



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE ELDE EDİLEN GÜCÜN MAKSİMUM GÜÇ
NOKTASI TAKİBİ YÖNTEMLERİ İLE ARTTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nihat KURŞUN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

ŞUBAT 2025

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE ELDE EDİLEN GÜCÜN MAKSİMUM GÜÇ
NOKTASI TAKİBİ YÖNTEMLERİ İLE ARTTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nihat KURŞUN

(22434981625)

ORCID:0009-0003-2533-8796

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

Danışman: Dr.Öğr. Üyesi İbrahim Gürsu TEKDEMİR

ORCID: 0000-0003-1381-3513

ŞUBAT 2025



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin aboneliği olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Nihat Kurşun

İmzası:



Babama, eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Rüzgar türbinlerinde elde edilen gücün, maksimum güç noktası takibi yöntemleri kullanılarak artırılması ile ilgili hazırladığım bu tezde, elde ettiğim analiz sonuçlarını gerçekleştirdiğim benzetim çalışmaları ile ortaya koydum. Gerek bu tezi hazırlarken gerekse iki yıllık yüksek lisans çalışmalarımda her zaman güler yüzü ve samimiyeti ile deneyimlerini paylaşarak danışmanlığımı yapan, değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Gürsu Tekdemir'e teşekkür ederim. Yüksek lisans çalışmalarım esnasında hayatını kaybeden ve benimle her zaman gurur duyduğunu söyleyen rahmetli babam Salih Kurşun'a, dualarını hiçbir zaman esirgemeyen anneme ve aile üyelerime, motivasyonları ile destek olan mesai arkadaşlarıma, teknik desteklerinden dolayı değerli arkadaşım Yusuf Karamanlı'ya, yirmibeş yıldır sevgisini ve desteğini esirgemeyen biricik eşim Ayşegül'e ve "bir talebe nasıl ders çalışmalı" sorusuna verilecek cevabı, anlatarak değil yaşayarak göstermem için bana çalışma azmi veren, harcadığım emeği ve çabayı anlamaları dileğiyle çocuklarım Ahmet Akif ve Yusuf Bahadır'a, bana çalışacağım sağlığı, aklı, zamanı ve imkanı tanıyan Rabbime teşekkür ederim.

Şubat 2025

Nihat KURŞUN
(Teknik Öğretmen)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
KISALTMALAR	x
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	17
1.1 Tezin Amacı.....	17
1.2 Literatür Araştırması.....	18
2. RÜZGAR ENERJİSİ SİSTEMLERİ	20
2.1 Rüzgarın Oluşumu.....	20
2.2 Rüzgarın Bir Enerji Olarak Kullanılma Tarihi.....	20
2.3 Ülkemizde Rüzgar Enerjisinin Gelişimi.....	21
2.4 Ülkemizde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Gelecek Perspektifi.....	22
2.5 Rüzgar Türbinleri.....	23
2.6 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırması.....	24
2.7 Generatör Çeşitleri.....	27
2.7.1 DC generatörler.....	28
2.7.2 Asenkron generatörler.....	28
2.7.3 Senkron generatörler.....	31
2.8 Rüzgar Santrallerinde Güç Elektronikliği.....	34
2.8.1 AC/DC kontrollü doğrultucu.....	35
2.8.2 DC-DC dönüştürücü.....	35
3. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİ VE YÖNTEMLERİ	39
3.1 MGNT Yöntemleri.....	39
3.1.1 Dolaylı mekanik güç algoritmaları.....	39
3.1.2 Direk güç kontrol algoritmaları.....	43
3.1.3 Akıllı algoritmalar.....	47
3.1.4 Hibrit algoritmalar.....	49
4. RÜZGAR SANTRALİNDE MEKANİK GÜÇ ÜRETİM FAKTÖRLERİ	50
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	52
5.1 Deneysel Çalışma Modeli.....	52
5.2 Rüzgar Türbini.....	52
5.3 Generatör.....	54
5.4 AC/DC Dönüştürücü.....	54
5.5 Boost Konvertör.....	55
5.6 MGNT Yöntemleri.....	56
5.6.1 MGNT uygulanmamış devre.....	56
5.6.2 Artırımlı iletkenlik yöntem devresi.....	56
5.6.3 Değiştir ve gözle yöntem devresi.....	57
5.6.4 Bulanık mantık yöntem devresi.....	58

5.6.5 Yapay sinir ağları yöntem devresi	60
5.7 Y¼k Bloğu.....	62
5.8 Analitik Sonuçlar	62
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ	71



KISALTMALAR

AC	: Alternatif akım
AI	: Artırımlı iletkenlik
BM	: Bulanık mantık
DC	: Doğru akım
DVG	: Değiştir ve gözle
EMK	: Elektro motor kuvveti
MGN	: Maksimum güç noktası
MGNT	: Maksimum güç noktası takibi
PI	: Oransal İntegral kontrolü (Proportional Integral control)
SCR	: Silikon kontrollü doğrultucu
SMSG	: Sabit mıknatıslı senkron generatör
YSA	: Yapay sinir ağı

SEMBOLLER

A	: Türbinin kanatlarının tarama alanı
B	: Bıçak hatve açısı
C_p	: Türbin performans katsayısı
D	: Boost devresinde görev çevrim oranı
DT	: Boost devresinde anahtar elamanının iletimde kalma süresi
L	: Endüktans
L_s	: Stator endüktası
P	: Elektriksel Güç
P_m	: Türbinin mekanik çıkış gücü
R_d	: Drain direnç değeri
R_{on}	: Mosfette drain ile source arasındaki direnç değeri
R_s	: Seri direnç değeri
V_{dc}	: Yük üzerindeki doğru gerilim değeri
V_f	: İletim sırasında tristör uçlarındaki gerilim değeri
V_i	: Giriş Gerilimi
V_L	: Bobin üzerindeki gerilim
V_o	: Çıkış gerilimi
V_{pk}	: Faz tepe gerilimi
V_s	: Kaynak gerilimi
V_w	: Rüzgar hızı
ΔP	: Elektriksel güç değişimi
ΔV	: Gerilim değişimi
ΔI_L	: Bobin akım değişimi
λ	: Kanat uç- hız oranı
α	: 3fazlı doğrultma devresinde tetikleme açısı
ρ	: Hava Yoğunluğu

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1 : Rüzgar Türbin Parametreleri.....	52
Çizelge 5.2 : SMSG Parametreleri.....	54
Çizelge 5.3 : AC/DC dönüştürücü Parametreleri.....	55
Çizelge 5.4 : Boost Konvertör devre eleman değerleri.	55
Çizelge 5.5 : BM kural tablosu.	58
Çizelge 5.6 : Rüzgar senaryolarından elde edilen ortalama güç değerleri (Watt).	64

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: 1897 yılında Paul La Cour tarafından yapılan rüzgar santrali (Johansen, 2021).	21
Şekil 2.2 : 2006-2015 yıllarında Rüzgar santrali kurulu gücü.	22
Şekil 2.3 : 2023 yılı itibari ile kurulu gücün birincil kaynaklara göre dağılımı.	22
Şekil 2.4 : ZEISS firmasına ait hub, kule ve nasel iç bileşenleri bağlantı kesiti.	24
Şekil 2.5 : Rüzgar Türbin Sınıflandırılması.	24
Şekil 2.6 : (a) Yatay eksenli türbin (b) Düşey eksenli türbinler.	25
Şekil 2.7 : Rüzgar türbinlerinde kanat sayıları.	26
Şekil 2.8 : Önden ve arkadan esen rüzgara göre tasarlanan rüzgar türbinleri.	26
Şekil 2.9 : Karada ve deniz üzerinde kurulan rüzgar türbinleri.	26
Şekil 2.10 : DC generatörün iç yapısı.	28
Şekil 2.11 : Kısa devre çubuklu rotor.	29
Şekil 2.12 : Sargılı rotor ve bilezikleri.	30
Şekil 2.13 : Çift beslemeli asenkron generatör.	30
Şekil 2.14 : Optislip indüksiyon generatörün yapısı.	31
Şekil 2.15 : Sargılı rotorlu senkron generatör (Warne, 2005).	32
Şekil 2.16 : Sargılı rotorlu senkron generatör rotor çeşitleri (a) Silindirik kutuplu rotor (b) Çıkıntılı kutuplu rotor.	33
Şekil 2.17 : Greefenergy firmasına ait SMSG'nin yapısı.	33
Şekil 2.18 : SMSG'nin şebekeye bağlantı prensip şeması.	34
Şekil 2.19 : Rüzgar santralinin enerji üretim ve dönüşüm yapısı.	34
Şekil 2.20 : SMSG çıkışına bağlanan AC/DC kontrollü dönüştürme devresi.	35
Şekil 2.21 : T periyotlu sinyalde DT görev çevrimi.	36
Şekil 2.22 : Boost dönüştürücü devresi.	36
Şekil 2.23 : (a) Boost devresi (b) Anahtar iletimde devresi (c) Anahtar açık devresi.	37
Şekil 2.24 : Boost dönüştürücü akım ve gerilim dalga şekilleri (a) Bobin üzerinden geçen akım (b) Bobin gerilimi-zaman grafiği.	37
Şekil 3.1 : Rüzgar enerjisi sistemlerinde MGNT algoritmaların sınıflandırılması. ...	40
Şekil 3.2 : Hız-uç oranı rotor hızı ve mekanik güç arasındaki ilişki grafiği.	41
Şekil 3.3 : Hız-uç oranı algoritma uygulama devresi.	41
Şekil 3.4 : Geri beslemeli güç sinyali algoritma uygulama devresi.	42
Şekil 3.5 : Optimal tork eğrisi.	42
Şekil 3.6 : Optimal tork algoritma yöntemi blok şeması.	43
Şekil 3.7 : AI algoritması.	44
Şekil 3.8 : AI güç-gerilim grafiği.	44
Şekil 3.9 : DVG metodunda (a) Büyük adım aralığı (b) Küçük adım aralığı.	45
Şekil 3.10 : DVG yönteminde adaptif adım aralığı.	46
Şekil 3.11 : DVG algoritma akış diyagramı.	46
Şekil 3.12 : BM sistem üniteleri.	47

Şekil 3.13 : YSA yapısı.	48
Şekil 4.1 : Rüzgar hızına göre rüzgar santrali kontrol bölgeleri.	50
Şekil 5.1 : Deneysel çalışma modeli.	52
Şekil 5.2 : Benzetim programında kullanılan rüzgar türbin bloğu.	52
Şekil 5.3 : Rüzgar türbini güç karakteristiği.	53
Şekil 5.4 : Rüzgar senaryoları.	53
Şekil 5.5 : Benzetim programında kullanılan SMSG bloğu.	54
Şekil 5.6 : Benzetim programında kullanılan AC/DC dönüştürücü bloğu.	54
Şekil 5.7 : Benzetim programında kullanılan DC/DC Boost dönüştürücü devresi. ..	55
Şekil 5.8 : MGNT uygulanmamış MATLAB/Simulink benzetim devresi.	56
Şekil 5.9 : AI yöntemi MATLAB/Simulink benzetim devresi.	57
Şekil 5.10 : DVG algoritması.	57
Şekil 5.11 : DVG MATLAB/Simulink benzetim devresi.	58
Şekil 5.12 : BM benzetiminde kullanılan (a) dP/dW_r (b) dP/dV (c) Çıkış output üyelik fonsiyonları.	59
Şekil 5.13 : BM MATLAB/Simulink benzetim devresi.	60
Şekil 5.14 : Veri seti için kullanılan (a) BM devresi (b) Rüzgar senaryosu.	61
Şekil 5.15 : YSA eğitim ve test regresyon eğrileri.	61
Şekil 5.16 : YSA MATLAB/Simulink benzetim devresi.	62
Şekil 5.17 : Benzetimde kullanılan yük devresi.	62
Şekil 5.18 : Rüzgar senaryolarına göre güç eğrileri (a) Rüzgar senaryo-1 (b) Rüzgar senaryo-2 (c) Rüzgar senaryo-3.	63

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE ELDE EDİLEN GÜCÜN MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİ YÖNTEMLERİ İLE ARTTIRILMASI

ÖZET

Ülkelerin tarım ve hayvancılık toplumundan, sanayi toplumuna dönüşmesi veya bu oranın sanayiden yana artış sağlaması, insan nüfusunun çoğalması, şehirlerin büyümesi, insanların konfor alanlarının ve ihtiyaçlarının farklılaşarak büyümesi, beraberinde enerji ihtiyacının da artmasına neden olmaktadır. Buna karşılık fosil enerji üretim kaynaklarının nihayetinde sınırlı olması ve gün geçtikçe azalması, ülkelerin yeni enerji planlamaları yapmalarını, sahip oldukları yenilenebilir enerji kaynaklarını geliştirmelerini ve daha verimli kullanmalarını, mevcut enerji kaynaklarındaki yenilenebilir enerji oranının artırılmasını, çeşitlendirilmesi yönünde enerji politikaları üretmelerini, zorunlu kılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranlarının fosil kaynaklara nazaran artması, karbon salınımının azalmasında, doğanın dengesinin bozulmasının önüne geçilmesinde veya yavaşlamasında da etkili olacak, insan nüfusu artarken, insanların sağlıklı yaşlanmasına katkı verecektir.

Bu tez çalışmasına konu olan rüzgar enerjisi en başta gelen yenilenebilir enerji kaynaklarından. Rüzgar santrallerinin temel parametresi rüzgardır. Rüzgarın sahip olduğu hız ve yön, stokastik özelliğe sahip olup, günlük, saatlik hatta anlık değişebilmektedir. Bu çalışmamızda temel amacımız, MATLAB/Simulink kullanarak oluşturduğumuz rüzgar enerji santral modeline, değişken rüzgar hız senaryoları uygulayarak, sistemin üretebileceği güç değerinin, sürekli maksimum güç noktasında olmasını sağlamaktır. Bunu için artırılmış iletkenlik (AI), değiştir ve gözle (DVG), bulanık mantık (BM) ve yapay sinir ağı (YSA) olmak üzere dört farklı maksimum güç noktası takibi yöntemi kullanılmış ve ayrıca hiçbir yöntem kullanılmadan türbin çıkışından alınan ortalama güç değerleri karşılaştırılmıştır. Bu beş farklı durumun, üç farklı rüzgar senaryosu ile simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Böylece hem anlık güç hem de ortalama güç değerleri bakımından, kullanılan yöntemler içinde elde edilen en yüksek değerler, BM metodu ile eğitilen YSA yönteminden, daha sonra BM metodu ile elde edilmiştir. Sonuç olarak, tezde incelenen yöntemler kullanılarak, anlık ve ortalama güç değerleri açısından rüzgar türbin çıkışından elde edilen değerlerin maksimum değere ulaştığı gösterilmiştir, bu da tez çalışmasının amacı açısından iyi bir sonuçtur.

Anahtar kelimeler: Rüzgar enerji santrali, Maksimum güç noktası takibi, Yapay sinir ağı, Bulanık mantık, Değiştir ve gözle, Artırılmış iletkenlik

INCREASING THE POWER OBTAINED IN WIND TURBINES WITH MAXIMUM POWER POINT TRACKING METHODS

SUMMARY

The transformation of countries from agricultural and animal husbandry societies to industrial societies or the increase in this ratio in favor of industry, the increase in the human population, the growth of cities, the growth of people's comfort areas and the differentiation of their needs lead to an increase in the need for energy. On the other hand, the fact that fossil energy production resources are ultimately limited and decreasing day by day makes it compulsory for countries to make new energy plans, to develop and use their renewable energy resources more efficiently, to increase the proportion of renewable energy in existing energy resources and to produce energy policies in the direction of diversification. Increasing the rate of use of renewable energy resources compared to fossil resources will also be effective in reducing carbon emissions and preventing or slowing down the deterioration of the balance of nature. While the human population is increasing, it will contribute to the healthy aging of people.

Wind energy, which is the subject of this thesis, is one of the leading renewable energy sources. The basic parameter of wind power plants is the wind. The speed and direction of the wind are stochastic and can change daily, hourly or even instantaneously. In this study, our main objective is to apply variable wind speed scenarios to the wind power plant model that we have created using MATLAB/Simulink to ensure that the power value that the system can generate is always at the maximum power point. For this purpose, we used four different maximum power point tracking methods, namely incremental conductivity, perturb and observe, fuzzy logic and artificial neural network, and also compared the average power values obtained from the plant output without using any method. These five different cases were simulated with three different wind scenarios. Thus, in terms of both instantaneous power and average power values, the highest values obtained among the methods used were obtained from the artificial neural network method trained with the fuzzy logic method, followed by the fuzzy logic method. As a result, it is shown that the value obtained from the wind turbine output reaches the maximum value in terms of instantaneous and average power values using the methods examined in the thesis, which is a good result for the purpose of the thesis.

Keywords: Wind power plant, Maximum power point tracking, Artificial neural network, Fuzzy logic, Perturb and observe, Incremental conductivity

1. GİRİŞ

İnsanlığın enerji ile tanışması, ateşin bulunmasıyla olmuştur denilebilir. Yüzyıllar boyunca hayatı kolaylaştıran, güvenliğini sağlayan bir araç olarak kullanılmış, geliştirilmiş ve çeşitlendirilmiştir. Enerji üretim kaynaklarına erişme amacı, dünya tarihinde olumsuz birçok olayı da beraberinde getirmiştir. Bilimsel gelişmelere öncülük eden, gerek askeri gerekse ekonomik açıdan gelişmiş olan ülkeler, fosil kaynaklara erişim için sömürgecilik üzerinden, 20. yüzyılın başında ve ortasında geniş coğrafyaya yayılan savaşlara sebep olmuşlardır. Nihayetinde sınırlı olan fosil yakıt rezervlerinin günümüzde azalma eğilimi göstermesi (Arı ve Yılmaz, 2023), enerji üretiminde yüksek hidrokarbon içeren fosil yakıtların kullanımı karbondioksit ve sera gazlarının salımını ile doğaya verdiği zarar göz önünde bulundurularak, ülkelerin yenilenebilir enerji sistemlerine yönelimini artırmıştır. Günümüz sosyo ekonomik gelişmeler çerçevesinde dünyada enerji talebi her yıl %4-5 düzeyinde artmaktadır (Özbektaş ve diğ, 2023). Bu da ülkelerin enerji üretim politikalarını planlarken, daha verimli, daha ucuz, daha erişilebilir, daha temiz olacak şekilde planlamalarını zorunlu kılmaktadır. Böylece ülkeler, bulunduğu coğrafi konum itibari ile yenilenebilir enerji kaynaklarını çeşitlendirmeye, sahip olunan her türlü yenilenebilir enerji kaynağını, enerji dönüşüm sistemleri ile elektrik enerjisine dönüştürmeye çalışmaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Yapılan tez çalışmasında, yenilenebilir bir kaynak olan rüzgar kuvvetini kullanarak elektrik enerjisi üreten rüzgar türbinlerinde, maksimum güç noktası takibi (MGNT) yöntemlerinin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlarda, MGNT kullanılacaksa hangi yöntemin diğerlerine göre (ortalama güç çıkışı açısından) daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bunun için MATLAB/Simulink programı ile benzetim çalışması yapılarak, sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak ortaya konulacaktır.

1.2 Literatür Araştırması

MGNT ile ilgili çalışmalar 1980'li yıllarda güneş enerjisi sistemlerinde kullanılmaya başlanmış, gün içi ve mevsimsel, güneş ışın etkilerindeki artış ve azalışlara karşılık, ek bataryaların şarj ünitelerinin kontrol edilmesi ile maksimum gücün korunması amaçlanmıştır. İlk yapılan çalışmalarda güç takibi için mikroişlemcili devreler kullanılmıştır (Akerlund, 1983; Harashima ve diğ, 1987; Enslin ve Snyman, 1991).

1999 yılında ise güneş enerjisi sistemlerinde MGNT için AI yönteminin kullanıldığını, sistemden alınan güç ve gerilim değerlerinin anlık değişimi, kontrol yönünü belirlemektedir (Wu ve diğ, 2000).

250 W bir güneş paneli ile yapılan deneysel çalışmayla MGNT metotlarından DVG metodu ile AI metodu karşılaştırılmış, küçük bir farkla AI daha iyi sonuç vermesine karşın karmaşıklık bakımından olumsuz özelliğe sahip olduğu belirtilmektedir (Hohm ve Ropp, 2000).

2002 yılında yapılan çalışmada rüzgar santralleri için MGNT çalışması gerçekleştirilmiş, rüzgar türbin hız kontrolü ile hız-uç oran kontrolü yapılarak maksimum güç değeri yakalanmaya çalışılmıştır (Yaoqin ve diğ, 2002; Koyanagi ve diğ, 2002).

2006 yılında yapılan çalışmayla herhangi bir hız sensörü kullanılmadan, sistemde bulunan boost konvertör anahtarlama elemanının kontrolü ile MGNT gerçekleştirilmiş ve %24 oranında kazanç sağlanmıştır (Tafticht ve diğ, 2006).

Tork-hız karakteristiği kullanılarak 2004 yılında yapılan çalışmalarla, tepkisel süresi daha kısa olan, daha verimli bir MGNT yöntemi gerçekleştirilmiştir (Jia ve diğ, 2007).

Güneş ve rüzgar enerjisinin bir arada hibrit bir santralde MGNT çalışması ise 2008 yılında yapılmış, güneş ve rüzgar enerjisi üretim girdilerindeki değişikliklere göre optimum ve güvenilir bir çalışma için BM kontrolörü kullanılmıştır (Badejani ve diğ, 2008).

2009 yılında değişken rüzgar ve yük durumunda , rüzgar santralinden maksimum güç elde etmek için optimum rüzgar türbin hızını tahmin etmek üzere YSA ve parçacık sürüsü optimizasyon tekniği kullanılmıştır (Chu ve diğ, 2009).

2016 yılında yapılan çalışmayla BM, PI denetleyicisi ile DVG MGNT yöntemleri değişken rüzgar hızlarında test edilmiştir. Çalışmada en verimsiz sonucun ise PI denetleyicisinde gerçekleştiği bunun sebebininse rüzgarın doğrusal almayan hızlarında elde edilmesi gereken maksimum güç noktasının takibinin PI denetleyicisinin takip edememesi olduğu, DVG metodunda ise maksimum güç takibinin, optimum noktada salınım yaptığı, bunun da bir sonraki noktayı takip etmede zorluk yarattığı belirtilerek, verimin istenen seviyede gerçekleşmediği ve en verimli ve hızlı yöntemin BM metodu olduğu, yalnız bu metodun ön bilgiye ihtiyaç duyduğu belirtilmektedir (Tiwari ve Ramesh, 2016).

2019 yılında yapılan çalışmayla DVG metodunda maksimum noktaya ulaşmak için kullanılacak olan DVG metodunda, kullanılacak olan adım büyüklüğü incelenerek, tepe noktada gerçekleşen salınımı azaltması için adaptif adımlı DVG metodu tavsiye edilmekte, 24 saatlik yapılan gözlem sonucunda rüzgar santralinin veriminin %87'den %91'e çıkardığı, maksimum noktanın 0,16 saniyelik bir farkla takip edildiği ortaya konulmuştur (Mousa ve diğ, 2019).

2022 yılında yapılan çalışmayla güneş ve rüzgar enerjisinden oluşan hibrit bir sistemde DVG, BM ve YSA yöntemleri kullanılarak yapılan MGNT yöntemleri karşılaştırılmış, elde edilen maksimum güç, takip süresi ve verim konusunda karşılaştırma yapılmış, en iyi sonuçlar YSA yöntemi ile elde edilmiştir (Jenitha ve Rajesh, 2022).

2024 yılında yapılan çalışmada adaptif adım aralığının BM ile belirlendiği DVG metodu ile MGNT gerçekleştirilmiştir. İki farklı metot kullanılarak yapılan bu çalışma, klasik DVG metoduna nazaran maksimum güç noktasına yakınsama süresini kısaltmıştır (Gouabi ve diğ, 2023).

2. RÜZGAR ENERJİSİ SİSTEMLERİ

2.1 Rüzgarın Oluşumu

Rüzgar, hava kütesinin yüksek hava basınç bölgesinden alçak hava basınç bölgesine hareketidir. Güneş ışınları dünyamızı ısıtır ancak yeryüzünün şekli, fiziki yapısı, kendi etrafında ve güneşin etrafında yaptığı dönüş hareketi, dünyanın farklı noktalarında farklı sıcaklık değerlerinin oluşmasına bu da yeryüzünde farklı atmosferik basınçlar sahip bölgelerin oluşmasına neden olur. İşte oluşan farklı basınç bölgeleri rüzgarın oluşmasına neden olur. Yani rüzgar enerjisinin kaynağı aslında güneş enerjisidir (Karaoğlu, 2018). Ülkemizde enerji üretimi açısından rüzgarın oluşum yönü değerlendirildiğine, Anadolu mevsimsel farklı basınç bölgelerinin etkisine girmektedir. Yazın iki farklı alanın etkisi altına girmektedir. Birincisi Anadolu'ya güneyden gelen tropikal rüzgarlar, ikincisi ise Kuzeybatı Avrupa üzerinde oluşan yüksek basınç alanından Basra alçak basınç alanına yönelmiş rüzgarlardır. Özellikle kuzey batıdan esen rüzgar, Ege bölgesini ve Marmara bölgesini etkisi altına almaktadır. Kışın ise Sibiryaya yüksek basınç alanı olarak, Karadeniz ve Akdeniz ise alçak basınç alanı olarak değerlendirildiğinde, rüzgarın karadan denize doğru esmesi beklenir (Özdamar, 2000).

2.2 Rüzgarın Bir Enerji Olarak Kullanılma Tarihi

Rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjinin insanlar tarafından ilk kullanımı Mısırlılar tarafından taşımacılıkta, Nil nehrinde keten ve papirüsten yaptıkları yelkenli gemilerle olmuştur (Pasqualetti ve diğ., 2004). Bir başka görüşte, elde edilen yazılı kaynaklara göre ise MÖ 200 yıllarında görüldüğü, bazı kaynaklarda ise MÖ 700 yılında İran'da dikey eksenli yel değirmenlerinin kullanıldığı ile ilgili kanıtların olduğu söylenmektedir (Kocatürk ve Ünsan, 2015). Dünyanın diğer bölgelerinde kullanımı savaşlar, göçler ve ticari faaliyetlerle gerçekleşmiştir. Avrupa'da kullanımı, 11. YY da İngiltere'de daha sonra diğer Avrupa ülkelerinde olmuş, sadece değirmen olarak değil su kuyularında su çekmek için de kullanılmıştır. İlk olarak insanlar rüzgarın nereden nasıl geldiği ile ilgili fikir yürütmese de yelkenli gemilerde

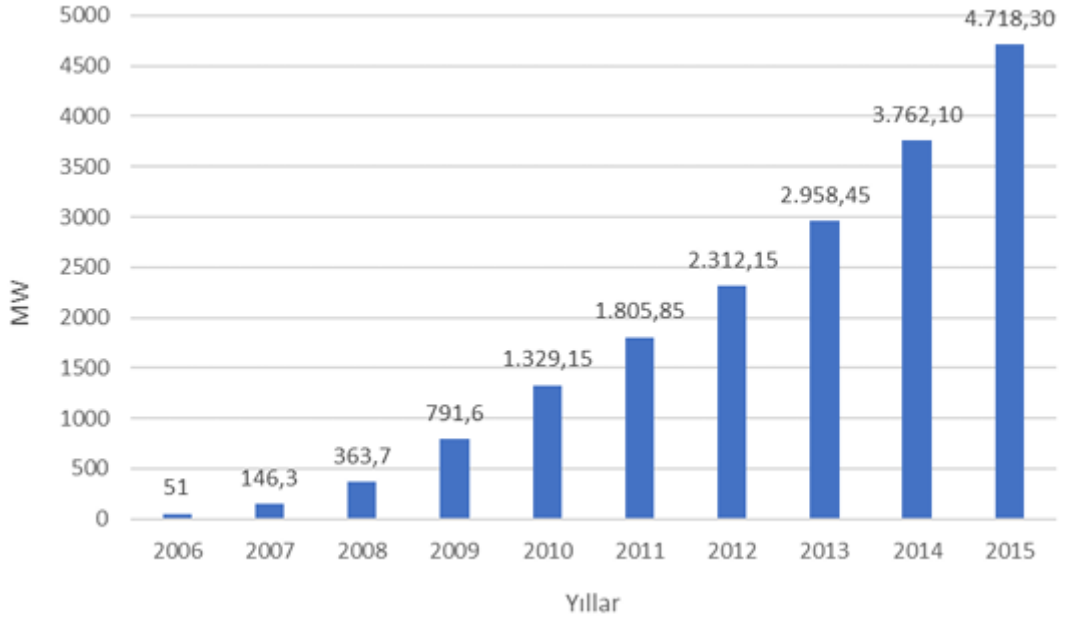
itici güç olarak, değirmenlerde dairesel hareket elde etmede ve suyun farklı fiziksel seviyelere çıkarılmasında kullanmışlardır (Durak ve Özer, 2008). Nihayet Şekil 2.1'de görülen 1897 yılında Danimarkalı meteorolog Paul La Cour 97 Watt güce sahip, DC üreten rüzgar enerjisi santrali imal etmiştir. Sonraki yıllarda AC üreten santraller geliştirilmiş, en büyük sıçrama ise 1950 yılından sonra olmuş, hem fiziksel boyut hem de güç artarak büyümüştür (Kocatürk ve Ünsan, 2015).



Şekil 2.1: 1897 yılında Paul La Cour tarafından yapılan rüzgar santrali (Johansen, 2021).

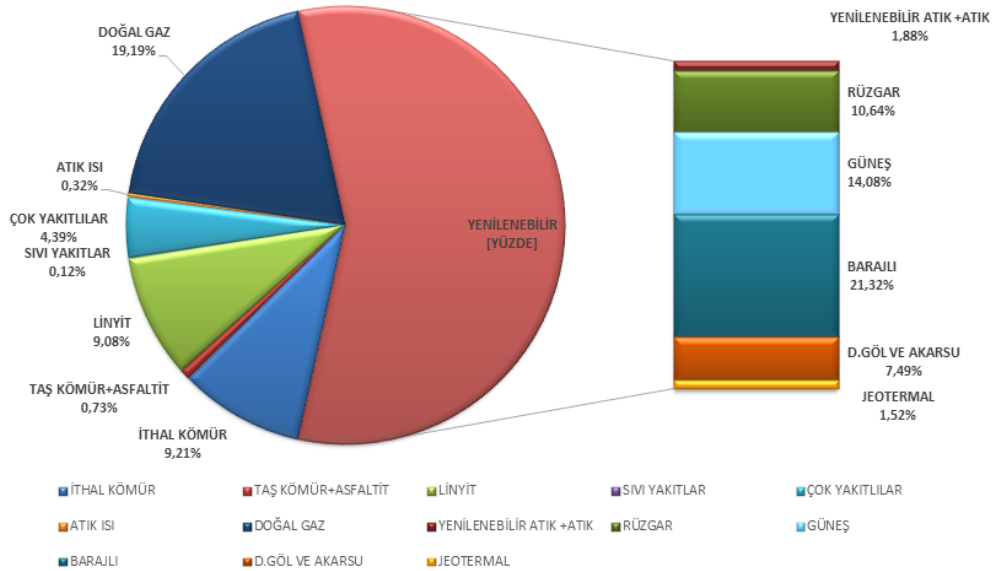
2.3 Ülkemizde Rüzgar Enerjisinin Gelişimi

Türkiye'nin ilk ticari faaliyet kapsamında yapılan rüzgâr enerjisi santrali 1998 yılında 1,5 MW'lık rüzgâr çiftliği İzmir-Çeşme'de kurulmuştur. Aynı yıl yine aynı bölgede 7,2 MW'lık başka bir santral, daha sonra 2000 yılında ise Çanakkale Bozcaada'da 10,2 MW'lık diğer rüzgâr santrali devreye girmiştir (Kabalcı ve diğ, 2010). Gerek devletin yap-işlet-devret gerekse özel sektör yatırımları ile 2015 yılına gelindiğinde kurulu güç 4718,3 MW'ta çıkmıştır. 2006-2015 yıllarındaki kurulu güç artışı Şekil 2.2'de görülmektedir (İLKILIÇ, 2016).



Şekil 2.2 : 2006-2015 yıllarında Rüzgar santrali kurulu gücü.

2023 yılında TEİAŞ'ın yayınladığı rapora göre ülkemizde rüzgar santrallerinin kurulu gücü toplam 11806.1 MW olmuştur. Şekil 2.3' e göre rüzgar santrallerinin 2023 yılı itibari ile toplam üretimin %10.64' üne yükseldiği görülmektedir (TEİAŞ, 2023).



Şekil 2.3 : 2023 yılı itibari ile kurulu gücün birincil kaynaklara göre dağılımı.

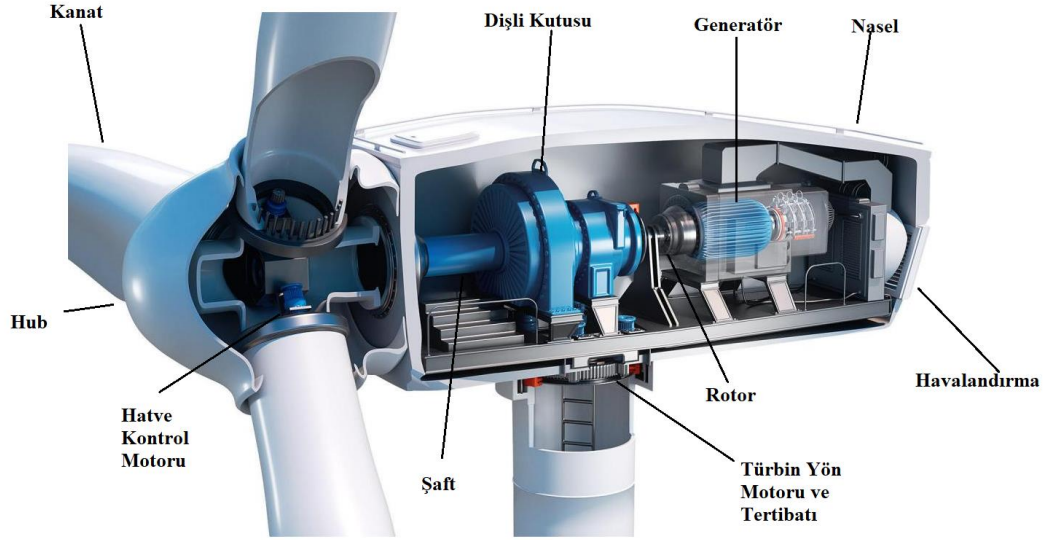
2.4 Ülkemizde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Gelecek Perspektifi

Dünyada meydana gelen savaşlar, siyasi ve ekonomik krizler, fosil yakıt kullanımıyla ortaya çıkan hava kirliliği sorunları ülkelerin enerji politikalarında farklı

bakış açılarının geliştirilmesine neden olmaktadır. Fosil yakıt arzında meydana gelebilecek olası kriz durumlarından etkilenmemek için mevcut enerji kaynaklarını çeşitlendirmeli, yenilenebilir enerji kaynaklarının ağırlığını artırmalı ve kendi öz kaynaklarını daha verimli kullanmalıdır. Ülkemiz fosil enerji kaynakları bakımından kendine yetebilen bir ülke olmamakla beraber, bulunduğu coğrafi konumun avantajlarını kullanarak su, rüzgar ve güneş başta olmak üzere tüm yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanmaya çalışmaktadır. 2022 yılında yayımlanan Türkiye ulusal enerji planı 2022 raporuna göre yenilenebilir enerji kaynaklarının 2020 yılında elektrik üretimindeki payı %42,4 iken 2035 yılında mevcut istatistiksel veriler ışığında %54,8 e yükseleceği ön görülmekte aynı şekilde rüzgar enerjisi santrallerinin 2020 yılında üretimdeki payı %8,1'den 2035 yılında %17,7 e yükseleceği ön görülmektedir. Yapılan ön görüye göre 2022 yılında fosil yakıt kaynaklı elektrik üretimi toplam üretimin %42,6 olup 2035'de ise %34,2 seviyelerinde olacağı öngörülmektedir (TCETKB, 2022).

2.5 Rüzgar Türbinleri

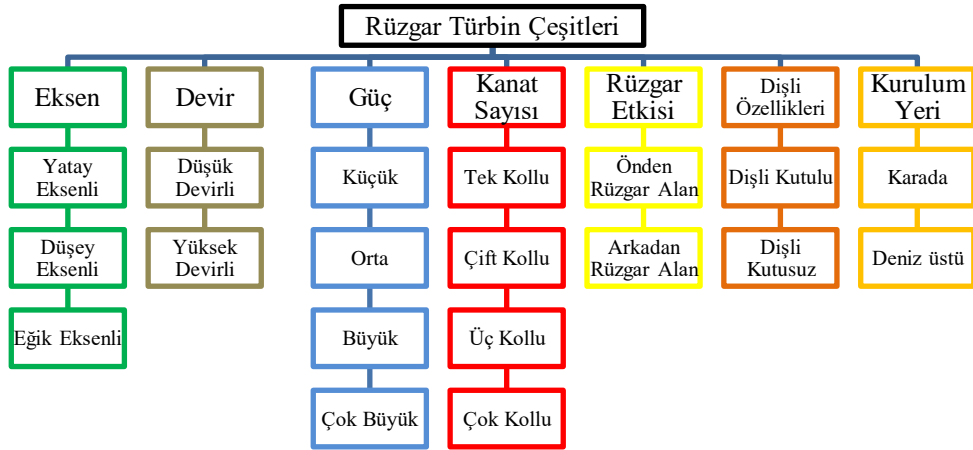
Rüzgar santrallerinin çalışma prensibi, esen rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjinin türbin kanatlarına çarparak kinetik enerjinin bir kısmını türbine iletmesi, kanatlara iletilen kinetik enerjinin bir shaft vasıtasıyla generatörün rotorunda mekanik enerjiye, rotordaki mekanik enerjinin de stator sargılarında elektrik enerjisine dönüşümünden ibarettir. Rüzgar enerjisinin ilk kullanımından günümüze kadar geçen zamanda farklı şekil, yapı, büyüklük ve çalışma amaçları olmuştur. Günümüzde ise tükenmez bir enerji kaynağı olan rüzgarın en önemli kullanım alanı elektrik enerjisi üretimi olmuştur. Rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminde kinetik enerji – elektrik enerjisi dönüşümünü verimli, güvenli, kontrollü şekilde sağlayan mekanik, elektrik ve kontrol birimi ana bileşenlerinden oluşmaktadır. Mekanik bileşenleri; kule, nasel, türbin kanatları, rotor, dişli kutusu, hatve aç kontrol parçaları, türbin yön kontrol parçaları, rüzgâr sensörleri, shaftlar ve frenleme tertibatlarıdır. Elektrik bileşenleri ise, generatör, 3 fazlı ve bir fazlı sistemler, AC/DC dönüştürücü sistemler, yükseltici transformatör, şebeke harmonik filtreleridir. Kontrol bileşenleri ise hem mekanik hem de elektrik bileşenlerde bulunmaktadır. (Yaramasu ve diğ, 2015). Şekil 2.4'de standart olmamakla beraber ZEISS firmasına ait naselin iç yapısı, kule ve hub iç bağlantılarının kesiti görünmektedir.



Şekil 2.4 : ZEISS firmasına ait hub, kule ve nasel iç bileşenleri bağlantı kesiti.

2.6 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırması

Rüzgarın bir enerji olarak kullanılmaya başlandığından günümüze mucitler, bilim insanları, mühendisler, geliştirdikleri türbin modelleri ile, çalışma veriminin daha yüksek olduğu, fiziksel zorlamalara daha dayanıklı, yerel ihtiyacı karşılama bakımından daha uyumlu rüzgar türbin modelleri üretmeyi amaçlamışlardır.

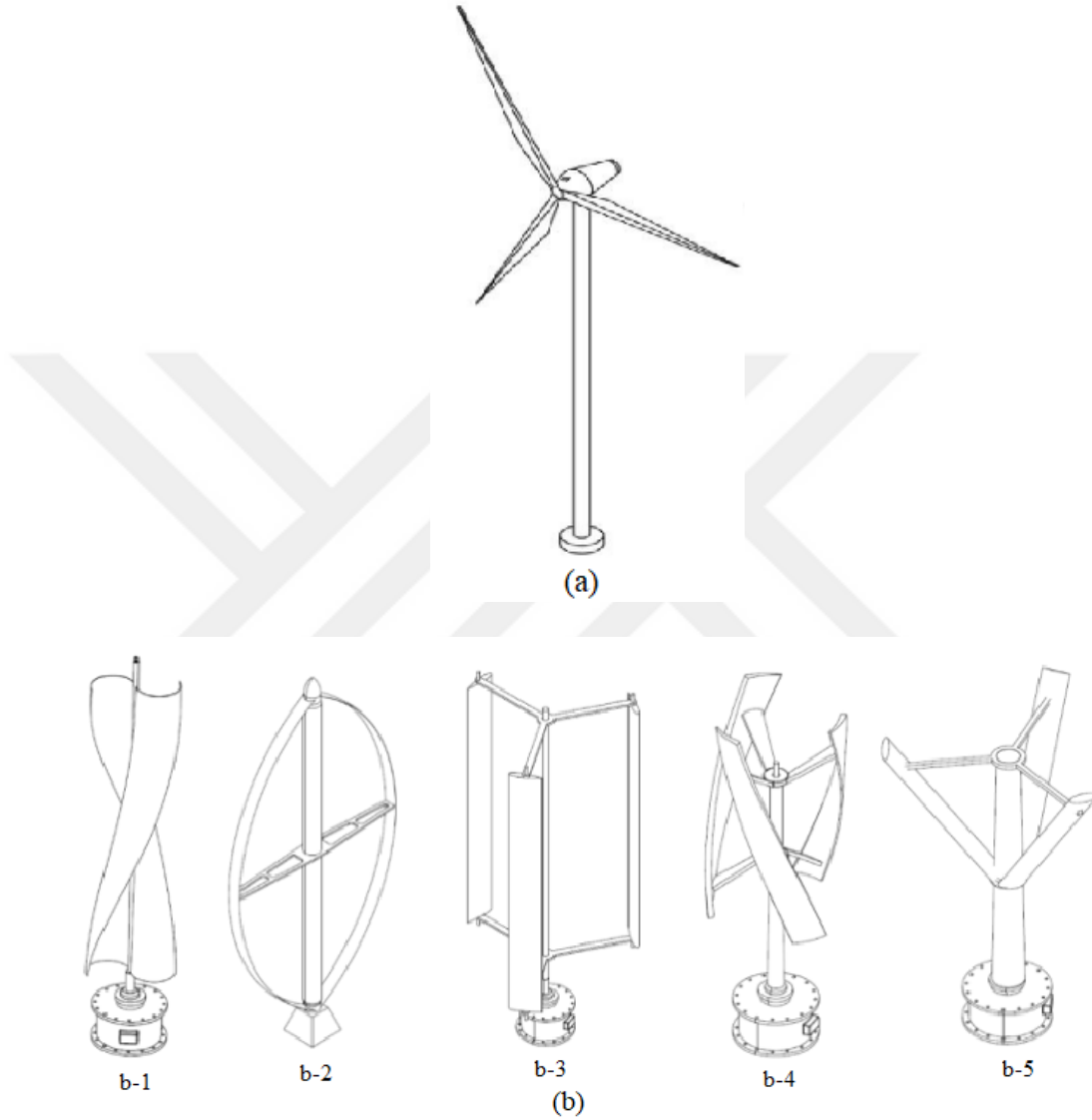


Şekil 2.5 : Rüzgar Türbin Sınıflandırılması.

Çalışma sistemi, fiziksel yapı, duruş pozisyonu, türbin içinde kullanılan elektrik makinelerinde sürekli bir değişim ve gelişim sözü konusu olmakla beraber rüzgâr türbinleri Şekil 2.5'te gösterildiği gibi dönme eksenlerine, devirlerine, güçlerine,

kanat sayılarına, rüzgâr etkisine, dişli özelliklerine ve kurulum konumlarına göre sınıflandırılırlar (Elibüyük ve Üçgöl, 2014).

Rüzgar türbinlerinin eksen kanat çeşitleri Şekil 2.6’da görülmektedir (Ghigo ve diğ, 2024).



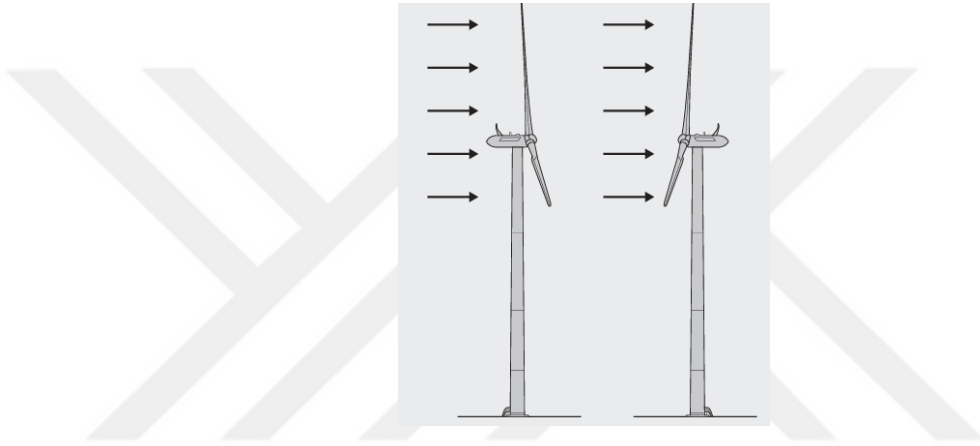
Şekil 2.6 : (a) Yatay eksenli türbin (b) Düşey eksenli türbinler (b-1Savanius tip, b-2Φ-Darius tip, b-3 H-darius tip, b-4Helisel tip, b-5 V şekil tip).

Kanat sayısına göre rüzgar türbinleri, tek, çift, üç ve çok kollu olmak üzere 4 farklı çeşitte incelenebilir. Şekil 2.7’de rüzgar türbinlerinde kullanılan kanat sayılarına göre çeşitleri görülmektedir.



Şekil 2.7 : Rüzgar türbinlerinde kanat sayıları.

Rüzgarın türbine çarpma yönüne göre, önden ve arkadan rüzgar alan türbinler ise Şekil 2.8’de görülmektedir (Matsunobu ve diğ, 2009).



Şekil 2.8 : Önden ve arkadan esen rüzgara göre tasarlanan rüzgar türbinleri.

Rüzgar santrallerinin kurulduğu yer itibari ile karada (onshore) ve denizüstü (Offshore) olmak üzere Şekil 2.9’da görüldüğü gibi iki çeşittir.



Şekil 2.9 : Karada ve deniz üzerinde kurulan rüzgar türbinleri.

2.7 Generatör Çeşitleri

Rüzgar türbin üreticileri aynı zamanda generatör üreticisi olmayabilir. Ancak tasarladıkları rüzgar türbinlerinde, sisteme en uygun tipte generatörü seçerler. Buna göre, generatör seçiminde dikkat edilen kriterler;

- Çalışma hızı
- Tam veya kısmi yükte verim
- Güç faktörü
- Gerilim dalgalanmaları
- Yol verme akımı
- Senkron makineler için eş zamanlılık
- Fiziksel özellikleri (Boyutu, ağırlığı)
- Tork dalgalanmalarına dayanımı
- Soğutma şekli
- İletkenlerinde meydana gelen elektriksel gürültülere dayanımı

Generatörler, hareket enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren dinamik elektrik makineleridir. Sabit (rotor) ve hareketli (stator) olmak üzere temel iki parçası mevcuttur. Rüzgar enerjisi santrallerinde, rüzgarın sahip olduğu kinetik enerji, kanatların bağlı olduğu milde dairesel dönme şeklinde mekanik enerjiye dönüşür, bu enerji aynı milin bağlı olduğu dişli kutusu ve bir shaft vasıtasıyla rotora iletilir. Rotordaki bu dönme hareketi ise stator sargılarında elektrik enerjisine dönüşümü sağlamaktadır. Hareket enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü elektromanyetik indüksiyon (indükleme) şeklinde olur. Elektrik enerjisi üretilmesinde iki tip indükleme prensibi vardır.

- Doğru akım indükleme prensibi
- Alternatif akım indükleme prensibi

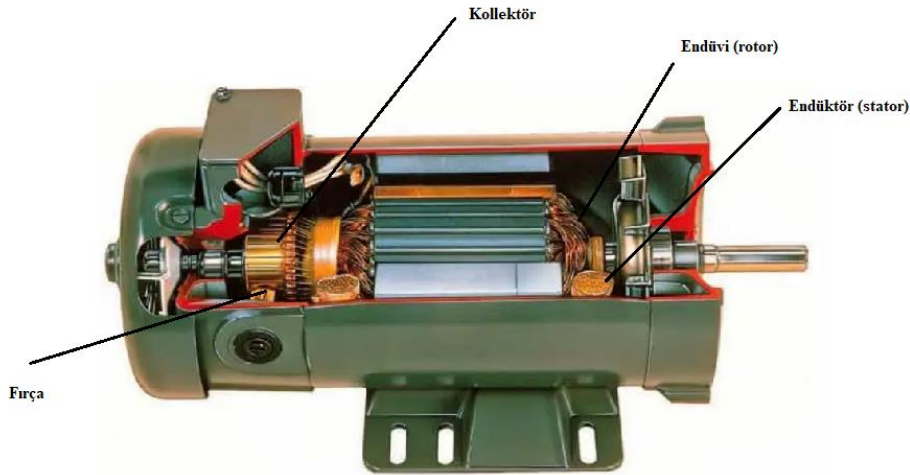
Doğru akım indükleme prensibi, sabit manyetik alan içinde hareket ettirilen iletkende EMK oluşur. Alternatif akım indükleme prensibinde ise değişken manyetik alan içinde bulunan iletkende EMK meydana gelir. Bu prensipler, generatörlerin temel çalışma prensipleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Generatörler, indükleme prensibine, rotorun sargılı olup olmadığına, rotorun dışardan uyarım şekline, statora

etkiyecek olan ve rotorda oluşturulan uyartım akısının oluşturulma şekline göre çeşitleri mevcut olup temel olarak üç farklı generatör tipi karşımıza çıkmaktadır:

- Doğru Akım generatörü
- Asenkron generatör
- Senkron generatör

2.7.1 DC generatörler

Bu tip generatörler, sargı alanı stator (endüktör) tarafında oluşturulurken, elde edilen elektrik enerjisi rotor (endüvi) kısmında elde edilir. Elde edilen elektrik enerjisi fırça ve kollektör dilimleri ile dışarıya alınır. Günümüzde kullanım alanı çok kısıtlıdır. Bunun sebebi, fırça ve kollektör kısımlarının bakım gerektirmeleri, endüvi reaksiyonu nedeniyle verim düşüklüğü, komütasyon gibi zorluklar, kullanım alanlarını daraltmaktadır. Küçük güçlü rüzgar enerjisi sistemleri için uygun olabilirken, ticari maksatlı uygulamalar için uygun değildir. Şekil 2.10'da iç yapısı görülen DC bir generatörde, hareketli olan parçadan enerji dışarıya kollektör dilimine basıncı yaparak taşıyan fırçalar görülmektedir. Endüvi dönerken üretilen elektrik enerjisinin dışarıya alınmasında birbirine sürekli temas halindeki fırça ve kollektör dilimleri çok kolay aşınmakta ve sık sık bakıma ihtiyaç duymaktadırlar.



Şekil 2.10 : DC generatörün iç yapısı.

2.7.2 Asenkron generatörler

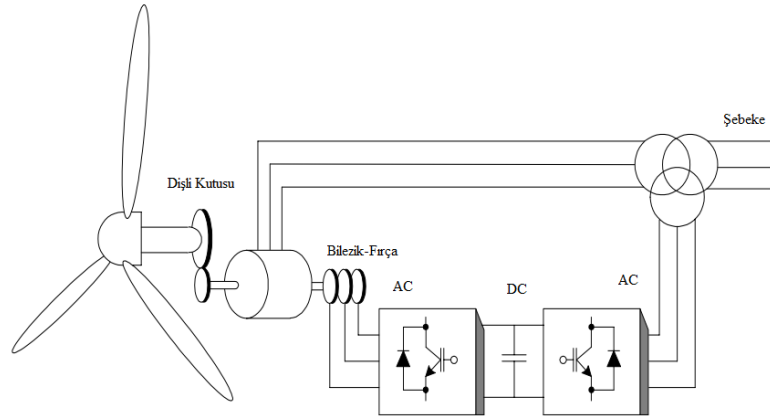
Asenkron generatörlerin diğer generatörlere göre en önemli avantajları sağlamlık, mekanik anlamda basitlik, fiyatının düşüklüğü ve az bakım gerektirmeleridir. Ayrıca rüzgar santralleri için ani rüzgar artışında oluşan tork titreşimlerini azaltmada

Böylece rotor devresinde bulunan iletkenlere ait değerler, dışardan bileziğe basacak olan fırçalar yardımı değiştirilerek, rotor akımı, gerilimi kontrol edilebilir. Motor olarak çalıştırıldığında ise motor kalkınma akımını sınırlamak üzere rotor devresine bağlanan yol verme dirençleri ile yol verme akımı sınırlandırılabilir.



Şekil 2.12 : Sargılı rotor ve bilezikleri.

Çift beslemeli asenkron generatörler Şekil 2.13’de görüldüğü gibi rotoru sargılı bir makine olmakla beraber, stator sargı çıkışları enerji hattına bağlanırken, rotor devresi stator çıkışından AC beslenerek AC/DC-DC/AC dönüşüm sağlayan kontrollü bir devre grubu beslenir (Apaydın ve diğ., 2009). Statorda oluşturulan alan ile rotorda oluşturulan alanın birbirine etkisi ile tork oluşurken, bu tork, iki alanın gücüne ve faz açılarına bağlıdır. İşte burada ihtiyaç duyulan faz açısı üretilerek, fırça bilezik sistemi ile rotor sargılarına verilmektedir (Breeze, 2016).

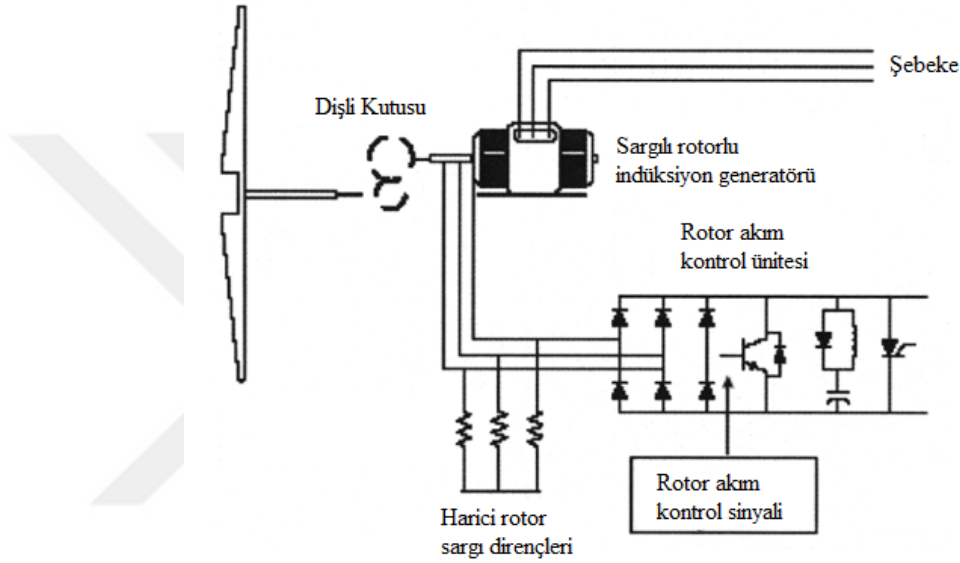


Şekil 2.13 : Çift beslemeli asenkron generatör.

2.7.2.3 Optislip indüksiyon generatör

Danimarkalı Vestas firmasının geliştirdiği, fırça ve bilezik sistemi bulunan rotoru sargılı generatörlerde mevcut olan fırça ve bilezik sisteminin ortadan kaldırıldığı rotoru sargılı bir generatör çeşididir. Temel çalışma prensibi, generatörün kayma

kontrolünün rotor akımının kontrolü ile gerçekleştirilmesi üzerinedir. Ani rüzgar hızı artışı ile ortaya çıkacak olan mekanik yüklerin rüzgar türbinine etkisini azaltmak (Warne, 2005) ve güç dalgalanmalarına mani olmak için kullanılır. Şekil 2.14'de görüldüğü gibi rotora kontrol bilgisi fırça ve bilezik yerine optik elemanlarla iletilir. Rotor üzerindeki kontrol ünitesi, rotora ait üç fazlı sargıların toplam direnç değerini değiştirmek suretiyle rotor akımını kontrol eder. Kaymadaki kontrol miktarı %1-10 arasındadır (Khadraoui ve Elleuch, 2008). Bu tip generatörlerin dezavantajı reaktif güç kontrolü yoktur (Apaydın ve diğ., 2009).



Şekil 2.14 : Optislip indüksiyon generatörün yapısı.

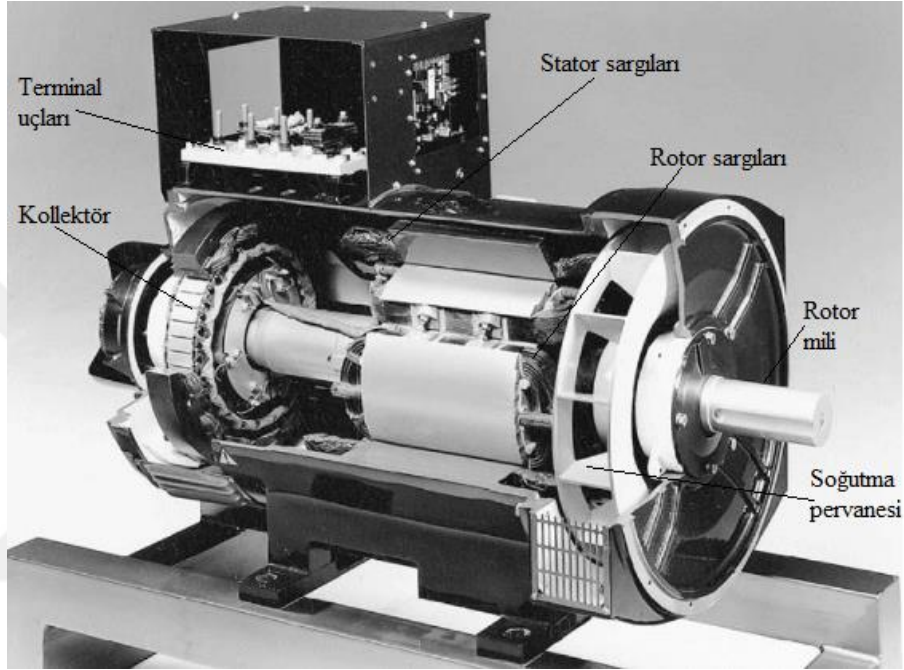
2.7.3 Senkron generatörler

Senkron generatörler, sabit (stator) ve hareketli (rotor) olmak üzere iki farklı temel parçadan meydana gelir. Stator elektrik enerjisinin üretildiği, rotor ise türbin-şaft-diğli kutusu vasıtasıyla hareketin iletildiği kısımdır. Senkron generatörlerde rotorda oluşturulan alan, zamana göre yönü ve şiddeti değişmeyen sabit bir alandır. Bu alanın stator eksenini boyunca yapacağı dönüş, stator sargılarında gerilim indüklenmesini sağlar. Rotor yapısına göre senkron generatörler, sargılı rotorlu senkron generatör ve sabit mıknatıslı senkron generatör (SMSG) olmak üzere iki çeşittir.

2.7.3.1 Sargılı rotorlu senkron generatör

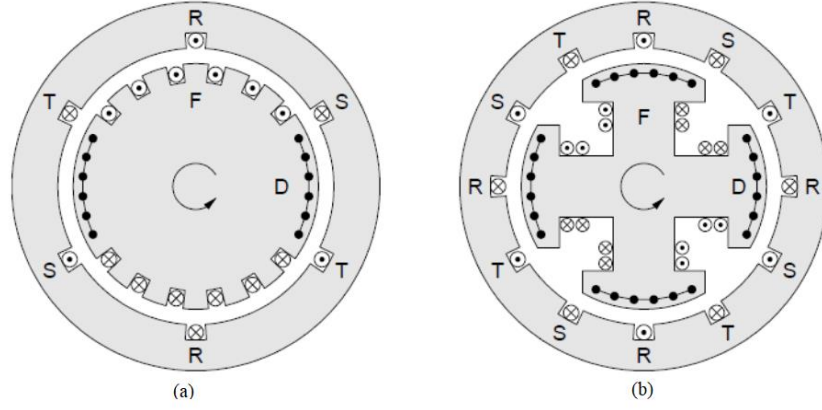
Sargılı rotorlu senkron generatörlerde rotor, elektromıknatıs olarak kullanılmakta olup, üç faz sargısının yerleştirildiği stator eksenini boyunca döndürülerek, stator

sargılarında üç fazlı AC gerilim indüklenmesini sağlar. Rotoru elektromıknatısa dönüştürmek için, dışardan fırça ve kollektör yardımıyla rotora DC gerilim verilir ve kollektör dilimleri üzerinde kısa devre edilen rotor sargılarında dolaşan akım, rotorun elektromıknatısa dönüşmesini sağlar. Böylelikle rotor eksenini boyunca rotor alanı oluşturulmuş olur. Rotora dışarıdan verilecek olan DC gerilim, stator sargılarında üretilen AC sinyalin AC/DC dönüştürücüler vasıtasıyla üretilmektedir. Şekil 2.15’de sargılı rotorlu senkron generatörün genel yapısı görülmektedir.



Şekil 2.15 : Sargılı rotorlu senkron generatör (Warne, 2005).

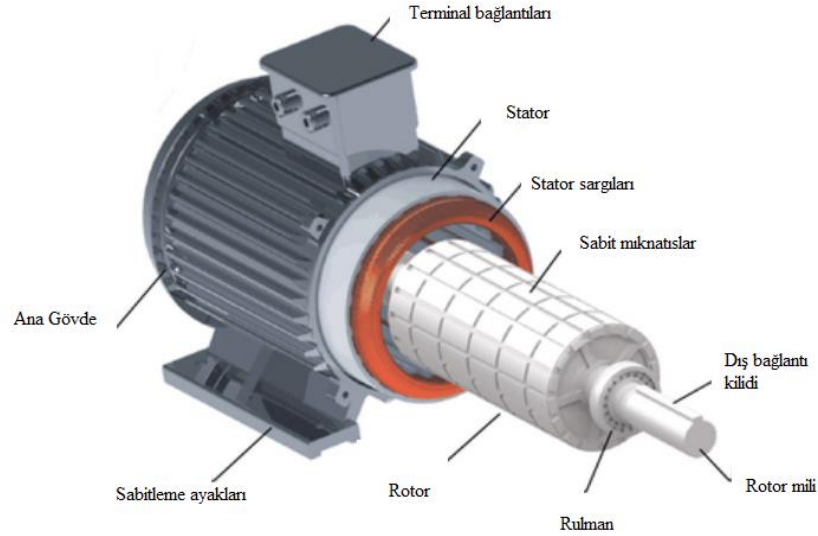
Sargılı rotorlu senkron generatörlerde, Şekil 2.16’da görüldüğü gibi çıkıntılı (çıkık) kutuplu ve silindirik kutuplu olmak üzere iki farklı rotor yapısı vardır. Çıkıntılı kutuplu rotorlarda, statorla rotor arasında kalan hava aralığı değişken olup, rotor kutup sayısı, silindirik rotora nazaran daha fazla olmaktadır. O yüzden düşük devirli sistemlerde karşımıza çıkmaktadır. Silindirik kutuplu rotorda ise stator-rotor hava aralığı sabit olup, rotor kutup sayısı, çıkıntılı kutuplu senkron generatörlere göre daha azdır. O yüzden yüksek devirli sistemlerde kullanılmaktadır (Öner ve diğ, 2008)



Şekil 2.16 : Sargılı rotorlu senkron generatör rotor çeşitleri (a) Silindirik kutuplu rotor (b) Çıkıntılı kutuplu rotor.

2.7.3.2 Sabit mıknatıslı senkron generatör

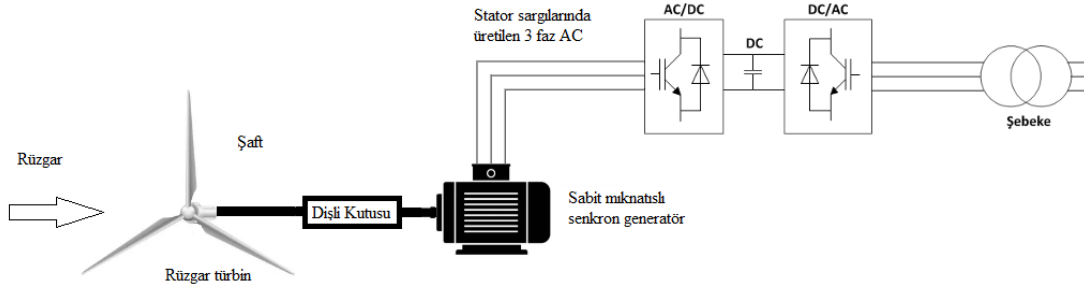
Bu generatörlerde dışardan uyarıtıma gerek kalmaksızın, rotor alanı, rotor eksenine üzerine gömülü vaziyette bulunan güçlü mıknatıslarla elde edilir. Şekil 2.17’de Greefenergy markasına ait SMSG’de görüldüğü üzere, fırça, kollektör dilimi ve rotorda sargı yoktur



Şekil 2.17 : Greefenergy firmasına ait SMSG’nin yapısı.

Şekil 2.18’de şebekeye bağlantı prensip şeması verilen SMSG’lerde, uyarıtım sargısı yerine kalıcı mıknatıslarının olması, geleneksel senkron makinalara nazaran güç yoğunluklarının daha fazla olmasını ve daha yüksek verime sahip olmalarını sağlamıştır. Ancak kullanılan sabit mıknatısların maliyetli oluşu, bu generatörün fiyatının, kısa devre çubuklu asenkron generatör, çift beslemeli asenkron generatör

ve sargılı rotorlu senkron generatöre göre daha yüksek olmasını sağlamaktadır (Cheng ve Zhu, 2014).

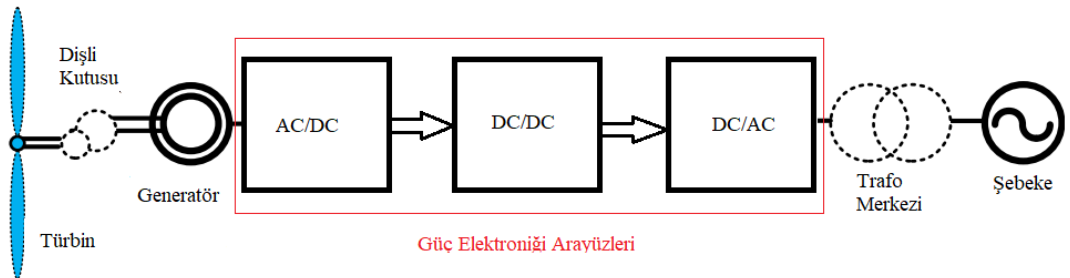


Şekil 2.18 : SMSG'nin şebekeye bağlantı prensip şeması.

Ayrıca SMSG'lerin güç katsayısının kontrol edilememesi ve sabit miktatların miktatlılık özelliklerinin yitirebilme durumunun olması olumsuz yönü olarak ortaya çıkmaktadır. (Yılmaz ve diğ., 2016). Kullanım alanı daha çok küçük güçlü (50 kW'tan küçük) rüzgar enerjisi sistemleridir (Marques ve diğ., 2003). Benzetim çalışmasında kullanılacak olan generatör, SMSG'dir.

2.8 Rüzgar Santrallerinde Güç Elektronikliği

Rüzgar santrallerinin Şekil 2.19'daki gibi generatör çıkışından elde edilen AC sinyalin, rüzgarın esme hızına göre hem frekansı hem de genliği değişmektedir. Elde edilen değişken genlik ve frekansa sahip AC sinyal, AC/DC dönüştürücülerle, frekans değişkenliği ortadan kaldırılmış, genliği ise güç sistemlerinin DC/DC dönüştürücü arayüzleri ile kontrol edilebilir DC ye dönüştürülmektedir. Santralin şebeke bağlantısı için elde edilen DC sinyal, DC/AC dönüştürücülerle tekrar sabit frekanslı AC sinyallere dönüştürülecektir (Alzahrani, 2023).



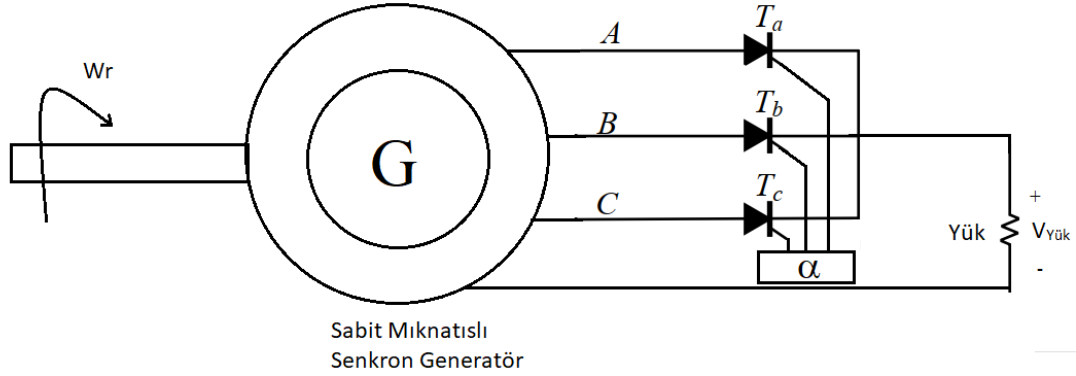
Şekil 2.19 : Rüzgar santralinin enerji üretim ve dönüşüm yapısı.

AC/DC dönüştürücüler, güç elektronikliği konularının içinde önemli bir alana sahip olmakla beraber, faz sayısına, çıkış sinyal şekline ve kontrollü olup olmamasına göre

çeşitlenmektedir (Altıntaş, 2008). Benzetim çalışmasında üç fazlı alternatif akımın DC dönüşümü, kontrollü doğrultucu (SCR) kullanılarak gerçekleştirilecektir.

2.8.1 AC/DC kontrollü doğrultucu

Üç fazlı kontrollü doğrultucu olarak kullanacağımız devremizde ana anahtarlama elemanı tristördür. Şekil 2.20 de görüldüğü gibi üç faz, tristörün anoduna bağlanacak, katotlar kısa devre edilerek yüke bağlanacaktır.



Şekil 2.20 : SMSG çıkışına bağlanan AC/DC kontrollü dönüştürme devresi.

Gate ucundan değiştirilecek tetikleme açısı (α) ile yük üzerindeki çıkış gerilim değeri kontrol edilir. α ile yük üzerindeki gerilim değeri (V_{dc}) ise denklem 2.1 ve 2.2 ile hesaplanır (Alzahrani, 2023).

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_{pk} \cos(\alpha)}{2\pi} , \quad 0 < \alpha < \frac{\pi}{6} \quad (2.1)$$

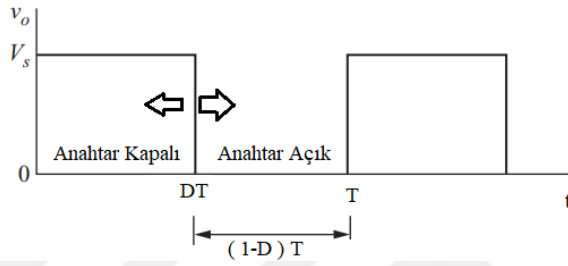
$$V_{dc} = \frac{3V_{pk}}{2\pi} \left[1 + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) \right] , \quad \frac{\pi}{6} < \alpha < \frac{5\pi}{6} \quad (2.2)$$

Denklem 2.1 ve 2.2' de bahsedilen V_{dc} yük üzerindeki gerilim değeri, α tetikleme açısı ve V_{pk} ise Maksimum faz gerilimidir.

2.8.2 DC-DC dönüştürücü

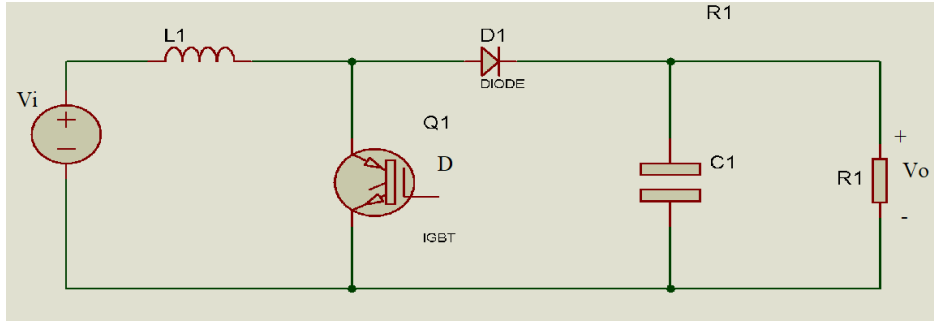
DC-DC dönüştürücüler, DC kaynaklarda farklı DC gerilim seviyesi elde etmede kullanılan temel güç elektroniği devreleridir. Yenilenebilir enerji sistemlerinde de güç takibi için kontrol devreleridir. Mekanik bir sensör kullanılmadığında, devre girişinden alınan akım ve gerilim değeri bilgisi ile MGNT yapılır. Benzetim çalışmasında kullanılan sabit mıknatıslı senkron generatörün, rotor devresinde herhangi bir uyarım sargısının olmaması, MGNT işleminin DC-DC dönüştürücü

üzerinden gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. DC-DC dönüştürücülerde çıkışta istenen gerilim seviyesinin, giriş gerilim seviyesine göre dizayn edilen topolojik yapı ve kullanılacak olan elemanların bağlantılarının değişik kombinasyonları ile buck, boost, buck-boost, cuk, sepic ve zeta olmak üzere isimlendirilmektedir. Gate sinyali, DC-DC dönüştürücüde kullanılan anahtar elemanın kontrol ucuna verilerek gerilim seviyesi değiştirilir. Şekil 2.21’de görülen T periyotlu sinyalin içinde bulunan (görev çevrimi) DT noktası değiştirilerek gerçekleştirilir. Yapılacak benzetim çalışmasında, sadece boost dönüştürücü kullanıldığından, sadece bu tip dönüştürücü ile ilgili bilgi verilmiştir.



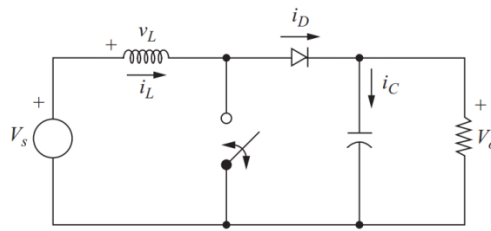
Şekil 2.21 : T periyotlu sinyalde DT görev çevrimi.

Şekil 2.22’de görülen boost dönüştürücü, çıkışta yük üzerindeki gerilim (V_o), giriş gerilim (V_i) değerinden büyük olan dönüştürücü tipidir.

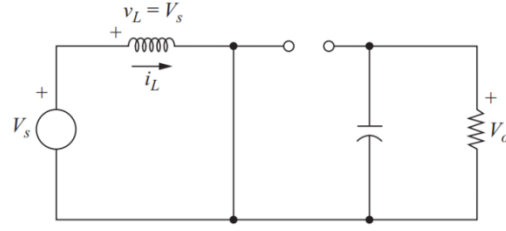


Şekil 2.22 : Boost dönüştürücü devresi.

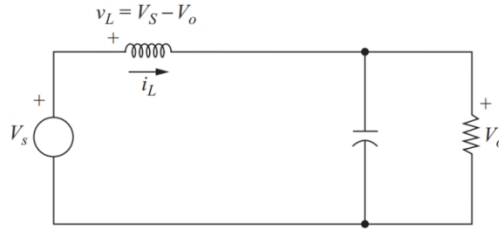
Boost devresinde kullanılan anahtar elemanın açık (kesimde) ve kapalı (iletimde) olma durumları ayrı ayrı incelendiğinde;



(a)



(b)



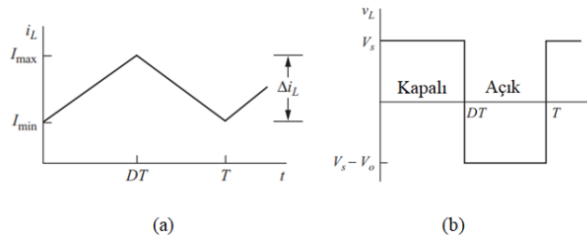
(c)

Şekil 2.23 : (a) Boost devresi (b) Anahtar iletimde devresi (c) Anahtar açık devresi.

Şekil 2.23 (a)'da boost devresinde bulunan elemanların üzerindeki akım, gerilim değerleri, yönleri verilmektedir. Şekil 2.23 b'de anahtar görevi gören elemanın kapalı olması yani iletimde olma durumu incelendiğinde; bobin üzerindeki gerilim, kaynak gerilimine eşit, diyot ters polarlanmış ve bobin üzerindeki gerilim, denklem 2.3 ile hesaplanır;

$$V_L = V_S = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'de verilen V_L bobin üzerindeki gerilim değeri, L bobin endüktans değeri, V_S kaynak gerilimidir.



Şekil 2.24 : Boost dönüştürücü akım ve gerilim dalga şekilleri (a) Bobin üzerinden geçen akım (b) Bobin gerilimi-zaman grafiği.

Şekil 2.24 (a)'da bobinden akımın değişiminin sabit olduğu, Şekil 2.24 (b)' de bobin gerilimi göz önüne alınarak, bobin akımının değişimi denklem 2.4 'deki gibi olur,

$$(\Delta I_L)_{Kapalı} = \frac{V_S DT}{L} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4’de verilen ΔI_L bobin akımındaki değişim, DT anahtarın kapalı kalma süresini vermektedir. Şekil 2.23 c’de anahtar elemanın açık olduğu durum analiz edildiğinde bobin üzerindeki gerilim, denklem 2.5’deki gibi olur,

$$V_L = V_S - V_O = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5’de verilen V_O çıkış gerilim değerini vermektedir. Şekil 2.24 a’daki grafiklerden görüldüğü gibi bobin akımının değişimi sabit bir değişimdir, buradan bobin akımının değişimi denklem 2.6’daki gibi elde edilir.

$$(\Delta I_L)_{Açık} = \frac{(V_S - V_O)(1 - D)T}{L} \quad (2.6)$$

Denklem 2.6’da verilen $(\Delta I_L)_{Açık}$ anahtar açık pozisyonunda bobinden geçen akımın değişimidir. Kararlı durum analizi yapıldığında bobin gerilimindeki net değişim sıfır olmalı, bunun için denklem 2.4 ve 2.6 kullanılarak,

$$(\Delta I_L)_{Kapalı} + (\Delta I_L)_{Açık} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{V_S D T}{L} + \frac{(V_S - V_O)(1 - D)T}{L} = 0 \quad (2.8)$$

$$V_S (D + 1 - D) - V_O(1 - D) = 0 \quad (2.9)$$

$$V_O = \frac{V_S}{(1 - D)} \quad (2.10)$$

Sırasıyla denklem 2.7, 2.8, 2.9 kullanılarak, çıkış gerilim denklem 2.10 elde edilir. Çıkış geriliminin denklemine göre, anahtar sürekli açıksa giriş gerilimi çıkış gerilimine eşittir, D görev çevrimi sıfırdan farklı değerler almaya başladığında ise giriş geriliminden daha büyük değerler almaya başlar (Hart, 2011).

3. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİ VE YÖNTEMLERİ

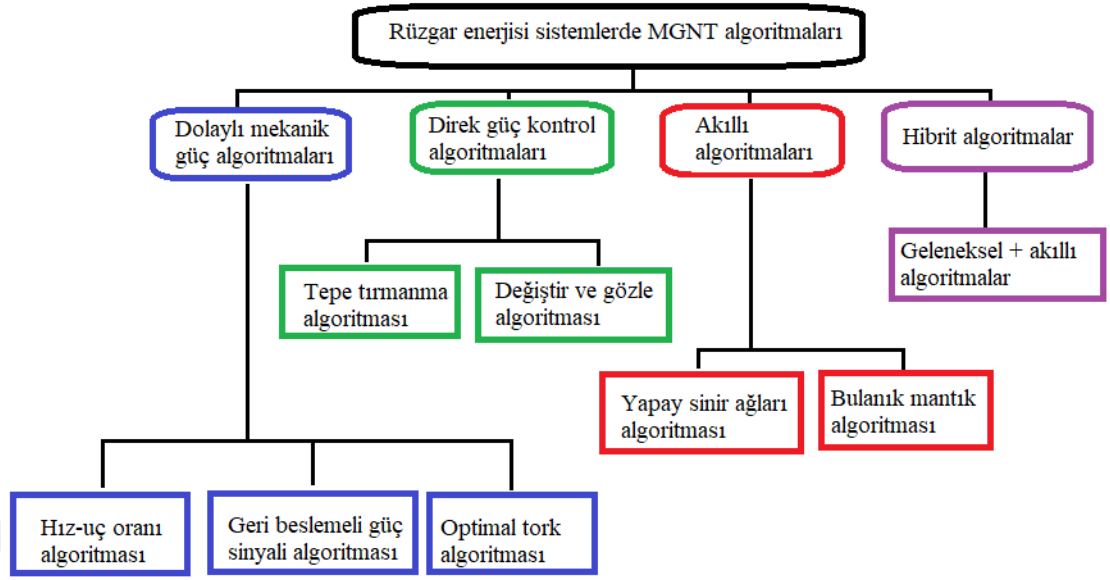
MGNT, değişken koşullar altında çalışan yenilenebilir enerji sistemlerinde, bir önceki mevcut koşullarda elde edilmiş maksimum güç değerinden, şimdiki mevcut koşullara göre elde edilecek maksimum güç değerine geçişi sağlama ve bunu sonraki her an için tekrar gerçekleştirme çabası olarak tanımlanabilir. Bunun için kullanılan yöntemlere MGNT yöntemleri denir. Gerek güneş enerjisi sistemlerinde gerekse rüzgar enerjisi sistemlerinde bu yöntemler, sistemden alınacak olan sayısal veriler ile gerçekleştirilir. Rüzgar enerjisi sistemlerinde, MGNT için rüzgar türbininin kanat uzunluğu, kanat hatve açısı, türbin yön kontrolü, fren kontrolü, dişli kutusunda oran kontrolü, kullanılan generatörün tüm elektrik tahrik ve fiziksel hız kontrolleri, generatör eşdeğer devre üzerinde kontrol edilebilir tüm değerler, güç elektroniği katında bulunan tüm kontrol edilebilir parametreler (akım, gerilim), doğrultma ve dönüştürme devrelerinde kullanılan anahtar elemanının açı kontrolleri, geçmiş dönemden elde edilen veri setleri kullanılabilir. Hangi yöntemin hangi durumlarda en doğru olduğu, maliyet analizleri, ön bilgi ihtiyaçları, uygulanabilirlik, karmaşıklık gibi değerlendirme kriterleri ile yöntem seçimine gidilir.

3.1 MGNT Yöntemleri

Değişken rüzgar etkisinden bulunan rüzgar santrallerinde kullanılan MGNT yöntemleri Şekil 3.1'de gösterilen sınıflandırma ile direk elektrik gücü, dolaylı mekanik güç, hibrit algortimalar ve akıllı algortimalar olmak üzere 4 farklı sınıflandırma mevcuttur (Zaid ve diğ, 2024).

3.1.1 Dolaylı mekanik güç algoritmaları

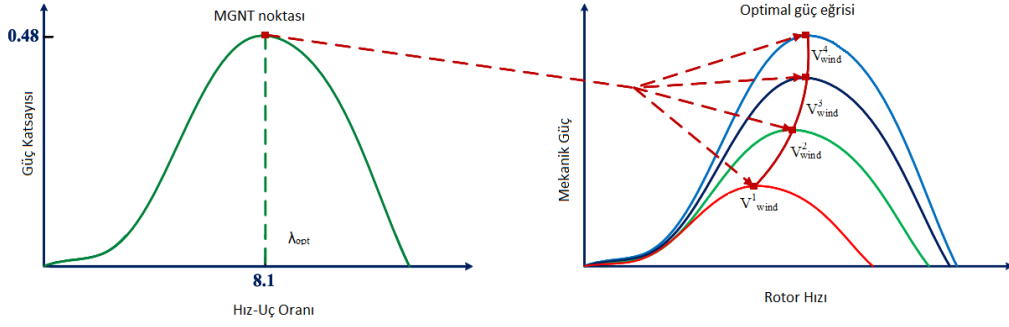
Rüzgar türbinlerinde mekanik gücü etkileyen temel faktörler; rüzgar hızı, kanat uzunluğu, hız-uç oranı (λ), kanat hatve açısı (β) ve sabit değer olarak kabul edilen türbine ait üretim parametreleridir. Dolaylı mekanik güç algoritmaları, rüzgar hızı hariç olmak üzere, bu parametrelerin dolaylı veya direk kontrol edilmesi ile çalışmaktadır.



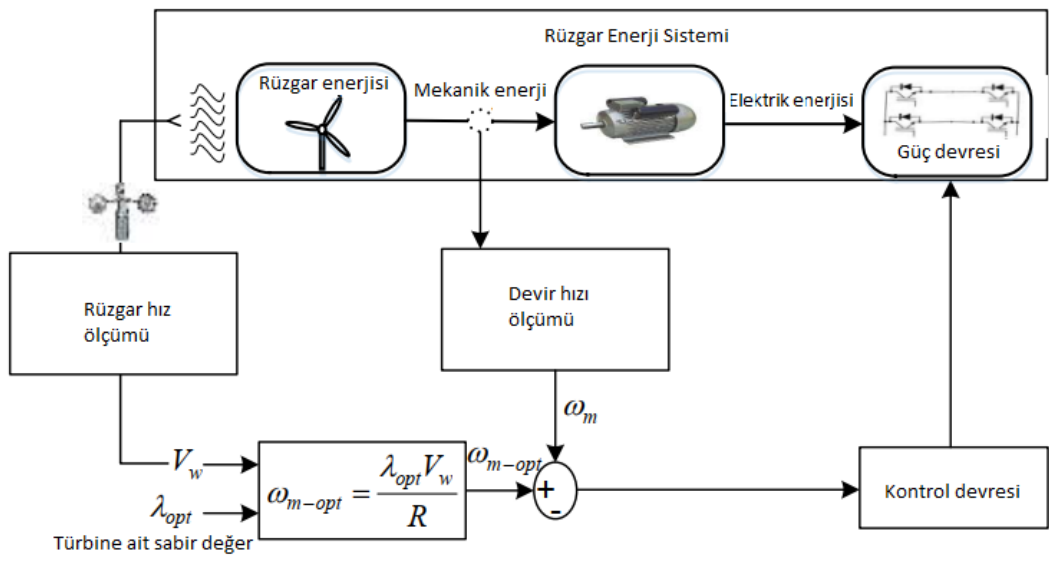
Şekil 3.1 : Rüzgar enerjisi sistemlerinde MGNT algoritmaların sınıflandırılması.

3.1.1.1 Hız-uç oranı algoritması

Değişken rüzgar hızlarında, kanat ucu ile rotor hızı arasındaki oranı, optimum değerde tutma prensibi ile gerçekleştirilen, uygulama prensiplerinin basit ancak ölçme ve uygulaması maliyetli olan bir yöntemdir. Burada optimum değer, mevcut durumda rüzgar hızı ile elde edilecek olan gücün maksimum olmasını sağlayacak orandır. Rüzgar düşük hızlarda kanat boşluklarında güce dönüşmeden geçme oranı artacak, yüksek hızlarda ise kanat alanından geçiş engellenecektir. Yavaş ve hızlı rüzgar hız skalasında, türbine çarpacak ve kinetik enerjiden mekanik enerjiye dönüşecek her rüzgar hızı için bir optimum hız-uç oranı vardır ve bu değer rotor tarafında sağlanarak, Şekil 3.2’de görüldüğü gibi farklı rotor hızları için generatörde maksimum güç sürekli üretilmiş olur (Mousa ve diğ, 2019). Türbin giriş gücünü maksimum yapmak amacıyla her rüzgâr hızında pervane farklı bir hızla dönmelidir. Bu değişken hızı sağlamak için Şekil 3.3’de verilen bağlantı şemasına göre generatör tarafındaki güç elektroniği çeviricisi anahtarlanır (Yaylacı ve Yazıcı, 2016).



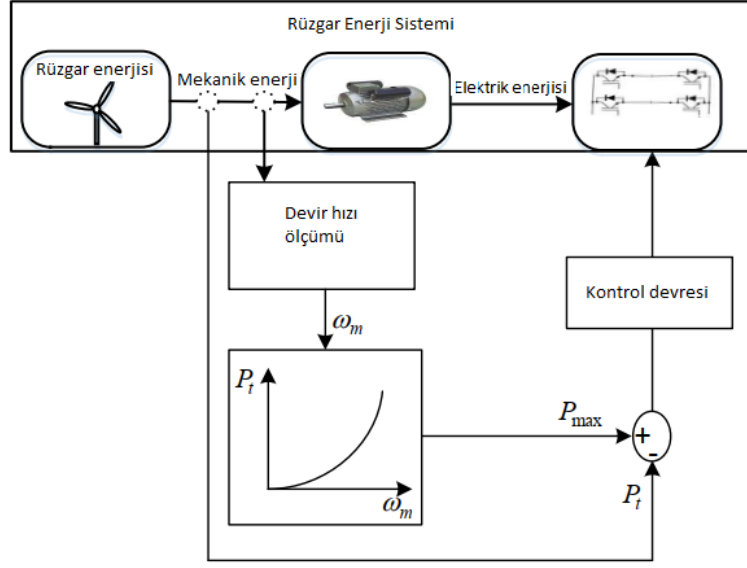
Şekil 3.2 : Hız-uç oranı rotor hızı ve mekanik güç arasındaki ilişki grafiği.



Şekil 3.3 : Hız-uç oranı algoritma uygulama devresi.

3.1.1.2 Geri beslemeli güç sinyali algoritması

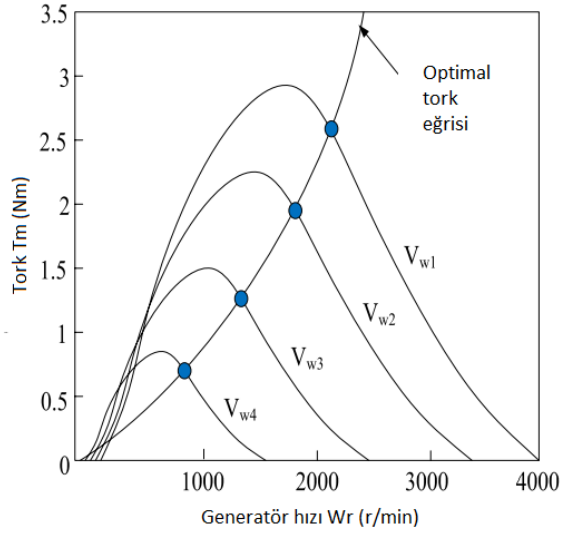
Optimal tork yöntemi ile aynı çalışma metoduna sahiptir, performans ve karmaşıklık düzeyleri belirleyici olur. Şekil 3.4’de görülen devrede, optimum güç, önceden elde edilmiş olan güç-hız eğrileri kullanılarak üretilir. Rotor devir hızı veya mevcut mekanik güç bilgisinden elde edilen hata değeri, kontrol devresinde işlenerek optimum güç üretilmeye çalışılır (Yaylacı ve Yazıcı, 2016).



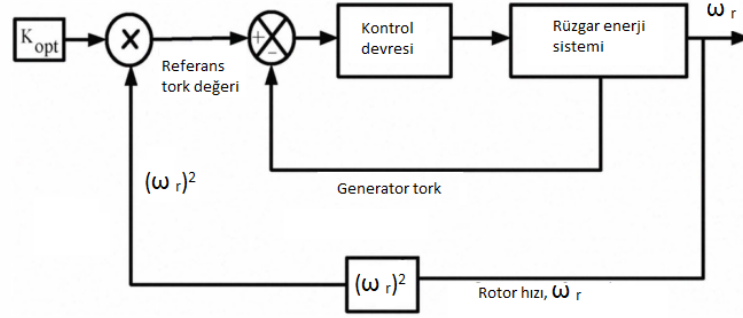
Şekil 3.4 : Geri beslemeli güç sinyali algoritma uygulama devresi.

3.1.1.3 Optimal tork algoritması

Bu algoritmada maksimum güç, generatör tork kontrolü ile elde edilir. Şekil 3.5'te verilen tork/rotor hız eğrisine göre, rotordaki her hız değişimine karşılık, generatöre ait yeni referans tork değeri meydana gelir (Pangedaiah ve diğ, 2021). Kontrol devresinde işlenmek üzere, eğriden alınan referans tork değeri ile Şekil 3.6'daki generatörden üretilen tork değeri karşılaştırılır. Kontrol devresi ile generatörün torku yeniden düzenlenerek, generatörün her an maksimum tork değeri elde etmesi veya o değere yaklaşması sağlanır (Abdullah ve diğ, 2011).



Şekil 3.5 : Optimal tork eğrisi.



Şekil 3.6 : Optimal tork algoritma yöntemi blok şeması.

3.1.2 Direk güç kontrol algortimaları

Dolaylı güç kontrol algortimaları, mekanik güç üzerinden MGNT gerçekleştirirken, direk güç kontrol yöntemleri, çıkışta üretilen elektrik gücü üzerinden MGNT gerçekleştirirler. Güneş enerji sistemlerinde de karşımıza çıkan bu algoritmalar temel olarak, tepe tırmanma algoritmaları ile DVG yöntemidir. Bu çalışmada tepe tırmanma algoritması olarak AI metodu incelenecektir.

3.1.2.1 Tepe tırmanma algoritması (artırımlı iletkenlik)

Bu algortimada temel yaklaşım, kullanılacak MGNT yönteminin sistem parametreleri uyarılacak olan DC-DC dönüştürücünün girişinden alınan akım ve gerilim bilgisi ile hesaplanacak iletkenliğin işlenmesi ile gerçekleşecektir. Şekil 3.7’de uygulanacak algoritma için iletkenlik hesabı;

DC-DC dönüştürücü gücü,

$$P = IV \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de iki tarafın gerilime göre kısmi türevi alınırsa;

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \partial(VI) \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’den,

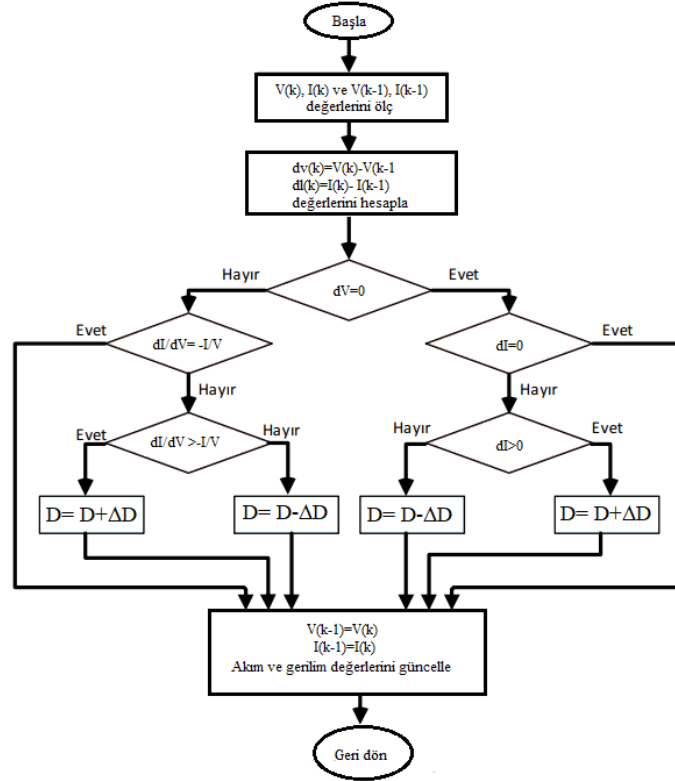
$$\frac{\partial P}{\partial V} = I + V \frac{\partial I}{\partial V} \quad (3.3)$$

Denklem 3.3’deki ifade, maksimum güç noktasına göre sıfıra eşit olacağından,

$$\frac{\partial P}{\partial V} = 0 \quad (3.4)$$

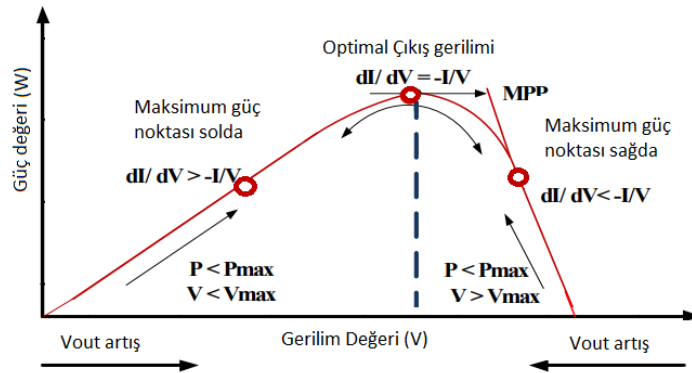
Sonuç olarak AI yöntemi için denklem 3.5 elde edilir,

$$\frac{\partial I}{\partial V} = -\frac{I}{V} \quad (3.5)$$



Şekil 3.7 : AI algoritması.

Arttırımlı iletkenlikte uygulanacak olan algortmada, elde edilecek akım gerilim değerlerine göre, Şekil 3.8’de görüldüğü gibi iletkenlikten alınan oranın durumuna ve maksimum güç eğrisinin sağında veya solunda olma durumuna göre DC-DC dönüştürücünün görev çevriminde anahtar elemanın, bir periyot içinde iletimde olma ve kesimde olma oranı değiştirilerek maksimum nokta araması gerçekleştirilir (Ay ve Arserim, 2019).

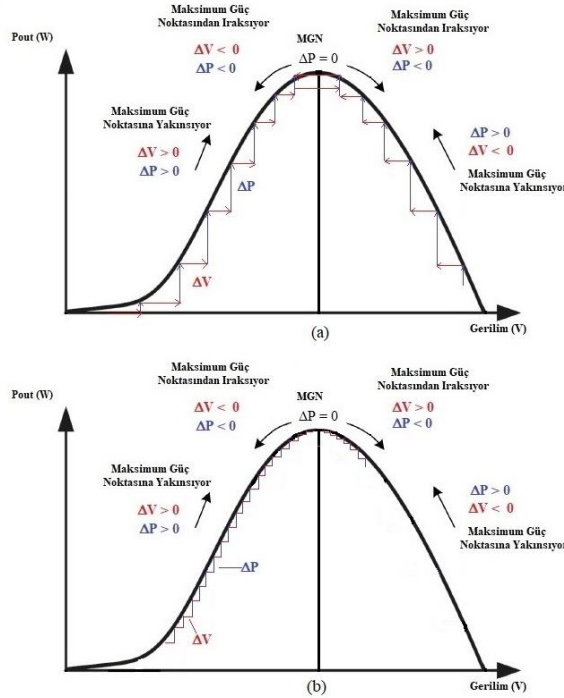


Şekil 3.8 : AI güç-gerilim grafiği.

3.1.2.2 Değiştir ve gözle algoritması

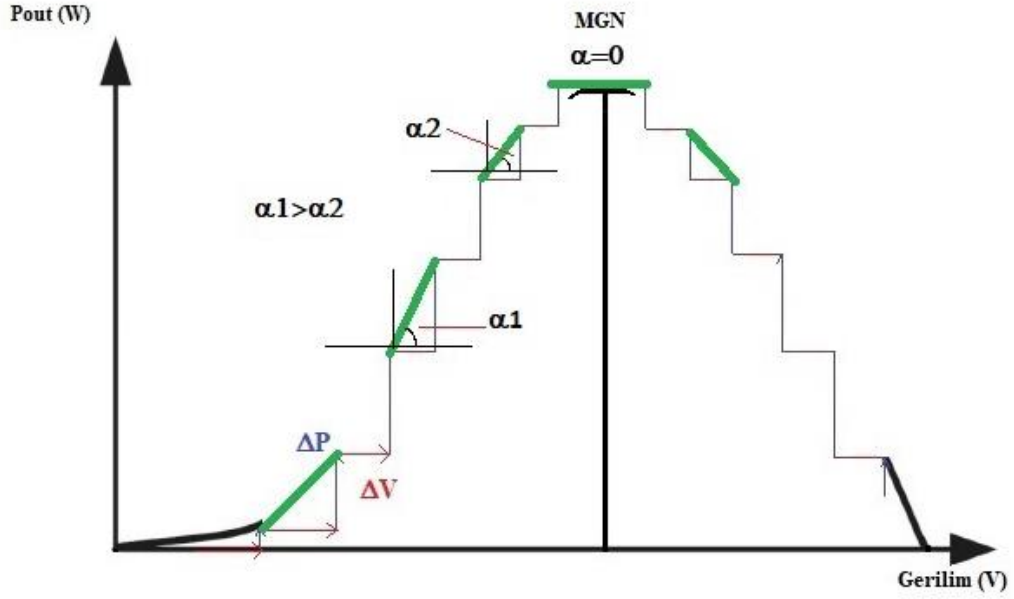
DVG metodu, sistemden alınan giriş bilgilerinin değiştirilerek, sistem çıkışından alınan bilgilerin değişikliğine göre sisteme müdahale edilen bir yaklaşıma sahiptir. Bu yöntem rüzgar enerjisi santrallerinde, uygulama kolaylığı ve düşük maliyetinden dolayı sıklıkla kullanılmaktadır. Rotor hızındaki değişimler, stator geriliminde değişimlere neden olur. Kullanılan DC-DC dönüştürücü devresi, gerilim değişimlerinde elde edilen çıkış gücünü takip ederek, görev döngüsü için uygulanan DVG algoritması sayesinde, görev çevrimini artırma ve azaltma şeklinde değiştirerek maksimum gücün takip edilmesini sağlar (Shahi ve Bhattacharjee, 2018).

DVG yöntemi, düşük maliyet ve basitlik itibari ile tercih edilirken, maksimum noktaya ulaşmada veya yaklaşımda salınımlı sonuçlar alınmasına neden olur. Salınımın az ve tepki süresinin en kısa olması için, algortimada kullanılacak olan adım aralığı büyük önem arz etmektedir (Mansouri ve diğ, 2023). Şekil 3.9' da verilen şekilde görüldüğü gibi, adım aralığı büyük seçildiğinde maksimum noktaya yakınsama hızlı fakat maksimum güç noktasında salınıma neden olmakta, küçük adım seçildiğinde ise maksimum noktaya yakınsama süresini uzatmaktadır (Mousa ve diğ, 2019).

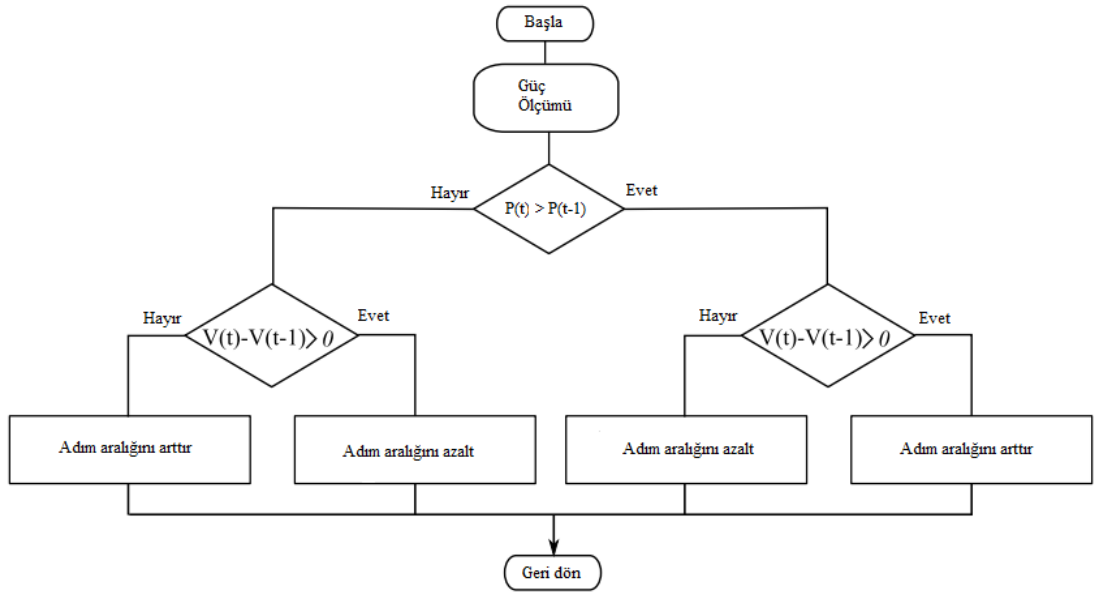


Şekil 3.9 : DVG metodunda (a) Büyük adım aralığı (b) Küçük adım aralığı.

Şekil 3.10’da verilen şekilde görüldüğü gibi adaptif adım aralığı, güç değişimindeki artış oranının yüksek olması durumunda adım aralığının arttırılması, güç değişimindeki artış oranının düşük olması durumunda ise adım aralığının azaltılmasıdır. Adaptif adım aralığının uygulanması, maksimum güce ulaşma hızının artmasına neden olurken, maksimum noktada salınma engel olur (Gouabi ve diğ, 2023). Bu yöntem, zayıf rüzgar hızlarında verimi düşüktür. DVG yöntemine ait algoritma akış diyagramı ise Şekil 3.11’de verilmiştir (Mansouri ve diğ, 2023)



Şekil 3.10 : DVG yönteminde adaptif adım aralığı.



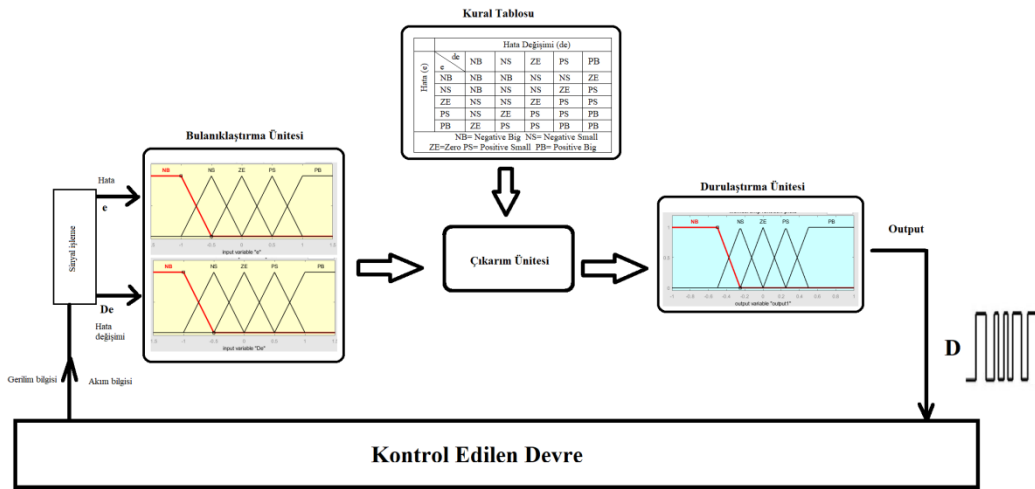
Şekil 3.11 : DVG algoritma akış diyagramı.

3.1.3 Akıllı algoritmalar

Direk ve dolaylı MGNT yöntemlerinden farklı olarak, sistemin matematiksel ifadelerine ihtiyaç duymaz ve sistemi etkileyen parametrelerden bağımsız olarak çalışır (Dipesh Kumar, 2016). Akıllı algoritma olarak isimlendirilen bu yöntemler, daha önce bilgi verilen yöntemlerin negatif özelliklerini gidermiş veya azaltmışlardır. BM yöntemi, tepki süresinin hızlı oluşu, sistem parametrelerinden bağımsız olması gibi avantajları vardır. Bir diğer akıllı algoritma olarak yapay sinir ağı, deneyimlenmiş bilgilerden, sistemin ihtiyaç duyduğu, elde edilmesi zor olan farklı bilgileri elde ederek kullanılmasını sağlayabilmektedir (Abdullah ve diğ., 2012).

3.1.3.1 Bulanık mantık yöntemi

BM, bilgiyi klasik 0-1 lojik mantıktan farklı bir bakış açısıyla, bilginin kendisini dilsel niteliklemlerle işleyerek kullanan bir yöntemdir. Şöyle ki 0 ve 1 aralığında sonsuz adet farklı değişken ve belirsizlik söz konusudur. Değişkenlerin ve belirsizliklerin ağırlığı, tamamen operatörün bilgisine ve tecrübesine bağlıdır. Şekil 3.12’de görüldüğü gibi BM sistemi 4 farklı üniteden oluşmaktadır.



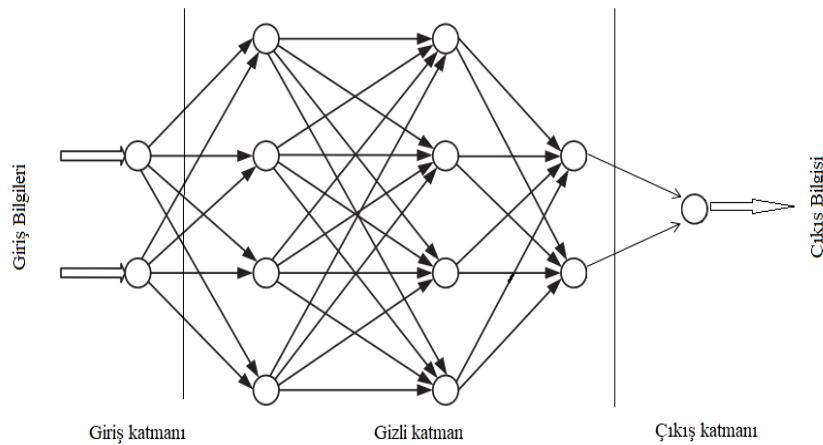
Şekil 3.12 : BM sistem üniteleri.

Bulanıklaştırma ünitesi, sistemin giriş katıdır ve sistemden alınan bilgileri, çeşitli üyelik fonksiyonları kullanarak, sözel nitelik kazandırılan, bilginin bulanıklaştırıldığı ünitelerdir. Kural tablosu ise, bulanıklaştırma ünitesine giren bilgilerin, dilsel niteliklerinin her birinin, birbirlerine göre ilişkilerinin ortaya koyulduğu ünitelerdir. Çıkarım ünitesi, bulanıklaşmış olarak giren bilgiyi, kural tablosundaki şartlara bağlı

olarak eğer-ise gibi mantıksal önermeler ile işleyen ünedir. Durulaştırma ünitesi, çıkarım ünitesinden alınan, artık kararı verilmiş olan çıkışın anlamlı bilgilere dönüştürüldüğü ünitedir. BM yönteminin verimli olmasında, tasarımcının sistem hakkında yeterli bilgi sahibi olarak, kural tablosunu sisteme uygun oluşturması etkilidir (Tiwari ve Ramesh, 2016).

3.1.3.2 Yapay sinir ağları

Dolaylı veya direk MGNT yöntemleri, deneyimlenmiş bilgilerden yoksun, anlık bilgiler ışığında çalışırlar. Buna karşılık YSA algoritması daha önceden elde edilmiş veri setlerini kullanarak, maksimum güç noktasını yakalamada ve tepki hızının artmasında daha iyi sonuçlar vermektedir (Kawashty ve diğ, 2023). YSA, bir sistemin karmaşık matematiksel modelini kullanmadan, geçmiş deneyimlerden elde edilmiş bilgi kümesi kullanılarak işletilen bir yöntemdir. Bir YSA'nın mimarisi üç katmandan oluşur: giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanları olmak üzere ve Şekil 3.13'te görüldüğü gibi üç katmanda bulunan düğüm sayısı değişir ve operatöre bağlıdır. Giriş bilgisi olarak; eğim açısı, terminal gerilimi, çıkış torku, rüzgar hızı, rotor hızı gibi sistemden alınacak temel bilgilerdir veya bunların kombinasyonu olabilir. Çıkış genellikle rüzgar türbininin güç elektroniği devresinden elde edilecek maksimum güç noktasına yaklaştırmak için kullanılan referans güç, rotor hızı, referans tork vb. gibi referans bilgilerdir. Maksimum noktaya ulaşmak, katmanlara atanan ağırlıklara, gizli katman tarafından kullanılan algoritma türüne ve farklı giriş-çıkış modelleri için sinir ağına verilen eğitime bağlıdır (Dipesh Kumar, 2016).



Şekil 3.13 : YSA yapısı.

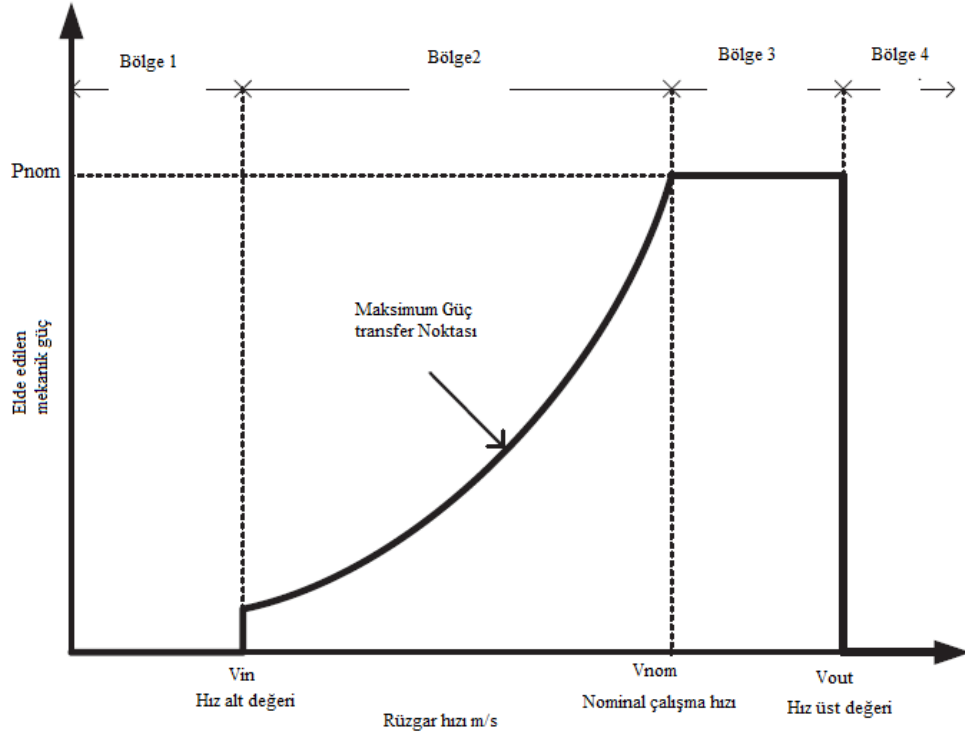
3.1.4 Hibrit algoritmalar

Hibrit algoritmalar, MGNT yöntemleri birleştirilerek ortaya çıkan ve bu birleşimde, yöntemlerin sahip olduğu dezavantajları azaltıp, avantajlı yönlerini ise daha verimli kullanmaya çalışan yöntemlerdir. Böylece klasik yöntemler ile akıllı yöntemler birleşerek yeni yaklaşımlar ortaya çıkmaktadır (Abdullah ve diğ, 2012). Her bir algoritmanın sahip olduğu dezavantajlar, hibrit yaklaşımlarla aşılabılır (Dipesh Kumar, 2016).



4. RÜZGAR SANTRALİNDE MEKANİK GÜÇ ÜRETİM FAKTÖRLERİ

Rüzgar enerjisi santrallerinde kontrol stratejisi Şekil 4.1’de görülen dört bölgeye göre yapılır. 1. ve 4. bölgede türbinin çalışması frenlenerek engellenir. 1. bölgede üretilen elektrik enerjisi maliyetleri karşılanamadığı için çalıştırılmazken, yüksek rüzgar hızına sahip 4. bölgede, türbinin güvenli çalışma sınırlarının dışına çıkmasına engel olmak için frenlenir. 3. bölge, rüzgarın nominal hızda eserek, maksimum gücün üretildiği bölgedir. 2. bölge ise rüzgar hızının, hız alt değeri ile nominal hız aralığında olduğu, MGNT yöntemlerinin uygulandığı bölgedir (Dipesh Kumar, 2016).



Şekil 4.1 : Rüzgar hızına göre rüzgar santrali kontrol bölgeleri.

Rüzgar enerjisi santralleri, kinetik enerjii mekanik enerjiye dönüştüren türbinlere ve mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren generatöre ve güç kontrol ünitelerine sahip, enerji dönüşümü gerçekleştiren dinamik makinelerdir. Bu dönüşümün temel faktörleri rüzgar hızı ve türbin üretim parametreleridir (Nasiri ve diğ., 2014). Buna göre üretilen mekanik güç, denklem 4.1’de verilmiştir.

$$P_m = 0.5 C_p(\lambda, \beta) \rho A V_w^3 \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de verilen, P_m türbinin mekanik çıkış gücünü, A türbinin kanatlarının tarama alanını, β bıçak hatve açısını, V_w rüzgâr hızını, λ kanat uç- hız oranını, C_p türbin performans katsayısını, ρ hava yoğunluğunu vermektedir. Kanat uç-hız oranı denklem 4.2’de verilmiştir:

$$\lambda = \frac{W_r \cdot R}{V_w} \quad (4.2)$$

Denklem 4.2’de verilen W_r rotor devir sayısını, R türbin çapını vermektedir. C_p katsayısı, λ ve β ile ilişkili olup, denklem 4.3’de verilmiştir.

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda_i \quad (4.3)$$

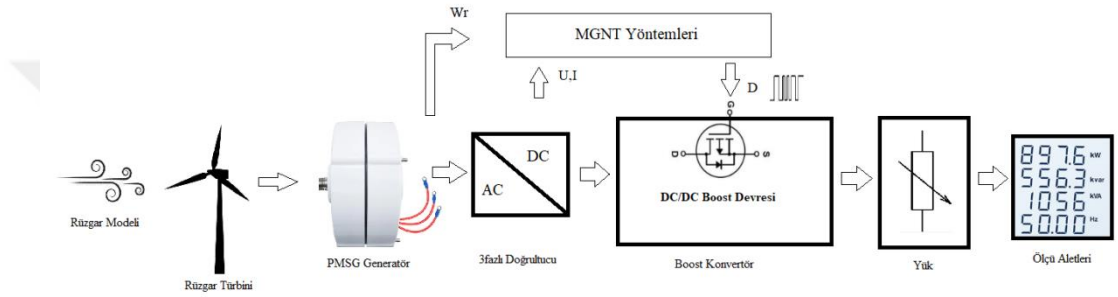
Denklem 4.3’de verilen C_{1-6} ifadeleri türbine ait imalat sabitleridir, $\left(\frac{1}{\lambda_i} \right)$ ifadesinin bağlı olduğu denklem 4.4 ‘de verilmiştir.

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4.4)$$

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Deneysel Çalışma Modeli

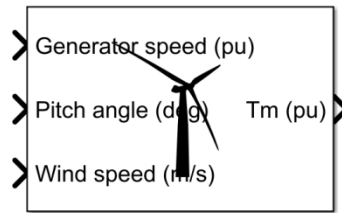
Şekil 5.1’de verilen model, tez çalışması için kullanılmış, Şekil 5.4’de verilen üç farklı rüzgar senaryosu üzerinden, 4 farklı MGNT yöntemi ayrı ayrı çalıştırılarak, sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.1 : Deneysel çalışma modeli.

5.2 Rüzgar Türbini

MATLAB/Simulink’de kullanılan rüzgar türbin bloğu Şekil 5.2’de verilmiştir. Türbine ait değiştirilebilir parametreler Çizelge 5.1 ‘de verilmiştir.

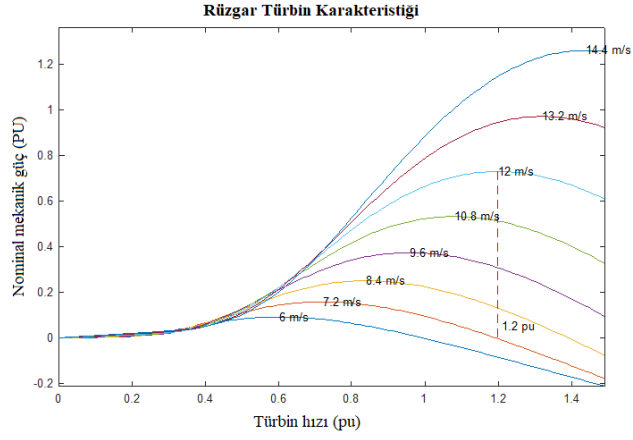


Şekil 5.2 : Benzetim programında kullanılan rüzgar türbin bloğu.

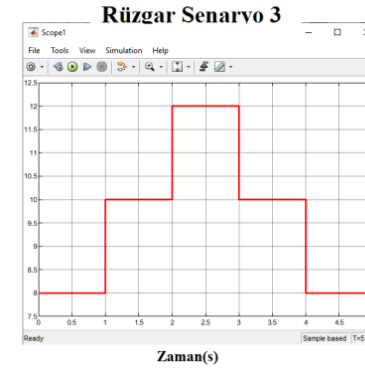
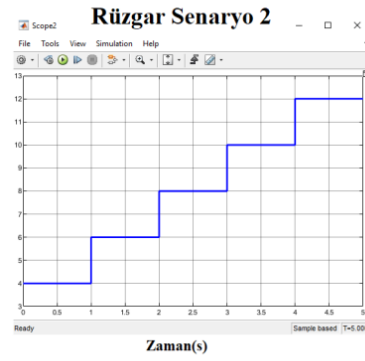
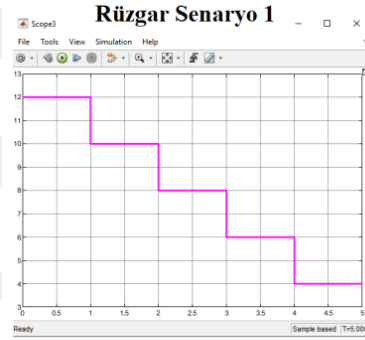
Çizelge 5.1 : Rüzgar Türbin Parametreleri.

Parametreler	Değerler
Nominal mekanik güç	10 kW
Genaratör görünür güç	10000/0.9 (VA)
Nominal Rüzgar hızı	12m/s

Benzetimde kullanılan rüzgar türbinine ait güç karakteristiği Şekil 5.3’de ve rüzgar senaryoları Şekil 5.4’de görülmektedir.



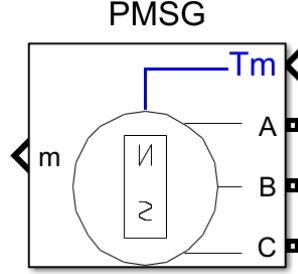
Şekil 5.3 : Rüzgar türbini güç karakteristiği.



Şekil 5.4 : Rüzgar senaryoları.

5.3 Generatör

MATLAB/Simulink’de kullanılan SMSG bloğu Şekil 5.5’de verilmiştir. Türbine ait değiştirilebilir parametreler Çizelge 5.2 ‘de verilmiştir.



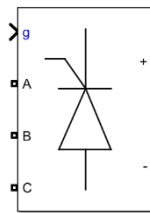
Şekil 5.5 : Benzetim programında kullanılan SMSG bloğu.

Çizelge 5.2 : SMSG Parametreleri.

Parametreler	Değerler
Stator sargı direnci (R_s)	0.05 Ω
Stator endüktans (L_s)	0.000635 H
Akı bağlantı katsayısı	0.192
Atalet	0.011 J (kgm^2)
Viskoz sönümlenme	0.001889 F(N.M.S)
Kutup çift sayısı	4
Statik sürtünme	0 T.f(N.M)
Faz sayısı	3
Rotor tipi	Silindirik kutuplu
Çıkış sinyal formu	Sinüsoidal

5.4 AC/DC Dönüştürücü

MATLAB/Simulink’de kullanılan AC/DC dönüştürücü bloğu Şekil 5.6’da verilmiştir. AC/DC dönüştürücü parametreleri Çizelge 5.3 ‘de verilmiştir.



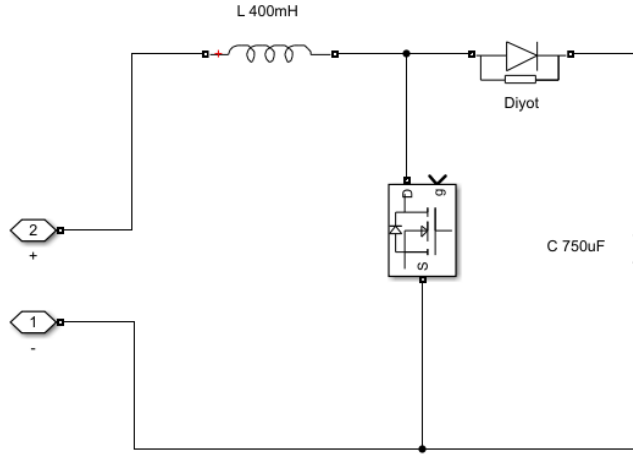
Şekil 5.6 : Benzetim programında kullanılan AC/DC dönüştürücü bloğu.

Çizelge 5.3 : AC/DC dönüştürücü Parametreleri.

Parametreler	Değerler
Faz sayısı	3
R_s	100k Ω
Kullanılan doğrultucu anahtar	Tristör
R_{on}	0.00001 Ω
V_f	0.8V

5.5 Boost Konvertör

MATLAB/Simulink’de kullanılan DC/DC boost dönüştürücü devresi Şekil 5.7’de verilmiştir. Boost devre elemanlarının parametreleri Çizelge 5.4 ‘de verilmiştir.



Şekil 5.7 : Benzetim programında kullanılan DC/DC Boost dönüştürücü devresi.

Çizelge 5.4 : Boost Konvertör devre eleman değerleri.

Parametreler	Değerler
L	400mH
C	750uF
Mosfete ait parametre değerleri	
R_{on}	0.1 Ω
L_{on}	0H
R_d	0.01 Ω
V_f	0.8 V
R_s	0.00001 Ω

5.6 MGNT Yöntemleri

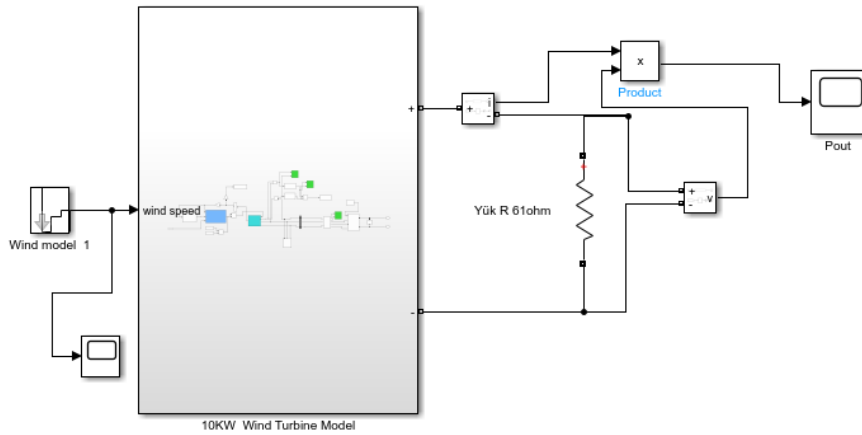
MGNT yöntemi olarak 4 farklı yöntem seçilmiş, ayrıca hiçbir MGNT yöntemi kullanılmadığı takdirde elde edilen sonuçlar ortaya konulmuştur. Sistemi test etmek üzere kullanılan yöntemler;

- Artırımlı iletkenlik
- Değişir ve gözle
- Bulanık mantık
- Yapay sinir ağları

Tüm yöntemlerde 61Ω değerinde omik yük kullanılmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

5.6.1 MGNT uygulanmamış devre

Tasarlanan benzetim programında, rüzgar türbini, generatör ve yük kısmı aynı olmak üzere herhangi bir MGNT yöntemi kullanmadan, yükün direk AC/DC doğrultucu çıkışına bağlandığı devre Şekil 5.8'de görülmektedir. Burada değişken rüzgar hızlarında yükün çektiği güç değerleri, simülasyon süresi boyunca analiz edilmek için alınmıştır.

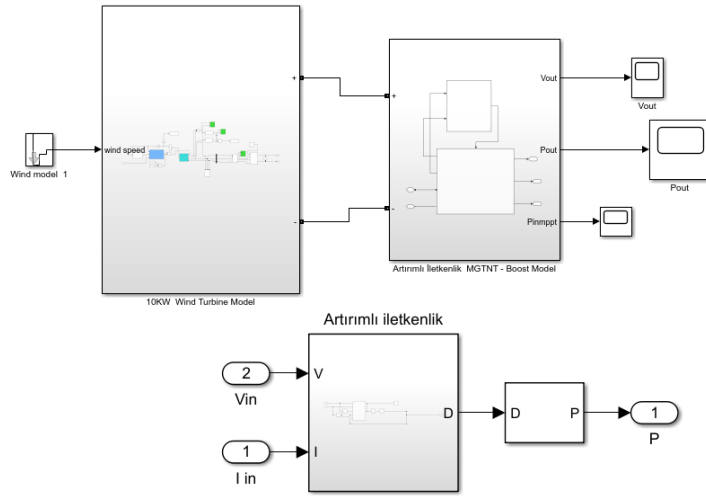


Şekil 5.8 : MGNT uygulanmamış MATLAB/Simulink benzetim devresi.

5.6.2 Artırımlı iletkenlik yöntem devresi

Tasarlanan benzetim programında, rüzgar türbini, generatör ve yük kısmı aynı olmak üzere, AI ve diğer MGNT yöntemleri, aynı değerler üzerinden maksimum güç noktası takibi yaptırılarak sonuçlar karşılaştırılacak, AI yönteminde boost konvertör

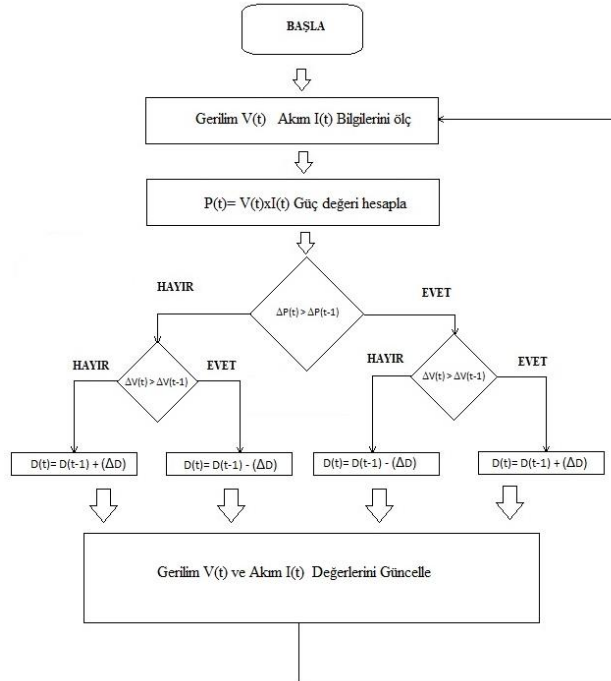
girişinden alınan akım ve gerilim değeri işlenerek MGNT yöntemi çalıştırılacaktır. Şekil 5.9'da AI yöntemine ait benzetim yöntem devresi görülmektedir.



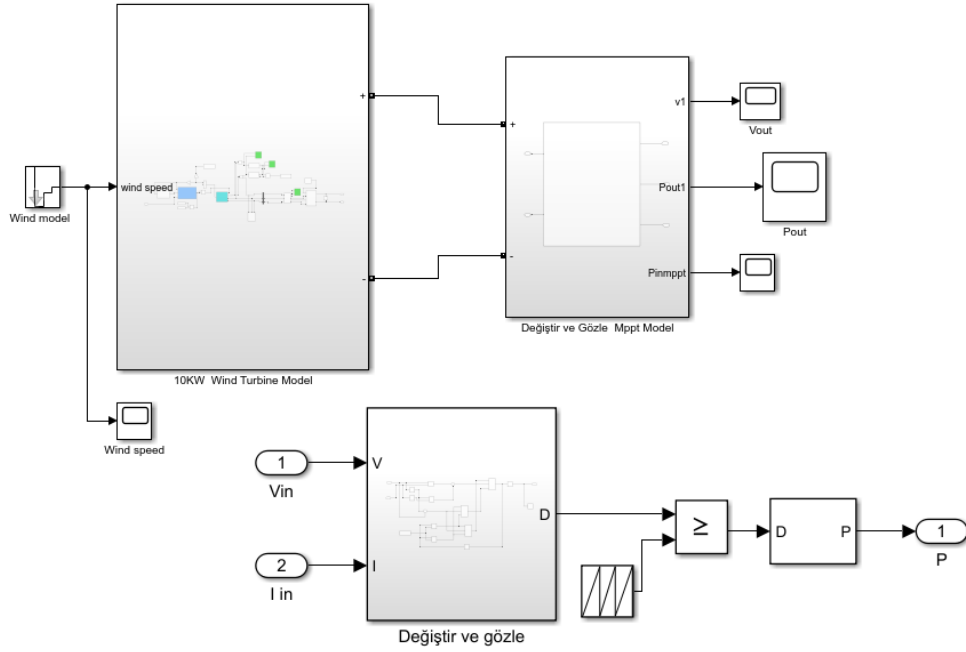
Şekil 5.9 : AI yöntemi MATLAB/Simulink benzetim devresi.

5.6.3 Değiştir ve gözle yöntem devresi

Şekil 5.10 da verilen algoritma, boost konvertör devresinin girişinden alınan akım ve gerilim bilgisi işlenerek, sabit adım aralığı olarak $D= 0.0001$ ile maksimum noktaya ulaşmak üzere çalıştırılacaktır. Şekil 5.11 'de ise benzetim devresi görülmektedir.



Şekil 5.10 : DVG algoritması.



Şekil 5.11 : DVG MATLAB/Simulink benzetim devresi.

5.6.4 Bulanık mantık yöntem devresi

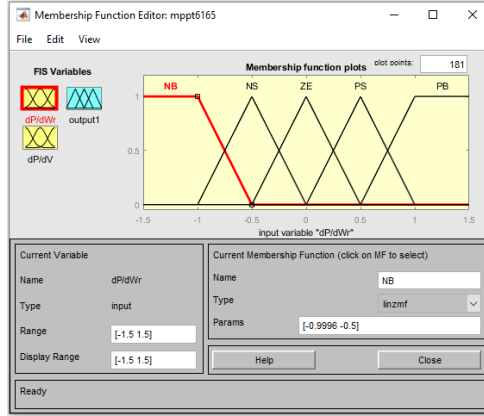
BM yöntemi için Çizelge 5.5’de verilen 5x5 = 25 lik bir kural tablosu oluşturulmuştur.

Çizelge 5.5 : BM kural tablosu.

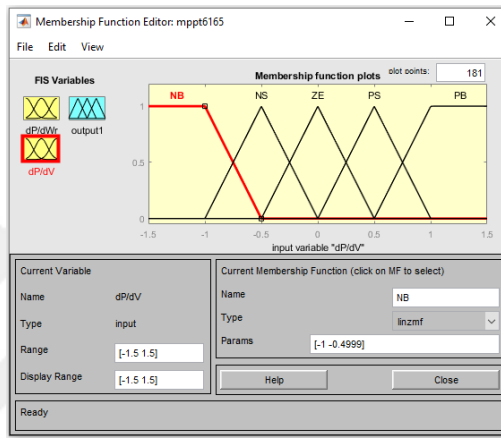
		Hata Değişimi (de)					
		$\Delta P/\Delta W_r$	NB	NS	ZE	PS	PB
Hata (e)	$\Delta P/\Delta V$						
	NB	NB	NB	NS	NS	ZE	
	NS	NB	NS	NS	ZE	PS	
	ZE	NS	NS	ZE	PS	PS	
	PS	NS	ZE	PS	PS	PB	
	PB	ZE	PS	PS	PB	PB	

NB= Negative Big NS= Negative Small ZE=Zero PS= Positive Small PB= Positive Big

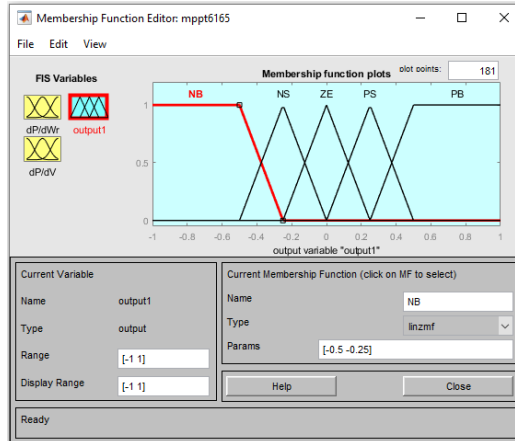
Şekil 5.12 ‘de ise güç değişimi oranı ile rotor devir sayısı değişim (dP/dW_r), güç değişimi ile gerilim değişim oranı (dP/dV) ve çıkış “output” için kullanılan üyelik fonksiyonları görülmektedir



(a)



(b)

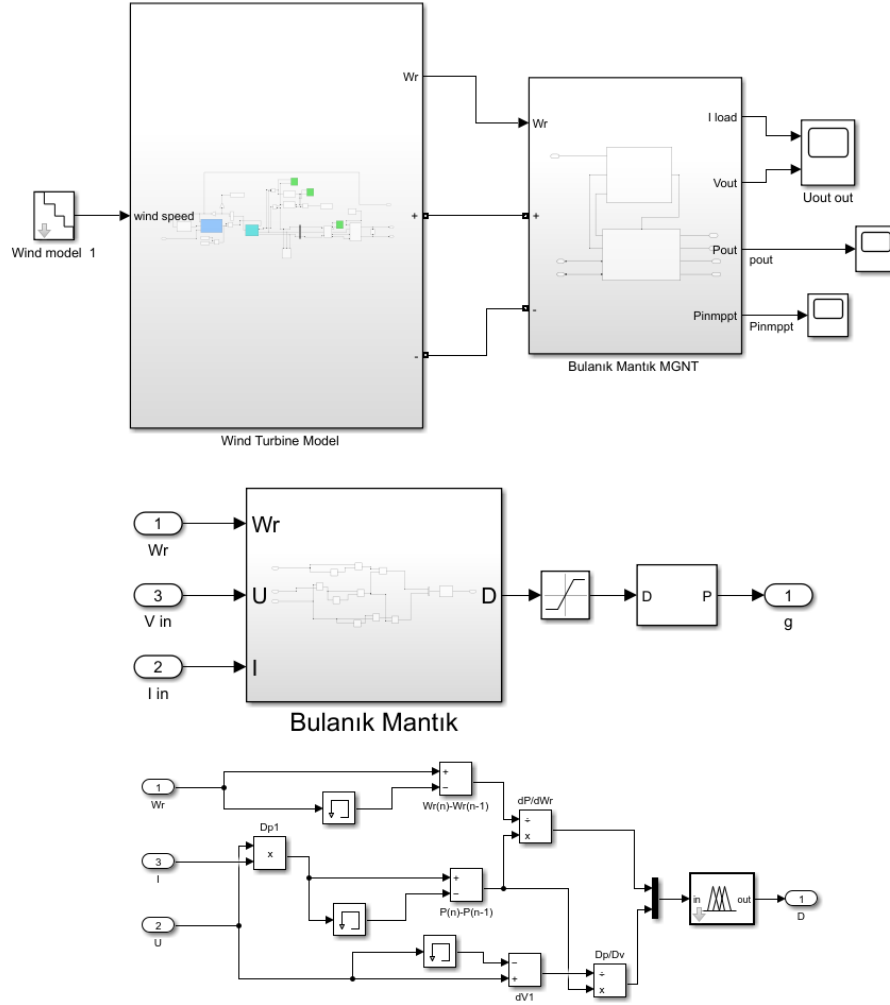


(c)

Şekil 5.12 : BM benzetiminde kullanılan (a) dP/dW_r (b) dP/dV (c) Çıkış output üyelik foksionları.

BM yönteminde, boost konvertör girişinden alınan akım ve gerilim bilgisi ile generatörün rotor devir sayısı işlenir. Boost devresinden alınan akım ve gerilim bilgisi ile güç değeri elde edilir, daha sonra güç, gerilim ve rotor devir sayılarının

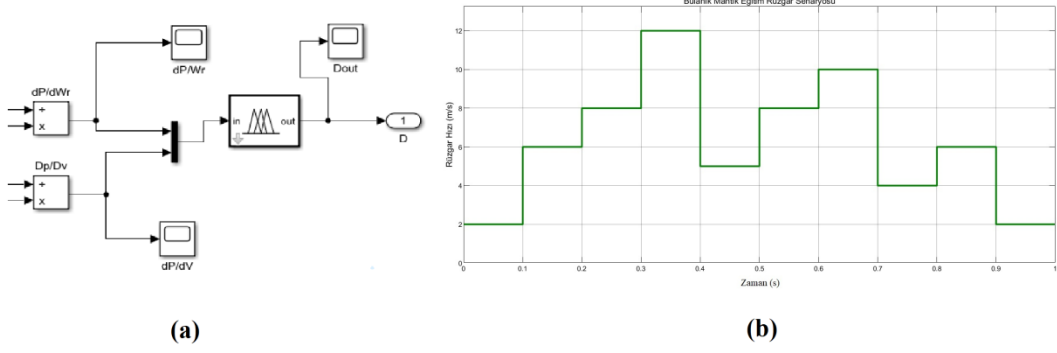
değişimlerinden elde edilen dP/dW_r , dP/dV oranları Şekil 5.12 'de görülen üyelik fonksiyonlarıyla işlenerek, BM devre çıkışında elde edilen D sinyali ile boost devresinin anahtarlama elemanı olan mosfetin gate ucu tetiklenmektedir. Şekil 5.13'de görülen benzetim devresinde elde edilen D sinyali ile üretilen PWM sinyali, dönüştürücünün görev çevrimini kontrol ederek, çıkış gücünde maksimum gücü üretmesi sağlanır.



Şekil 5.13 : BM MATLAB/Simulink benzetim devresi

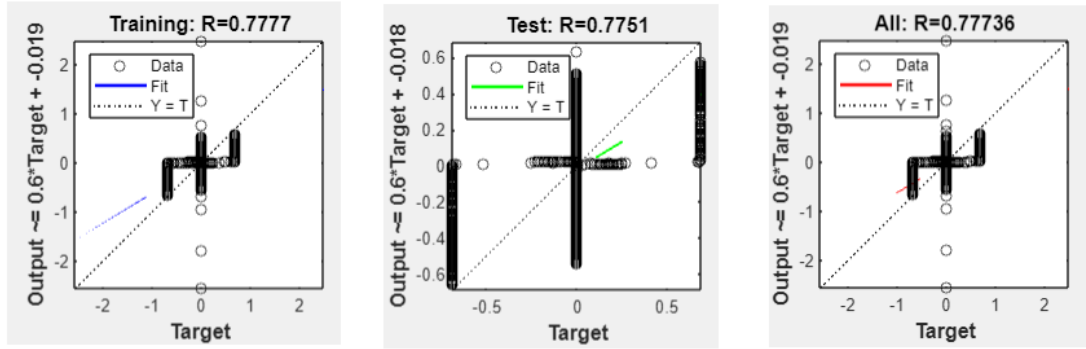
5.6.5 Yapay sinir ağları yöntem devresi

YSA yönteminin MATLAB/Simulink benzetiminde kullanılmak üzere giriş ve çıkış veri seti Şekil 5.14 a'da görülen BM yönteminin Şekil 5.14 (b)'de görülen 1 saniyelik bir rüzgar senaryosu kullanılarak elde edilmiştir. Kullandığımız veri setinde 20001x2'lik dP/dW_r ve dP/dV giriş bilgileri ve 20001x1'lik D_{out} (D) çıkış bilgisi kullanılmıştır.



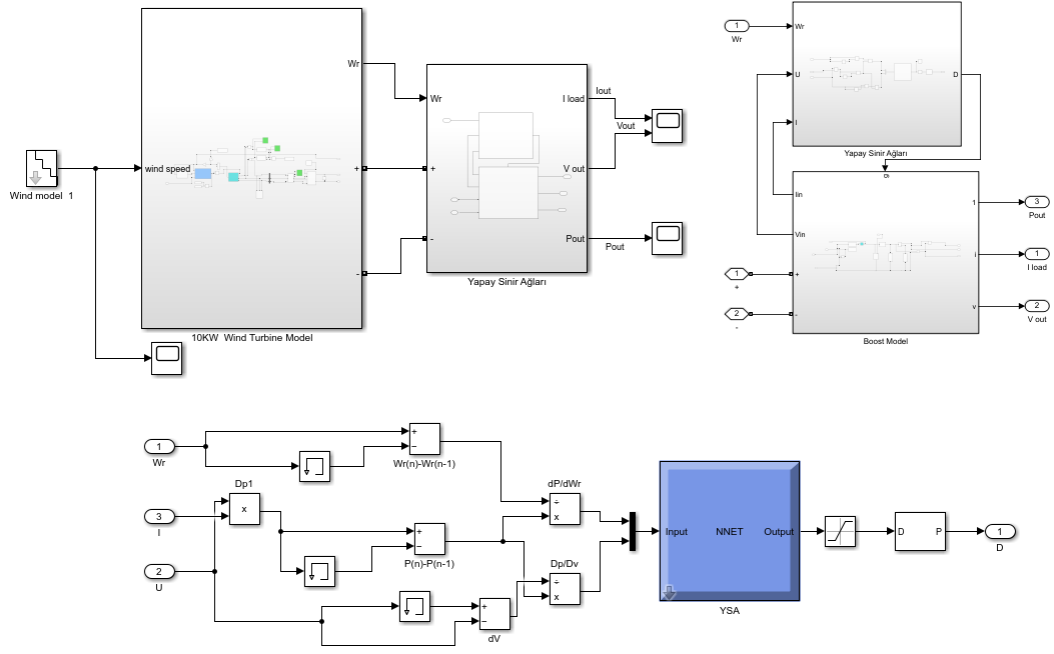
Şekil 5.14 : Veri seti için kullanılan (a) BM devresi (b) Rüzgar senaryosu.

Veri seti MATLAB/Simulink’de YSA ile ilgili modüle işlenerek, dP/dWr ve dP/dV ve D_{out} bilgileri ile YSA bloğu eğitilmiştir. İlgili modüldeki eğitim ve test regresyon eğrileri Şekil 5.15 ‘de verilmiştir.



Şekil 5.15 : YSA eğitim ve test regresyon eğrileri.

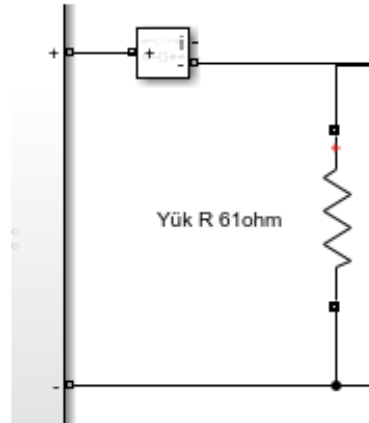
YSA modülünden elde edilen blok, aynen BM metodunda olduğu gibi, dP/dWr ve dP/dV , D_{out} üzerinden Şekil 5.16’ da kullanılarak, boost konvertörünün gate ucunun tetiklenmesi ve görev çevrim kontrolü ile maksimum güç takibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.16 : YSA MATLAB/Simulink benzetim devresi.

5.7 Yük Bloğu

Tüm devrelerde boost konvertör çıkışına Şekil 5.17’de gösterildiği gibi bağlanan 61Ω değerinde omik yük kullanılmıştır.

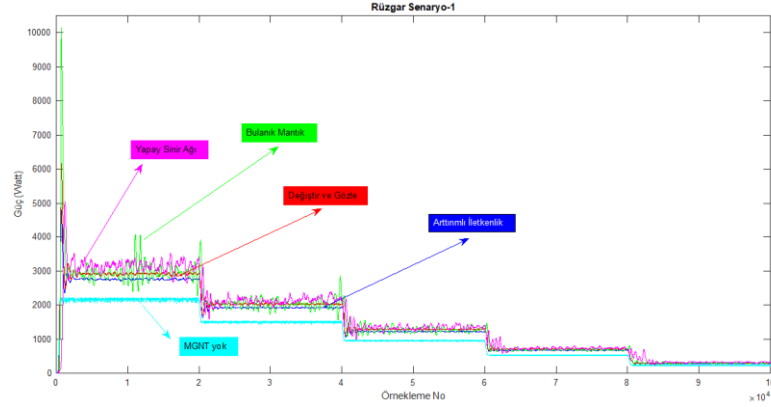


Şekil 5.17 : Benzetimde kullanılan yük devresi.

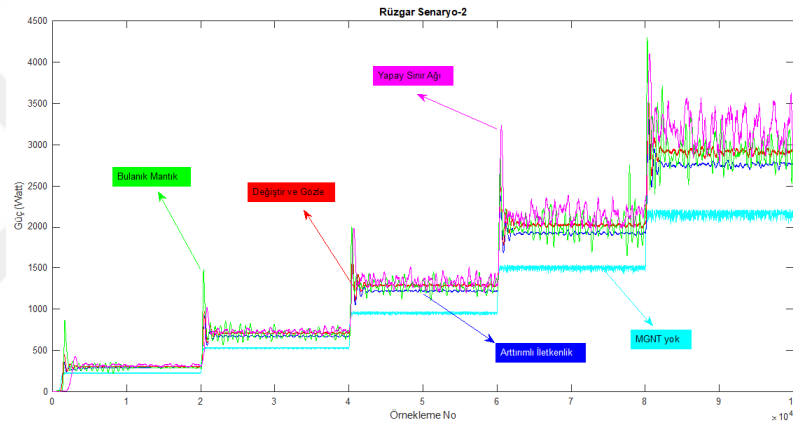
5.8 Analitik Sonuçlar

Üç farklı rüzgar senaryosu Şekil 5.4’de verilmiş, senaryolar, azalan rüzgar hızı, artan rüzgar hızı ve artıp-azalan rüzgar hızı şeklinde oluşturulmuştur. Üç rüzgar

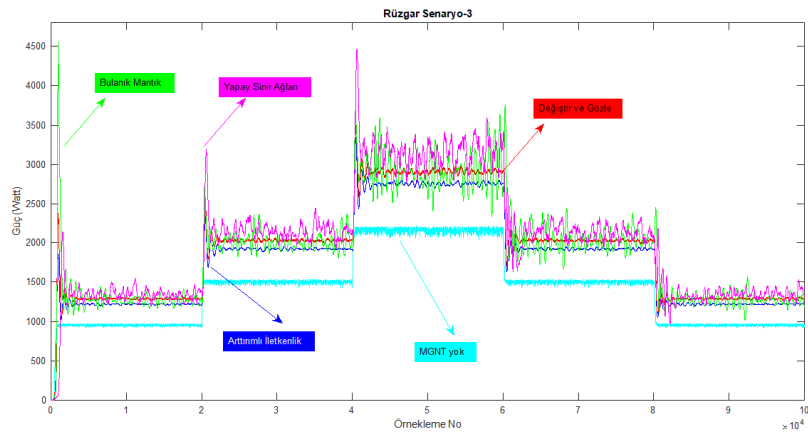
senaryosuna göre 5 farklı yÖneme göre elde edilen güç eğrileri Şekil 5.18'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.18 : Rüzgar senaryolarına göre güç eğrileri (a) Rüzgar senaryo-1 (b) Rüzgar senaryo-2 (c) Rüzgar senaryo-3.

Rüzgar senaryolarına göre simülasyonlardan elde edilen ortalama güç değerleri, Çizelge 5.6’da verilmiştir.

Çizelge 5.6 : Rüzgar senaryolarından elde edilen ortalama güç değerleri (Watt).

MGNT yöntemleri	Rüzgar senaryo-1	Rüzgar senaryo-2	Rüzgar senaryo-3
MGNT Yok	1068	1068	1407
Artırılmış İletkenlik	1369	1365	1801
Değiştir ve Gözle	1449	1442	1904
Bulanık Mantık	1472	1445	1920
Yapay Sinir Ağı	1529	1541	2016

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, yenilenebilir enerji santrallerinden olan rüzgar enerjisi santrallerinin, daha verimli kullanılması amacıyla, türbin çıkışında üretilen anlık gücün, maksimum güç olacak şekilde üretilmesi ve birbirini takip eden her izleme anı için bunun sürdürülmesini sağlamak üzerinedir.

Literatüre bakıldığında, birçok maksimum güç noktası takibi yöntemi olmakla beraber, bu çalışmada dört farklı yöntemi MATLAB/Simulink programında benzetimi gerçekleştirilerek sonuçlar ortaya koyulmuştur. Ayrıca hiç bir maksimum güç noktası takibi yöntemi kullanmadan, türbin çıkışından alınan güç değeri de kayıt altına alınmış ve analiz sonuçlarında paylaşılmıştır. Rüzgar santral modelini test etmek üzere 3 farklı rüzgar senaryosu oluşturulmuştur. Bu senaryolar ise birbirinden farklı özelliklere sahiptir. Birinci rüzgar senaryosu, azalan rüzgar hızı modeline sahip, ikinci rüzgar senaryosu artan rüzgar hızı modeline sahip, üçüncü rüzgar senaryosu ise önce artıp sonra azalan rüzgar hızı modeline sahiptir. Farklı hız karakterlerine sahip rüzgar modelleri ile incelenen dört farklı maksimum güç noktası takibi yöntemi ile herhangi bir maksimum güç noktası takibi yönteminin kullanılmadığı toplam beş farklı durumun verdiği anlık güç değerleri ve simülasyon sonunda elde edilen ortalama güç değerleri, sonuç olarak paylaşılmıştır.

Kullanılan maksimum güç noktası takibi yöntemleri; AI, DVG, BM ve YSA metotlarıdır. AI ve DVG yöntemlerinde, boost devre çıkışından alınan akım ve gerilim bilgisi kullanılırken, BM ve YSA yöntemlerinde, boost devre çıkışından alınan akım ve gerilim bilgisine ek olarak generatörün rotor devir sayısı eklenerek MGNT işlemi gerçekleştirilmiştir. Çıkış bilgisi, tüm yöntemlerde yük olarak kullanılan 61Ω 'luk omik yükün üzerindeki gerilim ve yük üzerinden geçen akım değeri ile alınan güç değeridir. Akıllı yöntem olarak isimlendirilen YSA metodunun eğitilmesinde, farklı bir rüzgar modelinin ve farklı bir BM metot devresinden alınan, güç değişiminin rotor devir sayısındaki değişime oranı (dP/dW_r) ve güç değişiminin gerilim değişimine oranı (dP/dV) giriş bilgisi olarak, konvertör devresindeki anahtarlama elemanının görev çevrim sinyali (D) çıkış bilgisi kullanılmıştır.

Simülasyon sonunda elde edilen güç-zaman eğrilerinde, YSA metodu üç rüzgar senaryosunda da rüzgar hızı değişim anlarında güç dalgalanmaları oluştursa da en yüksek güç değerlerini elde ettiği, BM metodu ise rüzgar hızının değiştiği anlarda güç osilasyonunun fazla olduğu görülmekle beraber, YSA metodundan sonra en yüksek anlık ve ortalama değeri verdiği görülmektedir. DVG metodu ise değerlendirmesi yapılan ilk iki yönteme göre, rüzgar hızı değişimlerinde güç salınımının daha az olduğu, ayrıca simülasyon sonunda üçüncü en iyi ortalama güç değeri elde ettiği görülmektedir. Aİ metodunda, rüzgar hızı değişimlerinde osilasyonun az olduğu, diğer 3 yönteme göre simülasyon sonunda üretilen ortalama güç değeri bakımından en düşük değeri ürettiği görülmektedir. Aİ, diğer yöntemlere göre en düşük ortalama güç değeri üretse bile, hiçbir yöntemin kullanılmadığı duruma göre elde ettiği ortalama güç değeri yüksektir. Tüm simülasyonlar değerlendirildiğinde, anlık güç - zaman eğrileri, simülasyon sonunda elde edilen ortalama güç değerleri ile uyumludur. Görülüyor ki, MGNT yöntemleri, ürettikleri anlık ve ortalama güç değerleri ile rüzgar türbin çıkışında olumlu yönde katkı vererek, ortalama gücü arttırmaktadır. Bunun sonucu olarak, üretilen anlık veya ortalama enerji miktarına olumlu yansiyacak, işletme maliyetlerini azaltacak, özellikle rüzgar santral kurulumunda dikkat edilen geri ödeme süresinin azalmasına katkı verecektir.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, giriş bilgisi olarak, kanat açısı kontrolü, tork kontrolü gibi sensörlü yaklaşımlar tercih edilebilir, MGNT yöntemlerinin ayrı ayrı yerine bir arada kullanılmasıyla ortaya çıkan hibrit maksimum güç noktası yöntemleri kullanılarak elde edilecek anlık ve ortalama güç değerlerine etkileri incelenebilir. Ayrıca bu çalışmada, deneysel model çıkışından elde edilen DC sinyal, DC/AC dönüştürücülerle trafo bağlantılarına uygun hale getirilip, rüzgar senaryoları vasıtasıyla geçici durum analizleri, yük değişim analizleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, M. A., Yatim, A. H., Tan, C. W., Saidur, R.** (2012). A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3220–3227.
- Abdullah, M. A., Yatim, A., Tan, C. W.** (2011). A Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy System. (pp. 321-326). *First Conference on Clean Energy and Technology CET*.
- Akerlund, J.** (1983). Hybrid Power Systems for Remote Sites - Solar, Wind and Mini Diesel. (pp. 443-449). Tokyo: *Fifth International Telecommunications Energy Conference*.
- Altıntaş, A.** (2008). An Education Set Of Power Electronics: AC/DC Converters. *AKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 71-76.
- Alzahrani, A.** (2023). Experimental Investigation of Controlled and Uncontrolled Rectifiers for Low-Power Wind Turbines. *MDPI*, 1-17.
- Apaydın, M., Üstün, A. K., Kurban, M., Filik, Ü. B.** (2009). Rüzgar Enerjisinde Kullanılan Jeneratörlerin Karşılaştırmalı Analizi. (s. 103-107). Diyarbakır: *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*.
- Arı, F., Yılmaz, V.** (2023). Türkiye'de Ve Dünya'da Enerji Kaynaklarının Genel Görünümü Ve Alternatif Enerji Kaynaklarının Önemi. *Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 496-519.
- Ay, S., Arserim, M. A.** (2019). Maksimum Güç Noktası İzleyicisinde Kullanılan Artan İletkenlik Algoritmasının FPGA Tabanlı Gerçeklenmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 113-120.
- Badejani, S. M., Masoum, M. A., Kalantar, M.** (2008). Optimal Design and Modelling of Stand-Alone Photovoltaic-Wind Hybrid System with Adaptive Fuzzy Controller. *Australian Journal of Electrical and Electronics*, 65-74.
- Breeze, P.** (2016). *Wind Power Generation*. Academic Press. (pp.41-48). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128040386000050>
- Cheng, M., Zhu, Y.** (2014). The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: *Energy Conversion and Management*, 332-347.
- Chun, Y. L., Yi, X. S., Jung, C. C., Chih, W. C., Yi, Y. L.** (2009). Optimization Method Based MPPT for Wind Power Generators. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2227-2280.
- Dipesh Kumar, K. C.** (2016). A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 957-970.
- Durak, M., Özer, S.** (2008). *Rüzgar Enerjisi: Teori Ve Uygulama*. Ankara: Enermet Enerji.
- Elibüyük, U., Üçgül, İ.** (2014). Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri Ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri. *YEKARUM*, 2(3), 1-14.

- Enslin, R. J., Snyman, D. B.** (1991). Combined Low-Cost, High-Efficient Inverter, Peak Power Tracker And Regulator For PV Applications. *Transactions on Power Electronics*, 73-82.
- Ghigo, A., Faraggiana, E., Giorgi, G., Mattiazzo, G., Bracco, G.** (2024). Floating Vertical Axis Wind Turbines for offshore applications among potentialities and challenges: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1-14.
- Gouabi, H., Hazzab, A., Habbab, M., Rezkallah, M., Chandra, A., Ibrahim, H.** (2023). Fuzzy adaptive dP-perturb and observe maximum power point tracking controller for wind energy conversion systems: Design and real-time implementation. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 1-9.
- Harashima, F., Inaba, H., Kondo, S., Takashima, N.** (1987). Microprocessor-Controlled SIT Inverter for Solar Energy System. *Transactions On Industrial Electronics*, 50-55.
- Hart, D. W.** (2011). *Power Electronics*. New York: McGraw-Hill Companies.
- Hohm, D. P., Ropp, M. E.** (2000). Comparative Study Of Maximum Power Point Tracking Algorithms Using An Experimental Programmable Maximum Power Point Tracking Test Bed. (pp. 699-1702). Anchorage: Photovoltaic Specialists Conference 1.
- İLKILIÇ, Z.** (2016). Türkiye’de Rüzgar Enerjisi ve Rüzgar Enerji Sistemlerinin Gelişimi. *Yaşam Bilimleri Dergisi*, 6(2), 1-13.
- Jenitha, R., Rajesh, K.** (2022). Stand-alone Micro Grid based on Artificially Intelligent Neural Network. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 1-8.
- Johansen, K.** (2021). Blowing in the wind: A brief history of wind energy and wind power. *Wind Policy*, 1-11.
- Kabalıcı, E., Çiçek, S., Keven, G.** (2010). Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Ve Gelişimi. (s. 190-200). İstanbul: 3. *Uluslararası Strateji ve Güvenlik Çalışmaları Sempozyumu*.
- Karaoğlu, M.** (2018). Rüzgar Ve Rüzgar Olayları. *Journal of Agriculture*, 39-48.
- Kawashty, A. A., Abdellatif, S. O., Ebrahim, A. G., Ghali, H. A.** (2023). Investigating the trade-off between response time and complexity in the Levenberg–Marquardt ANN-MPPT algorithm used in wind energy conversion systems. *Discover Sustainability*, 1-13.
- Khadraoui, M. R., Elleuch, M.** (2008). Comparison between OptiSlip and Fixed Speed Wind Energy Conversion Systems. (pp. 103-110). Amman: *5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*.
- Kocatürk, A. S., Ünsan, Y.** (2015). Rüzgar Enerjisi Santrallerinin Tarihsel Gelişimi Ve Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Santral Tipleri. *GİDB Dergi*, 3-16.
- Koyanagi, A., Nakamura, H., Kobayashi, M., Suzuk, Y., Shimada, R.** (2002). Study On Maximum Power Point Tracking Of Wind Turbine Generator Using A Flywheel. (pp. 322-327). Osaka : *Proceedings of the Power Conversion Conference* .
- Mansouri, A., Magri, A. E., Lajouad, R., Myasse, I. E., Younes, E. K., Giri, F.** (2023). Wind energy based conversion topologies and maximum power point tracking: A comprehensive review and analysis. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering Electronics and Energy*, 1-20.

- Marques, J., Pinheiro, H., Gründling, H. A., Pinheiro, J. R., Hey, H. L.** (2003). A survey on variable-speed wind turbine system. (pp. 732-738). *Proceedings of Brazilian Conference of Electronics of Power*.
- Matsunobu, T., Hasegawa, T., Isogawa, M., Sato, K., Futami, M., Kato, H.** (2009). Development of 2-MW Downwind Turbine Tailored to Japanese Conditions. *Hitachi Review*, 213-218.
- Mousa, H. H., Youssef, A.-R., Mohamed, E. E.** (2019). Variable step size P&O MPPT algorithm for optimal power extraction of multi-phase PMSG based wind generation system. *Electrical Power and Energy Systems*, 218-231.
- Nasiri, M., Milimonfared, J., Fathi, S. H.** (2014). Modeling, analysis and comparison of TSR and OTC methods for MPPT and power smoothing in permanent magnet synchronous generator-based wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 892–900.
- Öner, Y., Özçira, S., Bekiroğlu, N.** (2008). Düşük Güçlü Uygulamalar için Konvansiyonel Senkron Generatörler ile Sürekli Miknatıslı Senkron Generatörlerin Karşılaştırılması. Bursa: *ELECO*.
- Özbektaş, S., Şenel, M. C., Sungur, B.** (2023). Dünyada Ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Durumu ve Kurulum Maliyetleri. *Mühendis ve Makine*, 317-351.
- Özdamar, A.** (2000). Dünya ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisinden Yararlanılması Üzerine Bir Aratırma. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri dergisi*, 133-145.
- Pangedaiah, B., Obulesu, Y. P., Kota, V. R.** (2021). A New Architecture Topology for Back to Back Grid-Connected Hybrid Wind and PV System. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 1457–1467.
- Pasqualetti, M., Righter, R., Gipe, P.** (2004). History of Wind Energy. *Encyclopedia of Energy*, 419-433.
- Shahi, A., Bhattacharjee, C.** (2018). A Study & Analysis of Fuzzy Based P&O MPPT Scheme in PMSG Based Wind Turbine. *International Conference on Technologies for Smart-City Energy Security and Power*. India: Bhubaneswa, March 28-30.
- Tafticht, T., Agbossou, K., Chériti, A.** (2006). DC Bus Control Of Variable Speed Wind Turbine Using A Buck-Boost Converter. *Power Engineering Society*, 1-5.
- TCETKB.** (2022). *Türkiye Ulusal Enerji Planı*. Ankara: *Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*.
- TEİAŞ.** (2023). *Kurulu Güç Raporu*. Ankara: *TEİAŞ*.
- Tiwari, R., Ramesh, B. N.** (2016). Fuzzy Logic Based Mppt For Permanent Magnet Synchronous Generator In Wind Energy Conversion System. *IFAC*, 462-467.
- Warne, D.** (2005). *Newnes Electrical Power Engineer’s Handbook*. Oxford: Elsevier
- Wu, s.-F., Chang, C.-H., Chen, Y.-H.** (2000). A fuzzy-Logic-Controlled Single-Stage Converter For PV-Powered Lighting System Applications. *Transactions on Industrial Electronics*, 287-296.
- Y. Jia, Y., Wang, Z., Yang, Z.** (2007). Experimental Study Of Control Strategy For Wind Generation System. (pp. 1202-1207). Orlando : *Power Electronics Specialists Conference* .

- Yaoqin, J., Zhongqing, Y., Binggang, C.** (2002). A New Maximum Power Point Tracking Control Scheme For Wind Generation. (pp. 144-148). Kunming: *Proceedings International Conference on Power System Technology*.
- Yaramasu, V., Wu, B., Sen, P. C., Kouro, S., Narimani, M.** (2015). High-Power Wind Energy Conversion Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies. *IEEE*, 1-49.
- Yaylacı, E. K., Yazıcı, İ.** (2016). Maximum Power Point Tracking Algorithms for the Wind Energy Systems. *Journal of New Results in Science*, 71-80.
- Yılmaz, M., Altinkaya, H., Akbaba, M.** (2016). Şebekeden Bağımsız Çalışan Sincap Kafesli Bir Asenkron Generatörün Sürekli ve Geçici Durum Analizi. (s. 393-402). Antalya: *4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*.
- Zaid, I. E., Stallon, D., Vidal, Y., Boussada, M., Nouri, A. S.** (2024). Wind Turbine Modeling Maximum Power Point Tracking (MPPT) and Experimental Validation. (pp. 1-6). Bilbao: *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPPQ'24)*.

ÖZGEÇMİŞ

TARANMIŞ
VESİKALIK
FOTOĞRAF

Ad-Soyad : Nihat Kurşun

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2000, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi
- **Lisans** : 2022, Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2025, Bursa Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı