

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE  
ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN TASARIMI,  
MODELLENMESİ VE KONTROLÜ**

**EMİNE AMAL**

**KOCAELİ 2023**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE ÇİFT  
BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN TASARIMI,  
MODELLENMESİ VE KONTROLÜ**

**EMİNE AMAL**

**Dr. Öğr. Üyesi. Kadir YILMAZ**  
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

**Prof. Dr. Ercüment KARAKAŞ**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

**Prof. Dr. Murat KARABACAK**  
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.

.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 22.06.2023**

## ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

Beyan ederim.

Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddî/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ..... Tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddî/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Emine AMAL

## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır. Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

EMİNE AMAL

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çift beslemeli asenkron generatörler değişken hızlı sabit frekanslı sistemlerde kullanılabilmelerinden dolayı büyük güçlü modern rüzgâr türbinlerinde kullanımı yaygındır. Çift beslemeli asenkron generatörü tasarımı ve kontrolünün incelenmesi konulu bu tez çalışmasında başlangıç olarak asenkron makinelerin nasıl tasarlandığını ve rotoru sargılı asenkron generatörün matematiksel denklemlerle tasarımı gerçekleştirildi. Bu bilgilerin ardında asenkron makinenin dinamik modeli verilmiş, momentin, DC bara geriliminin ve şebeke ile aktif-reaktif güç alışverişinin kontrolü için ÇBAG'e vektör kontrol şeması uygulanmıştır. Şebekeye bağlı ÇBAG, rotor tarafı dönüştürücü ve şebeke tarafı dönüştürücü kontrolü için kontrolör blokları ile simüle edilmiştir. Tezde ayrıca güç kalitesini koruyarak çıkış gerilimini artırmak için referans sinyale üçüncü harmoniklerin enjeksiyonu yapılmıştır.

Tezime başlamadan bu konuda dersleri almamı teşvik eden, hazırlanması esnasında kıymetli zamanını, yardımını, bilgisini ve anlayışını esirgemeyen değerli hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Kadir Yılmaz'a teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, öğrenim hayatıma başladığımdan bu yana öğrenme ve araştırma hususunda beni sürekli destekleyen, çalışma süresince anlayışı, özellikle çocuklarla ilgilenerek sağladığı çalışma ortamı ve desteği için sevgili eşim Ufuk Amal'a yürekten teşekkür ederim.

Haziran – 2023

Emine AMAL

## İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI .....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	ix
ÖZET .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Bakış.....	1
1.2. Literatür Özeti.....	3
1.2.1. Mikro Makineler.....	4
1.2.2. Boyutlandırma Teknikleri .....	4
1.2.3. ÇBAG'ün Kontrol Stratejileri .....	5
1.2.4. Amaç ve Katkı.....	7
1.3. Araştırma Soruları.....	8
1.4. Tezin Ana Hatları.....	8
2.ASENKRON MAKİNE TASARIMIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	10
2.1. Giriş .....	10
2.2. Asenkron Makinelerin Mevcut Kullanımı .....	11
2.3. Bir Elektrik Makinesinin Tasarımı İçin Temel Bilgiler.....	14
2.4. Malzeme Seçimi .....	14
2.4.1. Laminasyonlar ve Manyetik Malzeme .....	15
2.4.2. Elektrik İletkenleri.....	16
2.5. Elektrik Makinesi Tasarım Adımları .....	16
2.6. Asenkron Makine Tasarım Süreci .....	17
2.6.1. Asenkron Makinesi Temel Boyutlarının Belirlenmesi.....	18
2.6.2. Standart Çerçeveler .....	20
2.6.3. Asenkron Makinelerin Stator Yapısı .....	21
2.6.4. Asenkron Makinelerin Rotor Yapısı .....	22
2.6.5. Hava Aralığı .....	23
2.6.6. Kayıplar ve Verimlilik.....	23
2.7. Sonuç .....	24
3. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN TASARIMI .....	25
3.1. Giriş .....	25
3.2. Stator Tasarımı.....	25
3.3. Rotor Tasarımı .....	30
3.4. Mıknatıslanma Akımı .....	33
3.5. Reaktanslar ve Dirençler.....	37
3.6. Elektrik Kayıpları ve Verimliliği.....	40
3.7. ÇBAG'ün Simülasyon Analizi .....	41
3.7.1. RMXprt'de Statorun Modellemesi.....	43
3.7.2. RMXprt'de Rotorun Modellemesi .....	44
3.7.3. Maxwell 2D Simülasyon Sonuçları.....	45
3.8. Sonuç .....	50

4. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN DİNAMİK MODELİ .....	52
4.1. Giriş .....	52
4.2. Çift Beslemeli Asenkron Generatörün Modellenmesi .....	53
4.2.1. Elektrikli Asenkron Generatörünün Modellenmesi .....	54
4.2.2. Uzay Vektör Gösterimi .....	55
4.2.3. ÇBAG'ün $\alpha\beta$ Modellemesi.....	57
4.2.4. ÇBAG'ün $dq$ Modellemesi.....	59
4.3. Sonuç .....	61
5. ÇBAG TABANLI RÜZGÂR TÜRBİNİN KONTROL TASARIMI .....	62
5.1. Giriş .....	62
5.2. ÇBAG'ün Aerodinamiği .....	62
5.3. Betz Limiti .....	65
5.4. Maksimum Güç Noktası Takibi.....	65
5.5. ÇBAG Rüzgâr Türbini için Kontrol Sisteminin Tasarımı .....	66
5.5.1. Rotor Tarafı Dönüştürücü (RTD) Kontrolör .....	66
5.5.2. Rotor Tarafı Dönüştürücünün Denetleyici Ayarı .....	68
5.5.3. Şebeke Tarafı Dönüştürücü (ŞTD) Kontrolör .....	69
5.5.4. Şebeke Tarafı Dönüştürücünün Denetleyici Ayarı .....	71
5.6. Sıfır Sıralı Gerilim Enjeksiyonlu Sinüzoidal PWM .....	72
5.7. Açık Tahmini .....	73
5.8. Sonuç .....	74
6. ÇBAG TABANLI RÜZGÂR TÜRBİNİNİN KONTROL SİMULASYONU .....	75
6.1. Giriş .....	75
6.2. Model Açıklaması.....	75
6.3. Blok Açıklamaları.....	76
6.3.1. Rotor Sargılı Asenkron Generatörü.....	76
6.3.2. Rüzgâr Türbini Aerodinamiği Bloğu .....	77
6.3.3. Denetleyici Bloğu.....	78
6.3.3.1. Rotor Tarafı Dönüştürücüsü Kontrol Sistemi.....	78
6.3.3.2. Şebeke Tarafı Dönüştürücüsü Kontrol Sistemi .....	79
6.4. Sonuç / Simülasyon .....	80
6.4.1. Rüzgâr Türbininin Değişken Hızlarda Çalışması.....	80
6.4.2. Aktif ve Reaktif Güç Kontrol Simülasyonu .....	83
6.4.3. Stator ve Şebeke PWM'lerin Sıcaklık Simülasyonları.....	84
6.4.4. Stator ve Şebekedeki Toplam Güç Kayıp Simülasyonları .....	85
7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	86
7.1. Sonuçlar .....	86
7.2. Öneriler ve Gelecekteki Çalışmalar .....	87
KAYNAKLAR.....	88
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	107
ÖZGEÇMİŞ.....	108

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgâr türbin sistemi blok diyagramı.....	11
Şekil 2.2. 2020 yılında küresel elektrik talebinin tahmini payı.....	12
Şekil 2.3. ASM'lerin en-boy oranı ile kutup çifti değişim eğrisi.....	20
Şekil 2.4. Bobin sargılarını yerleştirmek için oluk geometrisi a) yarı kapalı, b) yarı açık, c) açık .....	21
Şekil 3.1. Ana akı yolu .....	34
Şekil 3.2. Stator bobin uç bağlantısı.....	38
Şekil 3.3. Diferansiyel kaçak Katsayısı.....	39
Şekil 3.4. RMxprt'de tanımlanan M530-50A B-H eğrisi ve manyetik değerleri.....	42
Şekil 3.5. Stator slot geometrisi ve sargı yapısı .....	43
Şekil 3.6. Rotor oluk geometrisi ve sargı yapısı.....	44
Şekil 3.7. ÇBAG'ün statoru ve rotorundaki akı dağılımı .....	45
Şekil 3.8. ÇBAG'nün stator ve rotorundaki akı yoğunlukları.....	46
Şekil 3.9. ÇBAG'ün 3 fazlı stator akımı .....	47
Şekil 3.10. ÇBAG'ün 3 fazlı stator gerilimi.....	47
Şekil 3.11. ÇBAG'ün yük altındaki gerilimi.....	47
Şekil 3.12. ÇBAG'ün stator giriş gücü.....	48
Şekil 3.13. ÇBAG'ün çıkış gücü .....	48
Şekil 3.14. ÇBAG'de stator ve rotor nüve kayıpları .....	48
Şekil 3.15. ÇBAG'de üretilen tork.....	49
Şekil 3.16. ÇBAG senron hızlarda ürettiği tork grafiği.....	49
Şekil 3.17. ÇBAG'ün verimi.....	50
Şekil 4.1. Gerilim vektörünün abc- $\alpha\beta$ ve abc- dq dönüşümleri ile vektörel gösterimi.....	53
Şekil 4.2. 50Hz AC'ye bağlı ÇBAG .....	53
Şekil 4.3. Stator tarafına indirgenen ÇBAG'nin eşdeğer devresi .....	55
Şekil 4.4. Senkron dq referans çerçevesindeki ÇBAG'ün eşdeğer devresi.....	60
Şekil 4.5. ÇBAG güç aktarımı.....	61
Şekil 5.1. Farklı hatve açıları için uç-hız oranına sahip güç katsayısı değişimi.....	64
Şekil 5.2. Rüzgâr türbini için güç eğrisi .....	64
Şekil 5.3. Rüzgâr türbini için tork katsayısı eğrisi .....	65
Şekil 5.4. ÇBAG'ün rotor akı yönlendirmeli vektör kontrolü blok şeması .....	67
Şekil 5.5. Stator ve rotor akılarının vektörel gösterimi .....	68
Şekil 5.6. Rotor tarafı kontrolü için akım kontrol döngüsü.....	68
Şekil 5.7. Şebeke gerilimi oryantasyonu vektör kontrol blok diyagramı .....	70
Şekil 5.8. Şebeke tarafı dönüştürücü için akım kontrol döngüsü.....	71
Şekil 5.9. Temel sıfır sıralı harmonikler ve enjeksiyon sinyali.....	73
Şekil 5.10. Sıfır sıralı Gerilim Enjektör Blok diyagramı .....	73
Şekil 6.1. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinin kontrolünün PLECS'de modellenmesi.....	75
Şekil 6.2. Simülasyondan rotoru sargılı asenkron generatör bloğu.....	76
Şekil 6.3. Rüzgâr türbininin aerodinamiği bloğu .....	77
Şekil 6.4. Dolaylı Hız Kontrol Cihazı MPPT Bloğu.....	79
Şekil 6.5. PLECS'te Rotor Tarafı Kontrolör Blokları .....	79
Şekil 6.6. PLECS'te Şebeke Tarafı Kontrolör Blokları.....	80
Şekil 6.7. Zamana bağlı rüzgâr hız değişimi .....	81

Şekil 6.8. Üç fazlı stator gerilimi .....	81
Şekil 6.9. Üç fazlı stator akımı .....	82
Şekil 6.10. DC bara gerilimi.....	82
Şekil 6.11. Şebeke ile reaktif güç değişim kontrolü.....	83
Şekil 6.12. Şebeke ile reaktif güç değişim kontrolü.....	83
Şekil 6.13. Stator ve şebeke PWM'lerin zamana bağlı sıcaklık değişimi.....	84
Şekil 6.14. Stator ve şebekedeki toplam güç kayıplarının zamana bağlı değişimi .....	85



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Farklı rüzgâr türbini tiplerinin karşılaştırılması .....	12
Tablo 2.2. Pazar payının yüzde 70'ini oluşturan rüzgâr türbini tedarikçileri .....	13
Tablo 3.1. Kutup sayısı-çap oranı ilişkisi .....	26
Tablo 3.2. Laminasyon mıknatıslanma eğrisi $B_m(H_m)$ değerleri .....	36
Tablo 3.3. ÇBAG'ün elektriksel parametreler .....	42
Tablo 3.4. ÇBAG'ün Stator geometrisine ait parametreler .....	43
Tablo 3.5. ÇBAG'ün rotor geometrisine ait parametreler .....	44
Tablo 3.6. Analitik ÇBAG'ün ve Maxwell SEA tasarıma göre parametreler .....	50
Tablo 3.7. Analitik ve Maxwell SEA göre ÇBAG'ün eşdeğer devre parametreleri .....	51
Tablo 6.1. Generetör elektriksel parametreleri .....	77
Tablo 6.2. Aerodinamik Özellikler .....	78
Tablo 6.3. Simülasyon için rüzgâr hızının zamanla değişimi .....	80
Tablo A.1. ÇBAG'ün tasarım boyutlandırma değerlerinin MATLAB'teki sonuçları .....	97

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$S_{max}$	: Maksimum kayma
$D_{dış}$	: Stator dış çap
$E_S$	: Hava aralığı manyetik kuvvet
$I_{RO}$	: Yüksüz rotor akımı
$I_{RN}^R$	: Rotor akımı
$I_{SN}$	: Stator akımı
$L_r$	: Rotor endüktans
$L_s$	: Stator endüktans
$L_{\sigma r}$	: Rotorun öz endüktans
$L_{\sigma s}$	: Stator öz endüktans
$N_S$	: Stator senkron hız
$P_S$	: Aktif Güç
$P_{ad}$	: Çekirdek kayıpları
$P_{ironr}$	: Rotor demir kayıpları
$P_{irons}$	: Stator demir kayıpları
$P_m$	: Mekanik güç
$P_{sr}$	: Sürtünme kayıpları
$Q_S$	: Reaktif güç
$T_t$	: Türbin tork
$V_{3\_inj}$	: 3. harmonik enjeksiyon sinyali
$V_{dr} - V_{qr}$	: Rotor gerilimin d ve q eksen bileşenleri
$V_{ds} - V_{qs}$	: Stator gerilimin d ve q eksen bileşenleri
$V_{\alpha r} - V_{\beta r}$	: Rotor gerilimin $\alpha$ ve $\beta$ eksen bileşenleri
$V_{\alpha s} - V_{\beta s}$	: Stator gerilimin $\alpha$ ve $\beta$ eksen bileşenleri
$f_1$	: Frekans
$p_1$	: Kutup çifti sayısı;
$v_a^* v_b^* v_c^*$	: a, b ve c fazları için referans sinyali
$\eta_e$	: Elektrik verimlilik
$\psi_{ds} - \psi_{qr}$	: Rotor akısı d ve q eksen bileşenleri
$\psi_{ds} - \psi_{qs}$	: Stator akısı d ve q eksen bileşenleri
$\psi_{\alpha s} - \psi_{\beta s}$	: Stator akısı $\alpha$ ve $\beta$ eksen bileşenleri
$\psi_{\beta s} - \psi_{\alpha r}$	: Rotor akısı $\alpha$ ve $\beta$ eksen bileşenleri
$\omega_m$	: Rotor açısal hızı
$\omega_s$	: Stator açısal hızı
A	: Kanadın enine kesit alanı.
$A_{cos}$	: Stator iletken kesiti
$C_p$	: Güç katsayısı.
$C_t$	: Tork Katsayısı
d- q	: Döner referans eksenleri
g	: Hava aralığı
GW:	: Gigawatt
Hz:	: Hertz
$h_{CR}$	: Rotor boyundurluk yüksekliği
$h_{CS}$	: Stator boyundurluk yüksekliği
$h_{RU}$	: Rotor oluk yüksekliği

$I$	: Rotor devresinden akan akım.
$I'_{SN}$	: Rotor tarafına aktarılan anma stator akımı
$I_s$	: Stator dan akan akım.
$kW$	: Kilowatt
$K_{w1}$	: Sargı faktörü
$L_m$	: Karşılıklı endüktans.
$L_r$	: Toplam rotor endüktansı.
$L_s$	: Toplam stator endüktansı.
$L_{\sigma r}$	: Rotor tarafı öz endüktansı.
$L_{\sigma s}$	: Stator öz endüktansı.
$mmf$	: Manyetik motor kuvvet
$MW$	: Megawatt
$P_{RN}$	: Rotor Gücü
$R$	: Rüzgâr türbininin yarıçapı
$R_s$	: Stator direnci.
$S$	: Sistem kayması.
$T$	: Tesla
$T_e$	: Elektromagnetik tork
$V_r$	: Rotor devresi boyunca gerilim.
$V_s$	: Stator gerilimi.
$\alpha - \beta$	: Sabit referans eksenleri
$\lambda$	: Uç hız oranı
$\rho$	: Havanın yoğunluğu = 1,23 Kg/m <sup>3</sup>
$\Psi_r$	: Rotor akısı
$\Psi_s$	: Stator akısı.
$A_{cor}$	: Rotor iletken kesiti
$A_{ru}$	: Rotorun kullanabilir oluk alanı
$B_g$	: Hava aralığı akı yoğunluğu
$B_{tRb}$	: Alt rotor dış akı yoğunluğu
$B_{tRm}$	: Orta rotor dış akı yoğunluğu
$B_{tRmax}$	: Rotor dış k1 yoğunluğu
$B_{tRt}$	: Üst rotor dış akı yoğunluğu
$D_{IR}$	: Maksimum şaft çapı
$F_{A'B'}$	: Rotor dişleri mmf
$F_{AA'}$	: Hava aralığı mmf
$F_{AB}$	: Stator dişleri mmf
$F_{B'C'}$	: Rotor boyunduruğu mmf
$F_{BC}$	: Stator boyunduruğu mmf
$K_E$	: EMF katsayısı;
$K_R$	: Deri etkisi faktörü
$K_S$	: Doygunluk faktörü
$K_{W2}$	: Rotor sargı faktörü;
$K_{W2}$	: Rotor sargı faktörü
$K_m$	: Miknatıslanma akım katsayısı
$L_m$	: Miknatıslanma endüktansı
$L_{sl}$	: Stator kaçak endüktansıdır
$N_r$	: Rotor oluklarının sayısı
$N_s$	: Stator oluklarının sayısı

$P_{cor}$	: Rotor kayıpları
$P_{cos}$	: Stator kayıpları
$P_{sr}$	: Kayma halkaları kayıpları
$R_r$	: Rotor direnci
$R_s$	: Stator direnci
$S_{RN}$	: Güç faktöründe rotor tarafındaki güç
$S_{SN}$	: Güç faktöründe stator tarafındaki güç
$S_{gN}$	: Elektromanyetik güç
$V_{RN}$	: Rotor gerilimi;
$V_{SN}$	: Stator gerilimi
$W_1$	: Faz başına dönüş sayısı
$W_2$	: Faz başına rotor dönüş sayısı;
$W_R$	: Rotor oluk genişliği
$X_m$	: Stator mıknatıslanma reaktansı
$X_{rl}$	: Rotor kaçak reaktans
$X_{sl}$	: Stator kaçak reaktans
$a_{ce}$	: İletken kesit alanı;
$j_{cor}$	: Rotor akı yoğunluğu
$j_{cos}$	: Stator akı yoğunluğu
$k_f$	: Yuva doldurma faktörü
$l_{fs}$	: Uç sargı uzunluğu
$li$	: Yığın uzunluğu;
$m$	: Faz sayısı
$n_{c1}$	: Stator bobin başına sarım sayısı
$n_{c2}$	: Rotor Bobin başına sarım sayısı
$y/\tau$	: Stator bobin açıklığı/kutup hatve oranı;
$z_1$	: Statordaki oluk başına iletken sayısı
$z_2$	: Rotordaki oluk başına iletken sayısı
$\beta$	: Tel oranı;
$\eta_N$	: Verimlilik
$\theta_e$	: Elektriksel açı
$\theta_r$	: Rotor açı
$\theta_s$	: Stator açısı
$\lambda$	: Eksenel uzunluk oranı
$\lambda_{ds}$	: Diferansiyel kaçak geçirgenlik katsayısı
$\lambda_{end}$	: Uç bağlantı geçirgenlik katsayısı
$\lambda_s$	: Slot geçirgenlik katsayısı
$\mu_0$	: Hava alanın geçirgenliği;
$\sigma_{co}$	: Elektriksel iletkenlik;
$\tau$	: Kutup aralığı
$\tau_R$	: Rotor oluk aralığı
$\tau_S$	: Stator oluk aralığı
$\varphi(\xi)$	: Direnç
$\psi(\xi)$	: Slot kaçak endüktansı
$\omega_1$	: Açısız hız

## Kısaltmalar

AC	: Alternatif Akım
ASM	: Asenkron Makine
CAD	: Computer Aided Design Bilgisayar Destekli Tasarım
ÇBAG	: Çift Beslemeli Asenkron Generatör
DC	: Doğru Akım
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (Yatıtılmış İki Kutuplu Transistör)
MATLAB	: Matrix laboratory (Çok Paradigmalı Sayısal Hesaplama Yazılımı)
MPPT	: Maximum power point tracking (Maksimum Güç Nokta Takibi)
MRFC	: Multimedia Recource Fuction Controller (Referans Takip Denetleyici)
PI	: Proportional-Integral (Oransal-İntegral denetleyici)
PLL	: Phase Lock Loop (Faz Kilitlemeli Çevrim)
PLECS	: Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation (Doğrusal Elektrik Devre Simülasyonu)
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
PWM	: Pulse Width Modulation (Sinyal Genişlik Modülasyonu)
REDS	: Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi
RSAG	: Rotor Sargılı Asenkron Generetör
RTD	: Rotor Taraf Dönüştürücü
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SMSG	: Sabit Miknatıslı Senkron Generetör
ŞTD	: Şebeke Taraf Dönüştürücü
RL	: Resistans-Low Pass Filter (Düşük Geçişli Filtre)

# DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN GELİŞTİRİLMESİ, MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

## ÖZET

Rüzgâr enerjisi, değişen iklim ve fosil yakıt krizi nedeniyle yenilebilir enerji piyasasının geleceğinde önemli bir rol oynayacaktır. Başlangıçta, rüzgâr enerjisinin enerji piyasasının küçük bir bölümünü kapsaması amaçlanmıştı, ancak uzun vadede geleneksel fosil yakıtlı enerji üretimi ile rekabet etmelidir. Bu yüzden son on yılda yapılan araştırmalar rüzgâr enerjisi dönüştürme sistemine (REDS) odaklanmıştır. Şebekede rüzgâr enerjisi payı artmadan önce güç sisteminin bu yeni oluşuma doğru hareketi araştırılmalıdır. Bu nedenle, rüzgâr enerjisi entegrasyon sorunları, dağıtım, değişkenlik ve güç akışı konularının algılanmasını geliştirmek için ilginç bir konu olarak hizmet etmektedir. Bu sorunu çözmek için simülasyon modellerinin zorluklarını ve saha testlerinde yer alan maliyetleri aşmak için mikro makine tanıtıldı. Geçmişte, büyük turbo alternatörlerin şebeke entegrasyon sorunu mikro makineler tarafından çözülmüyordu. Mikro makineler ile çeşitli testler yapılabilmekte ve sistemin esnekliğini de artırmaktadır.

Bu tezde, bir çift beslemeli asenkron generatörünün tasarımını ve modellemesini içermektedir. Geliştirilen ÇBAG bir rüzgâr türbine entegre edilerek modellenmesi yapılmıştır. Değişken rüzgâr hızı uygulaması ile momentin, DC bara geriliminin ve şebeke ile aktif-reaktif güç alışverişinin kontrolü için ÇBAG'e vektör kontrolü uygulanmıştır. REDS'nin güç çıkışını en üst düzeye çıkarmak için maksimum güç noktası izleyicisi de uygulanmıştır. Tezde ayrıca güç kalitesini koruyarak çıkış gerilimini artırmak için referans sinyale üçüncü harmoniklerin enjeksiyonu yapılmıştır. Bu projenin hedeflerine ulaşmak için makine tasarımı için ANSYS Maxwell RMxprt'de modellenip Maxwell 2D'de simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Generatör kontrolü için MATLAB/Simulink ve PLECS programları kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çift Beslemeli Asenkron Generatör, Darbe Genişlik Modülasyonu, Güç Elektronikliği, Rüzgâr Enerjisi Sistemi.

# **DEVELOPMENT, MODELING AND CONTROL OF DOUBLY FEED INDUCTION GENERATOR IN VARIABLE SPEED WIND TURBINES**

## **ABSTRACT**

Wind power will play an important role in the future of the renewable energy market due to the changing climate and the fossil fuel crisis. Initially, wind power was intended to cover a small portion of the energy market, but in the long run it should compete with traditional fossil fuel power generation. That's why over the past decade research has focused on the wind energy conversion system (WECS). Before the wind energy share in the grid increases, the movement of the power system towards this new formation should be investigated. Therefore, wind energy integration problems serve as an interesting topic to improve the perception of distribution, variability, and power flow issues. To solve this problem, the micromachine was introduced to overcome the difficulties of simulation models and the costs involved in field testing. In the past, the grid integration problem of large turbo alternators was solved by micro-machines. Various tests can be performed with micro machines and increase the flexibility of the system.

This thesis includes the design and modeling of a double feed induction generator. The developed DFIG was modeled by integrating it into a wind turbine. Vector control is applied to the DFIG to control the torque, dc bus voltage and reactive power exchange with the grid with the variable wind speed application. Maximum power point tracker is also implemented to maximize the power output of WECS. In the thesis, third harmonics are injected into the reference signal to increase the output voltage while maintaining the power quality. In order to achieve the goals of this project, the machine design was modeled in ANSYS Maxwell RMxprt and simulated in Maxwell 2D. MATLAB/Simulink and PLECS programs were used for generator control.

**Keywords:** Doubly Fed Induction Generators, Pulse Width Modulation, Power Electronics, Wind Energy System.

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Genel Bakış

Elektrik enerjisi, evlerimiz, iş yerlerimiz ve endüstrilerimiz için en yaygın kullanılan enerji kaynağıdır. Nüfus ve endüstriyel büyüme, son otuz yılda güç tüketiminde önemli artışlara yol açmıştır. Onlarca yıldır elektrik santrallerimizi, endüstrilerimizi ve araçlarımızı çalıştıran kömür, petrol ve gaz gibi doğal kaynaklar çok hızlı bir şekilde tükeniyor. Bu ciddi sorun, dünyanın dört bir yanındaki ülkeleri tükenmez doğal kaynakları kullanan alternatif enerji biçimleri hakkında düşünmeye zorunlu kılmıştır.

Dünya çapında konvansiyonel fosil yakıtların yanması, çevre kirliliği seviyesinin artmasına neden olmuştur. İklim değişikliği sorununu ele almak ve çözmek için çeşitli uluslararası sözleşmeler ve forumlar kurulmuştur. Bu forumlar, ülkeleri kirlilik kontrolü, enerji tasarrufu, enerji verimliliği, alternatif ve temiz enerji kaynaklarının geliştirilmesine adanmış ulusal enerji politikaları oluşturmaya motive etti. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ile atılan ilk adımı takiben Kyoto Protokolü ile genişleyen ve Paris İklim Anlaşması ile günümüzde son halini alan küresel iklim politikalarında atılan bu adımlar uluslararası çevre düzenlemelerini zorunlu hale getirmiştir.

Güneş, rüzgâr ve okyanusların gelgit akıntıları gibi yenilenebilir enerji sürdürülebilir, tükenmez ve çevre dostu temiz enerjidir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en umut verici teknolojilerden biri rüzgârdır. Hâlihazırda önemli bir süredir kullanılmaktadır ve diğer alternatif enerji kaynaklarına kıyasla konvansiyonel üretimi azaltma konusunda en büyük potansiyele sahiptir. Rüzgâr a dayalı üretimin toplam enerji üretim payındaki oranı dünyanın birçok yerinde sürekli olarak artmaktadır. Rüzgâr türbin kapasitesi 1-3 kW'tan 1-3 MW ve daha fazlasını üreten makinelere yükseldi. Artan güvenilirlik, modern makinelerin mevcudiyetinin %97-99'a ulaşmasıyla maliyet düşüşüne katkıda bulunmuştur. Rüzgâr santralleri, son 15 yılda yapılan teknolojideki istikrarlı gelişmelerden faydalanılmıştır. Bu teknolojik ilerlemelerin çoğu, şebeke entegrasyonu, elektrikli makine, güç dönüştürücüler ve kontrol stratejiler ile ilgili bileşenlerde yapılmıştır. Yumuşak kalkışlı basit asenkron makinesinin kullanımı çok geride kalmıştır. Artık makinenin gerçek ve reaktif gücünü kontrol edebiliyor, güç çıkışını sınırlayabiliyor, gerilimi ve hızı kontrol edebiliyoruz. Bu alanda dünya çapında

devam eden çok sayıda araştırma var ve büyük bir yetenek sunan teknoloji geliştirilmeye devam etmektedir. Bu sayede ortak bir platformda bir araya getirilen güç sistemleri, makineler, güç elektroniği dönüştürücülerinin ve kontrol stratejilerin uygulamalarının anlaşılmasını sağlamaktadır.

Rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülebilmesinde rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Ticari olarak temin edilebilen mevcut şebeke ölçeğindeki rüzgâr türbinlerinin çoğu, "Danimarka konsepti" türbin konfigürasyonuna dayanmaktadır. Bu konfigürasyonda yatay eksen, üç kanatlı rotor, rüzgâr a karşı yönlendirme ve kanatları her zaman rüzgâr akışı yönünde yönlendirmek için aktif bir gövde döndürme sistemi, aktarma organı, rotoru dişli kutusuna bağlayan düşük hızlı bir şaft, 2- 3 kademeli hız arttırıcı dişli kutusu ve dişli kutusunu generatöre bağlayan yüksek hızlı bir şafttan oluşur. Rüzgâr türbinleri sabit hızlı ve değişken hızlı olmak üzere iki farklı çalışma şeklinde kullanılabilir. Sabit hızlı rüzgâr türbinleri, değişken hızlarda esen rüzgâr hızının belirli bir hız aralığında ( $\pm 1\%$ ) tutularak belirlenen sabit hızda dönen türbinlerden enerji elde edilmesi prensibine dayanan bir sistemdir ve doğrudan şebekeye bağlanmaktadır. Bununla birlikte, değişken hızlı bir rüzgâr türbininde, makine bir güç elektroniği dönüştürücü aracılığıyla kontrol edilir ve elektrik şebekesine bağlanır. Değişken hızlı bir rüzgâr türbini kullanmanın çeşitli nedenleri vardır. 1) Değişken hızlı rüzgâr türbinleri, sabit hızlı rüzgâr türbinlerine kıyasla daha yüksek enerji verimi sunar. 2) Değişken hızlı çalıştırma ile mekanik yüklerin azaltılması ve basit adım kontrolü sağlanabilir. 3) Değişken hızlı rüzgâr türbinleri çıkış gücünde daha az dalgalanma gösterir. 4) Senkron hızın  $\pm 30\%$  gibi geniş hız aralığında çalışabilmesi, 5) Aktif ve reaktif gücün bağımsız olarak kontrol edebilmesi ve kullanılan güç elektroniği dönüştürücü gücünün, generatör gücünün yaklaşık  $30\%$ 'una karşılık gelmesi gibi avantajlarından dolayı son yıllarda doğrudan tahrikli senkron generatör (dişli kutusu olmadan) veya çift beslemeli asenkron generatörü (ÇBAG) kullanan eğim kontrollü değişken hızlı çalışmaya dayalı rüzgâr türbinleridir.

Başlıca rüzgâr türbini imalatçılarının çoğu, 3 ila 5 MW aralığında büyük rüzgâr türbinleri üretebilmektedir. Bugün, çift beslemeli Asenkron generatörleri, rüzgâr türbini endüstrisinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Onu popüler yapan çift beslemeli

asenكرون generatörünün en büyük avantajı, güç elektroniği ekipmanının toplam sistem gücünün yalnızca bir kısmını (%20-30) idare etmesi gerektiğidir (L. H. Hansen ve diğ. 2001; L. Xu and C. Wei, 1995; P. Mutschler and R. Hoffmann, 2002). Bu, güç elektroniği ekipmanındaki kayıpların, daha küçük bir dönüştürücü kullanmanın maliyet tasarrufu dışında, doğrudan tahrikli bir senkron generatörde olduğu gibi toplam sistem gücünü idare etmesi gereken güç elektroniği ekipmanına kıyasla azaltılabileceği anlamına gelir.

ÇBAG'lerin amaca uygun kontrol edilebilmeleri önemli olup, karmaşık yapılarının getirdiği kontrol zorluğunu aşmak için Doğru Akım (DC) makinelerin kontrol edilebilme özelliği örnek alınmıştır. Bu nedenle 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 tasarlanabilmektedir.

## **1.2. Literatür Özeti**

Rüzgâr enerjisi sektöründe ÇBAG uygulamaları son yıllarda literatürde oldukça geniş yer almaktadır. Yapılan çalışmaların bir bölümünde ÇBAG'ün boyut teknikleri kullanarak mikro generatör modeli çıkartılması, farklı referans çerçeveleri ve koşullar altında maksimum enerji çıkışı ve şebeke senkronizasyonu için bir ÇBAG kontrol teknikleri incelenmiştir. ÇBAG üzerine yapılan çalışmaların büyük bir kısmı bilgisayar tabanlı benzetim çalışmaları olarak gerçekleştirilirken, bazı çalışmalarda ise benzetim çalışmalarının uygulamaya dönüştürülerek gerekli kontrol ve analizlerin yapıldığı görülmüştür. Tasarlayacağımız kontrolörün performans değerlendirmesi, 1) stator-gerilim ve stator-akısı yönelimli çerçevelerde gerçek/reaktif güç kontrolünün analiz edilmesi, 2) maksimum enerji çıkışı için hız kontrolü ve ayrıştırılmış d-q gerilim kontrolündeki etkinliğinin analiz edilmesi ve 3) kontrolörün güç şebekesi ile etkili senkronizasyonu kolaylaştırma yeteneği. Bu konuların her biri, ilerideki bölümlerde yürütülen çalışmalar hakkında genel bir fikir edinmek için burada tanıtılmaktadır.

### 1.2.1. Mikro Makineler

Deneysel verilerle üretmek için 1950'lerde mikro makineler geliştirilmiştir. (R. Robert, 1950). Prototip mikro makineler, eğitim ve öğretim amaçları, bir kontrol sistemi geliştirme, güç sistemi stabilite çalışmaları ve çeşitli analitik hesaplamalarda kullanılan teorik varsayımların ve yaklaşımların test edilmesi için kullanılmıştır. Son zamanlarda, güç santrali ve güç sisteminin geçici davranışlarının araştırılması, mikro makinelerin diğer ek uygulamaları haline gelmiştir (A. Rangekar ve diğ., 1985; S. S. Kalsi and B. Adkins, 1971). Mikro makinenin kesin çalışma koşulları altında test etme yeteneği nedeniyle, dijital teknoloji gelişmiş olsa bile, elektrik güç sistemlerinde kararlı durum ve geçici olayları araştırmak için kullanılırlar (T. J. Hammons and A. J. Parsons, 1971; S. Berchten ve diğ., 1989). Aslında, geçici koşullar altında mikro makineler tarafından yürütülen simülasyon doğruluğunu artırmak için zaman sabiti düzenleyicileri oluşturulmuştur (D.W. Auckland and R. Shuttleworth, 1981). Simüle edilmiş türbin generatörleri (D. W. Auckland ve diğ., 1987), generatörler için parametre belirleme ve güç sisteminin dijital modellerinin doğrulanması (D. W. Auckland ve diğ., 1990), (D. Ruiz, 1999) ayrıca mikro makinelerin uygulamaları olarak belirtilmiştir.

### 1.2.2. Boyutlandırma Teknikleri

Boyut analizi, mikro makinelerin tasarımında kritik bir tekniktir. Bu teknik, makinenin yapıları ve davranışı arasındaki ilişkiyi dikkate alır. Boyutsal analiz genellikle bir mikro makine tasarlamak için ölçeklendirme faktörlerini oluşturmak için ölçeklendirme sürecine yardımcı olur. Bir transformatörün ölçeklendirilmesi, temel fiziksel yaklaşım (D. W. Auckland ve diğ.) tarafından ilk ölçeklendirme olarak rapor edilmiştir. Elektrik makinelerinin dinamik modelleri, yapıları gereği transformatörlere göre daha karmaşıktır. Bu nedenle, elektrikli makineler için geometrik ölçeklendirme sonucu hatalı olabilmektedir. (V. A. Venikov and A. V. Ivanov-Smolenski)'de, referans makine ile mikro makine arasındaki fiziksel benzerliklerin, aynı koşullar altında makinelerin özelliklerinde benzerliği garanti etmediği sunulmuştur. Ayrıca ölçekleme sürecinde sınır ve başlangıç koşullarının da fiziksel modelin boyutunu etkilediği ortaya konulmuştur. (M. J. Jefferies and A. Wright)'de, makinenin iletkenlerinin iletkenliğini artırarak mikro makinenin karmaşıklığını azaltmak için düşük sıcaklıklarda çalıştırılması önerilmiştir. Bu makalenin yazarları, amaçlarına ulaşmak için sıvı nitrojen kullandılar. (S. Berchten

ve diğ., 1989)'de, makinenin boyutunun küçültülmesinin kayıplarını artırdığı ve mikro makinenin özelliklerinin eşdeğer devre parametreleri ile tanımlandığı bildirilmektedir. Bu nedenle, birim başına sistemde her iki makinenin dirençleri ve reaktansları eşitlenirse, mikro makine ve referans makinenin dinamik tepkileri aynı olacaktır. (Brecht ve meslektaşları, 1989) mikro makineler ile referans makine arasındaki ilişkileri tanımlayan denklemler tanımlayarak mikro makineler geliştirmek için yeni bir yaklaşım önermektedir. Tanımlanan bu denklemler, geometrik uygulanabilirlik ile sınırlandırılmıştır. Model Referans Takip Denetleyicisi (MRFC) olarak bilinen bir dinamik yanıt denetimi de geliştirilmiştir. MRFC, bir mikro senkron makineyi kontrol etmek için iki rotor sargısını beslemek üzere iki darbe genişlik modülasyonu (DGM) uyarlamışlardır.

### **1.2.3. ÇBAG'ün Kontrol Stratejileri**

Güç sistemi içerisinde elektrik üretiminde büyük paya senkron generatörlerin sahip olduğu bilinmektedir. Çeşitli koşullar altındaki davranışları onlarca yıldır araştırılmaktadır (C. Concordia, 1951; J. H. Walker, 1981). Güç sistemindeki rüzgâr enerjisi sürekli olarak artarken, Rüzgâr Enerji Dönüşüm Sistemi (REDS) genellikle ÇBAG'ler ve Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörler (SMSG) gibi güç elektrik dönüştürücülerine sahip değişken hızlı generatörler kullanır. Bu tür generatörlerin davranışları, şebekede yeni oldukları için daha fazla araştırma gerektirir. Bu nedenle, hatalı koşullar altında REDS davranışını simüle etmek ve araştırmak için sayısal modelleme kullanılmıştır (B. R. Singla ve ark., 2006; S. Williamson, 1995).

ÇBAG, modern rüzgâr enerjisi endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ayarlanabilir hızlı bir asenkron makinedir. Doğrudan tahrikli bir senkron generatör sistemi ile karşılaştırıldığında, ÇBAG'nin önemli bir avantajı, generatör sürücüsü rotora bağlı olduğu için, generatör etiket gücünün %30'u olmasıdır. Bu durumda, maliyet ve güç dönüştürücüsünün yani generatör sürücüsünün kayıpları azalmaktadır.

(O. Carlson ve diğ., 1996) göre, değişken hızlı bir rüzgâr türbini için enerji üretimi, sabit hızlı bir rüzgâr türbinine kıyasla %2-6 oranında artırılabilirken, (D. S. Zinger and E. Muljadi, 1997)'de enerjideki artışın %39 artırılacağı belirtilmektedir. (P. Mutschler and R. Hoffmann, 2002)'de, en basit sabit hızlı rüzgâr türbinine kıyasla

değişken hızlı rüzgâr türbininin enerji üretimindeki kazancının saha koşullarına ve tasarım parametrelerine bağlı olarak %3-28 arasında değişebileceği gösterilmiştir. ÇBAG sisteminin verimlilik hesaplamaları çeşitli belgelerde sunulmuştur, örneğin; (M. G. Ioannides and J. A. Tegopoulos, 1988; B. Rabelo and W. Hofmann, 2001). Bununla birlikte, rüzgâr türbinleri için diğer elektrik sistemleriyle bir karşılaştırma bulmak daha zordur.

ÇBAG'nin kontrolü, standart bir Asenkron makinesinin kontrolünden daha karmaşıktır. ÇBAG'yi kontrol etmek için rotor akımı bir güç elektroniği dönüştürücü tarafından kontrol edilir. Rotor akımını kontrol etmenin yaygın bir yolu, alan yönelimli (vektör) kontroldür. ÇBAG için çeşitli vektör kontrol şemaları önerilmiştir. Yaygın bir yol, rotor akımını stator akı oryantasyonu (B. Hopfensperger ve ark., 2001; R. Pena ve diğ., 1996; Y. Tang and L. Xu, 1995) veya hava aralığı akı oryantasyonu (S. Wang and Y. Ding, 1993; L. Xu and C. Wei, 1995) ile kontrol etmektir. Stator direncinin küçük olduğu kabul edilebiliyorsa, stator akı yönelimi, prensip olarak stator gerilimiyle (şebeke akı yönelimi) yön verir (L. Morel ve diğ., 1998; W. Leonhard, 1996).

Geleneksel bir sabit hızlı Asenkron makinesinin aksine, bir ÇBAG hem stator hem de rotor yollarından şebekeye güç sağlar. Generatörün statoru doğrudan şebekeye bağlanırken, rotor şebekeye PWM güç dönüştürücüleri aracılığıyla bağlanır. Farklı bir bakış açısıyla, d-q vektör kontrol tekniği, ÇBAG hızını kontrol etmesine rağmen, ÇBAG'nin tork, stator gerçek/reaktif gücü, rotor gerçek/reaktif gücü ve PWM dönüştürücü modülasyonunun etkinliği gibi temel değerlerini de kontrol etmektedir.

Ayrıca, bir ÇBAG'nin genel performansını değerlendirmek için değişken rüzgâr koşulları altındaki kontrol teknikleri analiz edilmelidir. Değişken rüzgâr koşulları altında bir ÇBAG kontrol sistemini daha iyi tasarlamak ve yönetmek için, generatörün elektriksel özelliklerinin ve türbin kanatlarının aerodinamik özelliklerinin bir ÇBAG sisteminin enerji çıkışını ve hız kontrolünü nasıl etkilediğini analiz etmek önemlidir. Geleneksel olarak, ÇBAG elektriksel ve aerodinamik özellikleri genellikle ayrı ortamlarda denetlenir. İki özelliği tek bir bütünleştirici ortamda birleştirerek ÇBAG davranışını inceleyen az çalışma vardır. Geleneksel sabit hızlı rüzgâr türbininden farklı olarak, bir ÇBAG hem rüzgâr türbini hem de generatör seviyelerinde gelişmiş kontrollere sahiptir ve bir ÇBAG tarafından rüzgârdan alınan güç yalnızca türbin

kanatlarının aerodinamik özelliklerine değil, aynı zamanda mekanik, elektriksel koordinasyona da dayanır. Bu durumlar, genel sistem performansını, verimliliği ve kararlılığı geliştirmek için ÇBAG sistem ve kontrolör tasarımlarında birlikte düşünülmelidir.

Ouyang ve arkadaşları rüzgâr hızı değişimine dayalı reaktif gücün dinamik kısıtlamalarına yönelik ÇBAG'nin kontrolü üzerine çalışma yapmışlardır. ÇBAG'nin rotor geriliminin kontrol edilebilirliğini dikkate alan bir vektör eşdeğer modeli oluşturmuşlardır. Rüzgâr hızı değişimi altında reaktif gücün dinamik gereksinimi ve sınırlandırılmasını araştırmışlardır. ÇBAG'ü önerilen yöntemle kontrol edilebileceğini simülasyonla göstermişlerdir (Ouyang ve ark., 2018).

Xiahou ve arkadaşları ÇBAG'nin sensörsüz rotor akımı kontrolü üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında, ÇBAG'nin aktif ve reaktif güçlerini birbirinden bağımsız kontrol eden bir yöntem önermişlerdir (Xiahou ve ark., 2018).

#### **1.2.4. Amaç ve Katkı**

Bu araştırmanın temel amacı, rüzgâr enerjisi entegrasyonu konularının değerlendirilmesi için değişken hızlı rüzgâr türbin tabanlı ÇBAG'ünün tasarlanmasıdır. Ayrıca tasarlanan ÇBAG'ü bir rüzgâr türbini üzerinden performans kontrolü için vektör kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Tezin inceleme alanları aşağıda özetlenmiştir:

- ÇBAG 'nün ayrıntılı tasarımı için bir tasarım metodolojisi geliştirilmiştir.
- ÇBAG 'lerin tasarımını sayısal tekniklerle Sonlu Eleman Analiz (SEA) ile simülasyonu geliştirilmiştir.
- Tasarlanan ÇBAG'ü rüzgâr türbini üzerinde modellemek ve kontrol etmek için PLECS ortamında, senkron altı, senkron üstü ve senkron hızda dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir.
- d-q eksenlerindeki ÇBAG modeli, istenen aktif ve reaktif güç referansı için rotor d ve q akım referansını hesaplamak için kullanılmıştır. Bu rotor akımı referansları ile ÇBAG'e vektör kontrol uygulanmıştır.

### 1.3. Araştırma Soruları

Tez ile ilgili araştırma soruları aşağıdaki gibidir:

- 1) Bir ÇBAG, doğrusal olmayan manyetik ve elektriksel özelliklerle nasıl küçültülebilir.
- 2) Bir Mikro Makine, büyük ölçekli (makro ölçekli) bir ÇBAG ile aynı dinamik özelliklere sahip olacak şekilde nasıl tasarlanabilir?
- 3) ÇBAG'lerle, belirli şebeke entegrasyon sorunlarını daha doğru bir şekilde analiz etmek için bir Mikro Makine kullanılabilir mi?

### 1.4. Tezin Ana Hatları

Bu tez çalışması aşağıdaki bölümlerden oluşmuştur.

Bölüm 1: Detaylı literatür taraması, amaç, katkı ve son olarak tezin yapısını tartışarak ÇBAG'ne dayalı rüzgar enerji dönüşüm sistemine giriş sağlanmıştır.

Bölüm 2: Asenkron makinesi tasarım trendlerine ilişkin bir literatür incelemesi verilmiş ve rotoru sargılı asenkron makinelerin tasarım kriterleri (RSAG) işlenmiştir. Ayrıca makine tasarımının bilinmeyen yönlerine ışık tutulmuş ve asenkron makinelerle ilgili önemli noktalara değinilmiştir.

Bölüm 3: Asenkron motor boyutlandırma denklemleri ve deneysel verilerle makinenin tasarımını teorik olarak açıklamaktadır. Ayrıca, 2B sonlu elemanlar analizi simülasyonu ile birlikte bir ÇBAG' ün analitik tasarımı sunulmuştur.

Bölüm 4: Tasarlanan ÇBAG'ne dayalı REDS modellemesi açıklamaktadır. Ayrıca, elektriksel ve aerodinamik özellikleri entegre edilerek d-q vektör kontrolü sayesinde ÇBAG' ü hız kontrolünün ve maksimum enerji çıkarımının analizi yapılmıştır.

Bölüm 5: Bu bölümde ÇBAG şebeke senkronizasyonu kontrol tekniği çalışılmıştır. Kontrol sisteminin ÇBAG'lü rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin kontrolü (REDS) için aerodinamik, mekanik ve elektrik modelleme gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 6: ÇBAG 'nün kontrol analizi ve şebeke senkronizasyonuna yönelik bu tezde gerçekleştirilen ayrıntılı simülasyon sonuçları sunularak yorumlanmıştır.

Bölüm 7: ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini sisteminin tasarımı, kontrolüne ilişkin gelecekteki çalışmalar için sonuç ve öneriler verilmektedir. Ayrıca bu alandaki çalışmaların gelecekteki kapsamı açıklanmıştır.



## 2. ASENKRON MAKİNE TASARIMIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Asenkron makineleri (ASM), endüstrideki en popüler elektrikli makinelerdir. Bu makineler sağlamdır ve ikinci bir DC kaynağa ihtiyaç duymazlar yani tek uyarımlı makineler grubundadırlar. Çok ekonomik ve güvenilirlerdir. Kısmi beygir gücünden büyük megavat kapasiteye kadar geniş bir güç aralığında mevcuttur. Asenkron makine tasarımı, yapısal analiz, verimlilik ve son teknoloji özellikler bu bölümde tartışılmaktadır. Amaç, asenkron makinelerin tasarımı ve üretimi açısından son yıllarda neler başarıldığını gözden geçirmektir.

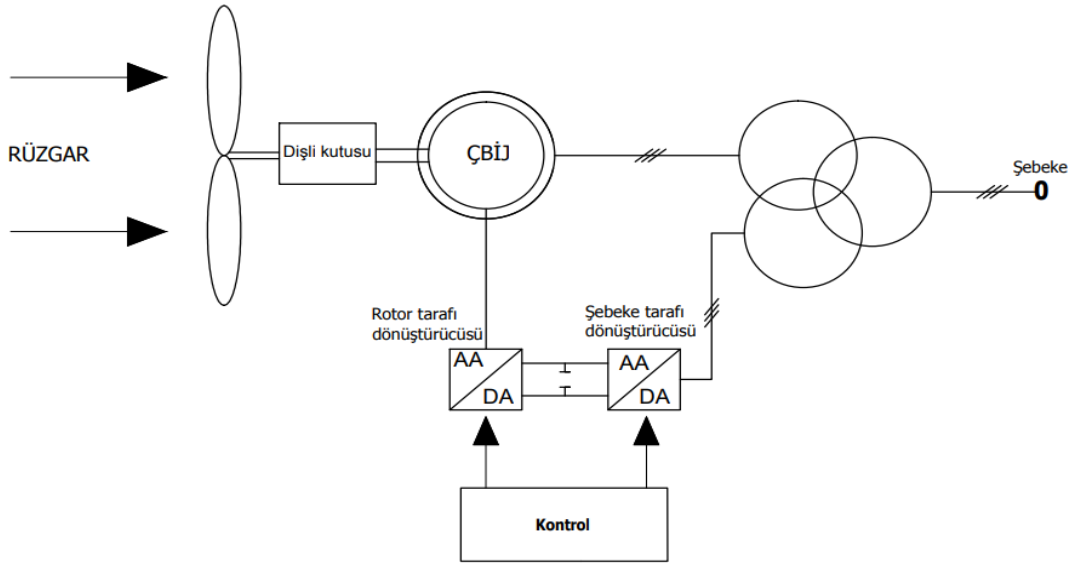
### 2.1. Giriş

ASM'ler, 1889'da sargılı bir rotorla ve daha sonra bir sincap kafesli rotor kullanılarak icat edilmiştir. Senkron makinelerde olduğu gibi, asenkron makinelerin statorlarında 3 fazlı sargılar bulunur. Rotor olukları 3 fazlı sargılarla veya katı çubuklarla doldurulabilir. Bu tür elektrikli makinelerin sağlam yapıları, basit tasarımları ve daha düşük maliyetleri olduğu bilinmektedir. ASM'ler, senkron makinelerin aksine değişken hızlarda çalıştırılabilir. Ayrıca, şebekeye bağlantı işlemleri nispeten basittir. Genellikle düşük güç faktöründe çalışırlar ve düşük güç faktörünü iyileştirmek için düzeltme kapasitörlerine ihtiyaç duyarlar (R. Richter, 1954; P. L. Cochran, 1989).

Sincap kafesli Asenkron makinelerinin rotor olukları katı iletken çubuklarla doldurulmuştur. Bu makineler, tasarımlarının basitliği ve sağlamlığı ve nispeten düşük maliyetleri nedeniyle en yaygın Asenkron makineleri türüdür. Bu tip, bağımsız rüzgâr enerjisi üretim şemalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

RSAG'i rotor üzerinde 3 fazlı sargılara sahiptir ve sonuç olarak sincap kafesli makinelerden daha pahalı ve daha az sağlamdır. Kayma halkalı rotorlu makineler, yüksek başlangıç torku üretebilmeleri nedeniyle tercih edilmektedir. Sargılı rotorlu asenkron makineler rotorlarından besleniyorsa, bunlara çift beslemeli asenkron makineleri denir. Bu makineler, stator ve rotor (P. L. Alger, 1970; T. A. Lipo, 2004) aracılığıyla şebekeye güç sağlayabilir. Aslında bu, rotor gücünü çıkarma kabiliyetine sahip olması, ancak rotor devresindeki güç elektroniğinin ek maliyetine sahip olması sargılı rotorun bir avantajıdır (R. Richter, 1954; E. S. Hamdi, 1994).

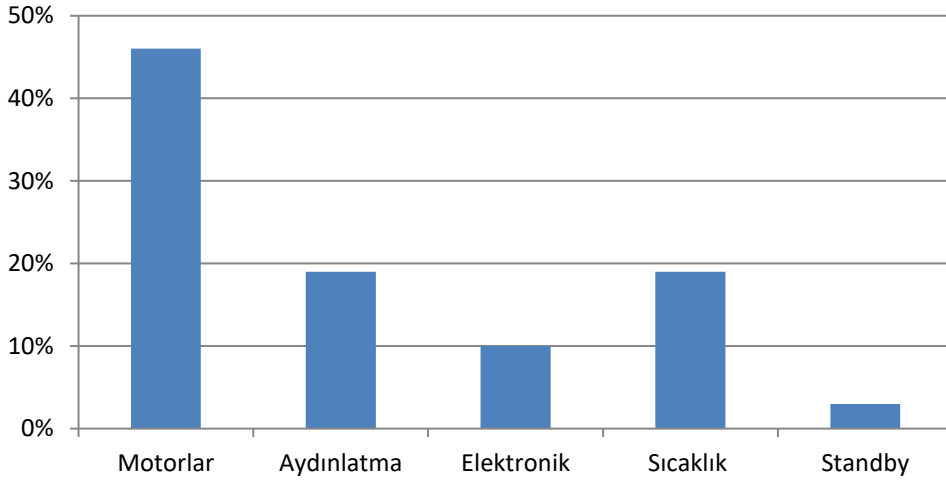
REDS’de en çok kullanılan ÇBAG uygulamalarıdır. Bunun başlıca nedeni, sürekli mıknatıslı senkron generatörler gibi rakip rüzgâr generatörü teknolojilerine göre basitliği ve düşük maliyetidir (T. Ackermann, 2005; J. H. Walker,1981; F. F. Tang and X., 2002). Ancak, özellikle rüzgâr enerjisi uygulamalarında düşük hızlı çalışma için bir dişli kutusuna ihtiyaç duyarlar (I. Boldea and S. A. Nasar, 2010; P. L. Alger, 1965). Şekil 2.1’de ÇBAG’ lü rüzgâr türbin sistemi blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.1. Çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgâr türbin sistemi blok diyagramı

## 2.2. Asenkron Makinelerin Mevcut Kullanımı

Elektrik motorları, modern dünyada kullanılan ana enerji dönüştürme cihazlarıdır. Gelişmiş ülkelerde, kişi başına 3kW'tan fazla elektrik motoru kuruludur (URL-1). Şekil 2.2’de, son kullanım uygulamalarına göre küresel elektrik talebinin tahmini payını göstermektedir (URL-2). Şekilde, elektrik motorlarının 2015 yılında üretilen elektriğin yaklaşık %46'sını tükettiğini göstermektedir. Bu, elektrik motorlarının veriminin ortalama olarak küçük bir oranda artması durumunda, önemli ölçüde enerji tasarrufuna yol açacağı anlamına gelir. 2012 yılında kurulan tahmini elektrik motoru sayısı 48,1 milyon adettir ve bu tahmininin 2017 yılına kadar yaklaşık 60,8 milyon birime çıkması bekleniyor (URL-3). ASM' lerin dereceleri onlarca watt ile 400 MW arasında değişir (I. Boldea, 2006; C. A. Gross, 2007).



Şekil 2.2. 2020 yılında küresel elektrik talebinin tahmini payı

Rüzgâr enerjisinden maksimum miktarda güç yakalama yetenekleri nedeniyle, değişken hızlı rüzgâr türbinleri, şebeke ölçeğinde elektrik enerjisi üretimi için popülerdir. Uygun güç elektroniği konvertörleri ile kullanıldığında, senkron veya Asenkron generatörleri her iki tipte değişken hızda çalışabilir. Çift beslemeli Asenkron generatörleri (ÇBAG'ler) ve sürekli mıknatıslı senkron generatörler, değişken hızlı generatörlerde kullanım için popülerdir. Tablo 2.1'de farklı rüzgâr türbini tiplerinin özelliklerinin karşılaştırmasını gösterilmektedir (I. Boldea and S. A. Nasar, 2010).

Tablo 2.1. Farklı rüzgâr türbini tiplerinin karşılaştırılması

Generatör Tip	SKAG	ÇBAG	SMSG
<b>Aerodinamik</b>	Az verimli	Verimli	Verimli
<b>Elektriksel</b>	Verimli	Az verimli	Az verimli
<b>Dişli Kutusu</b>	Dahil	Dahil	Yok
<b>Konvertör</b>	Yok	Güçte	Tam güçte
<b>Elektrik Gürültü</b>	Gürültülü	Az Gürültü	Az Gürültü
<b>Aerodinamik Gürültü</b>	Gürültülü	Gürültülü	Gürültülü
<b>Tasarım</b>	Basit	Zor	Zor
<b>Ağırlık</b>	Ağır	Ağır	Ağır
<b>Maliyet</b>	Normal	Düşük	Yüksek
<b>Motor hız kontrol aralığı</b>	Etiket hızında sabit	Etiket hızının %40-%100'ü arasında	Etiket hızının %0-%100'ü arasında

Asenkron makineleri için gelişmekte olan bir pazar, 1997'den beri kademeli olarak büyüyen rüzgâr enerjisi sektöründedir. 2014'ün sonunda, üretilen elektriğin 423 GW'ı, 80 ülkede, öncelikle Asenkron generatörlerinin kullanıldığı rüzgâr çiftlikleri tarafından üretiliyordu. Bu makineler piyasadaki sabit mıknatıslı senkron generatörlerle rekabet etmektedir. Bununla birlikte, üretici bilgisi eksikliği nedeniyle farklı sistemler (ÇBAG ve SMSG) için kesin pazar payı ayrıntıları yoktur. Tablo 2.2.'de rüzgâr generatörü tedarikçilerinin 2014 yılı için pazar payı yüzdelerini gösterilmektedir.

Tablo 2.2. Pazar payının yüzde 70'ini oluşturan rüzgâr türbini tedarikçileri

Üretici Firma	Generatör tipleri ve aktarma organları		Pazar payı (≈70%)
<b>GE (Amerika)</b>	AG <sup>1</sup> , ÇBAG <sup>2</sup>	SMSG <sup>3</sup>	11,8%
<b>Vestas (Danimarka)</b>	AG, ÇBAG	SMSG	11,8%
<b>Siemens (Almanya)</b>	AG, ÇBAG	SMSG	11%
<b>Enercon (Almanya)</b>	--	SMSG, EUSG <sup>4</sup>	7,2%
<b>Suzlon Grup (Hindistan)</b>	AG, ÇBAG, SKAG <sup>5</sup>	--	6,6%
<b>Gamesa (İspanya)</b>	AG, ÇBAG	SMSG	6,4%
<b>Goldwind (Çin)</b>	--	SMSG	6,0 %
<b>GuoDian United (Çin)</b>	AG, ÇBAG	--	3,5%
<b>Sinovel (Çin)</b>	AG, ÇBAG	--	2,7%
<b>Sewind (Çin)</b>	AG, ÇBAG	SMSG	2,3%

1

<sup>1</sup>Asenkron Generatörü

<sup>2</sup>Çift Beslemeli Asenkron Generatör

<sup>3</sup>Sabit mıknatıslı senkron Generatör

<sup>4</sup>Elektrikle uyarılmış senkron Generatör

<sup>5</sup>Sincap Kafesli Asenkron Generatör

### 2.3. Bir Elektrik Makinesinin Tasarımı İçin Temel Bilgiler

Bir elektrikli makinenin tasarımı, elektrik, manyetik ve yalıtım malzemelerinin seçimini ve manyetik devre ile elektrik devrelerinin ayrıntılı boyutlandırılmasını içerir. Bu, incelenmekte olan belirli makine için tasarım denklemlerinin ayrıntılı olarak değerlendirilmesiyle gerçekleştirilir. Genel olarak, tasarım için kullanıcı spesifikasyonlarını karşılayacak bir dizi olası tasarım çözümü vardır, ancak tasarım süreci boyunca karşılaşılan gerekli takaslara dayalı olacak optimum çözümü bulmak tasarımcının görevidir. İstenen çözüm, anma hızında yüksek verimlilik, yüksek güç ve tork yoğunluğu, tolere edilebilir sıcaklık artışı ve nihayetinde düşük maliyet gibi önemli özelliklere sahip olmalıdır. Son olarak, tasarım sürecinde makinenin dayanıklılığı ve güvenilirliği dikkate alınmalıdır. Üretim koşulları, tasarım zorluklarının bir parçasını oluşturur (M. G. Say, 1958; A. K. Sawhney, 1984). Tasarım süreci ayrıca makine tipi ile ilgili aşağıdaki alanların bilgisini gerektirir (J. Pyrhonen ve diğ.):

- Ulusal ve uluslararası standartlar
- Spesifikasyonlar (tüketicinin makine derecelendirmeleri, performans gereksinimleri vb. ile ilgilenen)
- Malzeme ve işçilik maliyeti
- Üretim kısıtlamaları

Tasarım karmaşıklıklarının üstesinden gelmek için istenilen tasarım değerleri tekrarlı yöntemlerle elde edilecektir. Bu nedenle bilgisayarlar, tasarım süreci boyunca yeterli doğrulukla tasarımın yönlerini değerlendirmek için önemli bir rol oynar. Ayrıca, sayısal sonuçları doğrulamak ve tasarım özelliklerine ulaşıp ulaşılmadığını değerlendirmek için bir prototipin laboratuvar testleri kullanılabilir (C. Kral, 2009; S. L. Ho and W. N. Fu,1998).

### 2.4. Malzeme Seçimi

Asenkron makineleri, dönen manyetik alanlara nüfuz eden manyetik devrelere ve ayrıca alternatif akımlara sahip elektrik devrelerine sahiptir. Elektrik devreleri, manyetik devrelerden farklı bir amaca sahiptir ve birbirinden yalıtılmıştır. Manyetik, elektrik ve

yalıtım malzemeleri, özellikleri ve kayıpları ile tanımlanır (A. K. Sawhney, 1984; S. A. Nasar, 1987).

#### **2.4.1. Laminasyonlar ve Manyetik Malzeme**

Malzemenin içindeki sabit mıknatıs dipolleri, malzemenin manyetik özelliklerini tanımlar. Bilindiği gibi histerezis, elektrik makinelerinde enerji kaybına neden olabilen manyetik malzemelerin bir özelliğidir. Demir, nikel, kobalt artı silikon çelik alaşımları, düşük histerezise sahip oldukları için yumuşak manyetik malzemeler olarak bilinirler. Bu malzemeler, boyutları  $10^{-4}$  ve  $10^{-7}$  m arasında olan mikro alanları içerir. Tamamen manyetikliği giderildiğinde, bu alanlar rastgele yönelimlere sahiptir. Bu nedenle malzemenin tüm sonlu örneklerde sıfır kalıcılığı vardır. Dipollerin sonucu manyetik alan içinde değişir. Malzeme ve her malzeme için B-H eğrileri oluşturur. Manyetik malzemeler BH eğrilerine göre kategorize edilebilir (M. Sawahata ve diğ., 2009; M. J. Hofmann and H.-G. Herzog, 2015).

Tavlanmış demir (yumuşak), doymadan yüksek düzeyde manyetik alan toleransı (2,6 Tesla'ya kadar) nedeniyle dönen makineler için bir nüve yapmak için tercih edilir. Yumuşak demir, manyetik alan konsantrasyonunu hava çekirdeğinden 50000 kat daha fazla artırabilir. Bu malzeme, yüksek girdap akımı kaybına ve istenmeyen ısınmaya neden olan yüksek bir iletkenliğe sahiptir. Demirin iletkenliğini azaltmak için genellikle iki yöntem kullanılır: silikon ile alaşımlama ve laminasyon (J. Martinez-Roman ve diğ., 2015).

Silikon-çelik, %6,5'a kadar silikon içeren bir demirdir ve genellikle 2 mm'den daha az kalınlıkta soğuk haddelenmiş olarak üretilir (M. Mochizuki ve diğ., 1994). Elektrikli makinelerin nüvelerindeki maksimum laminasyon kalınlığı 1 mm'dir (I. Boldea and S. A. Nasar, 2010). Silisyum çeliğin mekanik özelliği, silisyum uyumluluğuna bağlıdır. Silikon sonuçta demir iletkenliğini azaltarak nüve kayıplarını azaltır. Temel olarak indüklenen girdap akımlarını azaltır ve histerezis döngüsünü daraltır. Ardından, makinenin çekirdeği silikon çelikten yapılmış plakalarla lamine edilecektir. Bu laminasyonlar, plakalar arasındaki iletkenliği azaltmak için kaplanmıştır. Kaplama, laminasyonları oksidasyondan korur ve kalıp kesimi sırasında yağlayıcı görevi görür (C. A. Gross, 2007).

300Hz'e kadar temel frekanstaki ASM'ler için, 0,5 mm kalınlığındaki silikon çelik laminasyonların 1T ve 50Hz'de yaklaşık 2 ila 4W/kg'lık makul nüve kayıplarına yol açtığı rapor edilmiştir. Daha yüksek temel frekans için daha ince laminasyonlar gereklidir (M. Mochizuki ve diğ., 1994; S. Sprague and D. Jones, 2000).

#### **2.4.2. Elektrik İletkenleri**

Elektrik makinelerinin sargılarında genel olarak bakır iletkenler kullanılmaktadır. Dairesel veya dikdörtgen iletken türü, makinenin derecesine bağlıdır. Rotoru Sargılı Asenkron Generatörlerin (RSAG) hem statorunda hem de rotorunda üç faz sargısı vardır. Üç fazlı sargılardaki iletkenlerin boyutu akım yoğunluğuna bağlıdır. Ayrıca akım yoğunluğunun soğutma sistemini, servis görev döngüsünü ve hedeflenen verimi etkilediği bildirilmektedir. Yüksek verimli RSAG'ler için akım yoğunluğu 3,5 ila 6 A/mm<sup>2</sup> arasındadır. Cilt etkisini kabul edilebilir seviyelere indirmek için birkaç temel iletkeni (6 ile 8) paralel olarak bükme mümkündür (P. L. Cochran,1989; M. G. Say, 1958; R. Kimmich ve diğ., 2006).

#### **2.5. Elektrik Makinesi Tasarım Adımları**

Elektrik makinesi tasarımına başlamadan önce makinenin gücü, faz sayısı, besleme gerilimi, frekansı, istenen verim, güç faktörü, iletken akım yoğunluğu, hava aralığındaki ortalama akı yoğunluğu gibi değerlerin seçilmesi gerekmektedir. Bu değerler tasarım girdileridir. Belirlenen bu ön değerlere bağlı olarak tasarım süreci başlatılır ve gerekli durumlarda parametreler güncellenerek tasarımda revizyonlar gerçekleştirilir. Bu revizyonlar tasarım isterleri sağlanana kadar devam edilir.

Genel makine tasarımında izlenen adımlar aşağıda kısaca özetlenmiştir. (Cenk Ulu ve ark., 2004).

- Elektriksel tasarım: İlk olarak şebekeye uyumluluk açısından elektrik makinesinin besleme gerilimi, frekansı ve faz sayısı belirlenir. Bunun yanında nominal yük durumundaki istenen minimum güç faktörü ve verimin de belirlenmesi gerekir. Bu değerlere bağlı olarak elektrik makinesinin bağlantısı (üçgen, yıldız), sargı yapısı (bir ya da iki tabakalı, bükümlü, dalgalı sargı, tam ya da eksik adım), buna bağlı sargı faktörleri ve iletken akım yoğunluğu belirlenir.

- Manyetik tasarım: Burada belirlenen hava aralığı akı yoğunluğu ve malzeme doyma akı yoğunluğuna bağlı olarak stator ve rotor dişleri ve boyunduruğu doymaya gitmeyecek şekilde oluk şekilleri belirlenir. Ayrıca manyetizasyon ve kaçak endüktanslar, demir kayıpları ve harmonik etkileri hesaplanarak gerekli revizyonlar yapılır.
- İzolasyon tasarımı: İzolasyon tasarımı elektrik makinelerinin hem güvenliği hem de tasarımı açısından önem arz etmektedir. Yalıtımın gerekli ölçüde yapılmaması kısa devre arızalarına neden olmaktadır. Bunun yanında iletkenler üzerine uygulanacak yalıtkan maddenin kalınlığı oluk içindeki etkin olarak kullanılacak bakır alanını kısıtladığı için tasarımı olumsuz yönde etkilemektedir.
- Termal tasarım: Termal tasarımı iyi yapılmamış bir elektrik makinesinin verimi düşük olmaktadır. Bunun yanında yeterince soğutulmayan elektrik motorlarında iletkenler üzerindeki izolasyon malzemeleri etkisini yitirerek elektrik makinesinin arızalanmasına yol açmaktadır. Bu yüzden elektrik makinesinin ısıl analizleri yapılarak gerekli soğutma tibi (hava, su soğutmalı), vantilasyon kanalları sayısı, soğutma debisi gibi değerlerin belirlenmesi gerekmektedir.
- Mekanik tasarım: Bu tasarım adımında elektrik makinesinin kritik çalışma hızı, gürültü ve titreşimi, normal ve ekstrem çalışma durumlarında mile etki eden gerilme kuvveti, eylemsizlik momenti ve sargı başlarında oluşan kuvvetler hesaplanır. Böylece uygun mil seçimi ve yataklama elemanları belirlenir.

## 2.6. Asenkron Makine Tasarım Süreci

Literatürde çeşitli tasarım yaklaşımları mevcuttur, ancak çoğunluğu tasarım süreci özellikleri, önceden atanmış akı yoğunlukları ve akım yoğunlukları değerleri ile başlatır. Daha sonra stator delik çapı ( $D_{iç}$ ), yığın uzunluğu ( $L_i$ ), stator ve rotor slot sayısı, stator dış çapı ( $D_{dış}$ ), stator ve rotor slot boyutları çeşitli yaklaşımlarla belirlenir. Tipik olarak tasarım algoritmaları, kabul edilebilir bir verimlilik ve güç faktörü elde edilene kadar yinelenir. Tasarım sürecinin sonuçları tatmin edici değilse, tüm süreç başlangıç durumundan yeniden başlatılacaktır (I. Boldea and S. A. Nasar, 2010; F. F. Tang, 2002; I. Boldea, 2006; A. K. Sawhney, 1984; M. G. Say, 1976; G. Madescu ve diğ., 1996].

Geometrik varyasyonları ve düzensizlikleri, uygunlukları ve girdap akımı etkilerini yüksek doğruluk derecesi ile simüle etme yeteneği nedeniyle, elektrikli makineler tasarlamak için sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanmak popülerdir. Radyal akı makineleri genellikle 2B olarak simüle edilirken, aksenal akı makineleri, akı çizgilerini ve ayrıca aksenal olarak akı yoğunluklarını izlemek için 3B olarak simüle etmeyi gerektirir (B. R. Singla ve diğ., 2006; J. Wanjiku ve diğ., 2015; J. Wanjiku ve diğ., 2009; S. Williamson, 1995)'de yazarlar hem stator hem de rotor için indirgenmiş modeller kullanarak sonlu elemanlar (SEA) tabanlı bir analiz geliştirdiler. Bu model, büyük bir asenkron motor tasarlamak için kullanılabilir kadar hızlı ve doğru. Makine tasarımının optimizasyonu, çok değişkenli ve çok modlu bir optimizasyon problemidir. Geleneksel olarak, konveksiyonel tasarım optimizasyonu için analitik ve deneysel yöntemlerin bir kombinasyonu kullanılır. Bununla birlikte, ortaya çıkan tasarım optimizasyonu eğilimi, optimizasyon döngüsünde birleştirilmiş SEA dayanmaktadır. SEA kullanılarak alternatif tasarımların değerlendirilmesi basit ve doğru hale gelir. Ancak, SEA hesaplamalarının doğruluğunu artırmaya çalışırken simülasyon süresi uzar (J.-S. Rho ve diğ., 2007; L. Jun-qing and W. Xi-mei; 2013).

Madescu ve Boldea, asenkron motorlar için endüstriyel tasarım araçlarına eklenebilen pratik bir doğrusal olmayan model sunuyor. Ana amaçları, makineyi beş dairesel enine kesit alanına bölen iki boyutlu bir model geliştirmektir (G. Madescu ve diğ., 1996).

(L. Fan ve diğ., 2015) Verimli ve kompakt bir ÇBAG tasarımı için bilgisayar destekli tasarım (CAD) yaklaşımı sunmaktadırlar. Tasarlanan ÇBAG, sonlu elemanlar analizi ile doğrulanır. CAD programı tarafından geliştirilen tasarlanmış ÇBAG daha sonra aynı derecelendirmeye sahip geleneksel olarak tasarlanmış bir ÇBAG ile karşılaştırılır. Karşılaştırma, makinenin aktif hacmini, hava aralığı harmoniklerini ve değişken hızlarda verimliliği içermektedir (G. I. Vakil and K. R. Rajagopal, 2010).

### **2.6.1. Asenkron Makinesi Temel Boyutlarının Belirlenmesi**

Elektrik makineleri için temel boyutlandırma denklemleri (P. L. Cochran, 1989; P. L. Alger, 1970; E. S. Hamdi 1994)'de sunulmuştur. Yazarlar, stator iç ve dış çaplarını, nüve uzunluğunu, eşdeğer oluk boyutlarını, akı yoğunluğunu ve ayrıca kutup sayısını hesaplamak için çeşitli teknikleri açıklamaktadır. Bu stator çapı ve nüve uzunluğu

elektrik makinelerinin temel boyutlarıdır. ASM'lerin uzunluğunu ve çapını hesaplamak için iki farklı yöntem vardır: 1- çıkış katsayısı tasarım konseptine ( $C_0$ ) dayalı ve 2- rotor kayma gerilimine dayalıdır. Makine için stator iç çapını ( $D_{iç}$ ) hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılabilir (A. K. Sawhney,1984; M. G. Say, 1976):

$$D_{iç} = \sqrt{\frac{Q}{L_i n_s C_0}} \quad (2.1)$$

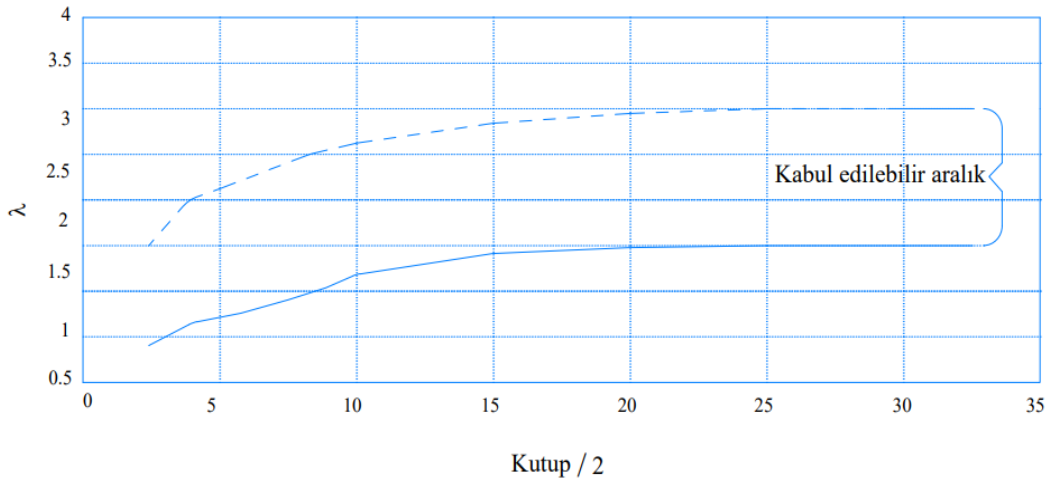
Burada  $p_1$  kutup çifti sayısı,  $Q$  giriş gücü,  $L_i$  stator eksenel uzunluğu,  $n_s$  senkron hız ve  $C_0$  çıkış sabitidir. Boldea ve Lipo, iç stator çapını ( $D_{iç}$ ) hesaplamak için rotor kayma gerilimini önerilmiştir (T. A. Lipo, 2004; I. Boldea, 2006). Öyleyse,

$$D_{iç} = \sqrt[3]{\frac{2xT_e}{\pi x \lambda x f_{xt}}} \quad (2.2)$$

burada  $T_e$  elektromanyetik tork,  $\lambda$  en-boy oranı ve  $f_{xt}$  asenkron generatörleri için rotor kayma gerilimidir. En boy oranı, stator uzunluğunun ( $L_i$ ) çapa ( $D_{iç}$ ) oranı olarak tanımlanır:

$$\lambda = \frac{L_i}{D_{iç}} \quad (2.3)$$

Makinenin eksenel uzunluğu ile çapı arasındaki oran, ASM'lerin güç faktörünü ve malzeme maliyetini belirleyecektir. Birkaç referansta, hedef çalışma özelliklerine ulaşılmasını sağlamak için yöntemler önerilmiştir (I. Boldea and S. A. Nasar, 2010; P. L. Alger, 1965; E. S. Hamdi, 1994; A. K. Sawhney, 1984; S. J. Chapman, 1999). Yazarlar, eksenel uzunluğunun en-boy ( $L/\lambda$ ) oranının ( $1,5 < L/\lambda < 2$ ) ise maliyetleri azaltabileceğini, ( $1,0 < L/\lambda < 1,25$  ise) güç faktörünü iyileştirebileceğini, ( $L/\lambda = 1.5$ ) ise verimliliği artırabileceğini önermektedir. ÇBAG'leri tasarlamak için ( $L/\lambda = 1$ ) kullanmak daha iyidir. ( $L/\lambda$ ) oranın değeri, makinenin boyutuna ve kullanılan makineye bağlı olarak 0,6 ile 2 arasında olması önerilmiştir. Şekil 2.3. kutup çiftlerinin sayısı için en-boy oranı için kabul edilebilir aralığı gösterir (F. F. Tang and X, 2002). Artan eksenel uzunluğunun %10'a varan ek sarım kayıplarına yol açtığı bildirilmektedir (P. L. Alger, 1965; J. Martinez ve diğ., 2015).



Şekil 2.3. ASM'lerin en-boy oranı ile kutup çifti değişim eğrisi

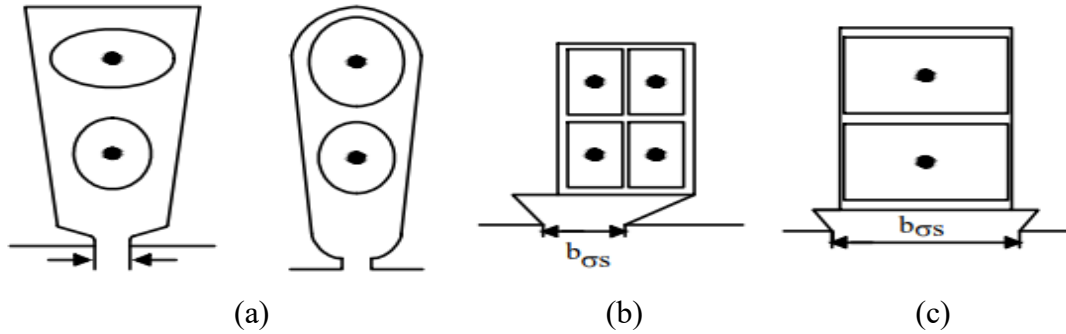
ASM statorunun çapını seçerken çevresel hız dikkate alınır. Çevresel hızın yaklaşık 30m/s'yi aşmaması önerilmektedir (C. G. Veinott,1959; W. L. Soong ve ark., 2000).

### 2.6.2. Standart Çerçeveler

Standart asenkron motor çerçeveleri, makinenin genel mekanik yapısını belirler. Çerçeve şunları içerir: stator, yataklar, uç kapak ve terminal kutusu. Havalandırmanın yanı sıra tork iletilirken güvenlik, bükülme kuvvetlerine ve şoka dayanma yeteneği sağlar. Birkaç özel makinenin dışında, endüstriyel uygulamalar için tüm modern makinelerin üreticileri, geniş bir güç derecelendirme aralığını kapsayan bir dizi standart çerçeve sağlar (P. C. Sen, 1997; B. J. Chalmers and A. C. Williamson, 1991). Asenkron makinelerin hava aralığı nispeten küçük olduğundan, stator ve rotoru eş merkezli tutmak için çerçeve yapısı rijit olmalıdır, aksi takdirde dengesiz manyetik çekmeye neden olabilir (S. J. Chapman; 1999; P. C. Sen, 1997). Çerçeve döküm veya fabrikasyon olabilir. Yaklaşık 50kW gücündeki makinelerin kasaları genellikle güçlü bir silikon alüminyum alaşımından ve bazı durumlarda stator nüvesi dökümden yapılmıştır. Daha fazla mekanik mukavemetin gerekli olduğu yerlerde kesit çerçevesi. Döküm çerçeveler işleme gerektirmez (C. A. Gross, 2007; T. L. Mthombeni ve diğ., 2007). Küçük makinelerin kasası genellikle tek bir ünedir ve bir taban plakası üzerinde gelir. Büyük boyutlu makinelerin çerçeveleri birkaç çelik levhadan oluşur. Tasarıma bağlı olarak, çerçeve uyarlanabilir ve değiştirilebilir.

### 2.6.3. Asenkron Makinelerin Stator Yapısı

Stator, laminasyonlardan yapılmış bir silindirden oluşur. Stator laminasyonları paketlenir ve bir çerçeveye yerleştirilir. Stator nüvesi, çelik israfını önlemek için büyük makinelerde segmentler halinde lamine edilmiştir. Silikon-çelik tipine bağlı olarak, her bir segmentin dış ark uzunluğu 0,3 ila 0,8 m arasında olabilir (O. Barre and B. Napame, 2015). Bu, kalıp maliyeti, montaj maliyeti ve laminasyonları çelik şeritlerden kestikten sonra kalan hurda malzeme miktarı arasında ekonomik bir denge sağlayacaktır. Verimli bir soğutma için uzun saç paketleri istiflenerek radyal hava kanalları arasına sıkıştırılmıştır. Tek bir nüve istifinin genişliği 0,5 ila 0,6 m'yi geçmemelidir (A. K. Sawhney, 1984; T. L. Mthombeni ve diğ., 2007; B. Amin; 2001). Oluk geometrisi, ASM'nin güç değerlerine göre tasarlanmıştır. Oluk geometrisinin ASM'lerin çalışma performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Şekil 2.4'de gösterildiği gibi oluklar, iletken tipine bağlı olarak açık veya yarı kapalı olabilir (Boldea and S. A. Nasar, 2010).



Şekil 2.4. Bobin sargılarını yerleştirmek için oluk geometrisi a) yarı kapalı, b) yarı açık, c) açık

Yarı kapalı oluklar, daha küçük mıknatıslanma akımı değerlerine neden oldukları için asenkron motor için kullanılır. Bahsedildiği gibi, yarı kapalı oluklar, açık oluklara kıyasla daha düşük dış titreşim kaybına ve çok daha sessiz bir çalışmaya sahip olacaktır (K. Wilkinson, 1965). Ayrıca açık oluk veya yarı açık olukların ağızlarına, sarımları merkezkaç kuvvetlerinden korumak için takozlar sokulur ve bunlar genellikle ahşap veya bakalitten yapılır. Açık tip oluklara sahip küçük ASM'lerde çok sayıda dar oluğun titreşim kayıplarını ve gürültüyü en aza indirmesi önerilir (E. R. Laithwaite, 1966) Çeşitli kaynaklarda, oluklar iletkenlerin kullanıldığı küçük ASM'lerde, belirli bir dış akısı yoğunluğu için maksimum oluk alanını verdiği için paralel kenarlı dış

düzenlemesine sahip konik oluk yapısının yararlı olduğu bildirilmektedir. Çok sayıda stator oluğu, dişlerin mekanik olarak zayıflamasına yol açabilen küçük bir stator diş genişliğine neden olacaktır. Ayrıca, ince stator ve rotor dişleri, dişlerde aşırı akı yoğunluğu seviyelerine ve daha yüksek demir kayıplarına neden olabilir. Ayrıca, kutup başına oluk sayısı azalırsa kaçak reaktansı da artar, bu da daha az bobin sayısı nedeniyle sargı maliyetini düşürür. Öte yandan, çok sayıda oluk, kaçak akıya neden olur ve dolayısıyla kaçak reaktans azalır, bu da daha yüksek bir aşırı yük kapasitesi ile sonuçlanır. Artan bobin sayısı nedeniyle daha fazla sayıda oluk ile maliyet de artar. Bu nedenle, ekonomik olarak mümkün olduğu kadar çok oluk kullanmak iyi bir uygulamadır. Genellikle, ASM'lerdeki oluk alanı faktörleri 0,25 ile 0,4 mm arasındadır. Yüksek gerilim makineleri, büyük yalıtım kalınlıkları nedeniyle daha düşük alan faktörlerine sahiptir (M. Cistelean and E. Demeter, 1997).

#### **2.6.4. Asenkron Makinelerin Rotor Yapısı**

Rotor nüvesi, küçük makinelerde tek plaka, büyük makinelerde segmental plaka olarak lamine edilir. Rotor saç paketi mile bir halka ile kilitlenmiştir. Halka, plakaları bir arada tutar ve anahtar, torku mile aktarır ve genellikle rotor nüvesinin eğrilmesine neden olur. Harmonikleri azaltmanın en basit yolu eğiltmektir. Ancak bu durum, makinenin güç faktörünü ve aşırı yük kapasitesini düşürür. Bu nedenle, burada büyük bir hava aralığı uzunluğunun harmonik torkları azaltabileceğini, ancak aynı zamanda ASM'deki güç faktörünü ve aşırı yük kapasitesini de azalttığını belirtmek daha iyidir. Yeterli hava sirkülasyonu sağlamak için makinenin boyutuna bağlı olarak rotor içerisine radyal ve aksel havalandırma kanalları yerleştirilmiştir. Rotordaki radyal havalandırma kanallarının sayısı genellikle statordakine eşittir (J. H. Walker; 1981). Genel olarak, rotor için faz-kutup başına tamsayı oluk sayısına sahip sargılar kullanılır ve statordaki faz-kutup başına oluk sayısına eşit olamaz. Literatürde, her bir sincap kafesli ve sargı rotorlu asenkron makinesi için faz-kutup başına slot sayısını seçmek için farklı politikalar mevcuttur (J. Staszak, 2013). Örneğin, SRAG'lerde tamamen simetrik sargılar üretmek için faz-kutup başına oluk sayısının (q) bir tam sayı olması önerilir. Bununla birlikte, hava aralığı akı yoğunluğunun harmonik içeriğini azaltmak için küçük SRAG'ler için rotorda kesirli yarı sargılarının kullanılması önerilir (A. K. Sawhney, 1984).

### 2.6.5. Hava Aralığı

Bir asenkron makinesindeki hava aralığının uzunluğu, mıknatıslanma akımını en aza indirmek ve çalışma güç faktörünü iyileştirmek için mekanik olarak mümkün olduğunca küçük olmalıdır. Büyük bir hava aralığı akı titreşim kaybını azaltabilir, ancak küçük bir eksantriklik ve dengesiz bir manyetik çekme yaratır. Hava aralığı uzunluğunu hesaplamak için çeşitli deneysel denklemler literatürde aşağıdaki şekliyle önerilmektedir. (T. A. Lipo, 2004; M. G. Say, 1976).

$$g = 0,2 + 2 \sqrt{D_{iç} \cdot l_i} \quad (2.4)$$

Asenkron makinelerde soğutmayı kolaylaştırmak için büyük bir hava aralığı uzunluğunun daha iyi olacağı bildirilmektedir. Zikzak akı yolundaki direnç değişimi, ASM'lerdeki gürültünün sebebidir. Büyük bir hava aralığı uzunluğu hem kaçak reaktans değerini hem de makinenin gürültü seviyesini azaltan zikzak akısını azaltır (B. Amin, 2001; D. M. Ionel ve diğ., 1998). Zayıf bir güç faktörü ile sonuçlanacak mıknatıslanma akımını sınırlamak için hava aralığındaki akı yoğunluğu orta düzeyde olmalıdır. Ancak asenkron motorlarda hava aralığındaki akı yoğunluğu, manyetik devrenin hiçbir yerinde doygunluk olmayacak şekilde olmalıdır. Ayrıca hava aralığındaki büyük akı yoğunluğu, yüksek demir kaybına neden olarak makinenin verimini düşürür.

### 2.6.6. Kayıplar ve Verimlilik

ASM'lerde geleneksel kayıplar, yüke bağlı kayıpları (stator bakır kayıpları, rotor bakır kayıpları ve diğer kayıplar) ve yükten bağımsız kayıpları (nüve kayıpları, sürtünme ve rüzgâr kayıpları) içerir (N. Christofides, 1965). Asenkron motorlarında, belirli bir akım için makinenin sonlu stator sargı direnci nedeniyle stator bakır kaybı baskın kayıptır. Oluk dolgusunun optimum tasarımı, stator nüvesinde daha kalın iletkenler ve kolay havalandırma kullanarak bakır kayıplarını azaltmaya yardımcı olabilecek geniş bir oluktur. Ancak bu, stator manyetik malzemesinin hacmini azaltarak doymasına ve nüve kaybını artırmasına neden olur, Rotordaki bakır kayıpları, rotor iletken çubuklarında veya sargılarında ısınmaya neden olur. Bu kayıplar, sargı için daha düşük dirençli büyük rotor çubukları veya iletkenler kullanılarak azaltılabilir (A. K. Sawhney, 1984),

Ayrıca iletkenin kesit alanı arttığında ve gerilim aynı olduğunda daha ince yalıtım kullanılabilir. Burada malzeme maliyeti ve oluk alanı dikkate alınmalıdır.

## **2.7. Sonuç**

Belirtildiği gibi, ASM'ler bugün endüstride kullanılan elektrik motorları arasında en popüler olanıdır. Ayrıca, ASM'ler için ortaya çıkan güçlü bir uygulama rüzgâr enerjisi sektöründedir. Bu bölüm, Asenkron makinelerinin tasarımıyla ilgili önemli hususları özetlemiştir. ASM'lerin tasarım optimizasyon süreci, performansı, kayıplar ve verimlilik açısından ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Sonuç olarak, ÇBAG'lerin tasarımı, REDS'lerdeki uygulamaları nedeniyle daha iyi verimliliğe sahip olmak için daha fazla araştırma gerektirir.

### 3. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN TASARIMI

Asenkron makineler için tasarım aşamaları önceki bölümde tartışılmıştır. Bu bölümde, ÇBAG'ün boyutlandırma denklemleri verilerek tasarım algoritmasını kapsamında analitik hesaplamalar verilmiştir. ÇBAG rotorunun bir dönüştürücü tarafından uyarıldığı ve gücün stator veya rotor yoluyla şebekeye aktarılacağı varsayılmaktadır.

#### 3.1. Giriş

ÇBAG'lerin elektromanyetik tasarım aşamaları, stator-rotor nüvelerinin boyutlandırılması, stator- rotor sargı tasarımı, mıknatıslanma akımı hesabı, eşdeğer devre parametresinin belirlenmesi ve verim hesabı şeklinde sunulmuştur.

#### 3.2. Stator Tasarımı

Statorun iç çapı, kayma rotoru gerilimi ( $f_{xt}$ ) olarak bilinen bir faktöre bağlıdır. Bu kayma rotor gerilimi tork ile artar ve 1,5 ile 6N /cm<sup>2</sup> arasında değişir (T. A. Lipo, 2011). Kesme rotoru gerilimi, stator iç çapını ( $D_{iç}$ ) hesaplamak için kullanılır.  $D_{iç}$ 'ni hesaplamak için elektromanyetik tork, makinenin giriş gücü ve beklenen verimlilik temel alınarak maksimum hızda tahmin edilmelidir. Elektromanyetik güç ( $S_{gN}$ ) aşağıdaki gibidir:

$$S_{gN} \approx \frac{S_{SN} + S_{RN}}{\eta_N} \quad (3.1)$$

Burada,

$S_{gN}$ : Elektromanyetik güç;

$S_{SN}$ : Güç faktöründe stator tarafındaki güç;

$S_{RN}$ : Güç faktöründe rotor tarafındaki güç;

$\eta_N$ : Beklenen verimlilik;

Karşılık gelen elektromanyetik tork  $T_e$ , (I. Boldea ve S. A. Nasar, 1998);

$$T_e = \frac{S_{gN}}{2\pi \frac{f_1}{p_1} (1 + |S_{max}|)} \quad (3.2)$$

Buradan;

$f_1$ : Frekans

$p_1$ : Kutup çifti sayısı;

$S_{max}$ : Maksimum kayma;

Maksimum kayma, anma kaymasından farklıdır.  $S_{max}$ , makineyi maksimum dönüş hızına göre tasarlamak için kullanılır. Bu nedenle, stator çapı  $D_{iç}$  şu şekilde olarak ifade edilebilir (A. K. Sawhney, 1984):

$$D_{iç} = \sqrt[3]{\frac{2xT_e}{\pi x \lambda x f_{xt}}} \quad (3.3)$$

$$\lambda = \frac{l_i}{D_{iç}} ; \quad 0,2 < \lambda < 1,5 \quad (3.4)$$

Burada,

$\lambda$ : En-boy oranı;

$l_i$ : Stator saç paketinin uzunluğu;

En-boy oranı, 1 civarında bir değer yaygın olmakla birlikte, aynı zamanda aynı laminasyon kullanılarak değişik amaçlarda farklı paket boyu uzunlukları ile boy/çap oranları 3:1 veya daha fazla aralıkta değişmektedir. Çok büyük boy/çap oranı yetersiz yanal rijitlik nedeniyle tercih edilmemektedir. Yüksek moment-atalet istendiği uygulamalarda ise bu oran 1'den daha küçük değerler alabilmektedir.

Tablo 3.1'de kutup sayısı-çap oranı ilişkisi yaklaşık olarak verilmiştir. Bu değerler stator boyunduruğun doymasını önlemek için ölçülür (I. Boldea and S. A. Nasar, 2010; M. G. Say, 1958)

Tablo 3.1. Kutup sayısı-çap oranı ilişkisi

Kutup çifti sayısı	2	4	6	8	$\geq 10$
$D_{dış}/D_{iç}$	1.65-1.69	1.46-1.49	1.37-1.40	1.27-1.30	1.24-1.20

Stator  $I_{SN}$ 'sindeki güç faktöründeki anma stator akımı;

$$I_{SN} = \frac{S_{SN}}{\sqrt{3}V_{SN}} \quad (3.5)$$

Burada,

$V_{SN}$ : Nominal stator gerilimi;

Hava aralığı akı yoğunluğu ( $B_g$ ) genellikle 0,65 ile 0,8 arasında alınır ve faz başına hava aralığı elektromotor kuvveti (emf)  $E_s$  aşağıdaki gibidir (I. Boldea and S. A. Nasar, 2010; B. J. Chalmers and A. C. Williamson, 1991):

$$E_s = K_E \frac{V_{SN}}{\sqrt{3}} ; \quad K_E = 0,97 \quad (0,97 < K_E < 0,98) \quad (3.6)$$

Burada,

$K_E$ : emf katsayısı;

Kutup adımı  $\tau$  şu şekilde hesaplanır:

$$\tau = \frac{\pi D_{iç}}{2p_1} \quad (3.7)$$

Faz başına sarım sayısı, faz başına emf'ye ( $E_s$ ), kutup adımına ( $\tau$ ) ve sargı faktörüne ( $K_{W1}$ ) bağlıdır. Temel sargı faktörü şu şekilde hesaplanır (I. Boldea and S. A. Nasar, 2010):

$$K_{W1} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{q_1 \sin \frac{\pi}{6q_1}} \sin \frac{\pi y}{2 \tau} ; \quad \frac{2}{3} \leq \frac{y}{\tau} \leq 1 \quad (3.8)$$

Burada,

$q_1$ : Statordaki kutup başına oluk sayısı

$y/\tau$ : Stator bobin açıklığı/kutup adımı;

Faz başına sarım sayısı ( $W_1$ ) (I. Boldea and S. A. Nasar, 2010; M. G. Say, 1958):

$$W_1 = \frac{E_s}{2\sqrt{2}f_1 W_1 K_{W1a} B_g \tau l_i} \quad (3.9)$$

Bobin başına sarım sayısı ( $n_{c1}$ ) aşağıdaki gibi hesaplanır

$$n_{c1} = \frac{W_1}{\left(\frac{2p_1q_1}{a_1}\right)} \quad (3.10)$$

Burada  $a_1$ , stator sargısındaki paralel kol sayısıdır.

Stator kutup adımı ( $\tau_s$ ) şu şekildedir:

$$\tau_s = \frac{\pi D_{i\zeta}}{m2p_1q_1} \quad (3.11)$$

Burada,

$m$ : Faz sayısı;

Stator kutup sayısı ( $N_s$ ):

$$N_s = 2p_1q_1m \quad (3.12)$$

Stator iletken kesit alanı ( $A_{cos}$ ) aşağıdaki gibidir:

$$A_{cos} = \frac{I_{SN}}{a_1j_{cos}} \quad (3.13)$$

Burada,

$j_{cos}$ : Stator akı yoğunluğu;

İletkenlerin soğutma sistemi ve kesiti, makinenin statorunda ve rotorunda seçilen akı yoğunluklarına bağlıdır. Kullanılabilir stator oluk alanı  $A_{su}$ :

$$A_{su} = \frac{z_1n_{c1}A_{cos}}{k_f} \quad (3.14)$$

Burada,

$z_1$ : Oluk başına iletken sayısı;

$k_f$ : Oluk doluluk oranı;

Genel olarak, oluk genişliği ( $W_s$ ), ÇBAG'ler için oluk aralığının yüzde 45 ila 50'sidir.

Dikdörtgen oluk yüksekliği ( $h_{su}$ ):

$$h_{su} = \frac{A_{su}}{W_s} \quad (3.15)$$

Hava aralığı uzunluğu ( $g$ ) 'dur (I. Boldea and S. A. Nasar, 2010; M. G. Say, 1958):

$$g = (0,1 + 0,012\sqrt[3]{S_{SN}})10^{-3} \quad (3.16)$$

Stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu  $B_{CS}$  olarak atanırsa, stator boyundurluk ( $h_{CS}$ ) yüksekliği:

$$h_{CS} = \frac{B_g \tau}{\pi B_{CS}} \quad (3.17)$$

Statorun manyetik olarak gerekli dış çapı  $D_{dışm}$ :

$$D_{dışm} = D_{iç} + 2(h_{SU} + h_{CS} + h_{SW}) \quad (3.18)$$

Burada,  $h_{SW}$  : Stator oluk ağzı yüksekliği tasarımda varsa kullanılacaktır.

Bilindiği gibi, alternatif akım (a.a) tarafından akan bir iletkendeki (veya bir iletkenler grubundaki) akı ve akım yoğunluğu dağılımı akımlar ve bazı hava boşlukları olan manyetik bir nüvele çevrelenmesi deri etkilerine neden olabilir. Deri etkisi, iletkenin etkili direncini, yüzey derinliğinin daha küçük olduğu daha yüksek frekanslarda artırır ve sonuç olarak iletkenin etkin kesitini azaltır. Deri etkisi faktörü, bir dizi denklem kullanılarak hesaplanır. Başlangıçta, bir tel oranının hesaplanmasını gerektirir,  $\beta$  (M. G. Say, 1958; I. Boldea and S. A. Nasar, 2010):

$$\beta = \sqrt{\frac{W_1 \mu_0 \sigma_{co} a_{ce}}{2 W_S}} \quad (3.19)$$

$\beta$ : Tel oranı;

$\omega_1$ : Açısal hız;

$\mu_0$ : Havanın geçirgenliği;

$\sigma_{co}$ : Elektriksel iletkenlik;

$a_{ce}$ : İletken kesit alanı;

Deri etkisi faktörünü hesaplamak için direnç ( $\varphi(\xi)$ ) ve slot kaçak endüktansı ( $\psi(\xi)$ ) düzeltme katsayıları gereklidir.

$$\varphi(\xi) = \xi \frac{\sin h2\xi + \sin 2\xi}{\cos h2\xi + \cos \xi} ; \quad \psi(\xi) = 2\xi \frac{\sin h\xi + \sin \xi}{\cos h\xi + \cos \xi} \quad (3.20)$$

burada,  $\xi = \beta \times h_c$  ve  $h_c$  iletken kalınlığıdır. Ayrıca deri etkisi katsayısı ( $K_{rme}$ )

$$K_{rme} = \varphi(\xi) + \frac{m_e^2 - 1}{3} \psi(\xi) \quad (3.21)$$

Burada,  $m_e$  iletken şerit sayısıdır. Ayrıca, ek deri etkisi katsayısı ( $K_{rad}$ ) 'dır (I. Boldea and S. A. Nasar, 2010):

$$K_{rad} = 4\beta^4 \cdot h_c^4 \left( \frac{l_i}{l_{sarım}} \right)^2 n_{cn}^2 \frac{(1 + \cos \gamma)^2}{4}$$

$$\gamma = \left( 1 - \frac{y}{\tau} \right) \frac{\pi}{2} \quad (3.22)$$

Burada,  $l_{sarım}$  bobin uzunluğudur. Toplam deri etkisi faktörü ( $K_R$ ) (I. Boldea and S. A. Nasar, 2010):

$$K_R = 1 + (K_{rme} - 1) \frac{l_i}{l_{sarım}} + K_{rad} \quad (3.23)$$

Toplam cilt etkisi faktörü, büyük makinelerde kayıp hesaplamaları nedeniyle çok önemlidir.

### 3.3. Rotor Tasarımı

Rotor tasarımı, maksimum rotor gerilimine karşılık gelen ( $V_{RN} \leq V_{SN}$ ) maksimum hıza ve güce, yani  $P_{RN}$  dayalıdır. Ek olarak, statordaki güç faktörünün ÇBAG' ü tasarladığı varsayılır. Bu nedenle, tüm reaktif güç rotor tarafından sağlanır. Sonuç olarak rotor, ÇBAG' deki akımın mıknatıslanmasını da sağlar.

$V_{RN} = V_{SN}$  için  $S_{max}$ 'da, rotor ve stator  $K_{RS}$  arasındaki dönüş oranı denklem 3.24 ve 3.25'te aşağıdaki gibi dikkate alınarak elde edilir (I. Boldea and S. A. Nasar, 2010; I. Boldea, 2006):

$$K_{RS} = \frac{W_2 K_{W2}}{W_1 K_{W1}} = \frac{1}{|S_{max}|} \quad (3.24)$$

Burada,

$W_2$ : Faz başına rotor dönüş sayısı;

$K_{W2}$ : Rotor sargı faktörü;

Rotor tarafına ( $I'_{SN}$ ) aktarılan anma stator akımı:

$$I'_{SN} = \frac{I_{SN}}{K_{RS}} \quad (3.25)$$

Nominal mıknatıslanma akımı ( $I'_m$ ) makine gücüne ve kutup sayısına bağlıdır. İlgili mıknatıslanma akımı şu şekilde ifade edilebilir:

$$I'_m = K_m * I'_{SN} \quad (3.26)$$

$K_m$ , mıknatıslanma akım katsayısıdır ve 0,1 ile 0,3 arasında değişir. Mıknatıslanma akımı katsayısının başlangıçta rotor akımını hesapladığı varsayılır, ancak nihai hesaplama yoluyla en sonunda ayarlanacaktır. Maksimum kaymada gerçek rotor akımı ( $I_{RN}^R$ ) (I. Boldea and S. A. Nasar, 2010; I. Boldea, 2006):

$$I_{RN}^R = \sqrt{I_{SN}'^2 + I_m'^2} = I_{SN}' \sqrt{1 + K_m^2} \quad (3.27)$$

Rotor güç faktörü  $\cos\varphi_{2N}$  şu şekildedir:

$$\cos\varphi_{2N} = \frac{P_{RN}}{\sqrt{3}V_{RN}I_{RN}^R} \quad (3.28)$$

Rotor sargı faktörü ( $K_{W2}$ ), stator sargı faktörü ile benzer şekilde hesaplanır.

$$K_{W2} = \frac{\sin\pi/6}{q_2 \sin\frac{\pi}{6q_2}} \sin\frac{\pi}{2} \frac{\gamma_R}{\tau} \quad (3.29)$$

Burada,  $q_2$  faz-kutup başına rotor sayısıdır. Dolayısıyla, rotor oluk sayısı ( $N_r$ ) şu şekildedir:

$$N_r = 2p_1 q_2 m \quad (3.30)$$

Faz başına rotor dönüşü ( $W_2$ ) (I. Boldea and S. A. Nasar, 2010):

$$W_2 = \frac{W_1 K_{W1} K_{RS}}{K_{W2}} \quad (3.31)$$

Bobin başına dönüş sayısı ( $n_{c2}$ ):

$$n_{c2} = \frac{W_2}{\left(\frac{2p_1 q_2}{a_2}\right)} \quad (3.32)$$

Burada  $a_2$ , rotor sargısındaki akı yollarının sayısıdır. Ayrıca rotor oluk kesit adımı ( $\tau_R$ ), stator oluk adımı benzer ve şu şekilde hesaplanır:

$$\tau_R = \frac{\pi D_{iç}}{m 2p_1 q_2} \quad (3.33)$$

Rotor iletken kesiti ( $A_{cor}$ ):

$$A_{cor} = \frac{I_{RN}}{a_2 \cdot j_{cor}} \quad (3.34)$$

Burada,  $j_{cor}$  rotor akım yoğunluğudur. Rotorun kullanabilir oluk alanı ( $A_{ru}$ ):

$$A_{ru} = \frac{z_2 n_{c2} A_{cor}}{k_f} \quad (3.35)$$

Burada,

$z_2$ : Rotordaki oluk başına iletken sayısı;

Rotor oluk genişliği ( $W_R$ ), ÇBAG'ler için genellikle rotor oluk aralığının %45 ila %55'i arasındadır. Rotor oluk yüksekliği ( $h_{RU}$ ):

$$h_{RU} = \frac{A_{ru}}{W_R} \quad (3.36)$$

Minimum rotor dış genişliği ( $W_{tRmin}$ ) (I. Boldea and S. A. Nasar, 2010; I. Boldea, 2006):

$$W_{tRmin} = \frac{\pi (D_{iç} - 2(g + h_{RU} + h_{RW}))}{N_r} - W_R \quad (3.37)$$

Burada,  $h_{RW}$  rotor oluk yüksekliği O halde, maksimum rotor dişi akı yoğunluğu ( $B_{tRmax}$ ) şu şekildedir:

$$B_{tRmax} = \frac{B_g \tau_R}{W_{tRmin}} \quad (3.38)$$

Rotor nüve akı yoğunluğu olarak  $B_{cr}$  atanırsa, rotor boyundurluğundaki akı yolu ( $h_{CR}$ ) şu şekildedir:

$$h_{CR} = \frac{B_g \tau}{\pi B_{cr}} \quad (3.39)$$

Sonuç olarak, maksimum shaft çapı ( $D_{IR}$ ) şu şekildedir:

$$D_{IR} = D_{iç} - 2(g + h_{RU} + h_{RW} + h_{CR}) \quad (3.40)$$

Mil çapı maksimum değerini geçerse, rotor göbeğinde ve rotor dişlerinde akı yoğunluğu artar. Bu, nüve kaybında artışa neden olur ve ayrıca rotor nüvesinde veya rotor dişlerinde doygunluğa neden olabilir.

### 3.4. Mıknatıslanma Akımı

Şimdiye kadar stator ve rotor tasarımları tartışıldı. Bu bölümde manyetizasyon akımı için analitik hesaplamalar verilmektedir. Tipik bir sargılı rotor asenkron makinesinin rotor ve statorundaki akı yolu Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Amper yasasını ana akının çevresinin yarısı boyunca uygulanırsa, aşağıdaki denklemleri verir (I. Boldea, 2006; M. G. Say, 1958):

$$F_M = (F_{AA'} + F_{AB} + F_{BC} + F_{A'B'} + F_{B'C'}) \quad (3.41)$$

Burada,

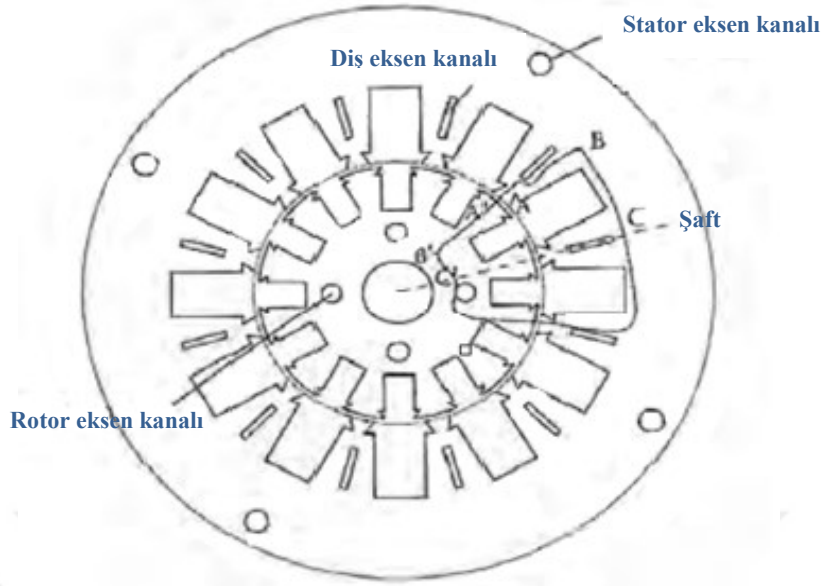
$F_{AA'}$ : Hava aralığı mmf;

$F_{AB}$ : Stator dişleri mmf;

$F_{BC}$ : Stator boyunduruğu mmf;

$F_{A'B'}$ : Rotor dişleri mmf;

$F_{B'C'}$ : Rotor boyunduruğu mmf;



Şekil 3.1. Ana akı yolu

(I. Boldea, The Electric Generators Handbook 2006)

Carter'ın katsayısı, hava aralığı boyunca oluklardan etkilenen manyetik akı yoğunluğu hesabının doğru yapılabilmesi için gerekli bir düzeltme katsayısıdır. Bir asenkron makine için Carter katsayısı, makinenin statoru ve rotorunun çarpımıdır ve şu şekilde ifade edilebilir (I. Boldea, 2006; M. G. Say, 1958):

$$K_C = K_{C1} \cdot K_{C2} \quad (3.42)$$

$$\text{Burada, } K_{C1,C2} = \frac{1}{1 - \gamma_{1,2} \frac{g}{2\tau_{S,R}}} \text{ ve } \gamma_{1,2} = \frac{\left(\frac{2W_{S',R'}}{g}\right)^2}{5 + \frac{2W_{S',R'}}{g}} \quad (3.43)$$

Manyetik takozların  $W_{S'}$  ve  $W_{R'}$  eşdeğer oluk açıklıkları şunlardır:

$$W_{S'} = \frac{W_S}{\mu_{RS}} \text{ ve } W_{R'} = \frac{W_R}{\mu_{RR}} \quad (3.44)$$

Burada,  $\mu_{RS}$  ve  $\mu_{RR}$ , sırasıyla stator ve rotor oluklarıyla ilişkili manyetik takozların göreceli geçirgenlikleridir. Hava aralığı mmf bu nedenle aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$F_{AA'} = g K_C \frac{B_g}{\mu_0} \quad (3.45)$$

Stator nüvesindeki ve dişlerdeki akı yoğunlukları, ilgili mmf'lerini hesaplamak için gereklidir. Stator nüve akı yoğunluğu  $B_{CS}$  olarak atanır ve dişlerdeki akı yoğunluğu ( $B_{ts}$ ) şu şekildedir:

$$B_{ts} = B_g \cdot \frac{\tau_s}{W_{ts}} \quad (3.46)$$

Tablo 3.2.'de %3,5 silikon içeren 0,5 mm kalınlıkta 50 Hz'de silikon-çelik laminasyonunun manyetizasyon eğrisi verilerini göstermektedir. Tablo 3.2'den  $B_{ts}$  ve  $B_{CS}$  için alan yoğunlukları belirlenebilir. Sonuç olarak stator dişleri ( $F_{AB}$ ) ve nüve ( $F_{BC}$ ) mmf'leri şöyledir:

$$F_{AB} = H_{ts} + (h_{su} + h_{sw}) \quad (3.47)$$

$$F_{BC} \approx H_{CS} \cdot l_{csav} \quad (3.48)$$

Burada  $H_{CS}$ , stator nüve akı yoğunluğuna göre tablo 3.2'den seçilir ve  $l_{csav}$ , stator akı yolunun ortalama uzunluğudur.

$$l_{csav} \approx \frac{2\pi(D_{diş} - h_{cs})}{3 \cdot 2.2p_1} \quad (3.49)$$

Rotor diş kısmındaki mmf'yi hesaplamak için ortalama rotor diş akı yoğunluğu gereklidir. Bu akı yoğunluğu şu şekilde ifade edilebilir:

$$B_{tRt} = B_{g1} \cdot \frac{\tau_R}{W_{tR}}, \quad B_{tRm} = B_{g1} \cdot \frac{\tau_R}{W_{tRm}} \quad \text{ve} \quad B_{tRb} = B_{g1} \cdot \frac{\tau_R}{W_{tR}}$$

$$B_{tR} = \frac{B_{tRt} + B_{tRb} + B_{tRm}}{6} \quad (3.50)$$

Burada,

$B_{tRt}$ : Üst rotor diş akı yoğunluğu;

$B_{tRm}$ : Orta rotor diş akı yoğunluğu;

$B_{tRb}$ : Alt rotor dişi akı yoğunluğu;

$H_{tr}$ , tablo 3.2'den alınır ve rotor dişleri mmf ( $F_{A'B'}$ ) şu şekildedir:

$$F_{A'B'} = H_{tr}(h_{RU} + h_{RW}) \quad (3.51)$$

Rotor boyundurluğundaki mmf, stator çekirdeğinininkine benzer şekilde şu şekilde hesaplanır:

$$F_{B'C'} = H_{CR} \cdot l_{CRav} \quad (3.52)$$

Burada,  $H_{CR}$ , rotor göbeği akı yoğunluğuna göre Tablo 3.2'den seçilir ve  $l_{CRav}$ , rotor göbeği akı yolunun ortalama uzunluğudur (I. Boldea, The Electric Generators Handbook, 2006)

$$l_{CRav} = \frac{2\pi(D_{şaft} + h_{CR} + 0,01)}{3 \cdot 2.2p_1} \quad (3.53)$$

Yüksüz rotor akımı ( $I_{R0}$ ) [3], [31]:

$$I_{R0} = F_m \frac{\pi \cdot p_1}{3W_2 \cdot K_{W2} \sqrt{2}} \quad (3.54)$$

Tablo 3.2. Laminasyon mıknatıslanma eğrisi  $B_m(H_m)$  değerleri

B[T]	H[A/m]	B[T]	H[A/m]
0,05	22,8	1,05	237
0,1	35	1,1	273
0,15	45	1,15	310
0,2	49	1,2	356
0,25	57	1,25	417
0,3	65	1,3	482
0,35	70	1,35	585
0,4	76	1,4	760
0,45	83	1,45	1050
0,5	90	1,5	1340
0,55	98	1,55	1760
0,6	106	1,6	2460
0,65	115	1,65	3460
0,7	124	1,7	4800
0,75	135	1,75	6160
0,8	148	1,8	8270
0,85	162	1,85	11170
0,9	177	1,9	15220
0,95	198	1,95	22000
1	220	2	34000

Dikkate alındığı gibi, anma mıknatıslanma akımı  $K_m$  atanarak belirlenir. Stator ve rotor boyutlandırdıktan sonra manyetik akı mmf aşağıdaki gibi yeniden hesaplanabilir:

$$K_m = \frac{I_{R0}}{I'_{SN}} \quad (3.55)$$

$K_m$  atanan değerden büyük olursa, yeni varsayımlar atayarak tasarım sürecinin tekrarlanması gerektirir. Bununla birlikte, daha küçük olan  $K_m$ , soğutma sistemi için kullanılabilen stator dişlerinde doygunluk için daha fazla alan bırakır. Doygunluk faktörü ( $K_S$ ), hava aralığı mmf'ye bölünen tüm demir mmf'lerini açıklar. Doygunluk faktörü aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$K_S = \frac{F_{AB} + F_{BC} + F_{A'B'} + F_{B'C'}}{F_{AA'}} \quad (3.56)$$

Normal ASM'ler için satürasyon faktörü  $K_S \leq 1$  olmalıdır ve  $1 < K_S < 1.6$  ise ASM hafif doymuştur.

### 3.5. Reaktanslar ve Dirençler

Ana ÇBAG parametreleri, statorla ilgili mıknatıslanma reaktansı  $X_m$ , stator ve rotor direnci  $R_s$  ve  $R_r$  ve kaçak reaktanslar  $X_{sl}$  ve  $X_{r'l'}$  dir. Mıknatıslanma reaktansı ifadesi (I. Boldea, The Electric Generators Handbook, 2006; M. G. Say)'dir:

$$X_m = \omega_1 \cdot L_m \quad (3.57)$$

Burada, mıknatıslanma endüktansı ( $L_m$ ):

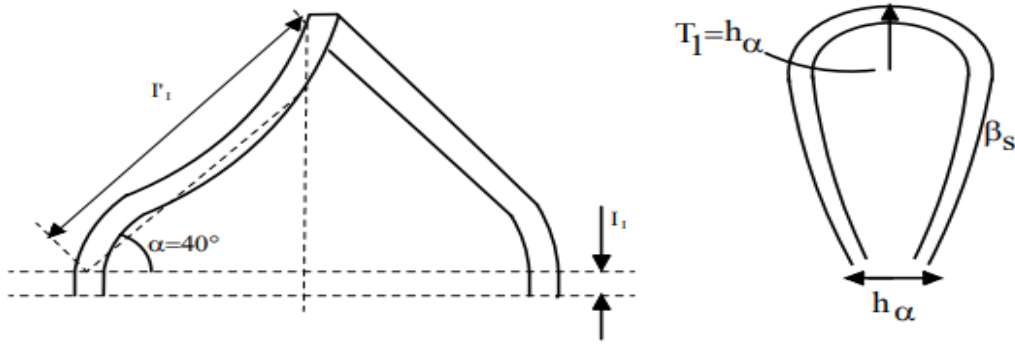
$$L_m = \frac{6\mu_0(W_1K_{WS})^2\tau l_i}{\pi^2 p_1 g K_C (1 + K_S)} \quad (3.58)$$

Faz başına stator direnci  $R_s$ 'dur :

$$R_s = \rho_{c0100^\circ} \frac{W_1 \cdot 2}{A_{cos}} (l_i + l_{fs}) \frac{1}{a_1} \quad (3.59)$$

Burada,  $l_{fs}$ , şekil 3.2'de gösterildiği gibi uç sargı uzunluğudur ve  $\rho_{c0100^\circ}$  olarak ifade edilebilen  $100^\circ$ 'deki bakır öz direncidir (I. Boldea and S. A. Nasar, 1998):

$$l_{fs} = 2(l_l + l_{l'}) + \pi h_{st} = 2 \left( l_l + \frac{\beta_s \tau}{2 \cos \alpha} \right) + \pi h_{st} \text{ ve } \beta_s = \frac{\gamma}{\tau} \quad (3.60)$$



Şekil 3.2. Stator bobin uç bağlantısı

Stator kaçak reaktansı ( $X_{sl}$ ):

$$X_{sl} = \omega_1 \cdot L_{sl} \quad (3.61)$$

Burada  $L_{sl}$  stator kaçak endüktansdır (I. Boldea ve S. A. Nasar, 2010).

$$L_{sl} = \mu_0 (2n_{c1})^2 l_i (\lambda_s + \lambda_{end} + \lambda_{ds}) \frac{N_s}{m a_1^2} \quad (3.62)$$

Oluk geçirgenlik katsayısı ( $\lambda_s$ ), uç bağlantı geçirgenlik katsayısı ( $\lambda_{end}$ ) ve diferansiyel kaçak geçirgenlik katsayısı ( $\lambda_{ds}$ ):

$$\lambda_s = \frac{h_{su}}{3W_s} + \frac{h_{sw}}{W'_s} \quad (3.63)$$

$$\lambda_{end} = 0,34 q_1 \frac{l_{fs} - 0,64 \beta_s \tau}{l_i} \quad (3.64)$$

$$\lambda_{ds} = 0,9 \tau_s (q_1 K_{W1})^2 K_{01} \frac{\sigma_{ds}}{K_C g} \quad (3.65)$$

Burada  $\sigma_{ds}$ , şekil 3.3'te gösterildiği gibi faz-kutup başına düşen oluk sayısına ve tel oranına  $\beta$  bağlı olan stator diferansiyel kaçak katsayısıdır.  $\lambda_{ds}$  terimi genellikle zikzak kaçak akıyı içerir.

Rotor ucu bağlantı uzunluğu  $l_{fr}$  stator ile benzer şekilde belirlenebilir (I. Boldea ve S. A. Nasar, 2010; M. G. Say, 1958):

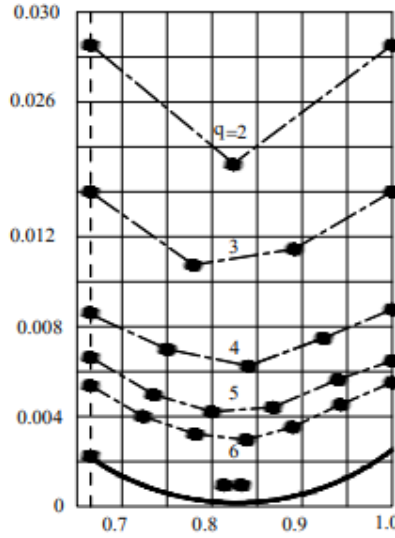
$$l_{fr} = 2 \left( l_i + \frac{\beta_r \tau}{2 \cos \alpha} \right) + \pi(h_{RU} + h_{RW}) \quad (3.66)$$

ve 100C°'de gerçek rotor direnci ( $R_R^R$ ):

$$R_R^R = \rho_{co100^\circ} \frac{2W_2}{A_{cor}} (l_i + l_{fr}) \quad (3.67)$$

$L_{rl}^R$  rotor kaçak endüktansı:

$$L_{rl}^R = \mu_0 (2n_{c2})^2 l_i (\lambda_{SR} + \lambda_{endR} + \lambda_{dR}) \frac{N_R}{m} \quad (3.68)$$



Şekil 3.3. Diferansiyel kaçak Katsayısı  $\sigma_d$

Statora benzer şekilde rotor slot geçirgenlik katsayısı ( $\lambda_{SR}$ ), uç bağlantı geçirgenlik katsayısı ( $\lambda_{endR}$ ) ve diferansiyel kaçak geçirgenlik katsayısı ( $\lambda_{dR}$ ) aşağıdaki gibidir:

$$\lambda_{SR} = \frac{h_{RU}}{3W_R} + \frac{h_{RW}}{W_R} \quad (3.69)$$

$$\lambda_{endR} = 0,34 q_2 \frac{l_{fr} - 0,64\beta_r \tau}{l_i} \quad (3.70)$$

$$\lambda_{dR} = 0,9\tau_R (q_2 K_{W2})^2 K_{02} \frac{\sigma_{dR}}{K_C g}; \quad K_{02} = 1 - 0,033 \frac{V'_R}{g\tau_R} \quad (3.71)$$

Burada rotor diferansiyel kaçak katsayısı ( $\sigma_{dR}$ ), Şekil 3.3'teki  $\sigma_{dS}$  ile aynı şekilde belirlenir. Bu nedenle, gerçek rotor kaçak reaktansı:

$$X_{rl}^R = \omega_1 \cdot L_{rl}^R \quad (3.72)$$

Bu değerleri stator tarafına aktarmak için dönüş oranı ( $K_{RS}$ ) kullanılabilir. Rotor direnci, daha büyük akım yoğunluğu nedeniyle genellikle stator direncinden daha büyüktür.

### 3.6. Elektrik Kayıpları ve Verimliliği

Eşdeğer devre, güç akışını belirlemek (makine çalışma moduna bağlıdır) ve ayrıca verimliliği hesaplamak için kullanılabilir. Stator ( $P_{cos}$ ), rotor ( $P_{cor}$ ) ve bilezik ( $P_{sr}$ ) kayıpları şu şekilde hesaplanır:

$$P_{cos} = 3K_R R_S I_{SN}^2 \quad (3.73)$$

$$P_{cor} = 3R_R^R I_{RN}^2 \quad (3.74)$$

$$P_{sr} = 3V_{SR} I_R^R \quad (3.75)$$

Burada,  $V_{SR}$ : Fırça ile bilezikler arasındaki gerilim düşüşü;

Stator ve rotor nüve kayıpları, Steinmetz tarafından geliştirilen klasik nüve kaybı formülleri aracılığıyla hesaplanır. Stator temel nüve kayıplarını hesaplamak için stator dişleri ve boyundurluk ağırlığı  $G_{ts}$  ve  $G_{cs}$  gereklidir (I. Boldea ve S. A. Nasar, 2010; I. Boldea, The Electric Generators Handbook, 2006):

$$G_{ts} = \left\{ \frac{\pi}{4} \left[ (D_{iç} + 2(h_{su} + h_{sw}))^2 - D_{iç}^2 \right] - N_S \cdot (h_{su} + h_{sw}) \cdot W_S \right\} l_i \gamma_{iron} \quad (3.76)$$

$$G_{cs} \approx \pi (D_{diş} - h_{cs}) \cdot h_{cs} \cdot l_i \cdot \gamma_{iron} \quad (3.77)$$

Statorun temel nüve kayıpları, mekanik işleme ile etkilenebilir. Bu etkiler, diş geçiştirme faktörü olarak  $K_t$  (1,6-1,8) ve boyunduruk geçiştirme faktörü olarak  $K_y$  (1,3 - 1,4) kullanılarak dikkate alınır.

$$P_{irons} = P_{10} \left( \frac{f_1}{50} \right)^{1,5} (K_t B_{ts}^2 G_{ts} + K_y B_{cs}^2 G_{cs}) \quad (3.78)$$

Rotor nüve kayıpları benzer şekilde hesaplanabilir.

Kaçak yük kayıpları, yüzey ve titreşim ilave nüve kayıplarını ( $P_{ad}$ ) içerir. Bu kayıplar, statordaki ve rotordaki hava boşluğundaki oluk açıklığının oranına bağlıdır. Bu kayıplar, stator anma gücünün %5'i olarak sayılabilir. Böylece, toplam elektrik kayıpları ( $\Sigma P_e$ ) şöyledir:

$$\Sigma P_e = P_{cos} + P_{cor} + P_{iron_s} + P_{iron_r} + P_{ad} + P_{sr} \quad (3.79)$$

Mekanik kayıplar (sürtünme ve rüzgâr kayıpları) önemsizdir, ancak toplam gücün %5'inden daha azını oluşturabilirler.

Elektrik verimliliği ise aşağıdaki denklem ile hesaplanır;

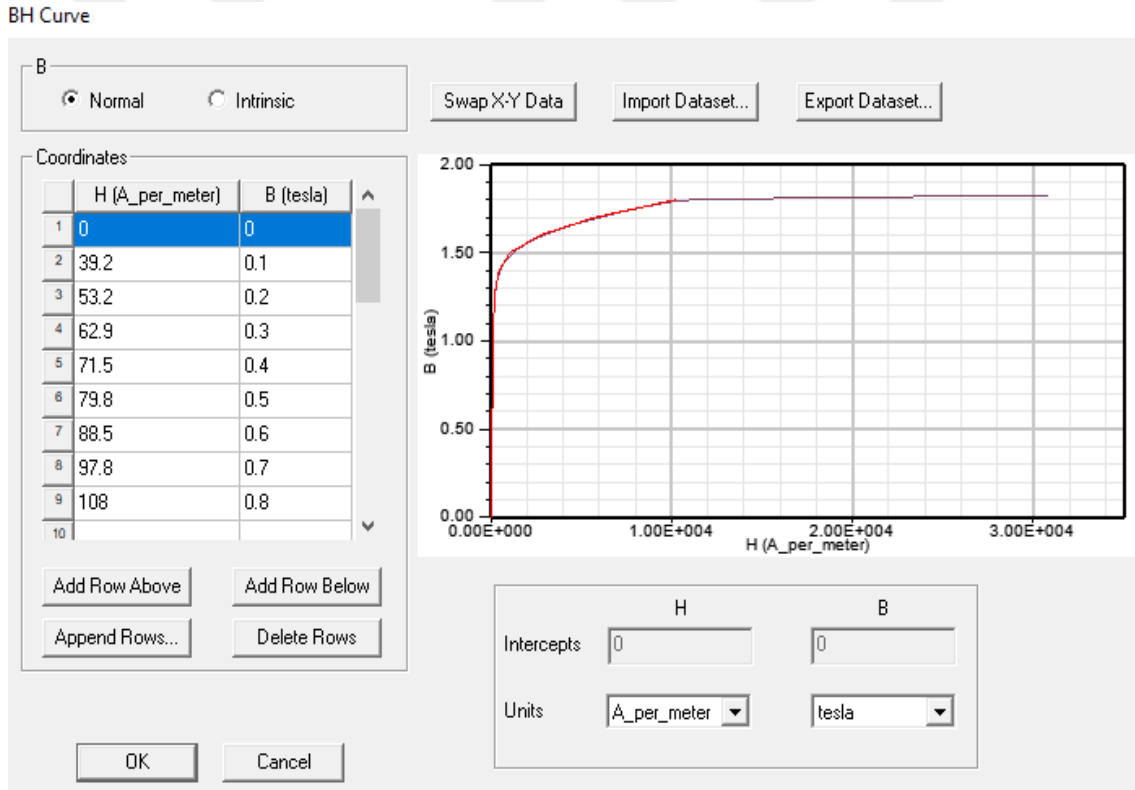
$$\eta_e = \frac{P_{SN} + P_{RN}}{P_{SN} + P_{RN} + \Sigma P_e} \quad (3.80)$$

### 3.7. ÇBAG'ün Simülasyon Analizi

Sargı rotorlu asenkron generatörün ana tasarımın boyutlandırma denklemleri bu bölümün önceki kısımlarında sunulmuştur. Makinenin analitik tasarımını gerçekleştirmek için çeşitli yaklaşımlar kullanılabilir. Bu bölümde, tablo 3.3'teki teknik özelliklerle birlikte bir referans makine sunulmaktadır. ÇBAG'ün tasarım boyutlandırma değerleri Matlab'te hesaplanmıştır ve sonuçlar Ek-A'da bulunan tablo A.1'de verilmiştir. ANSYS RMxpert ve Maxwell 2D, makinenin tasarımını modellemek ve doğrulamak için kullanılmıştır. Makinenin rotorunun bir dönüştürücü tarafından uyarıldığı ve anma hızının 1500 rpm olduğu varsayılmıştır. Stator ve rotor nüvelerinde M530 50A silikon çelik manyetik malzeme kullanılmıştır ve laminasyon kalınlığı 0,5 mm'dir. Şekil 3.4'de ANSYS RMxpert'de tanımlanan M530-50A malzemenin manyetik özellikleri ve B-H karakteristiği sunulmuştur.

Tablo 3.3. ÇBAG'ün elektriksel parametreler

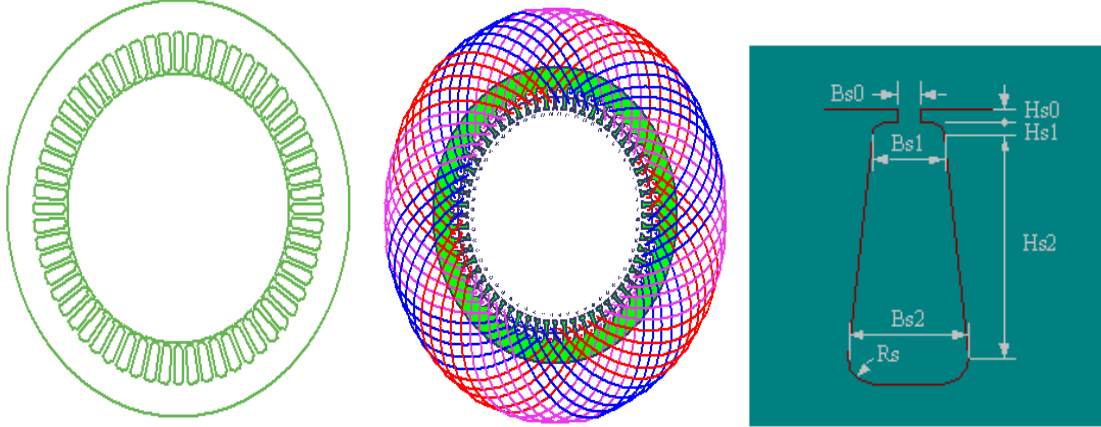
Teknik Data	Sembol	Değer
Güç [MW]	P	2.0
Verimlilik [%]	$\eta$	95,8
Gerilim [V]	$V_{SN}$	690
Kutuplar	2. $p_1$	4
Faz	m	3
Senkron Hız [rpm]	$n_{1N}$	1500
Frekans [Hz]	$f_1$	50
Maks. Kayma	$S_{max}$	$\pm 0,25$



Şekil 3.4. RMXprt'de tanımlanan M530-50A B-H eğrisi ve manyetik değerleri

### 3.7.1. RMXprt’de Statorun Modellemesi

ÇBAG’e ait elektriksel parametreler dikkate alınarak makineye ait genel boyutlandırma denklemleri analitik olarak hesaplanmış (Ek A) ve sonrasında RMXprt’de ön tasarım sonuçları elde edilmiştir. RMXprt’de stator ait geometrik boyutlar Tablo 3.4’de, stator oluk geometrisi ve sargı yapısı Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



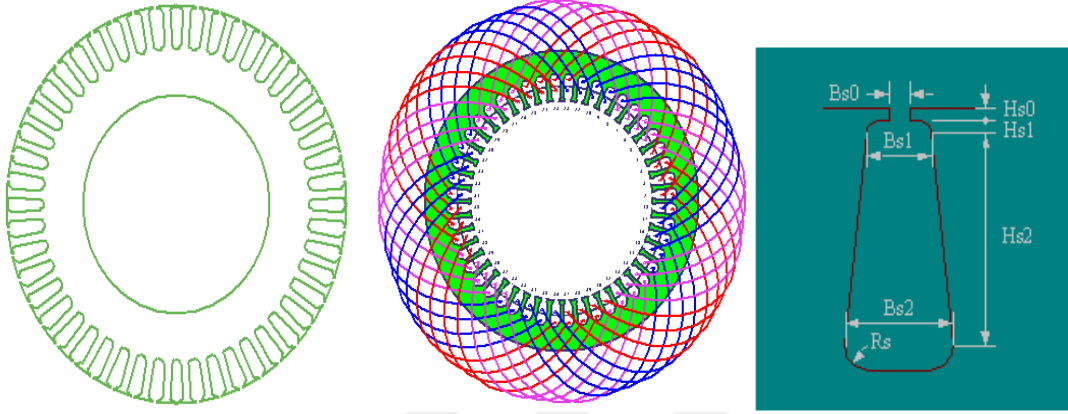
Şekil 3.5. Stator slot geometrisi ve sargı yapısı

Tablo 3.4. ÇBAG’ün Stator geometrisine ait parametreler

Stator Data	Değerler
Slot sayısı	60
Dış Çap[mm]	800
İç Çap [mm]	520
Eksenel uzunluk [mm]	520
Malzeme tipi	M530 50A
Sargı faktörü	0.95
Sargı tel çapı[mm]	4.62
Slot başına iletken sayısı	2
Hs0 [mm]	2.5
Hs1 [mm]	4.5
Hs2 [mm]	64.5
Bs0 [mm]	5.4
Bs1 [mm]	18.47
Bs2 [mm]	25.23

### 3.7.2. RMxprt’de Rotorun Modellemesi

RMxprt’de rotor ait geometrik boyutlar Tablo 3.6’da, rotor oluk geometrisi ve sargı yapısı Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Rotor oluk geometrisi ve sargı yapısı

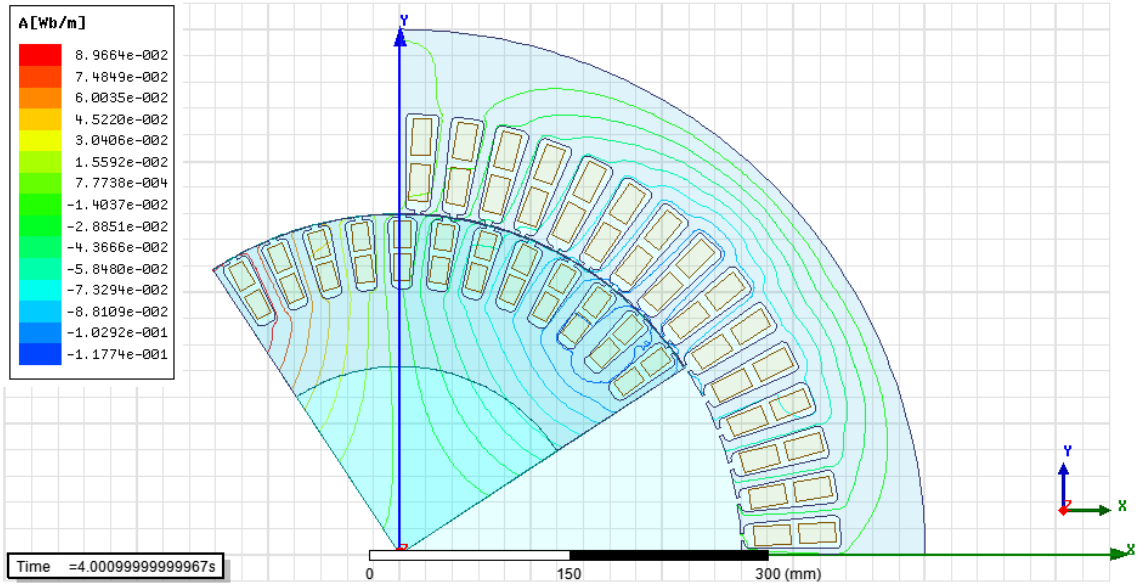
Tablo 3.5. ÇBAG’ün rotor geometrisine ait parametreler

Rotor Data	Değerler
Slot sayısı	48
Dış Çap [mm]	518.4
İç Çap [mm]	287
Malzeme tipi	M530 50A
Sargı faktörü	0.95
Sargı tel çapı [mm]	5.18
Slot başına iletken sayısı	5
Hs0 [mm]	2.5
Hs1 [mm]	4.5
Hs2 [mm]	45
Bs0 [mm]	6
Bs1 [mm]	21.6
Bs2 [mm]	15.7

### 3.7.3. Maxwell 2D Simülasyon Sonuçları

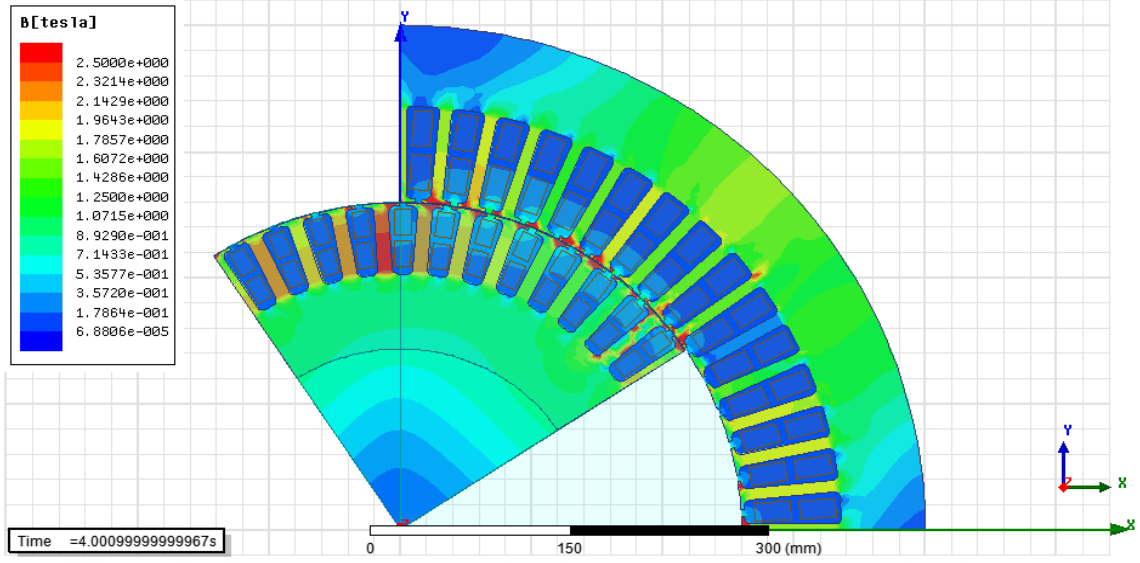
RMxpt'de ÇBAG'ün ön tasarım analizleri nispi çözüm yaptığı için buradaki sonuçlar daha iyi bir analiz için Maxwell 2D'ye aktarılarak Sonlu Elemanlar Analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçları daha kararlı halde görebilmek için simülasyon zamanı 4 s olarak alınmıştır.

Akı dağılımı ve akı yoğunlukları sırasıyla şekil 3.7 ve 3.8'te gösterilmektedir.



Şekil 3.7. ÇBAG'ün statoru ve rotorundaki akı dağılımı

Akı yolları, özellikle manyetik akının bir resmini oluşturmak için yararlıdır. Ayrıca yine kaçak akı tahmini ve kaçak permeance (manyetik iletkenlik) hesaplamak için de kullanılabilir. Şekil 3.6'da analizi yapılan makinenin akı yolları görülmektedir. İlgili iki nokta arasındaki akı, noktalar arasındaki vektör potansiyel farkı ile aksel uzunluğun çarpımı ile hesaplanır. Bu hesaplama, halkalanma akısını (flux linkage) dolayısıyla sargıların endüktansını elde etmek için genişletilebilir.



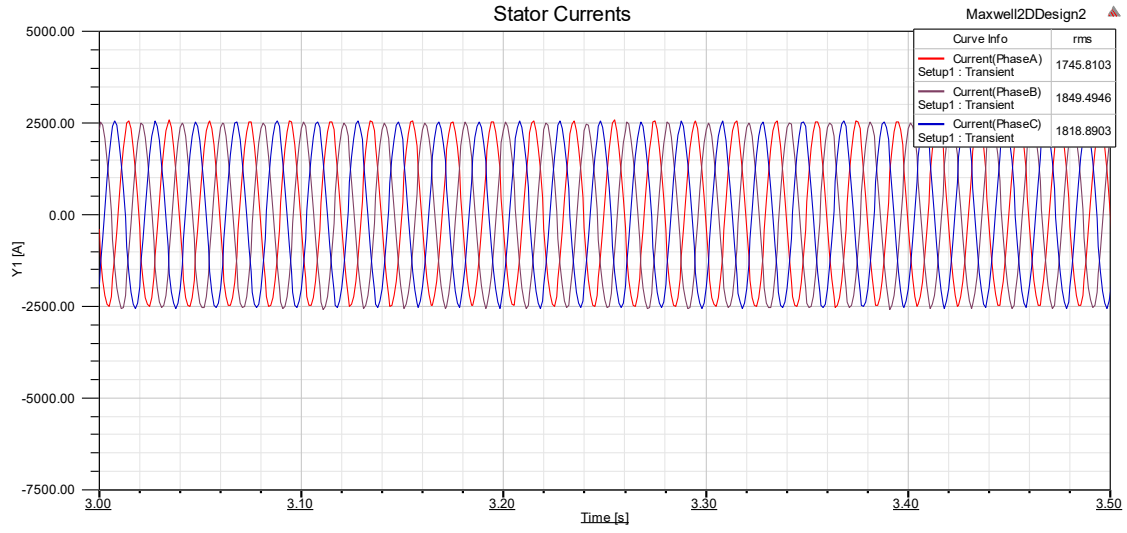
Şekil 3.8. ÇBAG'nün stator ve rotorundaki akı yoğunlukları

Manyetik akı yoğunlukları dağılımı, makine üzerindeki akı yoğunluklarının görülmesi amacı ile renkli bölgelerde yüksek yerel doyma alanları belirtmek için kullanılır. Herhangi bir noktada akı yoğunluğu değerleri makine kesiti üzerinde kolaylıkla görülebilir. Şekil3.8'de makinenin manyetik akı yoğunlukları görülmektedir.

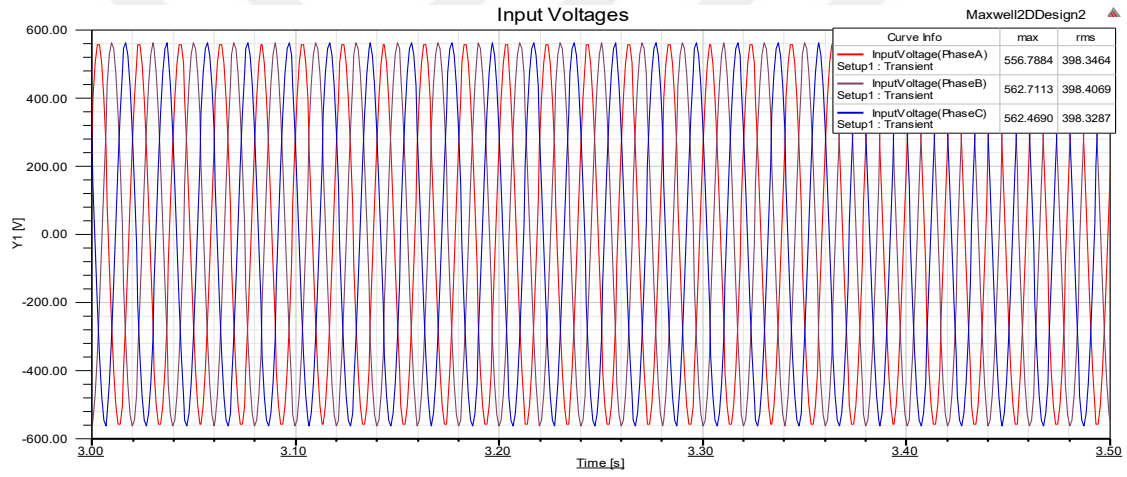
Analitik analiz sonucunda manyetik akı yoğunluğunun 1.7 T civarlarında olacağı hesaplanmıştı. Yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda manyetik akı yoğunluklarının stator, rotor boyunduruklarındaki, hava aralığındaki akı yoğunluğu değerlerinin ve malzemenin B-H karakterisliği dikkate alınarak tasarım kriterlerine uygun değer aralığında olduğu görülmektedir.

Analiz sonucunda genel olarak akı yoğunlukları 1.7 T değerlerini aşmamaktadır. Ancak dişlerin uç kısımlarındaki akı yoğunlukları, kutup geçişleri sırasında akının stator dişlerinde yoğunlaşacağından dolayı bu değerin biraz üzerinde çıkabilmektedir.

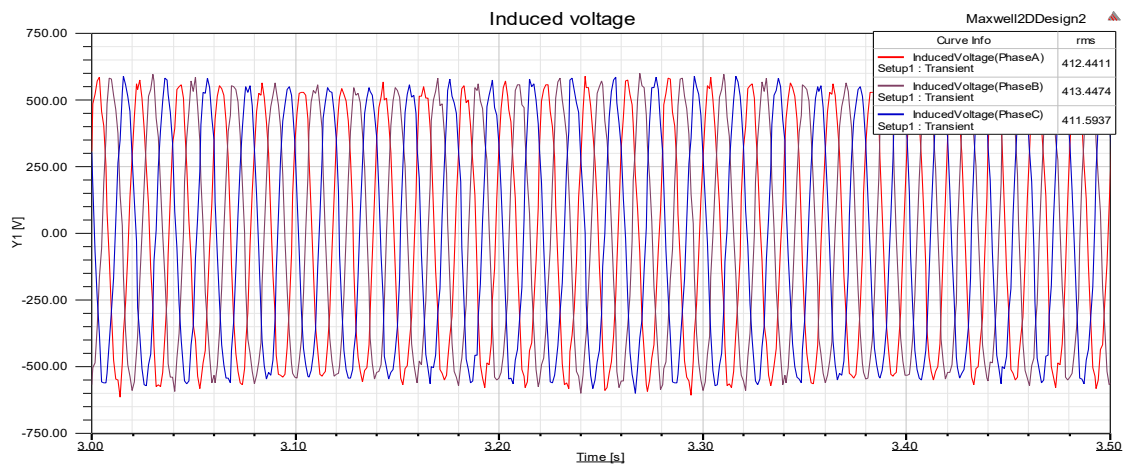
Maxwell 2D'de ÇBAG'e ait transient analizleri 4s için gerçekleştirilerek makineye ait 3 fazlı stator akımı, gerilimleri ve indüklenen gerilim elde edilmiştir. Şekil 3.9 stator akımlarını, şekil 3.10 ise giriş gerilimlerini ve 3.11'de indüklenen gerilim göstermektedir. Pik akım ve gerilim, sabit durumda sırasıyla yaklaşık 1745 A ve 690 V'dir.



Şekil 3.9. ÇBAG'ün 3 fazlı stator akımı

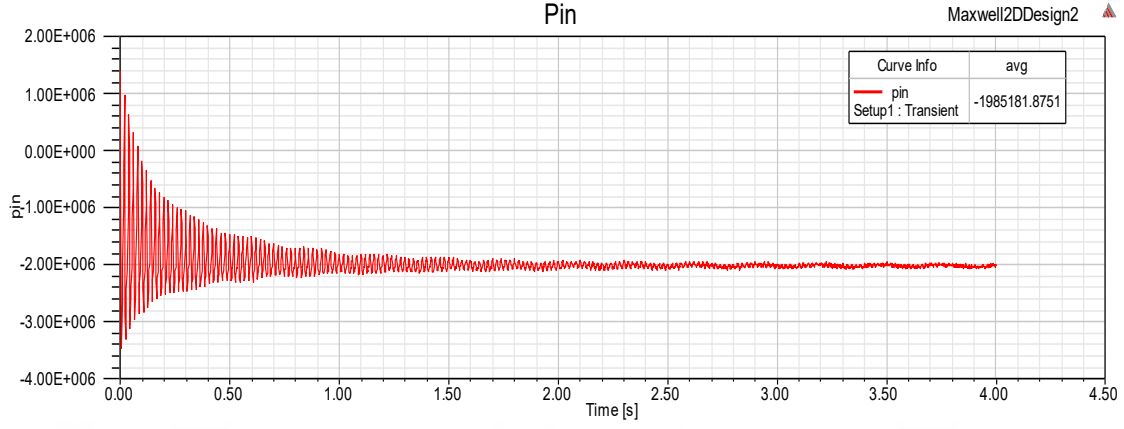


Şekil 3.10. ÇBAG'ün 3 fazlı stator gerilimi

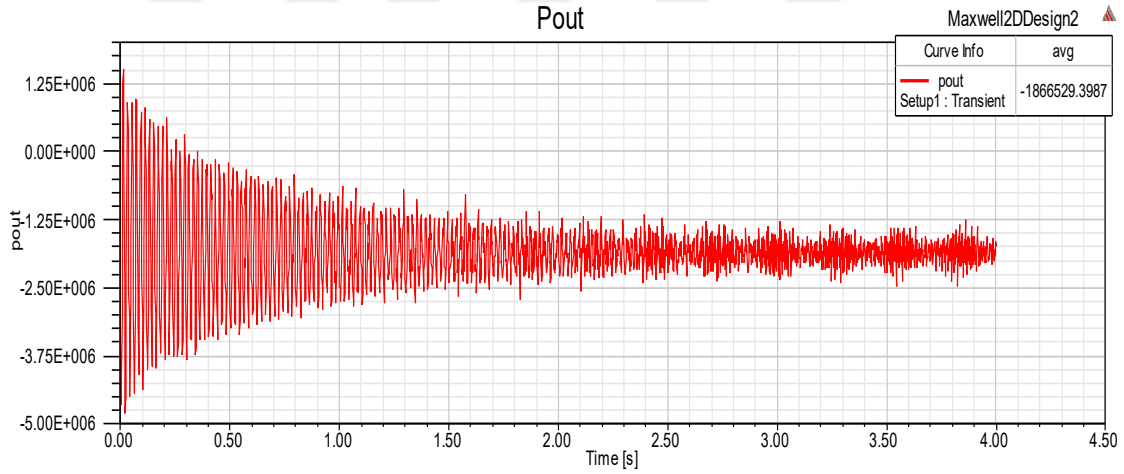


Şekil 3.11. ÇBAG'ün yük altındaki gerilimi

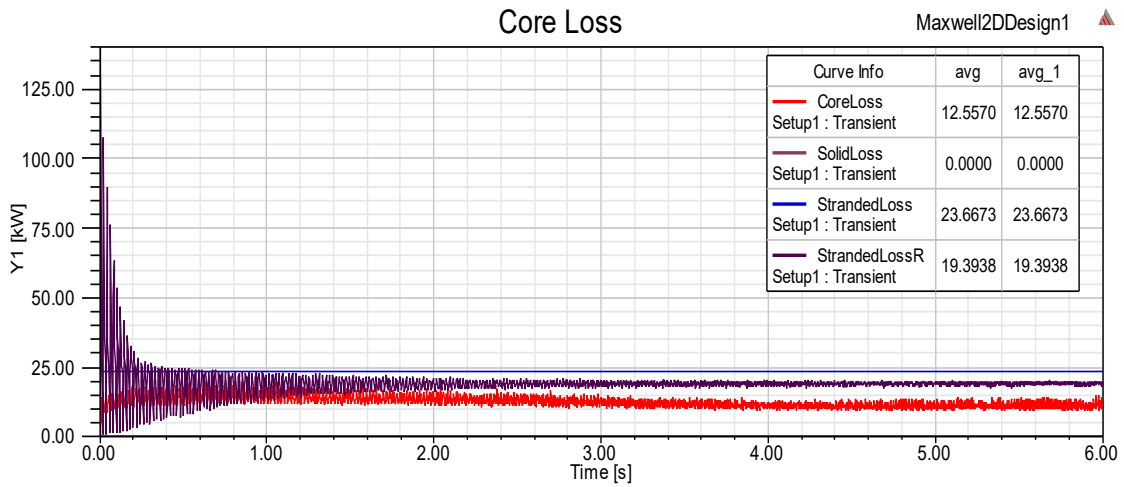
ÇBAG'e ait güç akış analizi yapılarak makineye ait kayıp güçleri sonrasında giriş gücü, çıkış gücü ve nüve kayıpları sonuçları şekil 3.12, 3.13 ve 3.14'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. ÇBAG'ün stator giriş gücü

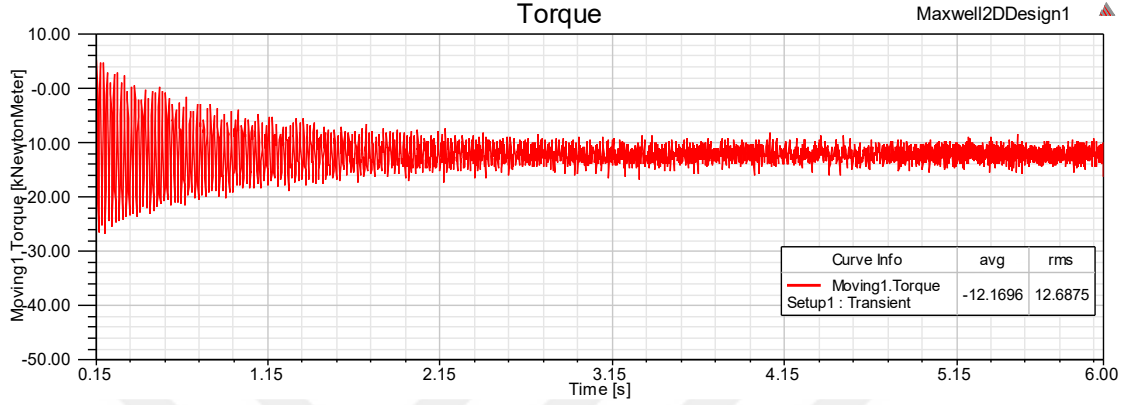


Şekil 3.13. ÇBAG'ün çıkış gücü

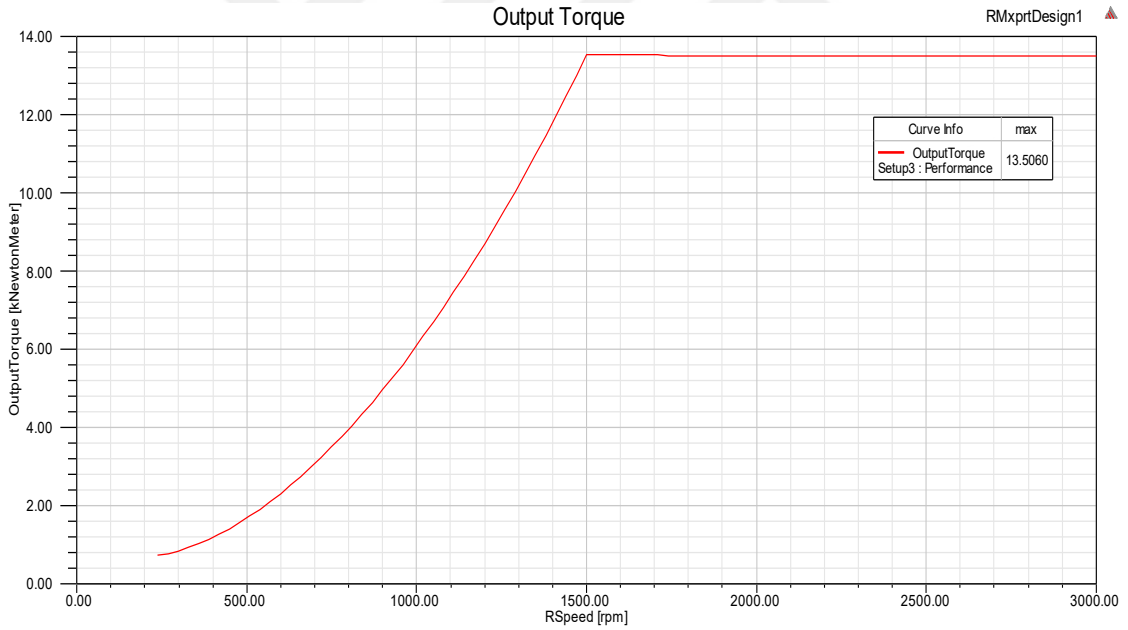


Şekil 3.14. ÇBAG'de stator ve rotor nüve kayıpları

Yük altında şaftta üretilen tork simülasyon grafikleri Şekil 3.15, 3.16’da gösterilmiştir. Yük altında şaftta yüklene tork 12687 N.m. Şekil 3.15’da görüldüğü gibi tasarlanan ÇBAG’ün senkron hızı 1500 rpm de üretilen çıkış torku 13500 N.m dir. Analitik analiz sonucunda çıkış torku ile uyumlu olduğu görülmektedir.

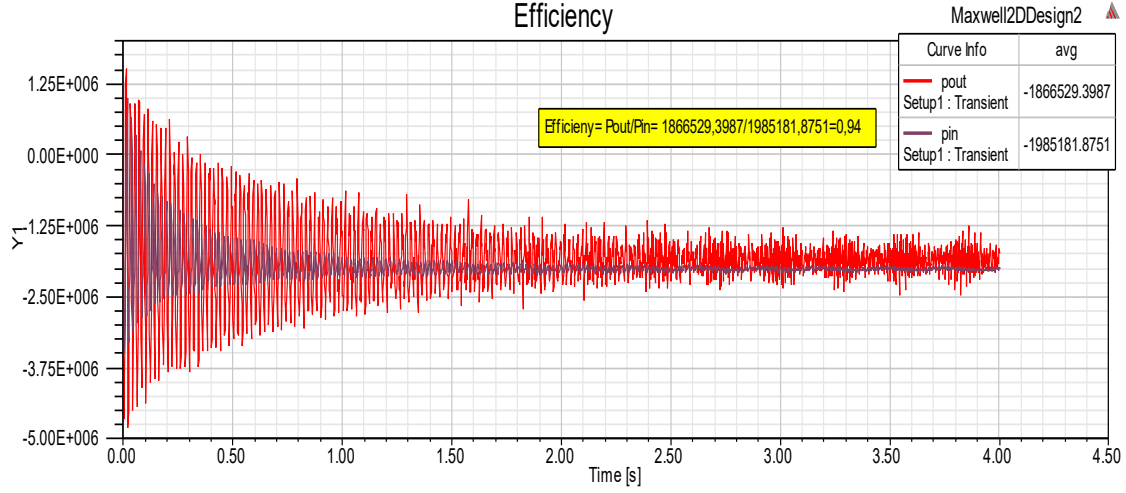


Şekil 3.15. ÇBAG’de üretilen tork



Şekil 3.16. ÇBAG senron hızlarda ürettiği tork grafiği

ÇBAG’ün verim grafiği şekil 3.17’de gösterilmiştir.SEA göre generatörün verimi %94 görülmektedir.Analitik analiz sonucuna göre verim çok yakın değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.17. ÇBAG'ün verimi

### 3.8. Sonuç

Sargı rotorlu endüksiyon makinesinin ana tasarımı için temel boyutlandırma denklemleri bu bölümde sunulmuştur. Bu makinenin tasarımı, boyutlandırma ayrıntılı denklemlerini, kayıp hesaplamalarını ve eşdeğer devre parametrelerini içermektedir. Elde edilen değerlerle ANSYS RMxprt'de ÇBAG tasarımı ön tasarımı gerçekleştirmiş ve buradaki datalar ile Maxwell 2D sonlu elemanlar analizi yapılarak grafik sonuçları sunulmuştur ve doğrulanmıştır. Aşağıda verilen Tablo 3.6 ve 3.7'de ÇBAG'ün analitik ve SEA sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.6. Analitik ÇBAG'ün ve Maxwell SEA tasarıma göre parametreler

Parametre	Analitik ÇBAG	SEA sonuçları
Stator giriş gücü[kV]	2000	1985
Verimlilik [%]	95.7	94
Akım [A]	1673.5	1767
Gerilim [V]	690	690
Tork [N.m]	13270	12687
Nüve kayıpları[kW]	8.97	12.55
Hava aralığı [mm]	1.6	1.6
Hava aralığı akı yoğunluğu [T]	0.75	0.81
Stator nüve akı yoğunluğu [T]	1.5	1.61
Stator dış akı yoğunluğu [T]	1.55	1.62
Rotor nüve akı yoğunluğu [T]	1.87	1.79
Rotor dışı akı yoğunluğu [T]	2.1	2.38
Stator akım yoğunluğu	6.5	6.5
Rotor akım yoğunluğu	8	10

Tablo 3.7. Analitik ve Maxwell SEA göre ÇBAG'ün eşdeğer devre parametreleri

<b>Parametre</b>	<b>Analitik ÇBAG</b>	<b>SEA sonuçları</b>
Stator Direnci ( $R_s$ ) [ohm]	0.0043	0.0021
Stator Kaçak Reaktansı ( $L_s$ ) [ohm]	0.0823	0.0768
Rotor Direnci ( $R_r$ ) [ohm]	0.0052	0.0038
Rotor Kaçak Reaktansı ( $L_r$ ) [ohm]	0.095	0.078
Mıknatıslanma Reaktansı ( $X_m$ ) [ohm]	2.58	2.72

## 4. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN DİNAMİK MODELİ

Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, bir referans makine kullanılarak bir mikro makine tasarlanırken boyutsal bir analiz tekniği gereklidir. Bu teknik, geçici koşullar altında her iki makinede de benzer davranış elde etmek olan ölçeklendirme işleminin amacı ile doğrulanır. Bir ÇBAG'ün normal ve kısa devre koşulları altındaki d-q modeli, kararlı ve geçici durumlardaki parametreleri açıklamak için bu bölümde sunulmuştur.

### 4.1. Giriş

Genel olarak, 3 fazlı asenkron makinelerin çalışmasını bir eşdeğer devre veya denklem sayısı ile göstermek modelleme olarak bilinir. Rüzgâr enerjisi sistemlerinin kararlı durum ve geçici durum özelliklerini araştırmak için bir rüzgâr generatörünün doğru bir dinamik modeli gereklidir. Başka bir deyişle, bu model, geçici koşullar altında makinenin kararlı ve geçici davranışları üzerinde etkili parametrelerin keşfedilmesine yardımcı olur. Bu nedenle, ölçekleme işleminde tanımlanan parametreler ile makinenin eşdeğer devre elemanları arasındaki ilişki dikkate alınmalıdır (I. Boldea ve S. A. Nasar, 2010; A. Trzynadlowski, 1994).

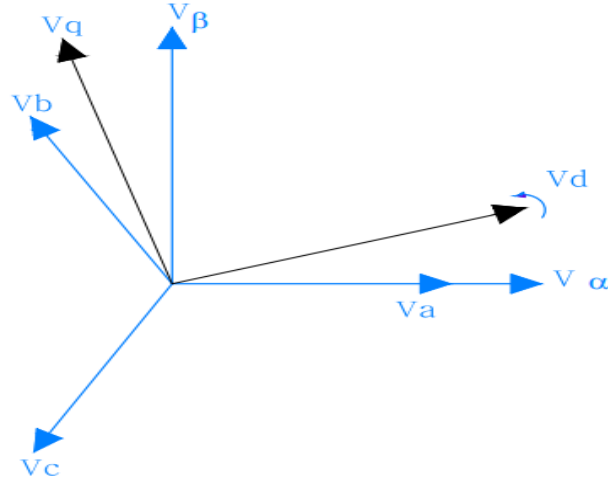
İki fazlı sistemler elektrik makinelerinin modellemelerinde ve teorik analizlerinde önemli kolaylıklar sağladığı için üç fazlı aralarında 120 derece faz farkı bulunan sistemleri durağan düzlemde aralarında 90 derece faz farkı bulunan iki fazlı sistemlere dönüştürülerek sıklıkla kullanılırlar. Ayrıca bu dönüşümler ile kontrol yapılarındaki gereksiz boyut fazlalığı indirgenmiş olur. Fakat iki fazlı duran sistemlerde sinüzoidal işaretlerde periyodik değişim gerçekleştiği için duran eksenden senkron hızla dönen eksene geçiş tercih edilir. Yapılan dönüşümler ile işaretlerin sürekli halde sabit bir değerde kalması sağlanır Gerçekleştirilen dönüşümler gerilim işareti baz alınarak verilecek olsa da diğer elektriksel değişkenler için de (akım, akı, vb.) aynı dönüşüm matrisleri kullanılabilir. Üç fazlı dengeli gerilim bileşen formülleri (4.1, 4.2, 4.3)'te ifade edilmiştir (İ. Erdem, 2019).

$$V_a = \cos \omega t \quad (4.1)$$

$$V_b = \cos(\omega t - 2\pi/3) \quad (4.2)$$

$$V_c = \cos(\omega t + 2\pi/3) \quad (4.3)$$

Şekil 4.1'de Gerilim vektörüne ait abc-  $\alpha\beta$  ve abc- dq eksen dönüşümleri ile vektörel gösterimi verilmiştir.

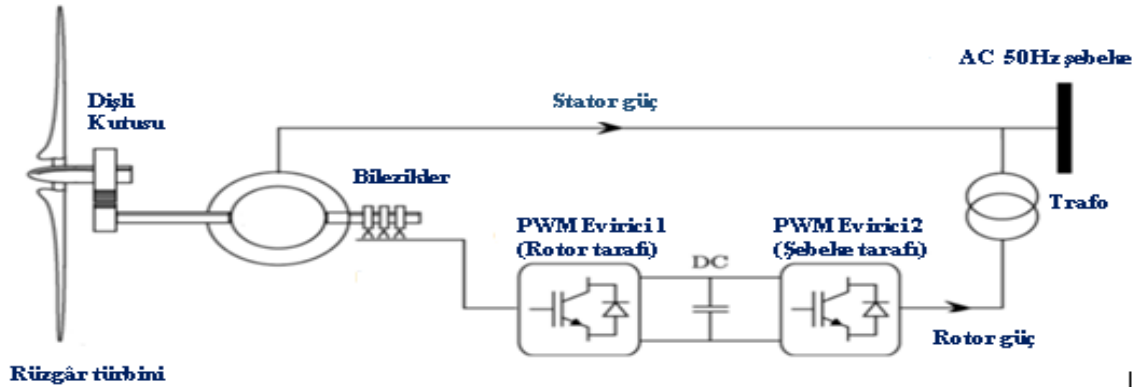


Şekil 4.1. Gerilim vektörünün abc-  $\alpha\beta$  ve abc- dq dönüşümleri ile vektörel gösterimi

#### 4.2. Çift Beslemeli Asenkron Generatörün Modellenmesi

ÇBAG tabanlı rüzgâr enerjisi dönüştürme sistemi, yaygın olarak kullanılan değişken hızlı rüzgâr üretim sistemidir. Aktif ve reaktif gücü birbirinden bağımsız olarak kontrol edebilme avantajı sunar (M. El Azzaoui ve diğ., 2017).

ÇBAG tabanlı REDS aşağıdaki ana bileşenlere sahiptir. Aşağıdaki şekil 4.2'de gösterildiği gibi generatör, türbin, rotor tarafı evircisi, şebeke tarafı evircisi, DC bara ve bağlantı trafosundan oluşmaktadır.



Şekil 4.2. 50Hz AC'ye bağlı ÇBAG

Generatörün statoru doğrudan şebekeye bağlanır. Asenkron makinenin rotoru, sırt sırta dönüştürücü ve trafo aracılığıyla kayma halkaları ile AC şebekeye bağlanır. Yukarıdaki şekilde 'invertör 1', rotor tarafı evirici olarak adlandırılır ve 'invertör 2', şebeke tarafı evirici olarak adlandırılır. İki dönüştürücü, DC bara üzerinden arka arkaya bağlanır. Şebeke tarafı evirici, DC hattı gerilimindeki değişimi kontrol eder. Rotor tarafı evirici, asenkron makinenin torkunu ve hızını kontrol etmek için kullanılır.

Güç dönüştürücü çift yönlü modda çalışır, bu nedenle Asenkron makinesi senkron altı, senkron ve ayrıca senkron üstü modda çalışabilir (R. Pena ve diğ., 1996).

#### 4.2.1. Elektrikli Asenkron Generatörünün Modellenmesi

ÇBAG'ün konfigürasyonu, dönüştürücünün boyutunun, nominal gücün yaklaşık %33'ü olmasını sağlar. Üç fazlı Asenkron generatörü, senkron hızda dönen stator akısına ve kayma nedeniyle senkron statordan daha düşük hızda dönen rotora sahiptir.

Stator akısının döndüğü senkron hız aşağıdaki denklemlerle verilir:

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (4.4)$$

Burada;

$f$  Frekans ve  $P$  generatörün kutup sayısıdır.

Generatörün kayması aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$s = \frac{(\omega_s - \omega_m)}{\omega_s} \quad (4.5)$$

Burada  $\omega_s$  ve  $\omega_m$ , stator ve rotorun açısal frekanslarıdır.

Rotor tarafında kademeli konvertörün kullanılması, bilezikli asenkron motorunun senkron altı ve senkron üstü hızında kontrol edilmesini sağlar. Asenkron makinenin senkron altı ve senkron üstü hızlarda kontrolünü sağlayan dönüştürücünün rotor tarafında çift yönlüdür (A. I. Said ve B. Mandoko, 1983).

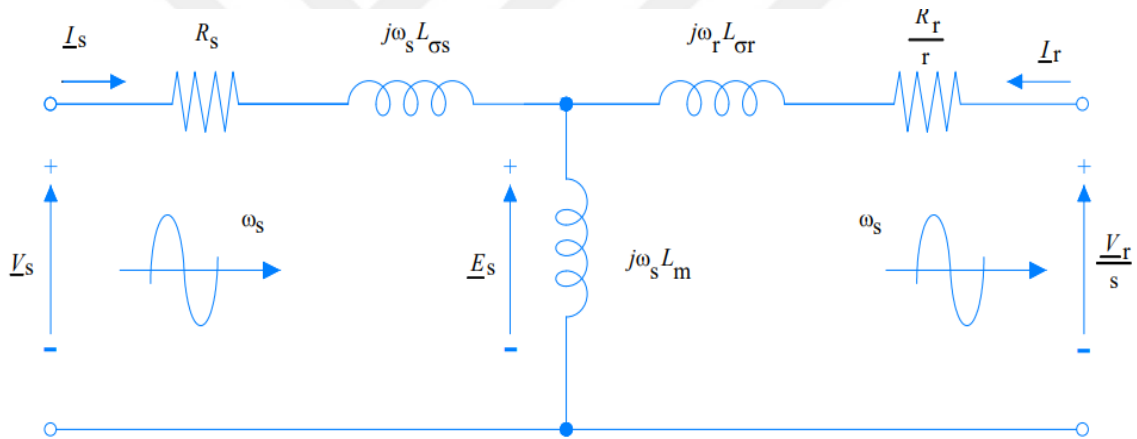
Kaymaya göre generatör çalışma bölgeleri aşağıda belirtilmiştir.

$s=1$  kayma durumunda generatör durmakta,  $s=0$  durumunda ise generatör senkron hızda dönmektedir.  $s>1$  olduğu durum ters çalışma bölgesini,  $0<s<1$  olduğu durum senkron

altı çalışma bölgesi,  $-1 < s < 0$  olduğu durum ise senkron üstü çalışma bölgesi ifade etmektedir. Asenkron makineler manyetik alanın oluşturduğu stator döner alan hızında dönemezler. Rotorun döndüğü hız ile stator hızı birbirinden farklı olup aralarındaki farkın stator hıza oranı kayma olarak adlandırılır. Kayma frekansı ise rotor döner manyetik alanının frekansına eşittir. Çift beslemeli asenkron generatörlerde rotor sargıları üzerinden rotor frekansı kontrol edilerek yani kayma frekansı kontrol edilerek generatörlerin belirli sınırlar içerisinde istenilen hızda kontrolü sağlanabilir (Zhao ve diğ., 2017)

#### 4.2.2. Uzay Vektör Gösterimi

Stator tarafına indirgenen ÇBAG'ün sabit durum eşdeğer elektrik devresi aşağıdaki şekil 4.3'de gösterilmektedir:



Şekil 4.3. Stator tarafına indirgenen ÇBAG'nin eşdeğer devresi

Rotor tarafına aktarılan statordaki gerilimlerin ve akıların denklemleri aşağıda verilmiştir:

$$V_s = R_s I_s + j\omega_s L_{\sigma s} I_s + j\omega_s L_m (I_s + I_r) \quad (4.6)$$

$$\frac{V_r}{s} = \frac{R_r}{s} I_r + j\omega_s L_{\sigma r} I_r + j\omega_s L_m (I_s + I_r) \quad (4.7)$$

$$\psi_s = L_s I_s + L_m I_r \quad (4.8)$$

$$\psi_r = L_r I_r + L_m I_s \quad (4.9)$$

Burada bir faz için;

$V_s$  = Stator Gerilimi.

$I_s$  = Statordan akan akım.

$R_s$  = Stator direnci.

$L_{\sigma s}$  = Stator kaçak endüktansı.

$L_m$  = Mıknatıslanma endüktansı.

$V_r$  = Rotor devresi boyunca gerilim.

$s$  = Kayma

$I$  = Rotor devresinden akan akım.

$L_s = L_{\sigma s} + L_m =$  Toplam stator endüktansı.

$L_{\sigma r} =$  Rotor kaçak endüktansı.

$L_r = L_{\sigma r} + L_m =$  Rotor endüktansı.

$\Psi_s =$  Stator akısı.

$\Psi_r =$  Rotor akısı

Aktif ve reaktif güç için denklemler aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$P_s = 3R_s |I_s|^2 + 3\omega_s L_m \text{Im}\{I_s I_r^*\} \quad (4.10)$$

$$Q_s = 3\omega_s L_s |I_s|^2 + 3\omega_s L_m \text{Re}\{I_s I_r^*\} \quad (4.11)$$

Rotor aktif ve reaktif güç şu şekilde elde edilir:

$$P_r = 3R_r |I_r|^2 - 3s\omega_s L_m \text{Im}\{I_s I_r^*\} \quad (4.12)$$

$$Q_r = 3s\omega_s L_r |I_r|^2 + 3s\omega_s L_m \text{Re}\{I_s I_r^*\} \quad (4.13)$$

Tork için ifade aşağıdaki denklemlerle verilir.

$$T_{em} = 3 \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} p \cdot \text{Im}\{\psi_s \psi_r^*\} \quad (4.14)$$

Burada,

$$\sigma = \left( 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \right)$$

ÇBAG'nin mekanik gücü için denklem şu şekilde yazılabilir:

$$P_m = P_s + P_r \quad (4.15)$$

### 4.2.3. ÇBAG'ün $\alpha\beta$ Modellemesi

Stator gerilimi, rotor gerilimi ve akılar, aşağıdaki gibi ( $\alpha$ - $\beta$ ) referans çerçevesi olarak da bilinen sabit referansa dönüştürülür.

$$V_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + \frac{d}{dt} \psi_{\alpha s} \quad (4.16)$$

$$V_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + \frac{d}{dt} \psi_{\beta s} \quad (4.17)$$

Rotor gerilimleri aşağıdaki gibi dönüştürülebilir:

$$V_{\alpha r} = R_r i_{\alpha r} + \frac{d}{dt} \psi_{\alpha r} + \omega_m \psi_{\beta r} \quad (4.18)$$

$$V_{\beta r} = R_r i_{\beta r} + \frac{d}{dt} \psi_{\beta r} - \omega_m \psi_{\alpha r} \quad (4.19)$$

Benzer şekilde, stator ve rotordaki akılar, sabit referans çerçevesinde aşağıdaki gibi temsil edilebilir:

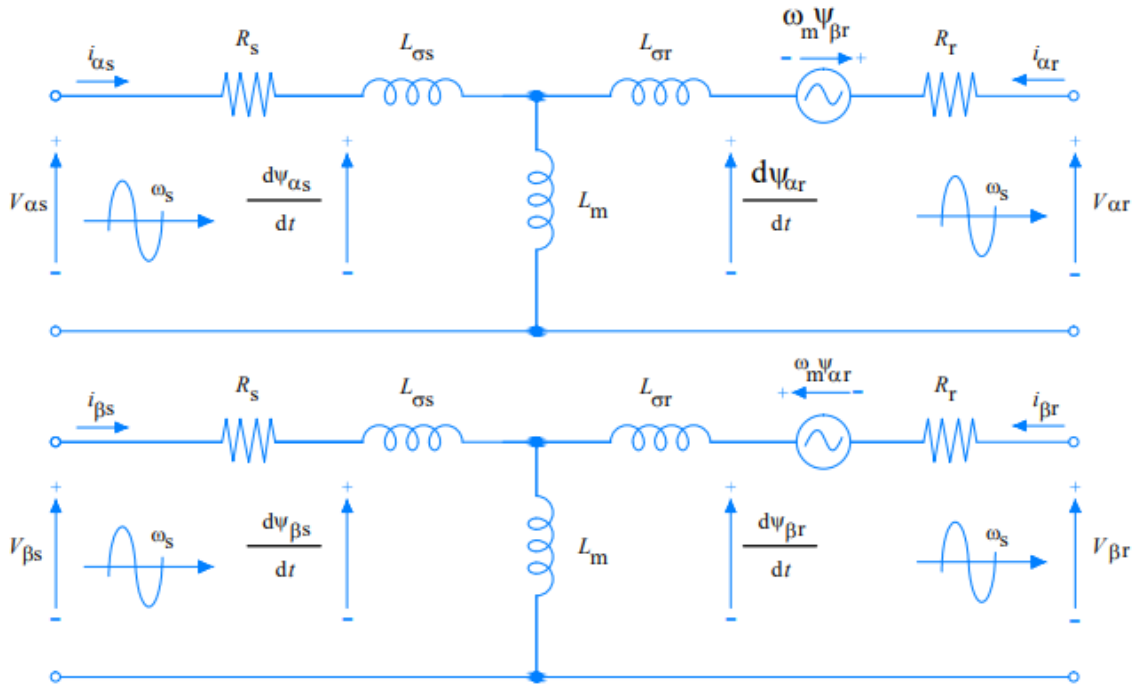
$$\psi_{\alpha s} = L_s i_{\alpha s} + L_m i_{\alpha r} \quad (4.20)$$

$$\psi_{\beta s} = L_s i_{\beta s} + L_m i_{\beta r} \quad (4.21)$$

$$\psi_{\alpha r} = L_r i_{\alpha r} + L_m i_{\alpha s} \quad (4.22)$$

$$\psi_{\beta r} = L_r i_{\beta r} + L_m i_{\beta s} \quad (4.23)$$

$\alpha\beta$  Referans çerçevesinde makinenin eşdeğer devresi Şekil 4.3'de gösterilmiştir:



Şekil 4.3.  $\alpha\beta$  referans çerçevesindeki eşdeğer ÇBAG devresi

Aktif ve reaktif gücün denklemi, sabit referans çerçevesinde aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$P_s = \frac{3}{2}(V_{\alpha s}i_{\alpha s} + V_{\beta s}i_{\beta s}) \quad (4.24)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(V_{\beta s}i_{\alpha s} - V_{\alpha s}i_{\beta s}) \quad (4.25)$$

Benzer şekilde rotor tarafındaki aktif ve reaktif güç de şu şekilde hesaplanabilir:

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

$$Q_r = \frac{3}{2}(V_{\beta r}i_{\alpha r} - V_{\alpha r}i_{\beta r}) \quad (4.27)$$

Sabit referans çerçevesindeki elektromanyetik tork denklemi şu şekilde verilir:

$$T_{em} = \frac{3}{2}p(\psi_{\beta r}i_{\alpha r} - \psi_{\alpha r}i_{\beta r}) \quad (4.28)$$

#### 4.2.4. ÇBAG'ün dq Modellemesi

Senkronize dönen yapıda ÇBAG'ün uzay vektör modelindeki gerilim ve akı denklemleri aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \quad (4.29)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} \quad (4.30)$$

Benzer şekilde, senkron dönen dq referans çerçevesindeki rotor gerilimleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_r \psi_{qr} \quad (4.31)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_r \psi_{dr} \quad (4.32)$$

Statordaki akılar şu şekilde yazılabilir:

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (4.33)$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (4.34)$$

Benzer şekilde, rotordaki akılar için şu şekilde yazılabilir:

$$\psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \quad (4.35)$$

$$\psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \quad (4.36)$$

Burada,  $L_s$ ,  $L_r$  ve  $L_r$  sırasıyla stator, rotor ve karşılıklı endüktanslardır.

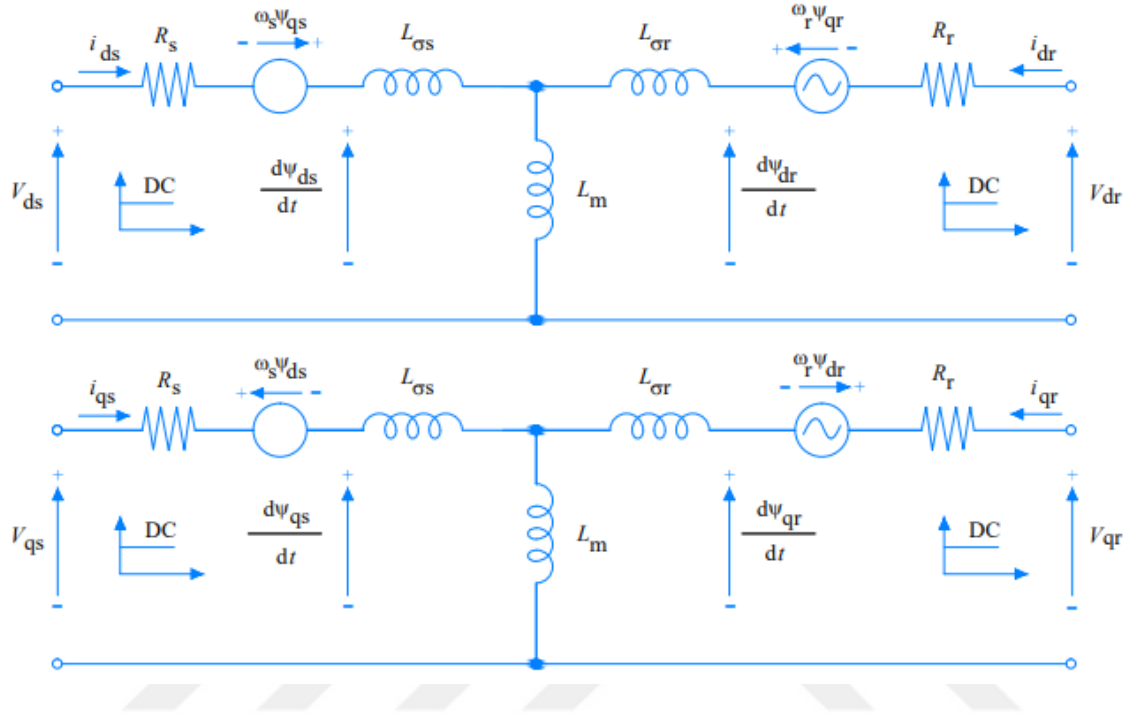
Ayrıca,

$$L_s = L_{\sigma s} + L_m \quad (4.37)$$

$$L_r = L_{\sigma r} + L_m \quad (4.38)$$

$L_{\sigma s}$  ve  $L_{\sigma r}$ , sırasıyla stator ve rotorun öz endüktanslarıdır.

Yukarıdaki denklemler kullanılarak, ÇBAG için eşdeğer devre, Şekil 4.4.'de gösterildiği gibi dq referans çerçevesi gösterilebilir.



Şekil 4.4. Senkron dq referans çerçevesindeki ÇBAG'ün eşdeğer devresi

Makine tarafından üretilen elektromanyetik tork  $T_e$ , senkron dq referans çerçevesinde şu şekilde türetilir:

$$T_e = \frac{3}{2} [\psi_{qs} i_{ds} - \psi_{ds} i_{qs}] \quad (4.39)$$

Generatör olarak çalışan motorun genel yapısını varsayarsak. Senkron referansta aktif güç, reaktif güç ve tork aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$P_s = -\frac{3}{2} [V_{qs} i_{qs} + V_{ds} i_{ds}] \quad (4.40)$$

$$Q_s = -\frac{3}{2} [V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs}] \quad (4.41)$$

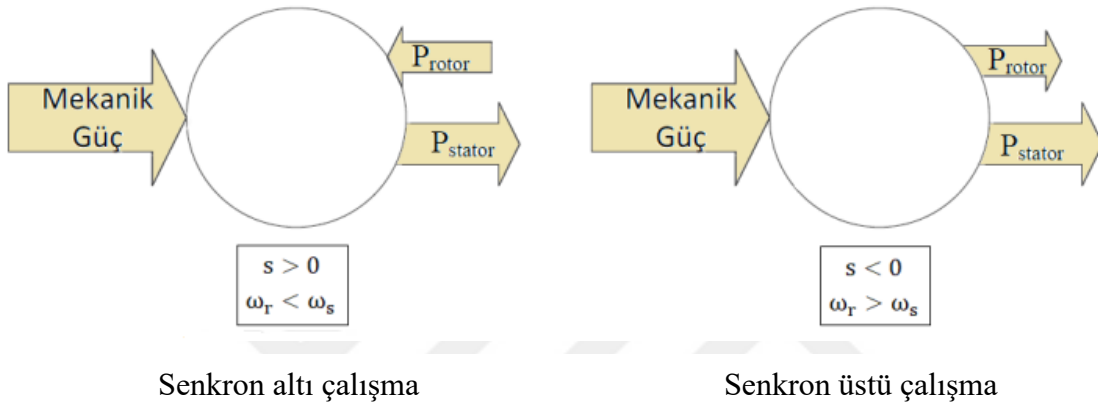
$$P_r = -\frac{3}{2} [V_{qr} i_{qr} + V_{dr} i_{dr}] \quad (4.42)$$

$$Q_r = -\frac{3}{2}[V_{qr}i_{dr} - V_{dr}i_{qs}] \quad (4.43)$$

Çift Beslemeli Asenkron generatörü tarafından üretilen toplam güç:

$$P_{toplama} = P_s + P_r \quad (4.44)$$

$$Q_{toplama} = Q_s + Q_r \quad (4.45)$$



Şekil 4.5. ÇBAG güç aktarımı

### 4.3. Sonuç

Bu bölümde, ÇBAG'ün dinamik modeli hem stator hem de rotor için sabit referans çerçevesindeki gerilim denklemlerini, akı denklemlerini eşdeğer devre ile indirgeme denklemleri tanımlanmıştır. Daha sonra, makinenin aktif gücü, reaktif gücü ve elektromanyetik torku için denklemleri de çıkartılmıştır.

## 5. ÇBAG TABANLI RÜZGÂR TÜRBİNİN KONTROL TASARIMI

### 5.1. Giriş

ÇBAG'lı rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin kontrolü (REDS), aerodinamik modelleme, mekanik modelleme ve elektrikli modelleme olarak aşağıdaki bölümlere ayrılabilir. Her ne kadar aerodinamik ve mekanik modellemeden kısaca değinilse de özellikle elektriksel modellemenin kontrolü üzerinde durulacaktır.

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde ÇBAG'nin sistem kontrolünün gerçekleştirilebilmesi için ÇBAG modelinin oluşturulması gerekir. Sistem modellemesi iki kısımdan meydana gelir. Bunlardan biri rotor tarafı dönüştürücü bölümü diğeri ise şebeke tarafı dönüştürücüsü bölümünden oluşur. Bu iki bölümün sistem modellemesi yapılarak ÇBAG kontrolü gerçekleştirilir. Rotor tarafı modellemesi yapılırken generatör yapısı baz alınırken şebeke tarafı modellemesinde ise sistem elektriksel denklemleri baz alınmaktadır. Rotor tarafı dönüştürücüsünün görevi rotor akımlarını kontrol ederek stator aktif ve stator reaktif güç üretiminin kontrolünü sağlar. Şebeke tarafı dönüştürücüsünün görevi ise DA bara gerilimini sabit tutarak güç akışının şebekeden rotora veya rotordan şebekeye çift yönde aktarımını kontrol eder (Zhu ve ark., 2017; İ. Erdem, 2019).

Bu bölümde ilk olarak ÇBAG'nin aerodinamiği, maksimum güç takibinin matematiksel modellenmesi verilecektir. Vektör kontrolü için rotor tarafı kontrolü ve şebeke tarafı kontrolüne yönelik iki kontrol yapısı ayrıntılı incelenecektir. Daha sonra ÇBAG'nin kontrol sisteminde kullanımına yönelik tasarlanan Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) algoritması detaylı anlatılacaktır.

### 5.2. ÇBAG'ün Aerodinamiği

Aerodinamik sistem, rüzgâr da bulunan kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürür. Üretilen mekanik enerji tork ve hız şeklindedir. Üretilen mekanik güç, rüzgâr hızının küpü güç ilişkisine sahiptir, bu nedenle rüzgâr hızındaki dalgalanmalar, üretilen güçte varyasyon yaratır. Rüzgâr da bulunan toplam enerji şu şekilde verilir:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 \quad (5.1)$$

Rüzgâr türbininin mekanik gücü ve torku şu şekilde verilir:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 C_p \quad (5.2)$$

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_w^2 C_t \quad (5.3)$$

Burada,

$\rho$  = Havanın yoğunluğu (1,23 Kg/m<sup>3</sup>)

$A = \pi R^2$  = Kanadın enine kesit alanı.

$R$  = Rüzgâr türbininin yarıçapı.

$C_p$  = Mekanik güç katsayısı, türbin güç katsayısı.

$C_t$  = Türbin tork sabiti ( $C_p/\lambda$ )

$$\lambda = \text{Uç Hız Oranı} = \frac{R\Omega_t}{V_w}$$

Yukarıdaki denklemde, rüzgâr da bulunan toplam kinetik enerjinin sadece bir kısmı rüzgâr türbininde mekanik enerjiye dönüştürüldüğünden, güç ve tork katsayıları kullanılır.

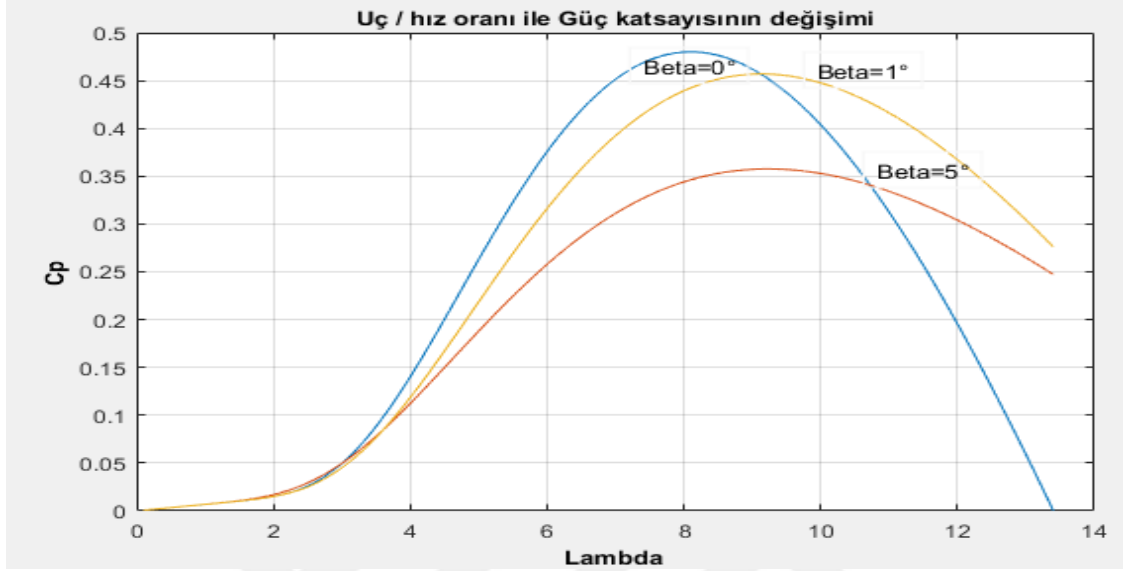
Güç dönüşüm katsayısı, kanat hatve açısının ( $\beta$ ) ve uç-hız oranının ( $\lambda$ ) fonksiyonudur. Uç hız oranı, rüzgâr hızına göre türbin kanadının ucunun hızıdır. Üretilen güç, rotor ucunun bağıl hızına ve rüzgâr hızına bağlıdır.  $C_p$  için birkaç sayısal yaklaşım önerilmiştir (E. B. Muhando, 2009). Bu tezde  $C_p$  için sayısal yaklaşım (M. F. Iacchetti ve diğ., 2015)'da açıklandığı gibi kullanılmıştır.

$$C_p = 0,5176 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0,0068\lambda \quad (5.4)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (5.5)$$

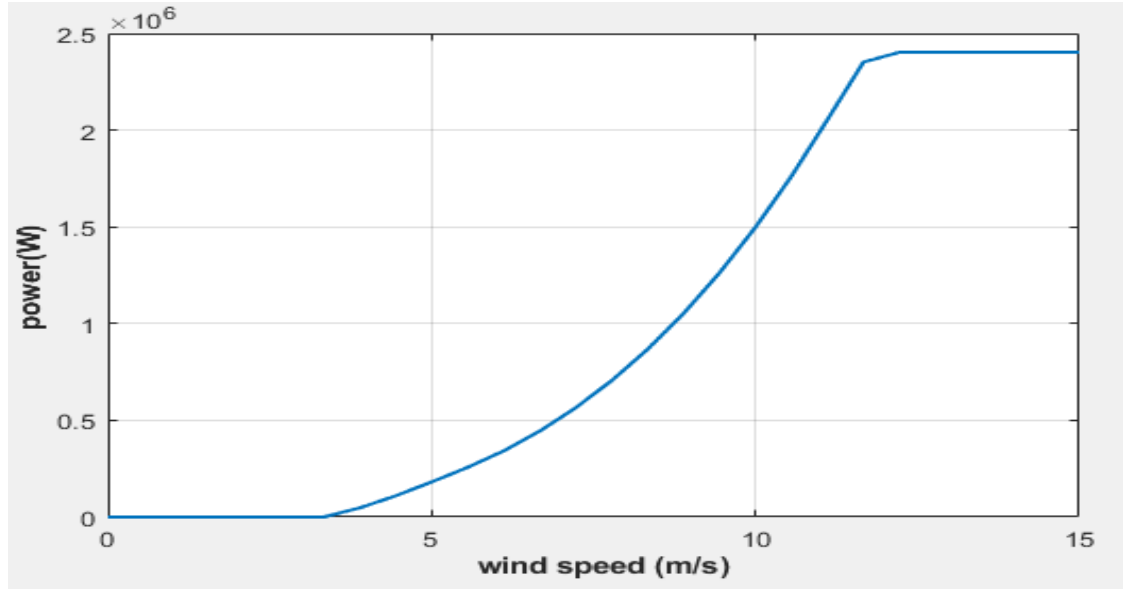
Rüzgâr türbininden çekilen güç,  $C_p$  değeri kontrol edilerek kontrol edilebilir. Yüksek rüzgârlar sırasında generatör ve konvertör aşırı yüklenebilir. Bu koşullarda rotor hızı

kontrol edilmelidir. Bu, kanatların eğimini döndürerek yapılır. Aşağıdaki Şekil 5.1.'de adım açısının farklı değerleri için güç dönüştürme katsayısı ile uç/hız oranı arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 5.1. Farklı hatve açıları için uç-hız oranına sahip güç katsayısı değişimi

2.0 MW rüzgâr türbini için güç eğrisi Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Rüzgâr türbini için güç eğrisi

### 5.3. Betz Limiti

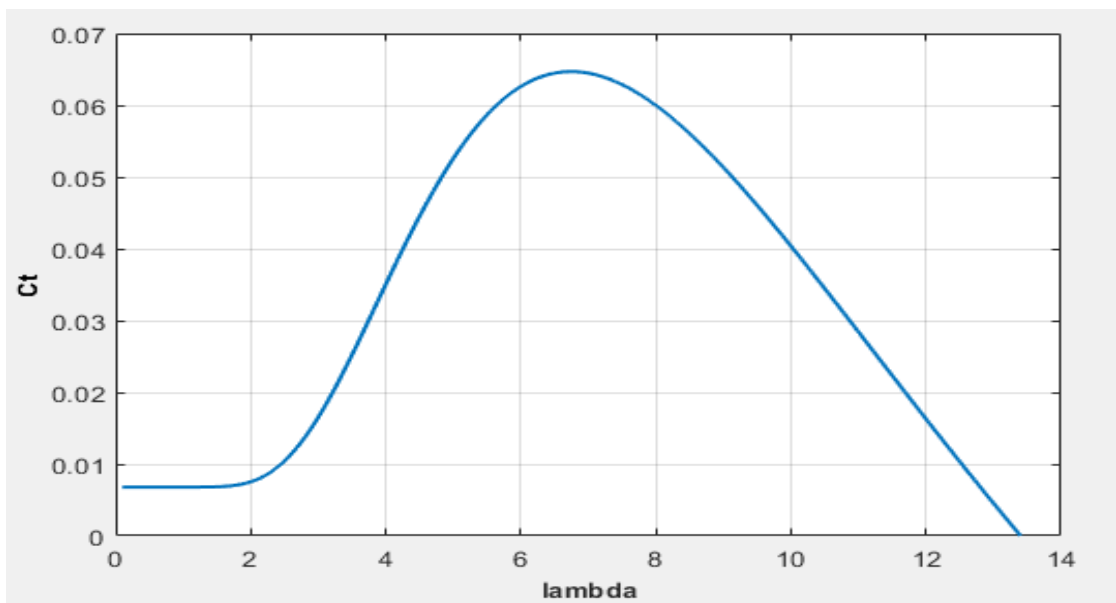
Rüzgâr türbininden geçen rüzgâr hala bir miktar hıza ve dolayısıyla kinetik enerjiye sahiptir. Bu nedenle, rüzgâr da bulunan enerjinin tamamı teorik olarak mekanik enerjiye dönüştürülemez. Betz limiti tarafından verilen teorik maksimum limit 0,593 veya %59,3'tür.

### 5.4. Maksimum Güç Noktası Takibi

Maksimum güç noktası takibi (MPPT) , türbinin güç çıkışını en üst düzeye çıkarmak için rüzgâr türbininde kullanılır. Kullanılan maksimum güç noktası takibi, rüzgâr hızını takip edecek ve türbinden gelen gücü en üst düzeye çıkarmak için buna göre ayarlayacaktır. Rüzgâr türbininin maksimum güç noktasında çalışması için uç hız oranı, güç dönüşümü ve tork katsayısı için aşağıdaki optimum değerlere sahibiz. Maksimum aerodinamik verim sağlamak için güç katsayısı, türbinin maksimum güç çıkarabilmesi için optimum değerde tutulmalıdır (A. Dekhane ve diğ., 2012).

$$\lambda_{opt} = \frac{R\omega}{V_w} \quad C_p = C_{p,max} \quad C_t = C_{t,max} \quad (5.6)$$

Rüzgâr türbinini maksimum güç noktasında çalıştırmak için optimum tork katsayısı Şekil 5.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Rüzgâr türbini için tork katsayısı eğrisi

Maksimum güç noktasında rüzgâr türbini tarafından çıkarılan aerodinamik tork 5.7 ve 5.8 denklemleri ile verilmiştir (G. Abad, Doubly Fed Induction Machine Book. 2011).

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{R^5 \omega^2}{\lambda_{opt}^2} C_{t_{max}} = K_{opt\_t} \omega^2 \quad (5.7)$$

$$K_{opt\_t} = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{R^5}{\lambda_{opt}^2} C_{t_{max}} \quad (5.8)$$

### 5.5. ÇBAG Rüzgâr Türbini için Kontrol Sisteminin Tasarımı

Asenkron makinenin vektör kontrolü yaygın olarak kabul edilir ve genişletilir. Asenkron makinenin vektör kontrolü, akım kontrol döngülerinden anlaşılmaktadır. Vektör kontrolü, yüksek performans ve sınırlı hız aralığı sürücü sistemi uygulaması için çekici bir çözümdür (A. Petersson, 2005). Rotor tarafında uygun güç konvertörü kullanılarak hem stator hem de rotor tarafında düşük akım harmonik bozukluk ile genel sistem kontrolü gerçekleştirilebilir (A. Dendouga ve diğ., 2007). Asenkron makinenin vektör kontrolünün arkasındaki ana fikir, ayrı ayrı mıknatıslanmış DC makineye matematiksel eşdeğerliğidir (A. Petersson, 2005). Uzay vektör teorisi, üç fazlı nicelikleri uzay vektörleri cinsinden ifade etmek için kullanılır. Asenkron motorun bu modellenmesi, motorun geçici ve sabit durumda çalışmasını açıklar (J. Lepka and P. Stekl, 2001). Üç fazlı elektrik bileşenleri vektörler olarak görselleştirilebilen iki dikey bileşene dönüştürülür. Böylece, üç fazlı zamana bağlı sistem, d-q eksen takımlarına dönüştürülerek sistemin daha basit hale gelmesi ve kontrol sürecinin anlaşılması kolaylaşmıştır.

#### 5.5.1. Rotor Tarafı Dönüştürücü (RTD) Kontrolör

Makinenin vektör kontrolü, dq eksenlerinde gerçekleştirilir. Üç fazlı generatör modeli değişkenlerinin dönüşüm tekniği ile aralarında 90 derece fark olan dq eksen takımına dönüşümü gerçekleştirilerek birbirlerinden bağımsız olarak kontrol edilebilmesi sağlanmaktadır. Rotor tarafındaki dönüştürücünün kontrolünün uygulanması stator-rotor akımları ile birlikte stator gerilimi ve rotor konumunun bilinmesini gerektirir. Torkun sadece rotor akımının eksen bileşenine bağlı olması stator akı oryantasyonunun en

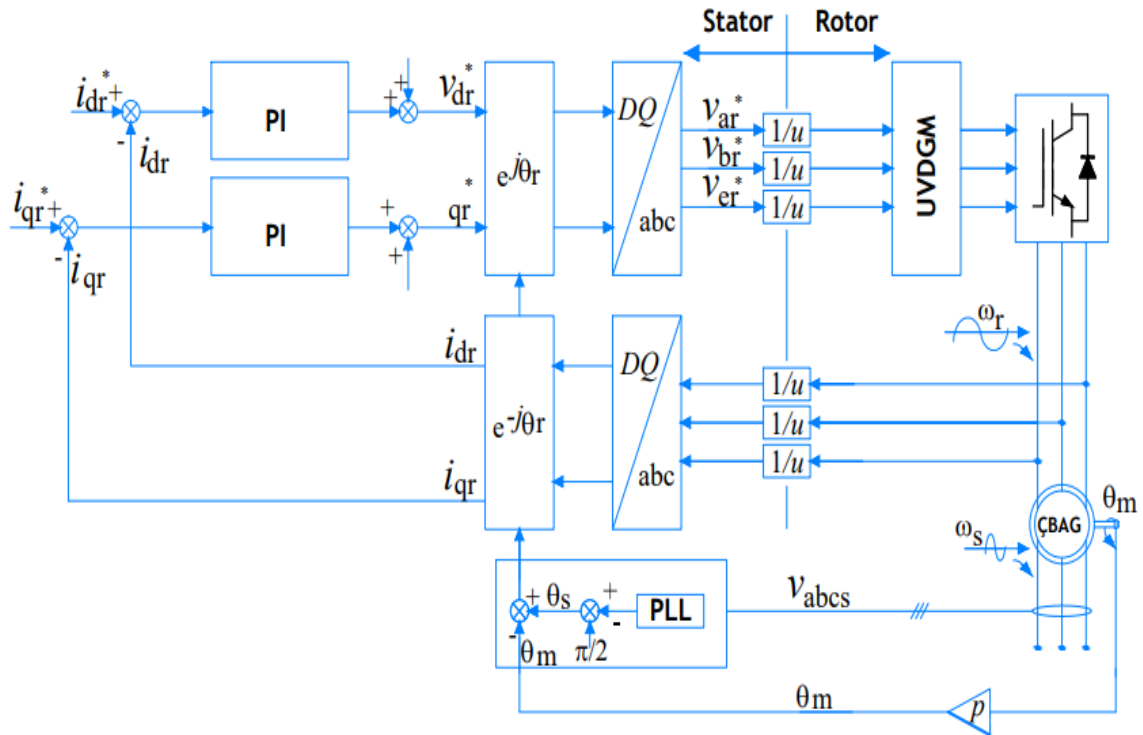
büyük avantajıdır (A. Petersson, 2005). Rotor akımlarının fonksiyonu olarak senkron referans çerçevesindeki rotor gerilimi için elde edilen denklemler aşağıda gösterildiği gibidir (K. A.-H. Haitham ve ark., 2014):

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{dr} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} |\vec{\psi}_s| \quad (5.9)$$

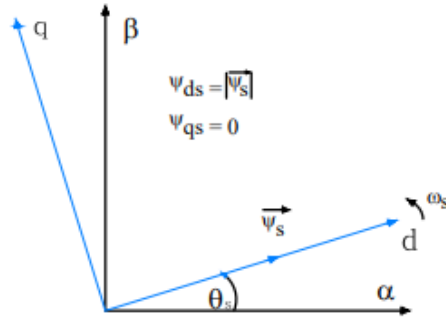
$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{qr} - \omega_r \sigma L_r i_{dr} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} |\vec{\psi}_s| \quad (5.10)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

Şebeke ÇBAG statoruna bağlı olduğundan stator akısı sabittir, bu türev teriminin  $\frac{d}{dt} |\vec{\psi}_s|$  değeri sıfırdır. Referans çerçevesindeki dönüşüm için  $\theta_r$  açısının tahmin edilmesi gerekir. Asenkron makinenin kontrol aşamalarında stator ve rotor sargı dönüş oranlarına dikkat edilmelidir. Bu çalışmada, rotor akımı  $i_{dr}$  sıfır olarak ayarlanmıştır. ÇBAG'ün rotor akı yönlendirmeli vektör kontrolü blok şeması Şekil 5.4 ile stator ve rotor akılarının vektörel gösterimi Şekil 5.5 ile verilmiştir.



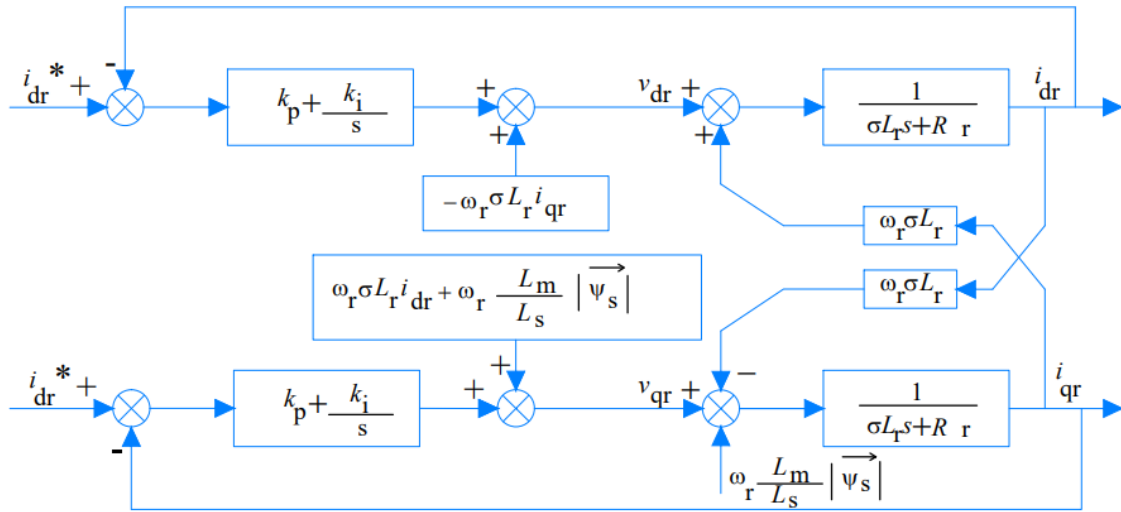
Şekil 5.4. ÇBAG'ün rotor akı yönlendirmeli vektör kontrolü blok şeması



Şekil 5.5. Stator ve rotor akılarının vektörel gösterimi

### 5.5.2. Rotor Tarafı Dönüştürücünün Denetleyici Ayarı

Rotor tarafı kontrol bloğundaki kapalı çevrim akım kontrolü için eşdeğer blok şeması, aşağıdaki Şekil 5.6'de blok şemasında gösterilmiştir (G. Abad, 2016).



Şekil 5.6. Rotor tarafı kontrolü için akım kontrol döngüsü

Yukarıda gösterilen blok şeması, aşağıdaki gibi transfer fonksiyonuna basitleştirilebilir:

$$\frac{i_{dr}(s)}{i_{dr}^*(s)} = \frac{sK_p + K_i}{s^2 L_r \sigma + s(R_r + K_p) + K_i} \quad (5.11)$$

$$\frac{i_{qr}(s)}{i_{qr}^*(s)} = \frac{sK_p + K_i}{s^2 L_r \sigma + s(R_r + K_p) + K_i} \quad (5.12)$$

Yukarıdaki transfer fonksiyonu daha sonra genel kontrol transfer fonksiyonunun ikinci mertebesinin paydası ile karşılaştırılır.

$$K_i = \sigma \cdot R_r \quad (5.13)$$

$$K_p = \sigma \cdot L_r \quad (5.14)$$

Bu denklemler, rotor tarafı dönüştürücü kontrolünde PI denetleyicisi için orantısal ve integral kazanç değerlerini verir. ( J. Schönberger, 2002–2021 by Plexim GmbH)

### 5.5.3. Şebeke Tarafı Dönüştürücü (ŞTD) Kontrolör

ŞTD, DC bağlantısının gerilimini sabit bir değerde düzenlemek için ÇBAG modelinde uygulanmaktadır. ŞTD, şebeke ile asenkron makinesinin rotoru arasındaki reaktif güç alışverişini kontrol eder. Uygulanan vektör, dq dönen referans çerçevesinin d ekseninin şebeke gerilimi  $V_{dg}$  ile hizalandığını kontrol eder.

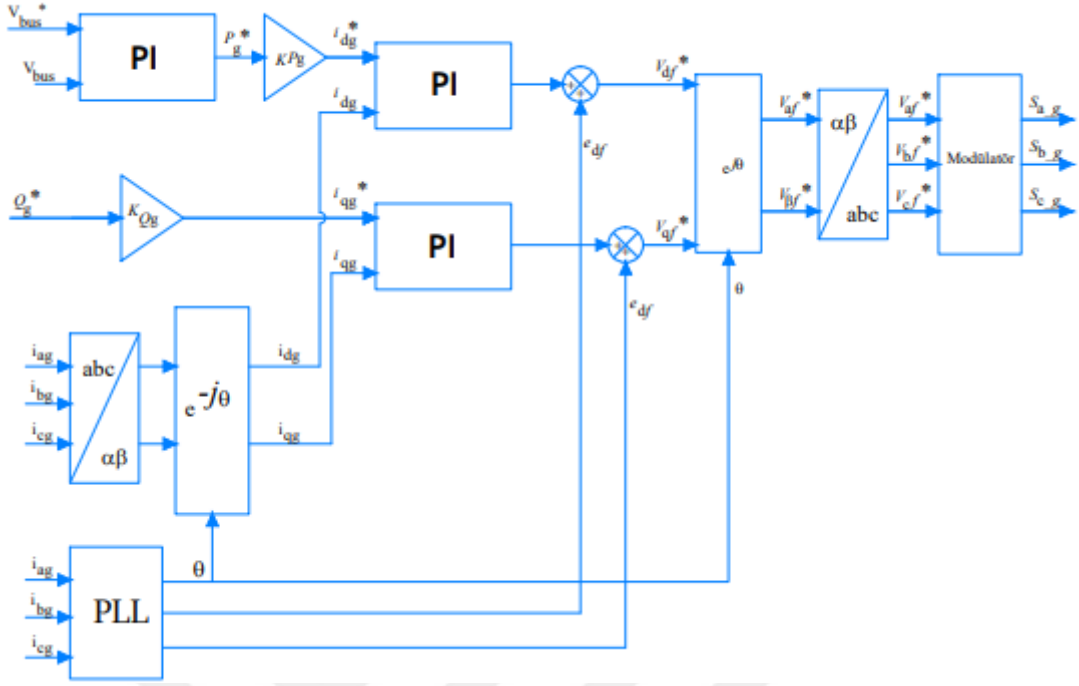
$$V_{dg} = |\vec{V}_g| \text{ ve } V_{qg} = 0$$

Enerji dönüşüm sistemindeki aktif ve reaktif güç akışını ayırıştırmak için RTD’de olduğu gibi abc-dq dönüşümleri uygulanarak şebeke geriliminden oryantasyonlu bir vektör kontrol yöntemi uygulanabilir. Şebeke tarafı kontrolörünün gerilim dq bileşenleri için temel denklemler şu şekilde elde edilebilir:

$$V_{df} = R_f i_{dg} + L_f \frac{d}{dt} i_{dg} - \omega_a L_f i_{qg} + V_{dg} \quad (5.15)$$

$$V_{qf} = R_f i_{qg} + L_f \frac{d}{dt} i_{qg} + \omega_a L_f i_{dg} + V_{qg} \quad (5.16)$$

Burada  $V_{df}$ ,  $V_{qf}$  evirici tarafından üretilen gerilimi,  $V_{dq}$ ,  $V_{qg}$  şebeke gerilimini,  $i_{dg}$ ,  $i_{qg}$  şebeke akımlarını,  $R_f$  şebekenin direncini,  $L_f$  şebekenin hat endüktansını,  $\omega_a$  ise şebekenin açısal hızını ifade etmektedir. Şebeke gerilimi yönlendirmeli vektör kontrollü şebeke tarafı dönüştürücünün vektör kontrolü için blok şeması aşağıda şekil 5.7’de gösterilmiştir (G. Abad, Doubly Fed Induction Machine Book. 2011; G. Abad, Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications. 2016).



Şekil 5.7. Şebeke gerilimi oryantasyonu vektör kontrol blok diyagramı

Blok diyagramda şebeke açısını tahmin etmek için PLL kullanılırken, bu tezde şebeke açısı daha sonraki bölümde açıklanacak olan açı hesaplama bloğu kullanılarak hesaplanır. Yukarıdaki blok şemasındaki sabit kazançlar aşağıdaki gibi tanımlanır (Aashish Pant B.E. 2019):

$$K_{Pq} = \frac{1}{\frac{3}{2} V_{dg}} \quad (5.17)$$

$$K_{Qg} = \frac{1}{-\frac{3}{2} V_{dg}} \quad (5.18)$$

Şebeke gerilimi, senkron hızla dönen dq eksen takımının d eksenine sabitlenirse ayrıştırılmış aktif ve reaktif güç kontrolü gerçekleştirilir. Böylece  $V_d = V_{dg}$ ,  $V_{dq} = 0$  eşitlikleri sağlanır.

$$V_{df}^* = -V_d' + (\omega_a L_f i_{qg} + V_{dg}) \quad (5.19)$$

$$V_{qf}^* = -V_q' + (\omega_a L_f i_{dg}) \quad (5.20)$$

Akım kontrolü PI kontrolör yardımıyla gerçekleştirilerek  $V_{df}^*$  ve  $V_{qf}^*$  gerilim referansları elde edilebilir. Dış döngüde kullanılan DA gerilimi kontrolü ile de DA gerilimi kontrol edilir.  $I_q$  referansının sıfır seçilmesi ile reaktif güç referansı sıfır olarak seçilmiş olur. Aktif güçte DA gerilimi kontrol eden  $I_d$  değişimine göre değişir. Aktif ve reaktif gücün değişimi (5.21) ve (5.22)'deki gibi tanımlanabilir.

$$P_g = \frac{3}{2}(V_{dg}i_{dg} + V_{qg}i_{qg}) \quad (5.21)$$

$$Q_g = \frac{3}{2}(V_{qg}i_{dg} + V_{dg}i_{qg}) \quad (5.22)$$

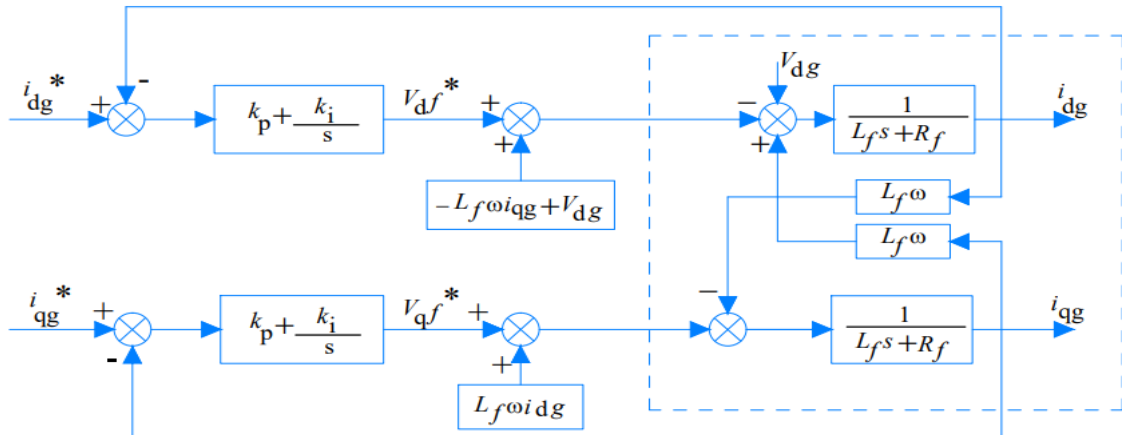
#### 5.5.4. Şebeke Tarafı Dönüştürücünün Denetleyici Ayarı

Şebeke tarafı dönüştürücü, RL filtresi kullanılarak şebekeden beslenir. Şebeke tarafı dönüştürücünün voltaj denklemlerinde Laplace dönüşümünü almak, aşağıdaki transfer fonksiyonunu verir:

$$\frac{i_{dg}(s)}{V_{df}(s)} = \frac{1}{L_f \cdot s + R_f} \quad (5.23)$$

$$\frac{i_{qg}(s)}{V_{qf}(s)} = \frac{1}{L_f \cdot s + R_f} \quad (5.24)$$

Şebeke tarafı dönüştürücü kontrol döngüsü için blok diyagramı aşağıdaki şekil 5.8'de gösterilmiştir. (G. Abad, 2016).



Şekil 5.8. Şebeke tarafı dönüştürücü için akım kontrol döngüsü

Yukarıda gösterilen blok şeması, aşağıdaki gibi transfer fonksiyonuna basitleştirilebilir:

$$\frac{i_{ds}(s)}{i_{ds}^*(s)} = \frac{sK_p + K_i}{s^2L_r + s(R_r + K_p) + K_i} \quad (5.25)$$

$$\frac{i_{qs}(s)}{i_{qs}^*(s)} = \frac{sK_p + K_i}{s^2L_r + s(R_r + K_p) + K_i} \quad (5.26)$$

Akım döngülerinin transfer fonksiyonunu standart ikinci dereceden kontrol denkleminin paydası ile karşılaştırarak  $s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2$  elde ederiz, şebeke tarafı dönüştürücü için  $K_p$  ve  $K_i$  değerleri (Aashish Pant B.E. 2019):

$$K_i = L_f \omega_n^2 \quad (5.27)$$

$$K_p = 2L_f \xi \omega_n^2 - R_f \quad (5.28)$$

Şebeke tarafındaki dönüştürücü için PI denetleyicisinin kazancı bu şekilde bulunur ve eşdeğer kazanç sabitleriyle ayarlanır.

## 5.6. Sıfır Sıralı Gerilim Enjeksiyonlu Sinüzoidal PWM

Üç fazlı güç dönüştürücüler, sıfır sıralı gerilim enjeksiyonu kullanılarak modüle edilebilir. Sinyalin kalitesini kaybetmeden, referans sinyallere sıfır sıralı gerilim enjeksiyonu ile çıkış gerilimi genliği önemli ölçüde iyileştirilebilir. Şekil 5.9'da temel sıfır sıralı harmonikler ve enjeksiyon sinyalin diyagramı verilmiştir. (G. Abad, Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications. 2016).

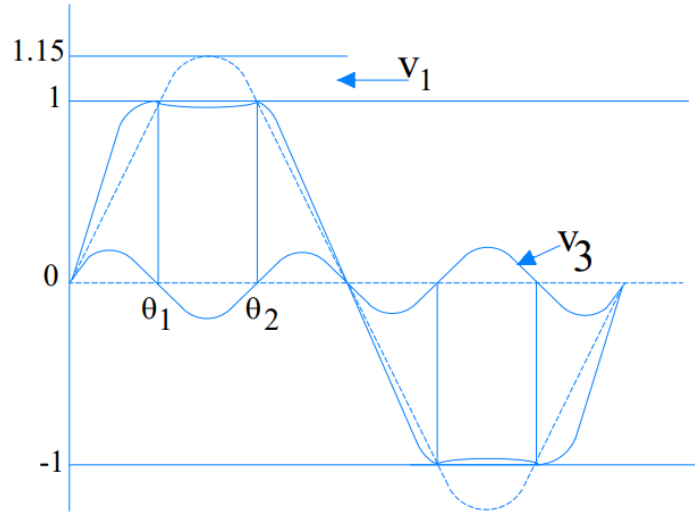
Enjeksiyon sinyali aşağıdaki formülle kolayca belirlenebilir:

$$V_{inj} = -\frac{\max\{v_a^* v_b^* v_c^*\} + \min\{v_a^* v_b^* v_c^*\}}{2} \quad (5.29)$$

Burada,

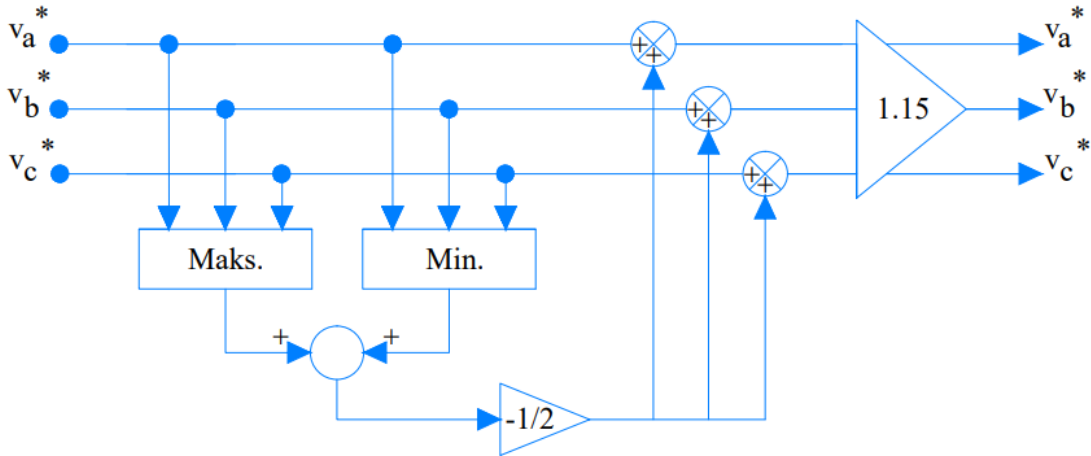
$V_{inj}$ , Sıfır sıralı harmonik enjeksiyon sinyalidir.

$v_a^* v_b^* v_c^*$  sırasıyla a, b ve c fazları için referans sinyalidir.



Şekil 5.9. Temel sıfır sıralı harmonikler ve enjeksiyon sinyali

Sıfır sıralı harmonik enjeksiyon bloğunun blok şeması Şekil 5.9’da gösterilmiştir:



Şekil 5.10. Sıfır sıralı Gerilim Enjektör Blok diyagramı

### 5.7. Açık Tahmini

Şebeke bağlantılı rüzgâr türbinli enerji dönüştürücü sistemlerinde şebeke gerilimlerinde bozulmalar ve harmonikler meydana gelebilmektedir. Yenilenebilir enerji sistemlerinin kontrolü esas olarak şebeke geriliminin fazına, büyüklüğüne, frekansına ve doğru bir şekilde belirlenmesi gereken senkronizasyon algoritmasına bağlıdır. Şebeke gerilim açısının belirlenmesi için Faz Kilitlemeli Döngü (PLL) teknikleri kullanılmaktadır. PLL yapısının tasarımı ve performansı sistem kontrol dönüştürücü dinamiklerini doğrudan etkilemektedir. Temelde sıfır geçişi algılama ve faz kilitlemeli çevrimler olmak üzere

iki yöntem kullanılmaktadır. Sıfır geçiş algılama tekniği oldukça basit olup ve bozucu işaretlere karşı dayanıksızdır (İ. Erdem, 2019).

Bu tezde rotor açısının ve şebeke açısının tahmini için bir açı tahmin bloğu kullanılır. Rotor açısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{V_{s\beta}}{V_{s\alpha}} \quad (5.30)$$

$$\theta_r = \theta_s - \frac{\pi}{2} - \theta_e \quad (5.31)$$

$$\theta_e = p \cdot \theta_m \quad (5.32)$$

Burada,

$\theta_s$  stator açısıdır

$\theta_r$  rotor açısıdır

$\theta_e$  elektriksel açıdır

Stator, şebeke açısı stator açısına eşit olacak şekilde doğrudan şebekeye bağlıdır. Rotor açısı, yukarıdaki formüller kullanılarak stator açısından tahmin edilebilir.

## 5.8. Sonuç

Bu bölümde Tasarlanan ÇBAG'ün rüzgâr türbin santraline entegre edilmiştir. Rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin 3 ana model olarak aerodinamik modelleme, mekanik modelleme ve elektrikli modellemesidir. ÇBAG'ün hem rotor tarafı hem stator tarafı vektör kontrolü, sıfır sıralı gerilim enjeksiyonlu sinüzoidal PWM modellenmiştir.



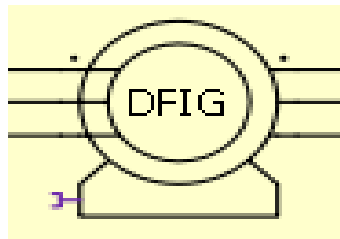
Generatörün statoru doğrudan şebekeye bağlanırken dönüştürücünün rotoru arka arkaya dönüştürücüye bağlanır. Simülasyonda IGBT tabanlı dönüştürücüler kullanılmaktadır. IGBT dönüştürücülerden biri ÇBAG rotoruna, diğer dönüştürücü ise filtre devresi üzerinden şebekeye bağlıdır. DC bara kondansatörü, dönüştürücülerin çalışmasını ayırır, böylece dönüştürücünün bağımsız kontrolü mümkün olur. Aerodinamik model, önceki bölümlerde verilen formüllere dayalı olarak ÇBAG'e moment uygular. Makinenin vektör kontrolü, kontrol bloğunda gerçekleştirilir. Denetleyici bloğu, ilgili dönüştürücüler için rotor tarafı denetleyicisinden ve şebeke tarafı denetleyicisinden oluşur. Dönüştürücüleri çalıştıran darbe sinyali, denetleyici bloğunda üretilir.

### 6.3. Blok Açıklamaları

Simülasyonda kullanılan bireysel blok şeması bu bölümde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Bağımsız bloklar için kullanılan parametre bu bölümde açıklanmaktadır.

#### 6.3.1. Rotor Sargılı Asenkron Generatörü

Rotor sargılı asenkron generatörü ÇBAG için simscape kütüphanesinden kullanılır. Blok hem stator hem de rotor için nominal güç, gerilim, endüktans ve direnç, karşılıklı endüktans, makinenin ataleti, sürtünme faktörü ve çift kutup sayısı parametreleri kullanır. Mekanik tork, rüzgâr hızına dayalı aerodinamik modelden türetilen generatör girdisidir. Aşağıdaki şekil 6.2'de PLECS'te rotor sargılı generatör bloğunu göstermektedir.



Şekil 6.2. Simülasyondan rotoru sargılı asenkron generatör bloğu

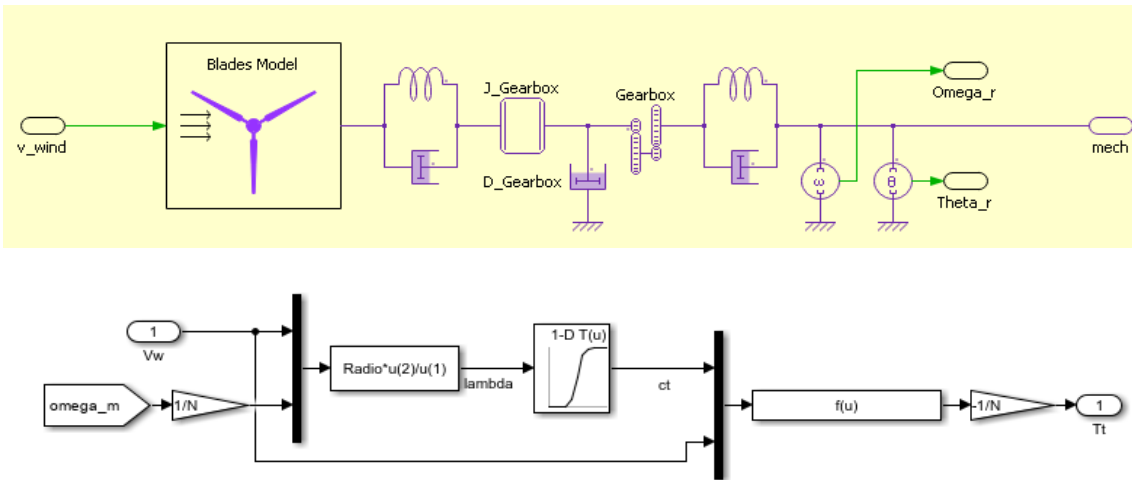
Blok ayrıca çeşitli ölçüm parametrelerini generatörden bir çıktı olarak sunar. Rotor sargılı generatör de kullanılan parametreler aşağıdaki Tablo 6.1'de özetlenmiştir.

Tablo 6.1. Generetör elektriksel parametreleri

Parametreler	Değerler
Kutup Çifti Sayısı	4
Stator Gerilimi (L-L) [V]	690
Rotor Gerilimi [V]	690
Stator Direnci [ohm]	0.0043
Stator Endüktansı [mH]	$0.257 \times 10^{-3}$
Mıknatıslanma Endüktans [mH]	8.0428
Rotor Direnci [ohm]	0.0052
Rotor Endüktansı [mH]	0.303
Stator Rotor Dönüş Oranı	1/2
Atalet [Kg.m <sup>2</sup> ]	127
Sürtünme faktörü [m.s]	0.01

### 6.3.2. Rüzgâr Türbini Aerodinamiği Bloğu

Rüzgâr türbini aerodinamik bloğu, asenkron generatörüne beslenen bir çıkış olarak torku hesaplar. Rüzgâr Türbini modeli, giriş parametreleri olarak rüzgâr hızı, generatör hızı ve eğim açısını kullanır. Kanadın yarıçapı ve rüzgâr hızı, güç katsayısı  $C_p$  ( $\lambda$ ,  $\beta$ ) üretmek için kullanılır. Ardından, tork hesaplanır. Aşağıdaki Şekil 6.3. türbin torkunun aerodinamik hesabını yapan bloğu göstermektedir.



Şekil 6.3. Rüzgâr türbininin aerodinamiği bloğu

Lambda'nın optimum değeri  $C_p$  ( $\lambda$ ,  $\beta$ ) ve uç hız oranı Bölüm 5'de bulunan şekil 5.1'deki güç katsayısı eğrisinden elde edilir. Güç katsayısının optimum değeri, eğriden elde edilen maksimum değerdir ve pratik olarak uygulanabilir olmayan %49 olarak elde edilir. Bu nedenle  $C_p$  değeri %44 olarak seçilmiştir. Aerodinamik bloğunda kullanılan nominal parametreler aşağıda Tablo 6.2.'de gösterilmiştir.

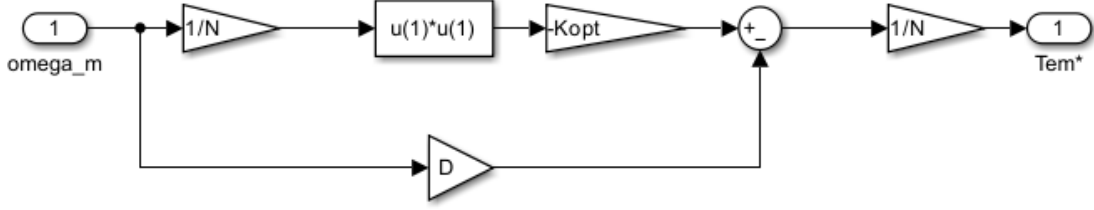
Tablo 6.2. Aerodinamik Özellikler

Parametreler	Değerler
Rüzgâr Hızı [m/s]	12
Radius (Yarıçap) [m]	42
Beta	0 °
Dışli kutusu oranı	100
Rüzgâr yoğunluğu [ $\text{kg/m}^3$ ]	1.23

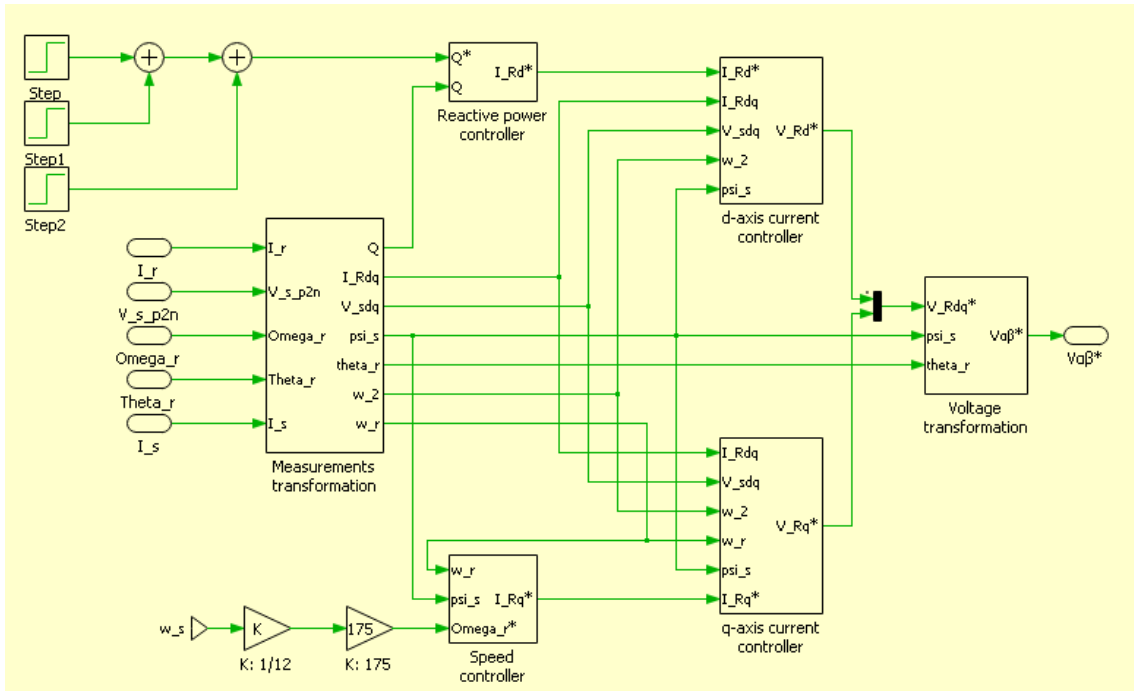
### 6.3.3. Denetleyici Bloğu

#### 6.3.3.1. Rotor Tarafı Dönüştürücüsü Kontrol Sistemi

Önceki bölümde sunulan Şekil 5.4.'de blok diyagramın vektör kontrolü bu bölümde uygulanmaktadır. Rotor tarafındaki dönüştürücü için referans gerilimi, vektör kontrolü kullanılarak üretilir. Blok ayrıca, optimum çalışma hızını izleyerek sistemin verimliliğini en üst düzeye çıkaran Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) bloğundan oluşur. Blok, abc referans çerçevesindeki gerilimleri ve akımları sabit referans çerçevesine ve ardından senkronize dönen dq referans çerçevesine dönüştüren birkaç dönüştürme bloğundan oluşur. PI (Oransal-İntegral) denetleyicileri kontrol için kullanılır. PI denetleyicisinin kazançları, önceki bölümde açıklanan şekilde ayarlanmıştır. Üretilen referans gerilimi daha sonra Matlab/Simulink 'de PWM üreteç bloğuna beslenir. Bu blok, rotor tarafındaki dönüştürücünün kontrolü için darbe sinyali üretir. Aşağıdaki şekil 6.4'de kontrol bloğunda kullanılan dolaylı hız kontrolörü MPPT'yi göstermektedir. Ayrıca rüzgâr türbinin rotor tarafı kontrol blokları şekil 6.5'de verilmiştir.



Şekil 6.4. Dolaylı Hız Kontrol Cihazı MPPT Bloğu

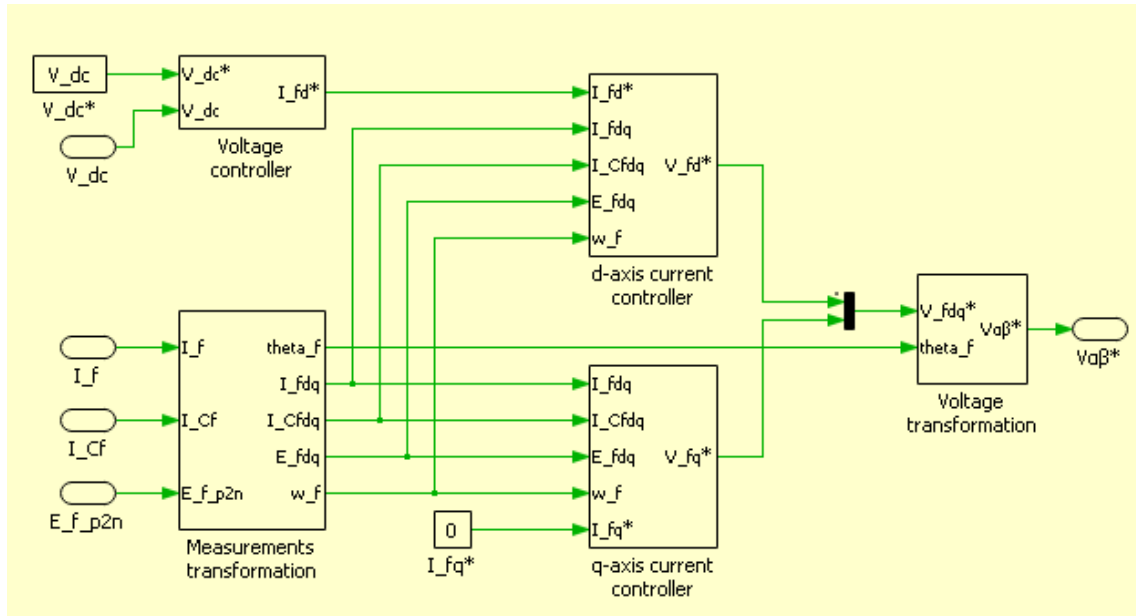


Şekil 6.5. PLECS'te Rotor Tarafı Kontrolör Blokları

### 6.3.3.2. Şebeke Tarafı Dönüştürücüsü Kontrol Sistemi

Önceki bölümde sunulan Şekil 5.6'de açıklanan şebeke tarafı dönüştürücü kontrolü bu bölümde uygulanmaktadır. Şebeke tarafındaki dönüştürücü (ŞTD), DC bara gerilimini kontrol eder ve şebeke ile aktif- reaktif güç alışverişini düzenler. Şebeke tarafı dönüştürücünün kontrolü, abc referans çerçevesinin eşzamanlı olarak dönen dq referans çerçevesine dönüştürülmesini gerektirir. Ayrılmış senkron referans çerçevesindeki şebeke tarafı akımı, PI denetleyicileri kullanılarak kontrol edilir. PI denetleyicileri, önceki bölümde türetilen kazanç parametreleri kullanılarak ayarlanır. PI denetleyicisinin akım çıkışları daha sonra abc referans çerçevesine dönüştürülen gerilimlere dönüştürülür. Sinyal daha sonra şebeke tarafı denetleyicisi için darbe sinyali üretmek

üzere PWM üreticisine uygulanır. Şebeke tarafı genel kontrol blokları şekil 6.6.'da verilmiştir.



Şekil 6.6. PLECS'te Şebeke Tarafı Kontrolör Blokları

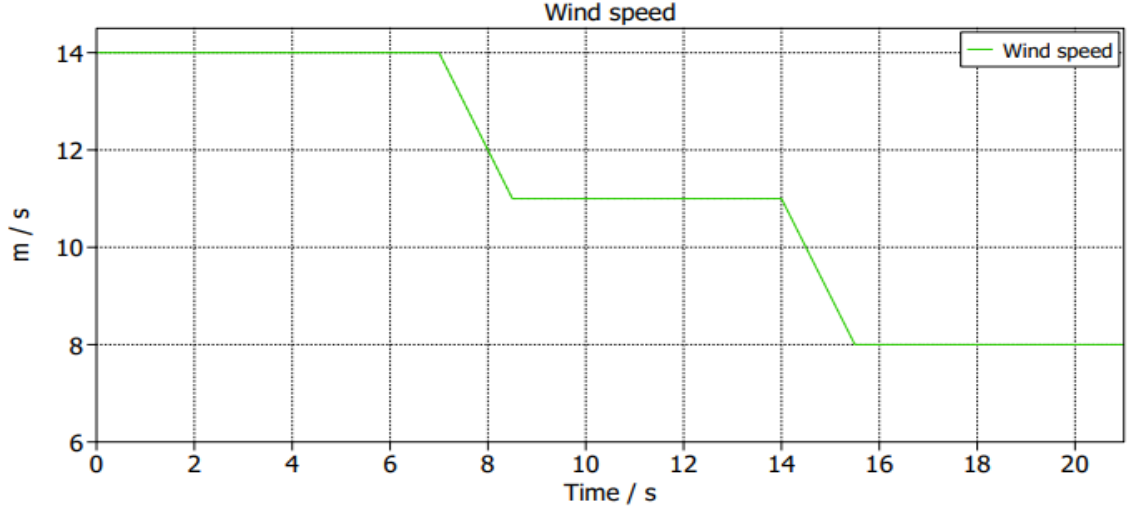
## 6.4. Sonuç / Simülasyon

### 6.4.1. Rüzgâr Türbininin Değişken Hızlarda Çalışması

Rüzgâr türbininin değişken hızlı çalışması için simülasyon, çeşitli rüzgâr hızlarında gerçekleştirilir. Her 7 saniyelik aralıklarla rüzgâr hızının hızı değişmektedir. Simülasyon, daha hızlı simülasyon için makine ataletinin yarı değere düşürülmesiyle gerçekleştirilir. Aşağıdaki tablo 6.3'de belirli zaman aralığındaki değişen rüzgâr hızını göstermektedir. Şekil 6.7'de simülasyonda zamana bağlı rüzgâr hız değişimi grafiği verilmiştir.

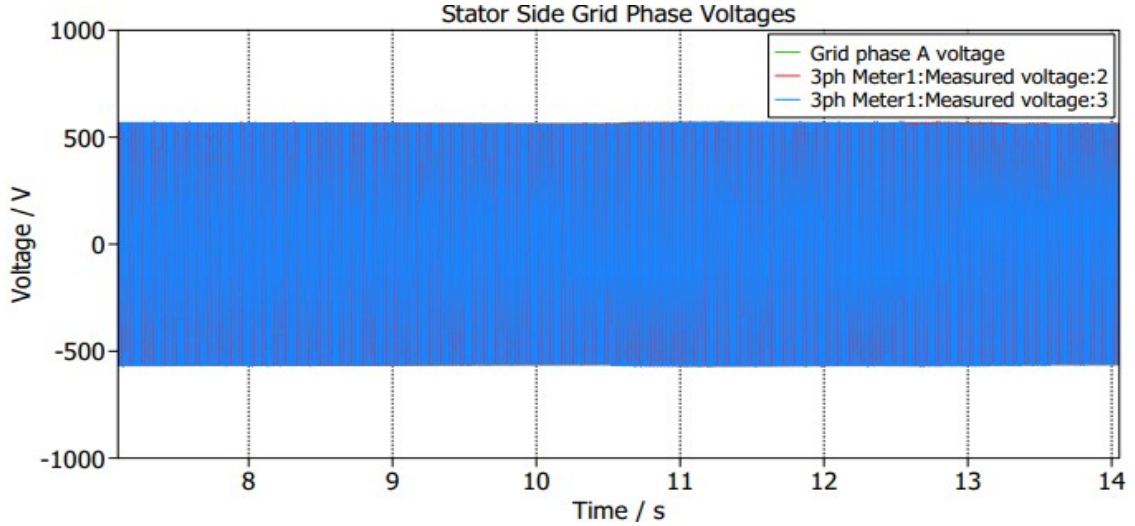
Tablo 6.3. Simülasyon için rüzgâr hızının zamanla değişimi

Zaman /saniye	Rüzgâr Hızı (m/s)
0-7	14 (senkron altı hız)
7-14	11 (senkron hız)
14-21	8 (senkron üstü hız)

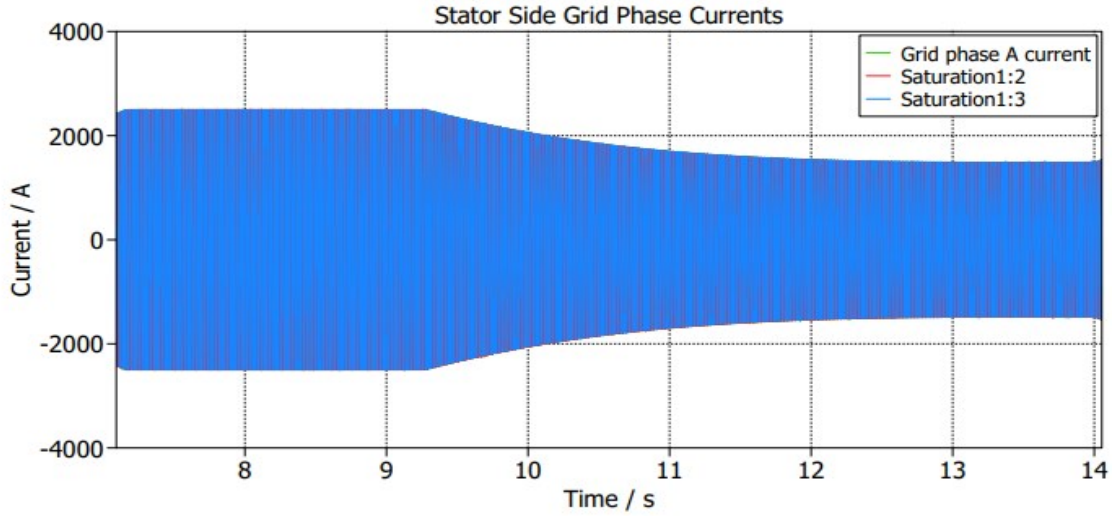


Şekil 6.7. Zamana bağlı rüzgâr hız değişimi

ÇBAG senkron hızda çalıştırıldığında görüldüğü gibi 7-14 saniye zaman aralığındadır. Sistemde üretilen gücün tamamı statordan kaynaklanmaktadır. Sistemin kayması sıfır olduğu için bu aralıkta rotor gücü sıfırdır. ÇBAG senkron altı hızda çalıştırıldığında 0-7 saniye aralığında stator gücü sağlarken rotor şebekeden güç çeker. Makine senkron üstü hızda, 20-30 saniye zaman aralığında çalıştırıldığında, hem rotor hem de stator şebekeye güç sağlar. Sistemde üretilen toplam güç, toplam mekanik güce eşdeğer olan stator gücü ile rotor gücünün toplamıdır.



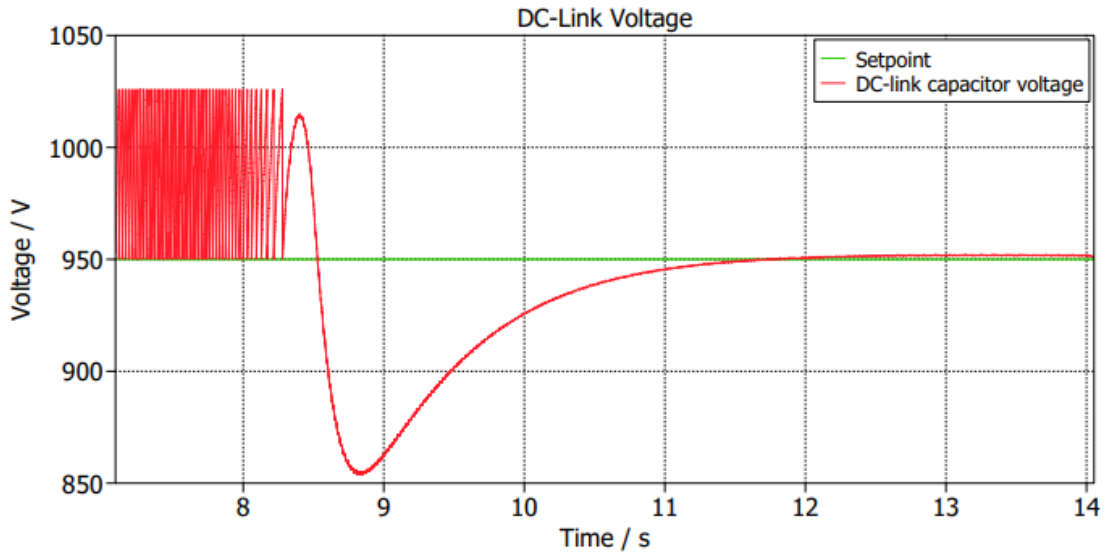
Şekil 6.8. Üç fazlı stator gerilimi



Şekil 6.9. Üç fazlı stator akımı

Yukarıdaki sonuçtan, ÇBAG senkron hızda çalıştırıldığında, stator akımları dc gibi davranır, ancak makine senkron altı veya senkron üstü hızda çalıştırıldığında, rotor akımı, makinenin kaymasıyla bağlı olarak stator akımı değişmektedir.

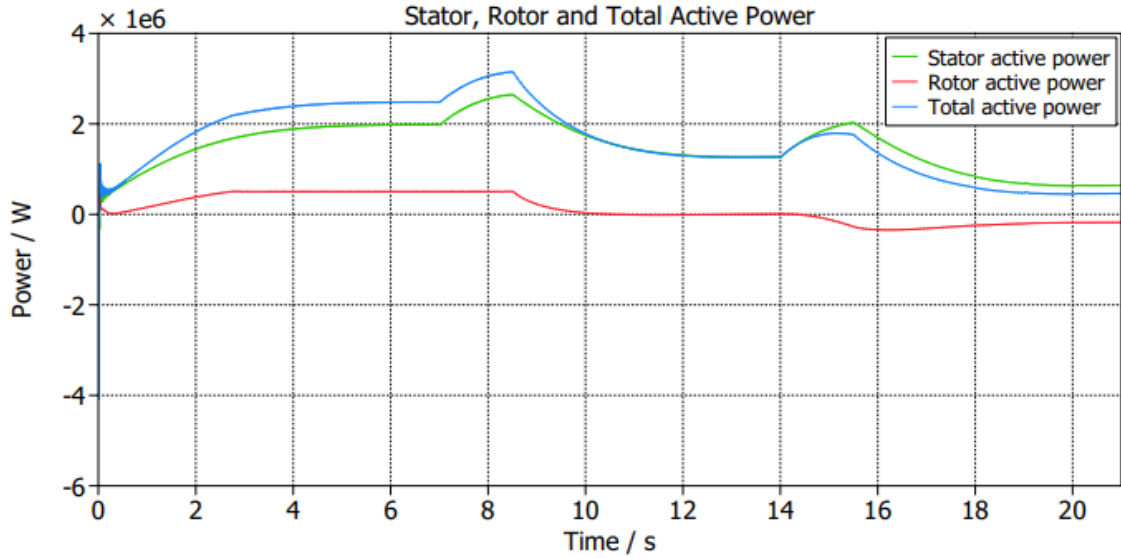
Şebeke tarafındaki dönüştürücü, DC bara gerilimini kontrol eder ve şebeke ile reaktif güç alışverişini düzenler. Şebeke tarafı denetleyicisinin DC bara gerilimi simülasyon grafiği şekil 6.11’de gösterilmiştir.



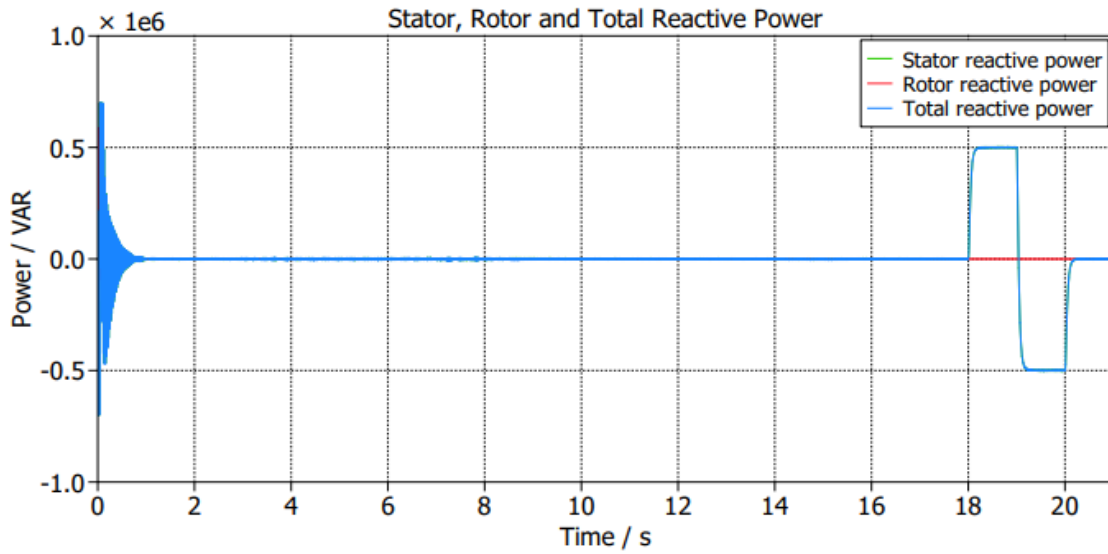
Şekil 6.10. DC bara gerilimi

#### 6.4.2. Aktif ve Reaktif Güç Kontrol Simülasyonu

Şebeke ile ÇBAG arasındaki reaktif güç değişimi, şebeke tarafındaki dönüştürücü tarafından kontrol edilir. Şebeke tarafı kontrolöründeki şebeke akımının  $I_{qg}$  eksenine, reaktif güç alışverişinin kontrolünü gerçekleştirir. Aşağıdaki simülasyon sonuçları şekil 6.25'te ve şekil 6.26'da, ÇBAG'ün şebeke arasındaki aktif ve reaktif güç alışverişini göstermektedir.



Şekil 6.11. Şebeke ile reaktif güç değişim kontrolü



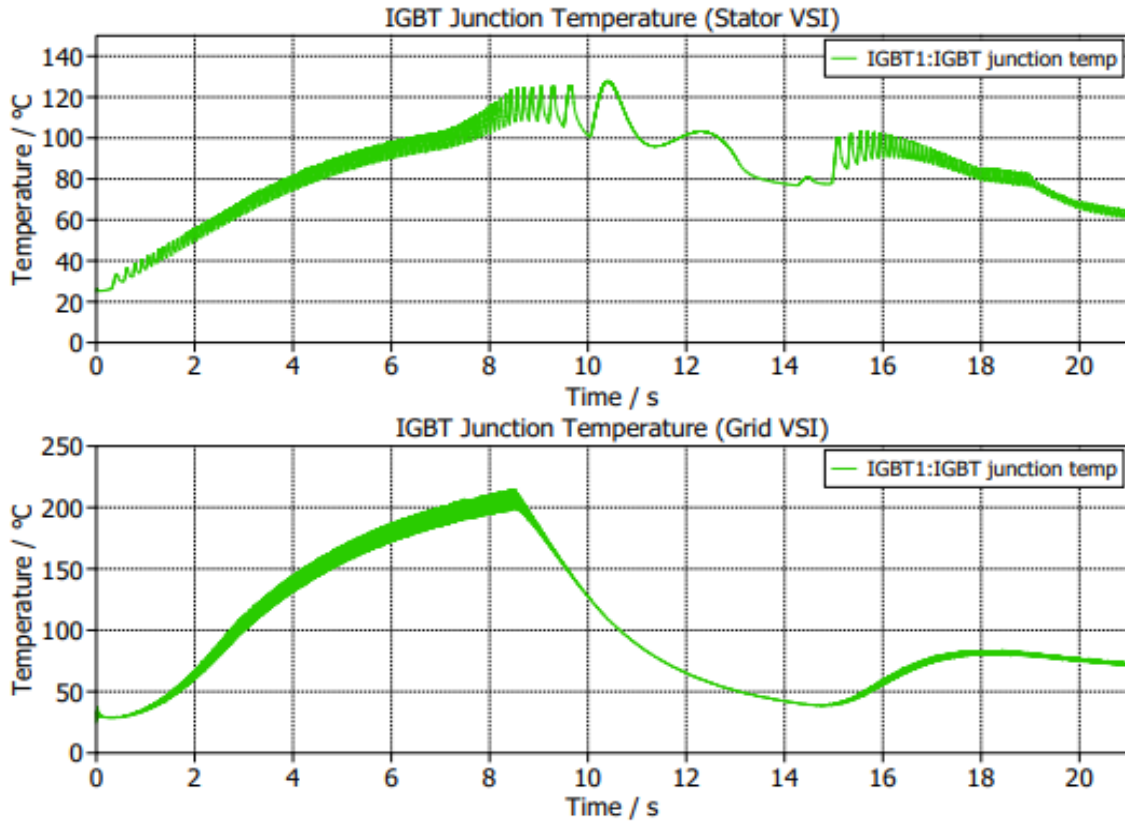
Şekil 6.12. Şebeke ile reaktif güç değişim kontrolü

### 6.4.3. Stator ve Şebeke PWM'lerin Sıcaklık Simülasyonları

Stator ve şebeke tarafında PWM'lerin simülasyonda kullanılan IGBT ve diyot modelleri aşağıdaki gibidir;

- Stator tarafı PWM'deki IGBT ve diyot, ABB marka ve 5SNA\_1600N170100 modeli kullanılmıştır.
- Şebeke tarafı PWM'deki IGBT ve diyot, ABB marka ve 5SND\_800M170100 modeli kullanılmıştır.

Termal simülasyon sonuçlarına göre kullanılan IGBT ve diyotların zamana bağlı sıcaklık değişim grafikleri şekil 6.27'de verilmiştir.



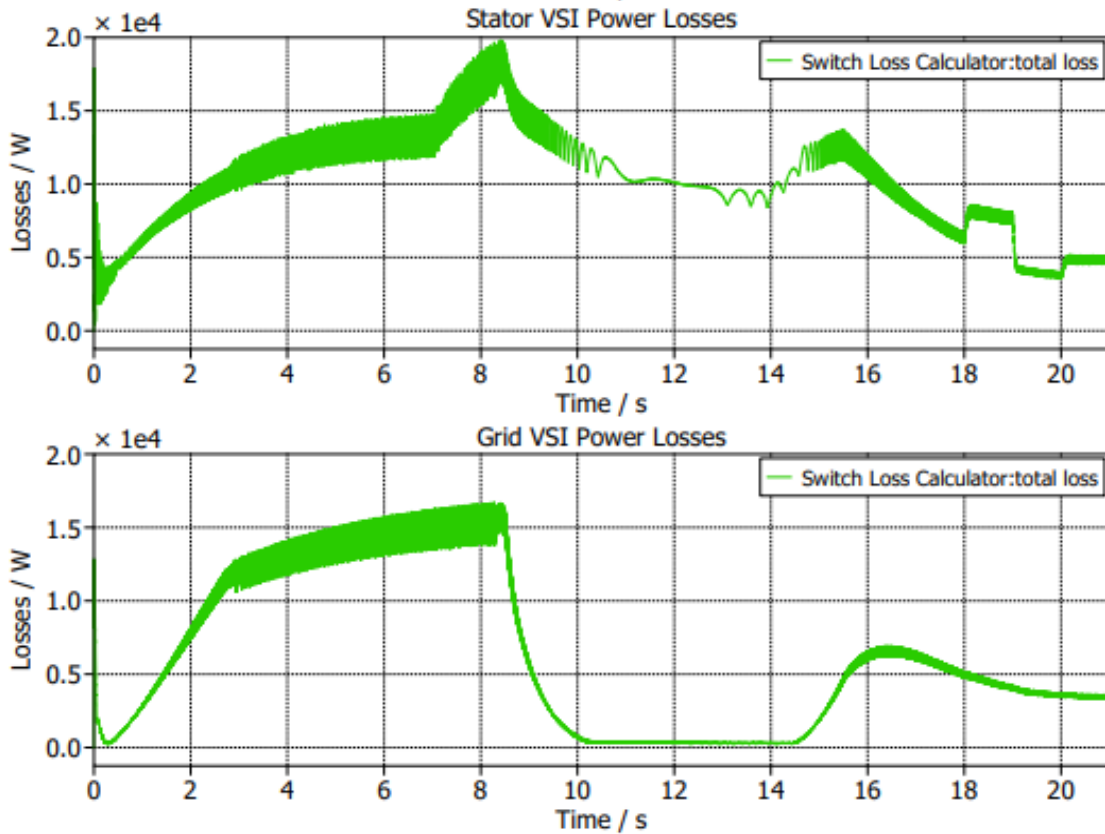
Şekil 6.13. Stator ve şebeke PWM'lerin zamana bağlı sıcaklık değişimi

#### 6.4.4. Stator ve Şebekedeki Toplam Güç Kayıp Simülasyonları

Asenkron motorlarında, stator sargı direnci nedeniyle stator bakır yüksektir. Oluk dolgusunun optimum tasarımı, stator nüvesinde daha kalın iletkenler ve kolay havalandırma kullanarak bakır kayıplarını azaltmaya yardımcı olur. Ancak bu, stator manyetik malzemesinin hacmini azaltarak doymasına ve nüve kaybını artırmasına neden olur, Rotordaki bakır kayıpları, rotor iletken çubuklarında veya sargılarında ısınmaya neden olur.

ÇBAG'ün temel boyutlandırma denklemlerine göre hesaplanan analitik toplam güç kaybı  $P_e = 101.2$  kW'dır. SEA sonucuna göre ise,  $P_e = 127.43$  kW'dır.

ÇBAG tabanlı rüzgar türbininde stator ve şebeke tarafındaki güç kayıplarının zamana bağlı değişim grafikleri şekil 6.28'de verilmiştir.



Şekil 6.14. Stator ve şebekedeki toplam güç kayıplarının zamana bağlı değişimi

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 7.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasının bulgularına dayanarak, aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

#### 1- Rotor Sargılı Asenkron Makine Tasarımı:

Bu tez çalışmasında ÇBAG ile detaylı literatür taramasının ardından rotoru sargılı asenkron generatörün analitik tasarımına değinilmiştir. Asenkron makine tasarımının boyutlandırma denklemleri verilerek ve tasarım algoritması kapsamında analitik hesaplamalar MATLAB programında gerçekleştirilmiştir. Elde ettiğimiz ÇBAG'ün isterleri RMxprt'de modellenip doğrulanmıştır. Boyutsal analiz ayrıca mikro makineler tasarlamak içinde tartışılmıştır. Ölçekli rüzgâr generatörü, tasarımını gerçekleştirdiğimiz 2MW'lık generatör ile aynı tepkiyi vereceğinden, rüzgâr çiftliği entegrasyon sorunlarını çözmek için mikro generatörler kullanmak mümkündür. İki makinenin dirençleri ve reaktansları eşitlenirse, mikro makine ve tasarlanan makinenin dinamik tepkileri aynı olacaktır.

#### 2- ÇBAG ile Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sisteminde İnceleme:

Tasarlanan ÇBAG, Matlab/Simulink ve PLECS programında REDS'i modellenmiştir. ÇBAG'ün maksimum güç noktası takibi ile değişken rüzgâr koşullarında çalışmasının performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, mevcut REDS için bir ÇBAG'ü yeniden tasarlama fırsatı varsa, bunu bir orta gerilim sistemi için tasarlamak mantıklı olacaktır.

#### 3- ÇBAG' ün kontrolü:

Bu tezde, rotor tarafı dönüştürücü için rotor akı yönlendirmeli ÇBAG'ün vektör kontrolü ve şebeke tarafı dönüştürücü için şebeke gerilimi yönlendirme vektör kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tez, ÇBAG'ün maksimum güç noktası takibi ile değişken rüzgâr koşullarında çalışmasını analiz etmektedir. Maksimum güç üretmek için asenkron generatörün başarılı kontrolü sağlanmıştı ÇBAG'ün farklı çalışma hızlarında çalışması gözlemlenmiş ve sistem değişken rüzgâr hızına maruz bırakılmıştır. Şebeke ile ÇBAG arasındaki aktif- reaktif güç değişimi, şebeke tarafındaki dönüştürücü tarafından kontrol

edilmesi sağlanmış ve referans çıkış sinyali karşılaştırılmıştır. ÇBAG'ün vektör kontrolü, makinenin dinamik kontrolünü sağlayan çok önemli bir kontrol tekniğidir. Mevcut döngüler ayrıntılı olarak incelenmiştir. ÇBAG için oluşturulan kontrol algoritması başarılı bir şekilde test edilmiş olup simülasyon sonucu elde edilen grafiksel sonuçlar verilmiştir.

## 7.2. Öneriler ve Gelecekteki Çalışmalar

Tek bir makinenin bir rüzgâr çiftliğini simüle etmesi ve sonuç olarak rüzgâr entegrasyonu sorununu araştırması mümkün olmadığından, mikro rüzgâr generatörleri kullanarak laboratuvar tabanlı bir rüzgâr çiftliğinin prototipini oluşturmak ideal bir çözüm olabilir. Laboratuvarda kurulacak rüzgâr çiftliğinde, ÇBAG, SKAG ve SMSG gibi farklı tipte rüzgâr generatörlerini içerebilir. Şebeke ile etkileşime girerken kurulduğu yere bağlı olarak farklı rüzgâr profilleri altında test edilebilir. Gelecek çalışmada tasarladığım ÇBAG mikro generatör olarak küçültülüp SEA ortamında doğrulamalı ve prototip olarak laboratuvar ortamında ölçekli ÇBAG'ün verimliliği değerlendirilebilir.

Değişken hızlı rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biridir. ÇBAG için yapılan vektör kontrolü asenkron generatörün şebekeye bağıyken yapıldığını sunmaktadır. Sistem kontrolü akım döngülerine göre gerçekleştirilmiştir. Bu model, kontrolör bloklarındaki değişikliklerle rüzgâr türbininin bağımsız çalışmasına genişletilebilir. Modelin statoru doğrudan şebekeye bağlıdır. Bu model için stator akısı şebeke tarafından sağlanır, bağımsız uygulamada stator akısı tahmin edilmelidir. Türbinin diğer mikro kaynaklarla entegrasyonu hibrit sistemlerle daha yüksek verimliliğe sahiptir ve güç sistemi istikrarına ve güvenliğine daha fazlasını eklemektedir. Türbin modeli, diğer kaynaklarla birlikte kararlılığı artırabilir ve güç sistemi dalgalanmalarını en aza indirebilir.

## KAYNAKLAR

- Aashish Pant, B. E. (2019). Modelling and Design of Grid Connected Doubly Fed Induction Generator, Master degree, Texas Tech University, United States of America.
- Abad G., López J., Rodríguez M. A., Marroyo L., and Iwanski G. (2011). Doubly Fed Induction Machine.
- Abad G. (2016). Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications.
- Ackermann T. (2005). Wind Power in Power Systems. John Wiley.
- Alger P. L. (1970). Induction Machines, Their Behavior and Uses. Gordon and Breach,
- Alger P. L. (1965). The Nature of Induction Machines. Gordon and Breach.
- Âmin B. (2001). Induction Motors. Springer.
- Auckland D. W. and Shuttleworth R. (1981). Compensation Systems for a Micromachine Model, IEE Proc. C Gener. Transm. Distrib., vol. 128, no. 1, pp. 12–17.
- Auckland D. W., Kabir S. M. L., and Shuttleworth R. (1990). Generator Model for Power System Studies, Transm. Distrib., vol. 137, no. 6, pp. 383–390.
- Auckland D. W., Shuttleworth R., and Turki Y. A. A. (1987). Micromachine Model for the 132 Simulation of Turbine Generators, Transm. Distrib., vol. 134, no. 4, pp. 265–271.
- Barre O. and Napame B. (2015). Fractional Slot Concentrated Windings, A New Method to Manage the Mutual Inductance between Phases in Three-Phase Electrical Machines and Multi-Star Electrical Machines, Machines, vol. 3, no. 2, pp. 123–137.
- Berchten S., Reichert K., and Thaler E. (1989). Micromachine for Real-Time Generator Simulation Design Limits and a Novel Solution with Adjustable Parameters, IEEE Trans. Energy Con., vol. 9, no. 12, pp. 38–39.
- Boldea I and Nasar S. A. (1989). The Induction Machines Design Handbook. CRC Press/Taylor & Francis.
- Boldea I. and Nasar S. A. (1998). Induction Machine Handbook. Boca Raton, Fla: CRC Press.

- Boldea I. (2006). *The Electric Generators Handbook*. CRC/Taylor & Francis.
- Bolik S. (2003). Grid requirements challenges for wind turbines, in Proc. Int. Work. LargeScale Integration Wind Power Transmission Networks Offshore Wind Farms, Billund, Denmark, Oct., 20–21.
- Bongiorno M. (2004). Control of voltage source converters for voltage dip mitigation in shunt and series configuration, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, Licentiate Thesis 515 L, Nov.
- Carlson O., Hylander J. and Thorborg K. (1996). Survey of variable speed operation of wind turbines, in Proc.of European Union Wind Energy Conference, Goteborg, Sweden, May, 20–24, pp. 406–409.
- Chalmers B. J. and Williamson A. C. (1991). *Machines*. Research Studies Press.
- Chapman S. J. (1999). *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill.
- Cheong S. W., Hilinski E. J., and Rollett A. D. (2003). Grain Growth in a Low-Loss ColdRolled Motor-Lamination Steel, *Met. Mat Trans A*, vol. 34, no. 6, pp. 1321–1327.
- Christofides N. (1965). Origins of Load Losses in Induction Motors with Cast Aluminium Rotors,” *Proc. Inst. Electr. Eng. UK*, vol. 112, no. 12, p. 2317.
- Cistelecan M. and Demeter E. (1997). New Three-Phase A.C. Windings with Low Spatial Harmonic Content,” *Rec. Electromotion Symp.*, pp. 98–100.
- Cochran P. L. (1989). *Polyphase Induction Motors*. M. Dekker.
- Concordia C. (1951). *Synchronous Machines, Theory and Performance*. New York.
- Daut I., Anayet K., and Tirapathy S. (2009). Design and modeling of induction motor using opera 2D based on aluminum material, 3rd International Conference on Energy and Environment, pp. 94–97.
- Dekhane A., Lekhchine S., Bahi T., Ghoudelbourg S., and Merabet H. (2012). DFIG modeling and control in a wind energy conversion system, 1st Int. Conf. Renew. Energies Veh. Technol, pp. 287–292.
- Dendouga A., Abdessemed R., Bendaas M. L., and Chaiba A. (2007). Decoupled active and reactive power control of a doubly-fed induction generator (DFIG), *Mediterr. Conf. Control Autom. MED*, no. 1.
- El Azzaoui M., Mahmoudi H., and Boudaraia K. (2016). Analysis and control of grid connected DFIG and solar PV based hybrid energy system, *Int. Renew. Sustain. Energy Conf.*, pp. 1104–1109,

- Erdem İ. (2019). Çift Beslemeli Asenkron Generetör Tabanlı Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin Kontrolü, Tasarımı ve Analizi, Munzur Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tunceli.
- Fan L., Miao Z., Miao L. F., Fan Z. (2015). Modeling and Analysis of Doubly Fed Induction Generator Wind Energy Systems, London: Academic Press.
- Gross C. A. (2007). Electric Machines. CRC Press.
- Haitham, K. A. and Abu-Rub, H. (2014). Mariusz Malinowski, Ed., Power Electronics for renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications, First. IEEE Press and John Wiley & Sons Ltd.
- Hamdi E. S. (1994). Design of Small Electrical Machines, 1st ed. Chichester: Wiley.
- Hammons T. J. and Parsons A. J. (1971). Design of Microalternator for Power-System Stability Investigations,” Proc. Inst. Electr. Eng. UK, vol. 118, no. 10, p. 1421.
- Hansen L. H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H., Sørensen P, and Bak-Jensen B. (2001). Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, Tech. Rep. Risø-R-1205(EN), ISBN 87-550-2743-8, Dec.
- Ho S. L. and Fu W. N. (1998). Review and Future Application of Finite Element Methodes in Induction Motors,” Electr. Mach. Power Syst., vol. 26, no. 2, pp. 111–125.
- Hofmann M. J. and Herzog H.-G. (2015). Modeling Magnetic Power Losses in Electrical Steel Sheets in Respect of Arbitrary Alternating Induction Waveforms: Theoretical Considerations and Model Synthesis, IEEE Trans. Magn., vol. 51, no. 2, pp. 1–11.
- Hopfensperger B., Atkinson D. J. and Lakin R. A. (2000). Stator-flux-oriented control of a doubly-fed induction machine with and without position encoder, IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 147, pp. 241–250.
- Iacchetti M. F., Marques G. D., and Perini R. (2015). A scheme for the power control in a DFIG connected to a DC bus via a diode rectifier, IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 3, pp. 1286–1296.
- Ioannides M. G. and Tegopoulos J. A. (1988). Optimal efficiency slip-power recovery drive,” IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 3, no. 2, pp. 342–348, June.
- Ionel D. M., Cistelean M. V, Miller T. J. E., and McGilp M. I. (1998). A New Analytical Method for the Computation of Airgap Reactances in Three-Phase Induction Machines, Rec. IEEE – IAS, Annu. Meet., vol. 1, pp. 65–72,

- Jun-qing L., and Xi-mei W. (2013). FEM Analysis on Interturn Fault of Rotor Winding in DFIG,” in *Electrical Machines and Systems*, pp. 797–802.
- Kalsi S. S. and Adkins B. (1971). Transient Stability of Power Systems Containing both Synchronous and Induction Machines,” *Proc. IEE*, vol. 118, no. 10, pp. 1467–1474.
- Kimmich R., Doppelbauer M., Pefers D. T., Cowie J. G., and Bruvn E. F. (2006). Die Cast Copper Rotor Motors via Simple Substitution and Motor Redesign for Copper, in *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEM)*.
- Kral A., Haumer A., Haigis M., Lang H., and Kapeller H. (2009). Comparison of a CFD Analysis and a Thermal Equivalent Circuit Model of a TEFC Induction Machine With Measurements, *IEEE Trans. Energy Con.*, vol. 24, no. 4, pp. 809–818.
- Laithwaite R. (1966). *Induction Machines for Special Purposes*. Newnes.
- Leonhard W. (1996). *Control of Electrical Drives*, 2nd ed. Berlin, Germany: SpringerVerlag,
- Lipo T. A. (2004). *Introduction to AC Machine Design*. Wisconsin Power Electronics Research Center, University of Wisconsin.
- Lipo T. A. (2011). *Introduction to AC Machine Design*, Third. Madison, USA: Wisconsin Power Electronics Research Center, University of Wisconsin.
- Madescu G., Boldea I., and Miller T. J. E. (1996). An Analytical Iterative Model (AASM) for 135 Induction Motor Design,” *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 23, pp. 566–573.
- Martinez J., Belahcen A., and Arkkio A. (2015). 3D Permeance Model of Induction Machines Taking into Account Saturation Effects and its Connection with Stator Current and Shaft Speed Spectra, *IET Electr. Power Appl.*, vol. 9, no. 1, pp. 20–29, 136.
- Martinez-Roman J., Perez-Cruz J., Pineda-Sanchez M., Puche-Panadero R., Roger-Folch J., Riera-Guasp M., and Sapena-Bano A. (2015). Electrical Machines Laminations Magnetic Properties: A Virtual Instrument Laboratory, *IEEE Trans. Educ.*, vol. 58, no. 3, pp. 159–166.
- McAdams W. H. (1942). *Heat Transmission*, 2nd ed. New York: McGraw Hill Inc.
- Mochizuki M., Hibino S., and Ishibashi F. (1994). Application of 6.5% Silicon Steel Sheet to Induction Motor and ITS Magnetic Properties, *Electr. Mach. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 17–29.

- Morel L., Godfroid H., Mirzaian A., and Kauffmann J. (1998). Double-fed induction machine: converter optimisation and field oriented control without position sensor, *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 145, no. 4, pp. 360–368.
- Mthombeni T. L., Pillay P., and Strnat R. M. W. (2007). New Epstein Frame for Lamination Core Loss Measurements Under High Frequencies and High Flux Densities, *IEEE Trans. Energy Con.*, vol. 22, no. 3, pp. 614–620.
- Muhando E. B., Senjyu T., Uehara A., Funabashi T., and Kim C. H. (2009). LQG design for megawatt-class WECS with DFIG based on functional models' fidelity prerequisites, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 4, pp. 893–904.
- Mutschler P. and Hoffmann R. (2002), Comparison of wind turbines regarding their energy generation, in *Proc. 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, vol. 1, Cairns, Qld., Australia, June, 23–27, pp. 6–11.
- Nasar S. A. (1987). *Handbook of Electric Machines*. McGraw-Hill.
- Ouyang, J., Tang, T., Diao, Y., Li, M., Yao, J. (2008). Control Method of Doubly Fed Wind Turbine for Wind Speed Variation Based on Dynamic Constraints of Reactive Power. *IET Renew. Power Gener.*, 12(9):973-980.
- Pena R., Clare J. C., and Asher G. M., (1996). Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation, *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 143, pp. 231–241.
- Petersson A. (2005). Analysis, modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines,” *Doktorsavhandlingar vid Chalmers Tek. Hogsk.*, no. 2282.
- Pyrhonen J., Jokinen T., and Hrabovcova V. (2013). *Design of Rotating Electrical Machines*
- Rabelo B. and Hofmann W. (2011), Optimal active and reactive power control with the doubly-fed induction generator in the MW-class wind-turbines, in *Proc. International Conference on Power Electronics and Drives Systems*, vol. 1, Denpasar, Indonesia, Oct., 22–25, pp. 53–58.
- Rangekar A., Rao K. V. N., Gupta M. K., and Saxena S. N. (1985), Development of Time Constant Regulator for Micron-machine, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. IE-32.
- Report A. (2013). Sensorless Field Oriented Control of 3-Phase Induction Motors Using Control Law Accelerator (CLA), no. October, pp. 1–44.
- Rho J.-S., Lee C.-H., and Jung H.-K. (2007), Optimal Design of Ultrasonic Motor Using Evolution Strategy and Finite Element Method, *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 25, pp. 699–704.

- Richter R. (1954). *Electric Machines*, Bassel/Stuttgart: Verlag Birkhauser.
- Robert R. (1950). Micromachines and Microreseaux: Study of the Problems of Transient Stability by the use of Models Similar Electromechanically to Existing Machines and Systems, in CIGRE, pp. 338–346.
- Ruiz D., Asiain T. I., and Olguin D. (1999). Teaching and Research Laboratory Simulator of Electric Power Systems, in FIE'99. 29th Annual Frontiers in Education Conference, p. 11B6/8-11B6/14.
- Said and Mandoko Na Mpeya B. (1983). Sub and Super-Synchronous Induction Motor-Thyristor Cascade Control, IFAC Proc. Vol., vol. 16, no. 16, pp. 345–352.
- Sawahata M., Nishihama K., Mikami H. and Fujigaki T. (2009). Magnetic Flux Density Analysis of Wound Rotor Induction Motor by Permeance Model, in International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEM), pp. 1–6.
- Sawhney A. K. (1984). *A Course in Electrical Machine Design*. Dhanpat Rai and Sons.
- Say M. G. (1976). *Alternating Current Machines*. Wiley.
- Say M. G. (1958). *The Performance and Design of Alternating Current Machines*. Pitman.
- Sen P. C (1977). *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. John Wiley & Sons,
- Singla B. R., Marwaha S., and Marwaha A. (2006), Design and Transient Analysis of Cage Induction Motor Using Finite Element Methods, in 2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems, pp. 1–5.
- Soong W. L., Kliman G. B., Johnson R. N., White R. A., and Miller J. E. (2000). Novel HighSpeed Induction Motor for a Commercial Centrifugal Compressor, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 36, no. 3, pp. 706–713.
- Sprague S. and Jones D. (2000). Using the New Lamination Steels Database in Motor Design, in Proceedings of SMMA, pp. 1–12.
- Staszak J. (2013). Determination of Slot Leakage Inductance for Three-Phase Induction Motor Winding using an Analytical Method, Arch. Electr. Eng., vol. 62, no. 4.
- Tang F. F. (2002). *Induction Machine Design Handbook*. Shanghai, China: China Machine Press.
- Tang Y. and Xu L. (1995). Flexible active and reactive power control strategy for a variable speed constant frequency generating system, IEEE Trans. Power Electron., vol. 10, no. 4, pp. 472–478, July.

- Trzynadlowski A. (1994). *The Field Orientation Principle in Control of Induction Motors*. Kluwer Academic,
- Ulu Cenk, Kömürgöz Güven, (2012) “Rüzgâr Türbini Uygulamaları için 500 kW Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tasarımı, ELECO Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa.
- URL-1 Ca.mouser.com, Mouser Electronics-Electronic Components Distributor. (Ziyaret tarihi: 10 Mart 2023).
- URL-2 Wind Energy Foundation, [Online]. Available: 133 <http://windenergyfoundation.org/>. (Ziyaret tarihi: 10 Mart 2023).
- URL-3 U.S. Motors, [Online]. Available: <http://www.usmotors.com/>. (Ziyaret tarihi: 11 Mart 2023).
- Vakil G. I. and Rajagopal K. R. (2010). Computer Aided Design of a Compact Doubly-Fed Induction Generator for Small Wind Power Application, *IEEE Trans. Ind. App.*, pp. 456–460.
- Veinott C. G. (1959). *Theory and Design of Small Induction Motors*. Mc Graw-Hill.
- Walker J. H. (1981). *Large Synchronous Machines*. Clarendon Press.
- Wang S. and Ding Y. (1993). Stability analysis of field oriented doubly-fed induction machine drive based on computer simulation, *Electric Machines and Power Systems*, vol. 21, no. 1, pp. 11–24.
- Wanjiku J., Khan M. A., Barendse P. S., and Pillay P. (2015). Influence of Slot Openings and Tooth Profile on Cogging Torque in Axial-Flux PM Machines, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 12, pp. 7578–7589, Dec.
- Wilkinson K. (1965). *Rewinding Small Motors*. Newnes.
- Williamson S. (1995). Implementation of finite-element analysis in a cage induction motor electrical design program, in *Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives*, pp. 57–61.
- Xiahou, K., Lin, X., Liu, Y., Wu, Q.H. (2018). Robust Rotor-Current Sensorless Control of Doubly Fed Induction Generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(2):897-899.
- Xu L. And Wei C. (1995). Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme,” *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 31, no. 3, pp. 636–642, May/June.

Zhao, M., Yuan, X., Hu, J. (2017). Modeling of DFIG Wind Turbine Based on Internal Voltage Motion Equation in Power Systems Phase-Amplitude Dynamics Analysis. IEEE Transactions on Power Systems, DOI 10.1109/TPWRS.2728598.

Zinger D. S. and Muljadi E. (1997). Annualized wind energy improvement using variable speeds, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 33, no. 6, pp. 1444–1447, Nov./Dec.





**EKLER**

## EK-A

Tablo A.1. ÇBAG'ün tasarım boyutlandırma değerlerinin MATLAB'teki sonuçları

Specification	Formula	Quantity
Güç [MW]	$P$	2,0
Verim [%]	$\eta$	95,8
Gerilim [V]	$V_{SN}$	690
Kutup	$2.p_1$	4
Faz	$m$	3
Hız [rpm]	$n_{1N}$	1500
Frekans [Hz]	$f_1$	50
Max. kayma	$S_{max}$	$\pm 0,25$
Elektromanyetik güç [MW]	$S_{gN} = \frac{P}{0,96}$	2,604
Stator güç [MW]	$S_{SN}$	2
Rotor güç [MW]	$S_{RN} = S_{SN} \cdot  S_{max} $	0,5
<b>Stator Tasarım</b>		
Elektromanyetik Tork [kN.m]	$T_e = \frac{S_{gN}}{2\pi \frac{f_1}{p_1} (1 +  S_{max} )}$	13.27
Rotoru kesme gerilimi [N/cm <sup>2</sup> ]	$1.5 < f_{xt} < 6$	6
Eksenel uzunluğu oranı	$\lambda = \frac{l_i}{D_{ic}}; 0.2 < \lambda < 1.5$	1
Stator iç çapı[m]	$D_{ic} = \sqrt[3]{\frac{2 \times T_e}{\pi \times \lambda \times f_{xt}} I_{SN}} = \frac{S_{SN}}{\sqrt{3V_{SN}}}$	0.52
Stator dış çapı [m]	$D_{out} = 1.48.D_{is}$	0.796
Norminal stator akımı[A]	$I_{SN} = \frac{S_{SN}}{\sqrt{3V_{SN}}}$	1675.46

Tablo A.1. (Devam) ÇBAG'ün tasarım boyutlandırma değerlerinin MATLAB'teki sonuçları

Specification	Formula	Quantity
Hava aralığı akı yoğunluğu[T]	$B_{g1}$	0.75
Kutup adımı [m]	$\tau = \frac{\pi D_{is}}{2p_1}$	0.4
Stator sargı faktörü	$K_{w1} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{q_1 \sin \frac{\pi}{6q_1}} \sin \frac{\pi \gamma}{2 \tau}$ $q_1 = 5(\text{faz} - \text{kutup başına yuva})$ $\frac{\gamma}{\tau} : \text{stator bobin açıklığı/kutup adımı}$ $\frac{2}{3} \leq \frac{\gamma}{\tau} \leq 1$	0.9097
Geçerli yol başına dönüş sayısı	$W_{1a} = \frac{K_e \frac{V_{SN}}{\sqrt{3}}}{2\sqrt{2}f_1 W_1 K_{w1a} B_{g1} \tau l_i}$ $K_E = 0.97(0.97 < K_E < 0.98)$ $a_1 = 2 \text{ (mevcut yol)}$	19.32
Bobin başına sarım sayısı	$n_{c1} = \frac{W_1}{\left(\frac{2p_1 q_1}{a_1}\right)}$	2
Faz başına sarım sayısı	$W_1 = \frac{2p_1}{a_1} q_1 n_{c1}$	20
Stator kutup adımı [m]	$\tau_s = \frac{\pi D_{is}}{m 2p_1 q_1}$	0.0266
Stator kutup sayısı	$N_s = 2p_1 q_1 m$	60
Stator iletken kesit alanı [mm <sup>2</sup> ]	$A_{cos} = \frac{I_{SN}}{a_1 \cdot j_{cos}}$ $j_{cos=6.5} \left[ \frac{A}{mm^2} \right] \text{ (varsayılan akı yoğunluğu)}$	128.88
Stator oluk genişliği [m]	$W_s = 0.5 \tau_s$	0.01333

Tablo A.1. (Devam) ÇBAG'ün tasarım boyutlandırma değerlerinin MATLAB'teki sonuçları

Specification	Formula	Quantity
Stator oluk doluluk alanı [mm <sup>2</sup> ]	$A_{su} = \frac{2n_{c1}A_{cos}}{k_f}$ k <sub>f</sub> =0.55 (varsayılan doldurma faktörü)	937
Stator oluk yüksekliği [mm]	$H_s = \frac{A_{su}}{1000 * W_s}$	70.315
Hava aralığı [mm]	$g = (0.1 + 0.012^3 \sqrt{S_{sn}}) 10^{-3}$	1.6
Stator boyundurluk yüksekliği [m]	$h_{cs} = \frac{Bg^{\tau}}{\pi B_{cs}}$ B <sub>cs</sub> = 1.55[T] (stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu)	0.0637
Dış çap [m]	$D_{outm} = D_{is} + 2(h_{sm} + h_{sw} + h_{cs})$	0.7997~0.8
Temel iletkenin kesit alanı [mm <sup>2</sup> ]	$A_{cose} = \frac{A_{cos}}{4}$ Temel iletken sayısı = 4	32.2
Temel iletkenin yüksekliği [mm <sup>2</sup> ]	$h_{ce} = \frac{A_{cose}}{a_{ce}}$ a <sub>ce</sub> = 12[mm], (temel iletkenlerin eleman genişliği) m <sub>e</sub> = 16 (temel iletken sayısı)	2.68
B[m <sup>-1</sup> ]	$\beta = \sqrt{\frac{\omega_1 \mu_0 \sigma_{co} a_{ce}}{2 W_s}}$ ω <sub>1</sub> = 2π . f1 μ <sub>0</sub> = 1.256 × 10 <sup>-6</sup> σ <sub>co</sub> = 4.3 × 10 <sup>7</sup>	69.64
ξ	$\xi = \beta \times h_{ce}$	0.1866
Deri etkisi katsayısı (16 kat için temel iletken)	$K_{Rme} = \varphi(\xi) + \frac{m_e^2 - 1}{3} \psi(\xi)$ $\varphi(\xi) = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cos 2h\xi - \cos \xi} = 1$ $\psi(\xi) = 2\xi \frac{(\sinh + \sin \xi)}{\cos 2h\xi - \cos \xi}$ = 5.55 × 10 <sup>-4</sup>	1.04675

Tablo A.1. (Devam) ÇBAG'ün tasarım boyutlandırma değerlerinin MATLAB'teki sonuçları

Specification	Formula	Quantity
Ek deri etkisi	$K_{Rad} = 4\beta^4 \cdot h_{ce}^4 \left( \frac{li}{l_{turn}} \right)^2 n_{cn}^2 \frac{(1 + \cos\gamma)^2}{4}$ <p><math>l_{turn}</math>: bobin uzunluğu  <math>\gamma = \left(1 - \frac{\gamma}{\tau}\right) \frac{\pi}{2}</math> 0 (boyut bobini için)</p>	0.01847
Toplam deri etkisi faktörü	$K_R = 1 + (K_{rme} - 1) \frac{l_{stack}}{l_{turn}} + K_{Rad}$	1.03717
<b>Rotor Tasarımı</b>		
Rotor ve stator arasındaki dönüş oranı	$K_{RS} = \frac{W_2 K_{w2}}{W_1 K_{w1}} = \frac{1}{ S_{max} }$	4
Rotor tarafına aktarılan anma stator akımı [A]	$I'_{SN} = \frac{l_{SN}}{K_{RS}}$	418.865
Rotor tarafına aktarılan mıknatıslama akımı [A]	$I'_m = K_m I'_{SN}$	125.6595
Max kaymada rotor akımı [A]	$I'_{RN} = \sqrt{I'^2_{SN} + I'^2_m}$	437.3
Rotor güç faktörü	$\cos\phi_{2N} = \frac{P_{RN}}{\sqrt{3} V_{RN} I'_{RN}}$	0.9578
Rotor sargı faktörü	$K_{W2} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{q_2 \sin \frac{\pi}{6q_2}} \sin \frac{\pi \gamma_R}{2 \tau}$ <p><math>q_2 = 4</math> (Faz başına rotor yuvası)</p>	0.925
Rotor oluk sayısı	$N_r = 2p_1 q_2 m$	48
Faz başına rotor dönüşü	$W_2 = \frac{w_1 K_{w1} K_{RS}}{K_{W2}}$	78.53~80

Tablo A.1. (Devam) ÇBAG'ün tasarım boyutlandırma değerlerinin MATLAB'teki sonuçları

Specification	Formula	Quantity
Bobin başına sarım sayısı	$n_{c2} = \frac{w_2}{\left(\frac{2p_1q_2}{a_2}\right)}$ $a_2 = 1(\text{motor akım yolu})$	5
Rotor oluk kesit adım [m]	$\tau_R = \frac{\pi D_{is}}{m_1 2p_1 q_2}$	0.033805
Rotor iletken kesiti [mm <sup>2</sup> ]	$A_{cor} = \frac{I_{RN}}{a_2 \cdot j_{cos}}$ $j_{cor} = 8 \left[ \frac{A}{\text{mm}^2} \right] (\text{varsayılan akım yoğunluğu})$	43.4
Rotor oluk genişliği [m]	$W_R = 0.45 \tau_R$	0.0152
Rotor kullanabilir oluk alanı [mm <sup>2</sup> ]	$A_{ru} = \frac{2n_{c2}A_{cor}}{k_f}$ $k_f = 0.55 (\text{varsayılan doldurma faktörü})$	789.09
Rotor kullanabilir oluk yüksekliği [mm]	$h_{RU} = \frac{A_{ru}}{1000 * W_R}$	51.913
Minimum rotor diş genişliği [mm]	$W_{tRmin} = \frac{\pi(D_{is} - 2(g + h_{RU} + h_{RW}))}{N_R} - W_R$	11.42
Maximum rotor diş akı yoğunluğu [T]	$B_{tRmax} = \frac{B_{g1}T_R}{W_{tRmin}}$	2.22
Rotor boyundurluk yüksekliği [m]	$h_{cr} = \frac{B_g t}{\pi B_{cr}}$ $B_{cr} = 1.6 [T] (\text{rotor akı yoğunluğu})$	0.0597~ 0.06
İç çap [m]	$D_{IR} = D_{IS} - 2(g + h_{su} + h_{RW} + h_{CR})$	0.287

Tablo A.1. (Devam) ÇBAG'ün tasarım boyutlandırma değerlerinin MATLAB'teki sonuçları

Specification	Formula	Quantity
<b>Mıknatıslanma Akımı</b>		
Carter Katsayısı	$K_C = K_{C1}K_{C2}$ $K_{C1,C2} = \frac{1}{1 - \gamma_{1,2} \frac{g}{2t_{s,r}}}; K_{c1} = 1.0826,$ $K_{c2} = 1.0$ $\gamma_{1,2} = \frac{\left(\frac{2W_{S',R'}}{g}\right)^2}{5 + \frac{2W_{S',R'}}{g}}$ $W_{S'} = \frac{w_s}{\mu_{RS}} = \frac{13.2}{3} = 4.066$ $W_{R'} = \frac{W_R}{\mu_{RR}} = \frac{15.2}{5} = 3.04$	1.126
Hava aralığı mmf [A.turns]	$F_{AA'} = gK_c \frac{B_{g1}}{\mu_0}$	1083.86
Stator dişleri mmf [A.turns]	$F_{AB} = H_{ts}(h_{su} + h_{sw})$ $B_{ts} = B_{g1} \times \frac{t_s}{w_{ts}} = 1.49[T]$ $H_{ts} = 1290 [A/m]$	94.62
Stator boyundurluk mmf [A.turns]	$F_{BC} \approx H_{cs} \cdot l_{csav}$ $(l_{csw})_{BC} \approx \frac{2\pi(D_{out} - h_{cs})}{3 \cdot 2.2p_1} = 0.19266m$ $H_{ts} = 1340[A/m]$	258.17
Rotor dişleri mmf [A.turn]	$F_{A'B'} = H_{tr}(h_{ru} + h_{RW})$ $B_{trt} = B_{g1} \times \frac{t_r}{w_{tr}} = 1.3629[T]$ $B_{trm} = B_{g1} \times \frac{t_r}{w_{trr}} = 1.69[T]$ $B_{trb} = B_{g1} \times \frac{\tau_R}{w_{tR}} = 2.2[T]$ $B_{tR} = \frac{B_{trt} + B_{trb} + 4B_{trm}}{6} = 1.72[T]$ $H_{tr} = 5334[A/m]$	292.34

Tablo A.1. (Devam) ÇBAG'ün tasarım boyutlandırma değerlerinin MATLAB'teki sonuçları

Specification	Formula	Quantity
<b>Mıknatıslanma Akımı</b>		
Rotor boyundurluk mmf [A.turns]	$F_{B'C'} = H_{CR} \cdot l_{CRav}$ $l_{CRav} = \frac{2\pi(D_{shaft} + h_{CR} + 0.01)}{3 \cdot 2.2p_1}$ $= 19266m$ $H_{CR} = 2460[A/m]$	216.92
Toplam manyetik mmf[A.turns]	$F_m = \frac{3W_2K_w2I_{RO}\sqrt{2}}{\pi p_1}$ $= (F_{AA'} + F_{AB} + F_{BC} + F_{A'B'} + F_{B'C'})$	1946.40
Yüksüz rotor akımı [A]	$I_{RO} = F_m \frac{\pi \cdot p_1}{3W_2K_w2\sqrt{2}}$ $K_m = \frac{I_{RO}}{I'_{SN}} = 0.09322$ <p>(varsayılan <math>K_m</math> ile karşılaştırın)</p>	39.05
Doygunluk faktörü [%]	$K_s = \frac{F_{AB} + F_{BC} + F_{A'B'} + F_{B'C'}}{F_{AA'}}$	79
<b>Reaktanslar ve Dirençler</b>		
Mıknatıslanma Endüktansı [mH]	$L_M = \frac{6\mu_0(W_{1a}K_{WS})^2\tau l_i}{\pi^2 p_1 g K_C (1 + K_S)}$	8.0428
Mıknatıslanma Reaktansı [ $\Omega$ ]	$X_m = \omega_1 L_m$	2.582
Reaktans [ $\Omega$ ]	$X_b = \frac{V_{SN}}{I_{SN}}$	0.238
Mıknatıslanma Reaktansı [p.u.]	$X_m = \frac{X_m}{X_b}$	10.85
Stator uç sargı uzunluğu [m]	$l_{fs} = 2(l_l + l_{l'}) + \pi h_{st}$ $2\left(l_l + \frac{\beta_s \tau}{2\cos\alpha}\right) + \pi h_{ts}$ $l_l = 0.015[m]$ $\beta_s = \frac{\gamma}{\tau} = \frac{12}{15}$ $h_{ts} = 0.07035[m](uç\ bağlantı\ çapı)$ $a = 40$	0.668

Tablo A.1. (Devam) ÇBAG'ün tasarım boyutlandırma değerlerinin MATLAB'teki sonuçları

Specification	Formula	Quantity
Stator direnci[Ω]	$R_s = \rho_{co100^\circ} \frac{w_{1a} \cdot 2}{A_{cos}} (l_i + l_{fs}) \frac{1}{a_1}$	$0.429 \times 10^{-2}$
Stator kaçak endüktansı[mH]	$L_{sl} = \mu_0 (2n_{c1})^2 l_i (\lambda_s + \lambda_{end} + \lambda_{ds}) \frac{N_s}{m_1 a_1^2}$ <p>slot katsayısı, <math>\lambda_2 = \frac{h_{su}}{3W_s} + \frac{h_{sw}}{w'_s} = 7.85</math>  Uç bağlantı katsayısı,</p> $\lambda_{end} = 0.34 q_1 \frac{l_{fs} - 0.64 \beta_s \tau}{l_i} = 1.5143$ <p>Diferansiyel geometrik geçirgenlik</p> $\lambda_{ds} = 0.9 \tau_s (q_1 K_{W1})^2 K_{01} \frac{\sigma_{ds}}{K_c g} = 1.127$ $K_{01} = 1 - 0.033 \left( \frac{W'_s}{g \tau_s} \right) = 0.9873$	$0.257 \times 10^{-3}$
Stator kaçak reaktansı [Ω]	$X_{sl} = \omega_1 L_{sl}$	0.0823
Rotor uç sargı uzunluğu[m]	$l_{fr} = 2 \left( l_i + \frac{\beta_r \tau}{2 \cos \alpha} \right) + \pi (h_{RU} + h_{RW})$ $l_i = 0.015 [m]$ $\beta_r = \frac{\gamma}{\tau} = \frac{10}{12}$ $\alpha = 40^\circ$	0.6375
Rotor direnci[Ω ] (Rotor tarafına indirgenmiş)	$R_R^r = \rho_{co100^\circ} \frac{W_2 \cdot 2}{A_{cor}} (l_i + l_{fs})$	$83.8 \times 10^{-3}$

Tablo A.1. (Devam) ÇBAG'ün tasarım boyutlandırma değerlerinin MATLAB'teki sonuçları

Specification	Formula	Quantity
Rotor kaçak endüktansı[mH] (rotor tarafına indirgenmiş)	$L_{rl}^r = \mu_0(2n_{c2})^2 l_i (\lambda_{SR} + \lambda_{endR} + \lambda_{dR}) \frac{N_R}{m}$ <p>Slot katsayısı, <math>\lambda = \frac{h_{RU}}{3W_R} + \frac{h_{RW}}{W} = 2.1256</math></p> <p>Uç bağlantı katsayısı,</p> $\lambda_{endR} = 0.34q_2 \frac{l_{fr} - 0.64\beta_R^r}{l_i} = 1.1093$ <p>Diferansiyel geometric geçirgenlik</p> $\lambda_{dR} = 0.9\tau_R(q_2K_{w2})^2 K_{02} \frac{\sigma_{dR}}{K_{cg}} = 1.413$ $K_{02} = 1 - 0.033 \left( \frac{W'_R}{g\tau_R} \right) = 0.994$	4.858
Rotor kaçak reaktansı[Ω] (rotor tarafına indirgenmiş)	$X_{rl}^r = \omega_1 L_{rl}^r$	1.525
Rotor kaçak endüktansı [mH]	$L_{RI} = \frac{L_{RI}^r}{K_{RS}^R}$	0.303
Rotor kaçak reaktansı [Ω]	$X_{RI} = \frac{x_{RI}^r}{K_{RS}^2}$	0.0953
Stator bakır kayıpları [kW]	$P_{cos} = 3 \times K_R R_S I_{SN}^2$	37.47
Rotor bakır kayıpları [kW]	$P_{cor} = 3 \times R_R I_{SN}^2$	48.075
Bilezik kayıpları [kW]	$P_{sr} = 3V_{sr} I_R^r$ <p>Fırçalar boyunca voltaj düşüşü <math>V_{SR} = 1V</math></p>	1.3119
Stator boyundurluk ağırlığı [kg]	$G_{cs} \approx \pi(D_{out} - h_{cs}) \times h_{cs} \times l_i \times \gamma_{iron}$	582
Stator dış ağırlığı [kg]	$G_{ts} = \left\{ \frac{\pi}{4} [(D_{is} + 2(h_{su} + h_{sw}))^2 - D_{is}^2] - N_s \times (h_{su} + h_{sw}) \times W_s \right\} l_i \gamma_{iron}$	313.8

Tablo A.1. (Devam) ÇBAG'ün tasarım boyutlandırma değerlerinin MATLAB'teki sonuçları

Specification	Formula	Quantity
Stator nüve kayıpları [kW]	$P_{irons}$ $= P_{10} \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1.5} (K_t B_{ts}^2 G_{ts} + K_y B_{cs}^2 G_{cs})$ $\frac{P_{10}}{50} = 3 \left[\frac{W}{kg}\right]$ $K_t = 1.6$ $K_y = 1.3$	8.442
Rotor nüve kayıpları [kW]	$P_{ironr} < S_{max}^2 * P_{irons}$	0.527
Toplam kayıplar [kW]	$\sum P_e = P_{cos} + P_{cor} + P_{irons}$ $+ P_{ironr} + P_{ad} + P_{sr}$ $P_{add} = 10[kW]$	101.2
Verim [%]	$\eta_e = \frac{P_{SN} + P_{RN}}{P_{SN} + P_{RN} + \sum P_e}$	95.8

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Amal E.**, Yılmaz K., Özdemir E., (2022). Rüzgâr Enerji Santrallerinin Elektrik Şebekesine Etkilerinin İncelenmesi. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 50-65. <https://doi.org/10.53410/koufbd.1096254>



## ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 1998 yılında girdiği Ondokuz Mayıs Üniversitesi Amasya Meslek Yüksekokulu Endüstriyel Elektronik Teknikerliğinden 2000 yılında mezun oldu. 2017-2020 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliğini tamamladı. 2021-2023 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2001- 2004 yılları arasında Yazaki Otomotiv Yan San. A.Ş 'de Elektrik Test Teknikeri olarak çalıştı. 2006-2010 yılları arasında İnka Yapı Bağlantı Elem. San. ve Tic. A.Ş. Otomasyon-Elektrik Teknikeri olarak çalıştı. 2012-2020 arasında Eko Sinerji Elektrik San. ve Tic. A.Ş. yüksek gerilim proje tasarım teknikeri olarak başladığı işte yüksek gerilim proje mühendisi olarak devam etti. 2022 Şubat ayından beri Ak-Ay Elektrik Dış Tic. Koll. ŞTİ. firmasında İş geliştirmede yüksek gerilim proje mühendisliği olarak devam etmektedir.

