

**AKILLI ŞEBEKELERDE GÜÇ KALİTESİNİN
OPTİMİZASYONU VE YENİLENEBİLİR ENERJİ
KAYNAKLARI İLE ENTEGRASYONU**

**2019
DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

Mustafa YILMAZ

**AKILLI ŞEBEKELERDE GÜÇ KALİTESİNİN OPTİMİZASYONU VE
YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İLE ENTEGRASYONU**

Mustafa YILMAZ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında

Doktora Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Nisan 2019

Mustafa YILMAZ tarafından hazırlanan “AKILLI ŞEBEKELERDE GÜÇ KALİTESİNİN OPTİMİZASYONU VE YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İLE ENTEGRASYONU” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet AKBABA



Tez Danışmanı, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 05/ 04/ 2019

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mehmet AKBABA (KBÜ)



Üye : Prof. Dr. Necmi Serkan TEZEL (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ (OMÜ)



Üye : Doç. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ (KTÜ)



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Tahir GÜNEŞER (KBÜ)



...../...../2019

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ



Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Mustafa YILMAZ

ÖZET

Doktora Tezi

AKILLI ŞEBEKELERDE GÜÇ KALİTESİNİN OPTİMİZASYONU VE YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İLE ENTEGRASYONU

Mustafa YILMAZ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mehmet AKBABA

Nisan 2019, 88 sayfa

Değişen ihtiyaçlar ve buna paralel olarak enerji talebinin artması sonucunda, tükenebilir nitelikteki kaynaklara bağımlı olarak çalışan geleneksel elektrik dağıtım sistemlerinin de değişimi kaçınılmaz hale gelmiştir. Mevcut sistemin geliştirilerek değişen ihtiyaçları karşılaması amacıyla akıllı şebeke fikri ortaya çıkmıştır. Gelecekteki elektrik şebekelerinde sistemi oluşturan bütün ekipmanların sürekli aktif, oluşacak değişikliklere doğru tepki verebilen, ücretlendirme açısından uygun, çevreye karşı duyarlı ve değişik her bir sistemle bağlanabilecek bir yapıda olması beklenmektedir. Akıllı bir şebeke sisteminin beklentileri karşılaması için mevcut şebekelere eklenmesi gereken özellikler sadece bunlarla da sınırlı değildir. Ayrıca akıllı şebekeler artan enerji talebine cevap verebilmeli, verimliliği arttırmalı, dinamik güç akışını ve güç kalitesini uygun yöntemlerle şebeke üzerinde kontrol edebilmelidir. Yeni sistemin bunlara ilave olarak, özellikle dağıtılmış durumdaki yenilenebilir enerji

kaynaklarını yönetebilmesi ve şebekelere entegre edilmiş olan enerji depolama sistemlerinin de kontrolünü sağlaması beklenmektedir.

Doğal kaynakların zengin olduğu bölgelerde enerji üreterek ihtiyacın fazla olduğu tüketim noktalarına uzun hatlarla iletim yapmak yerine tüketim noktalarına yakın noktalarda dağıtılmış üretim yaparak enerji ihtiyacının karşılanması yöntemi tercih edilmektedir. Birçok açıdan avantajlı olan bu sistemde, üretilen elektrik enerjisinin şebekedeki güç kalitesini bozmadan şebekeye entegrasyonunun yapılması çözülmesi gereken önemli bir problemdir.

Günümüzde mevcut şebekelerin gücüne oranla entegre edilen kaynakların gücünün düşük olmasından dolayı şebeke dengesinin sağlanmasında büyük problemler yaşanmamaktadır. Ancak yenilenebilir kaynakların üretim miktarlarının ve şebekedeki paylarının her geçen gün arttığı görülmektedir. Bu artışla birlikte entegre edilen gücün, şebekenin dengesini bozacağı gerçeği araştırmacıları düşündürmektedir.

Bu tez çalışmasında, yenilenebilir kaynak olarak en çok kullanılan rüzgar ve güneş enerjisi santralleri üzerinde benzetim çalışması yaparak entegrasyon problemlerinin çözümüne katkı yapılması amaçlanmıştır. Birinci benzetim çalışmasında rüzgar türbinlerinde kullanılan asenkron generatörün geçici ve sürekli durum analizi yapılmış ve entegrasyon sonrası oluşacak durumun önceden kestiriminin yapılması amaçlanmıştır. Diğer benzetim çalışmasında ise Burdur ilindeki 8 MW'lık kurulu gücü bulunan bir üretim tesisinde, fotovoltaiik (PV) panellerin çalışma koşullarının inverterin çıkış gücü ve şebekedeki güç kalitesi üzerindeki etkisi, Ocak ve Temmuz aylarındaki veriler kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Buna ilave olarak, farklı çalışma koşulları altında sürücünün çıkışındaki gücün çevresel koşulların etkisi ile değişimini tahmin etmek için yapay sinir ağı (YSA) kullanılmış ve optimal çalışma koşulları belirlenmeye çalışılmıştır. Güneş enerjisi santralinden elde edilen enerjinin, bağlı bulunduğu şebekeye sorunsuz bir şekilde entegrasyonunu sağlamak için inverter çıkış gücünü etkileyen çevresel faktörlerin seviyelerini, uygun çalışma koşullarının belirlenmesini ve sistem kayıplarını göz önüne alarak verimi tahmin etmek için çalışma yapılmıştır. YSA sonuçlarının başarı düzeyinin, deney sonuçları ile %99'un üzerinde bir doğruluk oranında olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Akıllı şebekeler, yenilenebilir enerji kaynakları, güç kalitesi
yapay sinir ağı.

Bilim Kodu : 905.1.173



ABSTRACT

Ph. D. Thesis

OPTIMIZATION OF POWER QUALITY IN SMART GRIDS AND INTEGRATION WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

Mustafa YILMAZ

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical-Electronics Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mehmet AKBABA

April 2019, 88 pages

As a result of the increasing needs and increasing demand for energy, development of the traditional electricity distribution systems, which are dependent on consumable resources, have become inevitable. Idea of the smart grids have emerged to develop the existing system and meet the changing needs. For the grid circuits in the future, all the equipment that make up the system are expected to be constantly active, able react to the changes that will occur, suitable for compensation, environmentally sensitive, and in a structure that it can be connected to each different system. Features, which must be added to the existing system to fulfill the expectations of the smart system, are not limited only to these aspects. Likewise, smart grids are expected to respond to the increasing energy demand, increase efficiency, and control dynamic power flow and power quality with appropriate methods on the grid. Moreover, smart grids should manage the distributed renewable energy resources and control the energy storage systems integrated into the grids.

Instead of producing energy in the districts where the natural resources are rich and thereby conducting energy using long lines to the consumption points, it is preferred to meet the energy needs by making production close to the consumption points. In this system, which is advantageous in many respects, the integration of electrical energy produced to the grid without disturbing the power quality in the grid is a problem to be solved.

Due to the low power of the integrated resources compared to the power of the existing grids, no major problems are experienced in the provision of the network balance. However, with the increase in the amount of production of renewable resources and their share in the network, the fact that the integrated power disrupts the balance of the network preoccupies researchers.

Aim of this study is to contribute to the solution of the integration problems by utilizing simulation works on the wind power plants and solar panels which are the most used renewable resources. In the first simulation study, the temporal and continuous state analysis of the asynchronous generator used in wind turbines was carried out and the prediction of the situation after the integration has been aimed. In the other simulation study, the effect of the working conditions of photovoltaic (PV) panels on the output power of the inverter and the power quality in the grid was investigated experimentally by using the data in January and July of a production facility with 8 MW installed power in Burdur province. In addition, artificial neural networks (ANN) was used to estimate the change in power at the exit of the driver with the effect of environmental conditions under different operating conditions and optimal working conditions were determined. In order to ensure the smooth integration of the energy obtained from the solar power plant to the grid it is connected to, the level of environmental factors affecting the inverter output power, determining the appropriate working conditions and estimating the efficiency by taking into account the system losses have been studied. It was observed that the level of success of the ANN results was higher than 99% with the test results.

Keywords : Smart grids, renewable energy sources, power quality, artificial neural network.

Science Code : 905.1.173



TEŐEKKÖR

Bu tez alıőmasında beni her zaman yönlendiren, her alanda ilgisini ve yardımını esirgemeyen, doktora tez alıőmam sürecinde bilgi ve tecrübelerinden sürekli istifade ettiğim değerli hocam Prof. Dr. Mehmet AKBABA'ya sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hep yanımda hissettiğim ok değerli anneme, merhum babama ve tezin zorlu aőamaları süresince hep yanımda olan değerli eőime ve ocuklarıma tüm kalbimle őükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	x
İÇİNDEKİLER	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
1.2. YENİLENEBİLİR KAYNAKLARIN ENTEGRASYON PROBLEMLERİ	13
1.3. TEZİN KAPSAMI	21
BÖLÜM 2	22
2.1. GÜNEŞ PANELLERİNDEN ÜRETİLEN ENERJİNİN ŞEBEKEYE	22
ENTTEGRASYONU.....	22
2.2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ŞEBEKEYE ENTEGRASYONU.....	25
2.2.1. Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Generatörler.....	30
2.2.1.1. Senkron Generatörler	31
2.2.1.2. Asenkron Generatörler	34
2.2.1.3. Doğru Akım Generatörleri	37
BÖLÜM 3	38
BENZETİM ÇALIŞMALARI	38
3.1. KENDİNDEN UYARTIMLI ASENKRON GENERATÖR ANALİZİ.....	38
3.1.1. Sincap Kafesli Asenkron Generatörün Sürekli Hal Analizi	47

	<u>Sayfa</u>
3.1.2. Sincap Kafesli Asenkron Generatörün Geçici Hal Analizi	49
3.2. GÜNEŞ PANELİNDEN ELDE EDİLEN ENERJİNİN ŞEBEKEDKİ GÜÇ KALİTESİNE ETKİSİ	53
3.2.1. Materyal ve Metot	55
3.2.2. Sonuçlar ve Değerlendirme	66
BÖLÜM 4	73
SONUÇ VE ÖNERİLER	73
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ	88

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1.	Akıllı şebeke organizasyon modeli [18].	7
Şekil 1.2.	2006 ve 2016 yılları için Türkiye kurulu gücü.	19
Şekil 1.3.	Türkiye'deki üretim kaynaklarına göre üretim miktarları.	20
Şekil 2.1.	Empedans kaynaklı evirici.	23
Şekil 2.2.	Güneş paneli eşdeğer devresi.	24
Şekil 2.3.	Rotoru sargılı senkron generatörün şebekeye bağlantısı.	31
Şekil 2.4.	Daimî mıknatıslı senkron generatör (DMSG).	32
Şekil 2.5.	Sincap kafesli asenkron generatör şebeke bağlantısı.	34
Şekil 2.6.	Rotoru sargılı (bilezikli) asenkron generatörün şebeke bağlantısı.	35
Şekil 2.7.	Çift beslemeli asenkron generatör bağlantısı.	36
Şekil 2.8.	Doğru akım generatörünün bağlantısı.	37
Şekil 3.1.	Nominal hız ve nominal frekansta asenkron generatörün eşdeğer devresi.	39
Şekil 3.2.	Farklı hız ve frekansta asenkron generatör eşdeğer devresi.	40
Şekil 3.3.	Her bir tarafın F ile bölünmesi durumunda eşdeğer devre.	41
Şekil 3.4.	Asenkron generatörün yaklaşık eşdeğer devresi.	41
Şekil 3.5.	Kendinden uyarmalı asenkron generatör vektör diyagramı.	43
Şekil 3.6.	SKAG sürekli hal yük akımının değişik parametrelere göre grafikleri.	48
Şekil 3.7.	SKAG sürekli hal yük akımı ile reaktans ve frekansın grafikleri.	48
Şekil 3.8.	SKAG sürekli hal yük akımı-verim grafiği.	49
Şekil 3.9.	SKAG geçici hal mıknatıslama akımı ve manyetik direnç değişimi.	49
Şekil 3.10.	SKAG geçici hal kendi kendine uyarım gerilimi, akım, moment ve hız grafikleri.	50
Şekil 3.11.	SKAG geçici hal yük akımı değişimi.	51
Şekil 3.12.	SKAG geçici hal mıknatıslama akımı ve yük akımı değişimi.	51
Şekil 3.13.	SKAG geçici hal kapasitör akımının değişimi.	52
Şekil 3.14.	Burdur ili Ocak ayı için ışıma ölçüm grafiği.	57
Şekil 3.15.	Burdur ili Temmuz ayı için ışıma ölçüm grafiği.	57
Şekil 3.16.	Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli (kWh/m ² -yıl).	58
Şekil 3.17.	Önerilen sisteme ait YSA'nın yapısı.	60

Sayfa

Şekil 3.18. Kullanılan sisteme ait YSA diyagramı.	60
Şekil 3.19. Kullanılan YSA performans grafiği.	62
Şekil 3.20. Yapılan çalışmanın akış şeması.	64
Şekil 3.21. Ocak ayı için eğitim, değerlendirme ve test sonuçları.	65
Şekil 3.22. Temmuz ayı için eğitim, değerlendirme ve test sonuçları.	65
Şekil 3.23. Ocak ayı için deneysel ölçüm verileri: a) ışıma, b) sıcaklıklar, c) nem, d) P_{DC}	66
Şekil 3.24. Ocak ayı için deneysel ölçümler ve YSA simülasyon sonuçları: a) P_{AC} , b) güç faktörü, c) Frekans, d) Güç kaybı.	68
Şekil 3.25. Ocak ayı ölçümleri için YSA sonuç grafikleri: a) P_{DC} ve P_{AC} , b) Güç faktörü, c) Frekans, d) Güç kaybı.	69
Şekil 3.26. Temmuz ayı için deneysel ölçümler: a) ışıma, b) sıcaklıklar, c) nem,	70
Şekil 3.27. Temmuz ayı için deneysel ve YSA simülasyon sonuçları: a) P_{AC} , b) Güç faktörü, c) Frekans, d) Güç kaybı.	71
Şekil 3.28. Temmuz ayı ölçümleri için YSA sonuç grafikleri: a) P_{DC} ve P_{AC} , b) Güç faktörü, c) Frekans, d) Güç kaybı.	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Sürekli durum analizi için kullanılan generatör parametreleri.	44
Çizelge 3.2. Geçici durum analizi için kullanılan generatör ve yük parametreleri. ...	45
Çizelge 3.3. İnvörtörün teknik özellikleri.	56
Çizelge 3.4. PV panellerin teknik özellikleri.	56



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- P : aktif güç
 Q : reaktif güç
 $\text{Cos}\varphi$: güç katsayısı
 ω : açısal hız
 n : devir sayısı (d/dak)

KISALTMALAR

- YSA : Yapay Sinir Ağı
SCADA : Supervisory Control and Data Acquisition
(Merkezi denetim ve veri toplama)
EPDK : Enerji Piyasası Düzenlem Kurulu
TEİAŞ : Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
FACTS : Flexible Alternating Current Transmission Systems
DG : Distributed Generation
DÜ : Dağıtık üretim
LTC : Load tap changer (Trafo yük kademe değiştirici)
UPFC : Unified Power Flow Controller
HES : Hidro Elektrik Santral
PV : Photovoltaic Panel
EMI : Electromagnetic Interference (Elektromanyetik girişim)
IPM : Integrated Pest Management
RSSG : Rotoru Sargılı Senkron Generatör
DMSG : Daimi Mıknatıslı Senkron Generatör
SKAG : Sincap Kafesli Asenkron Generatör
RSAG : Rotoru Sargılı Asenkron Generatör

- ÇBAG : Çift Beslemeli Asenkron Generatör
ARG : Anahtarlı Relüktans Generatör
DFIG : Double Feed Asynchronous Generator (Çift beslemeli asenkron generatör)
MPTT : Maximum Power Point Trackers (Maksimum Güç Noktası İzleyici)
LM : Levenberg-Marquardt algoritması
MSE : Mean Square Error (Ortalama Kare Hatası)



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve artan enerji ihtiyacı ile birlikte, tüketicilerin taleplerinin kesintisiz ve belirlenen standartlara uygun olarak karşılanabilmesinin yanında, elektrik şebekesine entegre olan bütün paydaşların üretim ve tüketim durumlarını değerlendirerek, verimli ve güvenli bir çalışma ortamı sağlamaya yönelik çalışmalar sonucunda akıllı şebekeler ortaya çıkmıştır [1]. Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de sınırlı kaynaklarla üretim yapan geleneksel dağıtım sistemlerinin yerine bir dizi ihtiyaçları karşılamak için akıllı şebeke yapısına geçiş süreci kaçınılmaz hale gelmiştir [2]. Kayıpları düşürerek ekonomik açıdan verimli, sürdürülebilir bir enerji sistemini hedefleyen akıllı şebekelerde en önemli problemlerden bazıları, yenilenebilir kaynakların sisteme entegrasyonu, yük atımı ve devreye alma sırasında oluşan gerilim değişimleri ve eviricilerin meydana getirdiği harmoniklerdir.

Gelecekteki güç şebekelerinde sistem içindeki tüm noktaların sürekli aktif, değişikliklere doğru tepki verebilen, ücretlendirme açısından uygun, çevreye karşı duyarlı, gerçek zamanlı, değişime açık, güçlü ve değişik her sistemle bağlanabilen bir yapıda olması, akıllı sistemin beklentileri karşılaması için eklenmesi gereken özellikler olarak karşımıza çıkmaktadır [1]. Akıllı şebekelerin artan enerji talebine cevap verebilmesi, verimliliği arttırması, dinamik güç akışını belirlenmiş yöntemlerle şebeke üzerinde kontrol edebilmesi, dağıtılmış durumdaki yenilenebilir enerji kaynaklarını yönetebilmesi ve şebekelere entegre edilmiş olan enerji depolama sistemlerinin kontrolünü sağlaması istenmektedir. Bu amaca yönelik olarak akıllı şebekeler üzerinde yapılan çalışmalar ve geleneksel sistemlerle farkları araştırılarak tez çalışmasının alt yapısı oluşturulmuştur.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegrasyonu sırasında elektrik enerji kalitesinin azalmaması için alınması gereken önlemler, sistemin verimliliği ve

tüketicilerin güvenliği için büyük bir öneme sahiptir. Gerilim ve frekans, elektrik enerji kalitesinin iki önemli parametresi olarak karşımıza çıkmakta ve belirlenen standartlar içerisinde olması ve sürekli kontrolünün yapılması şebeke güvenliği açısından büyük önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında akıllı şebekelerde devreye girme ve çıkma sırasında meydana gelebilecek gerilim değişimlerinin tüketicilere zarar vermesini engellemek ve hat üzerindeki kayıpları azaltmak amacı ile akıllı şebekeler üzerindeki gerilim regülasyonunu optimize etmek, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu sırasında meydana gelen elektriksels olayların istenmeyen etkilerini önleyerek sistemin daha verimli çalışması için yeni yöntemlerin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

2000'li yılların başlarında gündeme gelmeye başlayan ve özellikle de 2003 yılında Amerika'daki enerji kesintisinin meydana getirdiği etki ile önemi daha fazla hissedilen akıllı şebekelerin, gelişmiş ülkelerle birlikte, hızlı bir şekilde uygulamaya geçirilmesi gerekmektedir. Bu konuda yapılacak çalışmalar ve uygulamalar sisteme yabancı birçok ülke için örnek teşkil edecektir. Ülkemizde yalnızca akıllı sayaç kullanımı ile başlayan geçiş sürecinde, yenilenebilir kaynakların payının artırılması ile üretimde ve iletimde de akıllı şebekelere doğru geçiş sürecinin hızlandırılmasına katkı sağlama amacına yönelik faaliyetler akademisyenlerin ve özel sektörde faaliyet gösteren arge departmanlarının gündemine aldığı çalışmaların başında gelmektedir.

Günümüzde kullanılan elektrik dağıtım şebekesi, dağıtılmış enerji üretiminde elde edilen gücün şebekeye entegrasyonunu yapabilecek bir yapıda değildir. Özellikle enerjinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması durumunda, enerji kaynağının değişken oluşu, sistem bağlantısında kullanılan teknolojinin çeşidi, entegrasyon öncesi yapılacak olan analiz ve değerlendirmelerde dikkate alınmalıdır. Ayrıca şebeke içerisinde, kendi üretim ve tüketimini karşılayan ve diğer bölgelerle enerji transferi yapmayan adalaşma durumu meydana gelebilmektedir. Dağıtım sistemi içerisinde, üretilen enerjinin entegrasyonu gerçekleşikten sonra meydana gelebilecek olan bu adalaşmalar çok ciddi problemler ortaya çıkarabilmektedir. Entegrasyon sonrası enerji kalitesinin, mümkün olduğunca sürekli yüksek olması, dağıtım sistemi ekipmanlarına ve tüketicilere olumsuz etkisinin olmaması anlamına gelmektedir. Dağıtım sistemi

üzerinden gerçekleştirilen entegrasyonlarda, enerjinin kalitesini azaltmayacak şekilde gerekli tedbirlerin alınması gerekmektedir [3].

1.1. LİTERATÜR TARAMASI

Akıllı şebekelerle ilgili dünyadaki uygulamalardan örneklerin verildiği, geleceğe yönelik olarak gelişmiş ülkelerde bu alanda daha fazla yatırım yapılması ile ilgili planlamalara birçok çalışmada vurgu yapılmaktadır. Bu çalışmalardan birinde Kırmızıoğlu E. güç eksikliklerini şebekedeki sensörler vasıtasıyla anında tespit ederek, kesinti olmadan besleme yapmak ve enerji kalitesi ile ilgili arızaları onarmak, iletim ve dağıtım hattındaki kayıpların azaltılması, verimin artırılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin mevcut sisteme entegre olabilmesi için elektrik şebekelerinin akıllı şebekeye dönüştürülmesi gerektiğini belirtmektedir [4]. Akıllı şebekelere entegre edilecek yenilenebilir kaynaklardan rüzgâr türbinlerinin şebeke bağlantısı ve bağlantı sonrasında şebeke üzerinde meydana getirdiği etkileri üzerine yapılan çalışmalar, bu kaynakların üretimdeki payını arttırırken karşılaşılabilecek problemlerin çözümüne farklı bakış açıları getirmiştir [5–7].

Günümüzdeki enerji ihtiyacını karşılamak için yapılan uygulamalarda birden fazla enerji kaynağının bir araya getirildiği, değişik kaynakların birlikte kullanımını sağlayarak verimi artırmanın yanında kaynaklardan birinin mevcudiyetini kaybetmesi yada azalması durumunda diğer kaynakların sistemin enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla oluşturulan hibrit sistemler üzerine de pek çok çalışma mevcuttur [7,8]. Literatürde bu sistemler ile ilgili çalışmalarda genellikle hibrid sistemlerin daha ekonomik şekilde nasıl dizayn edilebileceği üzerinde durulmuştur [9]. Enerjinin tek bir kaynaktan sağlanmasının yerine hibrid sistem kullanılarak birden fazla kaynağının kullanımı, önceden tahmin edilemeyen yenilenebilir enerji kaynakları ve yük talebi, sistemi oluşturan bileşenlerin doğrusal olmayan özellikleri ve kontrol sistemini etkileyen pek çok parametrenin bulunması sebebiyle daha karmaşık bir sürecin işletilmesini zorunlu kılmaktadır [10]. Fakat bu olumsuzluklara rağmen hibrid sistemler, sistemin kuruluş masraflarının %20-%50 civarında düşmesi, üretilen enerjinin anında kullanılması durumunda akülerin çalışma veriminin % 20 artması ve kullanılabilir akü ömrünün uzaması gibi faydalarından dolayı tercih edilmektedir [11].

Hibrit sistemlerdeki elektrik enerji kalitesinin artırılarak sürekli durum performanslarının araştırılması da önemli bir araştırma konusu olarak çalışmalarda yer almıştır [12].

Hibrid enerji sistemlerinden bazıları otonom çalışırken şebeke bağlantılı olanları da vardır. Üretilen enerjinin sistemdeki mevcut yükler tarafından tüketildiği otonom sistemlerden farklı olarak şebeke bağlantılı sistemlerde üretilen enerji, sistemdeki yüklerde tüketilebildiği gibi ihtiyaç fazlası olan enerji mevcut olduğunda, şebekeye güç aktarımı da yapılabilmektedir [13].

Elektrik dağıtım şebekelerinin, piyasa paydaşları tarafından üretilen enerjinin entegrasyonunu yapabilecek şekilde dizayn edilmemiş olduğuna vurgu yapan araştırmacılar, şebekedeki enerji kalitesinin, piyasaya arz edilen enerjinin mümkün olduğu kadar kesintisiz olması, dağıtım sistemine ve kullanıcılara olumsuz etkisinin olmaması ile ilgili olduğunu söylemektedirler. Özellikle dağıtım sisteminden gerçekleştirilen üretim entegrasyonlarında enerjinin kaliteli olması için gerilim ve frekans gibi iki önemli parametrenin belirlenen sınırlar içinde olmasına vurgu yapılmıştır [3].

Akıllı şebekeler kavramını, *“verimli ve güvenilir enerji temini için bilgi teknolojileri ve haberleşme sistemleri kullanımıyla elektrik üretim, depolama, tüketim ile dağıtım ve iletim sistemlerinin esnek kontrolünü hedefleyen bir sistem”* olarak tanımlayan Dönmez, günümüze kadar yukarıdan-aşağıya olacak şekilde yapılan enerji ve kontrol akışı hesaplamalarının, merkezi olmayan (dağıtılmış) enerji paylaşımı bağlamında aşağıdan yukarıya entegrasyon ihtiyacı nedeni ile yeniden ele alınması gerektiğine dikkat çekmiştir [14].

Ertuğrul E. ve ark. elektrik enerji sisteminde optimizasyon için üretim ve tüketim noktaları arasında dengenin sağlanması ve gereksiz enerji sarfiyatının en aza indirilmesinin önemli temel taşları olduğuna vurgu yapmıştır. Mevcut elektrik şebekelerinde güç kalitesi standardının sağlanmasında karşılaşılan zorlukların, akıllı şebeke sisteminin tamamında, ilk üretimden son tüketim noktasına kadar olan

kısımları da kapsayacak şekilde otomasyon ve optimizasyon sağlanarak giderilebileceğini belirtmişlerdir [15].

EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu) ve TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi) tarafından hazırlanan, yenilenebilir enerji santrallerinin sisteme bağlantısında uyulması gereken kurallar gereği (başta rüzgâr santralleri olmak üzere) bağlantısı yapılacak olan trafonun kısa devre gücünün %5 değerini geçmemesi gerektiği belirtilmiştir. Bu değer pratik uygulamalarda geçerli bir kural olarak karşımıza çıksa da her bir yenilenebilir enerji santralinin kurulum gücü, bağlantı yapılacak olan şebeke noktasına göre de değişiklik göstermektedir.

Akdeniz E. ve ark. çalışmalarında, entegrasyon yapılan şebekenin gücünün yüksek olduğu bölgelerde yapılacak olan bağlantılardan sonra yeni kaynak entegrasyonlarının şebeke üzerinde olumsuz etkilerinin çok fazla hissedilmeyeceğini belirtirken, buna ilaveten aynı entegrasyonun bağlantı noktasındaki gücün düşük olduğu noktalarda şebeke paydaşlarına ciddi zararlar verebilecek şekilde bir etki meydana getirebileceği üzerinde durmuşlardır [16].

Dünyadaki birçok uygulamada olduğu gibi ülkemizde de elektrik şebekeleri yüksek kapasiteli enerji üretim santrallerinin enterkonnekte sistemi oluşturacak şekilde birbirlerine iletim hatları ile bağlandığı bir yapıda tesis edilmektedir. Geleneksel anlamda elektrik şebekesi terimi üretim, iletim, dağıtım ve kontrol operasyonlarının bir kısmını veya tamamını destekleyen sistem için kullanılmaktadır [17]. Bu sistemde doğal kaynaklarca zengin bölgelerde, fazla miktarda üretilen elektrik enerjisi uzun enerji iletim hatlarıyla tüketicilerin bulunduğu yerlere ulaştırılmaktadır. Günümüzdeki yaklaşım ise; elektrik enerjisinin üretiminin merkezi bir noktada olmasından ziyade tüketim merkezlerine yakın, dağıtılmış olarak yapılmasıdır [18]. Ayrıca ulusal elektrik şebekemize bağlı tüketicilerin enerji taleplerinin devamlı, güvenli, belli bir kalitenin altına düşmeden ve ekonomik sınırlarda tedarik edilebilmesini sağlamak için elektrik üretimi ve iletimi alanında geliştirme planları yapılmaya devam etmektedir [2] [19].

Yeni nesil enerji sistemlerinin uyarlanabilir, tüketicilerle etkileşim halinde ve sürekli olarak gerçek zamanlı izlenip kontrol edilebilen bir yapıda olması planlanmaktadır [1].

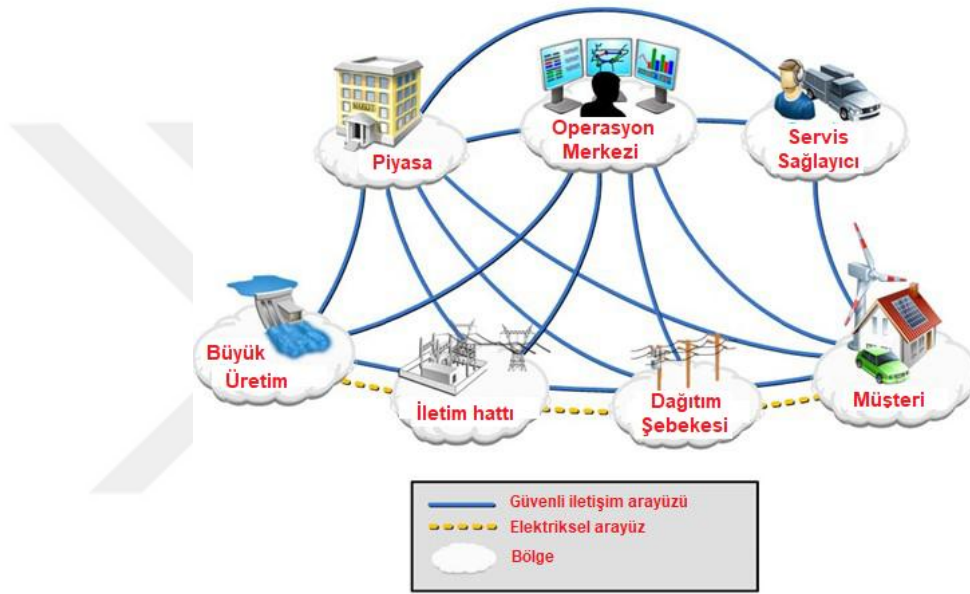
Bu hedefe uygun olarak Akıllı Şebeke modeli ile kayıpları azaltılmış, daha yüksek verimli ve etkili bir enerji yönetim sistemi kurulması hedeflenmektedir [4,20].

Yenilenebilir kaynaklardan dağıtılmış olarak üretilen enerjinin miktarının artması ile birlikte üretimle eş zamanlı olarak fiyatlandırmanın dinamik olarak yapıldığı serbest piyasa ortamının oluşması için de akıllı şebekelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemle arz-talep dengesi gerçek zamanlı bir şekilde dengelenirken yenilenebilir kaynakların entegrasyonu sırasında şebeke üzerinde meydana gelen problemler de azaltılmış olacaktır [3].

Mevcut enerji iletim ve dağıtım şebekelerindeki eksikliklerin telafi edilmesi ve paydaşların lehine olacak şekilde uyarlanabilmesi akıllı şebekeler ile mümkün hale gelebilecektir. Kullanılmakta olan şebekelerle ağ ve bilgisayar teknolojisinin bütünleştirilmesi ile sistemin akıllı hale gelmesi için en önemli adım atılmış olacaktır. Literatürde geçen farklı tanımlamaların ortak yanları göz önüne alınarak akıllı şebekelerin “Hem elektrik üreticileri hem de tüketicilerinin kolaylıkla, problemsiz ve verimli bir şekilde elektrik şebekesine entegre olabilmelerinin mümkün olduğu ve bu yapı sayesinde dağıtık olarak üretilen elektrik enerjisinin en az kayıpla, güvenli ve sürekli olacak şekilde tüketicilere aktarılmasını sağlayan sistem” olarak tanımlanması mümkündür [20].

Ülkemizde akıllı şebekeye geçiş çalışmaları kapsamında, kullanılmakta olan elektrik dağıtım şebekelerinde otomatik sayaç okuma-izleme yöntemi kullanılmaya başlamıştır. Bu şekilde oluşturulan sistemlerdeki ileri ölçüm altyapısı kullanılıp, anlık olarak şebeke üzerinden alınacak verilerin değerlendirilmesi ile enerji kalitesinin belirlenen standart değerler aralığında olmasının sağlanması ve kesintisiz olarak güvenli enerji temini hususunda da gerekli altyapının oluşturulması mümkün olabilecektir. Bu şekilde kayıp kaçak miktarının daha da azaltılarak, elektrik enerji kalitesinin yükseltilmesi ve değişik nedenlerle meydana gelen enerji kesintisi olaylarının ve enerjisiz kalınan sürelerin en aza indirilmesi, hatta hiç kesinti olmaması sağlanabilecektir [21,22].

Akıllı şebekeler, ağ üzerindeki tüm paydaşlarına verimi yüksek, kesintisiz, ekonomik açıdan uygun ve güvenlik sorunu olmayan elektrik enerjisi sağlarken, akıllı ev sistemi ile tüketicilere sistem içerisindeki işletme sürecinde etkin rol oynama imkânı verilebilmektedir. Böylece tüketici olarak sisteme entegre olan paydaşlar, dinamik fiyatlandırma opsiyonunu kullanarak istedikleri operatörden elektrik enerjisi satın alma imkânına sahip olacaklardır [23]. Şekil 1.1’de görüldüğü gibi piyasa paydaşlarının tamamı birbiriyle etkileşim içinde hareket etmektedir.



Şekil 1.1. Akıllı şebeke organizasyon modeli [18].

Geleceğin elektrik şebekesinde, değişikliklere sorunsuz bir şekilde adapte olabilen ve gelişmiş bir dağıtım şebekesi oluşturmak için üreticiden tüketiciye, tüketiciden üreticiye olacak şekilde, çift taraflı enerji ve de veri aktarımı yapılabilecektir. Bu sistem sayesinde aşırı yük durumları önceden tespit edilebilir, güç akış yönü ayarlanabilir, yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerjinin problemsiz bir şekilde entegrasyonu sağlanabilir ve tüketim maliyetlerinin düşürülmesi mümkün hale gelecektir [24].

Amerika Birleşik Devletlerinde 2003 yılı Ağustos ayında meydana gelen büyük çaplı elektrik kesintisinden komşusu Kanada'nın bir kısmı da etkilenmiş ve bu kesinti nedeniyle yaklaşık 55.000.000 kişi, Hindistan'da 2012 yılındaki elektrik kesintisinde

ise 300.000.000 kişi enerjisiz kalmıştır. Büyük çaplı etki uyandıran bu gelişmelerle, Tesla'nın öncülüğünü yaptığı, 1883 yılında kurulumuna başlanan geleneksel elektrik şebekelerinin modern çağın ihtiyaçlarına cevap veremez hale geldiği anlaşılmıştır. Eski sistemin yenilenecek akıllı şebekelere dönüştürülme ihtiyacı bu olaylarla daha da kendini hissettirmiş ve birçok ülke geçiş sürecini hızlandıracak çalışmalara başlamıştır [25].

Akıllı Şebekenin ana karakteristik özellikleri; kendi kendini iyileştirme, müşterileri yetkilendirerek sisteme dâhil etme, güç kalitesini iyileştirme ve çeşitli dağıtılmış üretim tesisleri ile uyum sağlama yeteneği olarak sıralanabilir. Buna ilaveten, gelişmiş kontrol metotları, dijital algılama ve ölçüm altyapısı, FACTS (Flexible AC Transmission Systems) ve SCADA (Supervision Control and Data Acquisition) gibi sistemler, akıllı şebekelerin yeni ve büyük teknolojiler içeren uygulamalarından birkaçıdır [26].

Bir akıllı şebeke modernize edilmiş ve otomatikleştirilmiş güç dağıtım sistemidir. Bu tanım mevcut konvansiyonel tesislerin bütünlüğü ve gelişmiş güç mühendisliği, karmaşık sensörler ve izleme teknolojisi, iki yönlü iletişim ve dağıtık üretim (DÜ) birimleri anlamına gelir[27,28]. Bu nedenle, bu şebekelerin ana bölümü dağıtık üretimin çok değişik şekillerdeki bir entegrasyonudur [29]. Diğer yandan, dağıtım sistemleri, herhangi bir dağıtık üretim hariç olmak üzere, özellikle son kullanıcıya güç sağlamak için dizayn edilmiştir. Bu yüzden güç şebekesine dağıtım seviyesindeki DÜ'nün bağlantısı, gerilim durumları ve güç akışı üzerinde hem olumlu hem de olumsuz olarak önemli derecede etkili olur [30]. Olumlu etkileri şöyle olabilir [31]:

- Gerilim desteği,
- Kayıp azaltma,
- İletim ve dağıtım sistemlerinin kapasitesini büyütme,
- Sistem güvenilirliğini arttırmaya yarar.

Fakat dağıtım şebekesinde dağıtık üretim ünitelerinin faaliyeti bağlanılan üretim barasının gerilimini etkiler [31]. Güç sistemlerinde DÜ ünitelerinin hızlı artan nüfuzuna göre, bu etki daha önemli bir hale gelmektedir ve bu yüzden yenilenebilir

DÜ kaynaklarının öngörülemeyen ve tahmin edilemeyen yapısı entegrasyonu daha da karmaşık hale getirmektedir [32].

Geleneksel olarak, trafo kademe değiştiricileri, hat düzenleyiciler ve şönt kapasitörler uygun gerilim regülasyonu sağlamak için trafo merkezleri ve dağıtım fiderlerine yerleştirilir. Orta gerilim veya düşük gerilim fiderleri üzerinde yükler arasında bağlı birçok DÜ birimine sahip bu cihazlar, kontrolü oldukça karmaşık hale getirir [33].

Mevcut güç sistemlerinde, bütün sistemin kontrolü Denetimli Kontrol ve Veri Toplama (SCADA) ile gerçekteştirilir [30,34]. Son yıllarda, çok etmen tabanlı sistemler karmaşık tesisler için dağıtılmış kontrol sistemi sağlamak üzere geliştirilmiştir. Çok etmen tabanlı sistem, sistemin genel amaçlarına, hedeflerine ulaşmak için birlikte iř birliği içinde çalışan birçok etkili elemanın birleşiminden meydana gelir. Bu nedenle, çok iyi organize edilmiş donanım ve yazılım protokollerinden oluşan bir altyapı sisteminde durum ve kontrol sinyallerinin alışverişi çok önemlidir. Genel olarak sistemde, her bir kontrol birimi bir etmen olarak bilinir ve sisteme ait olan diğer etmenlerle iyi tanımlanmış bir iletişim dili ile etkileşim içinde çalışır [30,35].

Geleneksel güç sistemlerinde gerilimi yükselterek akımı azaltıp hat kayıplarını azaltmak için alternatif akım tercih edilmektedir. Ancak günümüzde Tesla'dan beri kullanılan bu sistemlerin alternatifi olarak doğru akım güç sistemleri de kurulmaktadır. Bu değişimin sebebi doğru akım sistemlerinin alternatif akım sistemlerine göre maliyet ve teknik uygunluk açısından karşılaştırılması ile izah edilebilir. Güç sistemlerinin kararlılık ve maliyet kriterleri göz önüne alındığında her iki sistemin de tercih edilmesi için değişik sebepler bulunmaktadır. Hat kayıplarının oluşmasında etkili olan iletken direnci göz önüne alınırsa, doğru akım şebekeleri daha avantajlı olmaktadır. Çünkü iletken direnci, alternatif akımla iletim yapıldığında deri etkisinden dolayı, doğru akımdaki dirençten daha yüksek olmaktadır. Alternatif akımın geçmesi ile oluşan indüktif reaktansın doğru akımda meydana gelmemesi, dolayısıyla toplam direncin daha düşük olmasından dolayı, hat kayıpları açısından bir avantaj meydana getirmektedir [36].

Alternatif akım güç sistemlerinde görülen, hatların gereksiz yüklenmesi, gerilim değişimleri gibi problemlere neden olan reaktif güç, doğru akım sistemlerinde problem olarak karşımıza çıkmaz. Bu avantajlardan dolayı doğru akım sistemleri tercih edilir olarak görülebilirse de güçlü evirici istasyonlarının maliyeti bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Burada uzak mesafelere güç iletiminde kullanılan hattın kayıplarının azaltılması ile elde edilen kazancın yüksek olması durumunda, kurulum maliyetleri yüksek olsa bile işletme maliyetlerinin düşüklüğü ile doğru akım sistemleri öne çıkmaktadır. Dolayısı ile yapılacak hesaplamada iletim mesafesi, yük durumu ve hat güzergahının farklılıkları göz önüne alındığında, doğru akımla iletimde ekonomik iletim mesafesi 500 km'nin üzerinde olması gerektiği görülmektedir [37].

Evirici çıkış gerilimlerinin hızlı bir şekilde değiştirilmesi doğru akım sistemlerinde mümkün olabilmektedir. Böylece hatlardaki akım yönleri ve değerleri kolayca kontrol edilerek güç değeri ve yönü hızlı bir şekilde ayarlanabilir. Doğru akım sistemlerindeki çeviricilerde uygun tetikleme açıları belirlenerek, doğrultucu ya da evirici olarak çalıştırılması mümkün olabildiği gibi, hızlı bir şekilde ve istenilen değerdeki gücü alternatif akım baralarına verebilirler ya da bu baralardan güç çekebilirler. Doğru akım şebekelerinde alternatif akım sistemlerinde olduğu gibi uç gerilimleri değiştirilerek hat direncinin etkisi dolaylı olarak ayarlanabilir. Dolayısıyla doğru akım sistemleri alternatif akım sistemlerine entegre edilerek gerilim ve güç açısı karalılığını sağlama amaçlı olarak kullanılabilir [38,39].

FACTS aygıtları alternatif akım iletim sistemlerinin kontrol yeteneğini geliştirmek ve güç transfer kapasitesini arttırmak için kullanılan, temel yapısında güç elektroniği ve diğer statik denetleyicileri barındıran cihazlardır. Bununla beraber SCADA sistemi, şebekenin çalışması, izleme, veri toplama ve güç şebekesinin kontrolü için kullanılan veri tabanı ile iletişim ve kontrol anlamına gelmektedir. Fakat sistemle ilgili standartların tam olarak oluşturulamaması, bütün bileşenlerin birbirleriyle nasıl bağlanacağı, nasıl haberleşeceği veya enerji akışının nasıl çalışacağı gibi durumlar Akıllı Şebeke uygulamalarını gerçekleştirmek için çözülmesi gereken önemli kaygılar olarak güncelliğini korumaktadır [26,40].

Güç sisteminin dengeli olması için hatlardaki aktif ve reaktif gücün uygun şekilde kontrol edilmesi gerekir. Ülkemizdeki mevcut iletim hatlarındaki gücün kontrolü için faz açıları, hatlardaki uç gerilimleri ve hat empedanslarının standartlara uygun olarak ayarlanması gerekmektedir. Bu ayarlamalar içerisinde bulunan hat empedansını değiştirmek için ilave ekipmanlara ihtiyaç vardır. Kritik kararlılık problemlerinin çözümünde şebekede kullanılan generatörler ve faz kaydırmalı transformatörler faz açısını değiştirmede, kademe ayarlı transformatörler, reaktörler, statik kapasitörler ve senkron kapasitörler gerilim genliğini ayarlama da yeterince hızlı değişim gösteremezler. Hızlı bir şekilde gerekli ayarlamaların yapılması için, yarı iletken teknolojisi tabanına sahip, cevap süreleri kısa olan FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) aygıtları sisteme entegre edilmektedir. Alternatif akım sistemlerinde bu cihazlar, hat kapasitelerinin artırılmasında ve esnek kontrolde çok önemli görevler almaktadır [41].

Birleştirilmiş güç akış denetleyicisi olan UPFC (Unified Power Flow Controller), FACTS aygıtları içerisinde yer alan çok fonksiyonlu bir cihazdır [42]. Gerilim, güç akışı gibi sistemin istenildiği gibi çalışmasında etkin olan parametreleri eşzamanlı bir şekilde etkin olarak kontrol etme özelliğine sahiptir [43]. Temel anlamda bir kompanzasyon cihazı olarak tanımlanabilecek UPFC çok yönlü olarak çalışan gelişmiş bir işleve sahiptir. Bu işlevler, kullanılmakta olan mevcut iletim hatlarındaki güç akış kontrolü (loop-flows), dinamik ve geçişken kararlılığın (dynamic and transient stability) sağlanması, gerilim kararlılığı (voltage stability) gibi problemlerin giderilmesinde etkili olmaktadır. Bunlara ilave olarak UPFC, enerji ihtiyacının artması ile birlikte gerekli hale gelen ilave iletim hatlarının dizayn edilmesinde karşılaşılan güçlükler, çevreye yapılan etkinin sonucu olarak gelen tepkiler, iletim hatlarının gerçek kapasitelerinde kullanılamaması ve aşırı yüklenmiş hatlarla ilgili problemlerin çözümünde etkin olarak kullanılan bir ekipman haline gelmiştir [44–46].

Elektrik enerjisi iletim ve dağıtım sistemlerinin tesis edilmesi, güvenliğinin sağlanması ve kontrolü için sistemin güç dengesini temin etmeyi sağlayan sabit ve değişken parametreler tespit edilmelidir. Şebekedeki güç akışında dengenin sağlanabilmesi için güç akış hesaplamalarının iyi yapılması gerekmektedir [38]. Alternatif akımla iletim yapan şebekelerde lineer olmayan denklemleri içeren güç akışı

hesaplamaları için Newton-Raphson ve Gauss-Seidel yöntemleri literatürde sıkça kullanılmış olup, özellikle Newton-Raphson tabanlı geliştirilmiş güç akışı çalışmalarının daha fazla olduğu görülmüştür [47].

Artan elektrik enerjisi talebi nedeniyle elektrik güç şebekelerinin enerji taşıma kapasiteleri yetersiz kalmaktadır. Giderek daha fazla artan bu talebin karşılanabilmesi için, mevcut şebekeye ilaveler yapılması ve kapasitesinin artırılması gereklidir. Kurulum maliyetlerinin fazla olması ve yeni hat güzergâhı için arazi şartlarının neden olduğu problemlerden dolayı yeni iletim hatlarının tesisi uygun bir çözüm olmaktan uzak görülmektedir. Daha fazla talep edilen elektrik enerjisi, üretimdeki birim maliyetleri de arttırmaktadır. Bu şartlarda, kurulu olan şebekenin optimizasyonu ve kapasitesini arttırmaya yönelik çalışmalar büyük önem taşımaktadır.

Elektrik enerjisinin üretiminde maliyeti etkileyen pek çok etken mevcuttur. Üretim maliyetinin en fazla olduğu termik yapıdaki santrallerde maliyetin en önemli kısmı generatörleri tahrik edecek olan aktif gücü sağlayan yakıt giderleridir. Özellikle dışa bağımlı olarak elde edilen fosil yakıtlardan doğal gaz ve mazot enerji üretiminde en son tercih edilmesi gereken maliyeti yüksek ürünlerdir. Bu yakıtların maliyetlerinin, optimal güç akış algoritmaları ile en aza indirilmesi mümkün olabilmektedir [48]. Elektrik enerjisi iletim hatlarındaki kayıplarla birlikte hatlardaki reaktif güç akışı bu hatların aktif güç taşıma kapasitesini düşürmektedir. Kapasiteyi arttırmak için hatlardaki aktif güç kaybının, optimum reaktif güç akışı ile azaltılması mümkündür [49]. Bu iki uygulama bir arada kullanılarak, hem yakıt maliyetleri ve hem de hat kayıpları azaltılarak çok daha uygun bir çözümün elde edilmesi mümkündür. Bunun için çok amaçlı optimizasyon uygulaması yapılmalıdır [50].

Elektrik şebekelerinde optimizasyonla ilgili çalışmalar 1930'lu yıllarda başlamış olup, 1950'den sonra yarıiletken teknolojisinin gelişmesi ve bilgisayarların hızlarının artması ile paralel olarak daha fazla ilerleme görülmüştür [51]. Literatür araştırmasında alternatif akımla iletim yapılan sistemlerde aktif güç optimizasyonu [52–55], reaktif güç optimizasyonu [56–59] ve aktif-reaktif güç akışı optimizasyonu ile ilgili [60,61] birçok çalışma yapılmıştır.

Dünya çapındaki gelişmiş, elektrik üretimi ve tüketiminde büyük paya sahip olan ülkeler, artan hava kirliliği ile birlikte karbondioksit, kükürt dioksit gibi gazların emisyonu ile ilgili yeni düzenlemeler yapmak zorunda kalmışlardır. Üretim santrallerinde bu salınımların en aza indirilmesi için gerekli düzenlemelerin yapılması zorunlu hale gelmiştir. Bu durum güç akış hesaplamaları yapılırken, klasik hesaplama yöntemlerine ilave olarak emisyonların optimizasyonunun da hesaplamalara dahil edilmesini gerektirmiş ve bu şekilde hesaplamaların yapıldığı çalışmalar yapılmıştır [62–65].

Sezgisel yöntemler olarak adlandırılan ve doğal yaşam ortamlarındaki canlıların davranışlarını inceleyerek geliştirilen yöntemler de optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmaya başlanmıştır. Genetik Algoritma [66,67], Karınca Koloni Algoritması [68,69], Parçacık Sürü Optimizasyonu [70,71] ve Yapay Arı Koloni Algoritması [72,73] gibi sezgisel yöntemler bir çok optimizasyon probleminin çözümünde kullanıldığı gibi alternatif akım şebekelerinde güç akışı optimizasyon problemi için de başarılı bir şekilde uygulanmıştır [74]. Sezgisel yöntemlerin matematiksel yöntemlerden farklı olarak, popülasyon tabanlı olmaları ve geleneksel optimizasyon problemlerinde olduğu gibi türev işlemlerine ihtiyaç duymamaları gibi önemli iki özelliği bulunmaktadır.

1.2. YENİLENEBİLİR KAYNAKLARIN ENTEGRASYON PROBLEMLERİ

Akıllı şebekeler, geleneksel yöntemlerle tesis edilmiş elektrik iletim ve dağıtım şebekelerinin daha güvenli, dinamik ve verimli olmasını sağlarken, tüketicilerin aynı zamanda üretim yaparak sisteme güç aktarması söz konusu olduğu için bazı problemleri de beraberinde getirmiştir. Dağıtılmış üretim tesisleri iyi analiz edilmeden şebekeye entegre olduklarında dağıtım şebekesi sisteminde ve diğer kullanıcıların güvenliği açısından bazı problemler ortaya çıkabilmektedir [75]. Can güvenliği ve sistem sürekliliği açısından bu entegrasyonların uygun şartlar içerisinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu konuda uluslar arası geçerliliği olan standartlar da bulunmaktadır [76]. Şebeke entegrasyonu sırasında dağıtılmış üretim tesislerinin oluşturabileceği muhtemel problemler şunlardır [3,19];

- Büyük güçlerin üretildiği MW seviyesindeki üretim sistemlerinin dağıtım sistemine bağlantısı için uzun iletim hatları kullanılabilir. Kesitin uygun seçilmediği uzun iletim hatlarında, üretim tarafında ve de dağıtım sistemine bağlanılan noktada gerilim yükselmesi problemi ortaya çıkabilmektedir. Gerilim değişiminin oranı, iletim hattının kesiti, paralel bağlı sistem sayısı, bağlantı yapılan dağıtım noktası ve üretilen enerjinin miktarına bağlı olarak değişmektedir. Bu uzun hatlarda meydana gelen kayıplar da ayrı bir problemdir.
- Enerji üreten sistemler bağlandıkları baranın kısa devre sınırını değiştirmektedir. Entegre olan üreticinin kısa devre katkısı iyi hesaplanmazsa, bağlantı yapılan baradaki limit değerlerin, dizayn edilirken hesaplanan limitleri aşması söz konusu olabilir.
- Dağıtım sistemleri tek yönlü enerji akışına göre dizayn edildiğinden, üretilen enerjinin entegre edilebilmesi için çift yönlü değişken güç akışı yapabilecek hale getirilmesi gerekir. Entegre olan enerji üretim tesisi, bağlandığı bölgede güç akışının değişmesine neden olabilir. Güç akış yönü değiştiğinde ise reaktif güç kontrolü için yapılacak hesaplamalar farklılaştığı gibi dağıtım sisteminin koruma rölelerinin çalışma şekli de değişir.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegrasyonu için kullanılan konverter sistemleri, şebeke sisteminde değişik harmonik akımların artışına ve fliker (dalgalanma) oluşmasına sebep olabilir.
- Adalaşma durumu dağıtılmış üretim tesislerinin en büyük risklerinden biridir. Dağıtım sisteminin bir noktasında meydana gelen kısa devre sonucunda da bu tür bir adalaşma oluşabilir. Oluşan adalaşmanın işletme toprağını devre dışı bırakma ihtimali yüksek olduğundan, faz toprak arasında meydana gelen arızalarda, arızalı olmayan fazlarda zararlı olabilecek gerilim yükselmeleri meydana gelebilmektedir.

Entegrasyon için sisteme bağlantı yapılan noktada başka üretim tesisi olması analiz yapılırken mutlaka göz önünde bulundurulması gereken kritik bir durumdur [16,77]. Dağıtılmış enerji üretiminin sisteme entegre olması ile karmaşık hale gelen güç sistemlerinde, gerilimlerdeki aşırı artışlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının meydana getirdiği gerilim salınımları ve hatlarda oluşan aşırı yüklenmeler bu problemlerden en

önemlileridir [78]. Sistemi bir bütün olarak düşünürsek güç sistemleri pasif yapıdan aktif bir yapıya doğru bir geçiş yapmaktadır. Bu problemler dağıtılmış enerji üretiminin optimum entegrasyonu ile avantaja dönüşebilmektedir [79].

Yenilenebilir kaynakların, geleneksel şebekelere entegrasyonundaki en önemli zorluklardan biri de üretimin süresiz ve belirsiz olmasıdır. Üretimdeki bu belirsizlik ve süresizlikten kaynaklanan yük akışlarındaki anlık değişimlerin, sisteme nasıl etki edeceğinin önceden belirlenmesi, önleyici tedbirlerin alınması ile sağlıklı ve dinamik bir güç dağıtımının yapılması sağlanabilir. Şebekeden sürekli ve kalitesi yüksek bir güç dağıtımı için, dağıtılmış enerji kaynaklarının belirsizlik içeren çalışma şekillerinin, sistemin güç kalitesine etkilerinin incelenmesi oldukça önem kazanmıştır.

Yük akışında meydana gelebilecek problemlerin çözümü ile şebeke sisteminde hizmet veren her baradaki gerilim genliği, güç katsayısı ve baraya bağlı hatlardan çekilen aktif-reaktif gücün belirlenmesi sağlanır. Bir sistemdeki yük akışındaki problemlerin çözümü sırasında, şebekenin normal sınırlarda, güç akışının dengeli olduğu kabul edilir ve bu durum tek hat diyagramıyla gösterilir. Çalışan her barada ele alınması gereken önemli parametreler, gerilimin değeri (V), şebeke faz açısı (δ), aktif güç (P) ve reaktif güç (Q) gibi değişkenlerdir. Generatörlerin beslediği baralara üretim barası denilmektedir ve buradaki baraların gerilim genliği ve aktif güç sabit olarak alınır. Enerji üreten sistemlerin bağlı olmadığı diğer baralara ise yük barası denilmektedir [79].

Bu konuda yapılan çalışmalarda, yenilenebilir dağıtık üretim kaynaklarının şebekeye bağlanmasıyla sistemin gerilim seviyesinde ciddi bir değişiklik olmadığı görülmüştür [80]. Olumsuz bir etki olmamasının nedeni, sistemin bütünündeki enerji dengesinin (Energy Balance) sağlanmış olmasıdır. Enerji dengesinin sağlanması, kayıplarla birlikte sistemde tüketilen toplam gücün, üretilen güce eşit olması halidir. Baraya eklenen yenilenebilir dağıtık üretim kaynaklarının etkisi ile, ekleme yapılan baraya diğer üretim baralarından akan gücün azaltılması sağlanabilir. Ancak, bölgesel yenilenebilir dağıtılmış kaynak, talep gücün önemli bir kısmını karşılayacak kadar üretim yapıyorsa, sahip olduğu aktif-reaktif güç özelliklerinden dolayı bağlantı yapılan baradaki toplam aktif-reaktif bara gücünü etkileyerek baranın güç katsayısında anlık

değişimlere sebep olabilmektedir. Sürekli üretim yapmayan yerel kaynakların, çalışma karakteristikleri gereği fazla üretim yaptıkları zamanlarda, güç katsayısı değişimini kabul edilebilir sınırlarda tutacak şekilde tedbirlerin alınması ile baradaki güç katsayısı kararlığının kontrol edilmesi mümkün olabilir [81].

Resmî gazetede 10.11.2004 tarihli olarak yayınlanan “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenliği ve Kalitesi Yönetmeliği, Üretim Salt Tesisleri Tasarım Esasları” kısmında süreksiz kaynakların bağlantısında belirli sınırlamalar getirilmiştir. Dalgalı karakterdeki yüklerin yoğunlukla bulunduğu bölgelerde TEİAŞ tarafından konu ile ilgili mevzuat maddelerine göre verilen bağlantı görüşüne ilişkin yapılan değerlendirmede, *“bağlantı noktasında bulunan mevcut dalgalı yüklerin etkisinin de dikkate alınması ve rüzgâr hızının belli limitleri aşması durumunda rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesislerinin otomatik olarak devre dışı olma özellikleri”* dikkate alınmıştır. Ayrıca ilgili yönetmelikte *“Sistemde ani meydana gelen gerilim değişimi ve frekanstaki dalgalanmaları önlemek amacıyla sistemin döner yedeği miktarını da aşmayacak kurulu güce sahip rüzgâr enerjisine bağlı üretim tesisi bağlantısına izin verilmesi hususu hakkında görüş”* belirtilmiştir. Rüzgâr enerjisine bağlı üretim tesislerinin, reaktif güç miktarı ve gerilim seviyesi değişimlerinde sisteme verecekleri etkileşimin sınırlandırılması amacıyla rüzgâr enerjisine bağlı asenkron generatör kullanan enerji üretim tesislerinin güç katsayısının 0.99’den düşük olmaması ve güç katsayısının kullanıcılar tarafından kurulacak olan, sistemin yapısına uygun şekilde tesis edilmiş, kompanzasyon tesisleriyle yükseltilmesi gereği vardır [82].

Güneş panelinde üretilen enerjinin entegrasyonu sırasında oluşabilecek problemler [76,83];

- Voltaj regülasyonu
- Ani gerilim artışlarının (piklerin) düzeltilmesi
- Enerji depolama maliyetleri
- Doğru bağlantı yerinin tespiti

Rüzgâr santrallerinin entegrasyonunda ise;

- Değişkenliğin fazla olması,
- Anlık üretimin büyük değişimi gibi problemler söz konusudur.

İletim sisteminden gerçekleşecek üretim entegrasyonları da incelenmeye değer olmakla birlikte, özellikle dağıtım sisteminden gerçekleşecek olan üretim entegrasyonlarında doğru analizler gerçekleştirilip, doğru önlemler alınmadığı takdirde, enerji kalitesini bozucu, can ve ekipman güvenliğini tehlikeye düşürecek, üretilen gücün yeteri kadar verimli kullanılmamasına neden olabilecek sonuçlar ile karşılaşılması muhtemeldir [84,85].

Başta endüstriyel işletmeler olmak üzere birçok alanda, kullanılan elektrik enerjisinin daha güvenilir ve kaliteli olması arzu edilmektedir. Elektrik sistemlerinde enerji kalitesini üretim, iletim ve dağıtım kuruluşları ile bu enerjiyi kullanan son kullanıcılar beraber belirlemektedir. Güç sistemleri, belirli frekansa ve genliğe sahip sinüzoidal gerilim referans alınarak tasarlanmıştır. Gerilimin genliği, frekansı veya dalga biçimi üzerindeki herhangi bir bozulma, güç kalitesi problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Elektriksel güç kalitesini tanımlayan parametreler IEC 61000-4-30 standardında frekans salınımları, kısa süreli gerilim düşmeleri / yükselmeleri, aşırı ve düşük gerilimler, harmonikler, fazlar arası dengesizlikler ve gerilim dalgalanmaları olarak sıralanmaktadır [3,81].

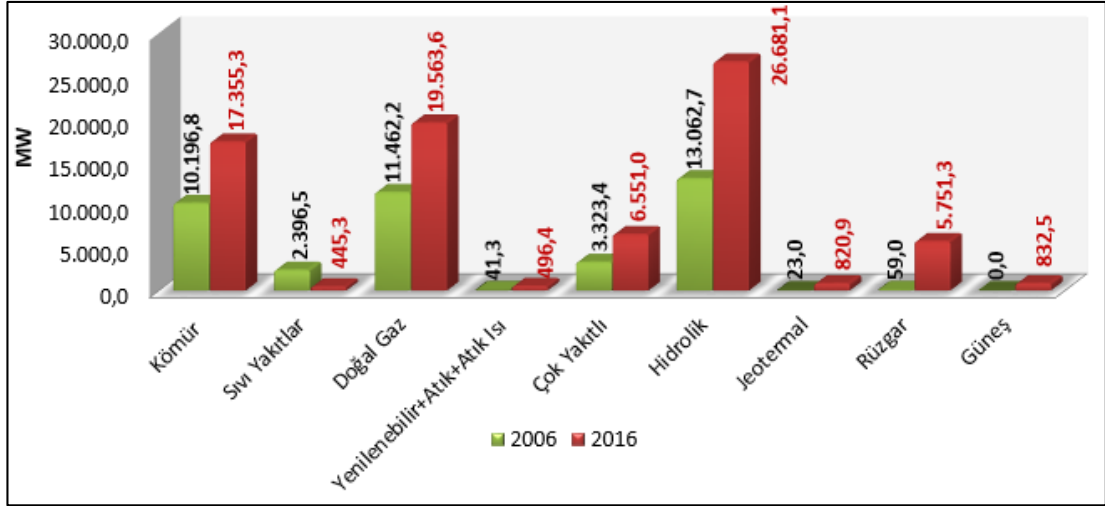
Güç kalitesi problemleri:

- Harmonik
- Gerilim artışı ve azalması
- Geçici durum
- Kalkış akımları
- Kesinti
- Fliker
- Frekans değişimleri
- Dengesizlik olarak sıralanabilir.

Güç akışı ve entegrasyon problemleri ile ilgili olarak literatürdeki birçok uygulamada değişik noktalardaki sensörlerden alınan ölçüm verilerini değişik yöntemlerle analiz ederek [86] şebeke ekipmanlarının kontrolünü sağlayan kontrolör tasarımı yer almaktadır [87–89]. Ayrıca güç akışının kontrolünde kullanılan geleneksel yöntemlerin geliştirilmesi ve sezgisel algoritmalar kullanılarak iyileştirilmesi için çalışmalar yapılmıştır [66,68,71].

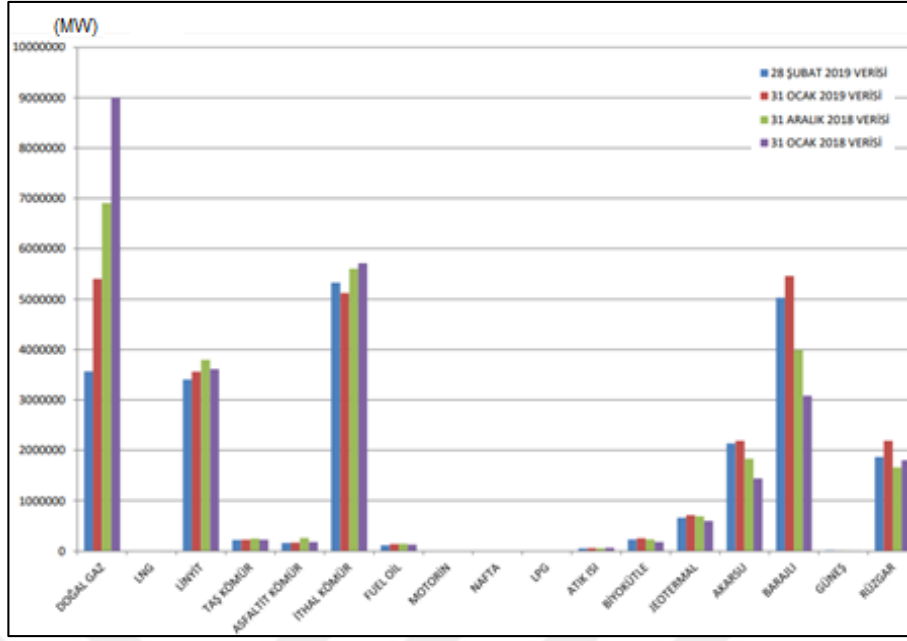
Bu tez çalışmasında akıllı şebekelerde devreye girme ve çıkma sırasında meydana gelebilecek gerilim değişimlerinin tüketicilere zarar vermesini engellemek ve bu problemlerden kaynaklanan hat üzerindeki kayıpları azaltmak amacı ile akıllı şebekeler üzerindeki güç kalitesini optimize etmek, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu sırasında meydana gelen elektriksel olayların istenmeyen etkilerini önleyerek sistemin daha verimli çalışması için yeni yöntemlerin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılan kaynakların sınırlı olması ve ülkemizdeki mevcut kaynakların ihtiyacımız olan enerjiyi karşılamak için yeterli olamaması yenilenebilir kaynakların daha etkin kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Elektrik üretimi için son yıllarda yapılan mikro HES'ler birim maliyeti düşürmek için yapılan çalışmalara katkı sağlasa da üretime katkısı beklenen oranda olamamıştır. Yenilenebilir diğer kaynakların oranı da dünya ortalamasının altında kalmıştır. Şekil 1.2'de TEİAŞ'tan alınan elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynakların 2006 ve 2016 yılları için birincil enerji kaynaklarına göre Türkiye kurulu gücü verilmiştir [90].



Şekil 1.2. 2006 ve 2016 yılları için Türkiye kurulu gücü.

Şekil 1.2'deki grafikte yenilenebilir kaynakların 10 yıl içindeki gelişimi gösterilmektedir. Enerji üretimindeki yenilenebilir kaynakların oranının az olması nedeniyle ülkemizde elektrik enerjisi ucuz değildir. Geçmiş yıllarla karşılaştırıldığında yenilenebilir kaynakların oranının artması, ilerisi için umut vaat eden bir gelişmedir. Enerji Bakanlığı verilerine göre; 2018 yılı ilk yarısı sonunda kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı; yüzde 32,0'ı hidrolik enerji, yüzde 26,4'ü doğal gaz, yüzde 21,4'ü kömür, yüzde 7,7'si rüzgâr, yüzde 5,4'ü güneş, yüzde 1,3'ü jeotermal ve yüzde 5,8'i ise diğer kaynaklar şeklindedir. Şekil 1.3'te üretim kaynaklarına göre enerji üretim miktarlarının güncel olarak miktarları verilmiştir [91].



Şekil 1.3. Türkiye'deki üretim kaynaklarına göre üretim miktarları.

Enerji üretilirken kullanılan fosil yakıtların yanması sonucu karbondioksit (CO₂), azot dioksit (NO₂) ve kükürt dioksit (SO₂) emisyonlarının önemli değerlere ulaşmasının yanında bu yakıtların yakın bir gelecekte tükenme olasılığı yenilenebilir kaynakların üretimdeki payının artırılması zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Yenilenebilir kaynakların ürettiği enerjinin birim maliyetlerinin düşük olması, çevre kirliliği oluşturmaması, atığı olmaması gibi pek çok avantajına karşılık iletim sistemine entegrasyonda yaşanan problemler birçok araştırmacının çalışma konusu olarak entegrasyon problemlerini ele almasına neden olmuştur. Konvansiyonel elektrik dağıtım sistemlerinde devreye girme ve yük boşalması durumlarında oluşan gerilim değişimleri akıllı şebekelerde de çözülmesi gereken bir problem olarak mevcudiyetini devam ettirmektedir.

Bu tez çalışmasında akıllı şebekelerde güç kalitesinin optimizasyonu ve yenilenebilir enerji kaynakları ile entegrasyonu konusunun seçilmesi, yukarıda kısaca anlatılan problemlere çözüm bularak yaşadığımız ülkeye bir katma değer kazandırmaktır. 2000'li yılların başlarında gündeme gelmeye başlayan ve özellikle de 2003 yılında Amerika'daki enerji kesintisinin meydana getirdiği etki ile önemi daha fazla hissedilen akıllı şebekelerin, gelişmiş ülkelerle birlikte, hızlı bir şekilde uygulamaya geçirilmesi gerekmektedir. Bu konuda yapılacak çalışmalar ve uygulamalar sisteme yabancı

birçok ülke için örnek teşkil edecektir. Ülkemizde yalnızca akıllı sayaç kullanımı ile başlayan geçiş sürecinde, yenilenebilir kaynakların payının artırılması ile üretimde ve iletimde de akıllı şebekelere doğru geçiş sürecinin hızlandırılmasına katkı sağlama amacına yönelik faaliyetler akademisyenlerin ve özel sektörde faaliyet gösteren arge departmanlarının gündemine aldığı çalışmaları başında gelmektedir [4].

1.3. TEZİN KAPSAMI

Tez çalışması toplam dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, konu hakkında kısaca bilgi verilmiş, literatürde yapılan çalışmalar, yenilenebilir kaynakların entegrasyon problemleri hakkında bilgi verilerek, çalışmanın amacı ve tezin ana hatları belirtilmiştir.

İkinci bölümde, güneş panellerinden ve rüzgâr türbinlerinden üretilen enerjinin entegrasyon yöntemleri, şebekeye bağlantı şekilleri hakkında bilgi verilmiştir. Burada kullanılan yöntemlerin olumlu ve olumsuz yönleri ile güç kalitesi üzerindeki etkilerine yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde yapılan benzetim çalışmalarına yer verilmiştir. Bu bölümde kendinden uyarımlı asenkron generatörün geçici ve sürekli durum analizi ile güneş panellerinden elde edilen enerjinin şebekedeki güç kalitesine etkisi, güneş enerji santralinden alınan deneysel ölçüm verileri ile yapay sinir ağı kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır.

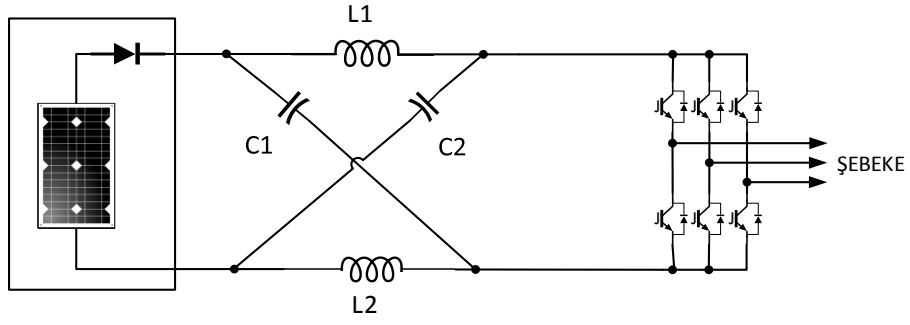
Dördüncü bölümde elde edilen sonuçlar ve üretilen enerjinin şebekeye entegrasyonunda problemlerin azaltılarak güç kalitesinin artırılabilmesi için önerilere yer verilmiştir.

BÖLÜM 2

2.1. GÜNEŞ PANELLERİNDEN ÜRETİLEN ENERJİNİN ŞEBEKEYE ENTEGRASYONU

Güneş enerjisinden fotovoltaik panel (PV) olarak adlandırılan güneş panelleri ile elektrik üretebilmektedir. Yarı iletken malzemelerden yapılan fotovoltaik paneller, güneşten gelen ışınların bir yarı iletken katmandan diğer katmana elektronları hareket ettirerek elektrik akımı oluşturma prensibi ile üretim yaparlar. Bu paneller üzerindeki hücreler, istenilen güç ve gerilimi elde edebilmek için birbirine paralel ya da seri bağlanırlar. Farklı kaplama teknikleri kullanılarak, yarıiletken malzemelerden silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi maddeler panel üretiminde kullanılmaktadır. İklimsel değişimlere bağlı olarak, güneş panellerinden alınan güç değişken bir karakteristiğe sahiptir. Bir güneş panelinin yapısına, ışınların gelme açısına bağlı olarak, yüzeye gelen enerji, %10-30 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan PV panellerde ortalama nominal verim yaklaşık olarak %15 civarındadır [92].

Fotovoltaik sistemlerde üretilen enerjinin, ekonomik bir alternatif kaynak olabilmesi için; yüksek verimle çalıştırılması, tesis maliyetinin mümkün olduğunca düşük tutulması ve sisteme entegre edilen güç kalitesinin şebeke için belirlenen standartlarda olması gerekmektedir. Belirlenen şartların sağlanması, temelde sistemin kontrolünün nasıl yapıldığı ile doğrudan ilgilidir. Akademik çalışmalarda, sinüzoidal darbe genişlik modülasyonlu kontrol yöntemleri ile empedans kaynaklı eviriciler kullanılarak yapılan uygulamalar olduğu gibi, bu eviricilerde uzay vektör modülasyonlu kontrol yöntemleri de kullanılarak değişik anahtarlama yöntemleri ile optimum çözüm için yapılan devreler mevcuttur. Yapılan çalışmaların sonucunda, sinüzoidal darbe genişlik modülasyonlu kontrol teknikleri ile kıyaslandığında, uzay vektör modülasyonunun Şekil 2.1'de bağlantı şeması verilen empedans kaynaklı eviricilerde istenen sonuçları verecek şekilde uygulanabileceği ve daha uygun bir yöntem olduğu gösterilmiştir [93].



Şekil 2.1. Empedans kaynaklı evirici.

Güneş kaynaklı üretim yapan sistemler, panellerin maliyetlerinin daha düşük yapılabildiği ölçüde, enerji üretim pazarındaki yerini daha da arttırmaktadır. Panellerle birlikte eviriciler bu aşamada en önemli bileşenlerden birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Gerilim veya akım kaynaklı olarak yapılan bu sistemlerde yapının özelliğinden kaynaklanan bazı problemler meydana gelebilmektedir.

Gerilim kaynaklı eviricilerde meydana gelebilecek problemler aşağıdaki şekilde sıralanabilir [93,94];

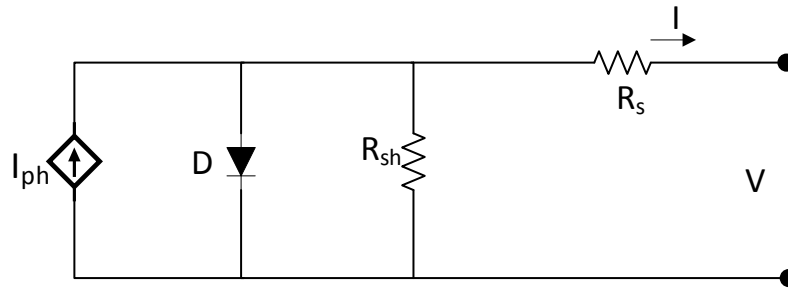
- DC bara geriliminin düşük olması durumunda, DC-DC dönüştürücü kullanılmak suretiyle baradaki gerilimin olması gereken seviyeye çıkarılması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.
- Normal şartlarda devrede aynı kolda bulunan alt ve üst sıradaki anahtarlama elemanları aynı anda devreye girip iletimde olamazlar. Ancak elektromanyetik girişim (EMI) benzeri istem dışı meydana gelen olaylarda anahtarlar beraber çalışabilir ki bu durumda ekipmanların zarar görmesi söz konusudur.
- Anahtarlama elemanlarının iletime girme sırasındaki gecikmeden kaynaklanan ölü zaman, çıkışta harmonik oluşumuna sebebiyet verir ve güç kalitesine olumsuz etki yapar.

Akım kaynaklı eviricilerde meydana gelebilecek olumsuzluklar şu şekilde özetlenebilir [93,94];

- Yükseltici bir karakterdedirler, gerilim için çalışma aralığının geniş olması istenen durumlarda, sisteme DC-DC dönüştürücü ilavesi gerekmektedir.
- Devrede IGBT varsa, seri bir diyot kullanmak gerekir. Bu durum IPM (Integrated Pest Management) kullanımını daha dar bir alanda yapma zorunluluğu getirir.
- Kaynağın, anahtar pozisyonları ile bağlantılı olarak açık devre şeklinde çalışması bağlı olunan şebeke için riskli bir durum meydana getirir.
- Komütasyonun emniyetli olabilmesi için gereken overlap (bindirme) süresinin çıkışta harmoniklere neden olması söz konusudur.

Bu iki tip eviricinin dezavantajlı yönlerini iyileştirmek için, girişinde empedans ağı bulunan, empedans kaynaklı evirici modeli kullanılmaktadır. Bu devrede DC-DC dönüştürücüye ihtiyaç kalmadan yükseltme-düşürme işlemi yapılarak geniş bir aralıkta gerilim ayarı da yapılabilmektedir. Devrede kullanılan anahtar sayısının azaltılması ile sistem daha küçük boyutlu ve daha az maliyetle tesis edilebilir hale gelmektedir. Güvenlik açısından bakıldığında, kaynak çıkışının evirici üzerinden kısa devre olmasının ya da açık devre olması durumunda sakınca oluşturmaması sistemin bir diğer avantajlı yönüdür.

Fotovoltaik panellerle elektrik üretiminde analiz yapmak ve modelleme için hem basit ve hem de gelişmiş eşdeğer devreler literatürde yer almaktadır [95,96]. Şekil 2.2'de güneş paneli eşdeğer devresi verilmiştir. Hava durumu verileri, ışığa ve sıcaklık üretilen enerjinin miktarında önemli rol oynamaktadır [97].



Şekil 2.2. Güneş paneli eşdeğer devresi.

Şekil 2.2'deki eşdeğer devreye göre çıkış akımı aşağıdaki (2.1)'de verilmiştir. Eşitlikte I_o , diyodun ters saturasyon akımı, q , bir elektronun yükü, A , diyot ideallik faktörü, K , boltzman sabiti ve T ise Kelvin cinsinden çalışma sıcaklığı olarak kullanılmaktadır.

$$I = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

Güneş panelleri için kullanılan Şekil 2.2'deki eşdeğer devrede, fotonların etkisi ile üretilen enerji akım kaynağı olarak I_{ph} ile gösterilmiştir. Işınım ve sıcaklık sabit olduğunda sabit bir değere sahiptir. I_{sh} direnci sızıntı akımını, R_s direnci çıkıştaki gerilim düşümünü temsil etmektedir. R_{sh} 'deki değişimler fotovoltaik üretimin verimliliğini etkilemezken, R_s 'deki küçük değişimler bile etkili olmaktadır. R_s direncindeki küçük bir artış, modül çıkışındaki gerilimin düşmesine neden olmaktadır [98].

2.2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ŞEBEKEYE ENTEGRASYONU

Rüzgar türbinlerinde elde edilen mekanik gücün etkisi ile farklı türlerdeki generatörlerden elektrik enerji elde edilmektedir. Sistemde elde edilen mekanik güç rüzgar hızı, türbin tipi ve büyüklüğü ile değişmektedir. Rüzgar türbini kanadının taradığı alan (A), V_1 hızıyla geçen hava tabakasının rüzgar türbinine verdiği güç (ρ hava yoğunluğu olmak üzere) eşitlik (2.2) ile elde edilebilir.

$$Pr = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 C_p \quad (2.2)$$

Burada C_p genellikle rüzgar türbini üreticileri tarafından deneysel olarak belirlenen katsayılar olup, teorik olarak rüzgar türbininin önündeki rüzgar hızının (V_1) türbin arkasındaki rüzgar hızına (V_3) oranı şeklinde belirlenir ve türbin güç katsayısı olarak tanımlanır. Rüzgardan elde edilecek güç C_p ile doğru orantılıdır ve aşağıdaki eşitliklerle hesaplanır.

$$C_p = \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{V_1}{V_1} + \frac{V_3}{V_1} \right) \left(\frac{V_1^2}{V_1^2} - \frac{V_3^2}{V_1^2} \right) \right\} \quad (2.3)$$

Eşitlik (2.3'te;

$$\lambda = \frac{V_3}{V_1} \quad (2.4)$$

yazılarak,

$$C_p = \left\{ \frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda) \right\} \quad (2.5)$$

Eşitlik (2.5 elde edilir. C_p 'ye rotor verimi veya tübin verimi denir.

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan jeneratörler enerji kaynağının karakteristiği nedeniyle, sürekli değişen bir mekanik güç ile tahrik edilerek çalışmaktadırlar. Yenilenebilir enerji santrallerinin entegrasyonunda; üretim generatörünün modeli (kontrol sistemleri), bağlantı yapılan noktadaki kısa devre gücü, şebeke hattının karakteristik özellikleri (omik ve endüktif), koruma rölelerinin aşırı akım durumunda maksimum akım kapasiteleri en önemli etkenler olarak karşımıza çıkmaktadır. Dağıtık üretim yapan bir yenilenebilir enerji santralinin şebekeye entegrasyonunun optimum bir şekilde yapılabilmesi için, sağlamak zorunda olduğu özellikler literatürde ve resmî gazetede yayınlanan yönetmeliklerde aşağıdaki şekilde belirtilmiştir;

- Aktif ve reaktif enerji üretimlerinin değişimi ile şebekedeki gerilim değişimlerini önlemek,
- Bağlanılan şebekedeki hat ekipmanlarının kısa devre akım sınırları ve ısı dayanım kapasitelerini zorlamamak,
- Harmonikler ve kırpışma (fliker) üretiminin yönetmeliklerdeki sınırları aşmamak,
- Devreye girme ve çıkma sırasında anahtarlama gibi geçici durumlarda şebeke kararlılığının sınır değerler içerisinde kalması gerekmektedir [16,99].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı Avrupa’da uzun yıllardır politik ve ekonomik açıdan desteklenmektedir. Özellikle Japonya’daki Fukushima nükleer santralindeki kazanın ardından Almanya hükümeti nükleer enerjiden elektrik üretiminden vazgeçme kararı alarak devre dışı bırakılan nükleer santrallerin ortaya çıkardığı enerji açığına kapatmak için yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yatırımları ve desteklerini arttırmıştır. Bunun sonucunda özellikle rüzgâr ve güneşe dayalı yenilenebilir enerji kaynakları yatırımında teknik gereksinimler ve entegrasyon ile ilgili yasal durumların belirlenmesi için kanunlar ve yönetmelikler hazırlanmıştır [100].

Ülkemizdeki kurulmuş rüzgâr türbinlerinin, yönetmelikler çerçevesinde tanımlanmış bulunan bağlantı teknik şartnamesine göre yüksek gerilim şebekesine bağlantısı mümkün olabilmektedir. Benzer şekilde, Almanya’daki TenneT projesindeki bağlantı yönetmeliğine göre; şebeke frekansı ve gerilimde tanımlanan bölgeler dışına çıkıldığında, kontrol sistemlerinin müdahalesi ile aktif güç ayar değeri sıfırlanır ve üretim tesisi devreden çıkarılarak şebeke beslemesi sonlandırılır. Bu projedeki uygulamada, çalışma bölgesi gerilimi 140 kV- 170 kV arası ve frekans aralığı 47,5 Hz- 51,5 Hz arası değerler belirlenmiştir. Belirlenen bu sınırlar dışına çıkıldığında ilgili üretim birimleri kontrollü olarak devre dışına çıkarılmakta, ölçüm değerleri limit değerler içine geldiğinde ise üretim sistemleri tekrar devreye alınmaktadır [101].

Elektrik üretim tesislerinden şebekeye verilen aktif güç, ihtiyacı karşılayacak kadar olmalı, fazla veya az olması durumunda şebekenin kararlı çalışma durumu tehlikeye girebilmektedir. Aktif güçle birlikte reaktif güç üretimi de şebekenin ihtiyacına uygun bir şekilde dengelenmelidir. Yenilenebilir kaynaklardan şebekeye entegre edilen enerjinin artmasıyla birlikte, şebekedeki salınımların dengelenebilmesi ve güç kalitesinin istenen seviyede tutulabilmesi için şebekeye bağlantı noktalarında kontrol sistemlerinin kullanılması lüzumlu hale gelmiştir. Farklı gerilim seviyelerinde şebekeye entere olan yenilenebilir kaynakların aktif ve reaktif güç kontrolünü, güç kalitesindeki değişimleri hızlı bir şekilde algılayarak yapması yönetmeliklerle zorunlu hale getirilmiştir. Literatürde reaktif güç hesabı için aşağıdaki eşitlik verilmektedir [101]:

$$Q = P \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1} \quad (2.6)$$

Rüzgar enerjisi ile elektrik üreten sistemdeki elektriksel performansı ifade eden güç kalitesi, şebekeye bağlantı durumunda rüzgâr türbinlerinin şebekenin gücü ve gerilim kalitesi üzerinde yaptığı etki önem arz etmektedir. Özellikle bağlantı yapılan şebekeye göre daha güçlü yapıda olan, artan sayılardaki rüzgar türbinleri şebekeye bağlantısında güç kalitesine etki eden parametrelere dikkat edilmesi gerekir. Bağlantı sonrasında güç kalitesinin durumunu tahmin etmek ve kabul edilebilir sınırlarda gerilim kararlılığı sağlamak için kullanılacak rüzgâr türbinlerinin karakteristikleri göz önüne alınmalıdır. Buna ilaveten, şebekeye bağlantı noktasında, elektrik sisteminin de parametreleri de göz önüne alınarak yapılacak hesaplamalarla sorunsuz bir entegrasyon mümkün olabilecektir. Bu bağlantı şartlarını tanımlayan IEC 61400-21 standardı, bir rüzgâr türbini üretim tesisi planlanırken, güç kalitesinin belirlenmesi için uygun parametreler ve yapılan ölçümlerle yapılacak olan hesaplama yöntemleri tanımlayan uluslararası kabul görmüş bir standart olarak kullanılmaktadır. Güç kalitesini etkileyen, Ani Gerilim Değişimleri (Voltage step changes), Kırpışma (Fliker), Harmonik Bozulma ve Gerilim Dengesizliği gibi dört temel husus bulunmaktadır [14,102].

Ani gerilim değişimi, hattaki manevra sırasındaki anahtarlama işleminden sonra, gerilim regülatörleri ile kompanzasyon için kullanılan kondansatörlerin devreye girmesinin ardından, kademe değiştirme ve diğer açma-kapama işlemleri ile gerilim seviyesinde meydana gelen değişimlerdir. Alıcıların çektiği akımdaki ani değişimler de gerilimde artış veya azalma şeklinde kendini gösterir ki bu durum diğer alıcıları olumsuz etkiler. Gerilim kontrol mekanizmalarının kademe değiştirme gibi müdahalelerle bu ani değişimleri kontrol edememesi durumunda, şebekenin herhangi bir noktasında gerilim değerlerinin belirlenen limitlerin dışına çıkmasına neden olabilir. Sabit hızlı indüksiyon generatörü kullanan rüzgâr türbinlerinin şebekeye entegrasyonu sırasında da ani gerilim değişimleri oluşabilir. Pasif kontrollü (stall regulated), sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde, devreye girme esnasında rotor hızlanırken kontrol mekanizması olmadığı için bu sorun meydana gelmektedir. Benzer bir durum çift hızlı rüzgâr türbinlerinde bir hızdan diğerine geçerken meydana gelebilmektedir. Türbinin maksimum hızının aşılması ve durdurulması sırasında da ani gerilim

değişimlerine rastlanılmaktadır. Başlatma sırasında rotor hızını kontrol edebilen kanat açısı kontrollü (pitch regulated) rüzgâr türbinlerinde bu etki azaltılabilir. Bu etki değişken hızlı türbinlerde daha az görülmektedir. Sabit hızlı rüzgar türbinlerinde ani gerilim değişimlerini söndürmek ve değişimin limitler içinde kalmasını sağlamak için genellikle yumuşak geçiş yapabilen güç elektroniği anahtarlama elemanları kullanılmaktadır [102].

Şebekedeki ana dalga üzerinde hızlı bir şekilde ve arka arkaya meydana gelen ani ve düşük seviyeli değişimler kırpışma (flikler) olarak değerlendirilir. Gerilim kalitesindeki problemlerin kaynağı, dalgalı yüklerle birlikte üretim sırasında meydana gelen gerilim değişimleridir. Özellikle devreye sıklıkla girip çıkan büyük motorlar, ark-kaynak makinaları ve metal eritme cihazları kaynaklı oluşan kırpışma, şebekenin zayıf olması durumunda önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Rüzgâr enerji santrallerinde, türbinlerin başlama ve durdurmaları ile çift hızlı rüzgâr türbinlerinde generatörler arasında yapılan anahtarlama geçişler kırpışmayı meydana getiren en önemli olaylardır. IEC 1000-3-7 kırpışma değerlendirmeleri ile ilgili hazırlanan standarttır. Değerlendirmenin esas olan; kare dalga sinyal uygulanmış bir akkor flamanlı lamba için görünürlük eşiğini veren bir eğridir. Çıplak gözle görülebilen rahatsızlık kırpışma şiddet faktörü (Pst) olarak isimlendirilir. Pst on dakikalık aralıklarla ölçülürken, uzun dönem kırpışma şiddet faktörü (Plt) iki saatlik periyotlarla belirlenmektedir. IEC 1000-3-7 standardında, Pst ve Plt için ayrı ayrı kırpışma seviyesi ve toplam kırpışma seviyesi için limit değerler verilmektedir [103].

Harmonik, şebeke geriliminin temel sinus dalgasının şeklindeki bozulmayı ifade eden bir durumdur. Temel dalganın şeklini bozan etkiler, ark kaynak makinaları, hız kontrolörleri, floresan lambaların balastları, bilgisayarlar, yarıiletken anahtarlama elemanları içeren cihazlardır. Meydana gelen harmonik, bu cihazların türüne ve oluşan harmoniğin numarasına göre farklı etkiler ortaya çıkartarak değişik zararlara yol açabilmektedir. Hızları değişken olan rüzgar türbinlerindeki elektronik güç dönüştürücüleri, temel frekansın üzerinde frekans yaydığı harmonik oluşturarak tüketicileri olumsuz etkilemektedir. Günümüzde artan sayıdaki rüzgar türbinlerindeki güç dönüştürücülerinden dolayı harmonik ölçümleri ve etkilerinin belirlenmesi önemlidir. Harmonik etkisini azaltmak için rüzgar türbinlerinde darbe genişlik

modülasyonlu (PWM) güç dönüştürücüleri tercih edilmektedir. Bu tip dönüştürücülerin ürettikleri düşük seviyeli harmonikler, şebeke için tanımlanan değerlerin altındadır [104]. IEC 1000-3-6 orta ve yüksek gerilim şebekelerinde projelendirme ve şebeke uyumluluğu hakkında temel hususları belirleyerek her bir tesis için oluşan etkinin belirlenmesinde gerekli olan yöntemleri vermektedir [105].

Rüzgâr türbinlerinin şebekeye entegrasyonunda güç kalitesine etkisi kurulumdan önce değerlendirilmeli ve güç kalitesi standartlara uygun olacak şekilde santralin çalışma şartlarını yerine getirmesi sağlanmalıdır. Entegrasyondan sonra meydana gelecek olan etkileri belirleyebilmek için üretici firma tarafından verilen rüzgâr türbinlerinin elektriksel karakteristikleri değerlendirilerek şebekede oluşabilecek entegrasyon problemlerinin önüne geçilebilir. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan farklı türdeki generatörlerin çalışma karakteristiklerinin bilinmesi, şebekeye entegrasyon sonrası oluşabilecek değişimlerin önceden kestirilebilmesi için büyük önem taşımaktadır. Entegrasyon öncesinde kurulum yapılan bölgenin ve kullanılan generatörün özellikleri göz önüne alınarak yapılacak düzenlemelerle oluşabilecek problemlerin en aza indirilmesi mümkün olabilecektir.

2.2.1. Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Generatörler

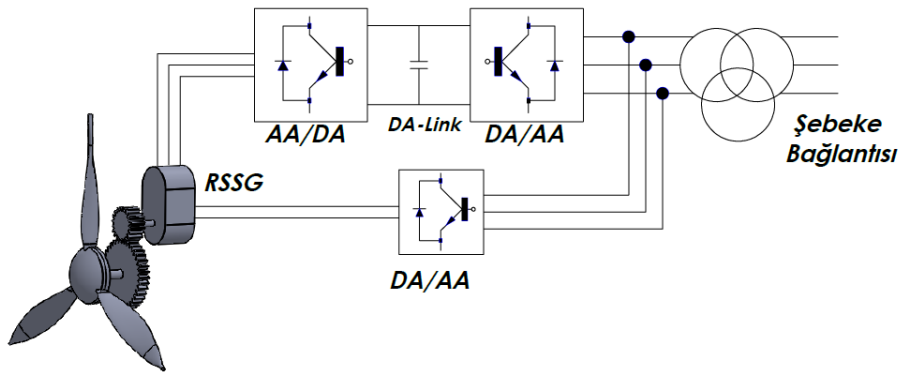
Rüzgâr türbinlerinde elektrik üretimini için kullanılan generatörler, enerji üretiminde etkili olan kaynağın karakteristiğinden dolayı, sürekli değişim gösteren bir mekanik gücün etkisi ile değişken bir şekilde tahrik edilerek çalışmaktadırlar. Yapıları göz önüne alınarak bir sınıflandırma yapıldığında, genel olarak kullanılan generatörleri 3 ana başlık altında incelemek mümkündür;

- Senkron yapıdaki generatörler
 - a) Rotoru sargılı senkron generatörler (RSSG)
 - b) Daimi mıknatıslı senkron generatörler (DMSG)
- Asenkron yapıdaki generatörler
 - a) Sincap kafesli asenkron generatörler (SKAG)
 - b) Rotoru sargılı asenkron generatörler (RSAG)

- Doğru akım üretimi yapan generatörleri (Anahtarlamalı Relüktans Jeneratör (ARG))

2.2.1.1. Senkron Generatörler

Senkron yapıdaki generatörler, diğer benzer güçte üretim yapan makinalarla karşılaştırıldığında, kurulum maliyetleri daha yüksek ve yapısal olarak daha fazla karmaşık sistemlere sahip olan makinalar olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapısal olarak, bilezikler ve bu bilezikler üzerindeki fırça üzerinden bir doğru akım kaynağına bağlı olarak çalışırlar. Bazı tiplerinde ise sabit mıknatısla manyetik alanı oluşturan bir rotor ve gerilim üreterek bağlı bulunduğu bara/yükü besleyen üç faz sargılarının bulunduğu statordan meydana gelir. Sabit hızlı sistemlerde kullanım için daha uygun bir yapıya sahip olan bu generatörler, sabit devir sayısına bağlı olarak sabit bir frekansta çalışmaktadırlar. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan senkron generatör tiplerinde, gerilim üretmede gerekli olan manyetik alan oluşumu için rotora uygulanan doğru gerilim şebeke üzerinden temin edilmektedir. Şebekedeki alternatif gerilim doğrultma ünitesinde doğru gerilime dönüştürüldükten sonra fırçalar ve bilezikler aracılığıyla rotor sargıları üzerinde durgun bir manyetik alan meydana gelmesini sağlar. Rüzgâr tahriki ile dönmekte olan rotordaki manyetik alan kuvvet çizgileri stator üzerindeki sargıları keserek gerilim üretilmesini sağlar [106].



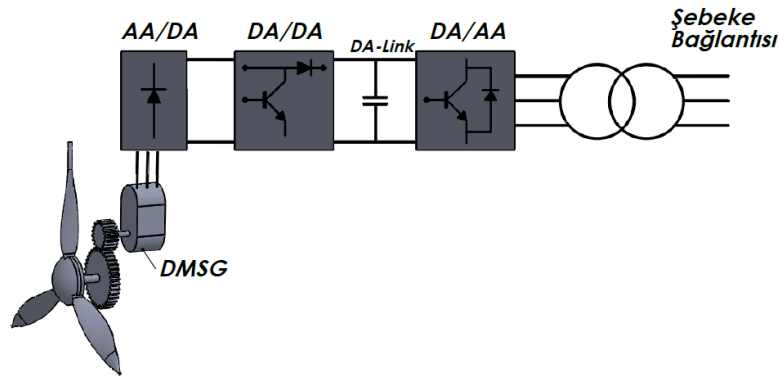
Şekil 2.3. Rotoru sargılı senkron generatörün şebekeye bağlantısı.

Şekil 2.3'teki rotoru sargılı senkron generatör, gerilim kaynaklı iki dönüştürücüden meydana gelen dört bölgeli bir güç konvertörü aracılığı ile şebekeye bağlanmıştır.

Dalga genlik modülasyonu kullanılarak çift yönlü kontrol edilebilen bu bağlantı yapısı kullanılarak, duran kısımdaki stator sargılarında üretilen gerilim şebekeye aktarılabilir. Sistemde şebeke tarafında bağlı bulunan konvertörün görevi generatörün üretmekte olduğu aktif ve reaktif gücü ayarlamaktır. Stator sargılarına bağlı olan diğer konvertörün görevi ise elektromanyetik torku kontrol etmektedir. Sistemin diğer generatörlere göre avantajları şunlardır;

- Elektromanyetik tork, statordaki akımın tamamının kullanılması ile üretildiği için verimin yüksek olması sağlanmıştır. Diğerlerine kıyasla bu makinanın verimi yüksektir.
- Generatörün yapısı, güç katsayısının doğrudan kontrolü sağlayacak uygun bir yapıya sahiptir. Çıkık kutuplu olarak yapılan alan sargısı kontrol için uygun yapıyı meydana getirmiştir ve bu yapı aynı zamanda generatörün çalışması esnasında stator akımının çok düşük olmasını temin edebilmektedir.
- Kutup sayısı artırılması ile düşük devir sayılarında bile gerilim üretimi yapılabilmektedir. Bu yapı sayesinde pervane miline monte edilen dişli sisteme ihtiyac ortadan kaldırılması mümkündür.

Daimî mıknatıslı diğer senkron generatörle kıyaslandığında, bu generatörün rotorunun sargılı olması bir dezavantaj olarak görülmektedir. Buna olumsuz duruma ilave olarak, bağlı bulunulan şebeke sistemine entegre edilecek olan aktif ve reaktif güçlerin uygun bir şekilde kontrolü için, kurulu rüzgâr gücünden %20 daha büyük bir güçteki konvertere ihtiyaç duyulmaktadır [107,108].



Şekil 2.4. Daimî mıknatıslı senkron generatör (DMSG).

Gerilim üretimi için gerekli olan manyetik alanı oluşturmada kullanılan sargıların yerine daimi mıknatısların kullanılmasıyla; sargı, bilezikler ve fırçaların bulunmaması nedeniyle makina yapısı sade bir hale gelmiştir. Şekil 2.4'te üretilen gerilimin şebekeye aktarılması için gerekli bağlantı görülmektedir. Generatörde üretilen üç fazlı gerilim doğrultularak belirlenen DA seviyesine yükseltildikten sonra tekrar DA/AA kıyıcısı kullanılarak şebekeye entegrasyon sağlanmıştır. Şekildeki yükseltici tip DA/DA kıyıcısının görevi elektromanyetik torku kontrol etmektedir. Güç katsayısını da kontrol etme görevini yerine getiren şebekeye bağlı konvertörün bir diğer fonksiyonu ise DA barasındaki gerilimi regüle etmesidir. Bu bağlantı yapısının genellikle düşük güçlü rüzgâr türbinlerinde tercih edildiği görülmektedir [108].

Daimî mıknatıslı senkron generatörün avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

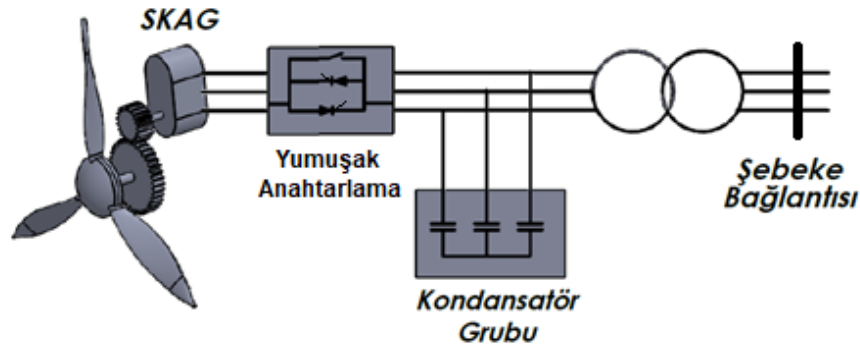
- Uyarım akımı için fazladan bir enerji kaynağına ihtiyaç bulunmamaktadır. Bu nedenle, genellikle yerleşim birimlerinden uzakta tesis edilen rüzgâr türbinleri için gayet uygun bir yapıya sahiptir.
- Elektrik üretimi farklı devir sayılarında yapılabilir.
- Yapıları basit, arıza yapacak parça sayısı az olduğu için fazla bakıma ihtiyaç duymazlar.
- Küçük güçlü sistemlerde ekonomik bir çözüm sağlarlar.

Dezavantajları;

- Daimî mıknatısların fiyatları fazladır.
- Yarıiletken elemanların kullanıldığı doğrultucular yardımıyla akımın genliğini artırma ihtiyacı bulunmaktadır.
- Daimî mıknatısların zamanla manyetik özelliklerini kaybetmeleri söz kousudur.
- Generatörün güç katsayısının kontrolü mümkün değildir.

2.2.1.2. Asenkron Generatörler

Asenkron generatörler fiziki olarak sade bir yapıya sahip olmaları, arıza yapacak parça sayısının azlığı ve fiyatlarının ekonomik olması gibi nedenlerle endüstriyel ortamlarda ve özellikle rüzgâr türbinlerinde elektrik üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapısal avantajlarının yanında, değişken hızlı rüzgâr sistemlerinde tork titreşimlerinin azaltılması konusunda performansları iyi bir karakteristiğe sahiptir. Bu generatörlerden gerilim elde etmek için ve şebekeye entegrasyon noktasındaki bağlantıda, Şekil 2.5'te de görüldüğü gibi kondansatör elamanlarına ihtiyaç bulunmaktadır. Gerilim üretiminde ihtiyaç duyulan mıknatıslama için gerekli olan reaktif akım bu kondansatör grubundan temin edilmektedir. Reaktif akım ihtiyacı için gerekli olan bu düzenekler sistemin dezavantajlı yönü olarak karşımıza çıkmaktadır [109].



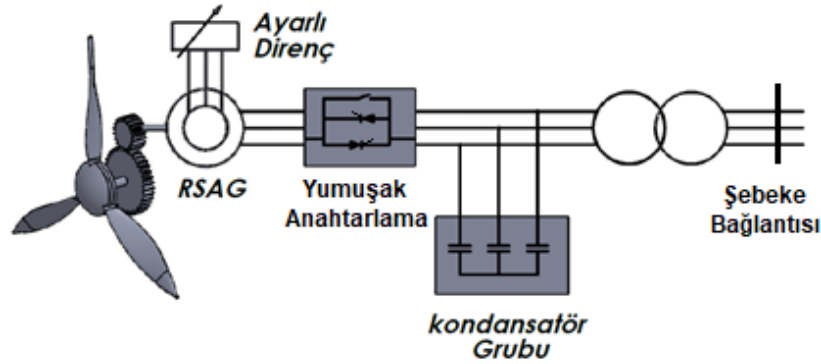
Şekil 2.5. Sincap kafesli asenkron generatör şebeke bağlantısı.

Rotor bölümünde sargılar yerine bir yüzü silisli sacların paketlenmesiyle oluşturulmuş oluklara alüminyum döküm yapılarak kısa devre çubukları kullanılmıştır. Bu generatörler yapıları hem sabit hızlı ve hem de değişken hızlı rüzgar sistemlerinde kullanılabilir bir özelliktedir. Çalışma sırasında meydana gelen manyetik gürültünün azaltılması ve iyi bir kalkış momenti elde edebilmek amacıyla rotor olukları mile paralel olarak değil, mil eksenine ile belli bir açı oluşturacak şekilde imal edilmektedir. Makinanın hareketli kısmından enerji almak veya enerji uygulamak için fırçaya ihtiyaç duymaması, sağlam mekanik sistemi ve güvenli bir çalışma ortamı sunan yapısına ilaveten maliyetlerinin düşük olması fazla tercih edilme nedenlerinin başında

gelmektedir. Rüzgar türbinlerinde fazlaca tercih edilen bu makinanın olumsuz yönleri de şu şekilde sıralanabilir [110];

- Generatörün çalışmasında etkili olan parametreler sıcaklıkla ve frekans etkisi ile değişim gösterebilmektedir. Bu değişken durum sistemin kontrolünde karmaşık bir durumun oluşmasına ve kontrolün zorlaşmasına neden olmaktadır.
- Moment-hız eğrisinin doğrusal olması nedeni ile rüzgârın hızında meydana gelecek olan değişimlerin şebekeye doğrudan iletildiği görülmektedir. Bu durumda sistemin şebekeye entegrasyon noktalarındaki akımın, olması gereken değer 7-8 katına çıkması mümkün olabilmektedir.

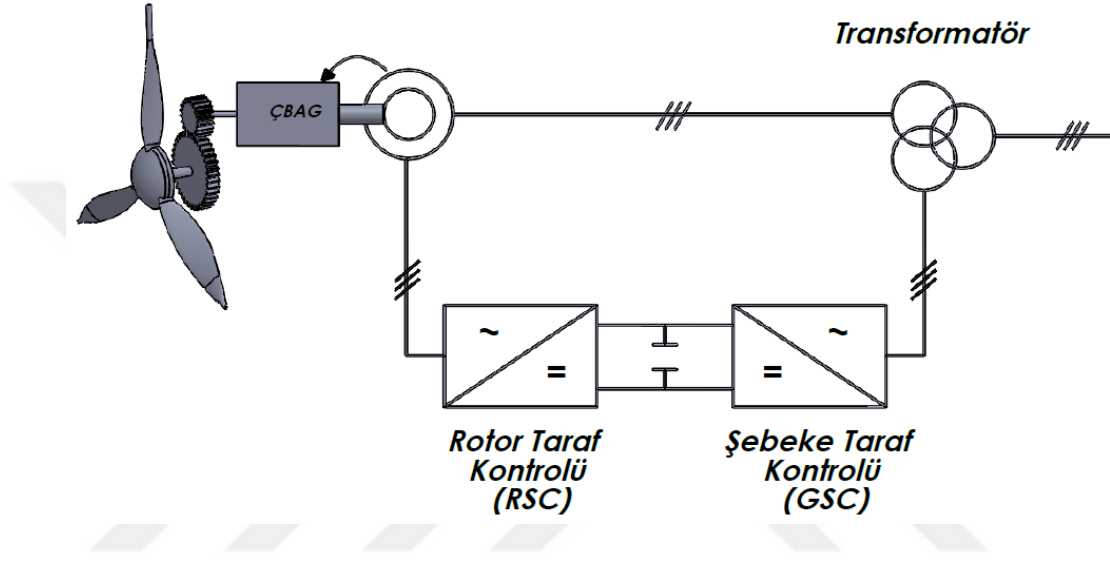
Sincap kafesli (kısa devre çubuklu) asenkron generatörler reaktif güç tükettikleri için büyük güçlü rüzgar türbini sistemlerinin zayıf şebekelere bağlanması durumunda bağlantı yapılan şebeke için problem meydana getirebilmektedir. Bu generatörlerde tüketilen reaktif gücün, şebeke kompanzasyonu için kullanılan kondansatörlerle dengelenecek şekilde tedbir alınması gerekmektedir.



Şekil 2.6. Rotoru sargılı (bilezikli) asenkron generatörün şebeke bağlantısı.

Rotoru sargılı asenkron generatörde, sincap kafesli asenkron generatörden farklı olarak rotor kısmında sargılar vardır ve bu sargıların uçları rotor üzerinde bulunan bileziklere bağlanmıştır. Bileziklerle temas halindeki fırçalar aracılığı ile rotordaki sargılar bir doğru akım kaynağına ya da ayarlı besleme yapabilmek için ayarlı bir dirence bağlanabilmektedir. Şekil 2.6'da gösterilen şebekeye bağlantı sistemi ile

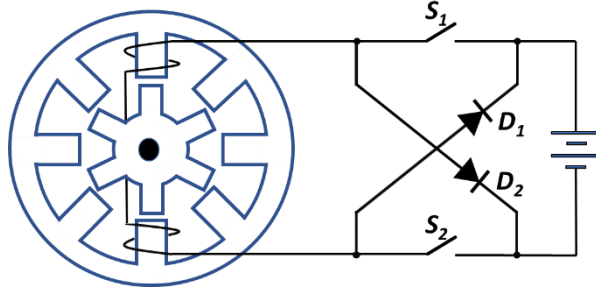
rotordaki elektriksel parametreler değiştirilebilir ve bu kontrol sayesinde rotor gerilimi de ayarlanabilmektedir. Generatörün motor olarak çalışmasında ise rotorun elektriksel parametreleri üzerinde yapılabilen bu ayarlamalar ile motor devir sayısı da kontrol edilebilmektedir. Bu generatörün sincap kafesli asenkron generatör yapısına göre daha pahalı olmasının yanında bakım gerektiren fazladan parçalarının varlığı, en çok tercih edilen üreteçler listesinde aşağı sıralarda yer bulmasına neden olmaktadır.



Şekil 2.7. Çift beslemeli asenkron generatör bağlantısı.

Şekil 2.7'deki çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) yapısı, statoru doğrudan şebekeye bağlanan ve rotora bağlı güç elektroniği elemanları içeren kontrol devresinden meydana gelmektedir. Rüzgar türbinlerinin değişken hızlı çevirim santrallerinde kullanılan diğer reteç tiplerine kıyasla verimleri daha yüksek olup, kurulum maliyetleri ise daha düşüktür. Ayrıca, bu tip generatörlerde statorda elde edilen aktif güç (P_s) ve reaktif güç (Q_s), güç elektroniği elemanlarından oluşan kontrol devresi ile rotor üzerinden dört bölgede kontrol edilebilmektedir. ÇBAG bu özelliklerinden dolayı hem değişken ve hem de sabit hızlı rüzgar santrallerinde en çok tercih edilen generatör tipi olarak üst sıralarda yer almaktadır [111].

2.2.1.3. Doğru Akım Generatörleri



Şekil 2.8. Doğru akım generatörünün bağlantısı.

Doğru akım üretmek için kullanılan anahtarlama relüktans generatörün, fiziki yapısının sağlamlığı, tork güç oranının yüksek olması, yüksek verimlilik ve fiyatının uygun olması nedeniyle son zamanlarda artan oranlarda daha fazla tercih edildiği gözlenmiştir. Bu makine yapısında, çoklu sargılar statordaki çıkık kutupların üzerine yerleştirilmiştir. Uyarım durumu ve üretim modu olmak üzere iki farklı çalışma durumundan bahsetmek mümkündür. Fiziki yapı olarak, Şekil 2.8’de gösterildiği gibi iki adet anahtar ve her bir faza bağlanan iki adet diyottan meydana getirilmiştir. Uyarım durumu için çalışmada, S_1 ve S_2 anahtarları açık pozisyonda iken stator sargılarına harici bir enerji kaynağı tarafından uyarım akımı verilerek manyetik alan oluşması sağlanmaktadır. Gerilim üretimi aşamasında ise S_1 ve S_2 anahtarları kapanmakta ve generatörde üretilen gerilim $D_1 - D_2$ diyotları üzerinden sisteme aktarılmaktadır [112].

BÖLÜM 3

BENZETİM ÇALIŞMALARI

Güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri yenilenebilir bir kaynak olarak elektrik üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde yenilenebilir kaynakların, toplam üretimdeki düşük oranı nedeni ile şebekedeki enerji dengesini bozmaları söz konusu değildir. Ancak artan üretim miktarları ile birlikte önümüzdeki yıllarda büyük bir problem olarak karşımıza çıkmaması için gerekli tedbirlerin alınması gerekmektedir. Diğer yenilenebilir kaynaklarla karşılaştırıldığında, dünyanın farklı coğrafyalarında bu iki kaynakla üretim mümkün olabilmektedir. Ancak, özellikle rüzgârın değişken karakteristiğinden dolayı, bu iki kaynaktan elde edilen enerjinin entegrasyonunda kaynağın etkisini en aza indirerek şebekede enerji kalitesini yüksek tutmak gerekmektedir. Bunu yapabilmek için üretim kaynağının, üretime etki eden parametrelerin değişimi ile birlikte nasıl davranacağını bilmek önemlidir.

Bu tez çalışmasında rüzgâr türbinlerinde sıklıkla kullanılan kendinden uyarımlı asenkron generatörün geçici ve sürekli durum analizi ile birlikte güneş panellerinde üretime etki eden parametrelerin şebekedeki enerji kalitesine etkileri incelenmiştir. Üretim tesisinin kurulumundan önce yapılan etüt çalışmaları ile birlikte şebeke entegrasyonunda oluşabilecek problemlerin önceden kestirilmesi için oluşturulan model ile bu alanda çalışma yapanlara katkı sağlanması amaçlanmıştır.

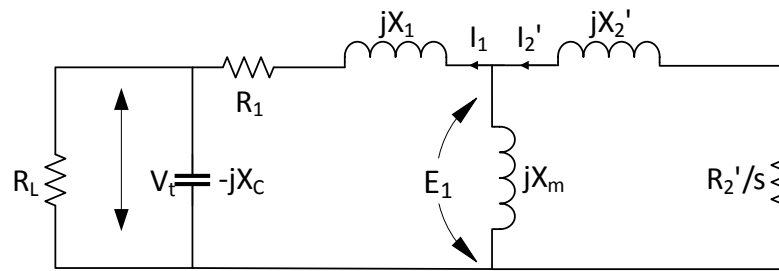
3.1. KENDİNDEN UYARTIMLI ASENKRON GENERATÖR ANALİZİ

Yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak çok fazla kullanılan rüzgâr türbinlerinde üretilen elektrik enerjisinin şebekeye entegrasyonu için uygun şartların sağlanabilmesi ve güç kalitesinin korunabilmesi bakımından, üretim için kullanılan generatörlerin çalışma karakteristiklerinin önceden bilinmesi önemlidir. Önceki bölümde, rüzgâr enerjisi ile çalışan türbinlerde enerji üretmek için kullanılan generatör yapıları incelenmiş ve bu

bölümde de kullanımı yaygın olan asenkron generatörün benzetim çalışması yapılmıştır. Şebekeye bağlantılı bir şekilde çalışan rüzgar çevrim sistemlerinde generatör bağlantı noktasındaki gerilim, frekans gibi değişkenler şebeke değerlerine uygun hale gelecek şekilde otomatik olarak ayarlanmaktadır. Doğrudan yüke bağlı olarak çalışan generatörlerde ise çıkış gerilimi ve frekansın yükün değişimine de uygun olacak şekilde kontrol mekanizmaları tarafından ayarlanması gerekir.

Kaynağın değişken bir karakterde olduğu uygulamalarda SKAG'ün kullanımı daha yaygındır. Çünkü, bu generatörler sabit hızda olduğu kadar değişik hızlarda da çalışabilmektedir. SKAG'ü kendinden uyartımlı olarak çalışabilmek için, bir düzenek yardımıyla tahrik edilmesi ve gerekli mıknatıslanma akımını karşılayacak değere sahip kondansatörün sargılara bağlanması gerekmektedir. Üretilen gerilim ve frekansı ile birlikte kendi kendini uyarma zamanını da etkilediğinden dolayı generatöre bağlanan kondansatörlerin kapasiteleri doğru hesaplanmalıdır. Bu hesaplamalarda maksimum verimin alınabileceği kapasite değeri bulunarak uygun kondansatör seçimi yapılmalıdır.

Yapılan benzetim çalışması ile asenkron motor matematiksel modeli kullanılarak, generatörün doğrudan yüke bağlı olarak çalışması sırasında sürekli ve geçici halde çıkış akımı ve gerilimi ile frekansın değişim durumu incelenmiştir. Asenkron generatörün eşdeğer devresi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Nominal hız ve nominal frekansta asenkron generatörün eşdeğer devresi.

Sınır değerler arasında bir değere sahip frekansın, temel frekansa oranı eşitlik (3.1)'deki gibi alındığında;

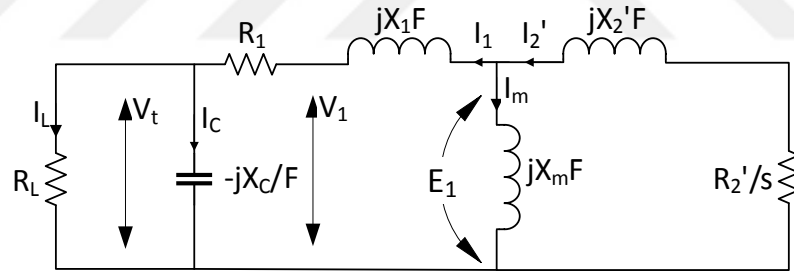
$$\frac{f}{f_b} = \frac{\omega}{\omega_{sb} = \omega_b} = F \quad (3.1)$$

$\omega_n = \omega_s = \omega_b$ durumunda rotor ve stator devri için aşağıdaki (3.2 ve (3.3'teki eşitlikler yazılabilir;

$$\frac{n_r}{n_{sb}} = v \quad (3.2)$$

$$\frac{n_s}{n_{sb}} = F \quad (3.3)$$

Hız değişimi olduğunda frekans da aynı zamanda değişecektir, bu durumda yeni frekans, ω_b yerine ω gelir. Bunun sonucunda hızda da değişim meydana gelecektir. Yukarıda verilen eşitliklere göre yeni hız ve yeni frekans için eşdeğer devre Şekil 3.2'deki gibi olacaktır.

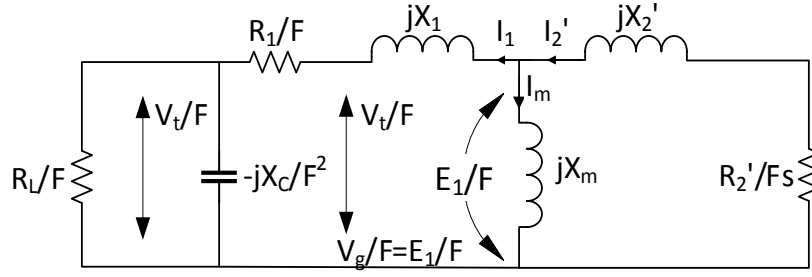


Şekil 3.2. Farklı hız ve frekansta asenkron generatör eşdeğer devresi.

Eşitlikte her bir kısım “F” ile bölüldüğünde, empedansların bölünmesiyle akımların da aynı kalması için gerilimlerin “F” ile bölünmesi halinde eşitlik (3.4'teki gibi bir sonuç elde edilecektir.

$$I = \frac{V}{X} = \frac{V/F}{X/F} = \left(\frac{V}{Z} = \frac{V/F}{Z/F} = \right) \quad (3.4)$$

Eşitlik (3.4'teki duruma göre eşdeğer devre Şekil 3.3'te gösterildiği gibi çizilebilir.



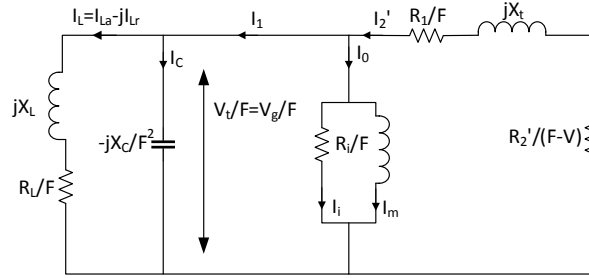
Şekil 3.3. Her bir tarafın F ile bölünmesi durumunda eşdeğer devre.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = 1 - \frac{n_r}{n_s = F n_{sb}} = 1 - \frac{v}{F} \quad (3.5)$$

$$\frac{n_s}{n_{sb}} = F = \frac{60}{\frac{60f_1}{p}} = \frac{f}{f_b} \quad (3.6)$$

$$\frac{R_2'}{F_s} = \frac{R_2'}{F \left(1 - \frac{v}{F}\right)} = \frac{R_2'}{F - v} \quad (3.7)$$

Asenkron generatörün yaklaşık eşdeğer devresi aşağıdaki Şekil 3.4'teki gibi çizilebilir.



Şekil 3.4. Asenkron generatörün yaklaşık eşdeğer devresi.

Akımlar;

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_0 + \bar{I}_1 \Rightarrow \bar{I}_{2a} = I_{1i} + I_{1a} , \quad I_{2r} = I_{cr} - I_{Lr} \quad (3.8)$$

$$I_0 = I_i - jI_m \quad (3.9)$$

$$I_{2a} = I_i - I_{La} \quad (3.10)$$

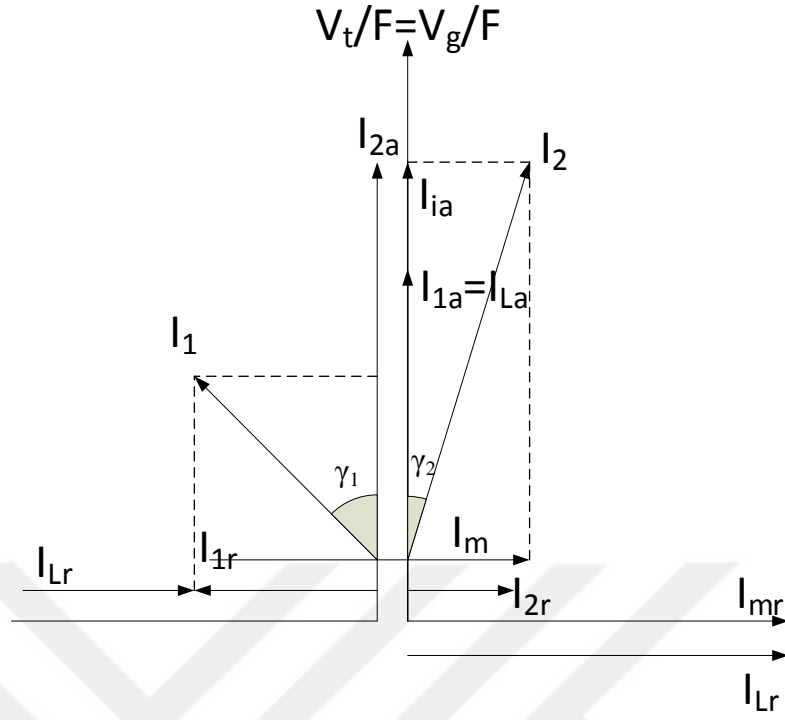
$$I_{La} = I_{1a} \quad (3.11)$$

$$I_1 = I_c - I_L \quad (3.12)$$

Reaktif akım dengesi;

$$I_{2r} = I_c - I_{Lr} - I_m \Rightarrow I_c = I_{2r} + I_{Lr} + I_m \quad (3.13)$$

Şekil 3.5'teki vektör diyagramında, I_{1r} her zaman kapasitif karakterde olmak zorundadır, aksi durumda uyartımın gerçekleşmesi mümkün olmaz. Bu durumda I_1 'in de kapasitif özellikte olduğu söylenebilir. Rotor devresindeki empedans da endüktif özelliktedir. Bu durumun sonucunda I_{2r} endüktiftir ve I_2 akımı da endüktif akımdır. Uyartım akımı ve gerilim üretimi olabilmesi halinde her zaman $I_m > I_{1r}$ olmak zorundadır.



Şekil 3.5. Kendinden uyarımalı asenkron generatör vektör diyagramı.

Stator ve rotor akımı eşitlikleri;

$$\bar{I}_1 = \frac{\frac{V_g}{F} \left(\frac{R_L}{F} + jX_L - j\frac{X_C}{F^2} \right)}{-\left(\frac{R_L}{F} + jX_L \right) \left(j\frac{X_C}{F} \right)} \quad (3.14)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{\frac{V_g}{F}}{\left(\frac{R_1}{F} + \frac{R_2}{F-v} \right) + jX_t} \quad (3.15)$$

$$\bar{I}_m = \frac{\frac{V_g}{F}}{jX_m} \quad (3.16)$$

$$\bar{I}_i = \frac{\frac{V_g}{F}}{\frac{R_i}{F}} = \frac{V_g}{R_i} \quad (3.17)$$

$$\bar{I}_c = \frac{\frac{V_g}{F}}{\frac{jX_c}{F^2}} = \frac{V_g F}{jX_c} \quad (3.18)$$

Giriş gücü;

$$P_{in} = \frac{3R'_2 |I'_2|^2}{s} = \frac{3R'_2 |I'_2|^2}{s = 1 - \frac{v}{F}} = \frac{-3R'_2 F |I'_2|^2}{F - v} \quad (3.19)$$

Çıkış gücü;

$$P_{out} = 3R_L I_L^2 \quad (3.20)$$

Verim;

$$\eta = \frac{(F - v)R_L I_L^2}{R'_2 F |I'_2|^2} \quad (3.21)$$

Asenkron generatörün geçici ve sürekli durum analizi için yukarıda verilen bilgiler ışığında, aşağıda verilen asenkron generatöre ait geçici hal denklemleri kullanılarak Matlab programında yapılan kodlama ile çalışma durumuna ait grafikler elde edilmiştir. Sürekli ve geçici durum için generatör ve yük parametreleri sırasıyla Çizelge 3.1 ve 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Sürekli durum analizi için kullanılan generatör parametreleri.

Özellik	Değeri	Birimi
Stator direnci	0,048	Ohm
Rotor direnci	0,067	Ohm
Stator endüktif reaktansı	0,095	Ohm
Rotor endüktif reaktansı	0,095	Ohm
Kondansatör direnci	13,65	Ohm
Kondansatör reaktansı	1,36	Ohm
Remenans gerilimi	1,6176	Volt

Çizelge 3.2. Geçici durum analizi için kullanılan generatör ve yük parametreleri.

Özellik	Değeri	Birimi
Stator direnci	2,046	Ohm
Rotor direnci	2,051	Ohm
Stator endüktif reaktansı	3,494	Ohm
Rotor endüktif reaktansı	2,3494	Ohm
Mıknatıslama empedansı	158,7	Ohm
Kondansatör kapasitesi	247,87	µF
Yük empedansı	0,028	Ohm
Yük direnci	3,21	Ohm
Yük gerilimi	100	Volt
Frekans	50	Hertz

Asenkron generatörün durum denklemleri eşitlik (3.22)'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix}
 A & 0 & -B & 0 & Q_1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & A & 0 & -B & 0 & Q_1 & 0 & 0 \\
 B & -G & D & -E & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 G & B & -E & D & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K \\
 -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & pC & 0 \\
 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & pC
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 i_{qsg} \\
 i_{dsg} \\
 i_{qrg} \\
 i_{drg} \\
 i_{qL} \\
 i_{dL} \\
 V_{qsg} \\
 V_{dsg}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 V_{qsg} \\
 V_{dsg} \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \quad (3.22)$$

Yukarıdaki eşitliklerde:

V_{qsg} = Asenkron generatör q eksen gerilimi

V_{dsg} = Asenkron generatör d eksen gerilimi

i_{qC} = Kapasitör q eksen akımı

i_{dC} = Kapasitör d eksen akım

i_{dsg} = Generator d eksen stator akımı

i_{qsg} = Generator q eksen stator akımı

i_{drg} = Generator d eksen rotor akımı

i_{qrg} = Generator q eksen rotor akımı

i_{dL} = Yük d eksen akımı

i_{qL} = Yük q eksen akımıdır.

Kapasitör q eksen akımı Eşitlik (3.23)'te verilmiştir.

$$i_{qC} = i_{qsg} - i_{qL} \quad (3.23)$$

Kapasitör d eksen akımı Eşitlik (3.24)'te verilmiştir.

$$i_{dC} = i_{dsg} - i_{dL} \quad (3.24)$$

$$i_L = \sqrt{i_{qL}^2 + i_{dL}^2} \quad (3.25)$$

Eşitlik (3.38)'te i_L = Yük akımı,

$$i_C = \sqrt{i_{qC}^2 + i_{dC}^2} \quad (3.26)$$

(3.39 eşitliğinde ise i_C = Kapasitör akımıdır.

Moment (3.27 ile bulunabilir.

$$T_g = 1.5P_{og}L_{mg}(i_{qsg}i_{drg} - i_{dsg}i_{qrg}) \quad (3.27)$$

$$A = R_{sg} + pL_{sg} \quad (3.28)$$

$$B = pL_{mg} \quad (3.29)$$

$$G = w_{rg}L_{mg} \quad (3.30)$$

$$D = R_{rg} + pL_{rg} \quad (3.31)$$

$$E = w_{rg}L_{rg} \quad (3.32)$$

$$Q_1 = R_L + pL_L \quad (3.33)$$

$$K = R_L + pL_L \quad (3.34)$$

Eşitlikler 3.28 – 3.34’te verilen ifadeler;

R_{sg} = Generatör stator sargısı direnci,

L_{sg} = Generatör stator sargısı toplam endüktansı,

R_{rg} = Generatör rotor sargısı direnci,

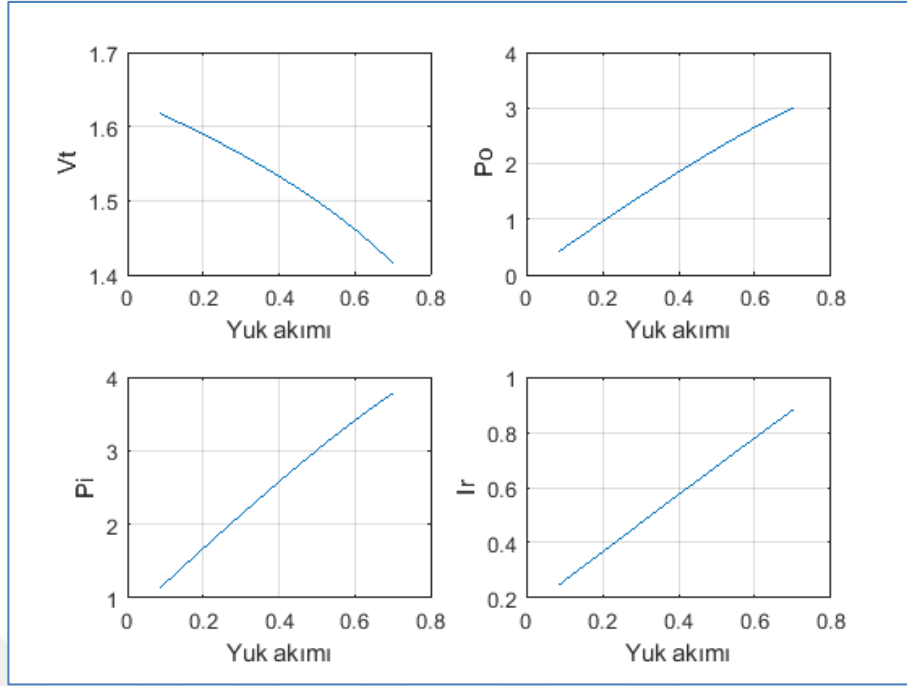
L_{rg} = Generatör rotor sargısı toplam endüktansı,

L_{mg} = Generatör mıknatıslanma endüktansıdır.

Generatörün kendi kendini uyarabilmesi için başlangıçta artık mıknatısiyetten elde edilecek remenans gerilimine ihtiyaç vardır. Bunu sağlamak için program yazılırken, başlangıçta V_{qsg} değerine 2 Volt gibi küçük bir değer atanmıştır. Program çalıştırıldığında bu gerilim uyarımının başlaması ile birlikte kendiliğinden büyüyerek nominal çıkış geriliminin elde edilmesini sağlamaktadır.

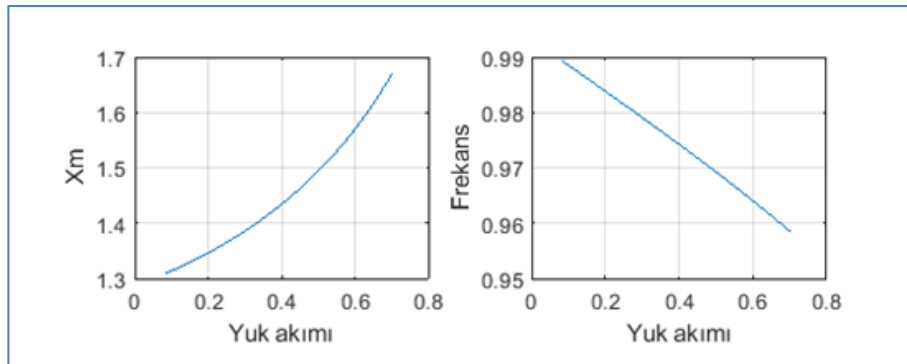
3.1.1. Sincap Kafesli Asenkron Generatörün Sürekli Hal Analizi

Sincap kafesli asenkron generatörün (SKAG) sürekli hal analizinde elde edilen grafikler aşağıda verilmiştir. Şekil 3.6’da yük akımı ile çıkış geriliminin, çıkış gücünün, giriş gücünün ve rotor akımının değişimi verilmiştir.



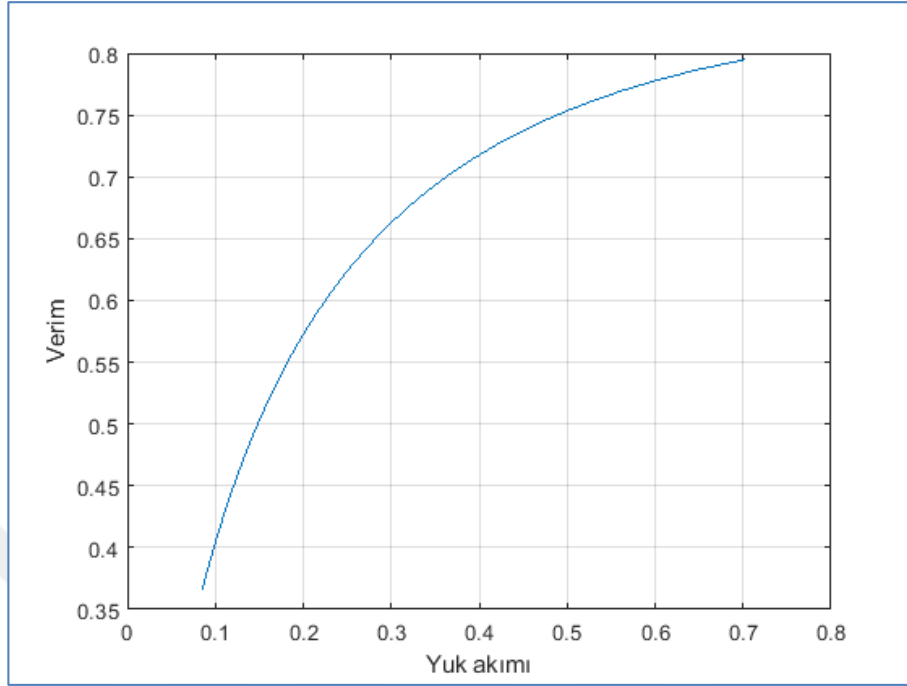
Şekil 3.6. SKAG sürekli hal yük akımının değişik parametrelere göre grafikleri.

Şekil 3.6. SKAG sürekli hal yük akımının değişik parametrelere göre grafikleri. Şekil 3.6’da yük akımı arttıkça çıkış geriliminin düştüğü görülmektedir. Bu durum entegrasyon yapılan noktada çözülmesi gereken problemlerden biridir. Asenkron generatörün gücü bağlantı noktasındaki güçten büyük değilse şebeke otomatik olarak çıkış gerilimini ve güç dengesini ayarlamaktadır. Ancak problem bu kaynakların oranının artması ile birlikte ortaya çıkacaktır. Yük akımının artışı ile birlikte giriş gücü, çıkış gücü ve rotor akımının da arttığı görülmektedir.



Şekil 3.7. SKAG sürekli hal yük akımı ile reaktans ve frekansın grafikleri.

Şekil 3.7’de yük akımının yükselmesi ve mıknatıslama empedansının artışı ile birlikte frekansın da azaldığı görülmektedir.

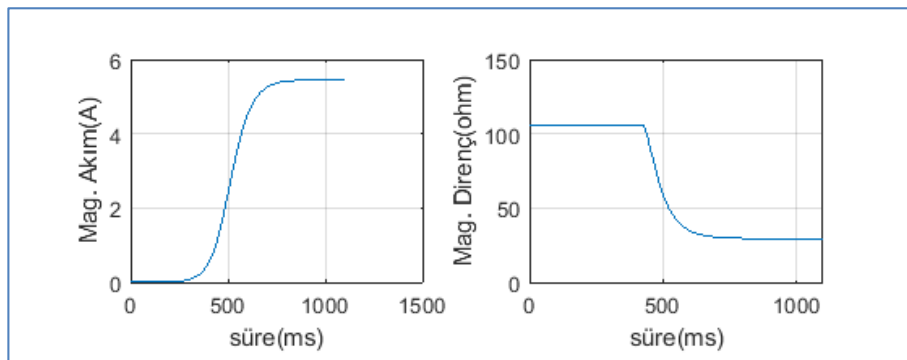


Şekil 3.8. SKAG sürekli hal yük akımı-verim grafiği.

Şekil 3.8’de görüldüğü gibi verim yük akımı ile birlikte artış göstermektedir.

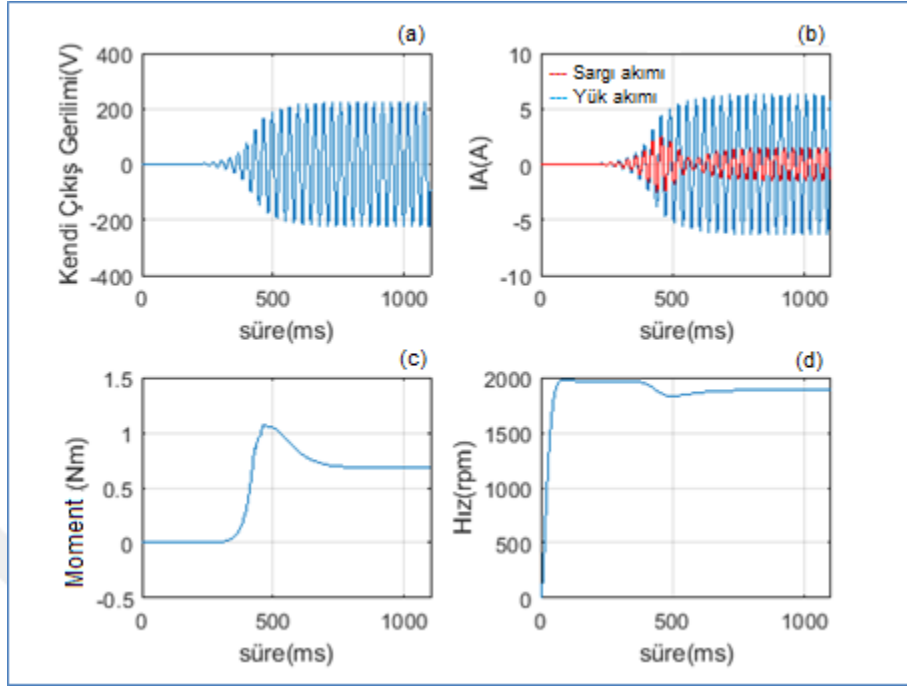
3.1.2. Sincap Kafesli Asenkron Generatörün Geçici Hal Analizi

Sincap kafesli asenkron generatörün geçici hal analizinden elde edilen grafikler aşağıda verilmiştir.



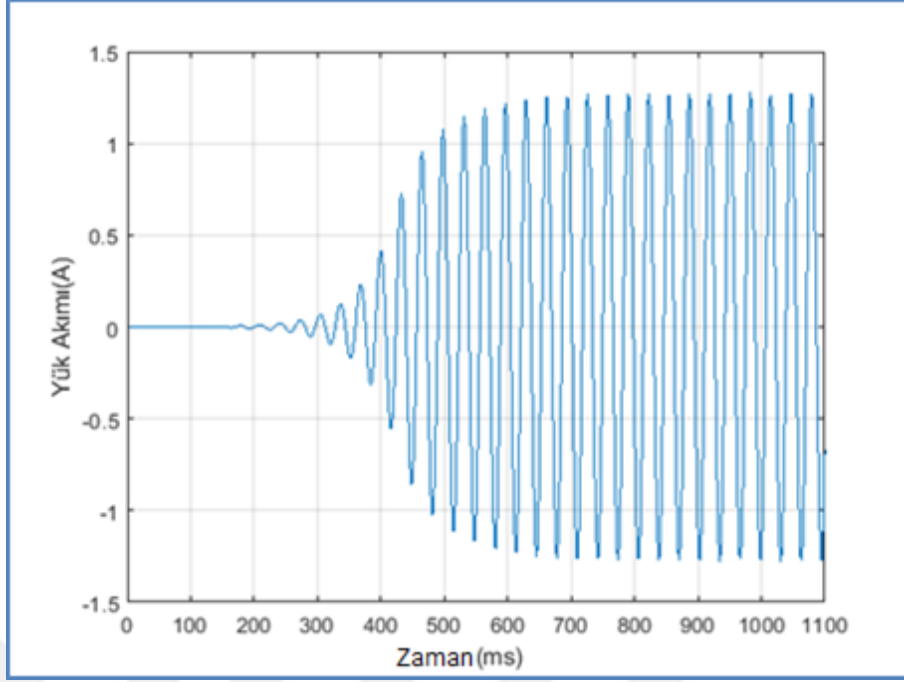
Şekil 3.9. SKAG geçici hal mıknatıslama akımı ve manyetik direnç değişimi.

Şekil 3.9’da manyetik direncin azalmasıyla birlikte eşzamanlı olarak mıknatıslanma akımının arttığı görülmektedir.

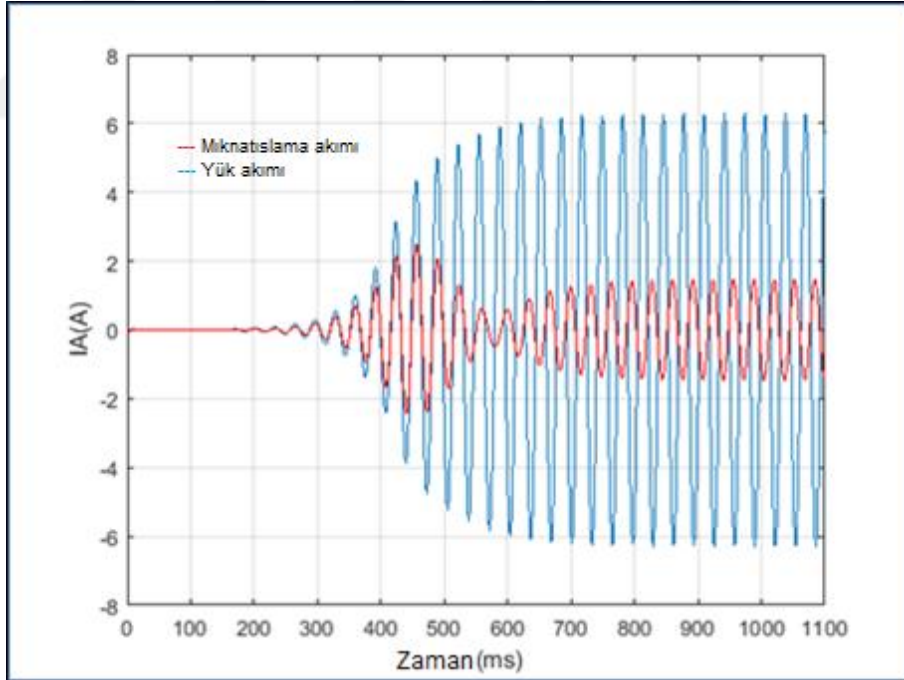


Şekil 3.10. SKAG geçici hal kendi kendine uyarım gerilimi, akım, moment ve hız grafikleri.

Şekil 3.10’da SKAG’de kendi kendine uyarımla üretilen çıkış geriliminin, rotorda meydana gelen uyarım akımının, momentin ve hız grafiklerinin değişimi verilmiştir. Şekil 3.10a’da mıknatıslama akımının artışı ile birlikte gerilimin arttığı görülmektedir. Şekil 3.10c’de kayma noktasında meydana gelen maksimum momentle eşzamanlı olarak Şekil 3.10b’de sargı akımı ile yük akımı arasında faz farkı meydana geldiği görülmektedir.



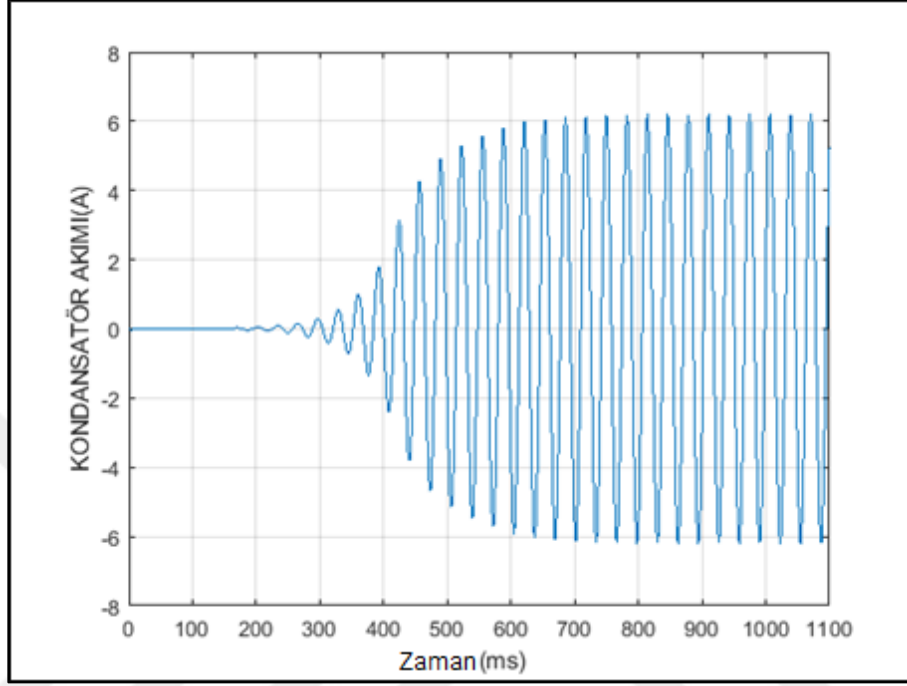
Şekil 3.11. SKAG geçici hal yük akımı değişimi.



Şekil 3.12. SKAG geçici hal mıknatıslama akımı ve yük akımı değişimi.

Şekil 3.12’de mıknatıslama akımı ve yük akımının değişimi verilmiştir. Burada uyarım akımını sağlayan kondansatör ve statorda indüklenen gerilimin sağladığı yük akımı arasında 180° faz farkı olduğu görülmektedir. Asenkron generatörde indüklenme

gerçekleştikten sonra yük akımı yön değiştirmektedir. Başlangıçta aynı fazda olan bu iki akım arasındaki açı, yük akımının nominal değerlere ulaşması ile birlikte, başlangıçtan yaklaşık 700 ms sonra 180° olacak şekilde stabil hale gelmektedir.



Şekil 3.13. SKAG geçici hal kapasitör akımının değişimi.

Şekil 3.13'te reaktif akım ihtiyacını karşılamak için bağlanan kondansatör akımı verilmiştir. Gerilim indüklenmesi için gerekli olan bu akım şebekeye bağlı olarak çalışan sistemlerde şebekeden temin edilebilmekte ve sistemin güç katsayısının düzeltilmesi için katkı sağlayabilmektedir.

MATLAB'ta yapılan analizler sonucunda yüke bağlı olarak çalışan asenkron generatörün yük akımı arttıkça çıkış geriliminin düştüğü gözlenmiştir. Şebeke güç kalitesinin belli standartlarda olması gerektiği düşünüldüğünde, yük akımı ile gerilimin düşmesi güç kalitesinin sürdürülebilirliği açısından sorun olarak görülmektedir.

3.2. GÜNEŞ PANELİNDEN ELDE EDİLEN ENERJİNİN ŞEBEKEDKİ GÜÇ KALİTESİNE ETKİSİ

Elektrik enerjisi üretimi için tükenbilir nitelikteki fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak için, yenilenebilir enerji tüm dünyada alternatif bir kaynak olarak önemini korumaya devam etmektedir. Bunlardan güneş ve rüzgâr enerjisi çevresel etkilerinin azlığı, hava kirliliğine neden olmamaları ve üretim maliyetlerinin ekonomik olmasından dolayı tercih edilmektedir. Akıllı şebekede kurulan çift yönlü haberleşme mekanizması sayesinde yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjinin entegrasyonu ile tüketiciler aynı zamanda üretici olarak şebekeye katkı sağlayabilmektedir. Bu nedenle şebekeye bağlı abonelerin hem üretici hem de tüketici olarak güç kalitesini etkilemeleri söz konusudur [84].

Artan enerji ihtiyacı ile birlikte birçok ülke, enerji iletim ve dağıtım sisteminde talebi karşılamak amacıyla, dağıtılmış üretimin, güç kalitesini bozmayacak şekilde entegrasyonu için farklı yönetmelikler hazırlamışlardır. Bu yönetmeliklerle enerjinin sürekliliğinin yanında güç kalitesinin de istenilen seviyede olabilmesi için entegrasyon öncesinde ve sonrasında analizler yapılması zorunlu hale getirilmiştir [113]. Üretim sisteminin kullandığı yöntem, uygulama bölgesi ve gücün üretildiği yerden tüketileceği yere kadar olan mesafe yapılacak olan analizlerde göz önünde bulundurulması gereken önemli hususlardır [114].

Dağıtılmış enerji üretiminin sisteme entegre olması ile karmaşık hale gelen güç sistemlerinde, gerilimlerdeki aşırı artışlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının meydana getirdiği gerilim salınımları ve hatlarda oluşan aşırı yüklenmeler bu problemlerden en önemlileridir. Sistemi bir bütün olarak düşünürsek güç sistemleri pasif yapıdan aktif bir yapıya doğru bir geçiş yapmaktadır. Bu problemler dağıtılmış enerji üretiminin optimum entegrasyonu ile avantaja dönüşebilmektedir [115].

Yenilenebilir kaynakların, geleneksel şebekelere entegrasyonundaki en önemli zorluklardan biri de üretimin süresiz ve belirsiz olmasıdır. Üretimdeki bu belirsizlik ve süresizlikten kaynaklanan yük akışlarındaki anlık değişimlerin, sisteme nasıl etki edeceğinin önceden belirlenmesi, önleyici tedbirlerin alınması ile sağlıklı ve dinamik

bir güç dağıtımının yapılması sağlanabilir. Şebekeden sürekli ve kalitesi yüksek bir güç dağıtımı için, dağıtılmış enerji kaynaklarının belirsizlik içeren çalışma şekillerinin, sistemin güç kalitesine etkilerinin incelenmesi oldukça önem kazanmıştır [84,116].

Bu konuda yapılan çalışmalarda, küçük güçlü yenilenebilir dağıtılmış kaynakların şebekeye bağlanmasıyla sistemin gerilim seviyesinde ciddi bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Olumsuz bir etki olmamasının nedeni, sistemin bütünündeki enerji dengesinin (Energy Balance) sağlanmış olmasıdır. Enerji dengesinin sağlanması, kayıplarla birlikte sistemde tüketilen toplam gücün, üretilen güce eşit olması halidir. Bölgesel yenilenebilir dağıtılmış kaynak, talep gücün önemli bir kısmını karşılayacak kadar üretim yapıyorsa, sahip olduğu aktif ve reaktif güç özellikleri nedeni ile bağlantı yapılan baranın toplam aktif ve reaktif bara gücünü etkileyerek bara güç katsayısında anlık değişimlere neden olabilmektedir. Sürekli üretim yapmayan yerel kaynakların fazla üretim yaptıkları zaman dilimlerinde güç katsayısı değişimini kompanze edecek şekilde tedbirlerin alınması ile bara güç faktörü kararlılığının korunması sağlanabilir [26].

Resmî gazetede 02.01.2014 tarihinde yayınlanan “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenliği ve Kalitesi Yönetmeliği, Üretim Salt Tesisleri Tasarım Esasları” bölümünde süreksiz kaynakların bağlantısında belirli sınırlamalar getirilmiştir. Dalgalı yüklerin yoğun olarak bulunduğu bölgeler için TEİAŞ tarafından ilgili mevzuata göre verilen bağlantı görüşüne ilişkin değerlendirmede, bağlantı noktasındaki mevcut dalgalı yüklerin etkisinin de dikkate alınması ve rüzgâr hızının belli limitleri aşması durumunda rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesislerinin otomatik olarak devre dışı olma özellikleri dikkate alınarak, sistemde ani gerilim değişimi ve frekans dalgalanmalarını önlemek amacıyla sistem döner yedeği miktarını aşmayacak kurulu güçte rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisi bağlantısına izin verilmesi esası belirtilmiştir. Rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesislerinin, reaktif güç ve gerilim değişimlerinde sisteme verecekleri rahatsızlığın sınırlandırılması amacıyla rüzgâr enerjisine dayalı asenkron rüzgâr türbinine sahip üretim tesislerinin güç faktörü 0.99’dan düşük olamaması ve güç faktörünün kullanıcının kuracağı uygun kompanzasyon tesisleriyle yükseltilmesi gereği vardır [85].

Başta endüstriyel işletmeler olmak üzere birçok alanda, kullanılan elektrik enerjisinin daha güvenilir ve kaliteli olması arzu edilmektedir. İletim sisteminden gerçekleştirilecek üretim entegrasyonları da incelenmeye değer olmakla birlikte, özellikle dağıtım sisteminden gerçekleştirilecek olan üretim entegrasyonlarında doğru analizler gerçekleştirilip, doğru önlemler alınmadığı takdirde, enerji kalitesini bozucu, can ve donanım güvenliğini tehlikeye düşürecek, üretilen gücün yeteri kadar verimli kullanılmamasına neden olabilecek sonuçlar ile karşılaşılması muhtemeldir. Elektrik sistemlerinde enerji kalitesini üretim, iletim ve dağıtım kuruluşları ile bu enerjiyi kullanan son kullanıcılar beraber belirlemektedir. Güç sistemleri, belirli frekansa ve genliğe sahip sinüzoidal gerilim referans alınarak tasarlanmıştır. Gerilimin genliği, frekansı veya dalga biçimi üzerindeki herhangi bir bozulma, güç kalitesi problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Elektriksel güç kalitesini tanımlayan parametreler IEC 61000-4-30 standardında frekans salınımları, kısa süreli gerilim düşmeleri/yükselmeleri, aşırı ve düşük gerilimler, harmonikler, fazlar arası dengesizlikler ve gerilim dalgalanmaları olarak sıralanmaktadır [117].

Dağıtık üretimde kullanılan yenilenebilir kaynakların üretim miktarını etkileyen faktörler aynı zamanda entegre olunan şebekede güç kalitesi ile ilgili değişimlere de neden olabilmektedir [116]. Bu etkilerin belirlenebilmesi için benzetim çalışmamızda, güneş panellerinde enerji dönüşümünde etkili olan parametrelerin invertör çıkışındaki güç, frekans ve güç faktörü üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

3.2.1. Materyal ve Metot

Bu çalışma, Burdur ilinde kurulu toplam 8 MW'lık santraldeki, 260 W'lık, 23 adet seri bağlı 8 gruptan oluşan Hanwha SolarOne marka PV panellerin bağlı olduğu baradaki 350kVA'lık LTI marka invertörden alınan ölçümlerle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca eşzamanlı olarak ışımaya, sıcaklık ve nem ölçümü verileri meteoroloji müdürlüğünden temin edilmiştir.

İnvertörler ve PV panellerin teknik verileri sırasıyla Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. İnvvertörün teknik özellikleri.

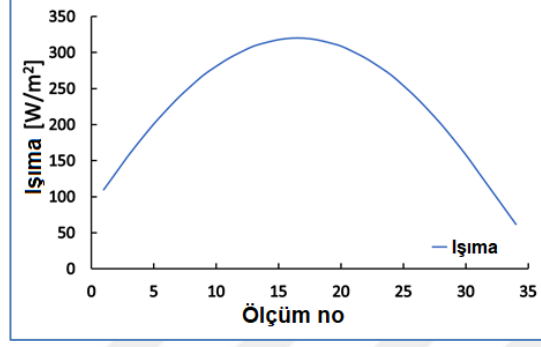
Özellik	Değeri	Birimi
Tip	1684.0002.0	
Generator bağlantısı	DC	-
Maksimum güç noktasıgerilim aralığı	590-920	V
Maksimum giriş akımı	600	A
Maksimum giriş gerilimi	1000	V
Ana güç bağlantısı	AC	-
Min/max çıkış gerilimi	390	V
Maksimum çıkış akımı	520	A
Maksimum çıkış gücü	350	kVA
Frekans oranı	50/60	Hz
Güç Katsayısı (cosp)	0.8 ind. to 0.8 cap.	-

Çizelge 3.4. PV panellerin teknik özellikleri.

Özellik	Sembol	Değeri	Birimi
Tip	-	HSL60P-PC-1-260	
Maksimum güç	P_{max}	260	W
Açık devre gerilimi	V_{OC}	38.1	V
Kısa devre akımı	I_{SC}	8.98	A
Maksimum güç gerilimi	V_{mp}	30.9	V
Ana güç akımı	I_{mp}	8.42	A
Maksimum system gerilimi	V_{max}	1000	V
Normal çalışma hücre sıcaklığı	NOCT	45±3	°C
Sıcaklık sınırı	T_{cyc}	-40/+85	°C
Ağırlık	W	18.5±0.5	Kg
Ölçüler	h/l/t	1670/1000/32	Mm
Hücre tipi	-	Poly crystalline	-
Maksimum seri sigorta akımı	MSFR	15	A

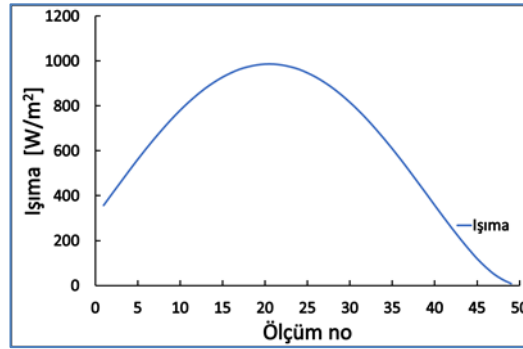
Kabin sıcaklığı, bara sıcaklığı ve şok bobini sıcaklığı, santralde üretilen enerji ve şebeke bağlantı noktasındaki güç ölçümü gibi gerekli veriler, PV sistemine bağlı inverter kayıtlarından alınmıştır. Hava sıcaklığı, nem ve radyasyon değerleri eş zamanlı olarak Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden elde edilmiştir. Ölçümler, sırasıyla en kısa ve en uzun dönem olan 4 Ocak ve 13 Temmuz günlerinde yapıldı.

Ocak ayında yapılan ölçümler, Şekil 6a'daki eğride de gösterildiği gibi, 15 dakikalık aralıklarla gün doğumundan gün batımına (7: 37'den 16: 37'ye) kaydedilen radyasyon değerleri (W/m^2) kullanıldı. Işıma değerlerine ait ölçüm grafiği Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14. Burdur ili Ocak ayı için ışıma ölçüm grafiği.

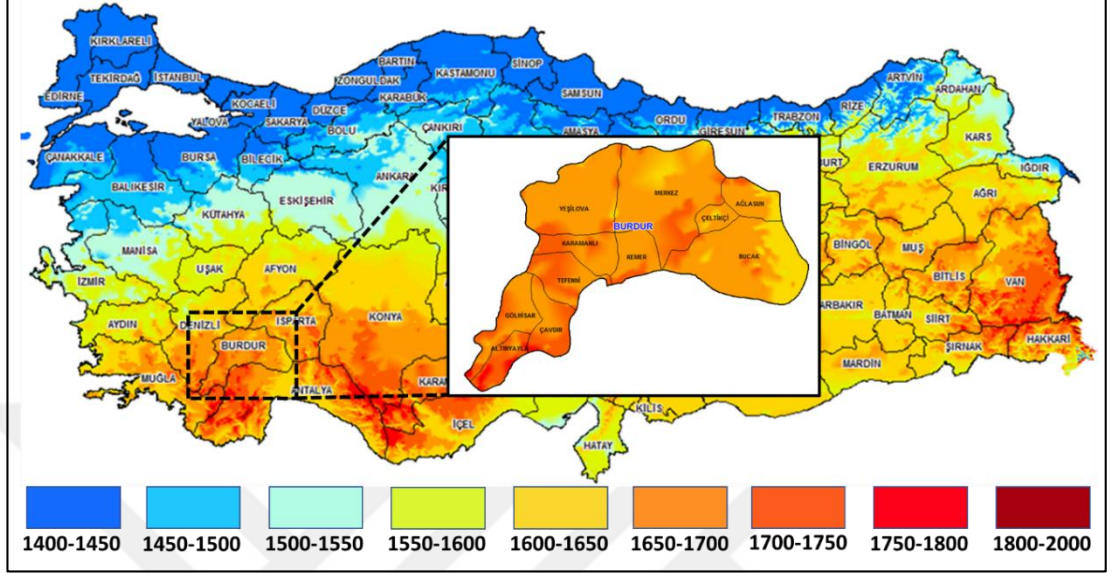
Temmuz ayında yapılan ölçümlerde, yaz aylarındaki güneş ışığından yararlanılan uzun süreler nedeniyle 15 dakikalık aralıklarla toplam 54 veri toplanmıştır. Ocak ayındaki ölçümlere göre bu ayda ışıma değerlerinin daha yüksek olduğu Şekil 3.15'te görülmektedir.



Şekil 3.15. Burdur ili Temmuz ayı için ışıma ölçüm grafiği.

Yapay sinir ağı (YSA) eğitimi sırasında, güneşin doğuş ve batış zamanlarındaki kararsız ölçüm sonuçları nedeniyle, sabahın ilk saatlerindeki ve güneşin battığı saatlerdeki veriler kullanılmamıştır. Sonuç olarak, bu veriler çıkarıldıktan sonra Ocak ayına ait 34 veri ile Temmuz ayına ait 49 veri benzetim çalışması için kullanılmıştır.

Burdur ili, Şekil 3.16'de verilen Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli haritasında görüldüğü üzere yüksek radyasyon potansiyeli nedeniyle seçilmiştir.



Şekil 3.16. Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli (kWh/m²-yıl).

Panellerin ürettiği enerjiyi doğrudan etkileyen güneş ışınması PV panellerinin 17°'lik eğim açısını dikkate alarak ölçülmüştür.

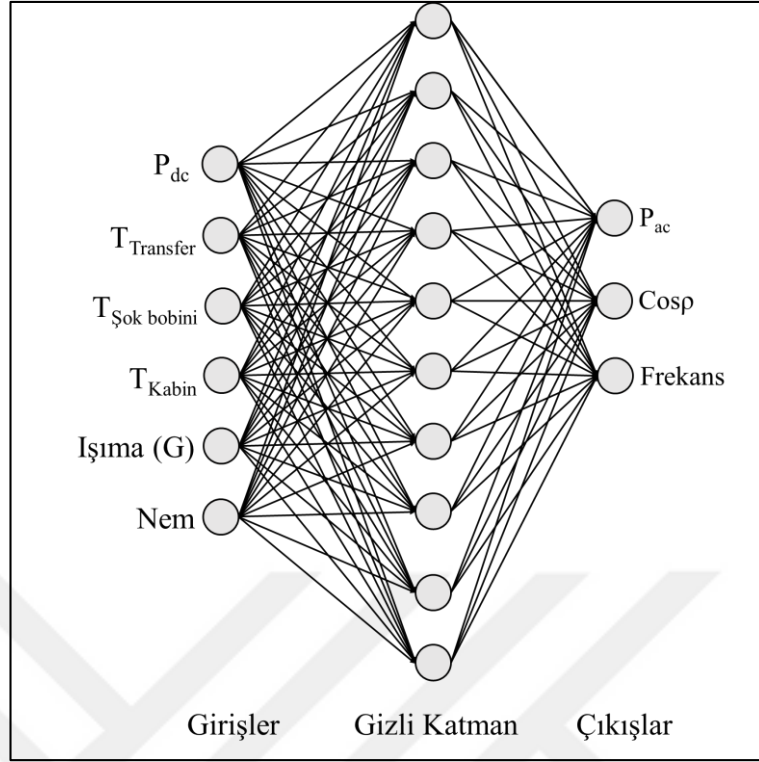
Yapay sinir ağları (YSA), yeni parametreler türetmek ve tüm bilim dalları için sonuçları tahmin etmek için, çoğunlukla teorik olarak tanımlanamayan girdi ve çıktı verileri arasındaki karmaşık ilişkileri keşfetmek için kullanılır [118]. YSA'lar, girdi ve çıktı verisine sahip olan eğitim setinden nasıl hareket etmeleri gerektiğini öğrenirler [119]. Literatürde ileri beslemeli YSA geri yayılım algoritması, arı algoritmaları gibi yöntemler kullanılarak farklı uygulamalarda çözüme ulaşmak için YSA kullanılarak çalışmalar yapılmıştır [120].

Sezgisel algoritmalar kullanılarak Si-polikristal fotovoltaik (PV) modülde üretilen gücün profilini tahmin etmek [121,122] ya da rüzgâr enerjisi sistemlerinde [123,124] sinir ağlarının çeşitli uygulamalarını görmek mümkündür. Yenilenebilir güç sistemlerinin optimizasyonu ve MPPT (Maximum Power Point Trackers (Maksimum Güç Noktası İzleyici)) uygulaması için geleneksel teknikler yerine, YSA kontrol tekniklerinin kullanımı günden güne artmaktadır [125].

Bir saat öncesinden PV sistemlerinin güç çıktısının kabul edilebilir bir doğruluk derecesinde tahmin edilebileceğini öne süren yöntemlerin [126] kullanımı ile yenilenebilir kaynak entegrasyonlarının daha sorunsuz yapılması mümkün olabilecektir. PV panel ve dizel jeneratörün beslediği bir sistemde ışınlım miktarı önceden tahmin edilerek optimum yakıt tüketimi ile üretim yapılabileceği görülmüştür [127]. İnce filmlili bir PV panelde üretilen AC gücün tahmini için YSA'larının bir uygulamasının sunulduğu çalışmada; Çok Katmanlı Algılama (MLP) yöntemi ile Karma Fiziksel Yapay Sinir Ağı (HPANN) adı verilen yeni bir hibrid yöntem karşılaştırılmıştır. Günümüzde, bağımsız veya şebekeye bağlı fotovoltaiik (PV) sistemlerin enerji verimliliğinin tahmini, ekonomik fizibilitesinin sağlanması ve sistem bileşenlerinin doğru boyutlandırılması için çok önemlidir. Aslında, enerji verimi tahmini, kesintileri önlemeye ve arzın kalitesini ve sürekliliğini sağlamaya izin verir [128].

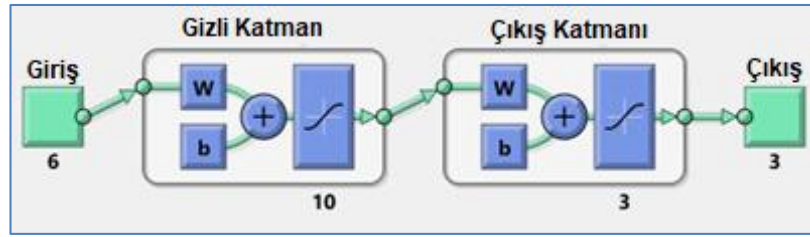
Bu çalışmada önerilen YSA modeli; bir giriş katmanı, bir gizli katman ve bir çıkış tabakasından meydana gelmektedir [84,118]. Giriş olarak; Radyasyon (G), PV panellerinden elde edilen güç (P_{DC}), aktarma barası sıcaklığı, şok bobini sıcaklığı, kabin sıcaklığı ve nem ölçüm değerleri giriş verileri olarak kullanılmıştır.

Şekil 3.17'deki YSA yapısında gösterildiği gibi; şebekeye entegre edilen güç P_{AC} , inverter çıkışındaki güç faktörü ve frekans değerleri çıktı verileri olarak kullanılmıştır. Ek olarak, giriş verilerinin %70'i eğitim için, %15'i test ve %15'i ise doğrulama için kullanıldı.



Şekil 3.17. Önerilen sisteme ait YSA'nın yapısı.

Şekil 3.18'da gösterildiği gibi, YSA, 6 giriş verisi olan giriş katmanına, 10 nöronlu bir gizli katman ve 3 çıkış verisine sahip bir çıkış katmanından oluşmaktadır.



Şekil 3.18. Kullanılan sisteme ait YSA diyagramı.

Bu çalışmanın YSA aşamasında, literatürde birçok eğitim algoritması bulunmasına rağmen, güvenilir, basit ve hızlı özelliklerinden dolayı birçok çalışmada yoğun olarak kullanılan ileri beslemeli geri yayılım (feed forward back propagation (FFBP)) YSA ve Levenberg-Marquardt (LM) algoritması seçilmiştir [129–132]. Levenberg-Marquardt algoritmasını kullanan ileri beslemeli geri yayılım YSA eğitim süreci aşağıdaki adımlarda açıklanmıştır.

Adım 1: Toplam hata (e_i), başlangıçta rasgele üretilmiş ilk ağırlıklarla ($w_{ij}, n=1, w_{jk}, n=1$) hesaplanmaktadır.

Adım 2: Ağırlıkları ayarlamak için eşitlik (3.35 ve (3.36 kullanılmaktadır.

$$\Delta w_{jk}(n) = w_{jk}(n) - \left(J_k^T J_k + \frac{1}{\alpha} I \right)^{-1} J_k e_k \quad (3.35)$$

$$\Delta w_{ij} = w_{ij}(n) - \left(J_k^T J_k + \frac{1}{\alpha} I \right)^{-1} J_k e_k \quad (3.36)$$

Adım 3: Toplam hata güncellenmiş yeni ağırlıklar ile hesaplanır.

Adım 4: Mevcut toplam hatanın önceki değerin üzerine çıkması durumunda (yani, $e > e_{i+1}$ olduğunda) ağırlık vektörü, kombinasyon katsayısı (μ) 10 ve katları ile çarpılmasıyla değiştirilir. Bu durumda, Adım 2'deki denklemler ($w_{ij}, n=1, w_{jk}, n=1$) kullanılarak yeni ağırlıklar tekrar güncellenir.

Adım 5: Mevcut toplam hatanın önceki hata değerinden, yani $e > e_{i+1}$ 'den aşağı düşürülmesi durumunda, ağırlık vektörleri bu değerde tutulur ve kombinasyon katsayısı (μ), 10 ve katları şeklinde azaltılır.

Adım 6: Geçerli toplam hata belirtilen değerden az olana kadar 2. Adımdaki işlemler tekrarlanır. Toplam hata belirlenen hatadan küçük olduğunda yineleme durur.

Simülasyonda LearnGdm adaptasyon öğrenme fonksiyonu, ortalama kare hata (MSE (Mean Square Error)) performans fonksiyonu ve Tansig transfer fonksiyonu tercih edilmiştir. Gizli tabakada 10 nöron tercih edildi. İşlemleri ileri ve geri yönünde tanımlayan maksimum çevrim 10000 olarak ayarlandı. Aşırı yinelemeleri önlemek için doğrulama kontrol değeri 1000 olarak ayarlandı.

Çalışmamızda tanımlanan ağ modelinin ağırlık katsayıları ve sapma değerleri performans fonksiyonunun hızlı bir düşüş gösterdiği yönde güncellenmektedir. Eğitimin tekrarı Eşitlik (3.37)'deki gibi yazılabilir.

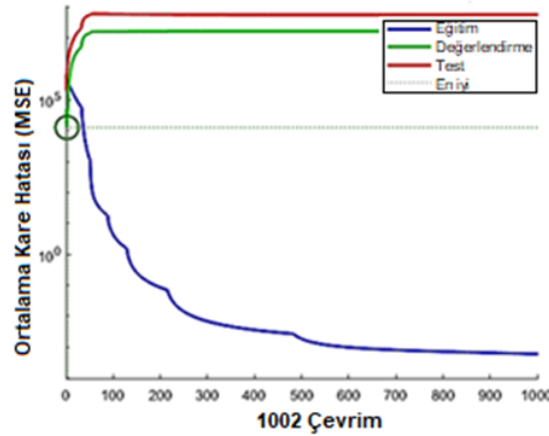
$$x_{k+1} = x_k - a_k g_k \quad (3.37)$$

Eşitlikte; x_k mevcut ağırlık ve sapma değerlerinin bir vektörü, g_k mevcut gradyan ve a_k öğrenme oranıdır. Hedef değerlerine, istenen seviyede yakın sonuçlar elde edilene kadar, diğer bir ifade ile öğrenme gerçekleşene kadar, Eşitlik (3.37)'de verilen işlemler her bir döngüde tekrarlanmaktadır.

Ağ çıktıları “ a ” ve hedef çıkışlar “ t ” arasında ileri besleme ağıın ortalama kare hatası (MSE) için varsayılan performans işlevi aşağıdaki Eşitlik (3.38)'teki gibi tanımlanmıştır [133];

$$F = mse = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - a_i)^2 \quad (3.38)$$

Gradyanın boyutu ve doğrulama kontrollerinin sayısı eğitim sürecini durdurmak için kullanılmaktadır. Eğitim minimum olduğunda gradyan değeri en düşük değeri alır. Bu çalışmada büyüklük gradyanı $1e^{-10}$ 'a ulaştığında eğitim sonlanacak şekilde ayarlama yapılmıştır. Eğitim adımının performans eğrileri Şekil 3.19'da verilmiştir.

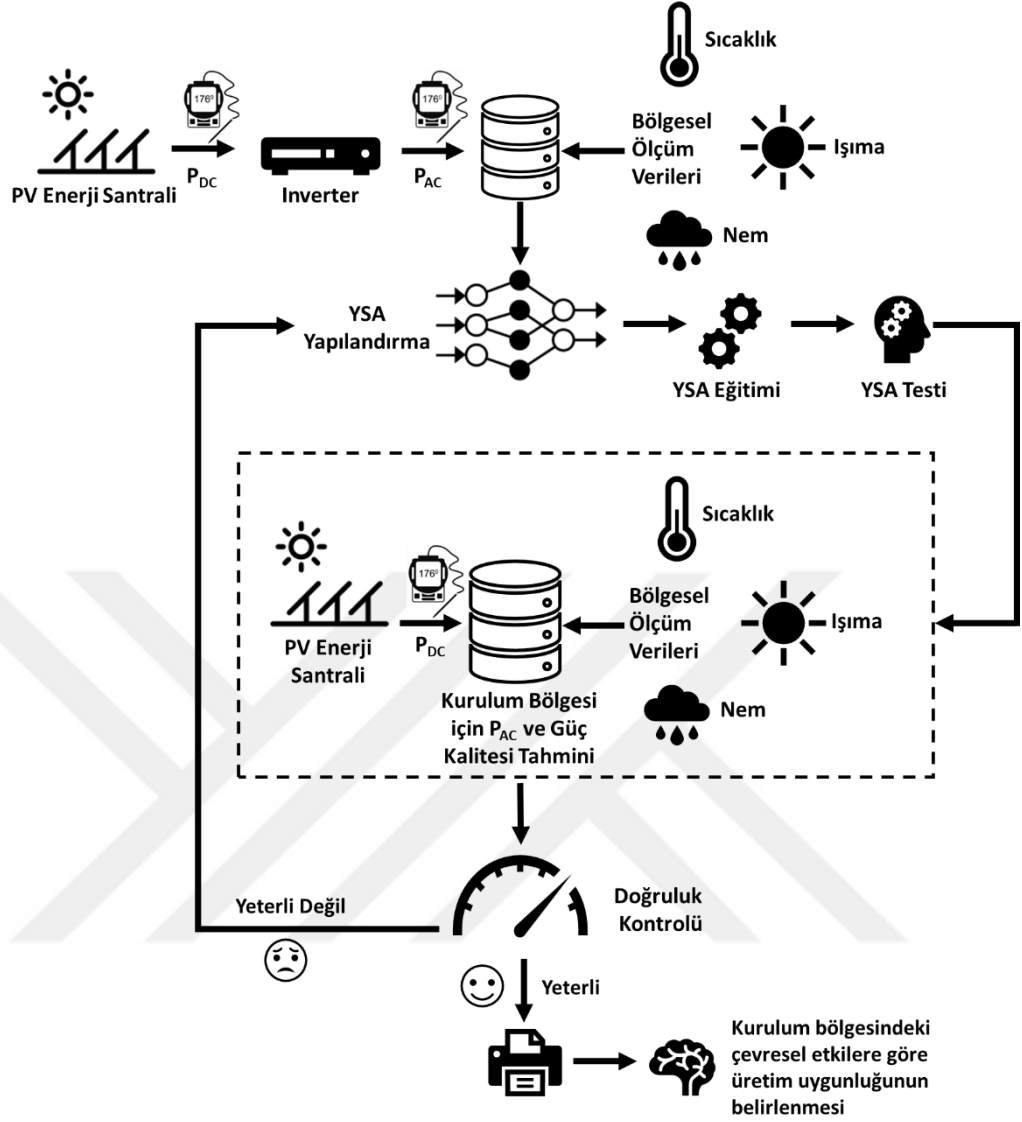


Şekil 3.19. Kullanılan YSA performans grafiği.

Simülasyon çalışmasında, işlemleri ileri ve geri yönde tanımlayan maksimum iterasyon 1000'e ayarlanırken hedeflenen hata 0 seçildi ve öğrenme oranı 0,01 olarak ayarlandı. Ağırlıklar ve sapma değerleri MATLAB YSA arayüzü ile tekrarlandı ve ayarlandı [118,130,134]. Ardından, istenen başarı seviyesine ulaşılan kadar eğitim süreçleri gerçekleştirildi. Göreceli hata (RE) hesaplamaları aşağıdaki Eşitlik (3.39) kullanılarak gerçekleştirilmiştir [95].

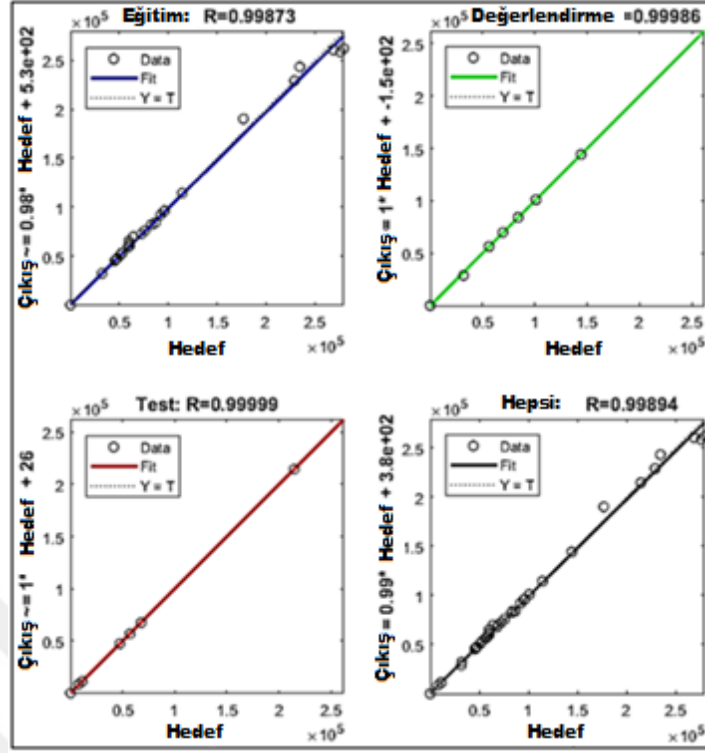
$$\%RE = \left| \frac{R_{EXP} - R_{ANN}}{R_{EXP}} \right| \times 100 \quad (3.39)$$

Önerilen sistemin gerçekleştirilen benzetim çalışmasındaki işlemler ve sıralaması Şekil 3.20'de simgesel olarak gösterilmiştir. PV panellerinde üretilen doğru akım (DC), inverter tarafından alternatif akıma (AC) dönüştürülür. PV panellerinde üretilen inverter girişindeki P_{DC} , inverter çıkışındaki P_{AC} , panellere gelen güneş radyasyonu, invertördeki üç farklı bölgedeki sıcaklıklar ve ortamdaki nem ölçüm verileri, YSA eğitimi için gün doğumundan gün batımına kadar 15 dakikalık aralıklarla kaydedildi. Girdi verileriyle, ANN, elde edilen sonuç %99'un üzerinde bir başarı seviyesine ulaşana kadar birçok kez eğitilmiş, deney sonuçları ile kontrol edilerek tekrar yapılandırılmıştır. Eğitilen ANN testi ve değerlendirme sonrası, farklı çalışma koşulları altında PV sisteminin davranışı yeni veri seti ile tahmin edilmiştir. Bu bağlamda, inverter çıkış gücü (P_{AC}), güç faktörü ve frekans değerleri türetilmiştir.

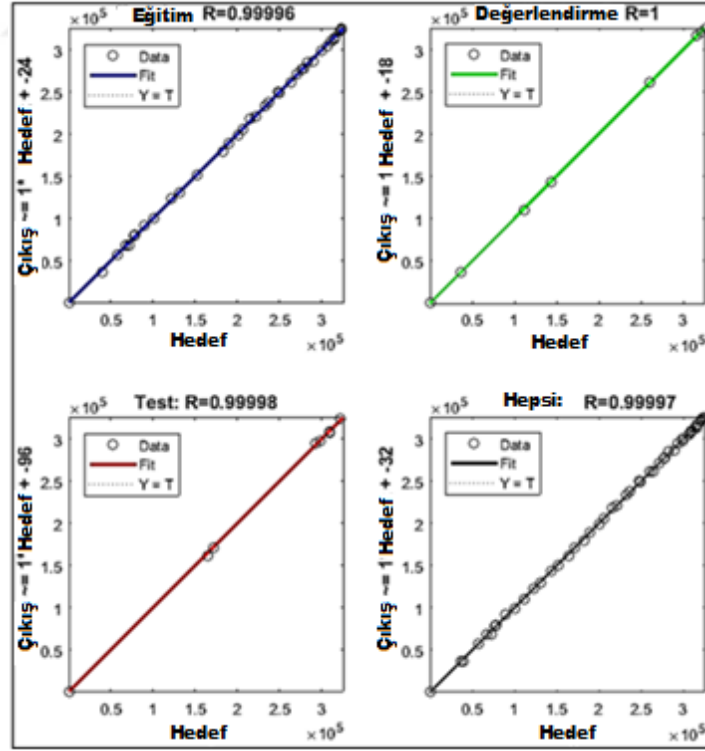


Şekil 3.20. Yapılan çalışmanın akış şeması.

Şekil 3.21 ve Şekil 3.22, sırasıyla, Ocak ve Temmuz ayı için geliştirilen her iki YSA'nın eğitim, doğrulama ve test sürecinde elde edilen sonuçları göstermektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi eğitim testi ve doğrulama için %99 doğruluk oranı ile YSA başarısını kanıtlamaktadır. Yeni veri setinden elde edilen çıktı ile, PV sisteminin davranışı, PV panel çıkışı ile inverter çıkışı arasındaki minimum güç kaybı oranının, PV sistemini daha düşük güç kayıplarıyla çalıştırmak için en uygun bölge tahmin edilebilmektedir.



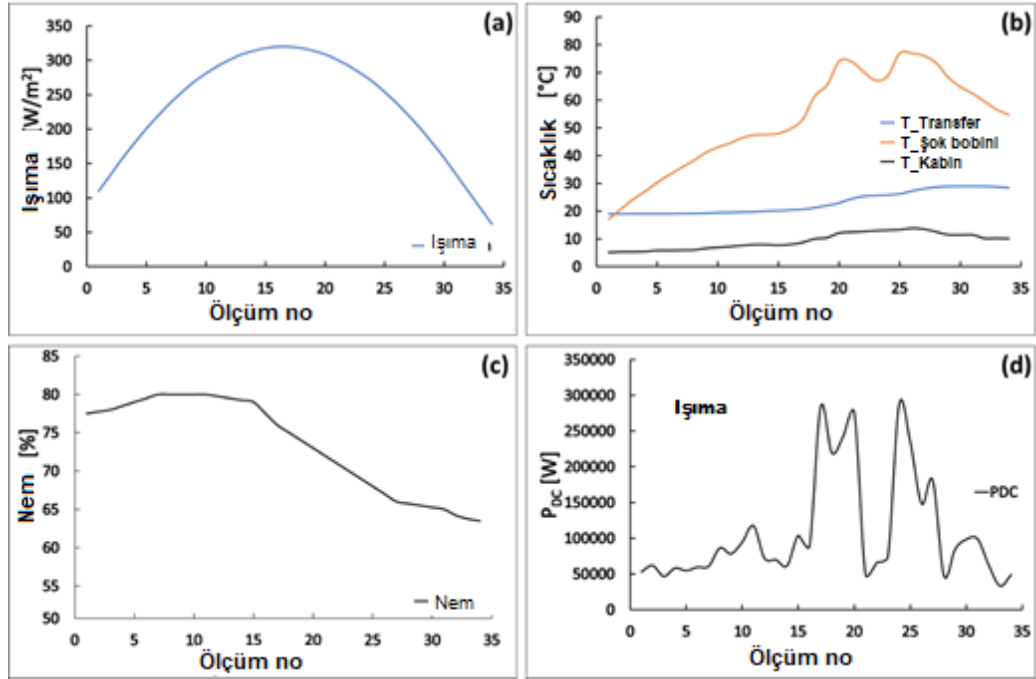
Şekil 3.21. Ocak ayı için eğitim, değerlendirme ve test sonuçları.



Şekil 3.22. Temmuz ayı için eğitim, değerlendirme ve test sonuçları.

3.2.2. Sonuçlar ve Değerlendirme

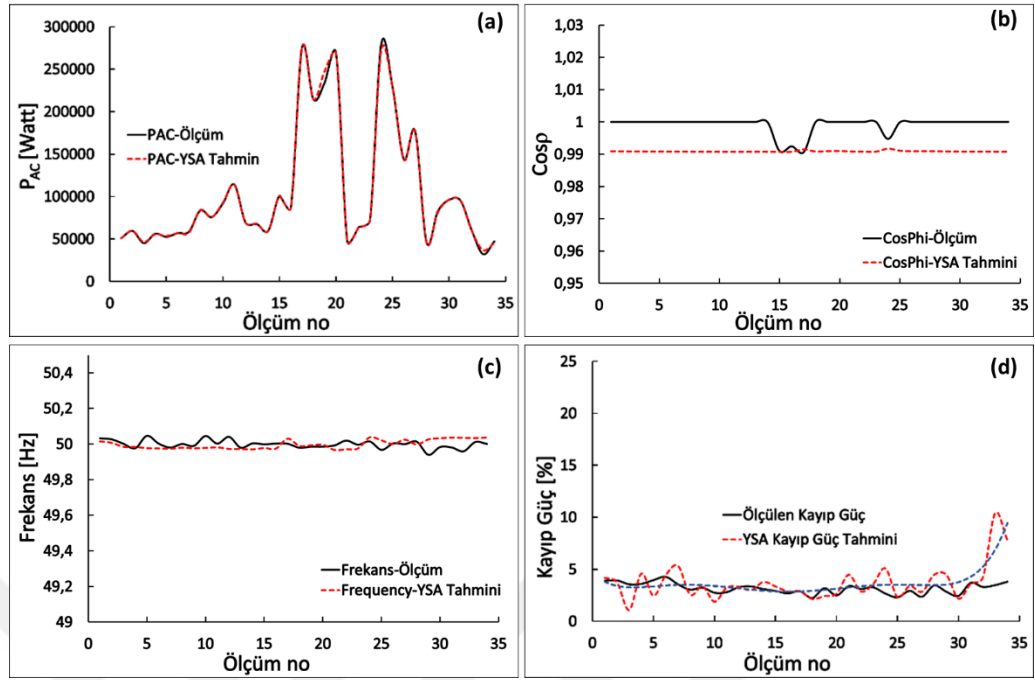
Şekil 3.23a, Burdur ili için Ocak ayında ölçülen radyasyon oranlarını göstermektedir. Ele alınan bölge için ölçülen maksimum radyasyon değeri 320 W/m^2 olarak gözlenmiştir. Ocak ayı için ülke genelindeki durum ile kıyaslandığında, radyasyon değerinin yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 3.23b'de, aktarma barasının (T_{Transfer}) sıcaklık değişimi, inverter girişinde harmonik koruma için kullanılan şok bobininin ($T_{\text{şok bobini}}$) sıcaklığı ve invertörü kapatan kabinin (T_{Kabin}) sıcaklığı Ocak ayı için verilmiştir. Bu üç sıcaklığın teorik radyasyon eğrisine paralel olarak değiştiği görülmektedir. Nemdeki değişim, PV panellerindeki enerji üretimini gün boyunca hava geçirgenliğini değiştirerek doğrudan etkilemektedir ki bu durum Şekil 3.23c'de verilmiştir. Nem değerleri Ocak ayında öğleden sonraya doğru azalan bir eğilim göstermektedir. Şekil 3.23d'de, Ocak ayında gün boyunca panellerden elde edilen güç (P_{DC}) verilmiştir. Enerji üretiminin, gün boyunca bulutların gölgeleri nedeniyle ani dalgalanmalar gösterdiği açıktır. Temmuz ayında aynı sistem için yapılan ölçümlerde, P_{DC} , Şekil 3.26d'de görüldüğü gibi Ocak ayından farklı olarak radyasyonla paralellikler göstermektedir.



Şekil 3.23. Ocak ayı için deneysel ölçüm verileri: a) ışıma, b) sıcaklıklar, c) nem, d) P_{DC} .

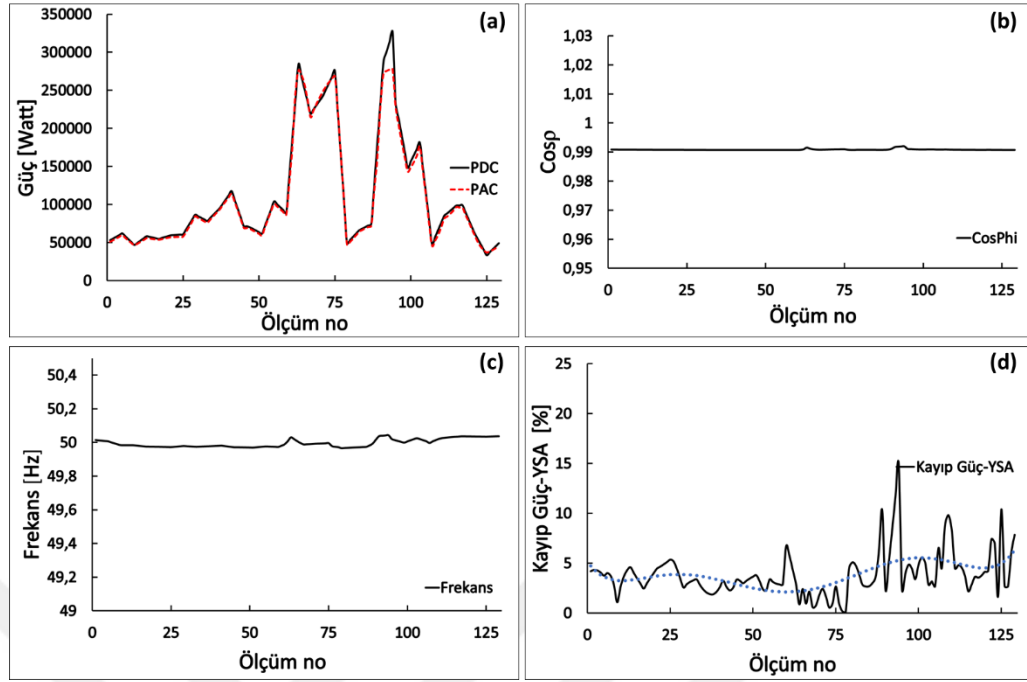
Ocak ayındaki deneysel sonuçlar ve YSA simülasyon sonuçlarının, eğitim aşamasında kullanılan deney sonuçlarıyla karşılaştırılması, Şekil 3.24'te gösterilmiştir. Bu şekilde de görüldüğü gibi deneysel sonuçlar ve YSA simülasyon sonuçları arasında mükemmel bir uyum vardır. Örneğin P_{AC} için ölçüm eğrisi ve YSA simülasyon sonuçları, Şekil 3.24a'da görüldüğü gibi neredeyse özdeştir. Güç faktörü ölçüm eğrisi, PV enerji santralının yakınlarında kurulu bulunan çok sayıdaki mermer fabrikasında çalışan büyük güçteki motorların devreye girip çıkması ve yüksek enerji talebinden kaynaklanan bazı dalgalanmalar göstermektedir. Ancak, YSA simülasyonları, Şekil 3.24b'de de görüldüğü gibi, yüksek doğrulukla daha kararlı sonuçlar vermiştir. Ayrıca, Frekans simülasyonlarının da Şekil 3.24c'de verildiği gibi deneysel sonuçlarla mükemmel bir uyum gösterdiği görülmektedir.

PV panelleri ile PV güç santrallerinin performansının değerlendirilmesi için inverter çıkışı arasındaki bir diğer önemli parametre olan güç kaybı Şekil 3.24'teki grafikte gösterilmiştir. YSA simülasyon sonuçları ve deneysel ölçümler için güç kaybı hesaplamaları benzer özellikler gözlenmiştir. Ek olarak, güç kaybı değişikliğini açıkça gözlemlemek için Şekil 3.24'deki YSA simülasyon eğrisine bir adet 6. derece regresyon eğrisi eklenmiştir. YSA sonuç eğrisine ve YSA sonuçlarının gerileme eğrisine göre, güç kaybı yüksek radyasyon oranlarına bağlı olarak günün ortasında azalan bir eğilim göstermektedir.



Şekil 3.24. Ocak ayı için deneysel ölçümler ve YSA simülasyon sonuçları: a) P_{AC} , b) güç faktörü, c) Frekans, d) Güç kaybı.

Şekil 3.25, Ocak ayı için farklı işletim koşullarında PV sistemi çıkış gücünün davranışını gözlemlemek için belirlenen yeni veri seti için YSA sonuçlarını göstermektedir. P_{DC} ve P_{AC} eğrileri ile güç kaybı eğrileri sırasıyla Şekil 3.25a ve Şekil 3.25d'de verilmiştir. Bu şekillerde Ocak ayında PV sisteminin performansı gösterilmiştir. Şekil 3.25a'da gösterildiği gibi, özdeş karakteristik eğrileri olan P_{DC} ve P_{AC} değerleri için çok yakın eğriler elde edilmiştir. Şekil 3.25b'de gösterilen güç faktörü değerleri çok istikrarlı olarak gözlemlenmiş ve deney sonuçlarına göre 0.99 ile 1 değerleri arasında farklılık göstermiştir. İnvörtör çıkışındaki AC gücünün frekansı Şekil 3.25c'de verilmiştir. Frekans değerleri 50 Hz ile 50.1 Hz arasında ve deneysel ölçümlerle mükemmel uyum içinde gözlenmiştir. YSA tahmini güç kaybı Şekil 3.25d'de gösterilmiştir. Ek olarak, güç kaybı eğrisinin eğilimini daha kolay gözlemlemek için 6. derece bir regresyon eğrisi eklenmiştir. Deneysel sonuçlara paralel olarak, güç kaybı eğrisi günün ortasında azalan bir eğilim gösterdiği görülmektedir.



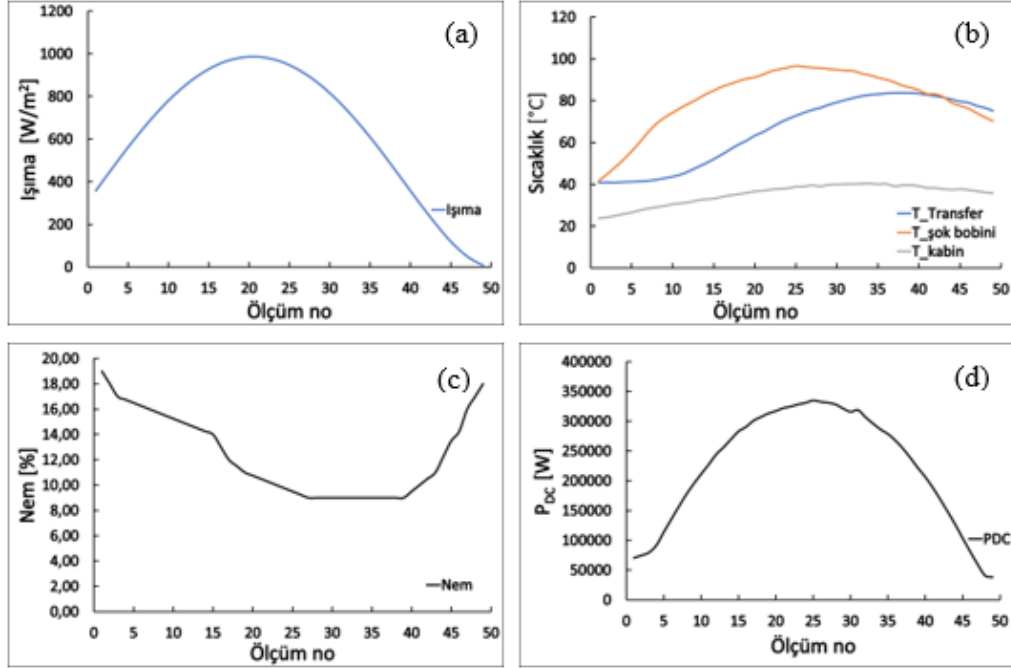
Şekil 3.25. Ocak ayı ölçümleri için YSA sonuç grafikleri: a) P_{DC} ve P_{AC} , b) Güç faktörü, c) Frekans, d) Güç kaybı.

Şekil 3.23 ve Şekil 3.25 birlikte değerlendirildiğinde, belirli bir seviyeye kadar olan sıcaklıkların artması ve azalan nemin her zaman güç kaybını azaltarak toplam sistem verimliliğini arttırdığı görülmektedir.

Şekil 3.26a, Burdur ili için Temmuz ayındaki teorik radyasyon oranlarını göstermektedir. Ele alınan il için maksimum teorik radyasyon değeri 986 W/m^2 olarak gözlenmiştir. Şekil 3.26b'de, aktarma barasının ($T_{Transfer}$) sıcaklık değişimi, inverter girişinde harmonik koruma için kullanılan şok bobininin (T_{Choke}) sıcaklığı ve invertörü içinde bulunduğu kabinin ($T_{Cabinet}$) sıcaklığı Temmuz ayı için verilmiştir. Bu üç sıcaklığın Ocak ayında kaydedilen sıcaklıklara göre daha yüksek seviyelerde ve teorik radyasyon eğrisine benzer özellikler gösterdiği görülmektedir.

Nemdeki değişim, PV panellerindeki enerji üretimini gün boyunca hava geçirgenliğini değiştirerek doğrudan etkilediği Şekil 3.26c'de görülmektedir. Nem değerleri Ocak ayında öğleden sonraya doğru artan bir eğilim göstermektedir. Genel olarak, Temmuz ayında nem değerlerinin Ocak ayında kaydedilen nem değerlerinden çok daha düşük olduğu söylenebilir. Şekil 3.26d'de, Temmuz ayında gün boyunca panellerden elde

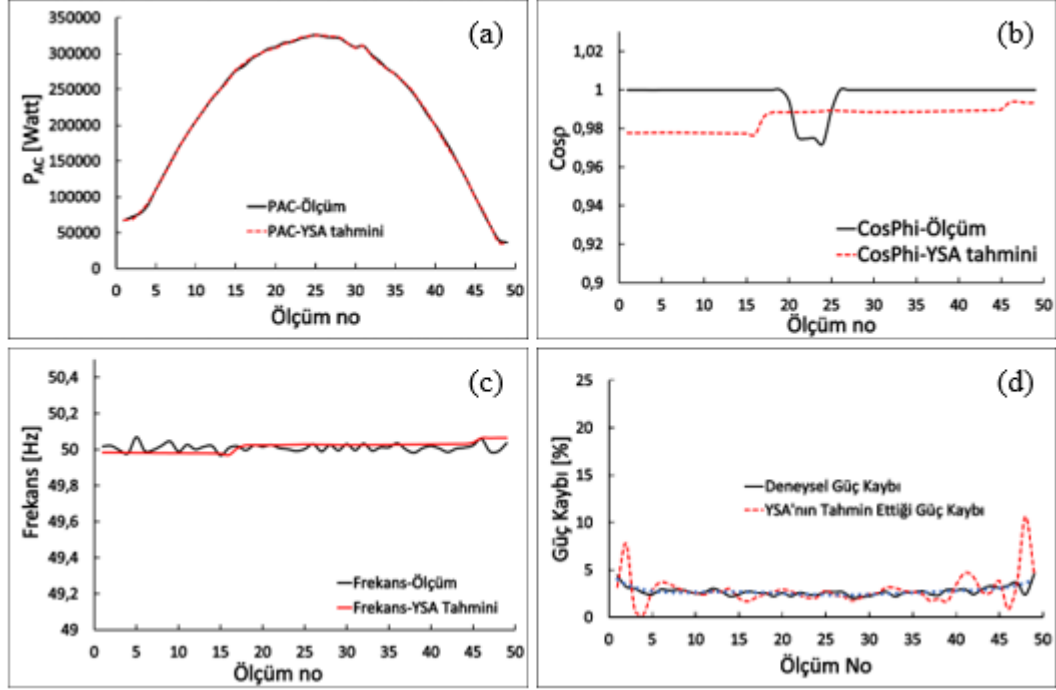
edilen güç (P_{DC}) verilmiştir. Enerji üretiminin herhangi bir dalgalanma göstermediği ve Temmuz ayında net gökyüzü nedeniyle gün içinde sürekli bir enerji üretiminin gerçekleştiği açıktır. Bu nedenle, Ocak ayında kaydedilen değerlerden çok daha yüksek P_{DC} gözlemlenmiştir.



Şekil 3.26. Temmuz ayı için deneysel ölçümler: a) ışıma, b) sıcaklıklar, c) nem, d) P_{DC} .

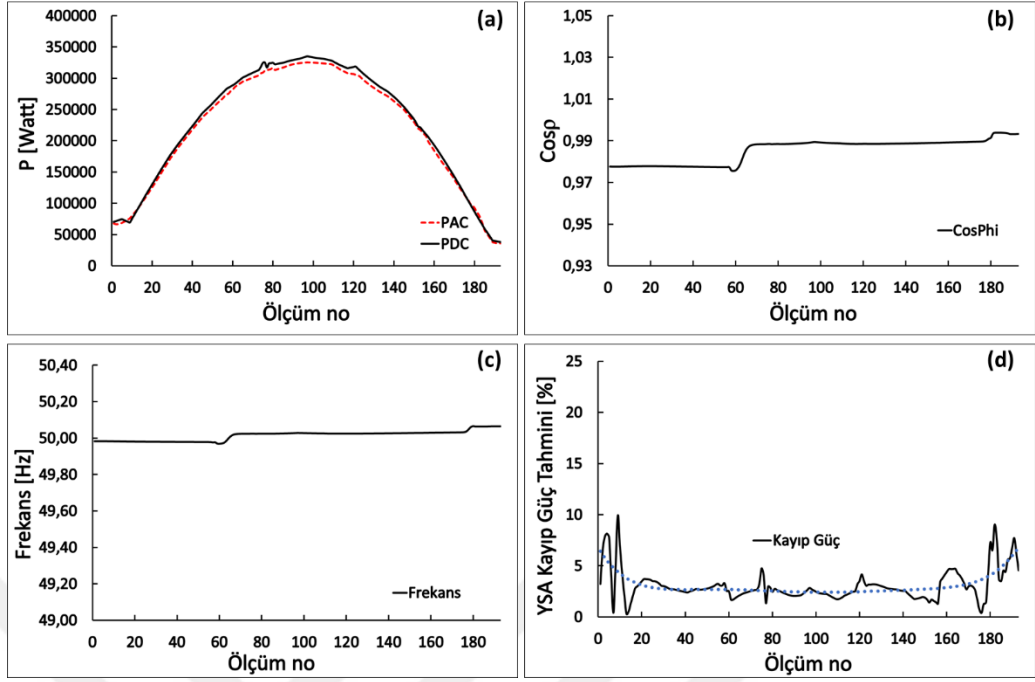
YSA simülasyon sonuçlarının eğitim aşamasında kullanılan deney sonuçlarının karşılaştırılması Temmuz ayı için Şekil 3.27'de gösterilmiştir. Şekil 3.27'e göre deneysel ölçümler ve YSA simülasyon sonuçları ile mükemmel bir uyumu vardır. Örneğin, Şekil 3.27a'da görüldüğü gibi, P_{AC} için elde edilen ölçüm eğrisi ve YSA simülasyon sonuçları ile tamamen özdeştir. Güç faktörü ölçüm eğrisi, Ocak ayında olduğu gibi, PV enerji santralının yakınlarında kurulan birçok mermer fabrikasının yüksek enerji talebinden dolayı dalgalanmalar göstermektedir. Bununla birlikte, YSA simülasyonlarının, Şekil 3.24b'ye benzer şekilde Şekil 3.26b'de de görüldüğü gibi, yüksek doğruluk oranlarında kararlı sonuçlar verdiği görülmektedir. Ek olarak, frekans simülasyonları, Şekil 3.27c'de gözlemlenen deney sonuçları ile mükemmel bir uyum sergilemiştir. Temmuz ayı için Şekil 3.27d'de verilen grafik güç kaybı eğrisidir. Güç kaybı değişikliğini açıkça gözlemlenmek için Şekil 3.27'deki YSA simülasyon eğrisine 6. derece regresyon eğrisi eklenmiştir. YSA sonuçları eğrisine ve hem de

regresyon eğrisine göre, güç kaybının yüksek radyasyon oranlarına bağlı olarak gün ortasına doğru azalan bir eğilim gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3.27. Temmuz ayı için deneysel ve YSA simülasyon sonuçları: a) P_{AC} , b) Güç faktörü, c) Frekans, d) Güç kaybı.

Şekil 3.28, Temmuz ayı için farklı işletim koşullarında PV sistemi çıkış gücünün davranışını gözlemlemek için belirlenen yeni veri seti için YSA sonuçlarını göstermektedir. P_{AC} ve P_{DC} eğrileri ve güç kaybı eğrileri sırasıyla Şekil 3.28a ve Şekil 3.28d'de verilmiştir. Temmuz ayında PV sisteminin performansı, Şekil 3.28a ve Şekil 3.28d'ye göre kolayca gözlemlenebilmektedir. Şekil 3.28a'da gösterildiği gibi, özdeş karakteristik eğrileri olan P_{AC} ve P_{DC} eğrileri için çok yakın değerler elde edilmiştir. Şekil 3.28b'de gösterilen güç faktörü değerleri çok sabit olarak gözlemlenmiş ve deney sonuçlarına 0.98 ile 1 değerleri arasında farklılık göstermiştir. İnvertör çıkışındaki AC gücünün frekansı Şekil 3.28c'de verilmiştir. Frekans değerleri 49.9 Hz ile 50.1 Hz arasında ve deneysel ölçümlerle mükemmel uyum içinde olduğu gözlenmiştir. YSA tahmini güç kaybı Şekil 3.28d'de gösterilmiştir. Ek olarak, güç kaybı eğrisinin eğilimini daha kolay gözlemlemek için 6. derece bir regresyon eğrisi eklenmiştir. Deneysel sonuçlara paralel olarak, güç kaybı eğrisi günün ortasında azalan bir eğilim gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3.28. Temmuz ayı ölçümleri için YSA sonuç grafikleri: a) P_{DC} ve P_{AC} , b) Güç faktörü, c) Frekans, d) Güç kaybı.

Şekil 3.26 ve Şekil 3.28 birlikte değerlendirildiğinde, belirli bir seviyeye kadar artan sıcaklık, azalan nem, her zaman güç kaybını azaltarak toplam sistem verimliliğini arttırmaktadır.

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER

Enerji ihtiyacının giderek daha fazla önem kazandığı günümüz şartlarında, akıllı şebekelere geçiş, bir ihtiyaçtan ziyade neredeyse zorunluluk haline gelmiştir. Yeraltındaki mevcut enerji kaynaklarının potansiyelini arttırmak mümkün olmadığına göre, aynı kaynaklardan daha fazla nasıl enerji üretebileceğimizi araştırırken üretilen enerjinin iletimi ve dağıtımındaki kayıpları da azaltarak verimli bir sistem oluşturmak mümkündür. Sistemde ömrünü tamamlamış ekipmanların akıllı şebeke sistemine uyum sağlayacak şekilde dijital röleler, trafolar, çift yönlü çalışan sayaçlar, sensörler ve haberleşme altyapısı ile birlikte akıllı operatör ile yönetiminin sağlanması geçiş sürecini hızlandıracaktır. Güç kalitesi daha iyi ve sürekli bir enerji arzının sağlanabildiği, yenilenebilir enerji kaynakların payının arttırıldığı yenilenmiş bir enerji sistemi ülkemizin öncelikli hedeflerinden birisi olmalıdır.

Yenilenebilir kaynak olarak rüzgar ve güneş enerjisinin, tekil olarak kullanımın yanında verimi yükseltmek amacıyla birlikte yer aldıkları hibrit sistemlerde yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu kaynakların toplam enerji üretimindeki payının yüksek olmasından dolayı sorunsuz entegrasyon için yapılan çalışmalar bu iki üretim yöntemi üzerinde yoğunlaşmıştır. Elektrik üretiminde kullanılan kaynakların karakteristikleri üretim miktarını etkilerken entegre edilen gücün kalitesi üzerinde de etkili olmaktadır. Tez çalışmasında yenilenebilir kaynak olarak kullanımı yaygın olan rüzgar türbini ve güneş paneli üzerinde çalışma yapılmıştır. Benzetim çalışmasında rüzgar türbinlerinde en çok kullanılan generatör çeşidi olan asenkron generatörün geçici ve sürekli durum analizi ile birlikte PV panelin bulunduğu bölgedeki ortam değişkenlerinin, entegrasyon noktasındaki güç kalitesine etkileri analiz edilerek literatüre katkı yapmak amaçlanmıştır.

Yenilenebilir kaynaklardan elektrik üreten generatör karakteristiğinin modellenmesi, şebekeye entegre edilecek gücün sınırlarının belirlenmesi, güç kalitesi seviyesinin belirlenmesi ve geleceğe dönük olarak yapılması planlanan sistem genişlemelerinde yol gösterici bir rol üstlenebilmektedir. Tez çalışmasında rüzgâr santrallerinde, şebekeye entegre edilecek olan gücü üreten generatörler incelenmiş ve bu makinalar arasında çok yaygın bir kullanıma sahip olan asenkron generatörün geçici ve sürekli durum analizi yapılmıştır. MATLAB'ta yapılan analiz grafiklerinde, şebeke bağlantılı çalışan asenkron generatörde yük akımının artmasıyla çıkış geriliminin düştüğü gözlenmiştir. Şebeke güç kalitesinin belli standartlarda olması gerektiği düşünüldüğünde, yük akımı ile gerilimin düşmesi güç kalitesinin sürdürülebilirliği açısından sorun olarak görülmektedir. Sonraki çalışmalarda bu sorunun çözümü üzerine odaklanılması şebekedeki kalite problemlerinin çözümüne katkı sağlayacaktır. Bu çalışma sonucunda ve diğer akademik çalışmalar göz önüne alındığında sincap kafesli asenkron generatörün rüzgâr türbinleri için uygun bir yapıda olduğu söylenebilir.

Güneş panelleri tarafından üretilen doğru gerilimin, iletim veya dağıtım sisteminde tüketicilerin kullanımına uygun bir alternatif gerilime dönüşümünü sağlamak için inverterler kullanılmaktadır. Entegrasyon eviriciler üzerinden şebekelere bağlantı yapılarak gerçekleştirilir. Bu süreçte, değişen çevresel koşullar, invertör sisteminin uygun matematiksel yöntemlerle modellenememesi ve üretilen enerjideki dalgalanmalar nedeniyle birçok zorluk yaşanmaktadır. Önerilen model ile yapılan benzetim çalışmasında, çevresel koşulların güç kalitesine etkisi ortaya çıkarılmıştır.

Bu tez çalışmasında, ikinci bir benzetim çalışması olarak, Türkiye'de Burdur kentinde bulunan PV santralinde 350 kW'lık bir evirici çıkışında AC güç, frekans ve güç katsayısı ile ilgili çevresel koşulların deneysel olarak incelenmesi Ocak ve Temmuz aylarında gerçekleştirildi. Bu araştırmalarda, Ocak ve Temmuz ayında atmosferik olarak farklı çalışma koşullarında ilk kez YSA kullanıldığına dikkat edilmelidir. Bu çalışmanın amacı, PV jeneratör çıkış gücü, sürücünün çeşitli kısımlarındaki sıcaklık artışı gibi çevresel koşulların, sürücünün çıkış gücü üzerindeki etkilerini araştırmak ve en verimli çalışma için en iyi parametrelere sahip çevresel koşulları tahmin etmektir.

Düşük nemli, daha yüksek güneş radyasyonu ve daha yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde, PV jeneratörünün çıkışı ile inverter çıkışı arasındaki güç farkının daha az olduğu ve bunun da daha iyi bir sistem verimliliği ortaya çıkardığı sonucuna varılmıştır.

Bu araştırmada elde edilen sonuçlar, akıllı şebekelere bağlı farklı çevresel koşullar altında yenilenebilir enerji kaynaklarının çıkış gücünü önceden belirlemek için olumlu bir şekilde kullanılabilir. Ek olarak, araştırmanın talep tarafı yönetimi ile ilgili gelecekteki araştırmalara yardımcı olması bekleniyor. Harmoniklerin etkisi bu araştırmaya dahil edilmemiştir ve gelecekte üzerinde çalışılabilecek bir konu olarak önemini korumaktadır.

KAYNAKLAR

1. Amin, M. and Wollenberg, B., "IEEE september/october 2005", *Power*, 3 (october): 34–41 (2005).
2. TEİAŞ, "2015 – 2019 Dönemi Stratejik Plan", (2015).
3. Basri, H. and Çetinkaya, Dumlu, Ferhat, S. E., "Dağıtık Üretim Tesislerinin Şebeke Entegrasyonunda Yaşanabilecek Olası Problemler ve Entegrasyon Analizleri", *Akıllı Şebekeler Ve Türkiye Elektrik Şebekesinin Geleceği Sempozyumu*, 2–6 (2013).
4. Internet: Erkut KIRMIZIOĞLU, "Akıllı Şebeke Stratejileri ve Örnek Projeler", http://www.emo.org.tr/ekler/b790c8dde17d8bf_ek.pdf.
5. Erlich, I., Winter, W., and Dittrich, A., "Advanced grid requirements for the integration of wind turbines into the German transmission system", *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2 (6): 7 pp. (2006).
6. Chinchilla, M., Arnaltes, S., and Burgos, J. C., "Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid", *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 21 (1): 130–135 (2006).
7. Rona, B., "Rüzgar santrallerinin güç sistemine entegrasyonu ve şebeke yönetmeliğine göre analizi", *İstanbul Üniversitesi Enerji Enstitüsü*, İstanbul, 76-77 (2014).
8. DEMİRTAŞ, M., "Güneş ve Rüzgar Enerjisi Kullanılarak Şebeke ile Paralel Çalışabilen Hibrit Enerji Santrali Tasarımı ve Uygulaması", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 60 (2008).
9. Fulzele, J. B. and Dutt, S., "Optimum Planning of Hybrid Renewable Energy System Using HOMER", *International Journal Of Electrical And Computer Engineering*, 2 (1): 68–74 (2012).
10. Wei Zhou, Chengzhi Lou, Zhongshi Li, Lin Lu, H. Y., "Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems", *Research Journal Of Applied Sciences, Engineering And Technology*, 8 (14): 1684–1690 (2014).
11. Kabbara, S. and Moubayed, N., "Hybrid Wind / PV System : The Lebanese Case", *Annals Of The University Of Craiova Electrical Engineering Series*, 34: 241–244 (2010).

12. Eskander, M. N., Jbrahim, W. M., Abdel Aziz, M. M., and Ibrahim, A. M., "Generation control of a wind farm with variable speed wind turbines for high power quality", *INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings)*, 443–448 (2005).
13. Mehdi Dali, Jamel Belhadj, X. R., "Hybrid solar-wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: Control and energy management - Experimental investigation", *Folia Haematologica*, 104 (5): 656–662 (1977).
14. Dönmez, M., "Akıllı Şebekeler ve Entegrasyon Smart Grids and Integration", *Akıllı Şebekeler Ve Türkiye Elektrik Şebekesinin Geleceği Sempozyumu*, 1–9 (2013).
15. Ertuğrul, E., Kaygusuz, A., Akçin, M., and İnönü, Ü., "Ölçüm Sistemi ile Yüksek Gerilim İletim Sisteminin Akıllı Şebekelere Adaptasyonu Adaptation of High Power Transmission System to Smart Grid by Using Current Özet 2 . Mevcut İletim Sistemi ve Ölçüm Sistemi", *Akıllı Şebekeler Ve Türkiye Elektrik Şebekesinin Geleceği Sempozyumu*, 1–4 (2013).
16. Ersen Akdeniz , Adnan Kaypmaz, E. A. Y., "Yenilenebilir Kaynaklardan Enerji Üretiminin Şebekenin Enerji Kalitesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi", *EMO Bilimsel Dergi*, 2–6 (2006).
17. Kürşat Tanrıöven, Serdar Yararbaş, H. C., "Geleceğin elektrik Şebekesi: Smart Grid", *Elektrik-Elektronik Ve Bilgisayar Sempozyumu 2011*, 52–55 (2009).
18. Dinçer, H., "Sayısal Teknolojinin Elektrik Şebeke Ağına Katılması: Akıllı Şebeke", *4. Enerji Verimliliği Ve Kalitesi Sempozyumu*, 193–197 (2011).
19. TEİAŞ, "2011 - 2015 Dönemi Stratejik Plan", (2011).
20. Abur, A., "Akıllı Şebekeler : Yeni Uygulamalar ve İleriye Dönük Düşünceler", *Akıllı Şebekeler Sempozyumu*, 1–6 (2013).
21. İnternet:"Türkiye'deki ilk ve tek smart grid projesi" https://docs.wixstatic.com/ugd/0ddb28_0801bdb49a6842bf9de656782a8f16c4.pdf (2016).
22. Akcanca, M. A. and Taşkın, S., "Akıllı Şebeke Uygulanabilirliği Açısından Türkiye Elektrik Enerji Sisteminin İncelenmesi", *Akıllı Şebekeler Ve Türkiye Elektrik Şebekesinin Geleceği Sempozyumu*, 131–135 (2013).
23. Dixon, C., Mahajan, R., Agarwal, S., Brush, A. J., Lee, B., Saroiu, S., and Bahl, P., "An Operating System for the Home", *Proceedings of the 9th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation*, 25-25 (2012).
24. Gül, O., "Akıllı Elektrik Şebekeleri ile Dağıtılmış Enerji Üretim Sistemlerinin Etkileşimi", (2013).

25. Polat, S. and Şekerci, H., "Dünyada ve Ülkemizde Önemli Elektrik Çöküntüleri", *V. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre Ve Sergisi*, 1–12 (2017).
26. Hidayatullah, N. A., Paracha, Z. J., and Kalam, A., "Impact of Distributed Generation on Smart Grid Transient Stability", *Smart Grid And Renewable Energy*, 02 (02): 99–109 (2011).
27. Brown, R. E., "Impact of Smart Grid on Distribution System design", *IEEE Power And Energy Society 2008 General Meeting: Conversion And Delivery Of Electrical Energy In The 21st Century, PES*, 1–5 (2008).
28. Moslehi, K., Kumar, R., and Member, S., "A Reliability Perspective of the Smart Grid", *IEEE Transactions On Smart Grid*, 1 (1): 57–64 (2010).
29. Ipakchi, A. and Albuyeh, F., "Grid of the Future: We Are Ready to Transition to a Smart Grid?", *IEEE Power And Energy Magazine*, 7 (2): 52–62 (2009).
30. R. A. (Reigh) Walling, Robert Saint, Roger C. Dugan, J. B. and L. A. K., "Summary of Distributed Resources Impact on Power Delivery Systems", *International Journal Of Sustainable Development And World Ecology*, 9 (4): 351–368 (2002).
31. Chang, J. and Jia, S., "Modeling and collaboration of wind-solar power generation system based on multi-agent system", *IEEE International Symposium On Industrial Electronics*, (ISIE): 1403–1406 (2009).
32. Chang, J. and Shu-Yun Jia, "Modeling and application of wind-solar energy hybrid power generation system based on multi-agent technology", *2009 International Conference On Machine Learning And Cybernetics*, (July): 1754–1758 (2009).
33. Carvalho, P. M. S., Correia, P. F., and Ferreira, L. A. F. M., "Distributed reactive power generation control for voltage rise mitigation in distribution networks", *IEEE Transactions On Power Systems*, 23 (2): 766–772 (2008).
34. Chiradeja, P. and Ramakumar, R., "An approach to quantify the technical benefits of distributed generation", *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 19 (4): 764–773 (2004).
35. Park, S., Miura, Y., and Ise, T., "A Maximum Power Control Scheme based on Multi- Agent System for Distributed Flexible Network Photovoltaic System", *2012 International Conference On Renewable Energy Research And Applications (ICRERA)*, 1–6 (2012).
36. Kala Meah and Sadrul Ula, "Comparative Evaluation of HVDC and HVAC Transmission Systems", *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 6 (7): 1–5 (2007).

37. Bahrman, M. P., "HVDC Transmission Overview", *2008 IEEE/PES Transmission And Distribution Conference And Exposition*, 1–7 (2008).
38. Huang, G. M. and Krishnaswamy, V., "HVDC Controls for Power System Stability", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 597–602 (2002).
39. Latorre, H. F., Ghandhari, M., and Söder, L., "Control of a VSC-HVDC operating in parallel with AC transmission lines", *2006 IEEE PES Transmission And Distribution Conference And Exposition: Latin America, TDC'06*, 3 (06): 1–5 (2006).
40. Lemaire, M., Thorimbert, S., Valange, S., Jolival, C., and Launay, F., "Reactive Power Compensation Based on FACTS Devices", (2016).
41. Kazemi, A. and Andami, H., "FACTS devices in deregulated electric power systems: a review", *2004 IEEE International Conference On Electric Utility Deregulation, Restructuring And Power Technologies. Proceedings*, 4 (April): 337–342 (2004).
42. Gyugyi, L., Schauder, C. D., Williams, S. L., Rietman, T. R., Torgerson, D. R., and Edris, A., "The Unified Power Flow Controller: A New Approach To Power Transmission Control", *IEEE Transactions On Power Delivery*, 10 (2): 1085–1097 (1995).
43. Xu, Y. and Chen, H., "FACTS-Based Power Flow Control in Interconnected Power Systems", *Ieee Transactions On Power Systems*, 15 (1): 257–262 (2000).
44. Edris, A., Mehraban, A. S., Rahman, M., Gyugyi, L., Arabi, S., and Reitman, T., "Controlling the flow of real and reactive power", *IEEE Computer Applications In Power*, 11 (1): 20–25 (1998).
45. Huang, Z., Ni, Y., Shen, C. M., Wu, F. F., Chen, S., and Zhang, B., "Application of unified power flow controller in interconnected power systems-modeling, interface, control strategy, and case study", *IEEE Transactions On Power Systems*, 15 (2): 817–824 (2000).
46. Mihalič, R., Žunko, P., and Povh, D., "Improvement of transient stability using unified power flow controller", *IEEE Transactions On Power Delivery*, 11 (1): 485–491 (1996).
47. Teng, J. H., "A modified Gauss-Seidel algorithm of three-phase power flow analysis in distribution networks", *International Journal Of Electrical Power And Energy Systems*, 24 (2): 97–102 (2002).

48. Ge, S. Y. and Chung, T. S., "Optimal active power flow incorporating power flow control needs in flexible AC transmission systems", *IEEE Transactions On Power Systems*, 14 (2): 738–744 (1999).
49. De Sousa, V. A., Baptista, E. C., and Da Costa, G. R. M., "Optimal reactive power flow via the modified barrier Lagrangian function approach", *Electric Power Systems Research*, 84 (1): 159–164 (2012).
50. Hua Wei, H.Sasaki, J.Kubokawa, R. Y., "An interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure", 1 (97): 134–141 (1997).
51. Burchett, R. C., Happ, H. H., and Wirgau, K. A., "Large Scale Optimal Power Flow", *IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems*, PAS-101 (10): 3722–3732 (1982).
52. Rukmi Sari Hartati and M. E. El-Hawary, "Optimal Active Power Flow Solutions Using a Modified Hopfield Neural Network", *Canadian Conference On Electrical And Computer Engineering 2001*, 189–194 (2001).
53. Oliveira, A. R. L., Soares, S., and Nepomuceno, L., "Optimal Active Power Dispatch Combining Network Flow and Interior Point Approaches", *IEEE Transactions On Power Systems*, 18 (4): 1235–1240 (2003).
54. Carvalho, M. F., Soares, S., and Ohishi, T., "Optimal active power dispatch by network flow approach", *IEEE Transactions On Power Systems*, 3 (4): 1640–1647 (1988).
55. Chung, T. S. and Ge, S., "Optimal power flow incorporating FACTS devices and power flow control constraints", *POWERCON 1998 - 1998 International Conference On Power System Technology, Proceedings*, 1 (5): 415–419 (1998).
56. Wu, Q. and Ma, J., "Power system optimal reactive power dispatch using evolutionary programming", *IEEE Transactions On Power Systems*, 10 (3): 1243–1249 (1995).
57. Nanda, J., Hari, L., and Kothari, M. L., "Challenging algorithm for optimal reactive power dispatch through classical co-ordination equations", *IEEE Proceedings-Generation, Transmission And Distribution*, 139 (2): 93–101 (1992).
58. Dai, C., Chen, W., Zhu, Y., and Zhang, X., "Seeker optimization algorithm for optimal reactive power dispatch", *IEEE Transactions On Power Systems*, 24 (3): 1218–1231 (2009).

59. Uthitsunthorn, D., Kwannetr, U., Sinsuphun, N., Leeton, U., and Kulworawanichpong, T., "Control of STATCOM by using optimal reactive power flow solutions", *Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications And Information Technology (ECTI-CON), 2010 International Conference On*, 1181–1185 (2010).
60. Kulworawanichpong, T., "Optimal power flow solution using adaptive tabu search", *International Journal Of The Physical Sciences*, 6 (28): 6394–6409 (2011).
61. Reddy, S. S., "Solution of multi-objective optimal power flow using efficient meta-heuristic algorithm", *Electrical Engineering*, 100 (2): 401–413 (2018).
62. Baxter, R., Hastings, N., Law, A., and Glass, E. J. ., "Reactive tabu search for optimal power flow under constrained emission dispatch", *Animal Genetics*, 39 (5): 561–563 (2008).
63. Shao, M. and Jewell, W. T., "CO2 emission-incorporated AC optimal power flow and its primary impacts on power system dispatch and operations", *IEEE PES General Meeting, PES 2010*, 4 (10): 1–8 (2010).
64. Roy, P. K., Ghoshal, S. P. and Thakur, S. S., "Biogeography based optimization for multi-constraint optimal power flow with emission and non-smooth cost function", *Expert Systems With Applications*, 37 (12): 8221–8228 (2010).
65. Mbamalu, G. A. N., El-Hawary, F. and El-Hawary, M. E., "Effects of load modeling on minimum loss, minimum emission, and multiple-objective optimal hydrothermal power flow", *Electric Power Systems Research*, 34 (2): 97–108 (1995).
66. Kumari, M. S. and Maheswarapu, S., "Enhanced Genetic Algorithm based computation technique for multi-objective Optimal Power Flow solution", *International Journal Of Electrical Power And Energy Systems*, 32 (6): 736–742 (2010).
67. Cho, J. R., Lee, J. H., Jeong, K. M., and Kim, K. W., "Optimum design of run-flat tire insert rubber by genetic algorithm", *Finite Elements In Analysis And Design*, 52: 60–70 (2012).
68. Soares, J., Sousa, T., Vale, Z. A., Morais, H., and Faria, P., "Ant colony search algorithm for the optimal power flow problem", *IEEE Power And Energy Society General Meeting*, 5 (11): 1–8 (2011).
69. Verma, O. P., Kumar, P., Hanmandlu, M., and Chhabra, S., "High dynamic range optimal fuzzy color image enhancement using Artificial Ant Colony System", *Applied Soft Computing Journal*, 12 (1): 394–404 (2012).

70. Mohammadi, M., Dini, F., and Amrollahi, R., "Optimization of Damavand tokamak poloidal field coils positions and currents with PSO algorithm", *Journal Of Fusion Energy*, 31 (2): 170–174 (2012).
71. Kim, J., Lee, H., and Park, J., "A Modified Particle Swarm Optimization for Optimal Power Flow", *Journal Of Electrical Engineering And Technology*, 2 (4): 413–419 (2007).
72. Singh, A. and Sundar, S., "An artificial bee colony algorithm for the minimum routing cost spanning tree problem", *Soft Computing*, 15 (12): 2489–2499 (2011).
73. Ozturk, A., Cobanli, S., Erdosmus, P., and Tosun, S., "Reactive power optimization with artificial bee colony algorithm", *Scientific Research And Essays*, 5 (19): 2848–2857 (2010).
74. Belgin Emre Türkay, Fatih Küçüktezcan, A. B., "Elektrik Enerjisinin Bölgeler Arası Alışverişinin Optimizasyonu", *EMO Bilimsel Derg*, 1 (1): 31–38 (2011).
75. Leong Hai KOH, Yen Kheng TAN, Peng Wang, K. J. T., "Renewable Energy Integration Into Smart Grids: Problems and Solutions – Singapore Experience", *IEEE/ASME International Conference On Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, 9 (12): 1–7 (2009).
76. IEEE, "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems", (2001).
77. Çetinkaya, H. B., "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Şebekeye Entegrasyonu", *ICSG İSTANBUL 2014*, 2 (2): 72–75 (2014).
78. Sanjab, A., Saad, W., Guvenc, I., Sarwat, A., and Biswas, S., "Smart Grid Security: Threats, Challenges, and Solutions", *International Journal Of Smart Grid And Clean Energy Smart*, 1 (971): 1–6 (2016).
79. Kaygusuz, A., Gül, O., and Alagöz, B. B., "Yenilenebilir Dağıtık Üretim Koşullarının Güç Sistemlerinin Yük Akışına Etkilerinin Analizi Algoditasyonları", *EMO Bilimsel Dergi*, 2 (4): 77–85 (2012).
80. Özdemir, E., Özdemir, Ş., Erhan, K., and Aktaş, A., "Akıllı şebekelerde enerji depolama uygulamalarının önündeki fırsatlar ve karşılaşılan zorluklar", *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University*, 32 (2): 499–506 (2017).
81. Akçin, M., Alagöz, B. B., Keleş, C., Karabiber, A., and Kaygusuz, A., "Dağıtık kontrol ile akıllı şebekelerde geniş-alan yönetimi ve geleceğe dönük projeksiyonlar Wide-area management of smart grid by distributed control and near future projections", *SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi*, 17 (3): 457–470 (2013).

82. İnternet: T.C. Resmi Gazete, "Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği", <http://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.19217&MevzuatIliski=0&sourceXmlSearch%20%20=Elektrik%20Piyasas%C4%B1> (2014).
83. Group, W., "IEEE Application Guide for IEEE Std 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems", IEEE Std 1547.2-2008, 1-207 (2008).
84. Shafiullah, G. M. and Oo, A. M. T., "Analysis of harmonics with renewable energy integration into the distribution network", *Proceedings Of The 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, ISGT ASIA 2015*, 1–6 (2016).
85. İnternet: T.C. Resmi Gazete, "Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği", <http://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.19217&MevzuatIliski=0&sourceXmlSearch%20%20=Elektrik%20Piyasas%C4%B1> (2009).
86. Stefan Willing, Joachim Nilges, Stefan Nykamp, Thomas Smolka, Claas Matrose, Armin Schnettler, A. S., "Improving Quality of Supply and Usage of Assets in Distribution Grids by Introducing a "Smart Operator"", *22nd International Conference On Electricity Distribution*, (0718): 10–13 (2014).
87. L. Bird, M. Milligan, and D. L., "Integrating Variable Renewable Energy: Challenges and Solutions", (2013).
88. Sajadi, A., Sebtahmadi, S. S., Koniak, M., Biczal, P., and Mekhilef, S., "Distributed Control Scheme for Voltage Regulation in Smart Grids", *International Journal Of Smart Grid And Clean Energy*, 1 (1): 53–59 (2012).
89. Farag, H. E., El-Saadany, E. F., and Seethapathy, R., "A two ways communication-based distributed control for voltage regulation in smart distribution feeders", *IEEE Transactions On Smart Grid*, 3 (1): 271–281 (2012).
90. İnternet: TEİAŞ, "2006 ve 2016 Yılları İçin Türkiye Kurulu Gücü", <https://www.teias.gov.tr/tr/i-kurulu-guc> (2018).
91. İnternet: TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, "Enerji İstatistikleri 28 Şubat 2019", http://www.emo.org.tr/ekler/c5aa4d5e03b92df_ek.pdf .
92. Green, M. A., Hishikawa, Y., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., and Ho-Baillie, A. W. Y., "Solar cell efficiency tables (version 52)", *Progress In Photovoltaics: Research And Applications*, 26 (7): 427–436 (2018).
93. Peng, F. Z., "Z-source inverter", *IEEE Transactions On Industry Applications*, 39 (2): 504–510 (2003).

94. Florescu, A., Stocklosa, O., Teodorescu, M., Radoi, C., Stoichescu, D. A., and Rosu, S., "The advantages, limitations and disadvantages of Z-source inverter", *Proceedings Of The International Semiconductor Conference, CAS*, 2 (1): 483–486 (2010).
95. Akbaba, M. and Alattawi, M. A. A., "A new model for I-V characteristic of solar cell generators and its applications", *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 37 (2): 123–132 (1995).
96. Bellia, H., Youcef, R., and Fatima, M., "A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB", *NRIAG Journal Of Astronomy And Geophysics*, 3 (1): 53–61 (2014).
97. Chowdhury, S., Taylor, G. A., Chowdhury, S. P., Saha, A. K., and Song, Y. H., "Modelling , Simulation and Performance Analysis of a PV Array in an Embedded Environment", *Universities Power Engineering Conference, 2007. UPEC 2007. 42nd International*, (1): 781–785 (2007).
98. EL Tayyan, A. A., "A simple method to extract the parameters of the single-diode model of a PV system", *Turkish Journal Of Physics*, 37 (1): 121–131 (2013).
99. İnternet: T.C. Resmi Gazete, "Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği", <http://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.19217&MevzuatTliski=0&sourceXmlSearch%20%20=Elektrik%20Piyasas%C4%B1> (2004).
100. Cetin, K. B. and N. S., "Electrical Power Production of ADU Faculty of Medicine From Wind-Photovoltaic Hybrid Power System and Environmental Influences", *ISEM2014 Adiyaman - TURKEY*, 570–579 (2014).
101. Dönmez, M., "Akıllı Şebekeler ve Üretim ile Entegre Sistem İletişimi", *SMART GRIDS AND INTEGRATED SYSTEM OPERATION WITH PRODUCTION*, 237–243 (2014).
102. Gardner, P., Garrad, A., Jamieson, P., Nicholls, G., Tindal, A., Zervos, A., Millais, C., Kjaer, C., Chandler, H., Douglas, B., Colasimone, L., and Riddell, R., "Wind Energy an Analysis of Wing Energy in the EU-25", (2003).
103. Akın Taşcıkaraoğlu and Mehmet Uzunoğlu, "Şebekeye Bağlı Rüzgar Türbinlerinin Fliker Etkileri", *Enerji Verimliliği Ve Kalitesi Sempozyumu*, 37–42 (2011).
104. Ta, Z. and Elektrik, L. U., "Rüzgâr Türbinleri Güç Kalitesi ve Şebeke Kodları", *5. İzmir Rüzgar Sempozyumu*, 1–13 (2008).
105. Xu, W., "Comparisons and Comments on Harmonic Standards IEC 1000-3-6 and IEEE Std. 519 Wilsun", *Ninth International Conference On Harmonics And Quality Of Power. Proceedings (Cat. No.00EX441)*, 260–263 (2000).

106. Mustafa Yılmaz, H. A. ve M. A., "Şebekeden Bağımsız Çalışan Sincap Kafesli Bir Asenkron Generatörün Sürekli ve Geçici Durum Analizi", *4th International Symposium On Innovative Technologies In Engineering And Science*, 393–402 (2016).
107. Internet: Onur COPÇUOĞLU, G. Ö., "Yel Enerjisi Dönüşüm Sistemleri İçin Uygun Jeneratör Türlerinin Değerlendirilmesi", http://www.emo.org.tr/etkinlikler/yeksem/etkinlik_metin.php?etkinlikkod=32&metin_kod=424.
108. Chen, Y., Pillay, P., and Khan, A., "PM Wind Generator Topologies", (2014).
109. Commission, "Wind Turbine Grid Connection and Interaction", (2008).
110. Hasanova, L., "Compensation of Reactive Power of Squirrel-Cage Asynchronous Generators, Used in Wind Power Plants and Small Hydroelectric Power Stations", *IFAC-PapersOnLine*, 51 (30): 462–467 (2018).
111. ÖZSOY, E. E., "Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinde Kullanıma Yönelik Dayanıklı Çift Beslemeli Asenkron Generatör Kontrol Yöntemi Tasarımı ve Uygulaması", (2014).
112. Meltem APAYDIN, Arif Kıvanç ÜSTÜN, M. K. ve Ü. B. F., "Rüzgâr Enerjisinde Kullanılan Jeneratörlerin Karşılaştırmalı Analizi", *V. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI SEMPOZYUMU 2009*, 103–107 (2009).
113. Lundberg, S., Petru, T., and Thiringer, T., "Electrical limiting Factors for Wind Energy Installations in Weak Grids", *International Journal Of Renewable Energy Engineering*, 3 (2): 305–310 (2001).
114. IEEE Committee, "Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems (2004).
115. Prasad, A. R. and Natarajan, E., "Optimization of integrated photovoltaic-wind power generation systems with battery storage", *Energy*, 31 (12): 1607–1618 (2006).
116. Trümper, S. C., Gerhard, S., Saatmann, S., and Weinmann, O., "Qualitative analysis of strategies for the integration of renewable energies in the electricity grid", *Energy Procedia*, 46: 161–170 (2014).
117. Neumann, R., "The importance of IEC 61000-4-30 Class A for the coordination of power quality levels: Is it important?", *2007 9th International Conference On Electrical Power Quality And Utilisation, EPQU*, 1–4 (2007).
118. Kayabasi, E., Ozturk, S., Celik, E., and Kurt, H., "Determination of cutting parameters for silicon wafer with a Diamond Wire Saw using an artificial neural network", *Solar Energy*, 149: 285–293 (2017).

119. Ozturk, T., Elhawil, A., Uluer, İ., and Guneser, M. T., "Development of extraction techniques for dielectric constant from free-space measured S-parameters between 50 and 170 GHz", *Journal Of Materials Science: Materials In Electronics*, 28 (15): 11543–11549 (2017).
120. Uysal, F., Kilinc, E., Kurt, H., Celik, E., Dugenci, M., and Sagiroglu, S., "Estimating Seebeck Coefficient of a p-Type High Temperature Thermoelectric Material Using Bee Algorithm Multi-layer Perception", *Journal Of Electronic Materials*, 46 (8): 4931–4938 (2017).
121. Mellit, A., Sağlam, S., and Kalogirou, S. A., "Artificial neural network-based model for estimating the produced power of a photovoltaic module", *Renewable Energy*, 60: 71–78 (2013).
122. Li, Z., Rahman, S., Vega, R., and Dong, B., "A Hierarchical Approach Using Machine Learning Methods in Solar Photovoltaic Energy Production Forecasting", *Energies*, 9 (1): 55 (2016).
123. Ata, R., "Artificial neural networks applications in wind energy systems: a review", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 49: 534–562 (2015).
124. Karabacak, K. and Cetin, N., "Artificial neural networks for controlling wind-PV power systems: A review", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 29: 804–827 (2014).
125. Kandemir, E., Cetin, N. S., and Borekci, S., "A comprehensive overview of maximum power extraction methods for PV systems", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 78 (May): 93–112 (2017).
126. Almonacid, F., Rus, C., Pérez, P. J., and Hontoria, L., "Estimation of the energy of a PV generator using artificial neural network", *Renewable Energy*, 34 (12): 2743–2750 (2009).
127. Yap, W. K. and Karri, V., "An off-grid hybrid PV/diesel model as a planning and design tool, incorporating dynamic and ANN modelling techniques", *Renewable Energy*, 78: 42–50 (2015).
128. Graditi, G., Ferlito, S., Adinolfi, G., Tina, G. M., and Ventura, C., "Energy yield estimation of thin-film photovoltaic plants by using physical approach and artificial neural networks", *Solar Energy*, 130: 232–243 (2016).
129. Sitharthan, R., Devabalaji, K. R., and Jeas, A., "An Levenberg–Marquardt trained feed-forward back-propagation based intelligent pitch angle controller for wind generation system", *Renewable Energy Focus*, 22–23 (December): 24–32 (2017).

130. Rostami, A., Anbaz, M. A., Erfani Gahrooei, H. R., Arabloo, M., and Bahadori, A., "Accurate estimation of CO₂adsorption on activated carbon with multi-layer feed-forward neural network (MLFNN) algorithm", *Egyptian Journal Of Petroleum*, 27 (1): 65–73 (2018).
131. Brouwer, R. K., "Training a feed-forward network by feeding gradients forward rather than by back-propagation of errors", *Neurocomputing*, 16 (2): 117–126 (1997).
132. Chiba, Z., Abghour, N., Moussaid, K., El Omri, A., and Rida, M., "A novel architecture combined with optimal parameters for back propagation neural networks applied to anomaly network intrusion detection", *Computers And Security*, 75: 36–58 (2018).
133. Demuth, H., Beale, M., and Hagan, M., "Neural Network Toolbox", *The MathWorks, Inc*, (4): 10–29 (2005).
134. Cao, W., Wang, X., Ming, Z., and Gao, J., "A review on neural networks with random weights", *Neurocomputing*, 275: 278–287 (2018).

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa YILMAZ 1972 yılında Karabük'te doğdu; ilk ve orta öğrenimini Karabük'te tamamladıktan sonra 1990 yılında Gazi Üniversitesi Sanat Eğitimi Yüksekokulu'nu kazandı. 1992 yılında Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği Bölümü'ne geçiş yaptı. Mezuniyetinden sonra 1996 yılında Ordu Merkez Endüstri Meslek Lisesi'ne öğretmen olarak atandı. 1998 yılında 263. Dönem Asker Öğretmen olarak askerliğini Tunceli'de tamamladı. 2005 yılında Sakarya 1. Endüstri Meslek Lisesi'ne tayin oldu. 2010 yılında halen çalışmaya ettiği Karabük Üniversitesi TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Elektrik Programı'na öğretim görevlisi olarak atanmıştır. Yüksek lisans eğitimini 2012 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliğinde tamamladı. Evli 4 çocuk babasıdır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu
Merkez/Karabük

E-posta : mustafayilmaz@karabuk.edu.tr