

T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖR TABANLI
RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN 3 FAZLI 5 SEVİYELİ
DÖNÜŞTÜRÜCÜ İLE BENZETİMİ

Tezi Hazırlayan
Yunus ÇITAK

Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Altan GENCER

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Eylül 2022
NEVŞEHİR

T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖR TABANLI
RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN 3 FAZLI 5 SEVİYELİ
DÖNÜŞTÜRÜCÜ İLE BENZETİMİ

Tezi Hazırlayan
Yunus ÇITAK

Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Altan GENCER

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Eylül 2022
NEVŞEHİR

Dr. Öğr. Üyesi Altan GENCER danışmanlığında **Yunus ÇITAK** tarafından hazırlanan “**Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tabanlı Rüzgâr Türbinlerinin 3 Fazlı 5 Seviyeli Dönüştürücü İle Benzetimi**” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

.../.../2022

JÜRİ

Başkan : Prof. Dr. Ersan KABALCI

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Altan GENCER

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ali ÜNLÜTÜRK

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun.....tarih ve..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.../.../2022

Prof. Dr. Şahlan ÖZTÜRK
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Yunus ÇITAK

Elektrik-Elektronik Mühendisi

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince aktarmış olduğu bilgilerden, her zaman her konuda yardımından yararlandığım, tezimde büyük emeği olan Sayın Hocam Dr. Öğr. Üyesi Altan Gencer' e gönülden teşekkür ederim.

Tecrübeleri ve yol göstericiliği ile idari yardımlarından dolayı, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dekanı Sayın Prof. Dr. Ersan Kabalcı' ya teşekkür ederim.

Ayrıca tüm öğrenim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen, hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, ilgi ve dualarıyla daima yanımda olan aileme, yüksek lisans süresince gösterdiği anlayış ve sabır için sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu tez çalışmasını hayatımın vazgeçilmezi, motivasyon kaynağım canım kızım Beren'e ithaf ediyorum.

ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖR TABANLI RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN 3 FAZLI 5 SEVİYELİ DÖNÜŞTÜRÜCÜ İLE BENZETİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Yunus ÇITAK

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2022

ÖZET

Dünyada artan enerji talebi ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjilere yönlendirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgâr enerjisi, rüzgâr türbinleri vasıtasıyla kinetik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör çeşitleri, kullanılacak yerlere ve istenilen özelliklere göre seçilmektedir. Bu tez çalışmasında, genellikle değişken hızlarda çalışabilen ve yüksek güç ihtiyacını karşılama özelliği bulunan çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) tabanlı rüzgâr türbin sistemi üzerine çalışma yapılmıştır. Arka arkaya bağlı iki adet dönüştürücüye sahip ÇBAG tabanlı rüzgâr türbin sistemi çift yönlü enerji akışına uygundur. Bu dönüştürücüler, Matlab/ Simulink ortamında iki seviyeli, üç seviyeli ve beş seviyeli dönüştürücü olarak tasarlanmıştır. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinine farklı dönüştürücü tipleri uygulanarak, toplam güç, reaktif güç, sistemin çıkış gerilimleri ve akımları ve DA bara gerilim değerleri karşılaştırılmıştır. Sistemin yük altında ve farklı rüzgâr hızlarında çalışması gözlenmiştir. Çıkan sonuçların toplam harmonik bozulmaları (THD) incelenmiş ve kullanılan dönüştürücü tipleri için THD izin verilen sınır değerlere uygun olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Rüzgâr türbini, Çift Beslemeli Asenkron Generatör, Beş Seviyeli Dönüştürücü

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Altan GENCER

Sayfa âdeti: 110

**SIMULATION OF DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR BASED WIND
TURBINE WITH 3 PHASE 5 LEVEL CONVERTER**

(M. Sc. Thesis)

Yunus ÇITAK

NEVSEHIR HACI BEKTAS VELI UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2022

ABSTRACT

Increasing energy demand in the world has led countries to energies produced from renewable energy sources. Wind energy, which is a renewable energy source, converts kinetic energy into electrical energy through wind turbines. Generator types used in wind turbines are selected according to the places to be used and the desired characteristics. In this thesis, a study was carried out on a doubly-fed asynchronous generator (DFIG based wind turbine system, which can generally operate at variable speeds and meet high power needs. DFIG-based wind turbine system with two converters connected back-to-back is suitable for bidirectional energy flow. These converters are designed as two-level, three-level and five-level converters in Matlab / Simulink program. Total power, reactive power, output voltages and currents of the system and DC bus voltage values were compared by applying different converter types to the DFW-based wind turbine.. It has been observed that the system works under load and at different wind speeds. The total harmonic distortions (THD) of the obtained results were examined and it was found that the THD was in compliance with the allowable limit values for the converter types used.

Key words: Wind turbine, doubly fed asynchronous generator, five level converter

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Altan GENCER

Page Number: 110

İÇİNDEKİLER

TEZ BİLDİRİM SAYFASI	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xiii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Literatür Özeti	3
1.3. Tezin İçeriği	6
BÖLÜM 2	7
YENİLENEBİLİR ENERJİ	7
2.1. Rüzgâr Enerjisi.....	8
2.2. Rüzgâr Türbini	9
2.3. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması	10
2.4. Rüzgâr Türbinlerinin Yapısı	11
2.5. Rüzgâr Türbini Elemanları.....	13
BÖLÜM 3	14
RÜZGÂR SANTRALLERİNDE KULLANILAN GENERATÖR ÇEŞİTLERİ.....	14
3.1. Doğru Akım Generatörleri	14
3.2. Asenkron Generatörler	15
3.2.1. Sincap Kafesli Asenkron Generatörler	16
3.2.2. Rotoru Sargılı Asenkron Generatörler	16

3.3. Senkron Generatörler	18
3.3.1 Alan Sargılı Senkron Generatörler	19
3.3.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörler	20
BÖLÜM 4	23
RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN DÖNÜŞTÜRÜCÜLER.....	23
4.1. Diyot doğrultucu tabanlı dönüştürücü.....	24
4.2. Sırt Sırt (Arka Arkaya) Dönüştürücüler	25
4.3. Matris Dönüştürücüler	30
4.4. Z-Kaynak Dönüştürücü.....	32
4.5. Çok düzeyli (Multilevel) dönüştürücüler	33
4.6. Darbe Genişlik Modülasyon Teknikleri.....	34
4.6.1 Sinüzoidal DGM	36
4.6.2. Uzay Vektör DGM.....	38
4.6.3. Üçüncü Harmonik İlaveli DGM	39
4.7. ÇBAG Kontrol Yöntemleri	40
4.7.1. ŞTD Kontrolü.....	41
4.7.2 RTD Kontrolü	42
4.8. Clarke Dönüşümü	43
4.9. Park Dönüşümü.....	43
4.10. Harmonikler	44
4.10.1.Harmoniklerin Tanımı.....	45
4.10.2. Harmonik Değer Sınırları ve Hesaplanması	45
BÖLÜM 5	47
İKİ, ÜÇ VE BEŞ SEVİYELİ DÖNÜŞTÜRÜCÜ YAPISININ İNCELENMESİ.....	47
5.1 İki Seviyeli Dönüştürücü.....	47
5.2 Üç Seviyeli Dönüştürücü	47
5.3 Beş Seviyeli Dönüştürücü	51
BÖLÜM 6	54

BENZETİM ÇALIŞMASI.....	54
6.1. Yüksüz Sistem Analizi.....	54
6.2. Yüklü Sistem Analizi.....	65
6.3 Farklı Rüzgar Hızlarına Göre Sistem Analizi.....	77
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	82
KAYNAKLAR.....	84
ÖZGEÇMİŞ.....	93



TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1. Tek faz için 3 seviyeli dönüştürücünün çıkış gerilim seviyeleri ve anahtar durumları.....	48
Tablo 5.2. Beş seviyeli dönüştürücünün tek fazına ait çıkış gerilim seviyeleri ve anahtarlama durumları	53
Tablo 6.1. Matlab/Simulink'te farklı zamanlarda ve yük durumlarında ölçülen değerler(U_{THD})	68
Tablo 6.2. Farklı zamanlarda ve yük durumlarında A1 akım THD'leri	74



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 1965-2035 yılları arasındaki dünya enerji tüketimi [4]	1
Şekil 1.2. Kullanımda olan enerji kaynaklarının tahmini rezerv süresi [5]	2
Şekil 2.1. Türkiye Enerji Üretimini Kaynaklara Göre Durumu (kWh) (30.09.2020 [22]	8
Şekil 2.2. Rüzgâr santrallerinde türbinler arası tarımsal faaliyetler için kullanılabilir.	9
Şekil 2.3. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması [25]	10
Şekil 2.4. a) Yatay eksenli ve b) Dikey eksenli rüzgâr türbinleri [8].....	11
Şekil 2.5. Yatay eksenli rüzgâr türbininin genel yapısı [26].....	12
Şekil 2.6. Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Üretimi [12].....	12
Şekil 2.7. Bir rüzgâr türbinini oluşturan elemanlar ve konumları [27].....	13
Şekil 3.1. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör çeşitleri.....	14
Şekil 3.2. Asenkron generatörlerin şebekeye bağlantı şeması	15
Şekil 3.3. Sincap kafesli asenkron generatörlerin şebekeye bağlantı şeması.....	16
Şekil 3. 4. RSAG şebekeye bağlantı şeması	17
Şekil 3.5. ÇBAG Rüzgâr Türbini modeli.....	18
Şekil 3.6. Senkron generatörlerin şebekeye bağlantı şeması [18].....	19
Şekil 3.7. Alan sargılı senkron generatörün şebekeye bağlantısı.....	20
Şekil 3.8. Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörlerin Şebeke Bağlantısı	21
Şekil 4.1. Tam dereceli dönüştürücü tabanlı rüzgâr türbini generatörü sistemi [13].....	23
Şekil 4.2. Diyot doğrultucu tabanlı dönüştürücü topolojisi [13].....	24
Şekil 4.3. Arka Arkaya dönüştürücü tabanlı rüzgâr türbini generatörü sistemi [13]	25
Şekil 4.4. Yüksek güçlü rüzgâr türbini tahrikli ÇBAG'ler için üç fazlı iki seviyeli arka arkaya dönüştürücülerin çeşitli paralel bağlantıları	27
Şekil 4.5. Arka arkaya dönüştürücü ile ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini sistemi [13]	28
Şekil 4.6. İki seviyeli yüksek güçlü arka arkaya bağlı dönüştürücü tabanlı rüzgâr türbini tahrikli ÇBAG [37]	29
Şekil 4.7. Matris dönüştürücü tabanlı rüzgâr türbini generatörü sistemi [13]	30
Şekil 4.8. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini generatörü sisteminin matris dönüştürücü ile yerleşim düzeni [13].....	32

Şekil 4.9. Z kaynaklı dönüştürücü tabanlı rüzgâr enerjisi üretim sistemi [13]	33
Şekil 4.10. Çok seviyeli dönüştürücüler için kontrol şeması	36
Şekil 4.11. İki Seviyeli Sinüzoidal DGM	37
Şekil 4.12. UVDGM Devre Yapısı	38
Şekil 4.13. Anahtarın Çalışma Durumu	39
Şekil 4.14. Üçüncü harmonik eklemeli DGM.....	40
Şekil 4.15. ÇBAG tabanlı rüzgar türbin modeli.....	41
Şekil 4. 16. ŞTD kontrol blok diyagramı	41
Şekil 4. 17. RTD kontrol blok diyagramı.....	42
Şekil 5.1. İki Seviyeli Dönüştürücü Topolojisi [61]	47
Şekil 5.2. Üç fazlı üç seviyeli dönüştürücü topolojisi.....	48
Şekil 5.3. Üç seviyeli diyot kenetlemeli dönüştürücü benzetim modeli [63]	49
Şekil 5.4. Dönüştürücü kontrolü için referans ve taşıyıcı işaretler ($M_i = 0.8$).....	50
Şekil 5.5. Üç seviyeli dönüştürücü tek faz anahtarlama sinyalleri	50
Şekil 5.6. Dönüştürücü çıkışındaki fazlar arası gerilimler	51
Şekil 5.7. Üç fazlı beş seviyeli diyot kenetlemeli dönüştürücü ve tek faz için anahtarlama sinyal benzetim modeli [64].....	52
Şekil 5. 8. Üç fazlı beş seviyeli dönüştürücü tek faz anahtarlama sinyalleri	52
Şekil 5.9. Dönüştürücü çıkışındaki fazlar arası gerilimler	53
Şekil 6.1. ÇBAG tabanlı 1,5 MW'lık rüzgâr türbini sistemi [66].....	54
Şekil 6.2. Rüzgâr Türbin sistemi [66]	55
Şekil 6.3. Kullanılan dönüştürücü tipine göre güç analizi	56
Şekil 6. 4. Kullanılan dönüştürücü tipine göre reaktif güç analizi.....	56
Şekil 6. 5. Kullanılan dönüştürücü tipine göre DC bara gerilim analizi	57
Şekil 6.6. Üç fazlı iki seviyeli dönüştürücü için çıkış akımı analizi	57
Şekil 6.7. Üç fazlı üç seviyeli dönüştürücü için çıkış akımı analizi	57
Şekil 6.8. Üç fazlı beş seviyeli dönüştürücü için çıkış akımı analizi	58
Şekil 6. 9. İki seviyeli dönüştürücü için sistem çıkış akım THD'si.....	59
Şekil 6. 10. Üç seviyeli dönüştürücü için sistem çıkış akım THD'si.....	60
Şekil 6. 11. Beş seviyeli dönüştürücü için sistem çıkış akım THD'si	61
Şekil 6.12. Üç fazlı iki seviyeli dönüştürücü için çıkış gerilim analizi.....	62
Şekil 6.13. Üç fazlı üç seviyeli dönüştürücü için çıkış gerilim analizi	62

Şekil 6.14. Üç fazlı beş seviyeli dönüştürücü için çıkış gerilim analizi	62
Şekil 6.15. İki seviyeli dönüştürücü ile sistem çıkış gerilim THD'si	63
Şekil 6.16. Üç seviyeli dönüştürücü ile sistem çıkış gerilim THD'si	64
Şekil 6.17. Beş seviyeli dönüştürücü ile sistem çıkış gerilim THD'si.....	64
Şekil 6.18. ÇBAG tabanlı 1,5 MW'lık rüzgâr türbini sistemi yük bağlanmış modeli	65
Şekil 6.19. Dönüştürücü tiplerine göre aktif güç analizi.....	65
Şekil 6. 20. Sistemin ürettiği aktif gücün yakınlaştırılmış durumu.....	66
Şekil 6.21. Dönüştürücü tiplerine göre reaktif güç analizi.....	66
Şekil 6.22. Dönüştürücü tiplerine göre da bara gerilim analizi.....	67
Şekil 6.23. İki seviyeli dönüştürücü ile yüklü sistemin çıkış gerilimi	67
Şekil 6.24. Üç seviyeli dönüştürücü ile yüklü sistemin çıkış gerilimi	67
Şekil 6.25. Beş seviyeli dönüştürücü ile yüklü sistemin çıkış gerilimi.....	68
Şekil 6.26. İki seviyeli dönüştürücü ile sistem çıkış gerilim THD'si	69
Şekil 6.27. Üç seviyeli dönüştürücü ile sistem çıkış gerilim THD'si	70
Şekil 6.28. Beş seviyeli dönüştürücü ile sistem çıkış gerilim THD'si.....	71
Şekil 6.29. Rüzgâr türbin sistemi yük bağlantı şeması	72
Şekil 6. 30. Yüklenen sistemde beş seviyeli dönüştürücü için yüklerin üzerinden geçen akımların toplamı	72
Şekil 6. 31. Dönüştürücüler için transformatör üzerinden geçen akım.....	73
Şekil 6.32. İki seviyeli dönüştürücü için A1 kol akımının THD oranları	75
Şekil 6.33. Üç seviyeli dönüştürücü için A1 kol akımının THD oranları.....	76
Şekil 6.34. Beş seviyeli dönüştürücü için A1 kol akımının THD oranları	77
Şekil 6. 35. Zamana göre rüzgâr hızının değişimi	78
Şekil 6. 36. Rüzgâr hızı değişimlerine göre aktif güç	78
Şekil 6. 37. Rüzgâr hızı değişimlerine göre reaktif güç	79
Şekil 6. 38. İki seviyeli dönüştürücü için çıkış gerilimi (pu).....	79
Şekil 6. 39. Üç seviyeli dönüştürücü için çıkış gerilimi (pu).....	80
Şekil 6. 40. Beş seviyeli dönüştürücü için çıkış gerilimi (pu)	80
Şekil 6. 41. İki seviyeli dönüştürücü için çıkış akımı (pu).....	81
Şekil 6. 42. Üç seviyeli dönüştürücü için çıkış akımı (pu)	81
Şekil 6. 43. Beş seviyeli dönüştürücü için çıkış akımı (pu).....	81

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AA	Alternatif Akım
ANFIS	Uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi
ASSG	Alan Sargılı Senkron Generatör
ÇBAG	Çift Beslemeli Asenkron Generatör
DA	Doğru Akım
DGM	Darbe Genişlik Modülasyonu
FC	Uçan Kondansatör
f_s	Frekans
I	Akım
IGBT	İzole Edilmiş Kapılı İki Kutuplu Transistör
ITHD	Akım Toplam Harmonik Distorsiyonu
MC	Matris Dönüştürücü
M_i	Modülasyon İndeksi
MOSFET	Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör
NPC	Nötr Nokta Kelepçeli
OSAG	Optisliip Asenkron Generatör
P	Güç
PI	Oransal-İntegral
Q	Reaktif güç
R	Direnç
SCHB	Seri Bağlı H Köprü
SHEDGM	Seçimli Harmonik Eleme Darbe Genişlik Modülasyonu
RES	Rüzgâr Enerji Santrali
RSAG	Rotoru Sargılı Asenkron Generatör
RTD	Rotor Tarafı Dönüştürücü
SDGM	Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu
SKAG	Sincap Kafesli Asenkron Generatör
SMSG	Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör
ŞTD	Şebeke Tarafı Dönüştürücü
THD	Toplam Harmonik Bozulma

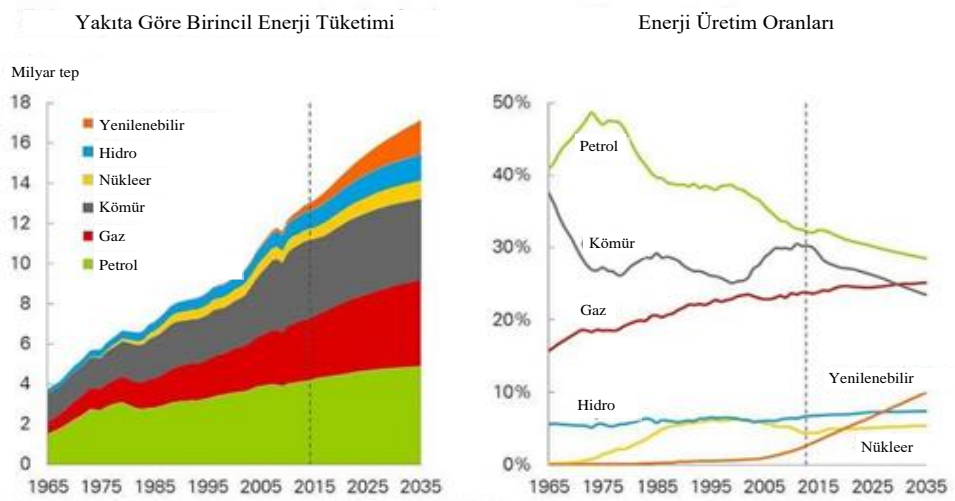
t_{off}	Anahtarın Kesim Süresi
t_{on}	Anahtarın İletim Süresi
T_s	Periyot
U_{THD}	Gerilim Toplam Harmonik Distorsiyonu
UVDGM	Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu
ÜHİDGM	Üçüncü Harmonik İlaveli Darbe Genişlik Modülasyonu
V_{dc}	Bara gerilimi
ω	Açısal Dönme Hızı
ρ	Hava Yoğunluğu
λ	Rüzgâr Hızı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde enerji ihtiyacı, artan nüfus ile birlikte her geçen gün artmaktadır. Fosil kökenli enerji kaynaklarının ise günden güne dünyamızda azalması insanlığı yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmektedir. Fosil yakıtların tükenebilirliği, çevre kirliliğine yol açması, kullanım maliyeti gibi etkenler insanları yeni enerji kaynaklarına doğru yönlendirmiştir [1].

Tükenebilir enerji kaynaklarını, üretimden tüketimine kadar olan süreçte ortaya çıkan en önemli sorun çevre kirliliğidir. Dünya genelinde artan çevre kirliliği sorunu, insanlar için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Aynı zamanda artan sanayileşme oranları fosil yakıt tüketimini de artırmıştır. Fosil yakıtların kullanım miktarının artması ile birlikte çevre kirliliği ve atmosferde oluşan çeşitli zararlı olan gazların miktarı da artmıştır. Bu nedenle, insanların hayatını olumsuz etkileyip ekolojik dengeyi bozmuştur [2]. Her geçen gün fosil enerjiyi kullanmadaki artış bu olumsuzlukları daha da artırmakta ve rezervleri tüketmektedir. Şekil 1.1'de 1965-2035 yılları arasındaki dünya enerji tüketimi gösterilmektedir. Bu şekilden anlaşılacağı üzere, dünyada ilerleyen yıllarda toplam enerji tüketiminin artması ile yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin yükseleceğini gösterilmektedir [3].



Şekil 1.1 1965-2035 yılları arasındaki dünya enerji tüketimi [4]

Fosil yakıtlı enerji kaynaklarının birçoğunun tükenebilir olması ve bu konuda “BP 2017 Dünya Enerji İstatistik İncelemesi” başlıklı çalışma yapılmıştır. Söz konusu çalışmada enerji kaynaklarının rezerv miktarlarına göre kalan tahmini süreleri Şekil 1.1’de gösterilmektedir. Bu bilgiler ışığında, en önemli enerji kaynaklarının sanayi sektörleri için 2000’ li yılların 3. çeyreğinde önemli bir sorun olarak ortaya çıkacağı öngörülmektedir. Bu çalışmaya göre, alternatif enerji kaynakların kullanımının artmasının önemi ortaya çıkmıştır [3].

Petrol, doğalgaz gibi tükenbilir enerji kaynaklarının rezervleri gitgide azalmakta olup, yarım yüzyıl sonra dünya ve ülkemiz açısından sorun oluşturacaktır. Şekil 1.2’de dünyada enerji kaynakları rezervlerine ait değerler gösterilmiştir [5].



Şekil 1.2. Kullanımda olan enerji kaynaklarının tahmini rezerv süresi [5]

Kömür, doğalgaz ve petrol gibi tükenbilir veya sınırlı rezervleri bulunan enerji kaynaklarının kalan zaman dilimleri göz önüne alındığında, dünya devletleri ve ülkemiz yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. Özellikle çeyrek yüzyıldır yenilenebilir enerjinin, elektrik enerjisi üretmekteki payı her geçen gün artmaktadır.

1.1. Tezin Amacı

Ülkemizde rüzgâr enerjisinin kurulu gücü her geçen gün artmaktadır. Aynı zamanda, rüzgâr enerjisi üretimi ile ilgili çalışmalar artmakta, yapılan her çalışma teknolojik gelişmeyi de yukarı taşımaktadır. Bu tez çalışmasında rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör çeşitleri hakkında bilgi vermek, iki, üç ve beş seviyeli dönüştürücü yapıları anlatılarak, tasarladığımız dönüştürücülerin çift beslemeli asenkron generatör tabanlı

rüzgâr türbinine uygulayarak, benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca tasarlanan dönüştürücülerin 1,5 MW'lık rüzgâr türbinine uygulanması sonrasında, toplam harmonik değişimlerinin sonuçları, toplam güçlerin değişimi, bara gerilimlerinin durumları, çıkış gerilimleri ve akımları, reaktif güçlerin davranışları karşılaştırma yaparak incelenmiştir. Özellikle kullandığımız her dönüştürücü tipi için rüzgâr türbini sisteminin, çıkış gerilimleri ve akımlarının toplam harmonik bozulmaları izin verilen yasal değerlerin altında tutulması amaçlanmıştır. Yapılan bu çalışmada farklı rüzgâr hızları ve farklı yükler altında yine gerilim ve akım değerlerindeki toplam harmonik bozulmalarındaki değişim gözlenmiştir.

1.2. Literatür Özeti

Nabae ve arkadaşları [6], darbe genişlik modülasyonlar üzerine çalışarak, üç fazlı üç seviyeli nötr nokta kelepçeli dönüştürücü için yeni bir darbe genişlik modülasyonu (DGM) geliştirmiştir. Geliştirilen darbe genişlik modülasyonunu dönüştürücü üzerinde uygulayıp verimliliğini kanıtlamıştır. Ayrıca bu sistemin değişken hızlı sürücü sistemi için uygun olduğunu söylemektedir.

Tuncer [7] çalışmasında uzay vektör darbe genişlik modülasyon tekniklerini çok seviyeli dönüştürücülere uygulayarak oluşacak harmonik bozulmanın minimum düzeyde kalması gerektiğini savunmuştur. Yaptığı çalışmada 5 seviyeli kaskad dönüştürücüye uyguladığı uzay vektör DGM tekniğinin benzetimi gerçekleştirerek, kolay anahtarlama geçişleri, harmonik bozulmanın azalması gibi iyi sonuçlar elde etmiştir.

Kabalıcı [8], çok seviyeli dönüştürücü uygulamalarında kullanılan kontrol yöntemlerini inceleyerek endüstriyel alanlarda çokça kullanılan H-köprülü çok seviyeli dönüştürücüye sinüzoidal darbe genişlik modülasyon (SDGM) tekniği ile gerilim ve akımdaki toplam harmonik bozulmanın genel kabul görmüş standartlara gelmesini konusunda çalışmıştır.

Deniz [9] yüksek lisans tezinde çok seviyeli dönüştürücülerden 5 seviyeli dönüştürücüler üzerinde çalışmalara yapmış, Matlab/Simpower Systems2' de SDGM tekniği kullanarak üç fazlı bir RL yükü besleyen çok seviyeli kaskad ve diyot kenetlemeli dönüştürücülerin benzetimini gerçekleştirmiştir.

Kocalmış [10], 2005 yılında bir ve üç fazlı dönüştürücü sistemlerini, çok seviyeli dönüştürücü sistemlerini ve DGM tekniklerini hakkında çalışmalarda bulunmuştur. Üç seviyeli doğru akım kaynaklı çok seviyeli dönüştürücüye SDGM ve UVDGM tekniklerini uygulayıp sonuçlarını karşılaştırmıştır. Ayrıca anahtarlama kombinasyonlarına göre sistemi tasarlamıştır.

Yavuz [11], çift beslemeli asenkron generatör kullanarak rüzgâr türbini tasarımı yapmıştır. Arka arkaya bağlı üç fazlı iki seviyeli iki adet dönüştürücünün ayrı ayrı kontrolü için Oransal-İntegral (PI) kullanarak yapay sinir ağları ve uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) için veri seti oluşturmuştur. Elde ettiği verilerin en iyi değerleri ile sistemi modellemiş, üç fazlı iki seviyeli dönüştürücünün esnek hesaplama yöntemi ile benzetimini gerçekleştirmiştir.

Guven ve arkadaşları [12], matlab/ simulink programı kullanarak rüzgâr türbini modellemesi ve benzetimini gerçekleştirmiştir. Rüzgâr türbini benzetiminde değişken rüzgâr hızları ve kanat açısına göre akım ve gerilim grafikleri karşılaştırmasını gerçekleştirmiştir. Benzetim sonucunda rüzgâr hızı arttığında akım, gerilim ve güç değerlerinin yükseldiği ancak, kanat açısı belirli bir noktaya ulaşana kadar akım ve gerilim değerlerinin düştüğünü göstermiştir.

Islam ve arkadaşları [13], rüzgâr türbini generatör sisteminde kullanılan dönüştürücü topolojilerini incelemiş, bu topolojilerin avantajlarını ve dezavantajlarını ortaya koymuştur.

2019 yılında Yuksek [14] çalışmasında, çok seviyeli doğrultucular ve darbe genişlik modülasyon teknikleri hakkında bilgiler vermiştir. Ayrıca Matlab/Simulink programında UVDGM tekniğini üç seviyeli doğrultucuya uygulayarak kontrolünü gerçekleştirmiştir. UVDGM'nin, üç seviyeli doğrultucu için en önemli iki husus olan sinüzoidal giriş akımındaki harmonikleri azaltarak güç faktörünü yükseltme ve DA çıkış gerilimi unsurlarını büyük bir doğruluk ile yerine getirdiği tespit etmiştir.

Goktas ve arkadaşları [15] 2011 yılında popüler modülasyon tekniklerinden UVDGM tekniğini asenkron motor sürücülerinin geliştirmesi için sisteme uygulamış çıktılarını

paylaşmışlardır. Düşük frekanslarda motorun kalkış anındaki gücünü artırmak için gerilim yükseltmesi gerçekleştirerek daha sağlıklı yol verimi yapılmasını sağlamışlardır.

Colak ve Kabalcı [16] TÜBAV bilim dergisinde 2008 yılında yayınladıkları bir makalede modülasyon tekniklerini incelemişlerdir. Dönüştürücü kontrolü için anahtarlama sistemlerinin üzerinde durulmuş ve çıkış geriliminin kaliteli şekilde üretmek için SDGM ve UVDGM tekniklerinin karşılaştırması yapılmış, UVDGM tekniğinin %15 daha yüksek verim sağladığını göstermişlerdir.

Gencer [17], çalışmasında rüzgâr türbinlerinin kontrol sistemlerinin karmaşık yapıda olmasından dolayı, sabit mıknatıslı senkron generatör bulunan bir rüzgâr türbinin verimliliğini artırmak için bulanık mantık kontrol sistemi uygulamıştır.

Celikdemir [18], tez çalışmasında sürekli mıknatıslı senkron generatörlü rüzgâr santrali uygulama çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışmasında generatör çeşitlerinden, rüzgâr türbin seçimine kadar konuları ele almıştır. Küçük güçlü rüzgâr santrali, beş kanatlı ve yatay eksenli, generatörü ise sürekli mıknatıslı senkron generatörden oluşmaktadır. Senkron generatör seçiminin sistem üzerindeki avantajlarını ortaya koymuştur.

Ting [19], yaptığı çalışmada sabit mıknatıslı senkron makinenin güç elektroniği devreleri ile hız kontrolü ve belirlenen hızda generatör olarak çalışmasını Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirmiştir. Çalışmasında rüzgâr enerjisinin avantajlarından, rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör çeşitlerinden bilgiler vermiştir. Sabit mıknatıslı senkron generatörün hız kontrolünde kullanılan alan yönlendirmeli kontrol metodunu açıklamıştır.

Dosoglu ve Dursun [20], 2018 yılında yayınladıkları makalede, üç fazlı gerilim kaynaklı dönüştürücü için sinüzoidal darbe genişlik modülasyon (DGM) , histerisiz DGM ve üçüncü harmonik eliminasyon DGM tekniklerini kullanarak, sistemde meydana gelen toplam harmonik bozulmaların (THD) karşılaştırmasını yapmışlardır. Kullandıkları sistem ve parametre değerleri ışığında DA bara gerilimi en iyi şekilde çıkışa aktarabilen modülasyon tekniğinin üçüncü harmonik eliminasyon tekniği olduğunu göstermişlerdir.

Tasaltin ve Kukrer [21], elektrik tesislerinde oluşan harmoniklerin meydana getirdiği kayıplar üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, elektrik enerjisinin kalitesini

belirleyen ana faktörlerinden biri olan harmoniklerin sistemlere verdiği zararlar ve olumsuz etkilerinden bahsetmişlerdir. Lazer torna tezgâhına sahip bir tesiste, CNC dik torna makinasına sahip bir tesiste ve endüksiyon eritme ocağına sahip bir tesiste güç analizörü ile sisteme ait akım, gerilim ve güç gibi parametreler ışığında harmonik analizleri yapmıştır.

1.3.Tezin İçeriği

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde konuya genel bir giriş yapılarak dünyada ve ülkemizdeki fosil yakıtlı enerji kaynaklarının durumları ve dezavantajlarından açıklanmıştır.

İkinci bölümde yenilenebilir enerji ve yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisi, rüzgâr türbininin genel bilgileri, yapısı ve elemanları hakkında bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde rüzgâr santrallerinde kullanılan generatör çeşitleri anlatılmış, bu generatör çeşitlerinin avantajları ve dezavantajları ele alınmıştır.

Dördüncü bölümde rüzgâr türbinlerinde kullanılan dönüştürücü tipleri ele alınmıştır. Dönüştürücülerin avantajları ve dezavantajlarının anlatılması ve darbe genişlik modülasyon tekniklerinin ayrıntılarına yer verilmiştir. Ayrıca çift beslemeli asenkron generatörün kontrol yöntemleri açıklanmış, Park ve Clark dönüşümleri incelenmiştir. . Yine bu bölümde benzetim sonuçlarında yer vereceğimiz toplam harmonik bozulmaların önemine dikkat çekilmiştir.

Beşinci bölümde üç fazlı iki seviyeli dönüştürücü, üç fazlı üç seviyeli dönüştürücü ve üç fazlı beş seviyeli dönüştürücüler hakkında bilgiler verilmiş, iki seviyeli, üç seviyeli ve beş seviyeli dönüştürücülerin Matlab/Simulink ortamında benzetimi yapılmış ve çıkan sonuçlara yer verilmiştir.

Altıncı bölümde tasarlanan dönüştürücü tiplerinin 1,5 MW'lık rüzgâr türbinine uygulanarak benzetimi yapılmış, aktif güç, reaktif güç, DA bara gerilimi çıkış gerilim ve akım değerlerinin karşılaştırması yapılarak sonuçlara yer verilmiştir. Ayrıca sisteme farklı zamanlarda devreye girecek şekilde yükler bağlanarak ve farklı rüzgâr hızlarına göre de sistemin sonuçları alınmıştır.

BÖLÜM 2

YENİLENEBİLİR ENERJİ

Dünyada artan hızla sanayileşme ve nüfus, enerji tüketimini de beraberinde getirmektedir. Günümüz enerji kaynaklarının üretimi ve rezervleri hızla azalmaktadır. Bu enerji ihtiyacının talebini karşılamak için dünya ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir. Fosil yakıtlar; dışa bağımlılığa, yüksek maliyetlere ve en önemlisi çevre sorunlarına sebep olduğundan yenilebilir enerji kaynakların önemini artırmaktadır. Ekonomik, sosyal ve çevresel etkileri düşünüldüğünde ülkelerin kalkınması için önemli enerji kaynakları yenilebilir enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları;

- Biyokütle Enerjisi
- Rüzgâr Enerji
- Jeotermal Enerji
- Hidrolik Enerjisi
- Güneş Enerjisi olarak sıralanabilir.

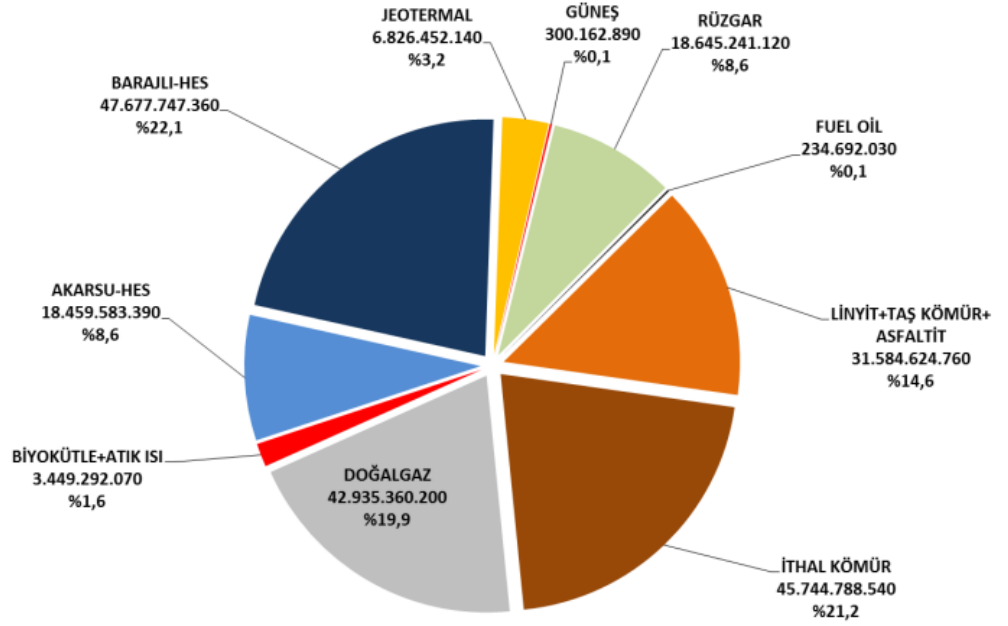
Yukarıda bahsedilen yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımlarının avantajlarını şöyle sıralayabiliriz:

- Enerjide dışa bağımlılık azalacaktır.
- Sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkınma sağlanacaktır.
- Ekonomik büyüme ve gelişme imkânı artacaktır.
- Doğanın kirlenmesi en aza inecek ve sonraki nesillere temiz bir yaşam alanı kalacaktır.
- Küresel ısınma ve iklim değişikliği ile ilgili problemler en aza inecektir.

Ülkemizde de yenilebilir enerji kaynaklarından üretilen enerji miktarı her geçen yıl artmaktadır. Özellikle yenilebilir enerji kaynaklarına sağlanan teşviklerle artması ile yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerji miktarı çok yüksek seviyelere gelecektir.

2.1. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisi sistemleri kısaca, hava olaylarının etkisiyle türbinlerin dönmesi sonucu oluşan hareket enerjisini mekanik enerjiye çevirerek elektrik üretimini gerçekleştiren sistemlerdir. Yenilenebilir enerji çeşitlerinden olan rüzgâr enerjisi, gerek ülkemizde gerekse dünyada enerji üretimindeki payı her geçen gün artmaktadır. Özellikle son yıllarda maliyetlerin düşmesi, teknolojideki ilerleme ve çevreye zarar vermeyen enerji kaynaklarına yönelim rüzgâr enerjisi konusuna yönelmede olumlu katkılar sağlamıştır. Ülkemizde ise genel olarak yenilenebilir enerji üretimi konusunda son yıllarda önemli kuruluşlar oluşmaktadır. Yenilenebilir enerjilerden rüzgâr enerjisinin payı Şekil 2.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Türkiye Enerji Üretiminin Kaynaklara Göre Durumu (kWh) (30.09.2020 [22])

Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliğine göre 2021 yılında elektrik üretimindeki rüzgâr enerjisinin payı %9,2, rüzgâr santrallerinin toplam kurulu gücü ise 10.585 MW'tır [23]. Bu kapasitenin ilerleyen zamanlarda daha fazla artması beklenmekte ve birtakım avantajları beraberinde getirmektedir.

Rüzgâr enerjisinin avantajlarını şöyle sıralayabiliriz:

- Rüzgâr santralleri kuruldukları alanların yalnızca %1'ini kullandıkları için kalan kısım tarımsal faaliyetler için kullanılabilir. (Şekil 2.2)
- Atmosfere zararlı gaz salınımı yoktur.
- Fosil yakıtların tüketimin miktarını düşürür.
- Montajı basittir.
- Bakım için harcanan zaman ve maliyet azdır.



Şekil 2.2. Rüzgâr santrallerinde türbinler arası tarımsal faaliyetler için kullanılabilir

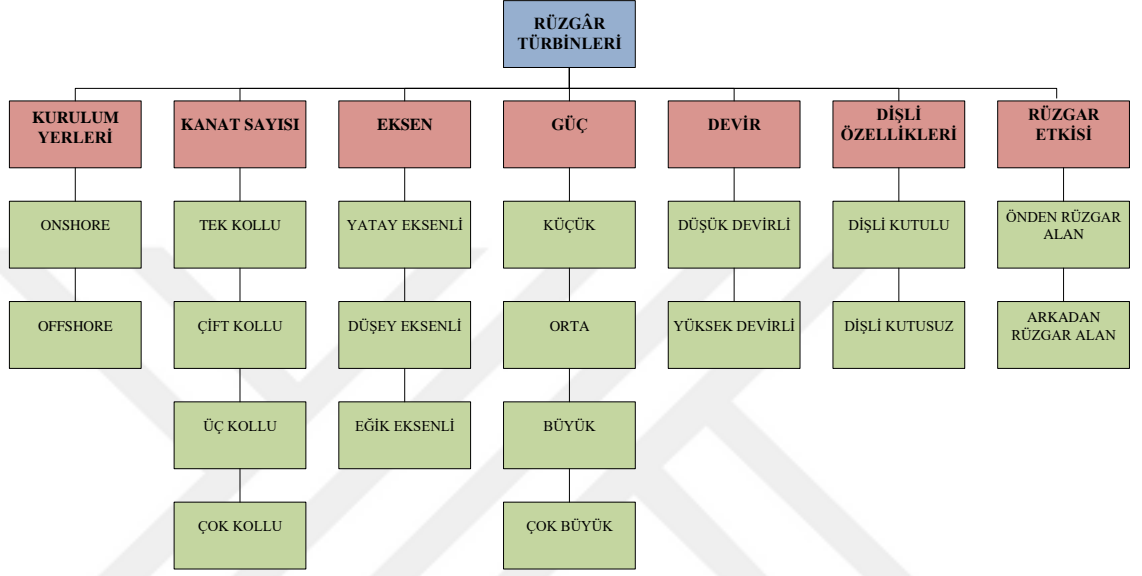
Bu avantajlarının yanında kuş ölümleri ve çıkardığı ses bakımından bir miktar gürültüye sebep olmaları ise dezavantajları olarak sayılabilir.

2.2. Rüzgâr Türbini

Rüzgârdaki kinetik enerjinin etkisiyle dönme hareketi yaparak mekanik enerjiye dönüştüren makinelere rüzgâr türbini ve bu mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştüren makinelere generatör adı verilmektedir. Rüzgâr türbini; genel anlamda türbin gövdesi, pervane ve kuleden oluşmaktadır. Rüzgâr türbinde rüzgâra karşı gelen yüzey sayesinde dönme hareketi meydana gelir. Bu hareket sonucunda dişli sistem ile birbirine bağlı olan generatör sayesinde elektrik üretilir. [24]. Başka bir deyişle rüzgârın belirli bir açıyla yüzeye etki etmesiyle oluşan dönme hareketi ile elektrik enerjisi meydana gelir. Rüzgâr türbinlerinde, rotor ve generatör birbirinden bağımsız değildir. [24].

2.3. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgâr türbinleri Şekil 2.3' de görüldüğü üzere kurulum konumlarına, eksen durumlarına, dişli özelliklerine, güçlerine, devirlerine, kanat sayılarına, rüzgâr etkisine, göre gruplandırılırlar [25].

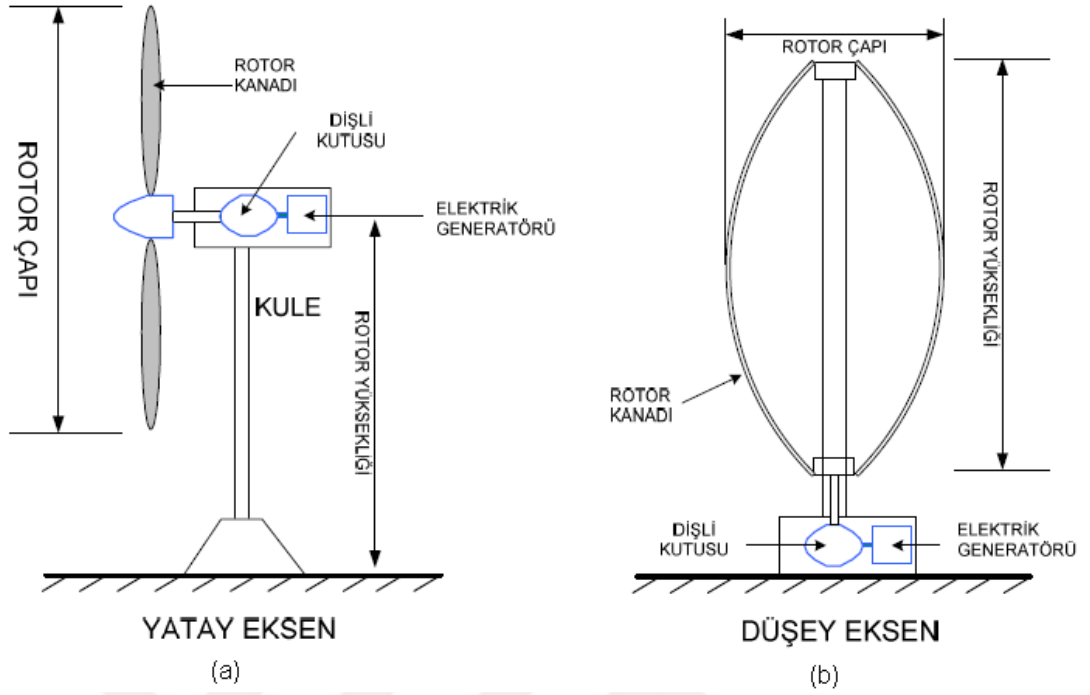


Şekil 2.3. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması [25]

Rüzgâr türbinleri eksen konumlarına göre; yatay eksenli rüzgâr türbini, eğik eksenli rüzgâr türbini ve düşey eksenli rüzgâr türbinleri olarak sınıflandırılır.

Düşey eksenli rüzgâr türbinleri Şekil 2.4.b de gösterilmektedir. Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin en önemli ayrıntısı generatör ve dişli aktarma elemanlarının yüksekte durmaması olmasına rağmen bakımı zordur. Bu sebeple kullanımı süre gelen zaman dilimlerinde azalmaktadır. Düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin kullanımının azalması yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin kullanımını artırmıştır.

Yatay eksenli yüksek rüzgâr hızları ve düşük türbülansdan dolayı öne çıkmıştır [26]. Yatay eksenli türbinler Şekil 2.4.a'da gösterildiği gibi elektrik generatörü ve bunun yanında dişli kutusu, kule üzerinde yatay kanatlardan oluşmaktadır. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin en büyük avantajı, rotor eksenini rüzgâr yönünde değiştirilerek her yöndeki rüzgârla çalıştırılabilir [26].

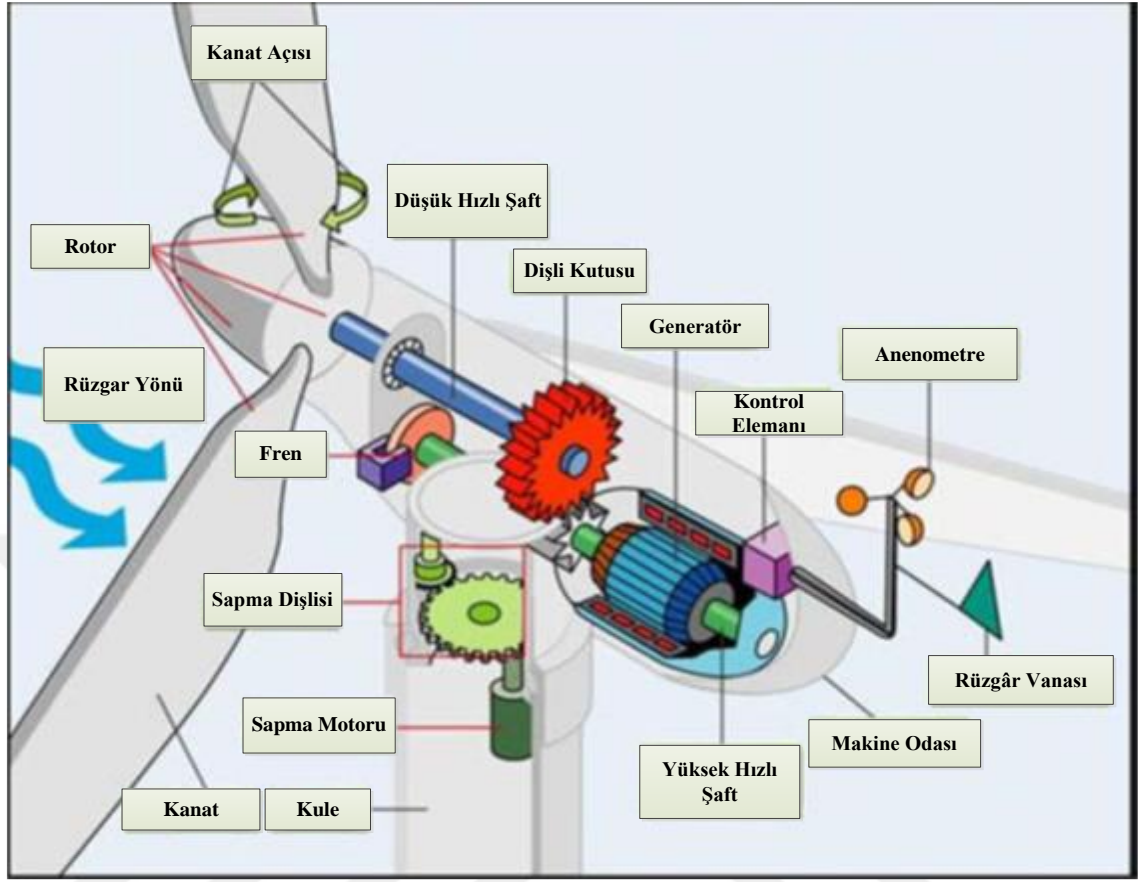


Şekil 2.4. a) Yatay eksenli ve b) Dikey eksenli rüzgâr türbinleri [8].

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri, aerodinamik, mekanik, generatör ve elektrik alt sistemlerinden oluşur.

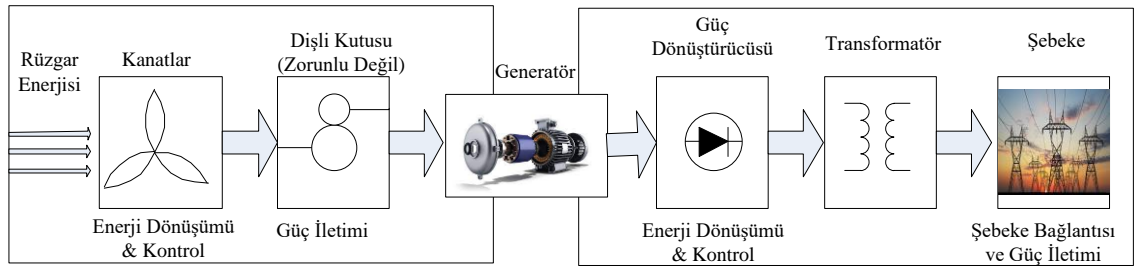
2.4. Rüzgâr Türbinlerinin Yapısı

Şekil 2.5'te konumuna göre yatay eksenli bir rüzgâr türbininin iç ve dış bileşenleri verilmiştir.



Şekil 2.5. Yatay eksenli rüzgâr türbininin genel yapısı [26]

Rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminin bloklar halinde şeması Şekil 2.6' da verilmiştir.



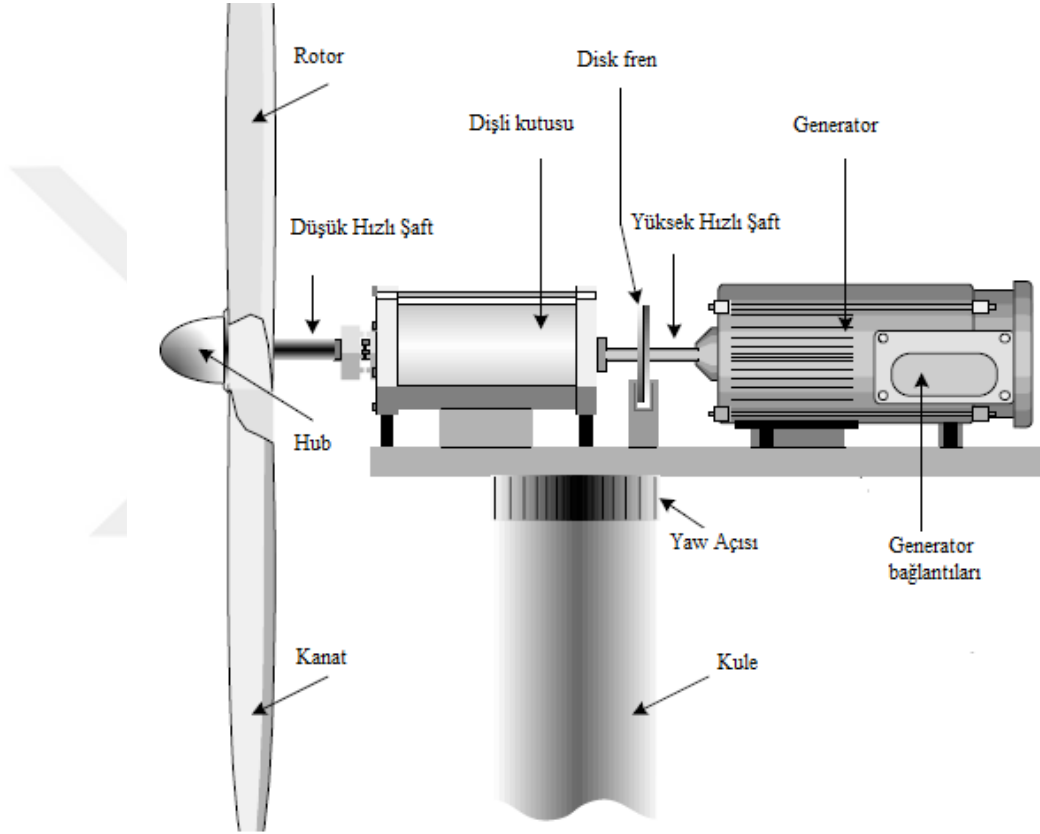
Şekil 2.6. Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Üretimi [12]

Kinetik enerjiye sahip olan rüzgâr, türbinin kanatlarına çarpma etkisiyle kanatları çevirir. Bu etki ile, kinetik enerji mekanik enerjiye dönüşmektedir. Generatöre uzanan şaft kanatlara bağlıdır. Generatörün görevi mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmektedir.

Generatörün ürettiği elektrik enerjisi, transformatör vasıtası ile gerilimi ayarlanarak şebekeye aktarılır [12].

2.5.Rüzgâr Türbini Elemanları

Rüzgâr türbini elemanları genel hatlarıyla kule, kanat, şaft, dişli kutusu, disk fren ve generatörden oluşmaktadır. Bir rüzgâr türbininin bileşenleri Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Bir rüzgâr türbinini oluşturan elemanlar ve konumları [27]

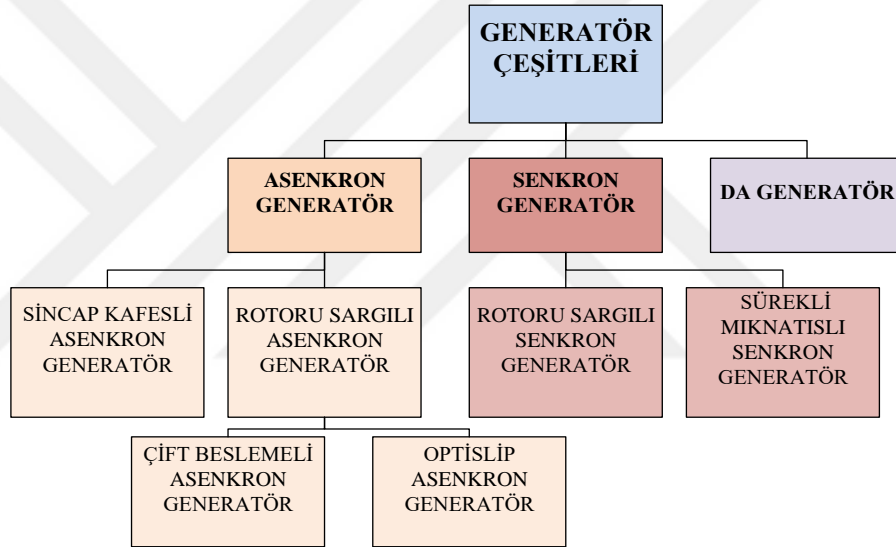
Ana gövde olarak kule, çelik veya betonarme olarak yapılır ve tüm sistemi taşır. Fren acil durumlarda türbini durdurmak için gereklidir. Dişli kutusu maliyetli, ağır ve yüksek hızlı generatörler için gereklidir. Yav açısı rüzgâra göre rotoru çevirerek sistemin verimli çalışmasını sağlar. Şaftlar rotor ile dişli kutusu arasındaki bağlantısı sağlar. Generatör ise mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir.

BÖLÜM 3

RÜZGÂR SANTRALLERİNDE KULLANILAN GENERATÖR ÇEŞİTLERİ

Rüzgârın etkisi ile meydana gelen kinetik enerji, ilk etapta mekanik enerjiye ardından kullanılan sistemler sayesinde elektrik enerjisine çevrilir. Mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştüren bu sistemlere generatör denir.

Rüzgârın hızını elektrik enerjine dönüşümü için gerekli olan unsurların başında rüzgâr türbini ve generatör gelmektedir. Rüzgâr santrallerinde kullanılan generatör çeşitleri Şekil 3.1' de verilmiştir.



Şekil 3.1. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör çeşitleri

Şekil 3.1'de gösterildiği üzere rüzgâr santrallerinde çoğunlukla kullanılan generatör çeşitleri asenkron, senkron ve DA generatörlerdir.

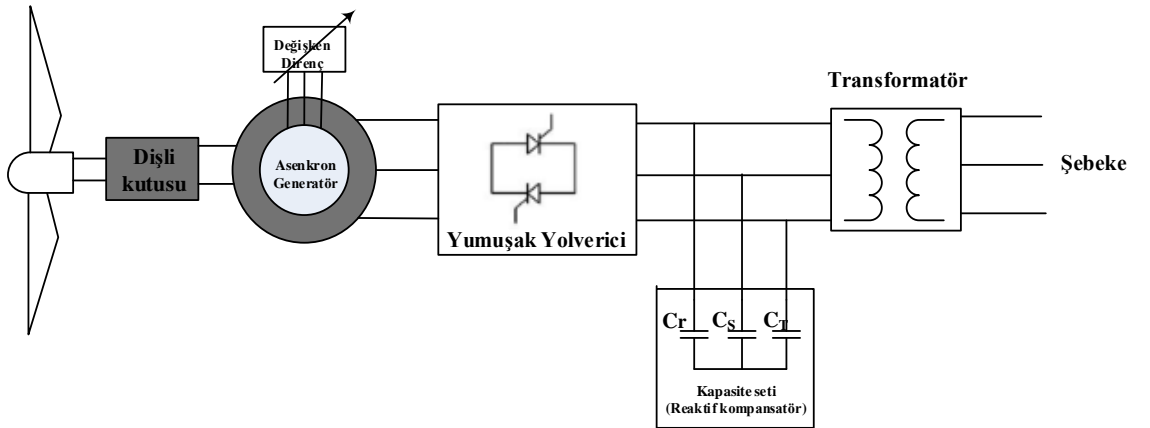
3.1. Doğru Akım Generatörleri

DA generatörleri, güvenilirliği az ve bakım ihtiyacı fazla olmasına karşın, hız kontrollerinin basit olması sebebi ile sanayi alanında kullanılmaktadır. Doğru akım generatörlerinin genel olarak tercih edildiği yerler küçük güçlü türbinler ve tekil olarak kullanılacak olan yerlerdir. Günümüzde doğru akım generatörleri, daimi mıknatıslı olarak imal edilmektedir. Bundan dolayı, komütatör elimine edilmektedir. [18]. Fırçasız olan DA generatörler küçük güçlü rüzgâr türbinlerinde kullanılmaktadır. Bunun nedeni ise sürekli mıknatısların kapasitelerinin ve güçlerinin düşük olmasıdır.

3.2. Asenkron Generatörler

Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretmek için kullanılan türbin sistemlerinde genel anlamda en fazla kullanılan generatör çeşididir. Kullanılma sebepleri sağlam olması, maliyetinin düşük olması ve mekaniğinin kolay yapıda olması gibi özelliklerindedir. Asenkron generatörlerin statorun reaktif bir mıknatıslanma akımına olan ihtiyacı sebebiyle, uyarım akımı için farklı bir kaynak gereksinimi duyması olumsuz özelliklerinden birisidir [28]. Uyarım akımı için farklı kaynak ihtiyacı, fazladan reaktif güç harcamasına sebep olur. Sadece bu generatör tipinin şebekeye bağlı olması durumunda manyetik alan oluşur [18]. Bu manyetik alan, akımın frekansı ve kutup sayıları aracılığı ile saptanan bir hızda döner. Asenkron generatörlerde çoğunlukla dişli kutusunun rotor kanatlarının hızını ayarlaması, diğer generatör çeşitleri gibi şebekeye aynı düzlemde olmayabilir. Asenkron generatörün, rüzgâr türbinlerinde kullanılması sonucu reaktif güç gereksinimine ihtiyaç vardır. Reaktif güç ihtiyacını doğrudan şebekeye bağlanması sonucunda şebekeden karşılır. Rüzgâr türbinlerinin şebekeden çektiği reaktif gücün azalması gerilim seviyesini yükseltir.

Asenkron generatörün sağlamlığı, mekaniksel basitliği, maliyetinin uygun olması, şebekeye bağlanma kolaylığı gibi avantajlarının yanı sıra generatör boyutunun artması durumunda şebekeden çekeceği başlangıç akımının yüksekliği, statorun reaktif mıknatıslanma akımına ihtiyaç duyması gibi de dezavantajları vardır. Şekil 3.2’de asenkron generatörün şebekeye bağlantısı verilmiştir.

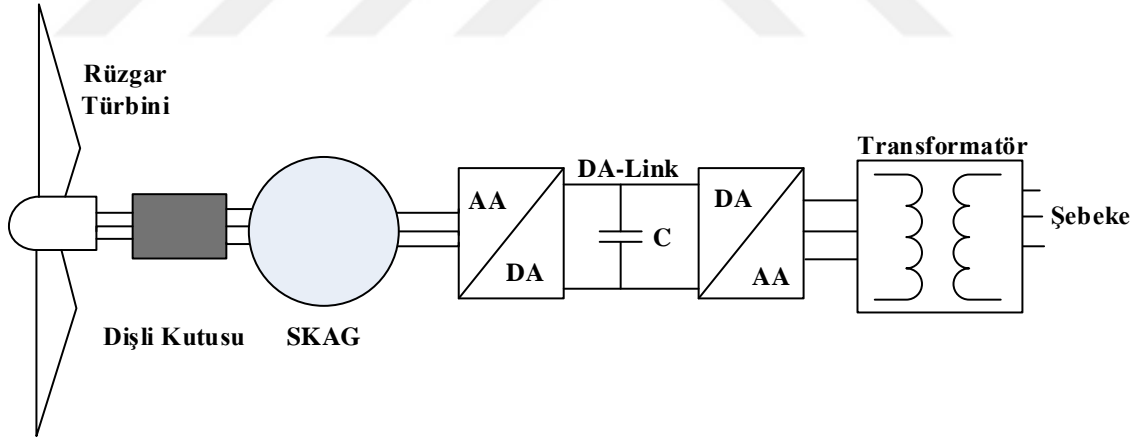


Şekil 3.2. Asenkron generatörlerin şebekeye bağlantı şeması

Asenkron generatörlerin, rotorların yapısı bakımından sincap kafesli ve rotoru sargılı asenkron generatör olmak üzere iki çeşidi vardır [11].

3.2.1. Sincap Kafesli Asenkron Generatörler

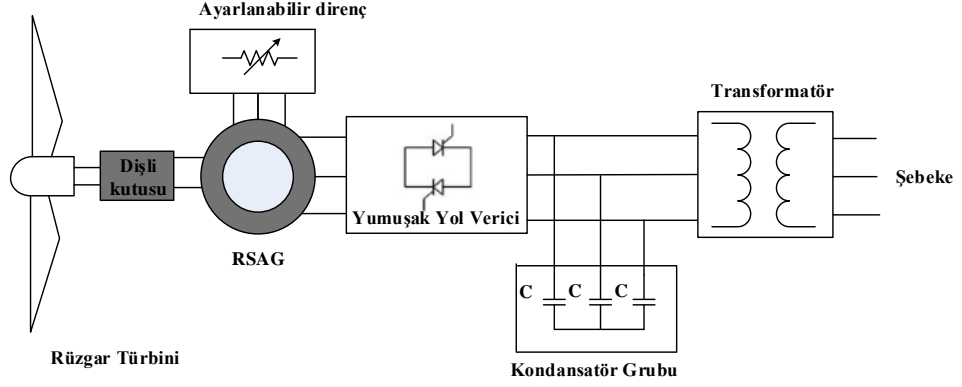
Doğrudan şebekeye bağlanabilen bu tip generatörler, rüzgâr hızı değişikliklerinin neden olduğu kaymasından çok az etkilenmesinden dolayı, sincap kafesli asenkron generatörler (SKAG) genellikle sabit hızlı rüzgâr türbinleri için tercih edilirler. Dişli kutusu, rotoru ve generatörü birleştirir [18] [29]. Bu tip generatörlerin rotorunun sargısız olması ihtiyaç duyulan reaktif gücün farklı bir kaynaktan sağlanması gerekir [19]. SKAG alternatif akım gerektiren bir sisteme direk bağlanarak belirli bir hızda görev yapacağı gibi, güç elektroniği bileşenleri ile birlikte farklı hızlarda da çalışabilmektedir. SKAG sağlam yapısı, fırça bulundurmaması, maliyetinin uygun olması sebebiyle tercih edilir. Fakat, sıcaklık ve frekansın etkisi gibi dış etkenlerden dolayı, generatörün değerlerinin değişmesi sistemin kontrol edilmesini karmaşık hale getirir. Şekil 3.3’de SKAG’ın şebekeye bağlantı şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Sincap kafesli asenkron generatörlerin şebekeye bağlantı şeması

3.2.2. Rotoru Sargılı Asenkron Generatörler

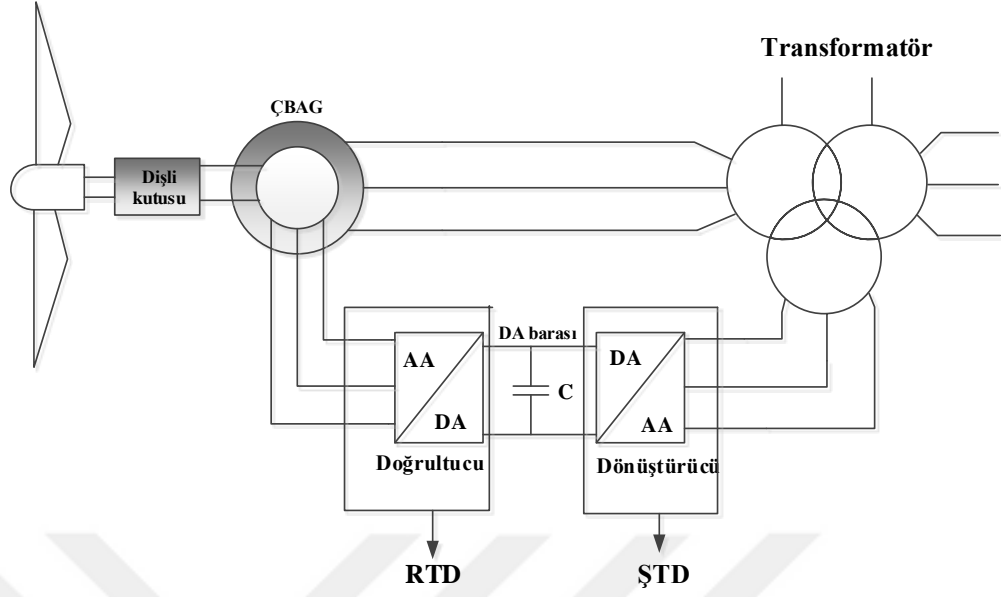
Rotoru sargılı asenkron generatörler değişken hızda ve sabit frekans altında doğrultucu-dönüştürücü aracılığı ile şebekeye bağlanır. Şekil 3. 4’te RSAG ile şebeke arasındaki bağlantı şeması verilmiştir.



Şekil 3. 4. RSAG şebekeye bağlantı şeması

Doğrudan şebekeye, fırçalar veya rotor sargıları yardımı ile bağlanabilirler [18]. RSAG ile şebeke arasında güç akışı rotorun uyarım akımı vasıtası ile oluşmaktadır. Rotorda yer alan dönüştürücü-doğrultucu devresi, aktif ve reaktif gücün ayrı ayrı denetlenmesini gerçekleştirir. Rotoru sargılı asenkron generatörleri diğer asenkron generatörlerden ayıran özellikler dayanıklılığının az olması ve maliyetinin yüksek olması dezavantajlarındandır. RSAG günümüz endüstrisinde; OptiSlip asenkron generatörler (OSAG) ve çift beslemeli asenkron generatörler (ÇBAG) olarak kullanılırlar [28]. Bu çalışmada rüzgâr türbinlerinde kullanılan çift beslemeli asenkron generatör kullanılmıştır.

Çift beslemeli asenkron generatörlerde stator sargısı şebekeye doğrudan bağlanırken, rotor sargısı iki adet darbe genişlik modülasyon tekniği kullanan dönüştürücü üzerinden şebekeye bağlanmaktadır [18] [28] [29]. Statordaki gerilimin şebekeden sağlanması ve rotordaki gerilimin ise dönüştürücü tarafından sağlanması nedeni ile ÇBAG adını almıştır. Dönüştürücüler, değişken frekans altında rotor akımı sağlamasıyla mekaniksel ve elektriksel frekans arasında oluşacak farkı dengeler [18]. Şekil 3.5’de çift beslemeli asenkron generatörün rüzgâr türbini modeli verilmiştir [30].



Şekil 3.5. ÇBAG Rüzgâr Türbini modeli

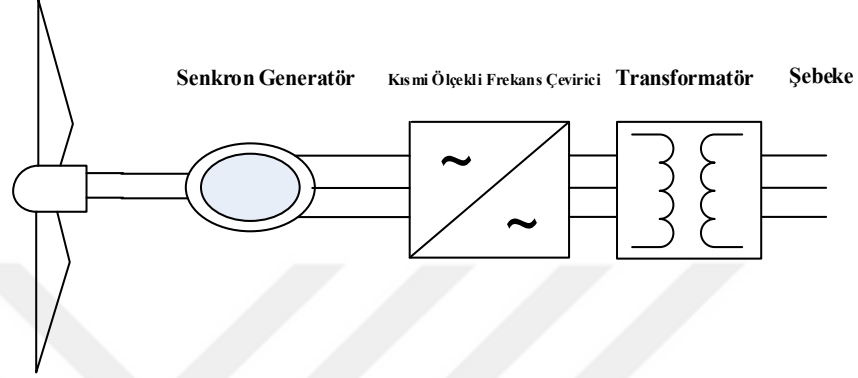
Şebeke ve rotor tarafı olmak üzere iki adet dönüştürücü bulunmaktadır. Rotor tarafındaki dönüştürücü generatörün ihtiyaç duyduğu mıknatıslanma enerjisini sağlar. Şebeke tarafındaki dönüştürücü ise DA-bara kondansatörü üzerindeki DA gerilimin değerini sabit tutmaktadır. Bu iki dönüştürücüden oluşan güç çevirici çalışma esnasında veya oluşabilecek arızalar anında, generatörün davranışını belirler. Bu iki dönüştürücü bağımsız olarak ayrı ayrı denetlenmektedir. Rotor tarafındaki dönüştürücü aktif ve reaktif gücü denetlerken, şebeke tarafındaki dönüştürücü ise DA bara gerilimi ve güç faktörü davranışlarını denetlemektedir [18]. Çift beslemeli asenkron generatörlerin dezavantaj olarak bünyesinde barındırdığı bilezik tertibatının periyodik bakım ihtiyacıdır.

3.3. Senkron Generatörler

Senkron generatörler rotor milinden aldığı mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren elektrik makinalarıdır. Senkron generatörler genel olarak rotor ve stator olarak isimlendirilen iki temel kısımdan meydana gelir [31]. Senkron generatörler, stator ve rotorunda sargılara sahip olması, rotor ve stator devir sayılarının birbirine eş değer olması sebebiyle tercih edildiği genel yerler sabit hızlı sistemlerdir [32] [33].

Senkron generatörlerde rotorun oluşturduğu manyetik alan, daimi mıknatıslardan veya sargılardan geçen akımdan sağlanır. Senkron generatörler genellikle sabit rüzgâr

hızlarında kullanılırlar. Kutup sayılarının uygun olması durumunda rüzgâr türbini ile arasında dişli kutusuna gerek yoktur [18]. Bu özellik değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde tercih edilme sebebidir. Şekil 3.6’te senkron generatörlerin şebekeye bağlantı şeması verilmiştir.



Şekil 3.6. Senkron generatörlerin şebekeye bağlantı şeması [18]

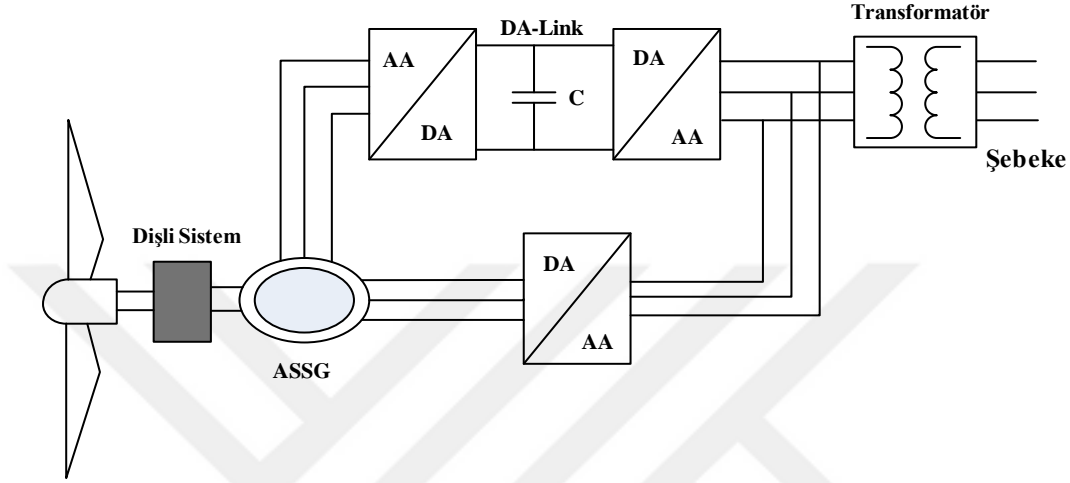
Senkron generatörlerin, asenkron generatörlerden ayıran önemli özelliği, reaktif güç kompanzasyon sistemine ihtiyaç duymuyor olmalarıdır. Şekil 3.6’te gösterilen kısmi ölçekli frekans çeviricinin görevi; şebeke üzerinde oluşacak bir dalgalanma için enerji tamponu görevi görmek, rüzgâr hızlarının neden olduğu güç dalgalanmaları sebebiyle mıknatıslanmayı kontrol ederek, şebeke frekansı ile aynı değerde kalarak oluşacak sorunların önüne geçmektir. Senkron generatörler sisteme daha temiz bir güç sağlaması şebekeden reaktif güç ihtiyacı duymamasındandır.

Senkron generatörleri iki gruba ayırabiliriz. Bunlar rotoru sargılı ve sürekli mıknatıslı senkron generatörlerdir.

3.3.1 Alan Sargılı Senkron Generatörler

Alan sargılı senkron generatörler (ASSG) stator sargısı çift yönlü akış sağlayan iki adet dönüştürücüden oluşmaktadır. Stator sargısı bu iki dönüştürücü üzerinden şebekeye bağlanır. Dönüştürücüler darbe genişlik modülasyon tekniklerine göre anahtarlama yapabilir ve gerilim kaynaklıdır. Şebeke tarafındaki dönüştürücü aktif ve reaktif gücü ayarladığından, alan sargılı senkron generatör, asenkron generatörler gibi reaktif güç kompanzasyonuna ihtiyaç duymaz. Alan sargılı senkron generatörün verimlerinin yüksek

olması, güç kontrolünün kontrol edilebilmesi ve dişli kutusuna ihtiyaç duymaması olumlu özelliklerindedir. Olumsuz özelliği ise sistemin reaktif gücünü ayarlamak için büyük güç dönüştürücüsüne ihtiyaç duymasıdır. Şekil 3.7’da bu tip generatörlerin şebekeye bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Alan sargılı senkron generatörün şebekeye bağlantısı

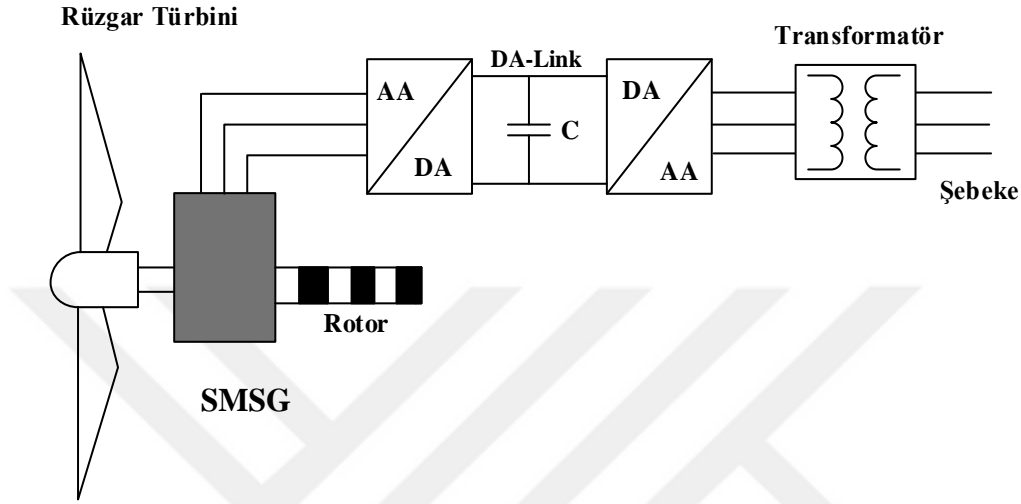
3.3.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörler

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlerde, generatör rotorunun senkron hızda dönmesi enerji dönüşümü için en önemli etkidir. Senkron generatörün gerilim üretimi için gerekli olan manyetik alan oluşumu, rotordaki sargılar yerine sürekli mıknatıslar vasıtasıyla olması sonucunda oluşan senkron generatör çeşidi, sürekli (sabit) mıknatıslı senkron generatördür [18]. Sürekli mıknatıslı senkron generatörlerde fırçaların, sargıların ve bileziklerin olmaması daha basit bir yapıya dönüşmesini sağlar [33]. Bu nedenle daha küçük güç gerektiren sistemlerde maliyet açısından avantaj sağlar.

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin kullanımı rüzgâr enerji sistemlerinde giderek yaygın hale gelmektedir. En önemli avantajı rotorlarındaki sabit mıknatıslar sayesinde herhangi bir uyarıya ihtiyaç olmadan kullanılabilmesidir [30]. Güçlü mekanik yapılaraya sahip olması, genellikle her hızda güç üretebilmesi, rotor yapısının kafesiz olması diğer önemli özellikleridir. Rotorda sargı yerine daimi mıknatısların kullanılması ile fırça ve kollektörden oluşacak arızaların ortadan kalkması sağlanmıştır. Ayrıca, sargıların

olmaması uyarma kayıplarını yok olacağından ısısal dayanma sınırları genişlemektedir. Bu dayanma sınırı benzer makinalara göre yüksek güç üretebilmesine olanak sağlar.

Şekil 3.8’ da sürekli mıknatıslı senkron generatörün şebeke bağlantısı gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörlerin Şebeke Bağlantısı

Sürekli mıknatıslı senkron makinaların avantaj ve dezavantajları şöyle sıralanabilir [34]:

Avantajları:

- Rotorunda sahip olduğu mıknatıslar sayesinde verimini yükseltmektedir. Rotor yüzeyinde sürekli mıknatısların olması ayrıca bir uyarma akısına ihtiyaç duyulmamasına neden olur. Böylece dışarıdan bir uyarma gücüne gerek olmadığı için uyarma kayıpları bu makinalarda yoktur. Böylece makinanın verim avantajı ortaya çıkmaktadır.
- Fırça ve kollektör bulunmaması hem bakım maliyeti açısından hem de fırçalarda kayıplar olmayacağından verim yükselmektedir.
- Rotorun sargısız oluşu ve kollektörün olmaması rotor hacminin küçülmesine ve bu sebep atalet momenti az ve dinamik performansı iyidir [18].
- Rotorda sargılar olmadığından dolayı makinanın sıcaklığı hızla kaybedilir.
- Asenkron makinalara göre güç faktörü yüksektir.

Dezavantajları [34]:

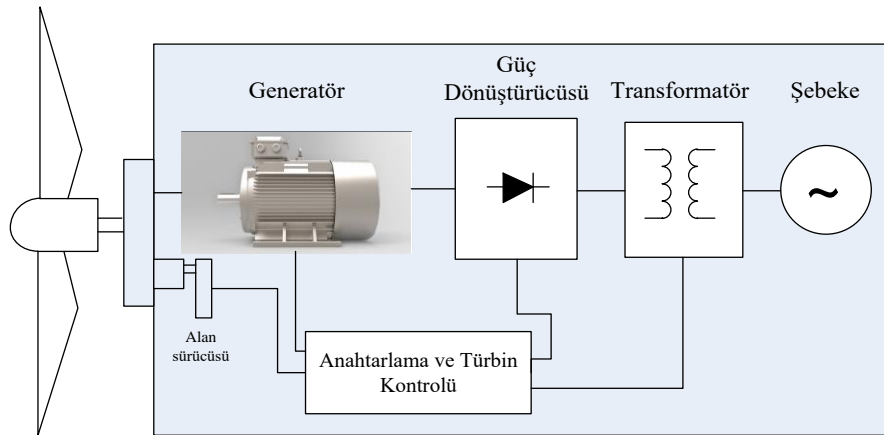
- Şebeke frekansına bağlı olarak sabit bir hızda çalışabildiğinden uygulama alanları da sabit hız gerektiren yerlerdir.
- Rotor pozisyonu sensörlerle belirlenmesinin maliyet artırıcı ve güvenilirliği azaltıcı etkisi oluşturur. Sensör kullanılmadan da moment üretilirse düşük hızlarda verimli olmaz.
- Kullanılan mıknatıs malzemelerin kalitesiz olması durumunda zamanla mıknatıslar, mıknatıslık özelliklerini kaybedebilirler.
- Yüksek enerjili mıknatısların maliyetlerinin yüksek olması diğer generatör çeşitlere göre ekonomik açıdan geride kalmaktadır. [18].
- Yüksek hızlar gerektiren yerlerde mıknatısların rotor yüzeyinde olarak tasarlanması zordur ve kopma durumuna sebebiyet verir.

BÖLÜM 4

RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Rüzgâr türbini generatör sisteminde, generatör frekansını ve gerilimini şebekeye göre ayarlayabilmesi için, dönüştürücü diye adlandırılan bir elektronik güç devresi kullanılmaktadır. Son zamanlarda dönüştürücü tasarımlarında çalışmalar artmış, ve dönüştürücü topolojisi ilerleme kaydetmiştir. Genellikle ticari rüzgâr türbini generatörü sistemlerinde iki dönüştürücü topolojisi ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Kullanılan dönüştürücülerin çoğu, güç kalitesini iyileştirmek ve gerilim seviyesini yükseltmek için hat filtrelerine ve transformatörlere ihtiyaç duyar [13]. Bu ağır ve hacimli bileşenler, kule yapımını, türbin kurulum ve bakım maliyetlerini hissedilir derecede artırır.

Yarı iletkenler ve manyetik malzemelerdeki son gelişmeler, güç dönüştürücülerin boyutunu, ağırlığını ve maliyetini azaltmak için olası bir çözüm olacak olan yeni dönüştürücü yapılarının geliştirilmesine yol açmıştır [13]. Şekil 4.1' de görüleceği, bu ağır ve hacimli transformatör, rüzgâr türbin ucunun mekanik gerilmesinin yanı sıra, mekanik ağırlığını ve hacmini de arttırmaktadır. Günümüzde bileşenler yüksek akım ve gerilim değerlerini idare edebilmektedir. Bu sayede güç kaybı azalmaktadır. Güç elektroniği hızla gelişen bir teknoloji olarak MW ölçekli gücün kontrolü için cihazların daha güvenilir hale gelmesi maliyetleri azaltmakta, güç dönüştürücüleri gittikçe daha çekici hale gelmekte, bu da rüzgâr enerjisi üretim sistemlerinin performansını artırmasını sağlamaktadır [13].

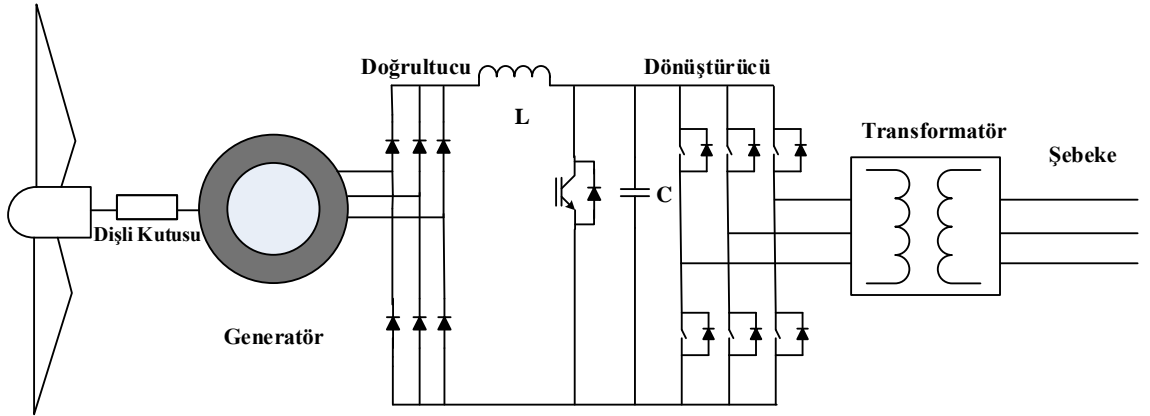


Şekil 4.1. Tam dereceli dönüştürücü tabanlı rüzgâr türbini generatörü sistemi [13]

Rüzgâr türbini generatörü sistemleri için farklı dönüştürücü tipleri araştırılmıştır. Her bir dönüştürücünün avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan en önemli dönüştürücü tipleri: diyot doğrultucu tabanlı dönüştürücü, sırt sırta (arka arkaya) dönüştürücü, matris dönüştürücüler, Z-kaynak dönüştürücü, çok düzeyli (multilevel) dönüştürücülerdir [28]. Rüzgâr türbini generatörü sistemlerinde diyot doğrultucu tabanlı dönüştürücü ve sırt sırta çift yönlü dönüştürücü tipleri en çok kullanılan dönüştürücü tipleridir [35].

4.1. Diyot doğrultucu tabanlı dönüştürücü

Şekil 4.2’de verilen diyot doğrultucu tabanlı dönüştürücü sisteminde, rüzgâr türbini generatöründen gelen değişken bir frekans ve değişken büyüklükte bir AC gücü önce bir diyot doğrultucu devresi tarafından bir DC gücüne dönüştürülür. Daha sonra kontrollü bir dönüştürücü tarafından farklı bir frekans ve gerilim seviyesinde bir AC gücüne geri dönüştürülür. Diyot doğrultucu (kontROLSÜZ doğrultucu) bazlı dönüştürücü sistemi, gücü generatörden şebekeye olmak üzere tek bir yönde aktarır. Bu tip güç dönüştürücü normalde bir senkron generatörde veya bir asenkron generatör yerine kalıcı mıknatıslı senkron generatörde rüzgâr enerjisi üretim sistemleri için kullanılır.



Şekil 4.2. Diyot doğrultucu tabanlı dönüştürücü topolojisi [13]

Bu tip dönüştürücünün avantajları ve dezavantajları şöyle sıralanabilir.

Avantajları:

- Düşük sistem üretim maliyetine sahiptir.

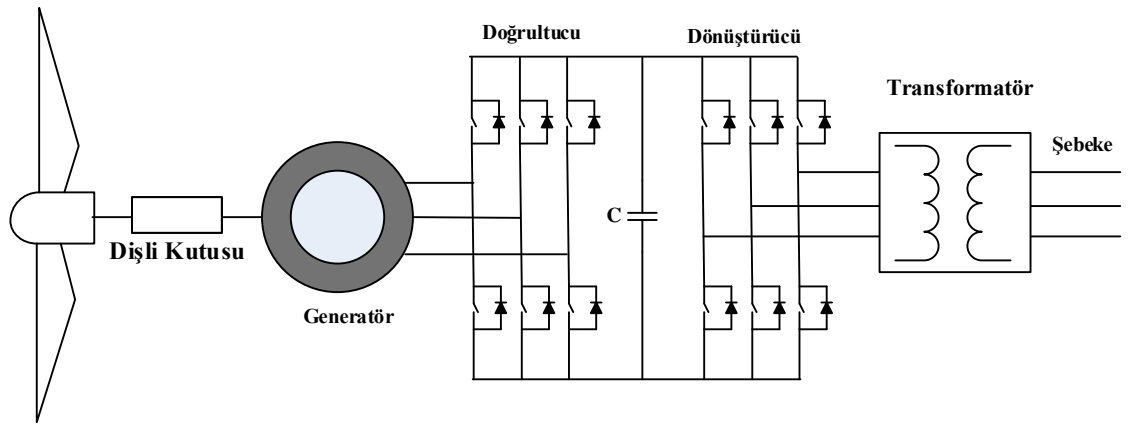
- Uygulaması basittir.

Dezavantajları:

- Diyot doğrultucu, şebeke sisteminin performansını etkileyen çok miktarda harmonik (giriş akımı) üretir
- Daha yüksek harmonik kayıplar (çıkış gerilimi)
- Tek yönlü güç kullanma kapasitesi

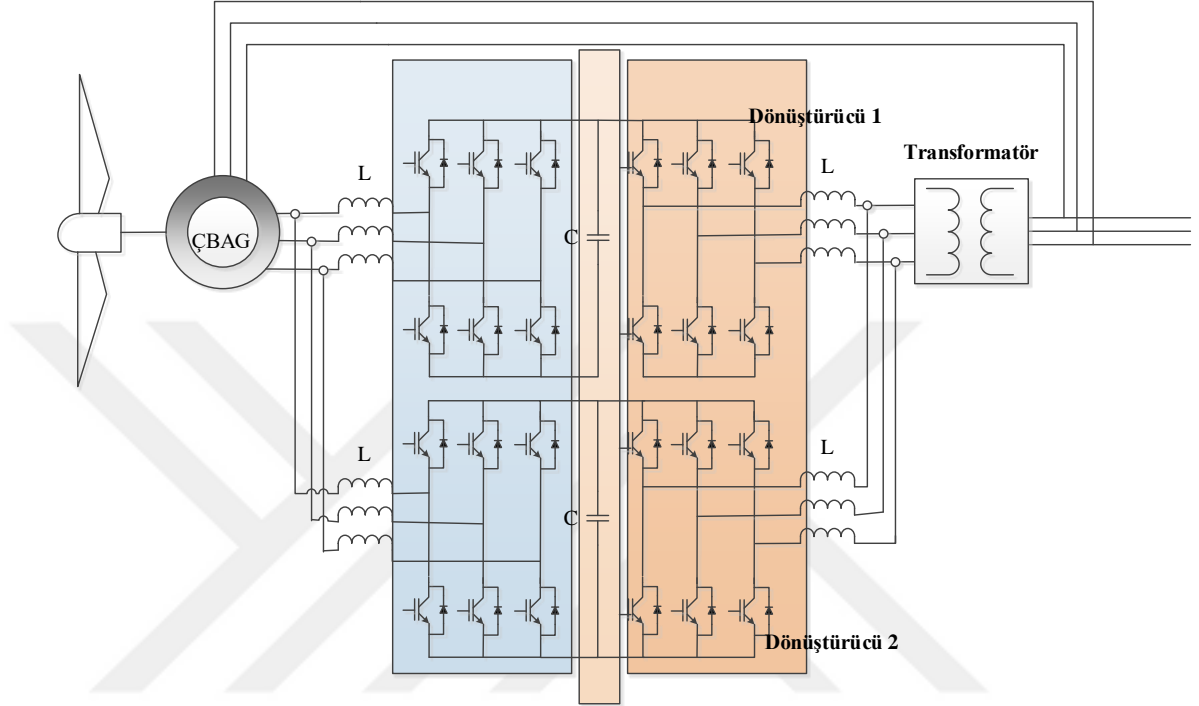
4.2. Sırt Sırta (Arka Arkaya) Dönüştürücüler

Kontrollü doğrultucu ve kontrollü evirici bazlı dönüştürücü, iki geleneksel darbe genişlik modülasyonlu (DGM) gerilim kaynağı dönüştürücünden oluşan arka arkaya(sırt sırta) dönüştürücü olarak adlandırılır. Doğrultucu devresine sahip diyot doğrultucunun, Şekil 4.3'de gösterildiği gibi kontrollü doğrultucu ile değiştirildiği için doğrultma aşaması diyot doğrultucu bazlı dönüştürücüsünden farklıdır. Ayrıca kontrollü doğrultucu, giriş akımı harmoniklerini ve harmonik kayıplarını büyük ölçüde azaltır. Şebeke tarafı dönüştürücü, şebekeye aktif ve reaktif güç akışını kontrol etmeyi sağlar ve DA bara gerilimini sabit tutar, toplam harmonik bozulmayı azaltarak çıkış gücü kalitesini iyileştirir [29]. Generatör tarafı dönüştürücü, mıknatıslanma talebini ve generatörün istenen rotor hızını kontrol eden bir sürücü olarak çalışır. Şebeke tarafı dönüştürücü ve generatör tarafı dönüştürücü arasındaki ayrıştırma kondansatörü, iki dönüştürücünün bağımsız olarak kontrol edilme yeteneği sağlar[17].

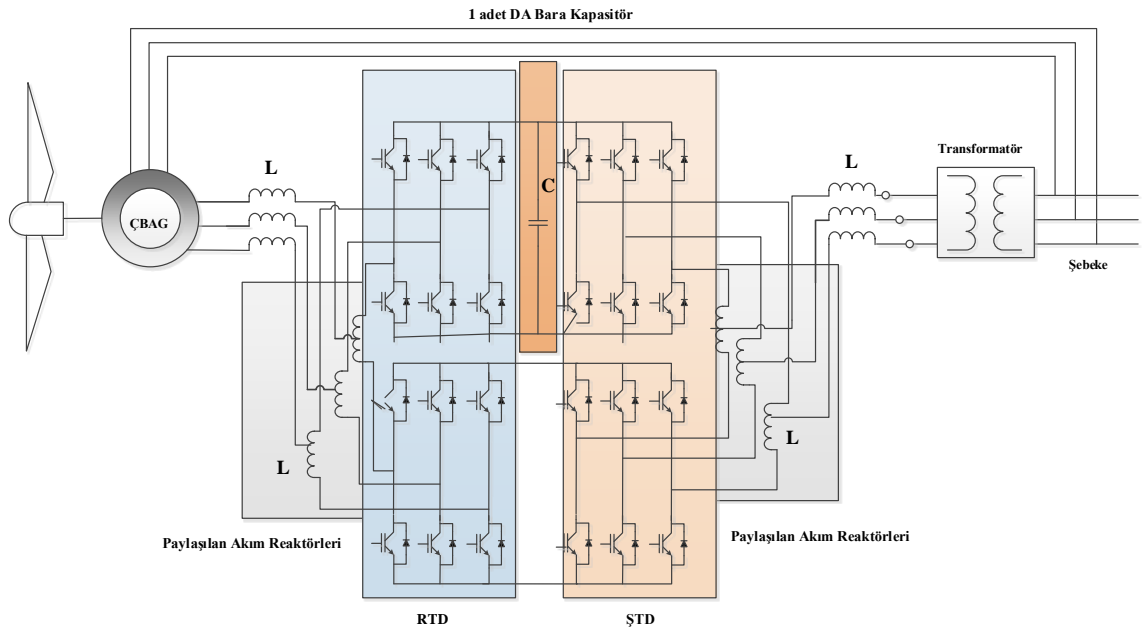


Şekil 4.3. Arka Arkaya dönüştürücü tabanlı rüzgâr türbini generatörü sistemi [13]

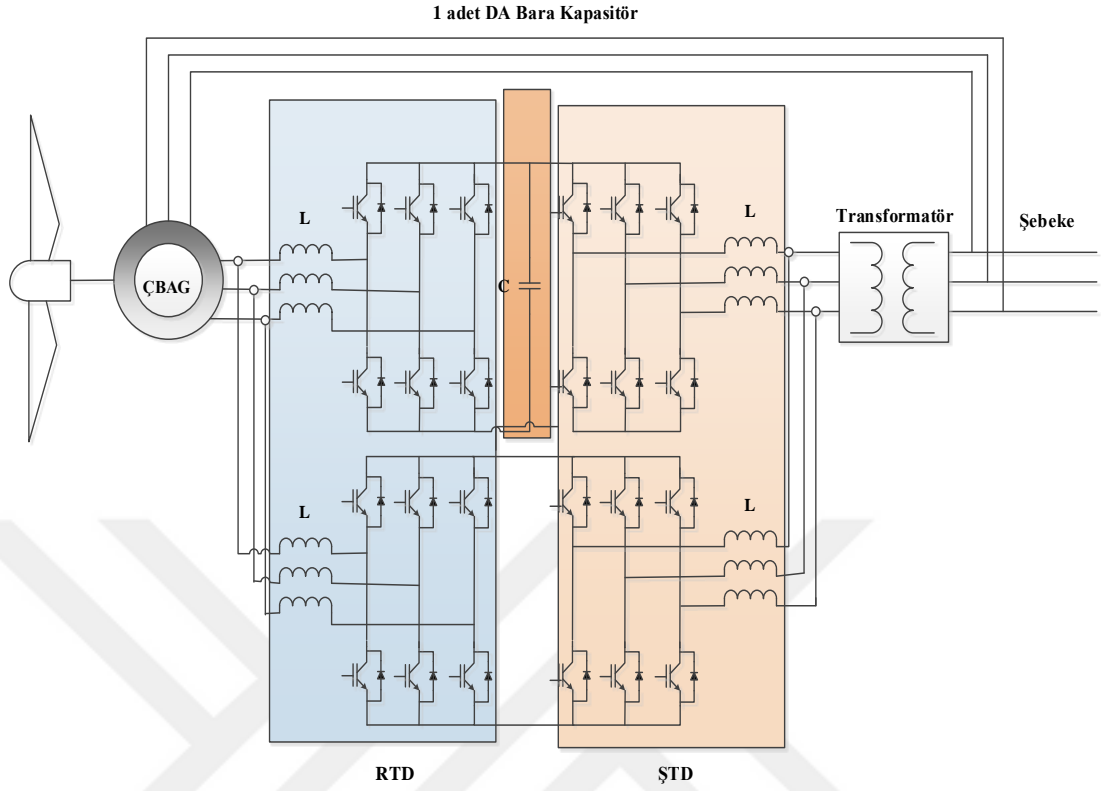
Arka arkaya dönüştürücülerin kapasitörlerin durumuna göre bağlantı şekilleri farklılaşabilmektedir [36]. Şekil 4.4'de 4 farklı şekilde kapasitörlerin sayısı ve bağlantı şekillerine göre çeşitli tasarımları verilmiştir.



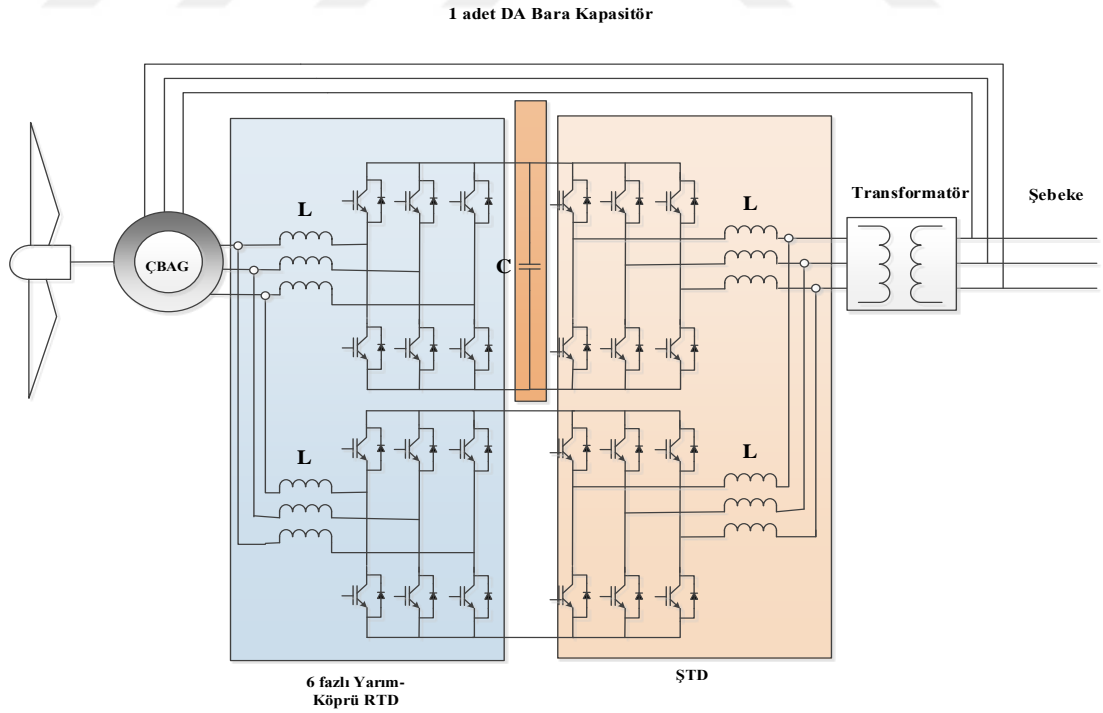
a) Bireysel dc kapasitörlü



b) Bir dc bara ve akım paylaşım reaktörleri ile



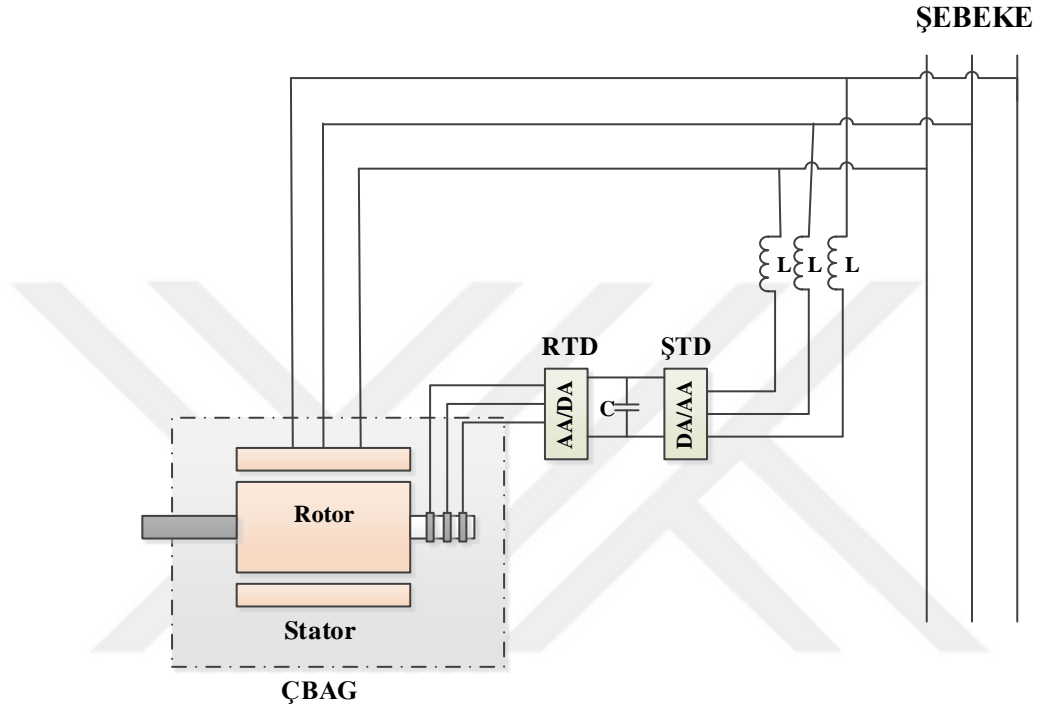
c) Tek dc bağlantı kapasitörlü



d) Bir dc bağlantılı 6 fazlı ÇBAG

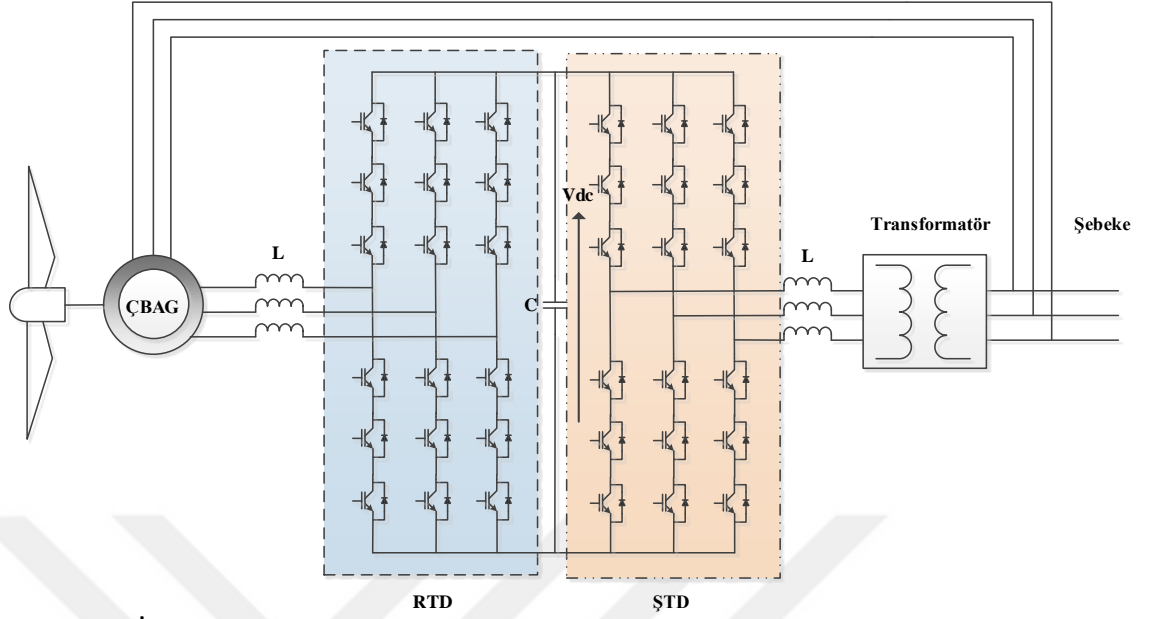
Şekil 4.4. Yüksek güçlü rüzgâr türbini tahrikli ÇBAG'ler için üç fazlı iki seviyeli arka arkaya dönüştürücülerin çeşitli paralel bağlantıları

Son zamanlarda, arka arkaya(sırt sırta) dönüştürücü çift beslemeli asenkron generatör tabanlı rüzgâr türbini sisteminde sıklıkla kullanılmaktadır. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini generatörü sisteminin arka arkaya dönüştürücülü bir blok şeması Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Arka arkaya dönüştürücü ile ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini sistemi [13]

Şekil 4.6'da yüksek güçlü iki seviyeli arka arkaya dönüştürücü bağlantı şeması verilmiştir.



Şekil 4.6. İki seviyeli yüksek güçlü arka arkaya bağlı dönüştürücü tabanlı rüzgâr türbini tahrikli ÇBAG [37]

Avantajları:

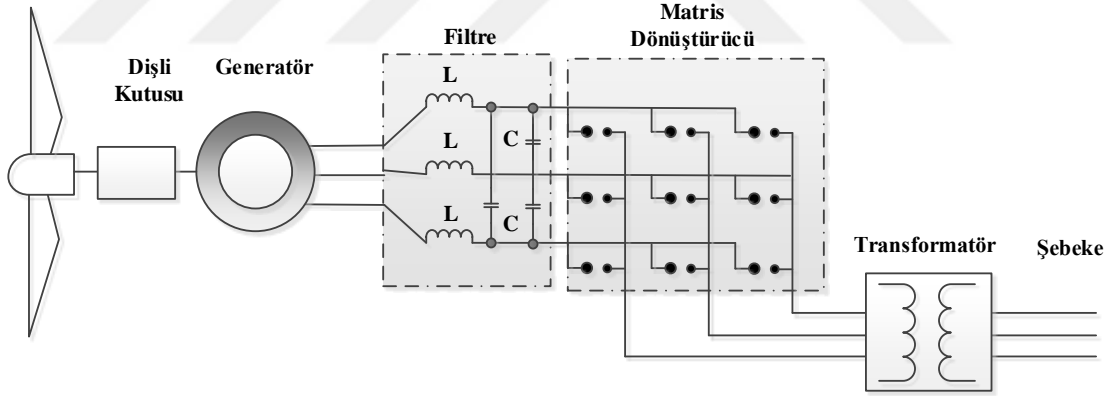
- Arka arkaya dönüştürücü, çift yönlü bir güç dönüştürücü tipidir.
- Şebeke üzerinden geçen akımı kontrol edebilmek için DA bara gerilimi, şebeke geriliminden daha da yükseltilebilir.
- Evirici ve doğrultucu arasındaki kapasitör, iki eviricinin kontrolünü ayırmayı mümkün kılar, böylece hem generatör tarafında hem de şebeke tarafında asimetrinin dengelenmesini sağlar.
- Bileşen maliyetleri düşüktür (piyasada bir modül biçiminde bulunur).

Dezavantajları:

- Ağır ve hacimli DA bara kondansatörünün kullanılması maliyeti artırır ve sistemin ömrünü azaltır
- Arka arkaya dönüştürücünün önemli bir sakıncası, anahtarlama kayıplarıdır.
- Şebekeye yüksek geçiş hızı ayrıca ekstra EMI filtreleri gerektirebilir.
- Kontrollü doğrultucu ve eviricinin aynı zamanda kombine kontrolü oldukça karmaşıktır.

4.3. Matris Dönüştürücüler

Matris dönüştürücü (MC), bir AC dönüştürücüsüne ve bu DA bara ile bağlantılı pasif reaktif filtre bileşenlerine olan gereksinimi ortadan kaldıran AC'den AC'ye güç dönüştürücüsüne özgü bir topolojidir [38]. AC dönüştürücü topolojisine doğrudan veya tek kademeli bir AC dönüştürücüsüdür. Dönüştürücü, giriş ve çıkış fazlarının kesişme noktalarına yerleştirilmiş bir çift yönlü anahtar dizisinden oluşur. Matris dönüştürücünün çıkış gerilimi, çift yönlü anahtar dizisinin seçici kapanmalarına ve açılmalarına bağlı olarak üretilir [13]. Giriş tarafındaki bir filtre değişime yardımcı olur ve üretilen harmoniklerin güç girişine yayılmasını engeller. Matris dönüştürücüler, DA bara kapasitörleri gibi herhangi bir büyük enerji depolama elemanının bulunmamasından dolayı, güç dönüştürücü uygulamalarında önemli boyut ve ağırlık küçültme potansiyeli sunmaktadır. Klasik bir arka arkaya dönüştürücüyle karşılaştırıldığında, matris dönüştürücüler çok daha küçük boyuttadır. Bu özelliklerden dolayı, matris dönüştürücüler son birkaç yılda büyük ilgi görmüştür. Bir matris dönüştürücü bazlı rüzgâr türbin sistemi, Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Matris dönüştürücü tabanlı rüzgâr türbinini generatörü sistemi [13]

Matris dönüştürücülerin avantaj ve dezavantajlarını şöyle sıralayabiliriz:

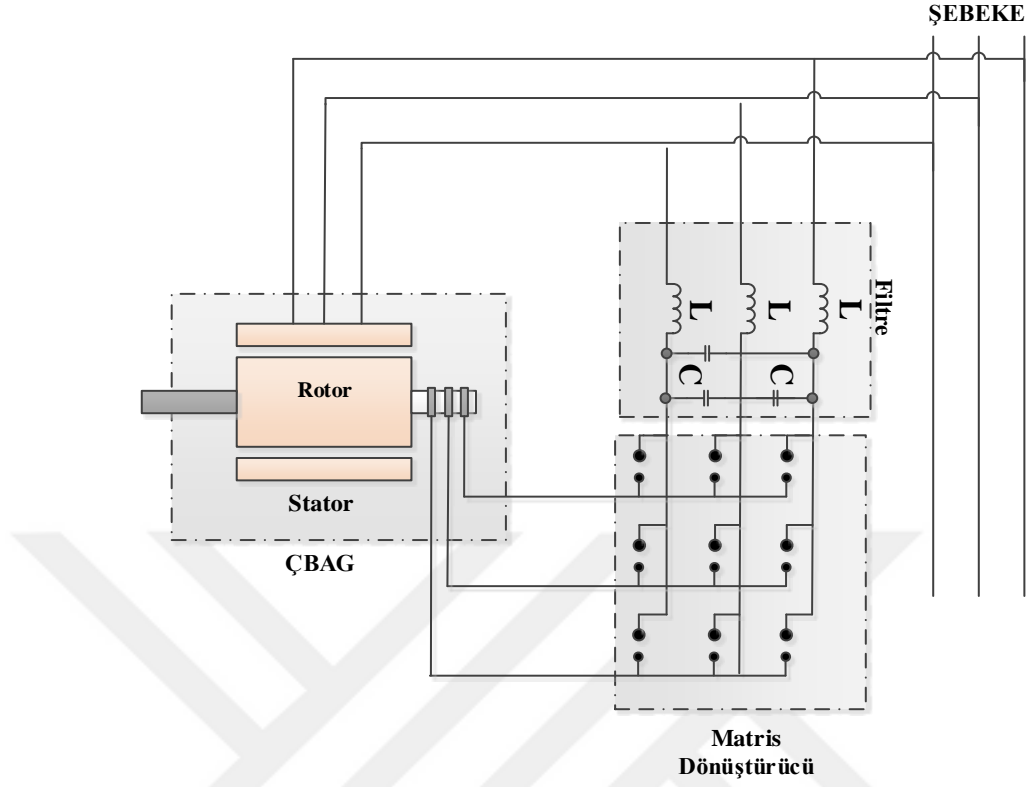
Avantajları:

- Matris dönüştürücüler, DA bara kondansatörleri gibi büyük enerji depolama elemanlarının bulunmaması nedeniyle güç dönüştürücü uygulamalarında önemli boyut ve ağırlık küçültme potansiyeli sunar [39].
- Matris dönüştürücünün arka arkaya dönüştürücüyle karşılaştırıldığında altı ek güç anahtarı içermesine rağmen, DA bara kondansatörünün olmaması dönüştürücünün verimini ve ömrünü artırabilir.
- Çift yönlü anahtarların gerçekleştirilmesine bağlı olarak, matris invertörünün anahtarlama kayıpları, anahtarlamanın yarısı doğal komütasyon haline geldiğinden, arka arkaya dönüştürücünün anahtar kayıplarından daha az olabilir.
- İhmal edilebilir düşük dereceli harmonikler ile giriş ve çıkış akımlarının pratikte sinüzoidal dalga formlarını sağlar.
- Bir matris dönüştürücüdeki yarı iletkenlerin termal gerilimleri, geleneksel bir dönüştürücükilerden daha düşüktür [13, 28].

Dezavantajları:

- Modülasyon tekniği ve komütasyon kontrolü, geleneksel DGM eviricilerden daha karmaşıktır.
- Matris dönüştürücünün hata durumunda korunması, arka arkaya dönüştürücününki kadar iyi değildir [35].

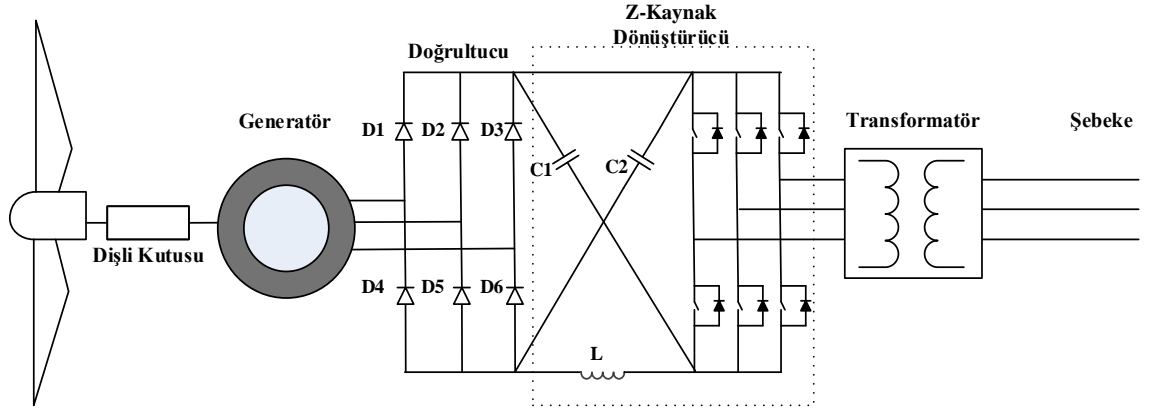
Şekil 4.8'de ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini generatörü sisteminin matris dönüştürücü ile yerleşim düzeni verilmiştir.



Şekil 4.8. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini generatörü sisteminin matris dönüştürücü ile yerleşim düzeni [13]

4.4. Z-Kaynak Dönüştürücü

Empedans kaynağı veya empedans beslemeli güç dönüştürücü, Z kaynağı dönüştürücü olarak kısaltılır. DC'den DC'ye, AC'den DC'ye, AC'den AC'ye ve DC'den AC'ye güç dönüşümleri için kullanılabilir. Son zamanlarda, Z-kaynak dönüştürücü rüzgâr türbini generatörü sistemine uygulanmaya başlamıştır. Ancak, tek yönlü olması onu rüzgâr santralleri sisteminde öne çıkarmamaktadır. Z-kaynaklı dönüştürücü bazlı rüzgâr türbini generatörü sistemi, Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Z kaynaklı dönüştürücü tabanlı rüzgâr enerjisi üretim sistemi [13]

Bu dönüştürücü tipinin Avantajlarını şöyle sıralayabiliriz:

- Diğerlerinden daha verimlidir.
- Geleneksel dönüştürücülerden daha az bileşen kullanır.
- Çekim durumları nedeniyle kullanım yeteneği, uygulaması daha güvenilirdir.
- Geleneksel dönüştürücülere kıyasla daha düşük maliyet ve ebatları vardır.

Dezavantajları:

- Z kaynağı aşaması ve gerilim yükseltme işlevini gerçekleştirmek için Z kapasitör gerilimi giriş geriliminden daha büyüktür. Bu nedenle, hacmi ve maliyeti artırabilen yüksek gerilim Z kapasitörleri kullanılmalıdır.
- Doğası gereği tek taraflı bir dönüştürücü çeşididir.

4.5. Çok Seviyeli (Multilevel) dönüştürücüler

Çok seviyeli dönüştürücü ile ilgili çalışmalar geçmişte ilk olarak Nabe tarafından önerilmiştir [6]. Çok seviyeli dönüştürücü, bir evirici veya doğrultucu olarak çalıştırılabilen bir güç elektroniği devresidir. Çok seviyeli dönüştürücülerin genel amacı kondansatörlerin üç ve daha fazla seviyelerde gerilim kaynağı olarak kullanıp sinüzoidal bir gerilim oluşturmaktır. Dönüştürücüler arasında en yüksek gerilimi verebilen ve

filtrelere en az gereksinim duyan dönüştürücü topolojisidir [40]. Düşük gerilimli anahtarlama cihazlarını kullanarak, yüksek gerilim elde etmek için, çok seviyeli dönüştürücü topolojisi düşük gerilimli DC kaynaklara sahip bir dizi anahtarlama cihazı kullanır. Çok seviyeli dönüştürücüler yüksek güçlü yenilenebilir enerji kaynaklarına dahil olarak rüzgâr türbini generatörleri için, çoklu DC gerilim kaynakları olarak kullanılabilir [6]. Bir rüzgâr türbini generatörü sisteminde çok seviyeli dönüştürücü, rüzgâr enerjisinden üç fazlı elektrik enerjisi üreterek, elektrik şebekesini beslemek için bir mekanizma sağlayabilir. Nötr nokta kelepçeli (NPC), uçan kondansatör (FC) ve seri bağlı H köprü (SCHB) dönüştürücü topolojileri, yüksek güçte ve orta / yüksek gerilim uygulamalarında yaygın olarak uygulanan üç tip çok seviyeli dönüştürücüdür.

Avantajları:

- Çok seviyeli dönüştürücünün temel avantajı, daha düşük değerli cihazlarla daha yüksek gerilim taşıma kapasitesidir.
- Daha düşük anahtarlama kayıplarına ve diğerlerinden daha yüksek toplam verime sahiptir
- Dönüştürücünün dinamik yanıtını etkileyen filtreleme elemanlarının boyutunda küçülme sağlar.

Dezavantajları:

- Kontrol devresinin karmaşıklığını artıran çok sayıda yarı iletken cihaz gerektirir
- Üst ve alt DC-kondansatör arasındaki gerilim dengesizliği.
- Yarı iletkenlerde eşit olmayan akım gerilimi.

4.6. Darbe Genişlik Modülasyon Teknikleri

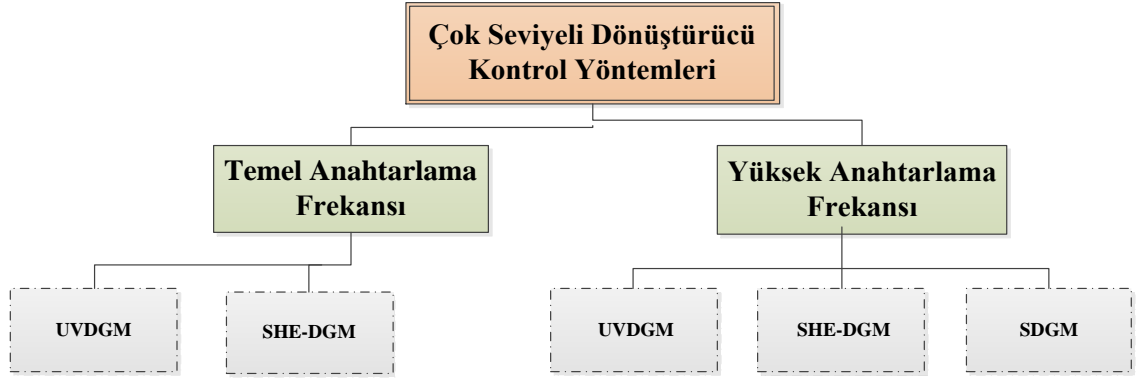
Dönüştürücülerde, DA kaynaktan sağlanan gerilimin AA çıkış gerilimine en az kayıpla dönüşmesi, anahtarlama bileşenlerinin iyi kontrol edilmesine bağlıdır [8]. Dönüştürücülerin anahtarlama esnasındaki kayıpları ve harmonik bozulmalara etki eden değişkenler kontrol yöntemi ile direkt bağlantılıdır.

DA/AA dönüştürücülerde yük tarafına gönderilecek AA sinyalin genlik ve frekansı kontrol edilebilmelidir. Dönüştürücünün kontrolünde kullanılacak modülasyon tekniğinin seçimini belirleyen en önemli faktör maksimum çalışma frekansıdır [8]. Araştırmalarda ve uygulamalarda kullanılan genel yöntem, AA yük devresine akım ya da gerilim aktarılmasını denetleyen darbe genişlik modülasyonu (DGM) yöntemidir. Çok seviyeli eviricilerde çıkış gerilim harmoniğini azaltmak için gerilim seviyesinin artırmanın yanında darbe genişlik modülasyon teknikleri de kullanılır [41]. İleri veya geri beslemeli DGM kontrol sistemleri üzerine fazlaca araştırma ve çalışma bulunmaktadır. İlerleme kaydedilen darbe genişlik modülasyon teknikleriyle aşağıda sıralanan şartlar sağlanır [42].

- Dönüştürücü çıkışında üretilen harmoniklerin düşürülmesi [43]
- Anahtarlama kayıplarını en aza indirmek

Darbe genişlik modülasyonundaki temel hedef kare dalga sinyalleri oluşturmak ve bu sinyallerin genliğini değiştirerek çıkış sinyalinin ana harmoniğini değiştirmektir [9]. Anahtarlama kayıplarını en aza indirmek, düşük harmonik akımları engellemek için en uygun DGM yöntemi seçilir. Seçilecek olan DGM yöntemi ile çıkış gerilim frekansı an anda dönüştürücüden kontrol edilebilir. Üç fazlı dönüştürücülerin çıkış dalga sinyalleri arasında 120° faz farkı olması sebebiyle, DGM sinyalleri arasında da 120° faz farkı bulunmalıdır [9].

Şekil 4.10'da gösterilen çok seviyeli dönüştürücülerin kontrol sistemi olarak kullanımında modülasyon şemaları iki ana başlıkta incelenmektedir. Bunlar temel anahtarlama frekansı ve yüksek anahtarlama frekansıdır [44] [16]. Temel anahtarlama frekansında kullanılan kontrol yöntemleri; Uzay Vektör DGM (UVDGM) ve seçimli harmonik eleme DGM (SHEDGM) kontrol şemalarıdır. Söz konusu her iki kontrol yöntemi temel anahtarlama frekansının yanı sıra yüksek anahtarlama frekansında da kullanılırken, sinüzoidal DGM (SDGM) yöntemi sadece yüksek anahtarlama frekansında kullanılmaktadır [45].



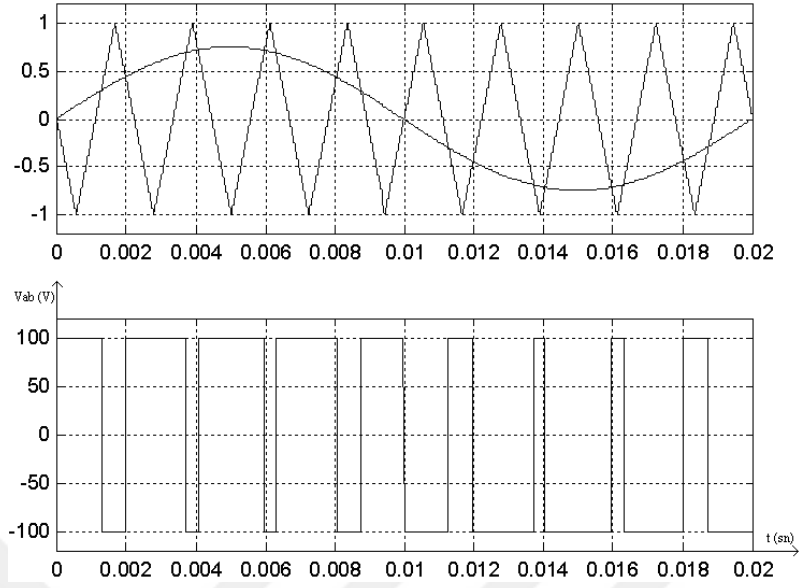
Şekil 4.10. Çok seviyeli dönüştürücüler için kontrol şeması

4.6.1 Sinüzoidal DGM

Sinüzoidal darbe genişlik modülasyon tekniği endüstriyel çeviriciler için fazlaca kullanılan bir tekniktir. Bu teknikte referans sinyal olarak sinüs dalgası kullanıldığından dolayı sinüzoidal DGM olarak bahsedilir. Kare dalga sinyallerindeki harmonikleri en aza indiren ve sıklıkla kullanılan tekniklerden bir tanesi SDGM tekniğidir [7]. Referans ve taşıyıcı dalgalar karşılaştırarak anahtarlama zamanları için kesişme noktaları belirlenir. Referans işareti, tepe farkları ve frekansı olan bir sinüs dalgadır [10]. Taşıyıcı işaret olarak genellikle üçgen dalga şekli kullanılır [46].

Referans işareti sinüs dalgası dönüştürücünün çıkış frekansı, f_m taşıyıcı işareti üçgen dalgadır [11]. Bu sinyaller dönüştürücün anahtarlama frekansını oluşturur. Şekil 4.11’de tek faz için iki seviyeli darbe genişlik modülasyon sinyali gösterilmiştir.

3 fazlı bir sistem içerisinde ayrı fazlar için aynı taşıyıcı dalga kullanılır. Üst anahtarların aktif duruma geçmesi için referans işaretinin taşıyıcı işareten büyük olması gerekmektedir. Alt anahtarlar ise tam tersi durumunda aktif olur [47]



Şekil 4.11. İki Seviyeli Sinüzoidal DGM

Modülasyon indeksi (M_a) SDGM’de modülasyon dalgasının genliğinin, taşıyıcı dalganın genliğine oranıdır. Modülasyon ve çıkış sinyali arasındaki ilişkinin lineer bir değer alması modülasyon indeksinin 0-1 aralığında değişen bir değere sahip olmasındandır. Modülasyon indeksi formülü denklem 4.1’de gösterilmektedir.

$$M_a = \frac{V_p}{V_{tri}} \quad (4.1)$$

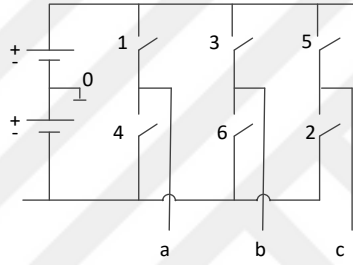
M_a değerinin 1’e eşit olması durumunda ana harmoniğin en üst tepe noktası değeri $V_d/2$ ’dir. Bunun anlamı kare dalga çalışmadaki tepe geriliminin %78,55’ine karşılık gelir [47]. M_a değerinin 0’a eşitse, anahtarlama frekansın kare dalga olur. M_a değeri 1’den ise aşırı modülasyon bölgesidir. M_a , 1’e yaklaştıkça lineer genişlikleri pozitif ve negatif yarı periyotların ortasına doğru yönelir ve devamında kaybolur. Minimum düzeyde darbe genişliklerinin korunması elemanların anahtarlama durumlarını devam ettirebilmesi için gereklidir [47].

SDGM tekniği çok seviyeli dönüştürücülerde biraz daha ilerlemiş durumdadır. Gerilim seviyesine göre taşıyıcı işaret değişirken referans işareti aynı kalır [47]. N seviyeli bir dönüştürücüye karşı (N-1) tane taşıyıcı işaret kullanılır. İşaretlerin ve genlikleri frekansları aynıdır.

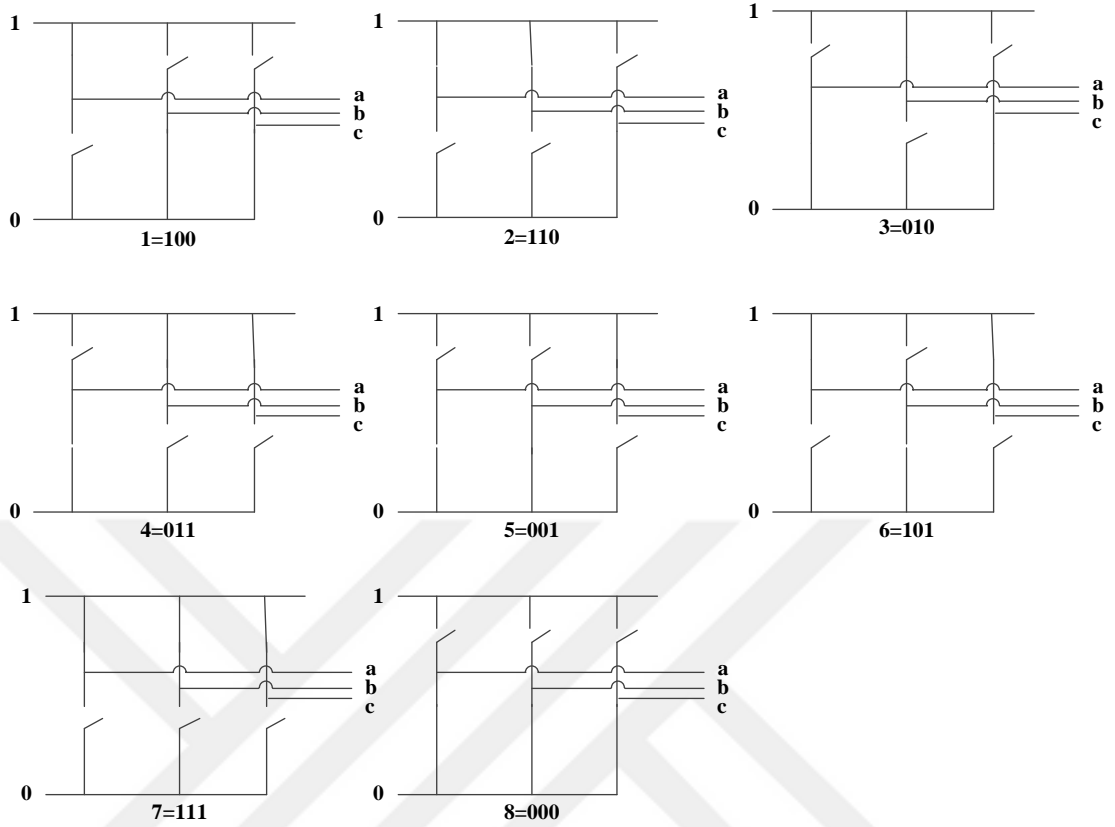
4.6.2. Uzay Vektör DGM

Darbe genişlik modülasyonlarıyla alakalı son yıllarda çok sayıda çalışma yapılması ve çalışmalar sonunda uzay vektör darbe genişlik modülasyonu çoğu sisteme uygulanmaya başlamıştır. Dijital işlemcilere rahatlıkla uygulanabilmesi, diğer DGM tekniklerine göre yüksek genlik modülasyon faktörü sağlaması, çıkış gerilimi harmoniklerini azaltması ve anahtarlama sırasında oluşan kayıpların kayda değer şekilde önüne geçmesi bu DGM tekniğinin avantajlarından [48].

Bu tekniğin amacı anahtarlama kayıplarını ve toplam harmonik değişimini minimum düzeye getirerek çıkış sinyalini sinüzoidal duruma getirmesidir.



Şekil 4.12. UVDGM Devre Yapısı

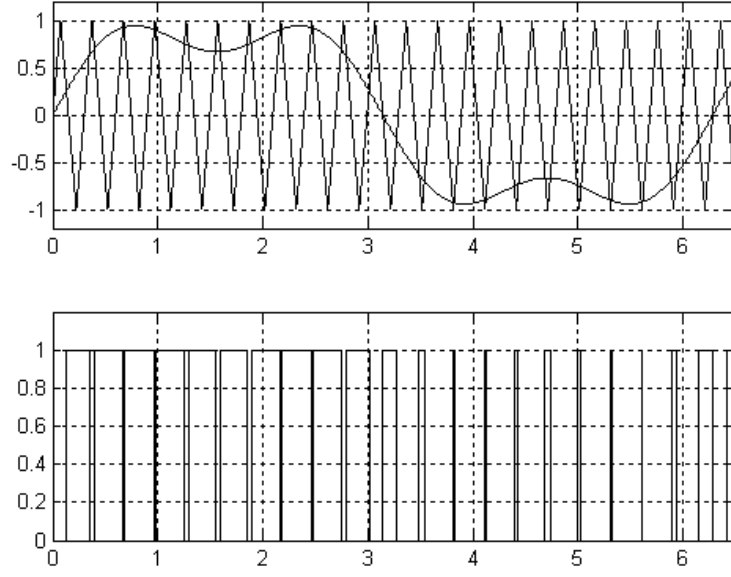


Şekil 4.13. Anahtarın Çalışma Durumu

Şekil 4.13’de bölgeler için hangi anahtarların iletimde olduğu gösterilmiştir. Bu DGM tekniği oldukça popülerdir. Literatür taramalarında bahsedildiği üzere bu modülasyon tekniği ile ilgili çok sayıda çalışma vardır ve geliştirilerek daha verimli sonuçlar elde edilebilir [15].

4.6.3. Üçüncü Harmonik İlaveli DGM

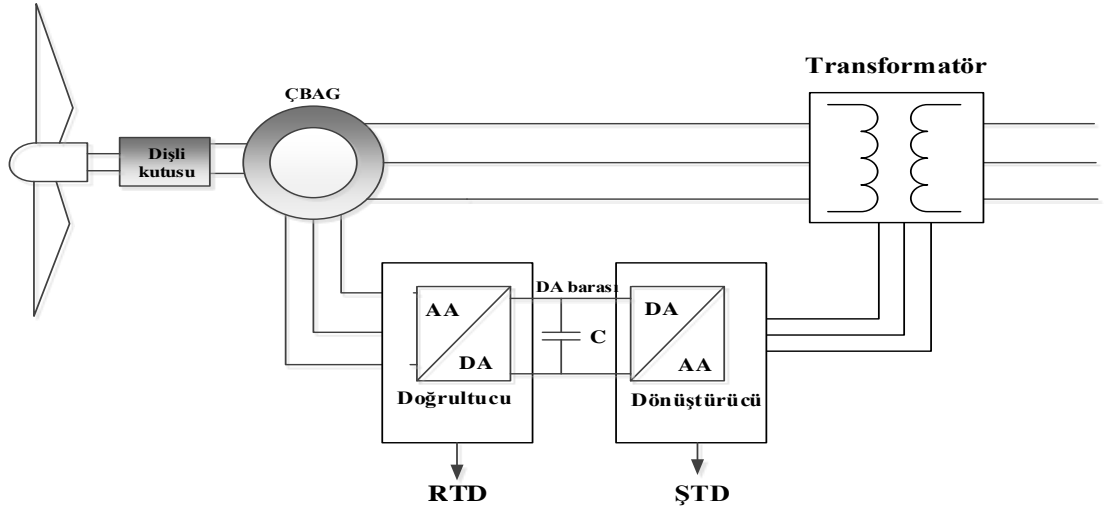
Üçüncü Harmonik Eklemeli DGM tekniği, üç fazlı uygulamalarda kullanılır. Sebebi ise üçüncü harmonik bileşen üç fazlı sistemlerde yoktur [20]. SDGM tekniğinden farklı, DC bara geriliminin kullanım oranı açısından daha elverişlidir [20]. Şekil 4.14’de gösterilen sinüs dalgasına üçüncü harmonik bir bileşen eklenerek modülasyon dalgası oluşturulur [14]. Bu modülasyon tekniğinin öne çıkan özelliği daha az harmonik bozulma içeren yüksek çıkış gerilimi sağlamasıdır. Olumsuz olarak ise faz-nötr geriliminde yüksek dereceli üçüncü harmonik bileşeninin var olması söylenebilir [11]. Bununla birlikte faz-faz gerilimde üçün katı olan harmonikler oluşmaz [10].



Şekil 4.14. Üçüncü harmonik eklemeli DGM

4.7. ÇBAG Kontrol Yöntemleri

Çift beslemeli asenkron generatör değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılmaktadır. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinlerinde iki adet gerilim kaynaklı dönüştürücünün kondansatör aracılığı ile ardışık olarak birbirine bağlanması sonucunda, DA bara gerilimi, aktif ve reaktif güç gibi parametreler kontrol edilmektedir [11]. Şekil 4.15'te verilen ÇBAG tabanlı rüzgâr türbin modeli incelendiğinde rotor tarafı dönüştürücü (RTD) ve şebeke tarafı dönüştürücü (ŞTD) arasında bir kondansatör bulunmaktadır. Bu iki dönüştürücü arasında yer alan DA bara sayesinde her iki dönüştürücü ayrı ayrı kontrol edilirler.

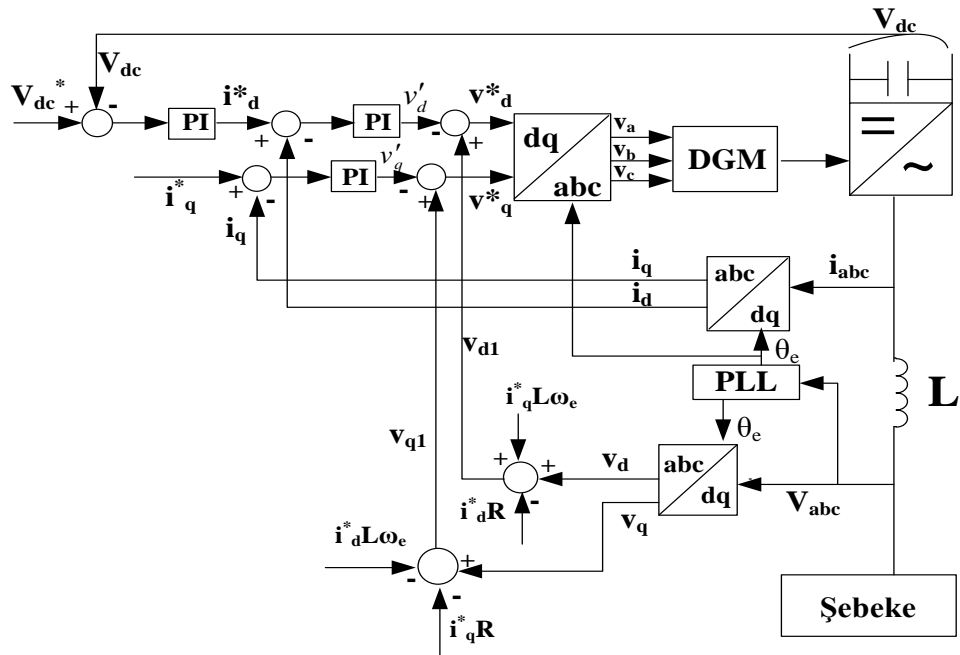


Şekil 4.15. ÇBAG tabanlı rüzgar türbin modeli

4.7.1. ŞTD Kontrolü

Şebeke tarafı dönüştürücü gücün rotor ile şebeke arasında aktarılmasında görev alır. Bu görevi yaparken DA bara gerilimini sabit tutar.

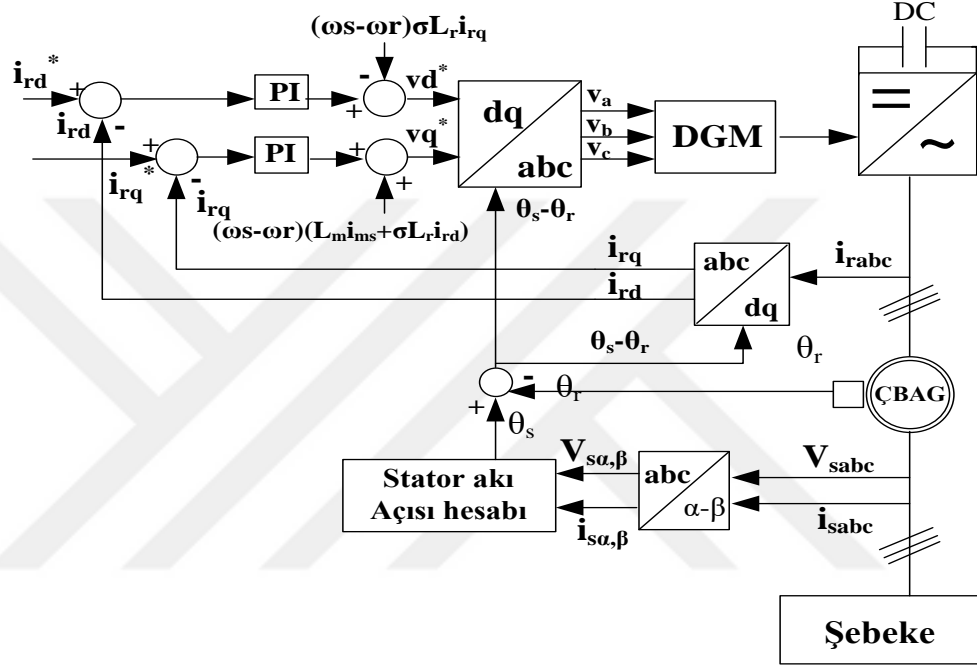
Şekil 4. 16'da ŞTD kontrol blok diyagramı verilmiştir. Diyagramda yer alan PLL bloğu, sistem frekansını ölçer. DGM dönüştürücü DA gerilimini düzenlemek için kullanılır.



Şekil 4. 16. ŞTD kontrol blok diyagramı

4.7.2 RTD Kontrolü

Rotor tarafı dönüştürücünün görevi, rotor hızını rüzgâr değişimlerinden etkilenmeden sabit tutmaktır. Ayrıca rotor tarafı dönüştürücü aktif güç ve reaktif gücün kontrol edilmesinde görev alır [49]. Şekil 4. 17’de rotor tarafı dönüştürücü için kontrol blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 4. 17. RTD kontrol blok diyagramı

Denklem 4.2 ve 4.3’de stator akı hesabının $\alpha\beta$ duran eksen takımındaki eşitliği verilmiştir [50].

$$\psi_{s\alpha} = \int (v_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \quad (4.2)$$

$$\psi_{s\beta} = \int (v_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \quad (4.3)$$

Stator akının değeri ile oluşan sonuçlar kullanılarak açı bilgisi bulunur. Açı bilgisi denklem 4.4’de verilmiştir.

$$\theta_s = \arctan \frac{\psi_{s\beta}}{\psi_{s\alpha}} \quad (4.4)$$

Bu eşitlikler neticesinde elde edilen stator akı ve açı değerlerine göre rotor akımları, PI kontrolör ile kontrol edilir. Rotor akımı kontrolü ayrıca sisteme dahil edilen kompanzasyon ile de kontrol edilmektedir. Kontrol sırasında rotor akımları ayrıştırılır [51].

4.8. Clarke Dönüşümü

Clarke veya başka bir deyişle $\alpha\beta 0$ dönüşümü, üç fazlı devrelerin analizini basite indirmek için kullanılan bir dönüşümdür. Bu uzay vektör dönüşümüyle doğal üç fazlı koordinat sistemindeki zaman domeni işaretleri, sabit iki fazlı referans sisteme ($\alpha\beta$) dönüştürülmektedir [52].

V_a , V_β ve V_0 değerleri Clarke matrisi ile elde edilir. Dönüşümün matematiksel ifadeleri Denklem 4.5 ve Denklem 4.6'te verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1 \\ 0.5 & -\sqrt{3}/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Denklem 4.4'te mevcut olan $2/3$ katsayısı üç fazlı sistemlerde eşdeğer genlik üretme ilkelerine göre saptanan sabit bir dönüşüm oranıdır [53].

4.9. Park Dönüşümü

Park dönüşümleri, doğrudan karesel ($d - q$) dönüşümleri olarak da bilinir. Sabit 2 fazlı referans çerçevesini döner 2 fazlı referans çerçevesine dönüştürmek için kullanılırlar. Park dönüşümü yapılırken Clarke dönüşümü ile elde edilen sabit 2 fazlı referans çerçevesi kullanılır [54]. Dönüşümün matematiksel ifadeleri Denklem (4.7) ve (4.8)'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Denklem 4.9’de θ açısı formülü verilmiştir. Buna göre θ döner alan hız bilgisi integral formundan çıkmaktadır.

$$\theta = \int 2\pi f dt \quad (4.9)$$

İki fazlı sabit sistemlerde, sinüzoidal dalgalarda periyodik olarak farkın oluşması nedeniyle, sabit eksenden belirli bir hızda dönen eksene geçiş avantajlıdır. Sabit eksende mevcut olan $\alpha\beta$ eksenleri dönen dq eksen çiftlerine dönüşümü yapılmıştır. $\alpha\beta$ -dq dönüşümü ile dq- $\alpha\beta$ ters dönüşümü denklem 4.10 ve 4.11’da verilmiştir [11].

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

4.10. Harmonikler

Güç sistemlerinde elektrik üretimi, iletimi ve dağıtımı sırasında akım ve gerilimin sinüs eğrisine benzer bir yapıda olması istenir. Bu faktör enerji kalitesini belirler. Ancak bazı sistemlerde doğrusal olmayan yükler ve yarı iletken malzemelerin etkisiyle, akım ve gerilimin dalga şekilleri, temel sinüzoidal dalgalardan farklı olmakta ve bu neden harmoniklere sebep olmaktadır [55]. Doğrusal olmayan yükler enerji kalitesini düşüreceği gibi enerji sistemlerinin içine harmonik etkide bulunarak düşük güç katsayısına neden olurlar.

Akım ve gerilimde oluşan harmonikler hassas cihazların çalışmalarına bir avantaj sağlamamakla birlikte, yarı iletken cihazlar, trafolar, asenkron makinalar ve kontrol sistemleri gibi cihazları olumsuz yönde etkiler. Harmonikler enerji sistemlerinde teknik ve ekonomik sorunlara yol açar [21].

4.10.1. Harmoniklerin Tanımı

Akım ve gerilim dalga şekilleri, yarı iletkenlerin etkisi, doğrusal olmayan yüklerin (frekans çeviriciler, asenkron makinalar, güç elektroniği elemanları, kesintisiz güç kaynakları, vb.) etkisiyle, periyodik olarak, temel sinüzoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer dalgaların toplamından meydana gelir. Temel frekans haricindeki dalgalara harmonik adı verilir [55]. Sinüzoidal dalgalara benzemeyen dalgalar(lineer olmayan) Fourier serileri sayesinde analiz edilirler. Lineer olmayan bir sinyalin Fourier analizinin zamana göre ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (4.12)$$

Bu denklemde yer alan “n” değeri harmonik mertebelerini, a_0 doğru akım bileşenini, a_n ve b_n de $f(t)$ fonksiyonunun harmonik katsayıları olarak adlandırılır [56]. Periyodik bir fonksiyon olan $f(t)$ ' nin temel frekansı ω 'dir.

4.10.2. Harmonik Değer Sınırları ve Hesaplanması

Yıllık maliyeti yaklaşık 150 milyar avro olan güç kalitesi sorunları, Avrupa Birliği ülkelerine fazlasıyla ekonomik yük getirmektedir [57]. Bu maliyet güç kalitesinin sebep olduğu ekonomik problemleri gözler önüne sermektedir. Ülkemizde harmoniklerden kaynaklanan kayıpların önüne geçmek için yetkili kurumlarca yayınlanan yürürlükteki yönetmeliklere göre: 154 kV seviyesinde %5, 154kV seviyesinin altında %8'lik toplam harmonik bozulma sınırı şartı koyulmuştur. Uluslararası (IEEE 519-2014)'ye göre harmonik bozulma sınır değerleri akım için %8 ve gerilim için %5'tir. Şebekede normal olarak gerilim toplam harmonik distorsiyonu $U_{THD} < \%3-5$ ve akım toplam harmonik distorsiyonu $I_{THD} < \%15-20$ olmalıdır. Harmonik oranların bu sınırları aşması, hem elektrik faturalarının yükselmesine, elektrik sistemleri için büyük zararlar oluşturmaya sebep olur [58].

Gerilim için toplam harmonik bozulması aşağıda verilmiştir.

$$U_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty}(U_n)^2}}{U_1} \quad (4.13)$$

Burada;

U_{THD} , gerilimin toplam harmonik distorsiyonunu (bozunumu),

U_n : Devreye uygulanan gerilimin n'inci mertebedeki harmoniğinin etkin değerini,

U_1 : Devreye uygulanan gerilimin temel frekanstaki etkin değerini,

Akım için toplam harmonik bozulması aşağıda verilmiştir.

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (I_n)^2}}{I_1} \quad (4.14)$$

I_{THD} , gerilimin toplam harmonik distorsiyonunu (bozunumu),

I_n : Devreye uygulanan gerilimin n'inci mertebedeki harmoniğinin etkin değerini,

I_1 : Devreye uygulanan gerilimin temel frekanstaki etkin değerini ifade etmektedir [21].

Akım ve gerilim harmoniklerin düşük olması hassas cihazların çalışmalarını olumsuz etkilememesi için önemlidir. Özellikle endüstriyel uygulama alanlarında enerji kayıplarına yol açmaması, enerji kalitesinin artması ve güç kat sayısının düşük olmasını sağlar.

Şebeke hattında doğrusal olmayan yüklerin fazlalığı harmonikleri artırır. Harmonikler işletmelerde gereksiz enerji tüketimine, bu enerji tüketimi ise yüksek faturalara sebep olur. Harmonik akımlar sebebiyle kompanzasyon için kullanılan kondansatörlerin ömürleri kısılır bu da ek maliyet oluşturur. Harmonikler genliklerine göre ısınmaları artıracığından bakır kayıplarına sebebiyet verir. En fazla bakır kayıpları motorlarda, kapasitörlerde ve transformatörlerde oluşur. Bu cihazlarda oluşacak bakır kayıpları ekstra maliyet oluşturarak, cihazların soğutma sorunlarını ortaya çıkarır. İşletme ve yatırım maliyetini artırır [55].

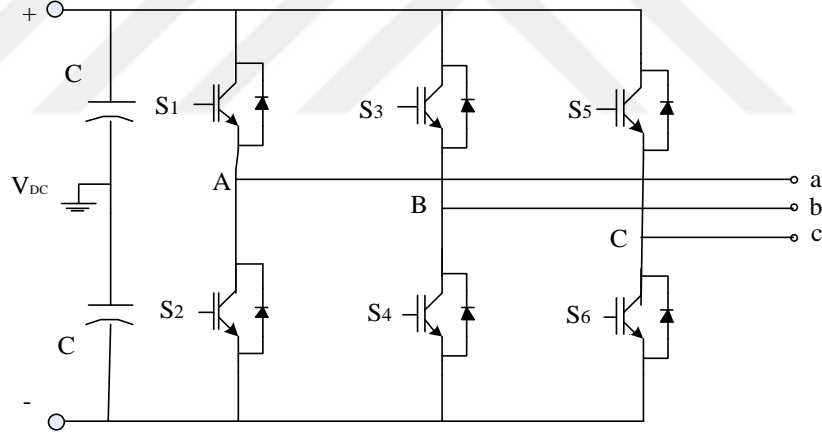
Bu tez çalışmasında sisteme entegre edilen, tasarlanan dönüştürücülerin seviyelerinin şebeke üzerindeki akım ve gerilim toplam harmonik bozulmaları incelenmiştir.

BÖLÜM 5

İKİ, ÜÇ VE BEŞ SEVİYELİ DÖNÜŞTÜRÜCÜ YAPISININ İNCELENMESİ

5.1 İki Seviyeli Dönüştürücü

Güç elektroniği devrelerinde, yapısının daha basit olması ve daha kolay kontrol edilebilmeleri sayesinde çoğunlukla tercih edilen iki seviyeli dönüştürücülerdir [59]. İki seviyeli dönüştürücülerin her faz kolunda iki adet çift yönlü yarı iletken anahtar vardır [60]. Dönüştürücünün akım ve gerilim değerine bağlı olarak Mosfet veya IGBT gibi yarı iletken anahtarlama elemanları, iki seviyeli dönüştürücülerde ana çift yönlü anahtar olarak kullanılabilir [61]. Yarı iletken anahtarlar çalışma zamanı içerisinde sırayla açma veya kapama görevi yapar. İki seviyeli dönüştürücünün çıkış gerilimleri iki seviyeden oluşmaktadır. Bu gerilim seviyeleri $\frac{V_{dc}}{2}$ ve $-\frac{V_{dc}}{2}$ 'dir [60]. Şekil 5.1'de iki seviyeli dönüştürücünün temel devre şeması gösterilmiştir.

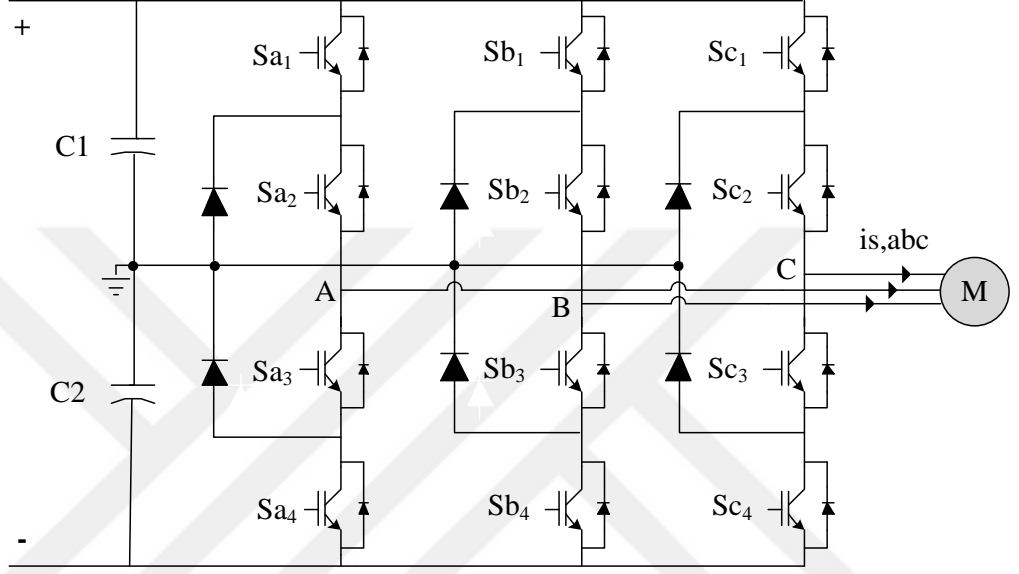


Şekil 5.1. İki Seviyeli Dönüştürücü Topolojisi [62]

5.2 Üç Seviyeli Dönüştürücü

Üç seviyeli dönüştürücüler konusunda ilk çalışma 1977 senesinde Holtz tarafından yapılmış, 1980 yılında ise Nabae ve arkadaşları bu konuda çalışmaları ilerletmiştir [59]. Yüksek güç gerektiren çalışmalarda, üç seviyeli dönüştürücüler iki seviyeli dönüştürücülere göre daha avantajlı hale gelmiş, düşük anahtarlama frekanslarında toplam harmonik bozulmanın az olması sayesinde, daha iyi bir çıkış sinyali ortaya çıkarmaktadır. Diğer bir yandan anahtarlar daha düşük gerilim altında çalışabildikleri için sistemin daha verimli çalışması ortaya çıkmaktadır [59]. Seviye sayısı arttıkça toplam

harmonik değişim azalmaktadır. Kısaca sonsuza giden bir seviye sayısının olması, çıkış geriliminde toplam harmonik değişim sıfır olması demektir [9]. Fakat seviye sayısının artması sistemi daha karmaşık hale getirdiğinden dönüştürücünün kontrolünün zorlaşmasına sebep olmakta ve çıkış geriliminde dengesizlik görülmektedir. Üç seviyeli dönüştürücünün genel topolojisi Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



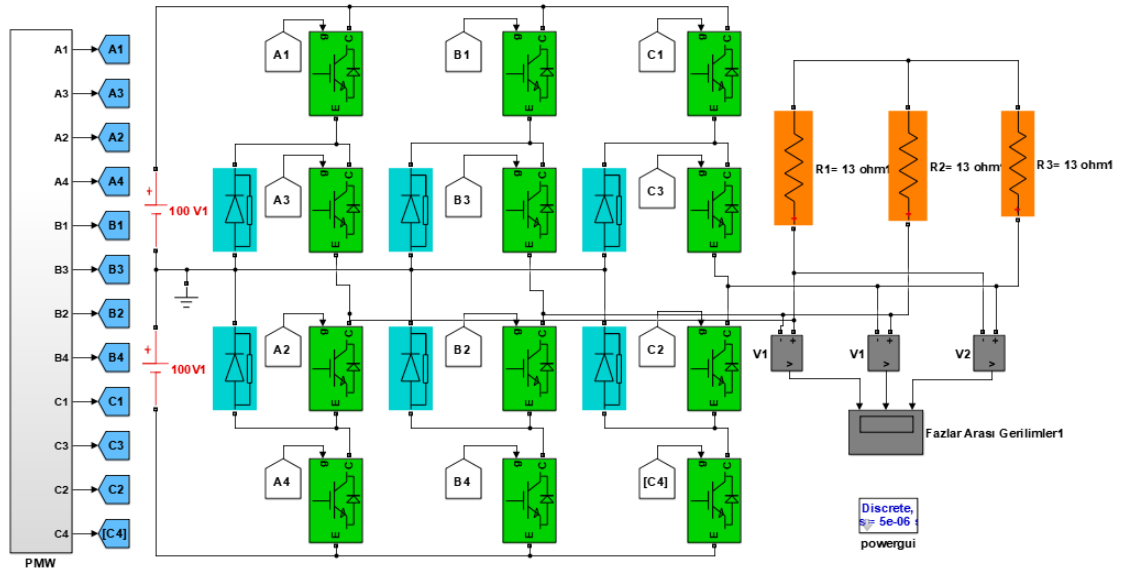
Şekil 5.2. Üç fazlı üç seviyeli dönüştürücü topolojisi[68]

Tablo 5.1’de gösterilen tek fazlı üç seviyeli dönüştürücünün anahtarlama durumuna göre çıkış gerilim değerleri gösterilmiştir. “1” halinde anahtarlar iletimde, “0” olduğu yerlerde ise kesimde olduğunu göstermektedir [9]. Tablodan görüleceği üzere V_{an} gerilimi üç farklı değer almaktadır.

Tablo 5.1. Tek faz için 3 seviyeli dönüştürücünün çıkış gerilim seviyeleri ve anahtar durumları

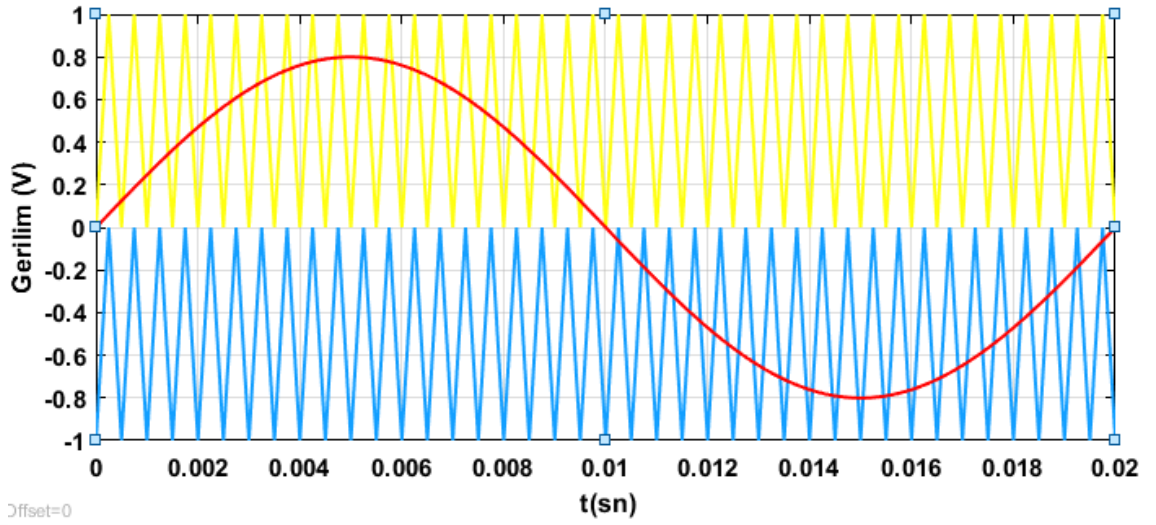
Çıkış Gerilimi	Anahtarlama durumları			
	S_{a1}	S_{a2}	S_{a3}	S_{a4}
V_{an}				
$V_{dc}/2$	1	1	0	0
0	0	1	1	0
$-V_{dc}/2$	0	0	1	1

Bu tez çalışmasında kullandığımız üç fazlı üç seviyeli dönüştürücünün Matlab/Simulink programında benzetimi Şekil 5.3'de verilmiştir. M. Bento ve arkadaşları da çalışmasında üç fazlı üç seviyeli dönüştürücü ile çalışmıştır [63]. Bu modelde tasarlanan üç fazlı üç seviyeli dönüştürücünün çalışma şartları incelenmiştir. Modelde anahtarlama sinyalleri sinüzoidal darbe genişlik modülasyon(SDGM) tekniği kullanılarak üretilmektedir. Bu modelde n seviyeli bir dönüştürücü için (n-1) tane taşıyıcı işaret içerir [64].



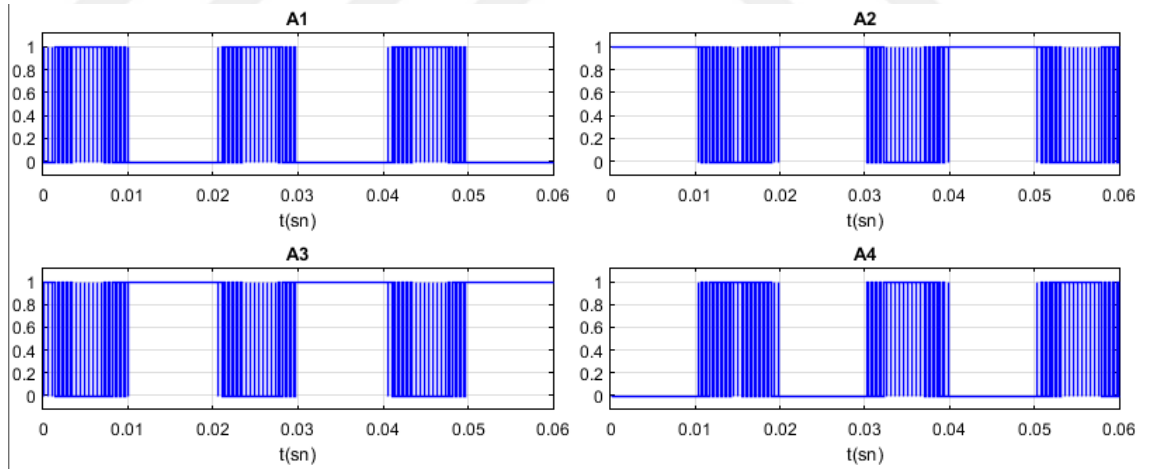
Şekil 5.3. Üç seviyeli diyot kenetlemeli dönüştürücü benzetim modeli [64]

Şekil 5.4'te referans (sinüs) sinyali ile aynı genlikle iki taşıyıcı sinyalin üç seviyeli dönüştürücü için karşılaştırılması verilmiştir. Sinyal genlikleri modülasyon indeksi 0,8 olarak ayarlanmıştır. Anahtarlama işaretleri, dönüştürücü çıkış gerilimlerinin frekansı 50 Hz ve anahtarlama frekansı 2 Khz olacak şekilde üretilmektedir [64].



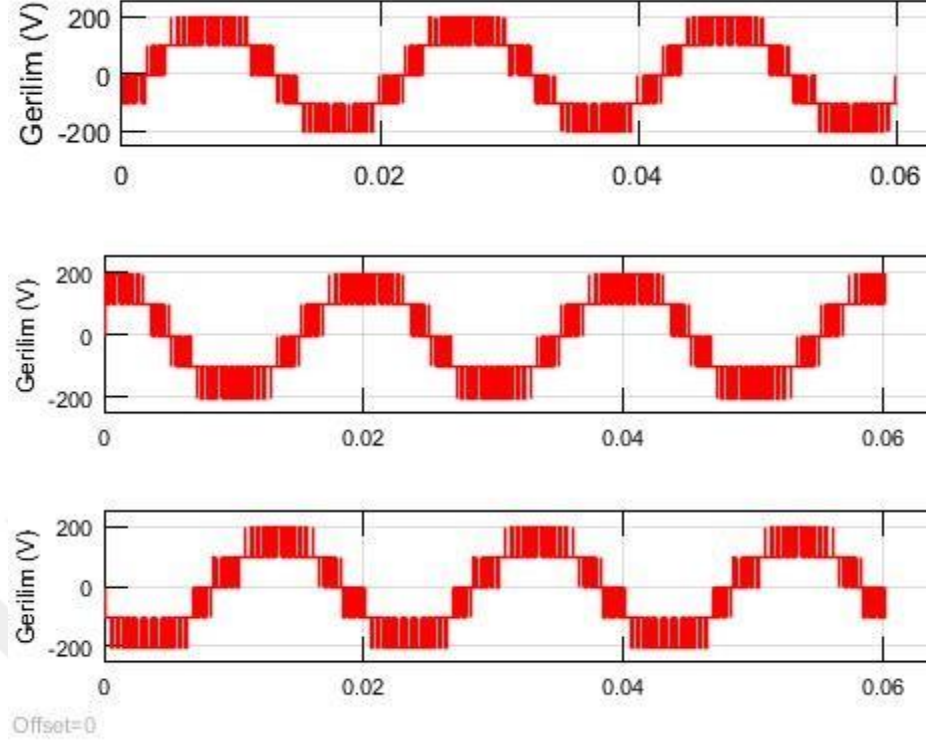
Şekil 5.4. Dönüştürücü kontrolü için referans ve taşıyıcı işaretler ($M_i = 0.8$)

Üç fazlı üç seviyeli dönüştürücünün tek fazı için anahtarlama sinyalleri Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Buna göre A1 anahtarı iletimde olduğunda A2 anahtarının iletimi devre dışı kalmaktadır. Yine aynı şekilde A3 anahtarı iletime geçtiğinde A4 anahtarı iletimi yoktur.



Şekil 5.5. Üç seviyeli dönüştürücü tek faz anahtarlama sinyalleri

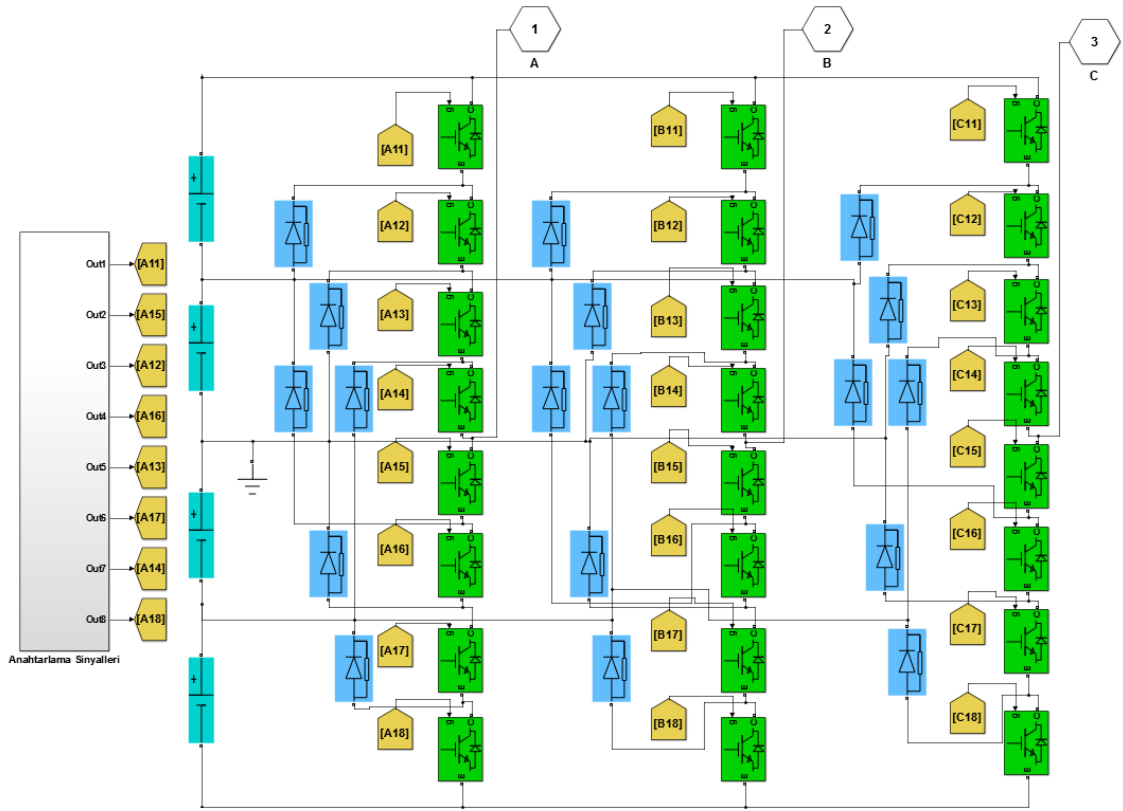
Şekil 5.3 'te tasarlanan üç seviyeli dönüştürücünün direnç yükleri (R_1, R_2, R_3 dirençleri) 13Ω büyüklüğünde kullanılmıştır. Bu şartlar altında elde edilen gerilim dalga sinyalleri Şekil 5.6'de gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Dönüştürücü çıkışındaki fazlar arası gerilimler

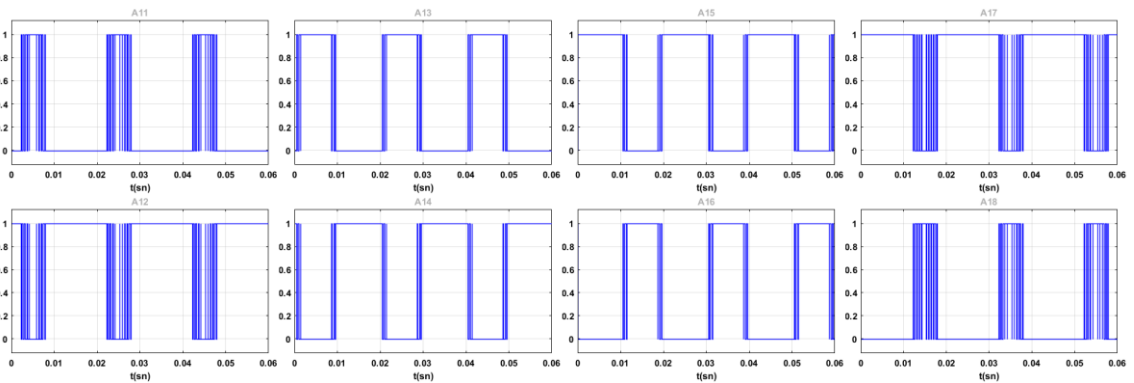
5.3 Beş Seviyeli Dönüştürücü

Seviye sayısının artmasıyla birlikte dönüştürücü tasarımda kullanılan yarı iletken malzeme sayısı artmaktadır. Bununla birlikte sistemin kontrol edilebilme basitliği ortadan kalkmakta daha karmaşık bir hal almaktadır. Şekil 5.7' de Matlab/Simulink programında tasarlanan üç fazlı beş seviyeli dönüştürücünün benzetimi ve tek faz için anahtarlama sinyalinin benzetimi görülmektedir.



Şekil 5.7. Üç fazlı beş seviyeli diyot kenetlemeli dönüştürücü ve tek faz için anahtarlama sinyal benzetim modeli [65]

A. Prayag ve S. Bodkhe[64], çalışmasında kullandığı üç fazlı beş seviyeli dönüştürücünün bir fazına ait anahtarlama sinyalleri Şekil 5. 8’da verilmiştir. Tablo 5.2’de de anahtarlama durumlarına göre çıkış gerilim değerleri gösterilmiştir.

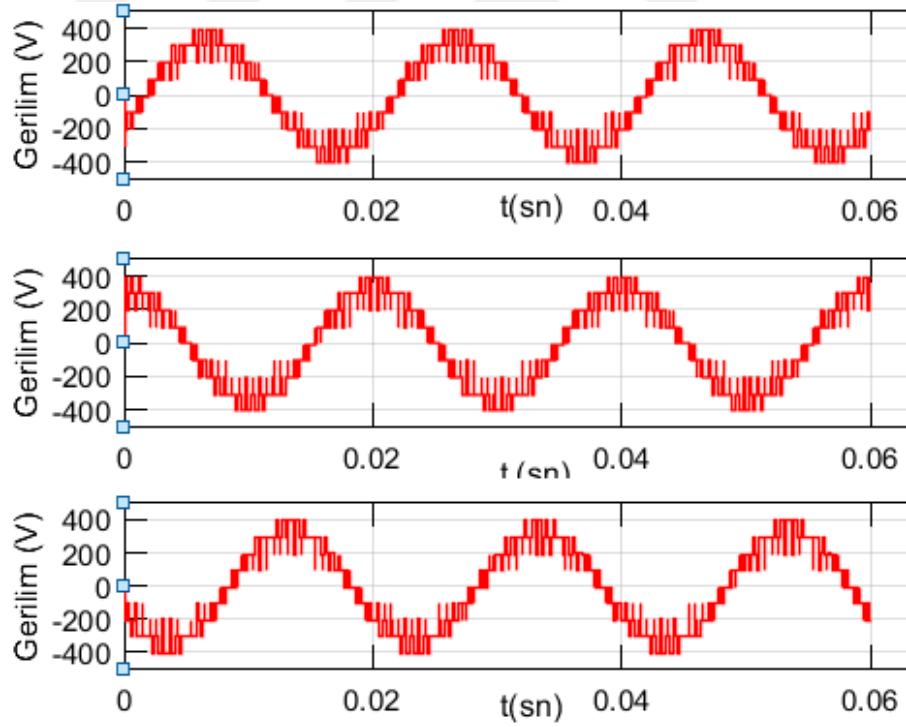


Şekil 5. 8. Üç fazlı beş seviyeli dönüştürücü tek faz anahtarlama sinyalleri

Tablo 5.2. Beş seviyeli dönüştürücünün tek fazına ait çıkış gerilim seviyeleri ve anahtarlama durumları

Faz Gerilimi	Anahtarlama Durumları							
	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18
V_{an}	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18
$V_{dc}/2$	1	1	1	1	0	0	0	0
$V_{dc}/4$	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	0
$-V_{dc}/2$	0	0	0	1	1	1	1	0
$-V_{dc}/4$	0	0	0	0	1	1	1	1

Üç fazlı beş seviyeli dönüştürücünün fazlar arasındaki gerilim değerleri Şekil 5.9’da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Dönüştürücü çıkışındaki fazlar arası gerilimler

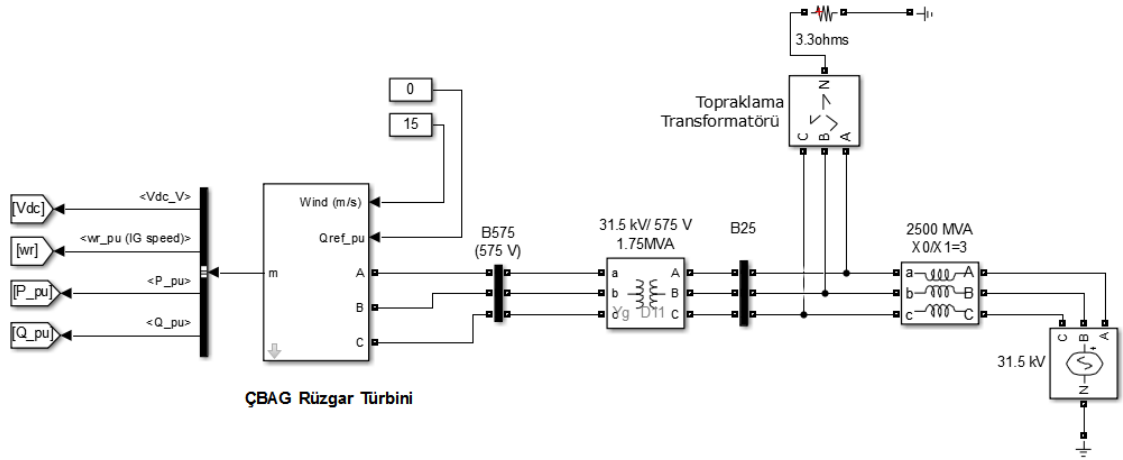
BÖLÜM 6

BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu tez çalışmasında, ÇBAG tabanlı 1,5 MW'lık rüzgâr türbini tasarlanmıştır, bu rüzgâr türbinlerinde dönüştürücü olarak çok seviyeli dönüştürücüler kullanılmıştır. İki seviyeli, üç seviyeli ve beş seviyeli dönüştürücüler tasarlanarak aktif güç, reaktif güç, DA bara gerilimi, çıkış gerilim ve akım değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada farklı zamanlarda sisteme girecek olan yükler ile de çalışma yapılmış başarılı sonuçlar alınmıştır. Ek olarak farklı rüzgâr hızlarına göre sistemin ürettiği güç, çıkış gerilim ve akım değerlerinin analizleri yapılmıştır. Çıkış gerilim ve akım değerlerinin toplam harmonik bozulmaları Matlab/Simulink programında hesaplanmış, çıkan sonuçların IEEE 519-2014'e uygun olduğu görülmüştür.

6.1. Yüksüz Sistem Analizi

Şekil 6.1' de 1,5 MW'lık rüzgâr türbinini oluşturan bloklar gösterilmiştir.

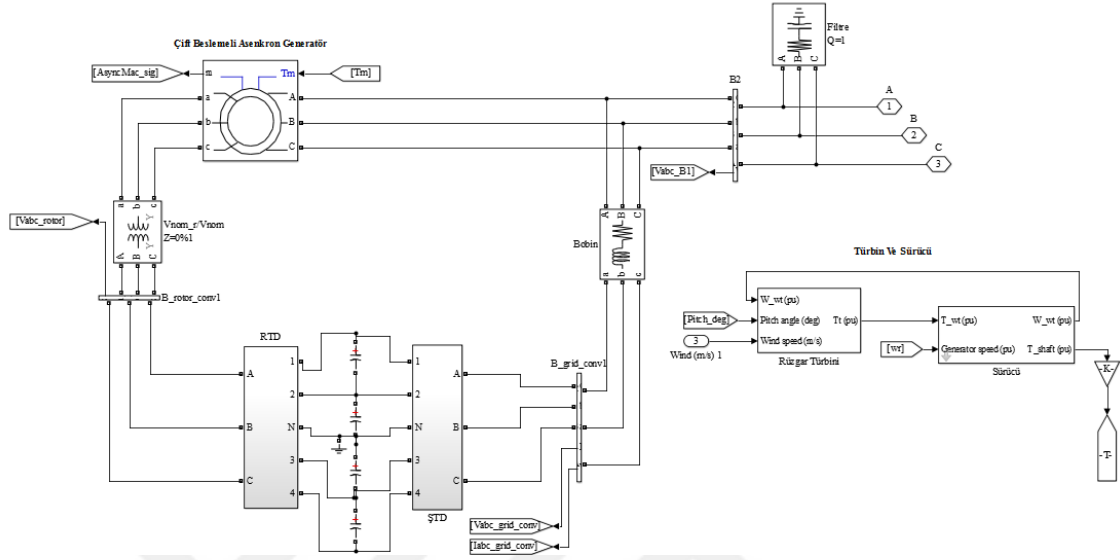


Şekil 6.1. ÇBAG tabanlı 1,5 MW'lık rüzgâr türbini sistemi [66]

Çalışma yapılan 1,5 MW gücünde rüzgâr santrali 31,5 kV'luk bir şebekeye güç sağlamaktadır. Sistem çalışma frekansı 50 Hz ve rüzgâr hızı 15m/sn olarak çalışma yapılmıştır.

Söz konusu rüzgâr türbinlerinde çift beslemeli asenkron jeneratör seçilmiş olup, seçilmesinin nedenlerinden biri farklı rüzgâr durumlarında maksimum kazanç elde

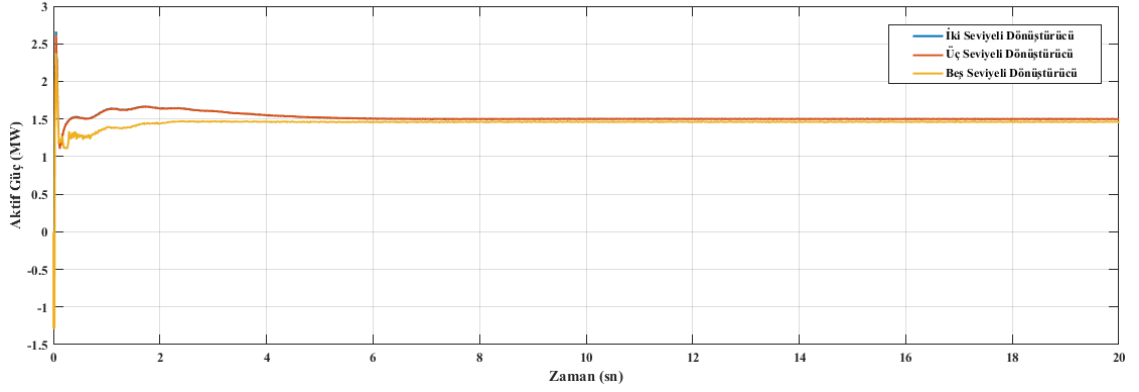
etmesidir. Şekil 6.2’de rüzgâr türbininin MATLAB/Simulinkte tasarlanan beş seviyeli dönüştürücü tipi ile generatör modellemesi gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Rüzgâr Türbin sistemi [66]

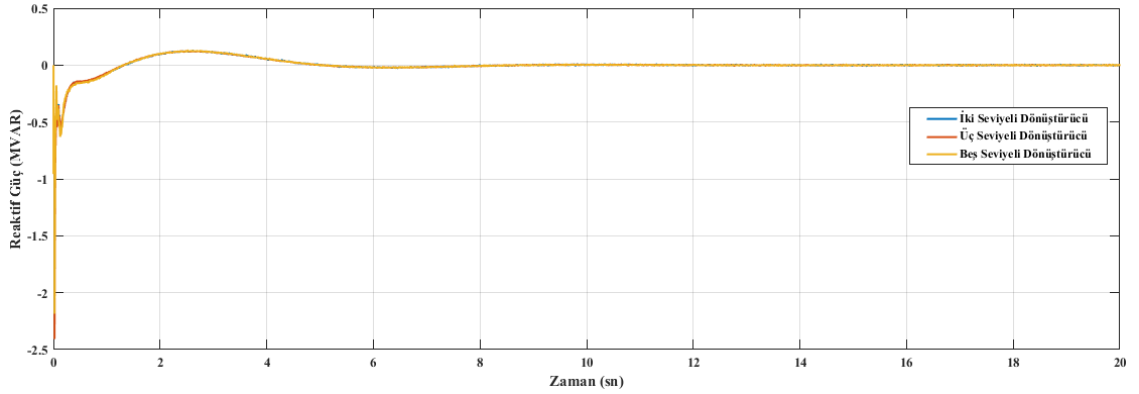
Şekil 6.2’ de gösterilen ve Matlab/Simulink programında tasarlanan rüzgâr türbini için dönüştürücünün tasarımı gerçekleştirilmiştir. İki ve çok seviyeli dönüştürücülerin sisteme dâhil edilmesiyle dc bara gerilimi (V_{dc}), toplam güç (P), toplam reaktif güç (Q), çıkış gerilimleri (V_{abc}) ve çıkış akımları (I_{abc}) incelemesi yapılmış, toplam harmonik değerleri gözlenmiştir.

Şekil 6.3’de üç fazlı iki seviyeli, üç fazlı üç seviyeli ve üç fazlı beş seviyeli dönüştürücüler kullanılarak sistemin ürettiği güç grafiği verilmiştir. Sistem 1,5 MW güç ürettiğinden her üç simülasyonda da zamanla o seviyede sabitlendiği görülmektedir. Şekil 6.3’te görüleceği üzere üç fazlı beş seviyeli dönüştürücü ile tasarlanan sistemin ürettiği güç daha kararlı bir şekilde 1,5MW’lık güce ulaşmaktadır.



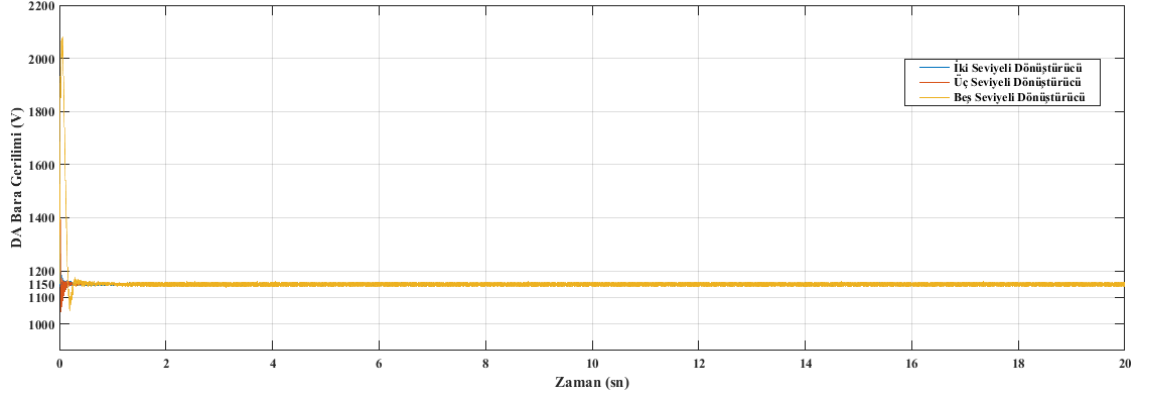
Şekil 6.3. Kullanılan dönüştürücü tipine göre güç analizi

Şekil 6. 4'te dönüştürücü seviyesine göre sistemin reaktif güç değişimi verilmiştir. Her üç dönüştürücü tipinde sistemin reaktif güç durumu benzer çıkmakta ve zamanla sıfıra yaklaşıp sabitlenmektedir.



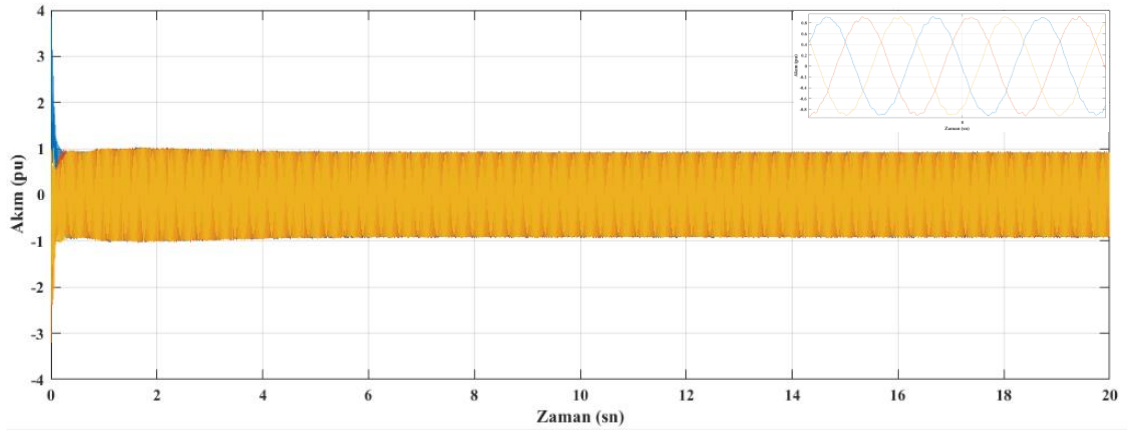
Şekil 6. 4. Kullanılan dönüştürücü tipine göre reaktif güç analizi

Şekil 6. 5'te sistemin V_{dc} (bara gerilimi) analizi verilmiştir. 1150 V bara gerilimine sahip sistem, üç farklı dönüştürücü tipinde istenilen değeri sağlamaktadır.

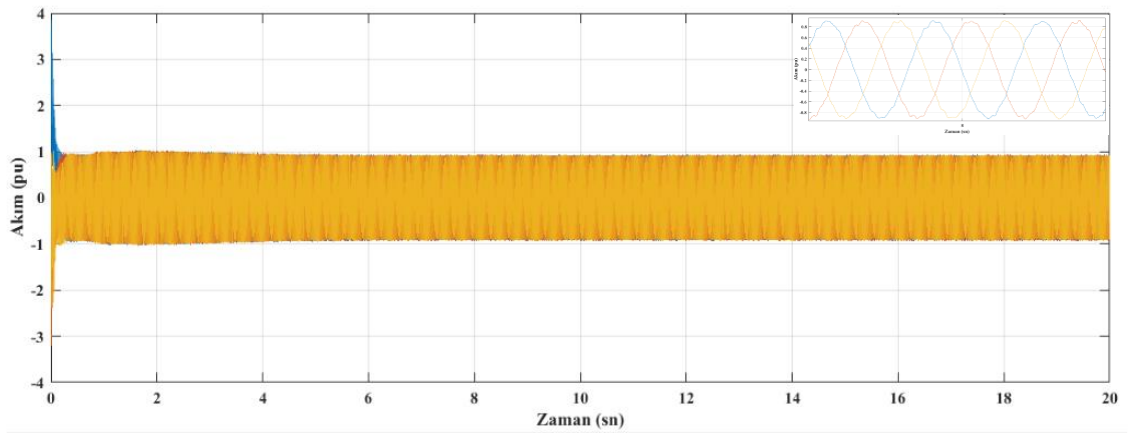


Şekil 6. 5. Kullanılan dönüştürücü tipine göre DC bara gerilim analizi

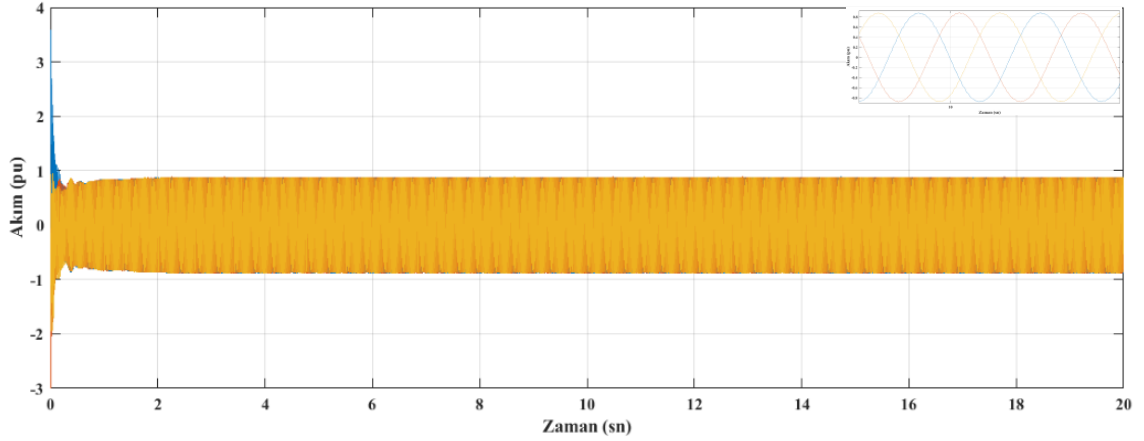
Şekil 6.6, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de iki seviyeli, üç seviyeli ve beş seviyeli dönüştürücüler için sistemin çıkış akımı grafikleri verilmektedir.



Şekil 6.6. Üç fazlı iki seviyeli dönüştürücü için çıkış akımı analizi

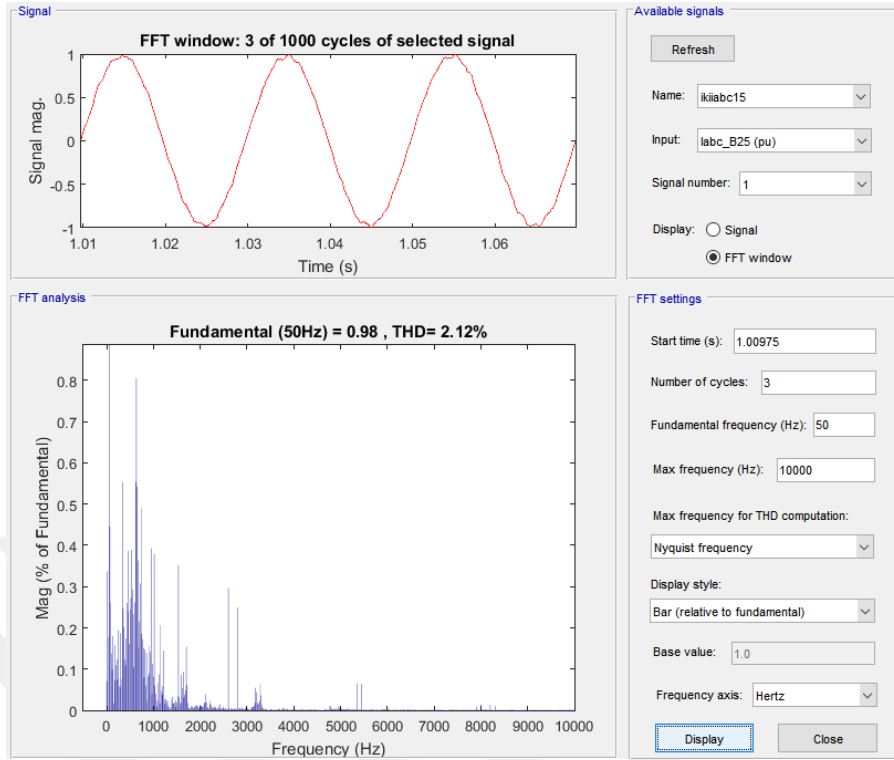


Şekil 6.7. Üç fazlı üç seviyeli dönüştürücü için çıkış akımı analizi

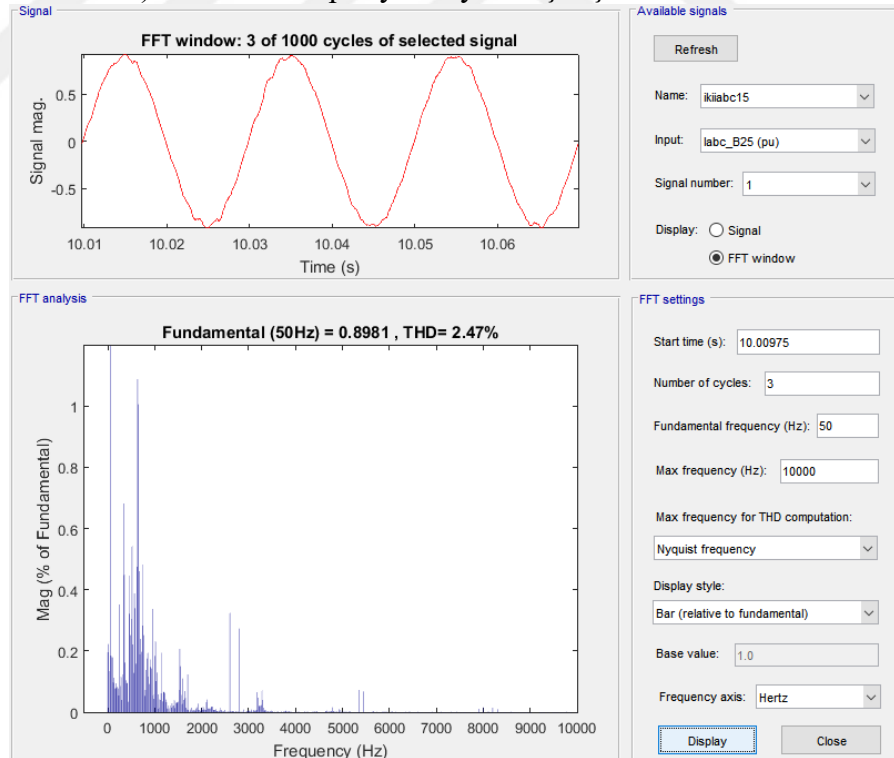


Şekil 6.8. Üç fazlı beş seviyeli dönüştürücü için çıkış akımı analizi

Sistemin çıkış akımları toplam harmonik bozulmaları dönüştürücü tiplerine göre incelenmiştir. Şekil 6. 9, Şekil 6. 10 ve Şekil 6. 11’de çıkış akımlarının sisteme uygulanan dönüştürücü seviyelerine göre THD’leri verilmiştir. Uluslararası (IEEE 519-2014)’ye göre harmonik bozulma değerleri akım için %8’den ve gerilim için %5’ten küçük olarak belirlenmiştir [67]. Farklı zamanlarda, 50 hz frekans ve 3 periyot boyunca oluşan sonuçlar incelendiğinde çıkış akım THD’leri dönüştürücü tiplerine göre %5’ten küçük olduğu görülmektedir. Yüksüz sistemde toplam harmonik bozulma oranı çıkış akımı için en iyi sonuç beş seviyeli dönüştürücü ile yapılan benzetim sonucunda çıkmaktadır.

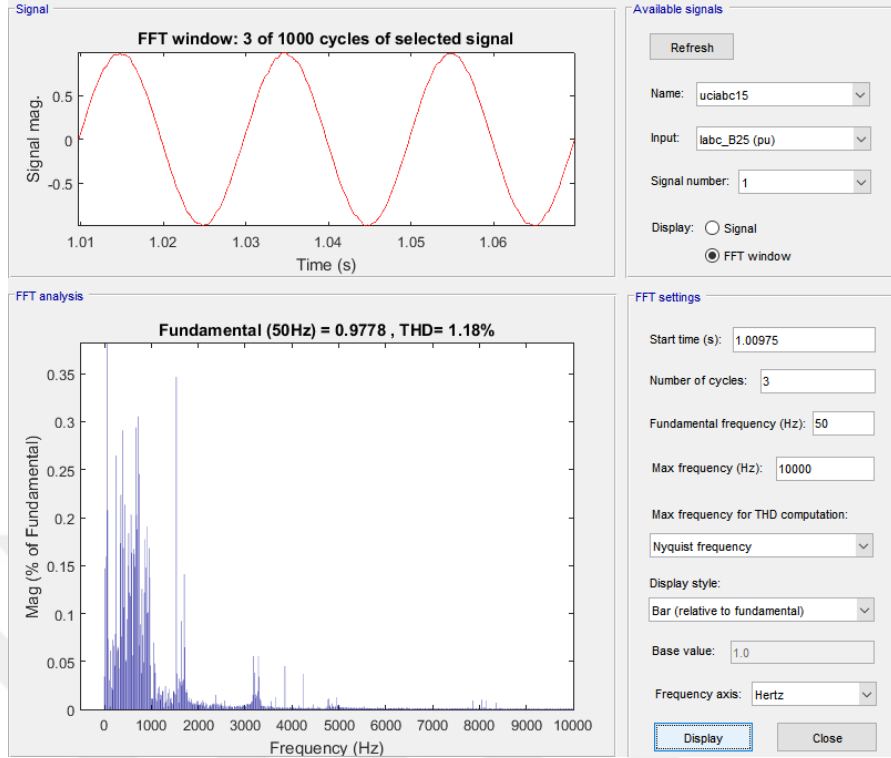


a)1 sn anında 3 periyot boyunca çıkış akım THD'si

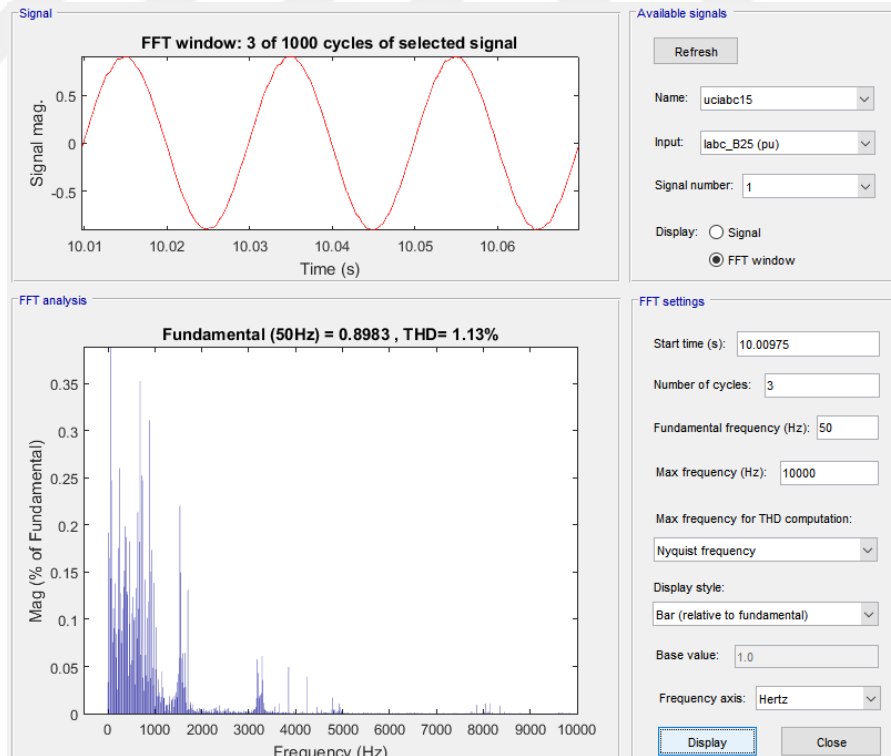


b)10 sn anında 3 periyot boyunca çıkış akım THD'si

Şekil 6. 9. İki seviyeli dönüştürücü için sistem çıkış akım THD'si

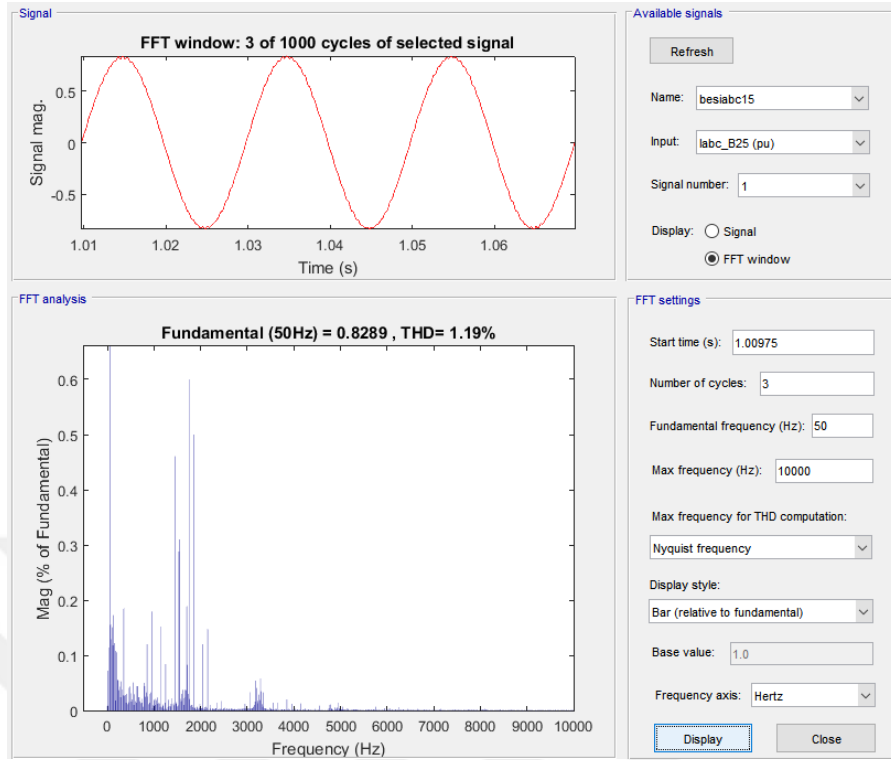


a)1 sn anında 3 periyot boyunca çıkış akım THD'si

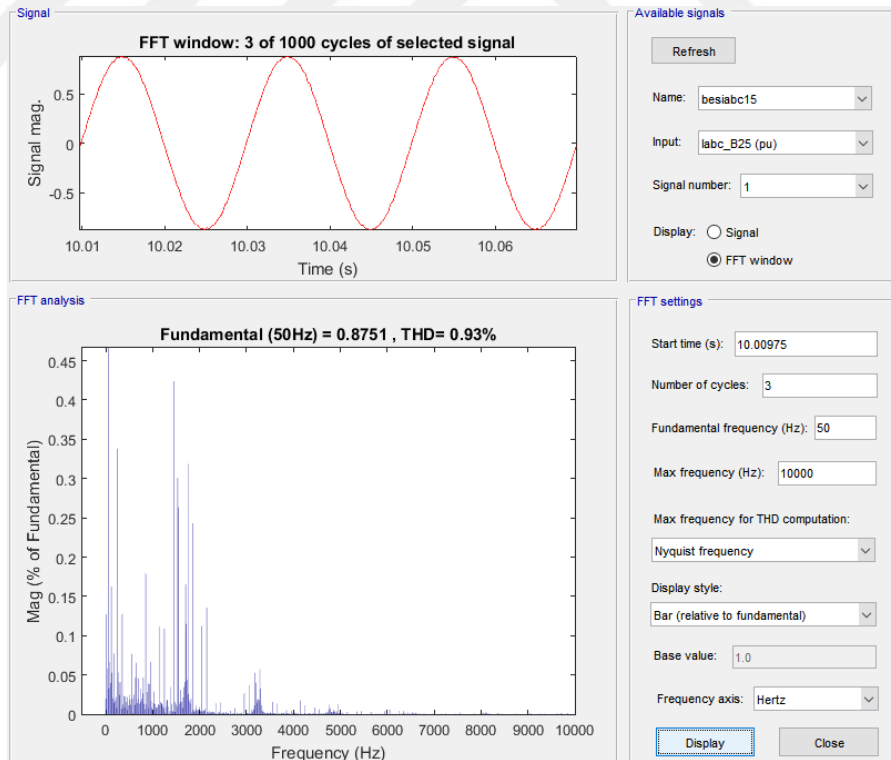


b)10 sn anında 3 periyot boyunca çıkış akım THD'si

Şekil 6. 10. Üç seviyeli dönüştürücü için sistem çıkış akım THD'si



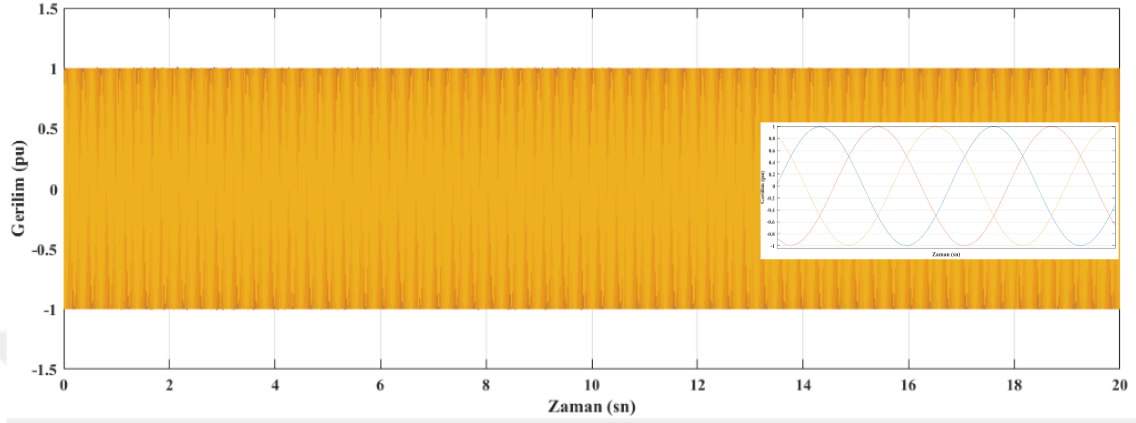
a)1 sn anında 3 periyot boyunca çıkış akım THD'si



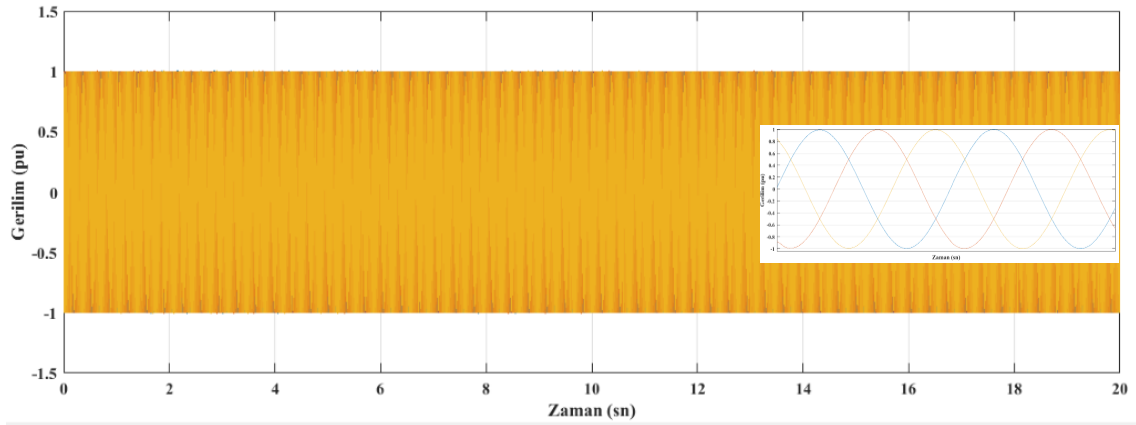
b)10 sn anında 3 periyot boyunca çıkış akım THD'si

Şekil 6. 11. Beş seviyeli dönüştürücü için sistem çıkış akım THD'si

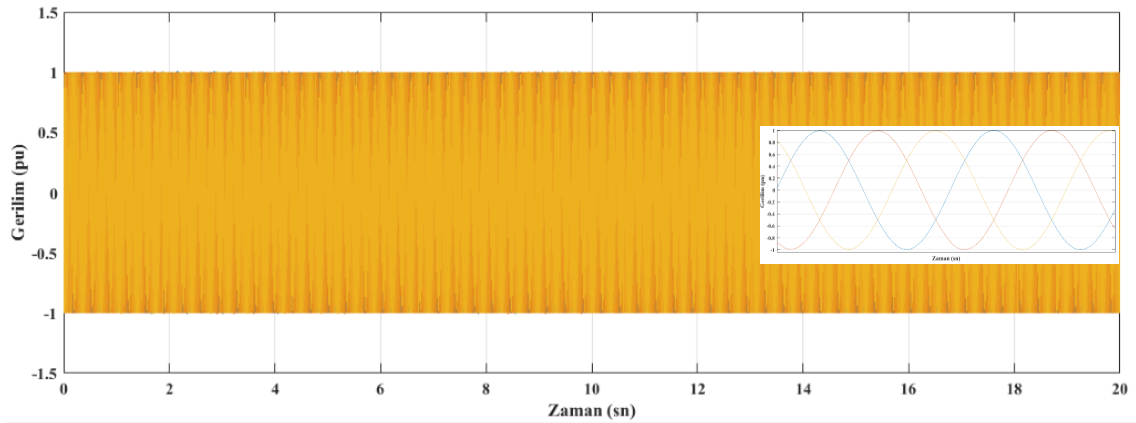
Şekil 6.12, Şekil 6.13 ve Şekil 6.14’ te dönüştürücü tiplerine göre sistemin çıkış gerilim analizleri verilmiştir. Her dönüştürücü tipi ile yapılan çalışma sonucunda gerilim seviyesi 1 pu değerini sağlamıştır.



Şekil 6.12. Üç fazlı iki seviyeli dönüştürücü için çıkış gerilim analizi

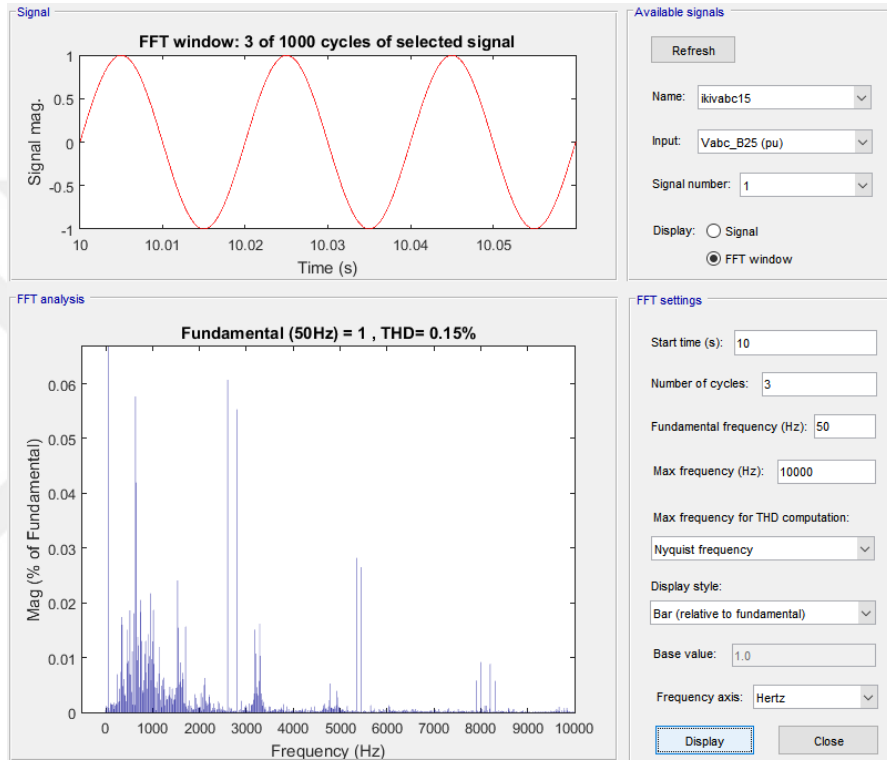


Şekil 6.13. Üç fazlı üç seviyeli dönüştürücü için çıkış gerilim analizi

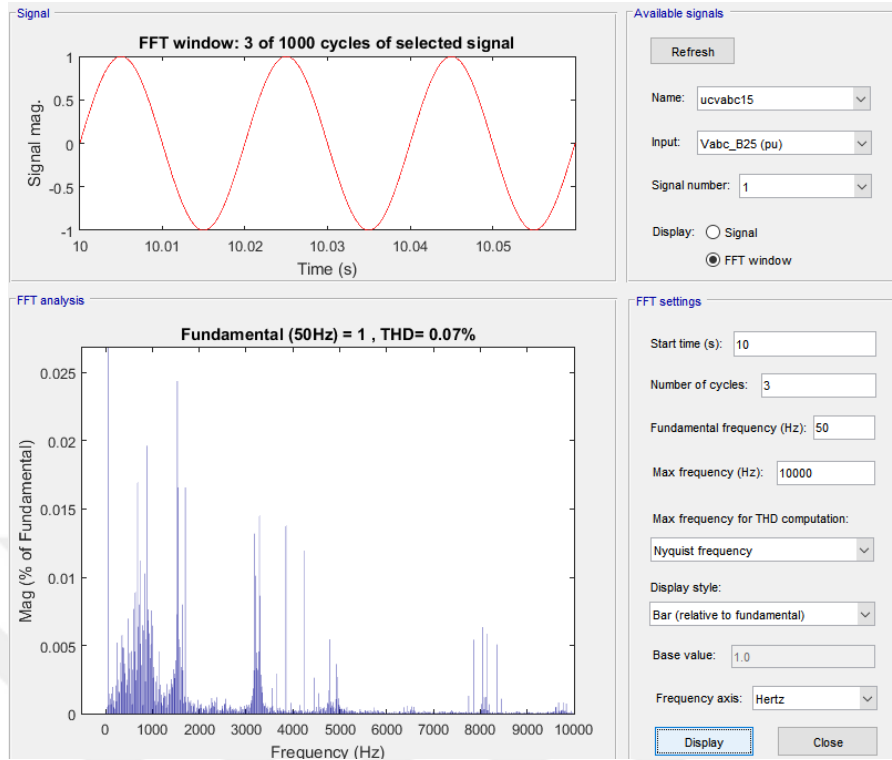


Şekil 6.14. Üç fazlı beş seviyeli dönüştürücü için çıkış gerilim analizi

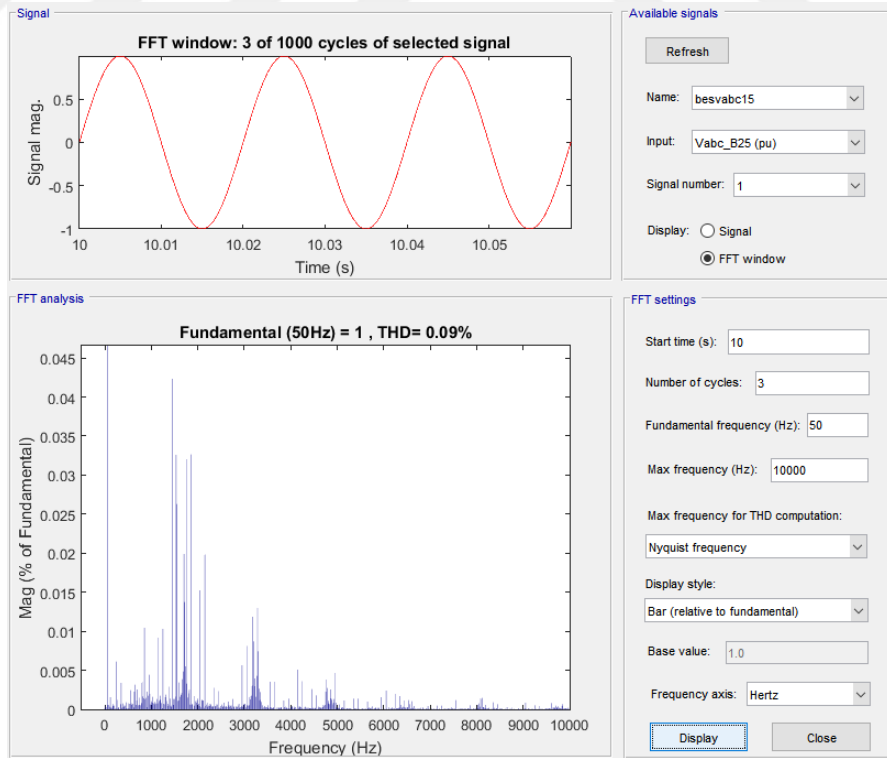
Dönüştürücülerin uygulandığı rüzgâr türbin sisteminin çıkış gerilim THD'leri Şekil 6.15, Şekil 6.16 ve Şekil 6.17'de verilmiştir. Matlab/Simulink ortamında sistem çıkış gerilim THD'si 10 sn anında, 3 periyot süresince; iki seviyeli dönüştürücü için %0,15, üç seviyeli dönüştürücü için %0,07 ve beş seviyeli dönüştürücü için %0,09 olarak ölçülmüştür. Sistemde kullanılan üç fazlı iki seviyeli, üç seviyeli ve beş seviyeli dönüştürücüler için çıkış gerilimini toplam harmonik bozulması IEEE 519-2014'e göre uygun değerlerdir.



Şekil 6.15. İki seviyeli dönüştürücü ile sistem çıkış gerilim THD'si



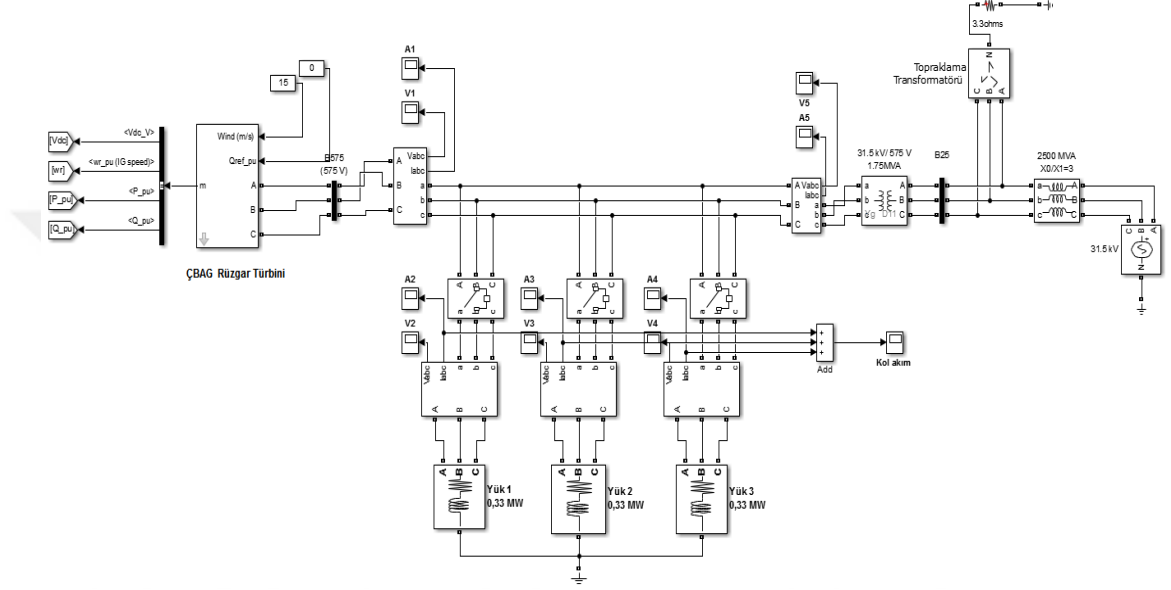
Şekil 6.16. Üç seviyeli dönüştürücü ile sistem çıkış gerilim THD'si



Şekil 6.17. Beş seviyeli dönüştürücü ile sistem çıkış gerilim THD'si

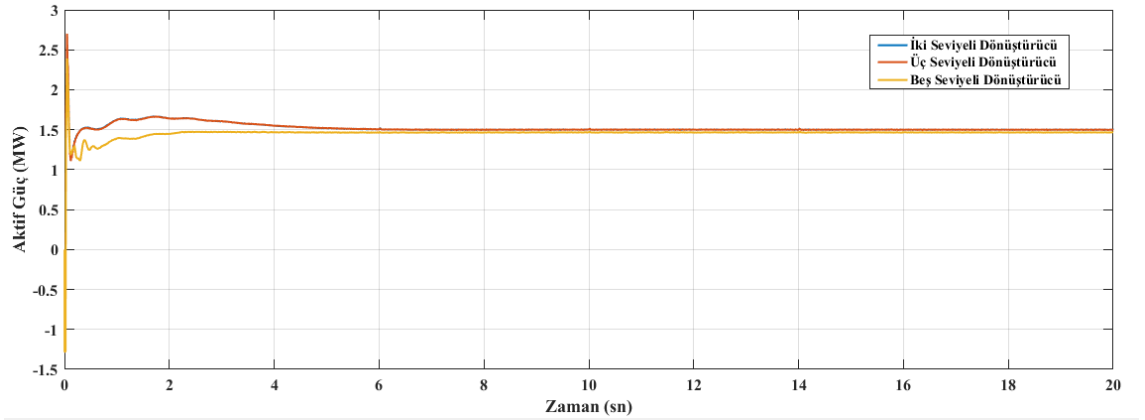
6.2. Yüklü Sistem Analizi

Benzetim çalışması yapılan 1,5 MW'lık rüzgâr türbin sistemine farklı zamanlarda devreye giren yükler bağlanmıştır. Sistemin çalışma frekansı 50 hz ve rüzgâr hızı 15 m/sn'dir. Şekil 6.18'de verilen rüzgâr türbin sistemine 6 sn, 10 sn ve 14 sn anında eşit büyüklükte olacak şekilde toplamda 1 MW yük devreye alınmıştır.

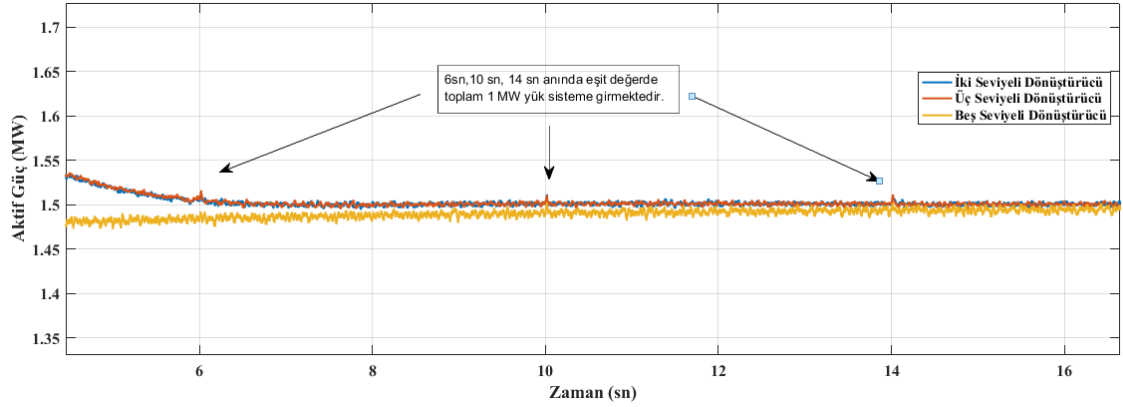


Şekil 6.18. ÇBAG tabanlı 1,5 MW'lık rüzgâr türbin sistemi yük bağlanmış modeli

Şekil 6.19'da devreye giren yükler sebebiyle kullanılan dönüştürücü tipine göre aktif güç analizi verilmiştir. Grafik incelendiğinde yüklerin devreye girdiği zaman anında, aktif güç kararlı olarak devam etmekte olduğu görülmüştür.



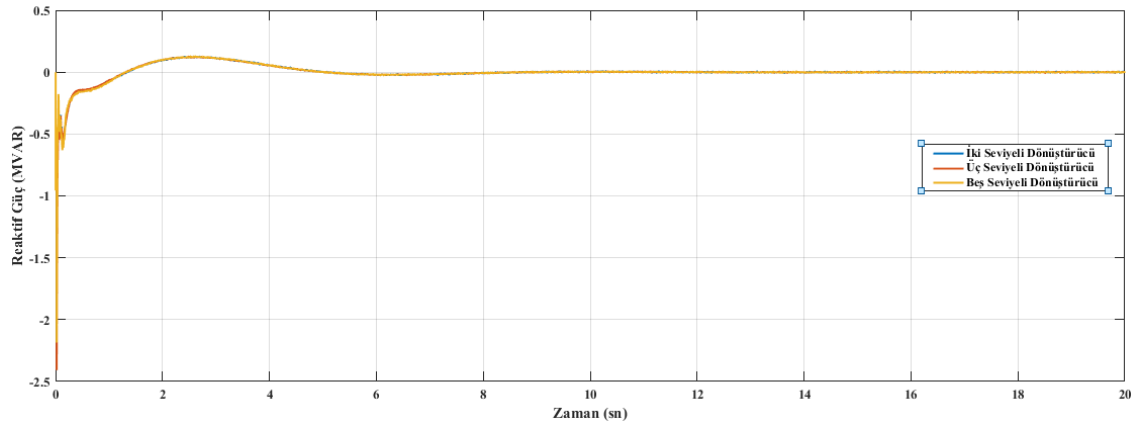
Şekil 6.19. Dönüştürücü tiplerine göre aktif güç analizi



Şekil 6. 20. Sistemin ürettiği aktif gücün yakınlaştırılmış durumu

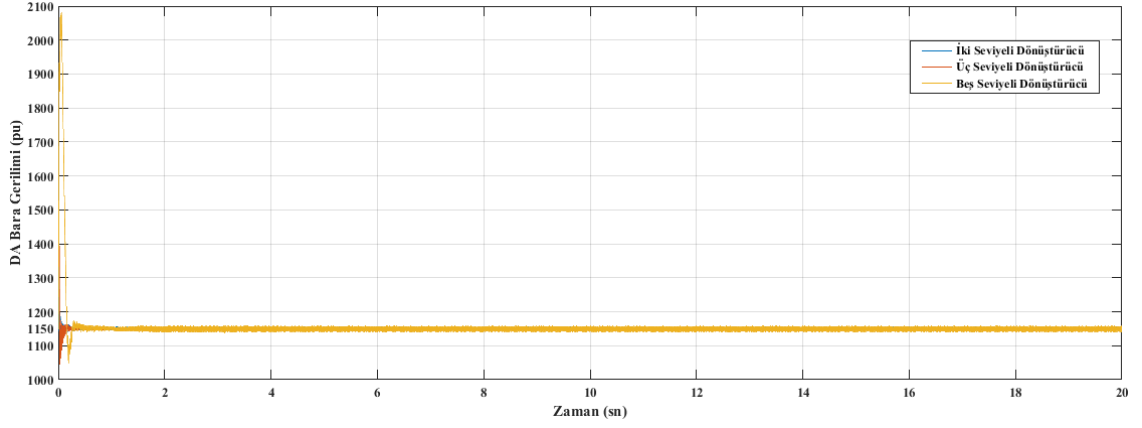
Dönüştürücü tiplerine göre sistemin ürettiği aktif güç grafiği yakın hali Şekil 6. 20’de gösterilmektedir. Buna sisteme dâhil olan yükler üretilen aktif güce anlık küçük etkiler yapmakta ancak kararlılığını bozmamaktadır.

Şekil 6.21’de yük bağlanan sistemin ürettiği reaktif güç analiz grafiği verilmiştir. Yüklerin devreye girmesi ile birlikte reaktif gücün kararlılığı değişmemektedir.



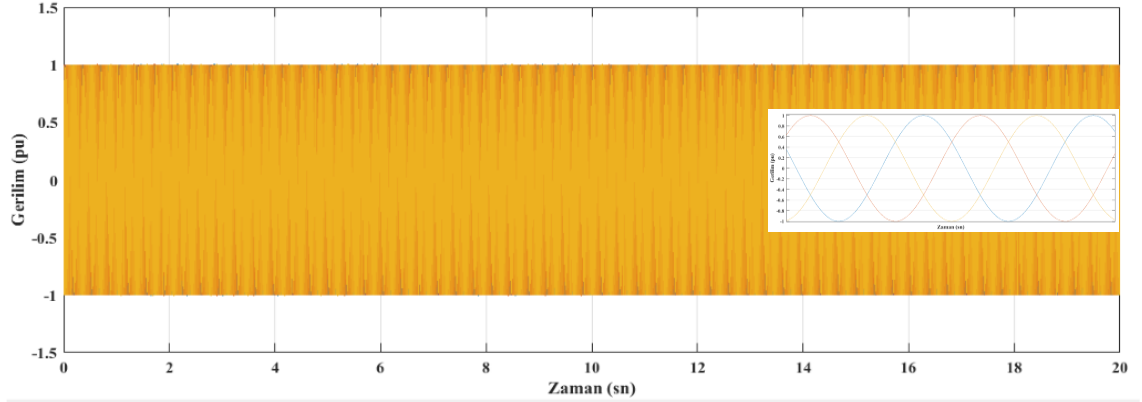
Şekil 6.21. Dönüştürücü tiplerine göre reaktif güç analizi

Şekil 6.22’de yük bağlanan sistemin DA bara gerilim grafiği verilmiştir. Sistem 1150 V DA bara geriliminde çalışmaktadır. Yüklerin devreye girmesiyle sistemin DA bara geriliminde herhangi bir bozulma meydana gelmemektedir.

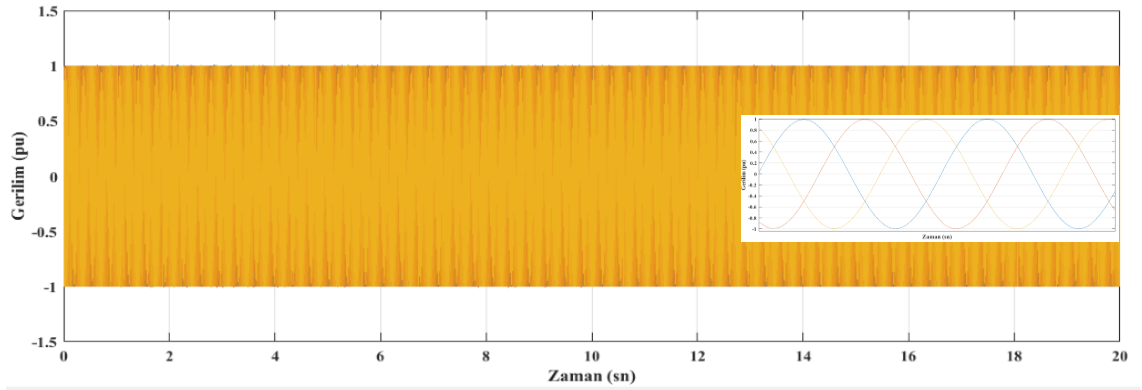


Şekil 6.22. Dönüştürücü tiplerine göre da bara gerilim analizi

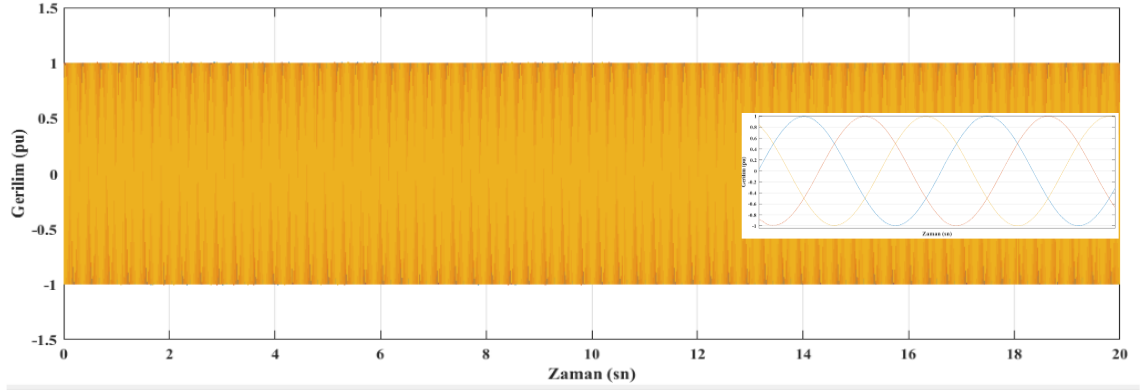
Şekil 6.23, Şekil 6.24 ve Şekil 6.25 'te yüklenen rüzgâr türbin sisteminin kullanılan dönüştürücü tiplerine göre çıkış gerilim analizleri verilmiştir. Her dönüştürücü tipinde yüklerin devreye girdiği zamanlarda sistemin çıkış geriliminde bir değişiklik olmadığı, sistemin kararlı çalışması devam ettiği gözlenmiştir.



Şekil 6.23. İki seviyeli dönüştürücü ile yüklü sistemin çıkış gerilimi



Şekil 6.24. Üç seviyeli dönüştürücü ile yüklü sistemin çıkış gerilimi



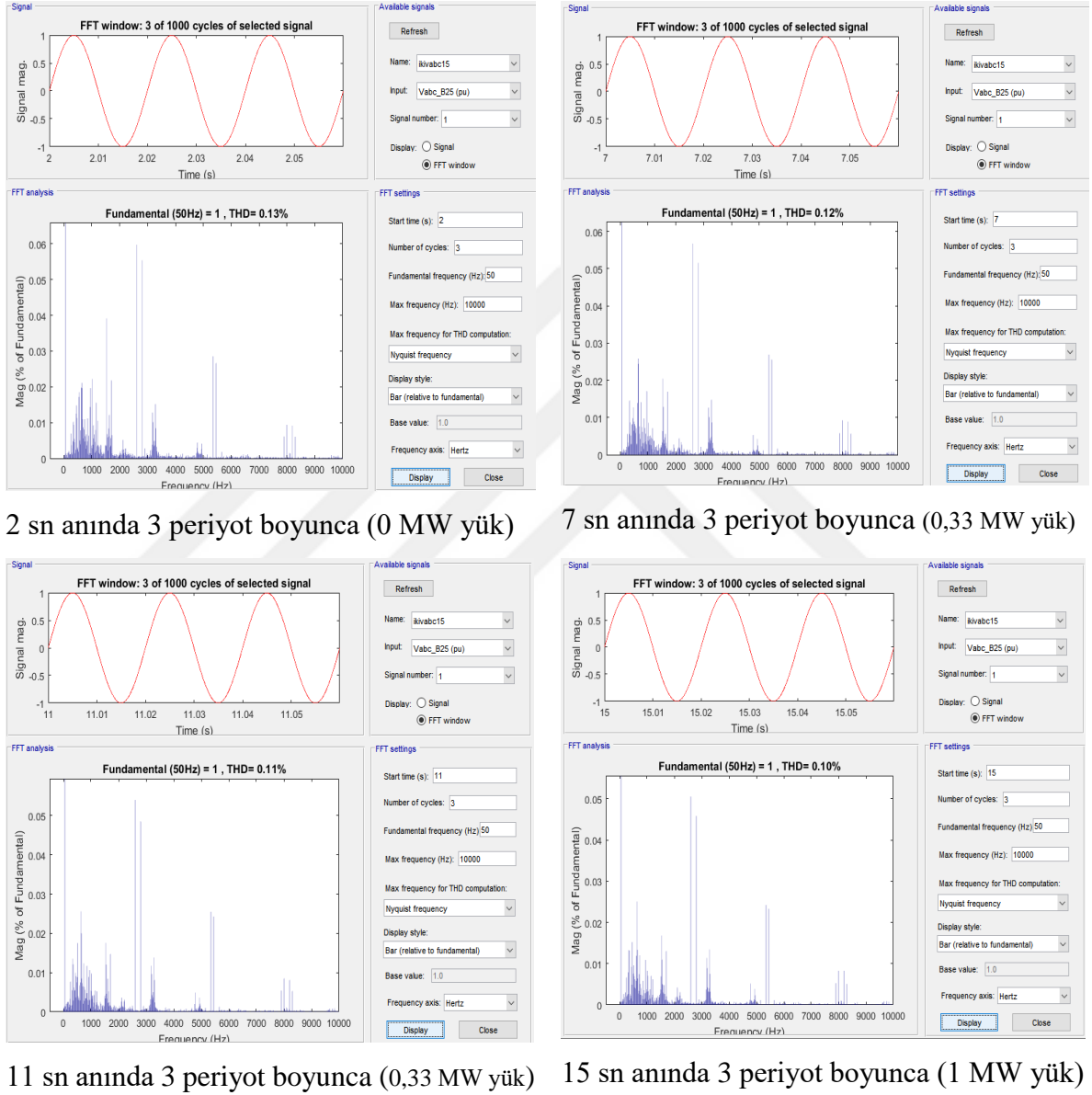
Şekil 6.25. Beş seviyeli dönüştürücü ile yüklü sistemin çıkış gerilimi

Benzetimi yapılan rüzgâr türbin sistemi 6 sn, 10 sn ve 14 sn anında eşit büyüklükte olmak üzere toplam 1 MW yük devreye girecek şekilde sistem tasarlanmıştır. Şekil 6.26, Şekil 6.27 ve Şekil 6.28’ de, kullanılan dönüştürücü tipine göre sistemin çıkış geriliminin THD’si Matlab/Simulink ortamında ölçülerek verilmiştir. Ölçümler farklı zamanlarda ve farklı yük durumlarında yapılmış ve özetle Tablo 6.1’de verilmiştir.

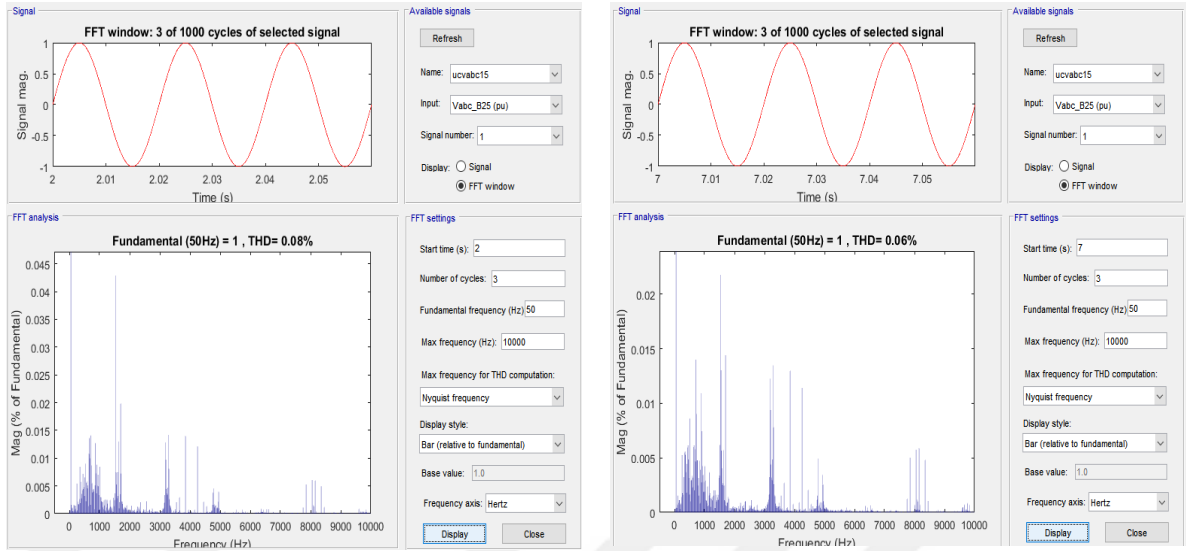
Tablo 6.1. Matlab/Simulink’te farklı zamanlarda ve yük durumlarında ölçülen değerler(U_{THD})

Dönüştürücü	Yük durumu	Ölçüm Zamanı (sn)	Periyot	Frekans (Hz)	THD
İki Seviyeli Dönüştürücü	0 MW	2	3	50	0,13%
	0,33 MW	7	3	50	0,12%
	0,67 MW	11	3	50	0,11%
	1 MW	15	3	50	0,10%
Üç Seviyeli Dönüştürücü	0 MW	2	3	50	0,08%
	0,33 MW	7	3	50	0,06%
	0,67 MW	11	3	50	0,05%
	1 MW	15	3	50	0,05%
Beş Seviyeli Dönüştürücü	0 MW	2	3	50	0,07%
	0,33 MW	7	3	50	0,06%
	0,67 MW	11	3	50	0,06%
	1 MW	15	3	50	0,06%

Tablo 6.1 incelendiğinde yüklerin devreye girmesiyle birlikte her üç dönüştürücü tipiyle yapılan çalışmada, çıkış gerilimi toplam harmonik bozulma oranının yükselmediği görülmüştür. Her bir yükün devreye girmesinden sonra 50 hz frekansta 2, 7, 11 ve 15. saniyelerde 3 periyot olacak şekilde ölçümler yapılmıştır.

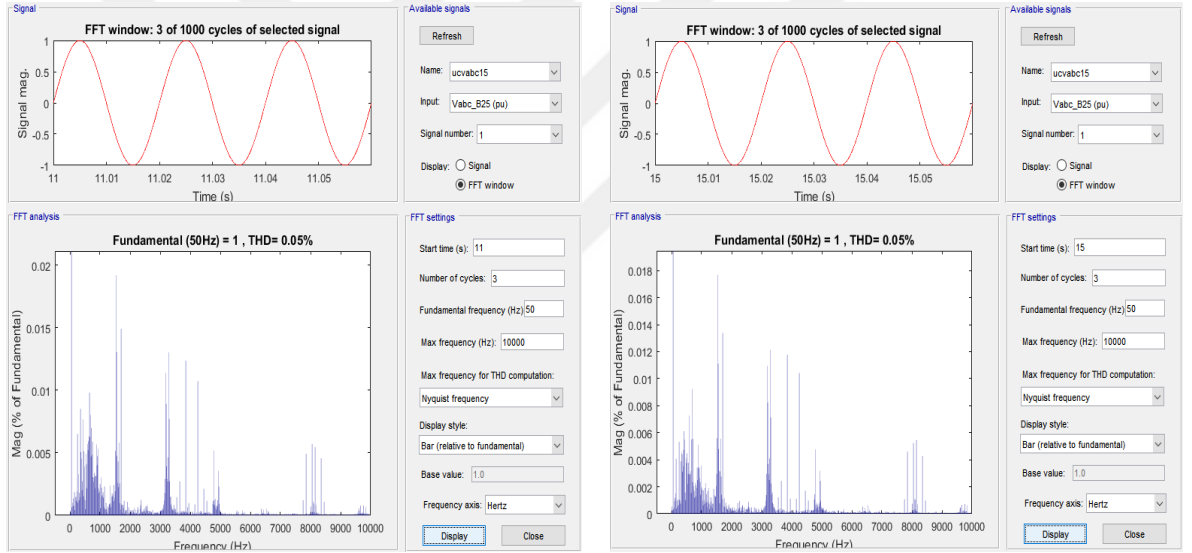


Şekil 6.26. İki seviyeli dönüştürücü ile sistem çıkış gerilim THD'si



2 sn anında 3 periyot boyunca (0 MW yük)

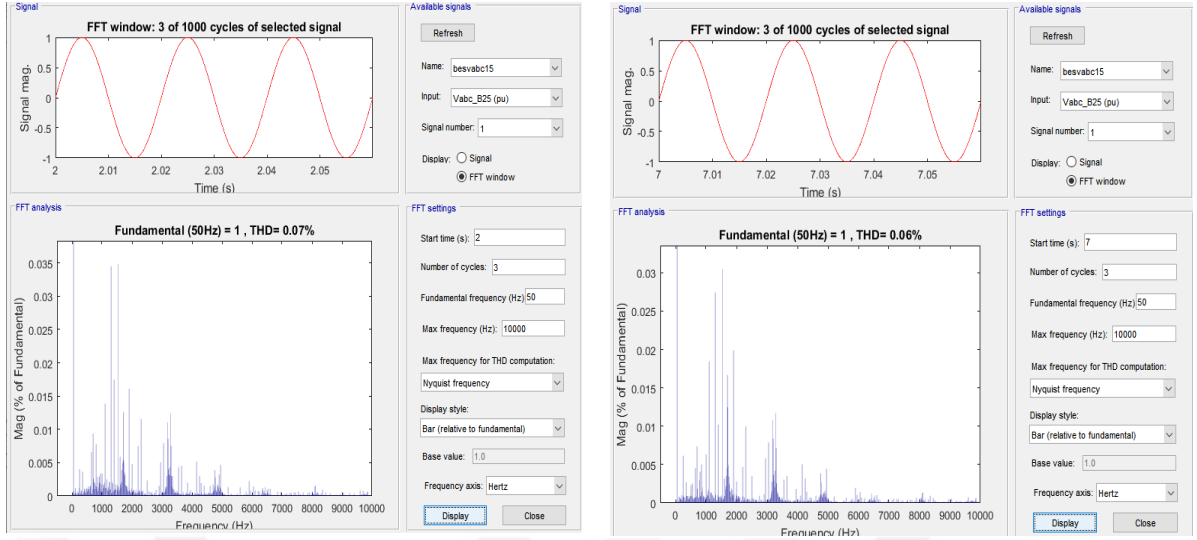
7 sn anında 3 periyot boyunca (0,33 MW yük)



11 sn anında 3 periyot boyunca (0,33 MW yük)

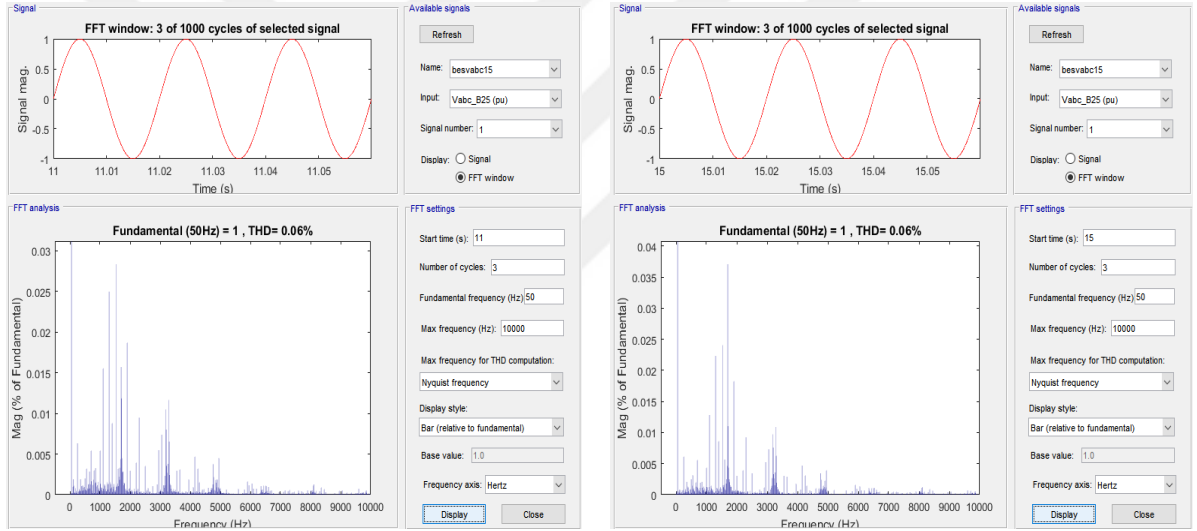
15 sn anında 3 periyot boyunca (1 MW yük)

Şekil 6.27. Üç seviyeli dönüştürü ile sistem çıkış gerilim THD'si



2 sn anında 3 periyot boyunca (0 MW yük)

7 sn anında 3 periyot boyunca (0,33 MW yük)

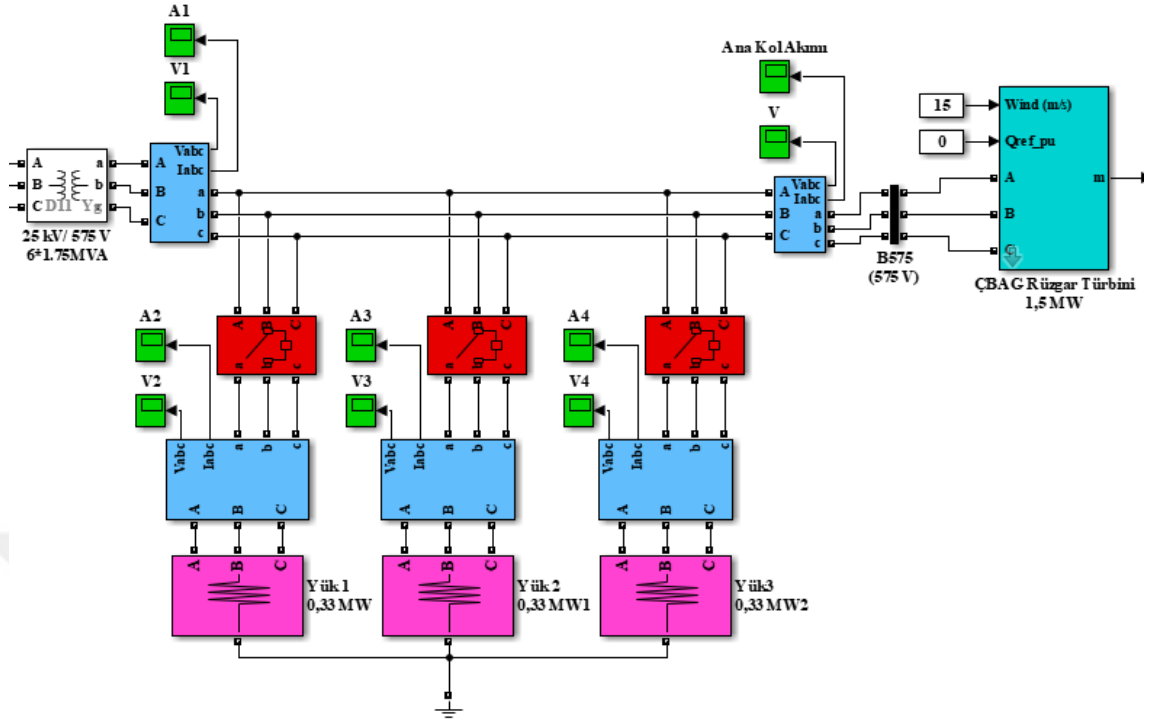


11 sn anında 3 periyot boyunca (0,33 MW yük)

15 sn anında 3 periyot boyunca (1 MW yük)

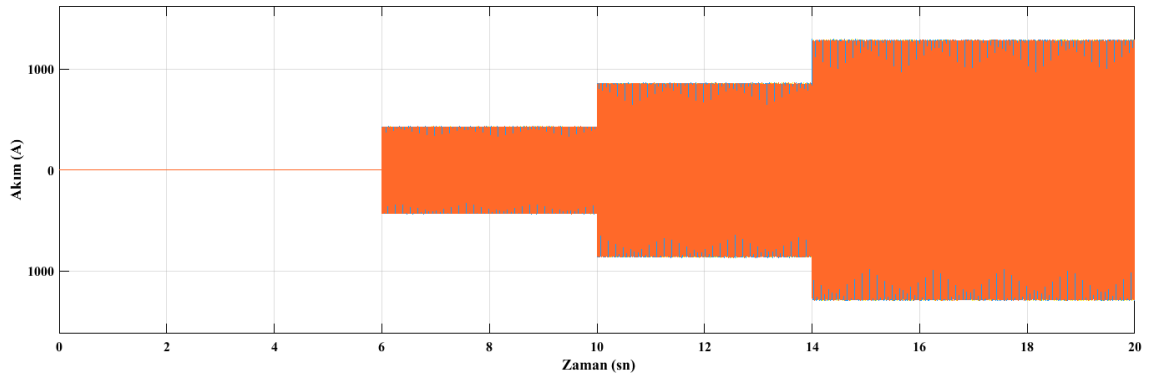
Şekil 6.28. Beş seviyeli dönüştürücü ile sistem çıkış gerilim THD'si

Benzetimi yapılan rüzgâr türbin sistemine yüklerin bağlantı şeması Şekil 6.29'de verilmiştir. 6 sn anında “Yük1”, 10 sn anında “Yük2” ve 14 sn anında “Yük3” devreye girmektedir. Yük 1'den geçen akım A2, Yük 2'den geçen akım A3 ve Yük 3'ten geçen akım A4'tür. Transformör üzerinden geçen akım ise A1'dir.



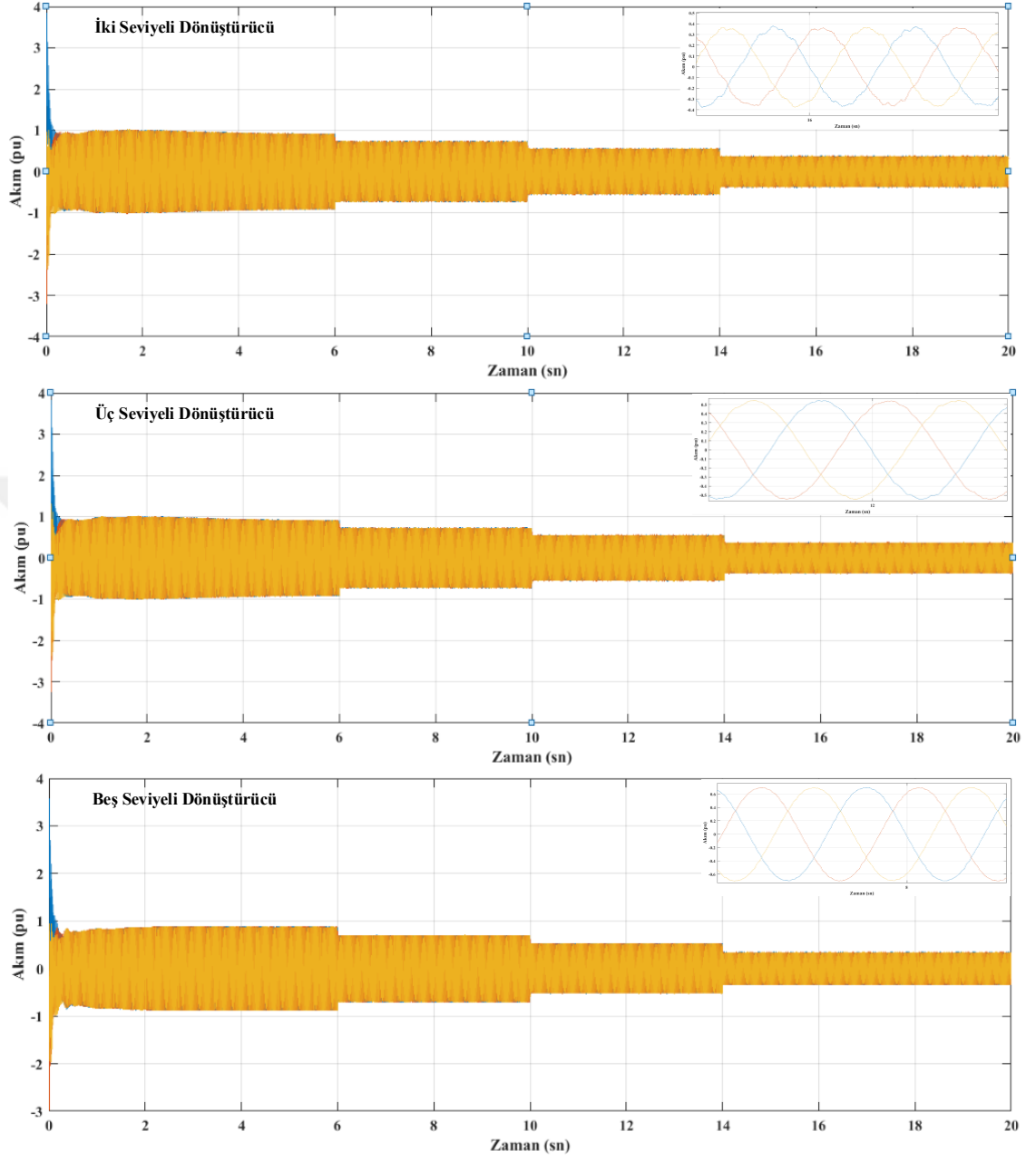
Şekil 6.29. Rüzgar türbin sistemi yük bağlantı şeması

6 sn anında, 10 sn anında ve 14 sn anında yüklerin devreye girmesiyle transformatörün üzerinden geçen akım (A1) azalmakta, yüklerin üzerinden ise akım geçmeye başlamaktadır. Yükler üzerinden geçen akımların toplamı (A2+A3+A4) Şekil 6.30'da gösterilmiştir.



Şekil 6.30. Yüklenen sistemde beş seviyeli dönüştürücü için yüklerin üzerinden geçen akımların toplamı

Örnek olarak beş seviyeli dönüştürücü için uygulanan sistemin transformatör üzerindeki akım (A1) grafiği Şekil 6.31'de verilmiştir.



Şekil 6. 31. Dönüştürücüler için transformatör üzerinden geçen akım

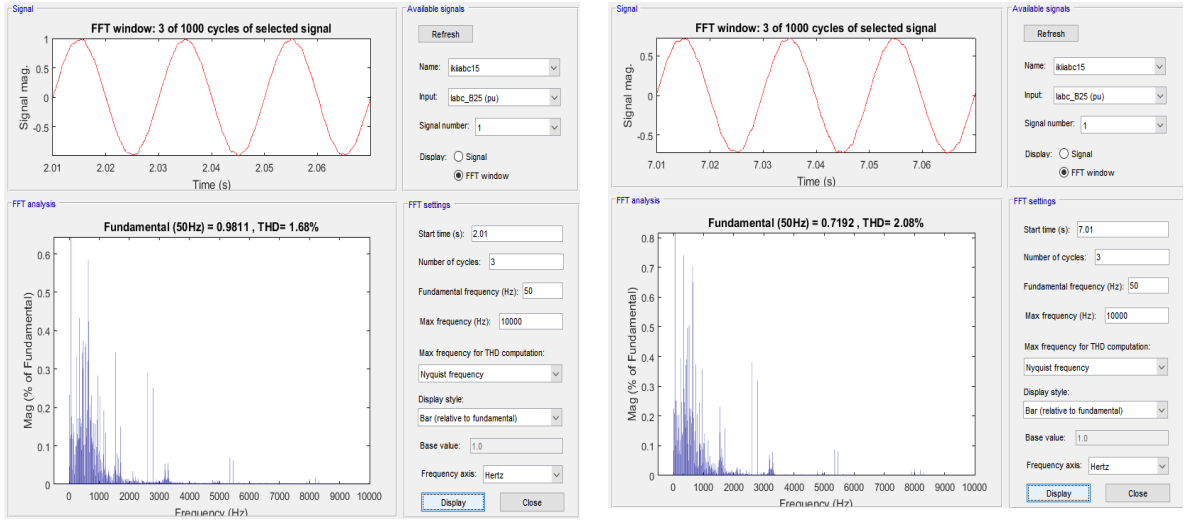
Şekil 6. 31’da görüleceği üzere, 6 sn, 10 sn ve 14 sn anında eşit büyüklükteki yüklerin devreye girmesiyle transformatörden geçen akım yükler üzerine dağıldığından azalmaktadır. Bu çalışmada iki, üç ve beş seviyeli dönüştürücüler ile tasarlanan rüzgâr türbin sisteminin farklı zaman dilimlerinde ve farklı yükler altında çalışması incelenmiştir.

Yük bağlanan rüzgâr türbin santralının iki seviyeli, üç seviyeli ve beş seviyeli dönüştürücü ile benzetimi yapılmış, kullanılan dönüştürücü tipine göre farklı zaman ve yük durumlarına göre oluşan THD değerleri Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2. Farklı zamanlarda ve yük durumlarında A1 akım THD’leri

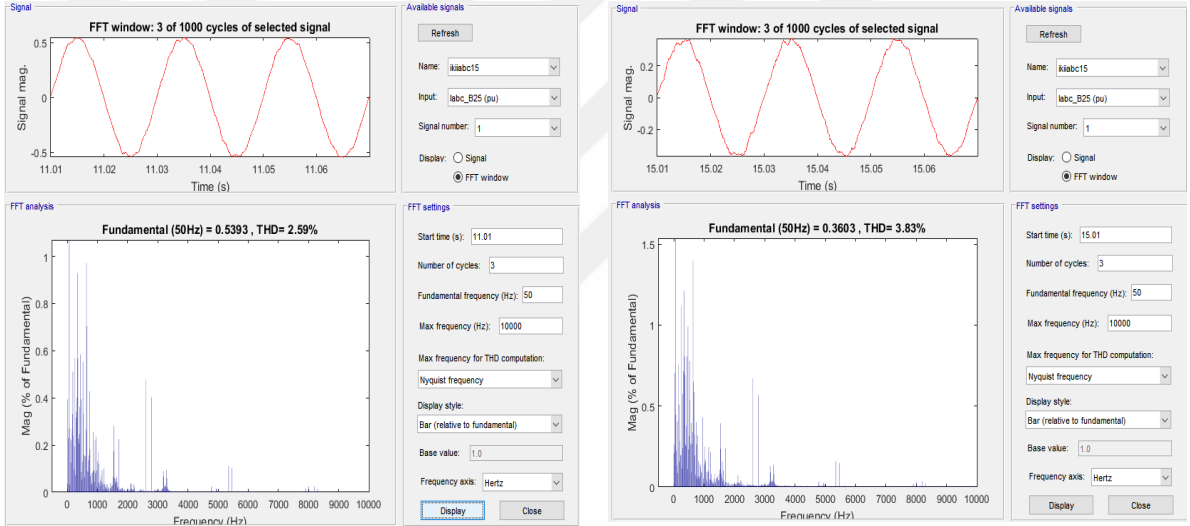
Dönüştürücü	Yük durumu	Ölçüm Zamanı (sn)	Periyot	Frekans (Hz)	THD
İki Seviyeli Dönüştürücü	0 MW	2	3	50	1,68%
	0,33 MW	7	3	50	2,08%
	0,67 MW	11	3	50	2,59%
	1 MW	15	3	50	3,83%
Üç Seviyeli Dönüştürücü	0 MW	2	3	50	1,12%
	0,33 MW	7	3	50	1,28%
	0,67 MW	11	3	50	1,55%
	1 MW	15	3	50	2,49%
Beş Seviyeli Dönüştürücü	0 MW	2	3	50	0,78%
	0,33 MW	7	3	50	0,94%
	0,67 MW	11	3	50	1,29%
	1 MW	15	1	50	1,84%

Tablo 6.2 incelendiğinde yüklü sistemin transformatör üzerinden geçen akım THD oranları en iyi beş seviyeli dönüştürücü ile yapılan benzetim sonucunda çıkmıştır. Matlab/Simulink programı kullanarak A1 akımına ait THD görselleri iki seviyeli dönüştürücü için Şekil 6.32, üç seviyeli dönüştürücü için Şekil 6.33 ve beş seviyeli dönüştürücü için Şekil 6.34’te verilmiştir.



2 sn anında 3 periyot boyunca (0 MW yük)

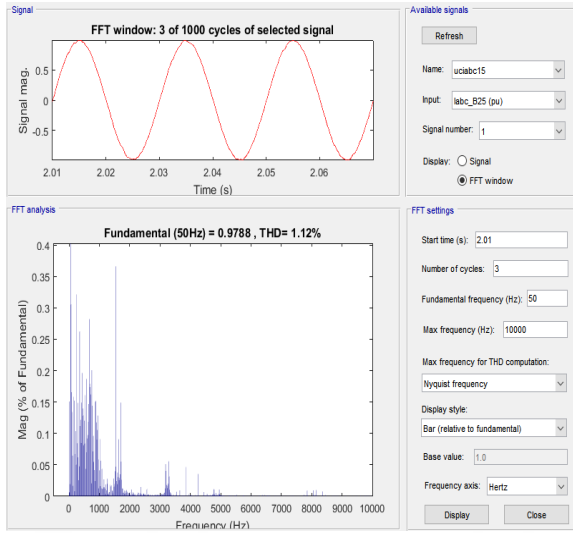
7 sn anında 3 periyot boyunca (0,33 MW yük)



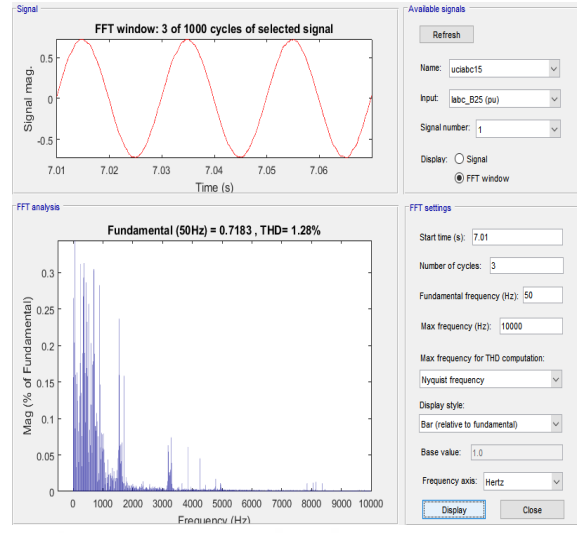
11 sn anında 3 periyot boyunca (0,33 MW yük)

15 sn anında 3 periyot boyunca (1 MW yük)

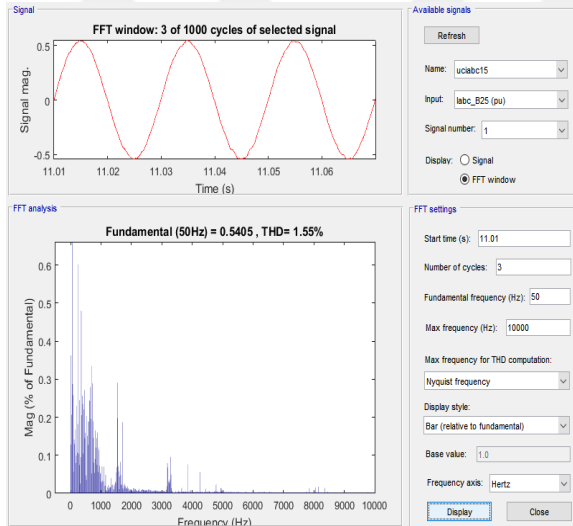
Şekil 6.32. İki seviyeli dönüştürücü için A1 kol akımının THD oranları



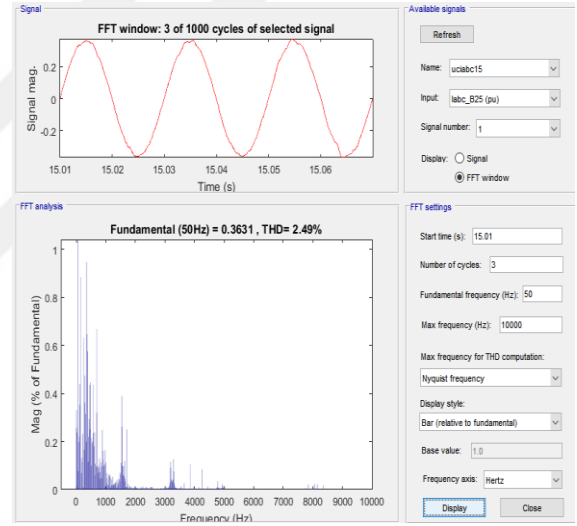
2 sn anında 3 periyot boyunca (0 MW yük)



7 sn anında 3 periyot boyunca (0,33 MW yük)

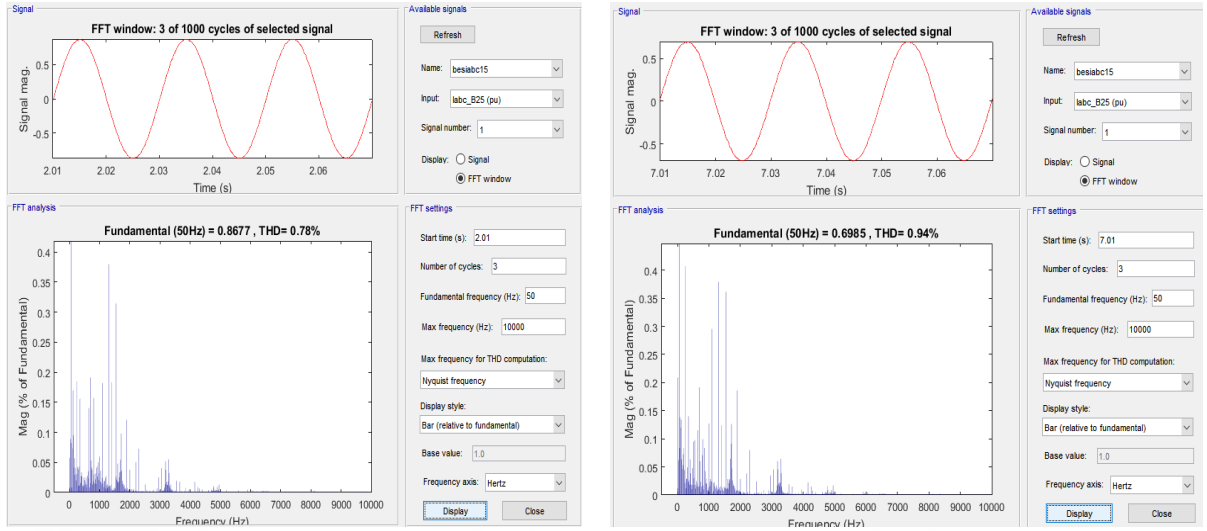


11 sn anında 3 periyot boyunca (0,33 MW yük)



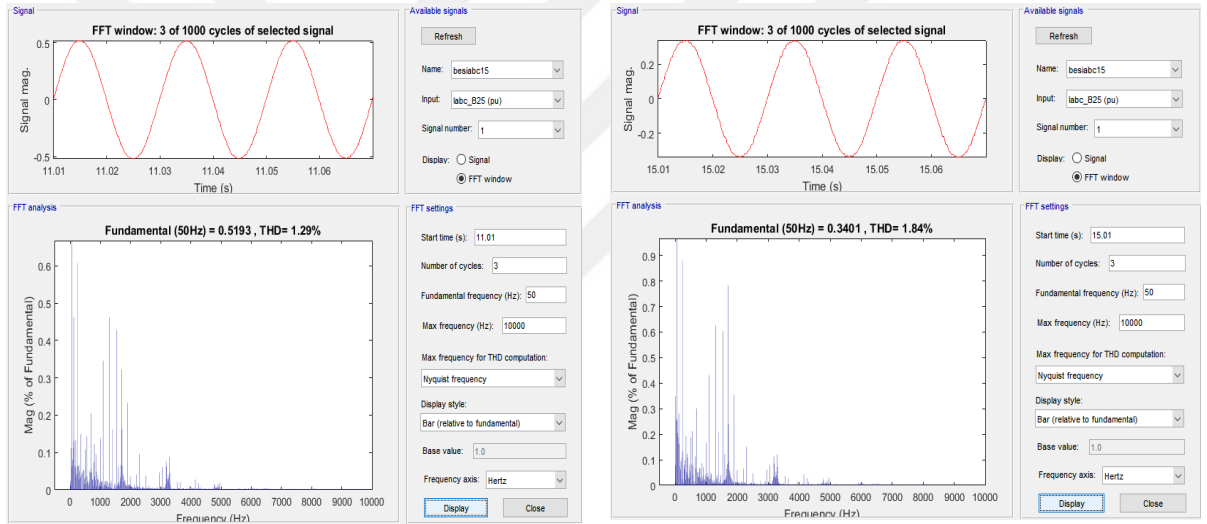
15 sn anında 3 periyot boyunca (1 MW yük)

Şekil 6.33. Üç seviyeli dönüştürücü için A1 kol akımının THD oranları



2 sn anında 3 periyot boyunca (0 MW yük)

7 sn anında 3 periyot boyunca (0,33 MW yük)



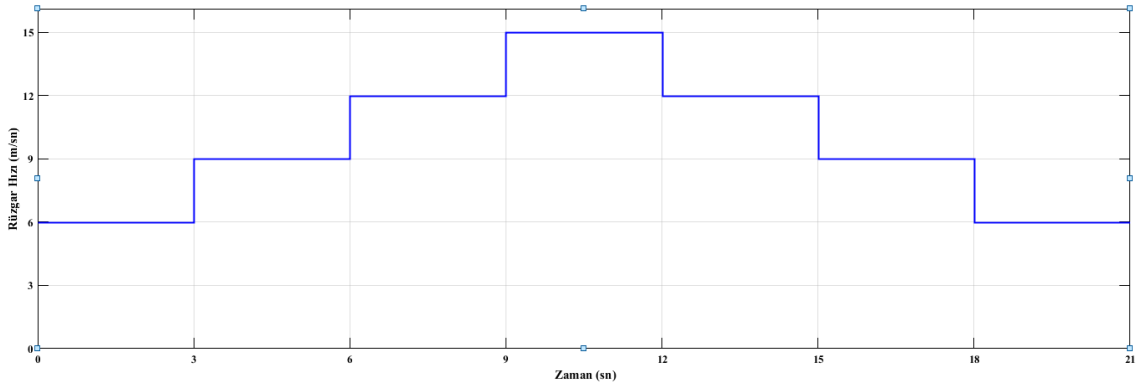
11 sn anında 3 periyot boyunca (0,33 MW yük)

15 sn anında 3 periyot boyunca (1 MW yük)

Şekil 6.34. Beş seviyeli dönüştürücü için A1 kol akımının THD oranları

6.3 Farklı Rüzgâr Hızlarına Göre Sistem Analizi

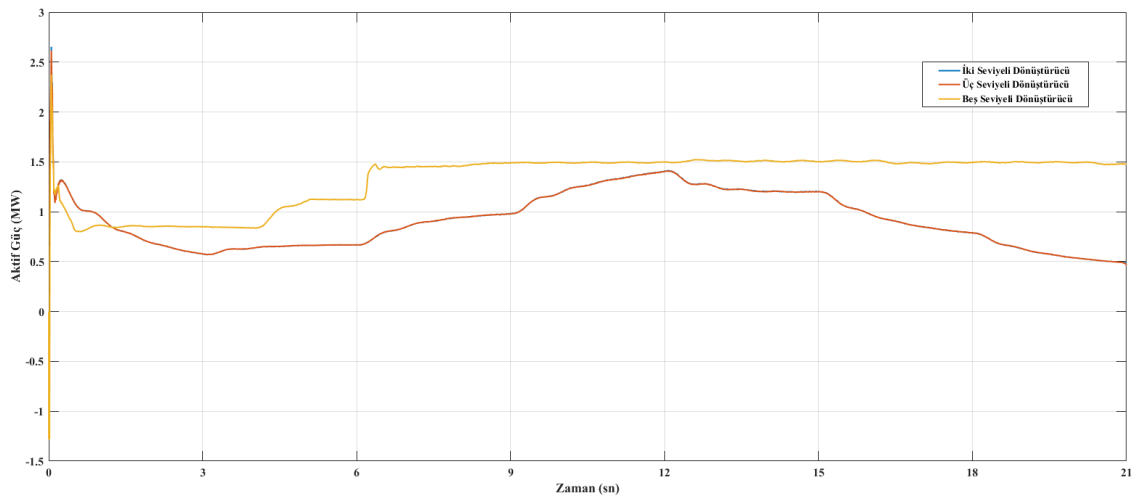
Çift beslemeli asenkron generatör, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında tasarlanan sistemde sabit olan rüzgâr hızını belirli periyotlarla değiştirerek sistemin ürettiği aktif güç, reaktif güç ve çıkış akım ve gerilim değerleri karşılaştırılmıştır. Sistem 21 saniye çalıştırılmış, rüzgâr hızının zamana göre değişim grafiği Şekil 6. 35'de verilmiştir.



Şekil 6. 35. Zamana göre rüzgâr hızının değişimi

Grafikte görüleceği üzere; 0-3 sn aralığında rüzgâr hızı 6 m/sn, 3-6 sn aralığında 9 m/sn, 6-9 sn aralığında 12 m/sn, 9-12 sn aralığında 15 m/sn, 12-15 sn aralıklarında 12 m/sn, 15-18 sn aralığında 9 ve 18-21 sn aralığında 6 m/sn'dir.

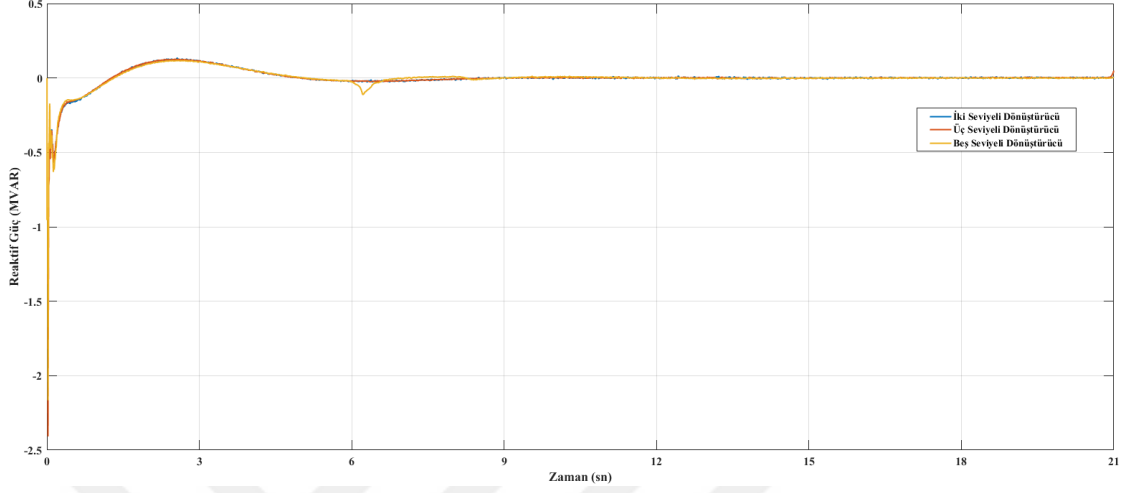
Rüzgâr hızının değişimi ile sistemin ürettiği aktif güç değişimleri, sistemde kullanılan iki seviyeli, üç seviyeli ve beş seviyeli dönüştürücülere göre karşılaştırılması Şekil 6. 36'de verilmiştir. Buna göre rüzgâr hızının arttığı 3, 6 ve 9. saniyelerde, 1,5 MW'lık rüzgâr türbinin ürettiği aktif güç zamana bağlı olarak artmaktadır. Rüzgâr hızının 12. saniyeden sonra kademeli olarak düşmesine rağmen beş seviyeli dönüştürücü ile tasarlanan sistem için aktif güç bu süreçte daha kararlı kalmaktadır.



Şekil 6. 36. Rüzgâr hızı değişimlerine göre aktif güç

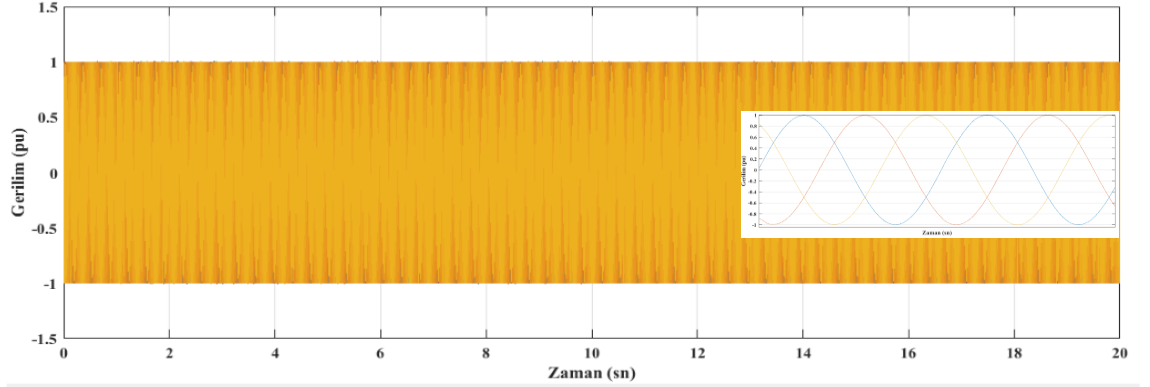
Şekil 6. 37'da kullanılan dönüştürücü tiplerine göre reaktif güç grafiği verilmiştir. Reaktif gücün aktif güce oranla, rüzgâr hızından daha az etkilendiği gözlenmiştir. Başlangıçta

salınım yapan reaktif güç, sistemin çalışma zamanı ilerledikçe istenilen değer olan sıfıra gitmektedir.

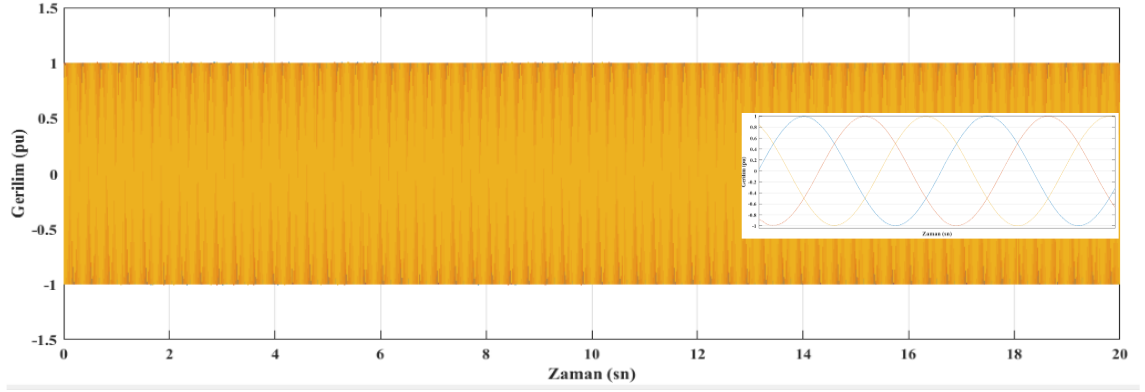


Şekil 6. 37. Rüzgâr hızı değişimlerine göre reaktif güç

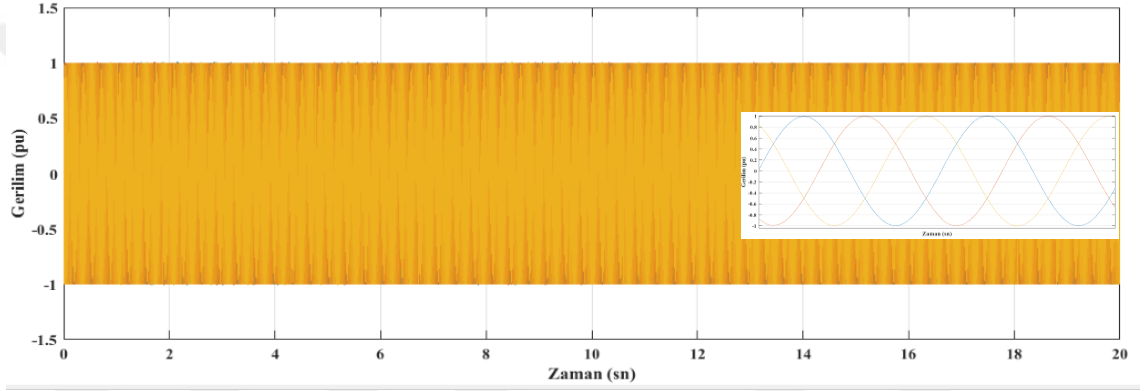
Şekil 6. 38, Şekil 6. 39 ve Şekil 6. 40 ‘da farklı rüzgâr hızları etkisinde kalan rüzgâr türbininin; iki, üç ve beş seviyeli dönüştürücüler ile tasarlanan sistem için çıkış gerilimleri (pu) cinsinden gösterilmektedir. Rüzgâr hızı değişmesinin sistemin çıkış gerilimi üzerinde bir etkisi olmadığı görülmüştür.



Şekil 6. 38. İki seviyeli dönüştürücü için çıkış gerilimi (pu)

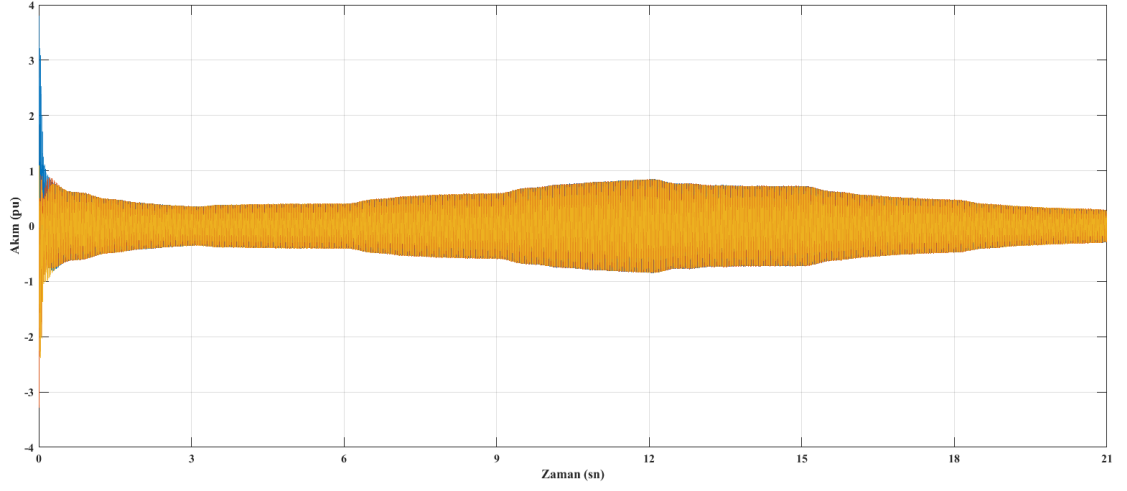


Şekil 6. 39. Üç seviyeli dönüştürücü için çıkış gerilimi (pu)

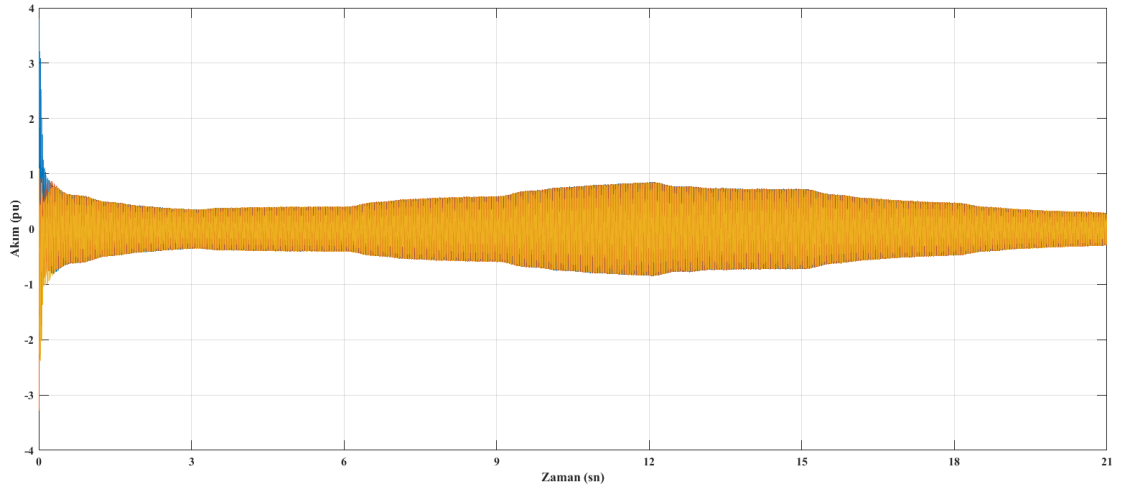


Şekil 6. 40. Beş seviyeli dönüştürücü için çıkış gerilimi (pu)

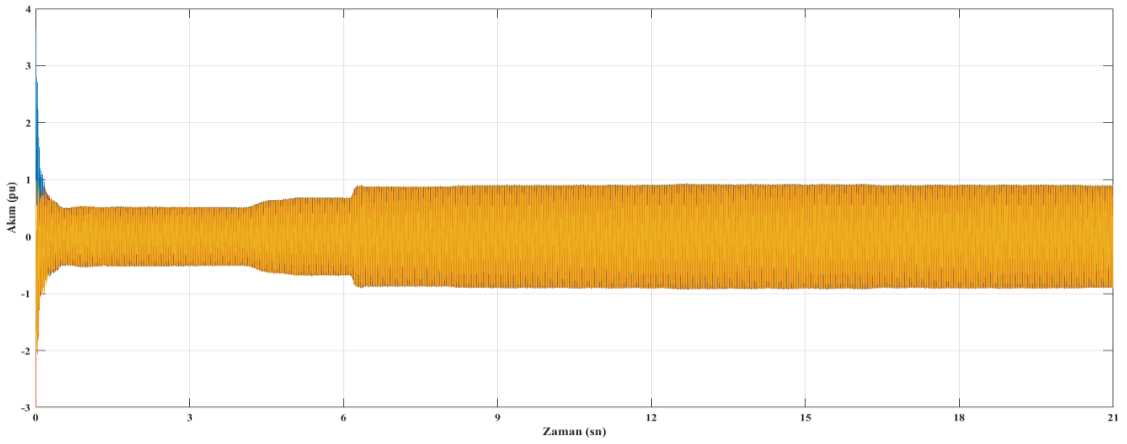
Şekil 6. 41, Şekil 6. 42 ve Şekil 6. 43'de farklı rüzgâr hızları etkisinde kalan rüzgâr türbininin; iki, üç ve beş seviyeli dönüştürücüler ile tasarlanan sistem için çıkış akımları (pu) cinsinden gösterilmektedir. Grafikler incelendiğinde rüzgâr hızının artmasıyla çıkış akımının arttığı görülmektedir. Rüzgâr hızının azalmasıyla ise iki ve üç seviyeli dönüştürücü ile tasarlanan sistemde akımların azaldığı, beş seviyeli dönüştürücüler için ise sistemin daha kararlı kaldığı görülmektedir.



Şekil 6. 41. İki seviyeli dönüştürücü için çıkış akımı (pu)



Şekil 6. 42. Üç seviyeli dönüştürücü için çıkış akımı (pu)



Şekil 6. 43. Beş seviyeli dönüştürücü için çıkış akımı (pu)

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Matlab/simulink'de 1 adet 1,5 MW gücünde 31,5 kV'luk şebekeye güç üreten rüzgâr türbin sistemi ve bu sistem içerisinde şebeke ve rotor yönlerinde iki adet dönüştürücünün benzetimi yapılmıştır. Sistemin çalışma frekansı 50 Hz'dir. Dönüştürücüleri birbirine bağlayan ve ayrı ayrı kontrol edilmesine imkân tanıyan DA bara gerilimi 1150 V'tur.

Çift beslemeli asenkron generatör tabanlı rüzgâr türbinlerine uygulanan dönüştürücü için anahtarlama sinyalleri darbe genişlik modülasyon tekniği ile kullanılarak üç fazlı iki seviyeli, üç fazlı üç seviyeli ve üç fazlı beş seviyeli dönüştürücünün kontrolü sağlanmıştır.

Benzetimi yapılan rüzgâr türbin sistemi ilk önce yüksüz olarak çalıştırılmış, sisteme dâhil ettiğimiz iki seviyeli, üç seviyeli ve beş seviyeli dönüştürücü için sistemin ürettiği aktif güç, reaktif güç, çıkış gerilimi, çıkış akımı, DA bara gerilimi değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, benzetimi yapılan dönüştürücü tipleri ile alınan sonuçların uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca sistemin çıkış gerilimi ve akımın toplam harmonik bozulma değerleri Matlab/Simulink programı kullanılarak ölçülmüştür. Toplam harmonik bozulma oranları Uluslararası (IEEE 519-2014)'ye göre akım için %5 ve gerilim için %8 olduğundan, yapılan çalışma uluslararası standartları sağlamıştır.

Bu tez çalışmasında ayrıca rüzgâr türbin santraline farklı zamanlarda devreye girecek şekilde yükler bağlanmış ve iki seviyeli, üç seviyeli ve beş seviyeli dönüştürücü için sistemin ürettiği aktif güç, reaktif güç, çıkış gerilimi, çıkış akımı, DA bara gerilimi değerleri karşılaştırılmıştır. Yük bağlanan sistem sonuçlarında da elde edilen grafikler incelendiğinde, aktif gücün 1,5 MW olduğu, reaktif gücün sıfıra doğru gittiği, sistemin çalışma DA bara geriliminin 1148-1152 V aralığında olduğu görülmüş ve elde edilen sonuçlarda başarı sağlanmıştır. Ayrıca yine sistemin çıkış gerilimi ve akımın toplam harmonik bozulma değerleri Matlab/Simulink programı kullanılarak ölçülmüştür. Toplam harmonik bozulma oranları Uluslararası (IEEE 519-2014)'ye göre akım için %5 ve gerilim için %8 olduğundan, yapılan çalışma uluslararası standartları sağlamıştır. Üç fazlı beş seviyeli dönüştürücü ile yapılan yüklü sistemde transformatör üzerinden geçen akım THD'leri en iyi sonuçları vermiştir.

Çalışmalara ek olarak sistemin farklı rüzgâr hızlarında ürettiği aktif güç, reaktif güç ve çıkış gerilim ve akım değerleri karşılaştırması yapılmıştır. Çıkış gerilimleri her üç dönüştürücü tipinde kararlı olduğu gözlenmiştir. Çıkış akımlarında ise beş seviyeli dönüştürücü ile tasarlanan sistemde rüzgâr hızının artmasıyla akımın arttığı ve diğer dönüştürücü tiplerine göre daha kararlı olduğu ortaya çıkmıştır.



KAYNAKLAR

1. Simsek, V., “Rüzgar Enerjisi Ve Sivas Şartlarında Bir Rüzgar Santrali Tasarımı”, *Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.5-9, Sivas, 2007.
2. Köse, R., Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi, *3 e Dergisi Temmuz 1998* sayısı, s. 68-72, 1998.
3. Boyar, A., “Güneş Panelleri İçin Mikro Evirici Tasarımı Ve Analizi”, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.4-10, Nevşehir, 2018.
4. İnternet: BP “BP Statistical Review of World Energy 2017”
https://www.researchgate.net/figure/Trends-in-worldwide-energy-consumption-from-1965-to-2035-Source-https-wwwogjcom_fig1_325926433.
Erişim tarihi: 01.03.2022
5. İnternet: “Dünya Ve Türkiye Enerji Ve Tabii Kaynaklar Görünümü” Sayı 15:
https://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FEnerji%20ve%20Tabii%20Kaynaklar%20G%C3%B6r%C3%BCn%C3%BCm%C3%BC%2FSayı_15.pdf. Erişim tarihi: 12.02.2022
6. Nabae A., Takashi, I. And Akagi H., “A new neutral-point clamped PWM inverter”, *IEEE Transactions on Ind. Applications*, 17(5): 518-523 (1981).
7. Tuncer, S., "Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu Kullanan Beş Seviyeli İnverter Tasarımı ve Uygulaması", *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, s.10-38, Elazığ, 2004.
8. Kabalci E. “Çok Seviyeli İnvertörler İçin Yeni Bir SDGM Tekniğinin Geliştirilmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi*, s. 188, Ankara, 2010.

9. Deniz, E., “Beş seviyeli İnverterlerin SDGM ile Kontrolü”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.119 , Elazığ, 2005.
10. Kocalmış,A.,"Uzay Vektör Pwm Kontrollü Çok Seviyeli İnverterin modellenmesi ve benzetimi"*Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Yüksek Lisans Tezi* s.97,Elazığ, 2005.
11. Yavuz, I., “Rüzgâr Türbini Dönüştürücülerinin Esnek Hesaplama Yöntemi İle Denetimi”, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.133, Nevşehir, 2021.
12. Guven, F. Y., Sungur, H.,Turemis, H., "Güneş Paneli Ve Rüzgar Türbininin Matlab Simülink Modellenmesi Ve Simülasyonu" *ICoSReSSE Konferans*,Antalya, 2018.
13. Md Rabiul Islam, Youguang Guo, and Jianguo Zhu “Power converters for wind turbines: Current and future development” *Formatex*, s.559-571,2013.
14. Yuksek, H., I., “Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu Yöntemi İle Üç Faz Üç Seviyeli Doğrultucunun Matlab/Simulink Ortamında Modellenmesi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.120, Sakarya, 2019..
15. Goktas,T., Murat,E., Sunter,S. "DSC Tabanlı Uzay Vektör Darbe Modülasyon Tekniğini Kullanan Kompakt Asenkron Motor Sürücüsünün Geliştirilmesi," *Elektrik-Elektronik, Bilgisayar Sempozyumu* , Elazığ, Turkey, 2011.
16. Çolak Ğ. And Kabalcı E., “Çok seviyeli eviricilerin kontrol yöntemleri”, *TÜBAV Bilim Dergisi*, 1(2): 45-54 (2009).».
17. Gencer A., "Analysis and Control of Fault Ride-Through Capability Improvement for Wind Turbine Based on a Permanent Magnet Synchronous Generator Using an Interval Type-2 Fuzzy Logic System". *Energies*. 2019; 12(12):2289.

18. Celikdemir, S., “Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgar Santrali”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 115, Elazığ,2014..
19. Ting,N.,S.,“Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörün Back-To-Back Dönüştürücü ile Hız Kontrolü" *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, 2013.
20. Dursun, M. ve Döşoğlu ,M.K., "Üç Fazlı Gerilim Kaynaklı Evirici için SDGM, ÜHDGM ve HDGM Tekniklerinin MATLAB/SİMULİNK ile Karşılaştırmalı Analizi", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 6, sayı. 4, s. 983-999, 2018.
21. Kukrer F., Tasaltin R, “Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Meydana Getirdiği Kayıpların Analizi”, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 5, s.21-38, 2016.
22. https://www.emo.org.tr/ekler/af99dbdeeac089e_ek.pdf?tipi=41&turu=X&sube=0.
23. <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/turkiyenin-ruzgar-enerjisi-kurulu-gucu-10-bin-500-megavati-asti/2440570#:~:text=T%C3%BCrkiye%20R%C3%BCzgar%20Enerjisi%20Birlirli%C4%9Fi%20Ba%C5%9Fkan%C4%B1>. [Çevrimiçi].
24. Dosoglu,M. K., “Rüzgar Santralinde Gerilim Ve Güç Kontrolünün Facts Cihazları İle İncelenmesi”, *Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.113, Düzce, 2010.
25. Elibüyük, U. ve Üçgül, İ., “Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri”, *Yekarum e-Dergi*, 2(3),2014.

26. Akdogan, S. , “Değişken Hızlı Değişken Kanat Açılı Bir Rüzgâr Türbininin Modellenmesi, Simülasyonu ve Kontrolü”, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendisliği Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.93, Gebze, 2011.
27. Engin, Ş., N., “TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enstitüsü Rüzgar Enerjisi Çalışma Alanları ve MİLRES Projesi”, *İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi*, 2011.
28. Dumlu, F., “Rüzgâr Santrallerinin Güç Sistemlerine Etkilerinin İncelenmesi Ve Şebekeye Uyumluluk Analizi”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.26-27, İSTANBUL, 2014.
29. Ackerman, T., “Güç Sistemlerinde Rüzgar”, *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası*, s.733, Emo Yayın No: GY/2009/4.
30. Percin, H.,B., “Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinde Maksimum Güç Kontrolünün Akıllı Yapı Tabanlı Modellemesi”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.121, Elazığ, 2021.
31. Kavuran, G., “ Güç Sistemlerinin Kararlılığında Senkron Generatörün Uyarım Kontrolü”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.93, Elazığ 2011.
32. Tasar, B., “ İki Senkron Generatörlü Dinamik Güç Sistemlerinde Küçük İşaret Kararlılığının Analizi”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.149, Elazığ 2011.
33. Yılmaz, M., “Akıllı Şebekelerde Güç Kalitesinin Optimizasyonu Ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları İle Entegrasyonu”, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, s.106, Karabük, 2019.

34. Kim, H. S. ve Lu, D. D., "Wind Energy Conversion System from Electrical Perspective - A Survey, Smart Grid and Renewable Energy", 119-13, Aralık 2010 (<http://www.SciRP.org/journal/sgre>).
35. Ulutas, A., "Değişken Hızlı Doğrudan Tahrikli Mıknatıs Uyarmalı Senkron Generatörlü Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sisteminin Modellenmesi Ve Benzetimi", *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.112, Kocaeli, 2019.
36. Al-Toma A. S. H., "Hybrid Control Schemes for Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbines, Doctor of Philosophy Thesis", *Brunel University, College of Engineering*, s.26-35 London, UK, 2017.
37. Z.Q. Zhu, Jiabing Hu "Electrical machines and power-electronic systems for high- ower wind energy generation applications" *The University of Sheffield*, Sheffield, UK, 2012.
38. Coskun I., Saygın A., Dursun M., "Matris Konverter Uygulaması", *Politeknik Dergisi*, 11(3), 193-198, 2018.
39. Garces A., Molinas M., "Comparative Investigation of Losses in a Reduced Matrix Converter for Off-Shore Wind Turbines", *5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, Brighton, UK, 19-21 April 2010.
40. Hansen L. H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk-Nielsen S., Bindner H. W., Sørensen P. E., Bak-Jensen B., "Conceptual Survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines", *Risø National Laboratory*, 2001.
41. Budak, U., "Çok Seviyeli Eviricili Elektronik Balast Devresinin Modellenmesi Ve Benzetimi", *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.39-43, Elazığ, 2011.

42. Manguelle J.S., Mariethoz S., Veenstra M., Rufer A., 2001. "A Generalized Design Principle of a Uniform Step Asymmetrical Multilevel Converter For High Power Conversion", *EPE 2001: European Conference on Power Electronics and Applications*, 27-29 August.
43. Kang D.W., Lee Y.H., Suh B.S., Choi C.H., Hyun D.S., 2000. "An Improved Carrierwave-based SVPWM Method Using Phase Voltage Redundancies for Generalized Cascaded Multilevel Inverter Topology", *Applied Power Electronics Conference and Exposition. APEC 2000*.
44. Kouro, S., Rebolledo, J. And Rodríguez, J., "Reduced switching Trequencymodulation algorithm for high-power multilevel inverters", *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 54(5): 2894-2901 (2007).
45. Nandhakumar, S., And Jeevananthan, S., "Inverted sine carrier pulse width modulation for fundamental fortification in DC-AC converters", *IEEE Power Electronics and Drive- Systems, Thailand*, 1028-1034 (2007).
46. Tolbert L.M., Habetler T.G., "Novel Multilevel Inverter Carrier-Based PWM Method", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 36 No.35,1098-1107, 1999.
47. Sigergök, B., "Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon Denetimli Aktif Filtre Devrelerinin Modellenmesi ve Benzetimi", *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*", *Yüksek Lisans tezi*, s. 69, Elazığ, 2009.
48. Arslanoglu, I., "Şebekeden Bağımsız Sinüzoidal Darbe Genişlik İle Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonlarının Karşılaştırmalı Performans Analizi", *Munzur Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.103, Tunceli, 2019.
49. D. Zhu, X. Zou, S. Zhou, W. Dong, Y. Kang, J. Hu, "Feedforward Current References Control for DFIG-Based Wind Turbine to Improve Transient

- Control Performance During Grid Faults”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 33(2), s. 670-681, 2018.
50. Yavuz, I., "ÇBAG Tabanlı Rüzgâr Türbini Sisteminin ANFIS ve YSA ile Kontrolü," *IV International Conference on Data Science and Applications (ICONDATA '21)*", pp. 630-637, 2021.
51. X. Tian, W. Wang, Y. Chi, Y. Li, and C. Liu, “Virtual İnertia Optimisation Control Of DFIG And Assessment Of Equivalent İnertia Time Constant Of Power Grid”, *IET Renewable. Power Generation.*, 12(15), s. 1733-1740, 2018.
52. Clarke E. Circuit analysis of A-C power systems. Vol. I. USA: John Wiley & Sons; 1950.
53. İnal, T. T., “Üç Faz İgbt Köprü Doğrultucunun Tasarımı Ve Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tabanlı Rüzgar Türbin Sistemlerindeki Kontrolü”, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi*, s.75, İstanbul , 2012.
54. Yılmaz, M., Tezgel, S., Corapsız, M., F., “Graphical User Interface for Asynchronous Motors Clarke-Park Transforms Using LabVIEW”, *AKÜ Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(2021),(317-325).
55. Gunturkun,R., “İleri Beslemeli ve Elman Geri Beslemeli Yapay Sinir Ağlarını Kullanarak Harmoniklerin Kompanzasyonu",*Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,DoktoraTezi*,s.156,Sakarya, 2003.
56. Adak, S., Cangi, H. “Fotovoltaik Sistemde Bulunan Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli Eviricinin Çıkış Gerilimi Toplam Harmonik Distorsiyonunun Simulasyon ve Analizi” *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 242-253,2016.
57. Targosz, R. And Manson, J., PAN European LPQI power quality survey, Proceedings of 19th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2007), May 2007, Vienna.

58. Guven, F. Y., Yorukeren, N., "Yalova Üniversitesi Merkez Kampüsünde Elektrik Enerji Kalitesini Etkileyen Harmoniklerin İncelenmesi", *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1) 2019, 123-143».
59. Ozkilog, M. C., "Şebeke Bağlantılı Çok Seviyeli İverterler İçin Yeni Bir Modülasyon Tekniğinin Geliştirilmesi Ve Uygulanması", *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, s.220 , İstanbul, 2018.
60. Pacacı, S., "Yapay Sinir Ağları, Bulanık Mantık ve Sinirsel Bulanık Denetleyiciler ile Asekron Motorların Hız Denetimi için Simülatör Tasarımı", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.117, Isparta 2011.
61. Madan, A., "Performance And Thermal Reliability Comparisons of 2-Level and 3-Level NPC Voltage Source Inverters For Elektrik Vehicle Drive Applications", *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.123, Ankara 2019.
62. Mat, A., "Bağlaşık İndüktörlü Üç-Seviyeli Evirici İle Asekron Motorların Hız Kontrolü İçin Genetik Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyici Simülatör Tasarımı", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.132, Isparta 2013.
63. A. A. d. M. Bento, P. K. P. Vieira and E. R. C. da Silva, "Application of the One-Cycle Control Technique to a Three-Phase Three-Level NPC Rectifier," *in IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 2, s. 1177-1184, 2014.
64. Sezen, S. "Üç Fazlı Şebeke Bağlantılı Çok Seviyeli Evirici Kullanarak Aktif Filtreleme Yeteneğine Sahip Fotovoltaik Sistemin Tasarımı Ve Uygulanması", *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, s.147 , Kocaeli, 2015.
65. A. Prayag and S. Bodkhe, "A comparative analysis of classical three phase multilevel (five level) inverter topologies," *2016 IEEE 1st International*

Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 2016, pp. 1-5.

66. Mathworks.com, Available:
<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/wind-farm-dfig-detailed-model.html;jsessionid=89a2caf9df84b443bfa5aa6f8294>. [Erişildi: 15 06 2022].
67. IEEE(519-2014), "Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems".
68. Citak, Y., " Rüzgâr Türbin Sisteminde İki ve Üç Seviyeli Dönüştürücü Tasarımı ve Güç Analizinin Yapılması", *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 5, sayı. 1, ss. 81-90, 2022

