünün
başlangıç şartları
ts_dt=[5 100 ; % Üst satır zaman sınırları, alt satır dt
değerleri.
1e-4 1e-4
];% Zaman aralıklarına göre dt değişebilir.
% Devam edilecekse silinmemeli, ama yana eklenebilir.
nciz=5000; % Kaç noktada bir çizdirileceği

% Motor parametreleri
Rs=1.28333; Rr=0.9233; Ls=0.1418333; Lr=0.1430333; M=0.1373333;
np=2;
nd=10; Bf=0.00*nd; J=0.1*nd; kT1=90; kT2=0.25;
% Rs=8; Rr=0.717; Ls=0.363; Lr=0.0338; M=0.9*sqrt(Ls*Lr); np=2;
J=0.02; Bf=0.001;

% Kontrol parametreleri
ws=100*pi; Vs genlik=220; fazvs=0;
Kp_T=1000; Ki_T=3e4;
Kp_fi=100; Ki_fi=1e3; vr_max=inf;
Kp_w=50; Ki_w=500; T_max=90;
wg=ws; yon=1; dwref=1e-4;
```

```

% Hesaplanmış parametreler

sigma=1-M^2/(Ls*Lr); Ts=Ls/Rs; Tr=Lr/Rr;

a11=1/(sigma*Ts);      a12=M^2/(sigma*Lr*Ls);
a13=M/(sigma*Ls*Tr);  a14=M/(sigma*Ls);
a31=M/(sigma*Lr*Ts);  a41=M/(sigma*Lr);  a33=1/(sigma*Tr);
bbsigma=1/sigma;

b11=1/(sigma*Ls);    b13=M/(sigma*Lr*Ls);    b33=1/(sigma*Lr);
a51=1.5*np^2*M/J;    a5T=np/J; Bf_J=Bf/J;  afi= M/Lr;  asigma= sigma*Lr;
c0=1.5*np*M;  c1=1.5*np*M/(sigma*Lr*Ls);  c2=1/c1;

% Boyutlandırma

nts=size(ts_dt,2);
t=[t0]; nt=length(t);

for in=1:nts,
t=[t t(nt)+ts_dt(2,in):ts_dt(2,in):ts_dt(1,in)];
    nt=length(t);
end

if [(baslangic=='devam') (i>1)],
    nonceki=length(vsd);
if nt > nonceki,
    nek=nt-nonceki;
    vsal=[vsal zeros(1,nek)]; vsbt=[vsbt zeros(1,nek)];
    vral=[vral zeros(1,nek)]; vrbt=[vrbt zeros(1,nek)];
    vsd=[vsd zeros(1,nek)]; vsq=[vsq zeros(1,nek)];
    vrd=[vrd zeros(1,nek)]; vrq=[vrq zeros(1,nek)];
    isd=[isd zeros(1,nek)]; isq=[isq zeros(1,nek)];
    ird=[ird zeros(1,nek)]; irq=[irq zeros(1,nek)];
    fisd=[fisd zeros(1,nek)]; fisq=[fisq zeros(1,nek)];
    fis2=[fis2 zeros(1,nek)]; Te=[Te zeros(1,nek)];
%     fird=[fird zeros(1,nek)]; firq=[firq zeros(1,nek)];

```

```

        th=[th zeros(1,nek)]; thvs=[thvs zeros(1,nek)]; thg=[thg
zeros(1,nek)];
w=[w zeros(1,nek)]; TL=[TL zeros(1,nek)]; x=[x, zeros(5,nek)];
        pv=[pv zeros(1,nek)]; pR=[pR zeros(1,nek)]; pf=[pf
zeros(1,nek)];
        pT=[pT zeros(1,nek)]; Edepo=[Edepo zeros(1,nek)]; q=[q
zeros(1,nek)];
        kT1c=[kT1c zeros(1,nek)]; kT2c=[kT2c zeros(1,nek)];
        T_integ=T_integ_eski; fi_integ=fi_integ_eski;
w_integ=w_integ_eski;
end
else
        vsal=t;vsbt=t; vral=t;vrbt=t; th=t;thg=t; vsd=t;vsq=t;
        vrd=t; vrq=t; TL=t; w=t;
        vsan=[0;0]; vran=[0;0];
        isd=t; isq=t; ird=t; irq=t;
        fisq=t; fisd=t; fis2=t; Te=t;
% fird=t; firq=t;
x=[t;t;t;t;t]; thvs=t;
        pv=t; pR=t; pf=t; pT=t; Edepo=t; q=t;
        kT1c=t; kT2c=t; param=[1;1;1]; parmat=eye(3);
% Başlangıç değerleri
        x(:,1)=x0; thvs(1)=fazvs; i=1;
        [vsal(1),vsbt(1)]=pol2cart(thvs(1),Vsgenlik);
        wg=ws; th(1)=0; wgs=0; wref=1.2*ws;
        cs=cos(th(1)); sn=sin(th(1));
        vsd(1)=vsal(1)*cs+vsbt(1)*sn;
        vsq(1)=-vsal(1)*sn+vsbt(1)*cs;
        isd(1)=x(1,1)*cs+x(2,1)*sn;

```

```

    isq(1)=-x(1,1)*sn+x(2,1)*cs;
    ird(1)=x(3,1)*cs+x(4,1)*sn;
    irq(1)=-x(3,1)*sn+x(4,1)*cs;
    fisd(1)=Ls*isd(1)+M*ird(1); fisd(1)=Ls*isq(1)+M*irq(1);
    kT1c(1)=param(2)/(200*(t(2)-t(1)))-Te(1);
    kT2c(1)=(1-param(1))*J/(np*(t(2)-t(1)))-Bf/np;
    rk=1;
    T_integ=0; fi_integ=0; w_integ=0; peski=1e10;
end
[thvr,vr]=cart2pol(vrd(i),vrq(i));
figure(1),hold off,set(1,'Name','Stator ve rotor akımları isdq ve
irdq'); b=1:i;
subplot(2,1,1),plot(t(b),[isd(b);isq(b)]), xlim([t(1) t(nt)]), zoom
on, hold on,
subplot(2,1,2),plot(t(b),[ird(b);irq(b)]), xlim([t(1) t(nt)]), zoom
on, hold on,
set(1,'Position',[20 510 560 420])
figure(2),hold off,plot(t(b),x(5,b)), xlim([t(1) t(nt)]), zoom on,
hold on,
set(2,'Name','Elektriksel açısal hız'), zoom on
xlabel('t (saniye)'); ylabel('hız (rad/s)')
set(2,'Position',[700 510 560 420])
figure(3), zoom on, set(3,'Name','Reaktif güç(verilen), mekanik güç
ve elektriksel terminal gücü'),
set(3,'Position',[360 20 560 420]),
hold off,plot(t(b),q(b),t(b),Te(b).*w(b)/np,t(b),pv(b)), xlim([t(1)
t(nt)]), zoom on, hold on,pause(0.2),hold off
ionceki=i; disp('Döngü başladı')

for i=ionceki:nt-1

```



```

% Runga Kutta

[vsan(1), vsan(2)] = pol2cart(thvs(i) - thg(i), Vsgenlik);
[vran(1), vran(2)] = pol2cart(thvr + th(i), vr);

dt = t(i+1) - t(i);
k1 = dfasenkron_turevi(t(i), x(:, i)) * dt;
k2 = dfasenkron_turevi(t(i) + dt/2, x(:, i) + k1/2) * dt;
k3 = dfasenkron_turevi(t(i) + dt/2, x(:, i) + k2/2) * dt;
k4 = dfasenkron_turevi(t(i) + dt, x(:, i) + k3) * dt;
x(:, i+1) = x(:, i) + (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4) / 6;

% Ölçümler
w(i+1) = x(5, i+1); isd(i+1) = x(1, i+1); isq(i+1) = x(2, i+1);
ird(i+1) = x(3, i+1); irq(i+1) = x(4, i+1);
fisd(i+1) = Ls * isd(i+1) + M * ird(i+1);
fisq(i+1) = Ls * isq(i+1) + M * irq(i+1);
fis2(i+1) = fisd(i+1)^2 + fisq(i+1)^2;
if fis2(i+1) < 0.01, fis2(i+1) = 0.01; end % Akı paydaya geldiği için
Te(i+1) = c0 * (isq(i+1) * ird(i+1) - isd(i+1) * irq(i+1));

thg(i+1) = thg(i) + wg * dt;
if thg(i+1) > pi, thg(i+1) = thg(i+1) - 2 * pi; end
if thg(i+1) < -pi, thg(i+1) = thg(i+1) + 2 * pi; end

thvs(i+1) = thvs(i) + ws * dt;
if thvs(i+1) > pi, thvs(i+1) = thvs(i+1) - 2 * pi; end
if thvs(i+1) < -pi, thvs(i+1) = thvs(i+1) + 2 * pi; end

% Denge var mı?

```

```

pv(i+1)=1.5*(vsd(i)*isd(i+1)+vsq(i)*isq(i+1)+vrd(i)*ird(i+1)+vrq(i)*
irq(i+1));
pR(i+1)=1.5*Rs*(isd(i)*isd(i+1)+isq(i)*isq(i+1))+1.5*Rr*(ird(i)*ird(
i+1)+irq(i)*irq(i+1));
    pf(i+1)=Bf*(w(i)*w(i+1)/np^2);
    pT(i+1)=-TL(i)*(w(i+1)/np);
    Edepo(i+1)=1.5*Ls*isd(i+1)*(isd(i+1)-
isd(i))+1.5*Ls*isq(i+1)*(isq(i+1)-isq(i));
    Edepo(i+1)=Edepo(i+1)+1.5*Lr*ird(i+1)*(ird(i+1)-
ird(i))+1.5*Lr*irq(i+1)*(irq(i+1)-irq(i));
    Edepo(i+1)=Edepo(i+1)+1.5*M*isd(i+1)*(ird(i+1)-
ird(i))+1.5*M*isq(i+1)*(irq(i+1)-irq(i));
    Edepo(i+1)=Edepo(i+1)+1.5*M*ird(i+1)*(isd(i+1)-
isd(i))+1.5*M*irq(i+1)*(isq(i+1)-isq(i));
    Edepo(i+1)=Edepo(i+1)+J/np^2*w(i+1)*(w(i+1)-w(i));
    pdepo=(Edepo(i+1)-Edepo(i))/(t(i+1)-t(i));
    pdenge=pv(i+1)+pT(i+1)-pR(i+1)-pf(i+1)-pdepo;
q(i+1)=1.5*(vsd(i)*isq(i+1)-vsq(i)*isd(i+1)+vrd(i)*irq(i+1)-
vrq(i)*ird(i+1));

```

```

% Rüzgâr tahmini

```

```

    degisken=[w(i) Te(i) 1]';
    carpim=paramat*degisken;
payda=(0.5+degisken'*carpim);
param=param+carpim*(w(i+1)-degisken'*param)/payda;
    paramat=(paramat-carpim*carpim'/payda);
    kT1c(i+1)=param(3)/param(2);
    kT2c(i+1)=(1-param(1))*J/dt-Bf;

```

```

% KONTROL

if floor(i/50000)*50000 == i, rk=1-rk; end

    TL(i+1)=(-kT1+kT2*w(i+1)/np)*rk;

% Hız kontrolü

    wref=np*kT1/2/(Bf+kT2);

if wref<314, wref=314; end

if wref>400, wref=400; end

hata=(wref-w(i));%*sign(ird(i));

oransal_w=Kp_w*hata;

w_integ=w_integ+Ki_w*hata*dt;

    Tref=oransal_w+w_integ;

if Tref > T_max, Tref=T_max;

elseif Tref < -T_max, Tref=-T_max;

end

w_integ=Tref-oransal_w;

if rk==0 & Te(i)>0, Tref=0; end

hata=Tref-Te(i);

oransal_T=Kp_T*hata;

    T_integ=T_integ+Ki_T*hata*dt;

uT=oransal_T+T_integ;

% Ak1 (fis2) kontrolü (ufi ile)

    fis2ref=0.6;

hata=fis2ref-fis2(i);

oransal_fi=Kp_fi*hata;

fi_integ=fi_integ+Ki_fi*hata*dt;

    ufi=oransal_fi+fi_integ;

    th(i+1)=th(i)+wgs*dt;

```

```

if th(i+1) > pi, th(i+1)=th(i+1)-2*pi; end
if th(i+1)<-pi, th(i+1)=th(i+1)+2*pi; end
    [vsd(i+1),vsq(i+1)]=pol2cart(thvs(i+1)-th(i+1)-
thg(i+1),Vsgenlik);

% Şimdi vrd, vrq belirlenecek
    vrd(i+1)=(c2*fisq(i+1)*uT+0.5*fisd(i+1)*ufi)/fis2(i+1)*rk;
    vrq(i+1)=(-c2*fisd(i+1)*uT+0.5*fisq(i+1)*ufi)/fis2(i+1)*rk;
% vr sınırlama
    [thvr,vr]=cart2pol(vrd(i+1),vrq(i+1));
if vr > vr_max,
    vr=vr_max;
    [vrd(i+1),vrq(i+1)]=pol2cart(thvr,vr);
end
% uT ile ufi güncellensin ki integraller de güncellensin (wind up
effect)
uT=c1*(fisq(i+1)*vrd(i+1)-fisd(i+1)*vrq(i+1));
    ufi=2*(fisd(i+1)*vrd(i+1)+fisq(i+1)*vrq(i+1));
    T_integ=uT-oransal_T; % integraller de güncelleniyor
fi_integ=ufi-oransal_fi;

    [vral(i+1),vrbt(i+1)]=pol2cart(thvr+th(i+1)+thg(i+1),vr);
    [vsal(i+1),vsbt(i+1)]=pol2cart(thvs(i+1),Vsgenlik);

if isnan(uT), disp('NaN var Ctrl+C ile programı durudurun'),
disp(i), pause, end

    T_integ_eski=T_integ; fi_integ_eski=fi_integ;
w_integ_eski=w_integ;

```

```

if floor(i/nciz)*nciz==i,
    bc=floor(i/nciz)*nciz-nciz+1:i+1;
    figure(1),subplot(2,1,1),plot(t(bc),[isd(bc);isq(bc)]),
    figure(1),subplot(2,1,2),plot(t(bc),[ird(bc);irq(bc)]),
    figure(2),plot(t(bc),x(5,bc)),
b=bc(2):i+1;
% figure(3),plot(t(b),pdenge),set(3,'Name','Aktif güç, verilen')

figure(3),plot(t(bc),q(bc),t(bc),Te(bc).*w(bc)/np,t(bc),pv(bc)),
%
figure(4),plot(t(bc),[kT1c(bc);0*t(bc)+kT1+5*sin(pi*t(i+1)/2)])
% figure(5),plot(t(b),pdenge)

    pause(0.1)

    pyeni=mean(pv(bc));
if pyeni > peski, yon=-yon; end
%     wref=wref+yon*dwref; [wref pyeni]
    peski=pyeni;[wref pyeni]

end

end

disp('Döngü bitti')

% b=2:nt;

% figure(3),plot(t(b),pdenge),set(3,'Name','Aktif güç, verilen')
% figure(3),plot(t,q,t,pv-pR-pf+pT),set(3,'Name','Reaktif
güç(verilen) ve pdenge')
% set(3,'Position',[700 27 560 420])
% figure(5),plot(t(b),pdenge)

```