

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONTROL VE KUMANDA SİSTEMLERİ BİLİM DALI**

**BİR AKILLI ŞEBEKE SİSTEMİNİN MODELLENMESİ,
SİMÜLASYONU VE DENEYSEL OLARAK DOĞRULANMASI**

Macit TOZAK

**Danışman
Prof. Dr. Sezai TAŞKIN**



MANİSA-2020

Macit
TOZAK

BİR AKILLI ŞEBEKE SİSTEMİNİN MODELLENMESİ, SİMÜLASYONU VE DENEYSEL
OLARAK DOĞRULANMASI

2020

TEZ ONAYI

Macit TOZAK tarafından hazırlanan "**Bir Akıllı Şebeke Sisteminin Modellenmesi, Simülasyonu ve Deneysel Olarak Doğrulanması**"adlı tez çalışması 29/17/2020 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Prof. Dr. Sezai TAŞKIN
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Nevzat ONAT
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Yüksel OĞUZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Macit TOZAK



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ	VII
TEŞEKKÜR.....	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	XI
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması.....	2
1.2. Tezin Amacı.....	4
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Akıllı Şebeke ve Bileşenleri.....	5
2.1.1. Akıllı Altyapı Sistemleri.....	9
2.1.1.1. Akıllı Enerji Alt Sistemleri.....	10
2.1.1.1.1. Elektrik Üretimi	10
2.1.1.1.2. Güç İletim Sistemi	12
2.1.1.1.3. Güç Dağıtım Sistemi	13
2.1.1.1.4. Mikroşebeke, Araçtan Şebekeye, Şebekeden Araca Sistemler	14
2.1.1.2. Akıllı Bilgi Alt Sistemleri.....	17
2.1.1.2.1. Veri Ölçümü.....	17
2.1.1.2.2. Veri Yönetimi.....	21
2.1.1.3. Akıllı Haberleşme Alt Sistemleri.....	22
2.1.1.3.1. Kablosuz Haberleşme Teknolojileri.....	24
2.1.1.3.2. Kablolü Haberleşme Teknolojileri.....	27
2.1.2. Akıllı Yönetim Sistemleri	29
2.1.2.1. Yönetim Hedefleri	29
2.1.2.1.1. Enerji Verimliliği ve Talep Profili	29
2.1.2.1.2. Fayda – Maliyet Optimizasyonu ve Fiyat İstikrarı	31
2.1.2.1.3. Emisyon Kontrolü	32
2.1.2.2. Akıllı Yönetim Metotları	34
2.1.2.2.1. Optimizasyon	34
2.1.2.2.2. Makine Öğrenmesi	35
2.1.2.2.3. Oyun Teorisi	35
2.1.2.2.4. Açık Arttırma ve Teklif Verme.....	35
2.1.3. Akıllı Koruma Sistemleri	35
2.1.3.1. Sistem Güvenliği ve Arıza Koruması	36
2.1.3.2. Gizlilik ve Güvenilirlik.....	36
2.2. Dünyada Elektrik Üretimi ve Akıllı Şebeke Çalışmaları.....	37
2.3. Ülkemizde Elektrik Üretimi ve Akıllı Şebeke Çalışmaları.....	40
3. MATERYAL VE YÖNTEM	45
3.1. Merkezi Kontrol ve Veri Toplama Sistemi.....	45

3.2. Elektrik Üretim Birimi	47
3.2.1. Hidroelektrik Üretim Birimi	48
3.2.2. Rüzgâr Enerjisi Üretim Birimi	51
3.2.3. Termik Enerji Üretim Birimi	53
3.2.4. Güneş Enerjisi ile Elektrik Üretim Birimi	54
3.3. İletim Birimi	56
3.4. Trafo Birimi	58
3.5. Yükler	59
3.6. Kesiciler	61
3.7. Reaktif Güç Kontrol Birimi ve Kapasitif Banklar	62
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	65
4.1. Deneysel Çalışmalar	65
4.1.1. Hidroelektrik Santral Deneyleri	65
4.1.2. Rüzgar Santrali Deneyleri	67
4.1.3. Fotovoltaik Panel Deneyleri	72
4.2. Sistem Modelleri	73
4.2.1. Sistem Yüklerinin ve Anahtarların Modeli	73
4.2.1. İletim Hatları ve Trafo Modeli	75
4.2.2. Termik Santral Modeli	77
4.2.3. Hidroelektrik Sistem Modeli	78
4.2.4. Rüzgâr Enerji Sistemi Modeli	79
4.2.5. Güneş Enerji Sistemi Modeli	81
4.2.6. Otomatik Kompanzasyon Bloğu Modeli	83
4.2.7. Akıllı Şebeke Modeli	86
4.3. Simulasyon Sonuçları ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırması	89
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	93
KAYNAKLAR	94
ÖZGEÇMİŞ	98

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AB	Avrupa Birliği
AMI	Gelişmiş Ölçüm Altyapısı (Advanced Metering Infrastructure)
AMR	Otomatik Sayaç Okuma Sistemleri (Automated Meter Reading)
BEV	Bataryalı Hibrit Elektrikli Araç (Battery Electric Vehicle)
CR	Bilişsel Radyo (Cognitive Radio)
DA	Tağıtım Otomasyonu (Distribution Automation)
DRM	Talep Tepki Yönetimi (Demand Response Management)
DSM	Talep Tarafı Yönetimi (Demand Side Management)
FAN	Saha Ağ Bağlantısı (Field Area Network)
FCEV	Yakıt Pilli Elektrikli Araç (Fuel Cell Electric Vehicle)
HAN	Ev Ağ Bağlantısı (Home Area Network)
HEV	Hibrit Elektrikli Araç (Hybrid Electric Vehicle)
IoT	Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
ISO	Bağımsız Sistem Operatörleri (Independent System Operators)
LAN	Yerel Ağ Bağlantısı (LAN - Local Area Network)
MAN	Metropol Ağ Bağlantısı (Metropolitan Area Network)
NAN	Yakın/Komşu Ağ Bağlantısı (Neighborhood Area Network)
NIST	Amerikan Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (National Institute of Standards and Technologies)
PHEV	Şarjlı Hibrit Elektrikli Araç (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
PLC	Güç İletim Hattı Üzerinden Haberleşme (Powerline Communication)
PMU	Fazör Ölçüm Birimi (Phasor Measurement Unit)
RTO	Bölgesel Elektrik İletim Kuruluşları (Regional Transmission Organizations)
V2G/G2V	Araçtan Şebekeye/Şebekeden Araca Sistemler (Vehicle to Grid/Grid to Vehicle Systems)
WAN	Geniş Ağ Bağlantısı (WAN – Wide Area Network)
WSN	Kablosuz Sensör Ağları (Wireless Sensors Network)
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynakları

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Türkiye Akıllı Şebekeler 2023 Vizyon ve Strateji Belirleme Raporu'na göre Akıllı Şebeke.....	5
Şekil 2.2. Akıllı Şebeke kavramsal modeli	6
Şekil 2.3. Akıllı Şebeke paydaşları ve işlevleri	8
Şekil 2.4. Akıllı Şebeke üzerine yapılan çalışmaların detaylı sınıflandırılması	9
Şekil 2.5. Dağıtık üretim sınıflandırması	11
Şekil 2.6. İletim, üretim ve iletim sistemleri arasındaki etkileşim.....	13
Şekil 2.7. Elektrikli araç bileşenleri ve şebeke bağlantıları.	16
Şekil 2.8. WSN düğüm mimarisi	18
Şekil 2.9. Akıllı Şebeke hiyerarşik mimarisinde kablosuz sensör ağı uygulaması....	19
Şekil 2.10. Virginia Tech'te oluşturulan ilk PMU seti	20
Şekil 2.11. Hızlı dinamik bir olay süresince PMU ölçümü ve SCADA verisinin karşılaştırılması	21
Şekil 2.12. Akıllı Şebeke bilgi ağları için mevcut sistemlerin mantıksal modeli	23
Şekil 2.13. Temel kablosuz örgü ağları yapısı	24
Şekil 2.14. Hücresel haberleşme yapısı.....	25
Şekil 2.15. 31 Mart 2020 tarihli Türkiye geneli saatlik enerji talep profili	30
Şekil 2.16. Ocak - Şubat 2020 tarihlerinde Türkiye geneli saatlik tüketim verisi (MWh).....	31
Şekil 2.17. Dünya genelinde farklı sektörlerdeki CO ₂ salınım miktarlarının yıllara göre değişimi.	32
Şekil 2.18. 2014 yılı Dünya geneli CO ₂ emisyon salınım oranlarının sektörlerle göre dağılımı.	33
Şekil 2.19. 2014 yılı Türkiye geneli CO ₂ emisyon salınım oranlarının sektöre göre dağılımı.	33
Şekil 2.20. 2009-2018 yılları arası Dünyadaki toplam yenilenebilir enerji üretim kapasitesi	38
Şekil 2.21. 2019 yılı enerji üretiminin kaynaklara göre dağılımı	40
Şekil 2.22. Türkiye Mart 2020 itibarıyla kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı (%)	41
Şekil 3.1. De Lorenzo firmasına ait akıllı şebeke deney seti genel görünümü	46
Şekil 3.2. Akıllı şebeke deney seti SCADA ekranı ana paneli	47
Şekil 3.3. Senkron ve asenkron jeneratörleri tahrik eden 1 kW gücünde 4000 d/dak fırçasız DC servomotor	47
Şekil 3.4. Servo motor sürücüsü kontrol paneli	48
Şekil 3.5. Deneylerde kullanılan senkron makine.....	48
Şekil 3.6. AC makine uyartım denetleyicisi.....	49
Şekil 3.7. Jeneratör senkronizasyon rölesi	49
Şekil 3.8. Senkron makine tak faz eşdeğer devresi	50
Şekil 3.9. Deneyde kullanılan asenkron makine	52

Şekil 3.10. Hatve açısı kontrol ekranı	53
Şekil 3.11. Termik santral ünitesi	54
Şekil 3.12. Şebeke bağlantılı evirici (1- Güneş paneli giriş terminali, 2- Çıkış gücü göstergesi, 3- Ada koruma göstergesi, 4- Şebeke terminali)	55
Şekil 3.13. Güneş paneli ve güneş simulatörü	56
Şekil 3.14. 100 km uzunluğundaki 380 kV, 1000 A iletim hattını temsil eden modül	57
Şekil 3.15. 360 km uzunluğundaki 380 kV, 1000 A iletim hattını temsil eden modül	57
Şekil 3.16. 100 km uzunluğundaki 380 kV, 1000 A iletim hattı devre şeması.....	58
Şekil 3.17. 360 km uzunluğundaki 380 kV, 1000 A iletim hattı devre şeması.....	58
Şekil 3.18. 3 fazlı trafo	59
Şekil 3.19. Omik, endüktif ve kapasitif yükler	60
Şekil 3.20. Kesici modülü	62
Şekil 3.21. Reaktif güç denetleyicisi.....	63
Şekil 3.22. Kapasitif bank modülü.....	63
Şekil 3.23. Anahtarlanabilir kapasitif bankların ve güç faktörü denetleyicisinin bağlantı şeması.....	64
Şekil 4.1. Senkron makine yüksüz çalışma deneyi	65
Şekil 4.2. Senkron jeneratörün farklı rotor hızlarında I_e - U_s grafiği	66
Şekil 4.3. Senkron jeneratörün şebekeye bağlanmasından önce ve sonra jeneratör ve şebeke durumu	67
Şekil 4.4. Rüzgar santrali hız ve hatve açısı kontrol birimi arayüzü.....	68
Şekil 4.5. Rüzgar türbini hatve açısına göre mekanik güç ve rotor dönüş hızı değişimi (rüzgar hızı 18,5 m/s)	69
Şekil 4.6. Rüzgar hızına göre mekanik güç ve şaft hızı (hatve açısı 45^0)	69
Şekil 4.7. Hatve açısına göre rüzgar türbinin mekanik, aktif, reaktif ve görünür güç değerleri (Rüzgar hızı = 18 m/s)	70
Şekil 4.8. Rüzgar türbini tork kontrolü arayüzü.....	71
Şekil 4.9. Torka göre güç aktif, reaktif ve görünür güç değerleri (Rüzgar hızı =18,5 m/s).....	71
Şekil 4.10. Torka göre güç faktörü ve şaft hızı (Rüzgar hızı = 18,5 m/s).....	72
Şekil 4.11. Fotovoltaik panel I-V ve P-V grafikleri.....	73
Şekil 4.12. Y-bağlı yükler	74
Şekil 4.13. Simulink omik, endüktif ve kapasitif yük anahtar modelleri.....	74
Şekil 4.14. Endüktif yükler anahtarlama bloğu iç gösterimi.....	75
Şekil 4.15. İletim hattı modeli.....	76
Şekil 4.16. Trafo blok parametreleri	76
Şekil 4.17. Termik santral modeli	77
Şekil 4.18. Termik santralin jeneratörünü temsil eden 3 fazlı güç kaynağına ait blok parametreleri	78
Şekil 4.19. Hidroelektrik santral modeli	79

Şekil 4.20. Hidroelektrik santralin jeneratörünü temsil eden asenkron makinenin blok parametreleri	79
Şekil 4.21. Rüzgar santrali modeli	80
Şekil 4.22. Rüzgar santralinin jeneratörünü temsil eden asenkron makinenin blok parametreleri	81
Şekil 4.23. Güneş paneli modeli	82
Şekil 4.24. Güneş paneli parametreleri	82
Şekil 4.25. Fotovoltaik sistem modeli.....	83
Şekil 4.26. Otomatik kompanzasyon bloğu ve ölçüm modülü	84
Şekil 4.27. Otomatik kompanzasyon bloğu iç yapısı	85
Şekil 4.28. Akıllı Şebeke tek hat şeması	86
Şekil 4.29. Akıllı şebeke sisteminin Simulink modeli	87
Şekil 4.30. Akıllı şebeke Simulink modeli ölçüm modülleri	88
Şekil 4.31. Senkron jeneratör boştaki çalışma durumu deney ve model karşılaştırması	89
Şekil 4.32. Asenkron jeneratör güç değerleri deney ve model karşılaştırması	90
Şekil 4.33. Güneş paneli I-V grafiği deney-model karşılaştırması	91
Şekil 4.34. Güneş paneli P-V grafiği deney-model karşılaştırması	92

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 1.1. Geleneksel şebeke ile akıllı şebekenin karşılaştırılması	1
Tablo 2.1. Türkiye iletim hat uzunluklarının kapasitelere göre dağılımı.....	13
Tablo 2.2. PLC ile diğer erişim teknolojilerinin karşılaştırılması.....	28
Tablo 2.3. Dünyada kaynaklara göre kurulu gücün ve bu kaynakların toplam üretimdeki payının tahmini	39
Tablo 2.4. Dünyada kaynaklara göre elektrik üretimi değişim tahmini ve enerji kaynağının toplam üretimdeki payı (TWh).....	39
Tablo 3.1. Senkron makine etiket değerleri (rotoru sargılı).....	50
Tablo 3.2. Asenkron makine etiket değerleri (sincap kafesli)	52
Tablo 3.3. Güneş paneli etiket değerleri (1000 W/m^2 ışıınım ve 25°C hücre sıcaklığı koşullarında).....	54
Tablo 3.4. Anahtar konumuna göre her faz için ölçülen direnç değerleri.....	60
Tablo 3.5. Anahtar konumuna göre her faz için ölçülen endüktans değerleri	61
Tablo 3.6. Anahtar konumuna göre her faz için ölçülen kapasitans değerleri	61
Tablo 4.1. Kompanzasyonda kullanılan kapasitörlerin etiket ve ölçülen değerleri ...	83
Tablo 4.2. Hatta bulunan endüktif reaktif güce karşılık aktif olan kapasitif banklar ve kompanzasyon bloğunun her kademedeki yük değeri	84
Tablo 4.3. Senkron jeneratör gerilim regülasyonu deney-model mutlak yüzde hata ortalaması	90
Tablo 4.4. İletim hatları kapasitanslarının ve tefonun şebekeye kalıcı etkisi (İH=iletim hattı paralel kapasitansları, 1: bağlı, 0: bağlı değil, P ve Q: CH2-AD10 üzerinde ölçülen güç değerleri)	92

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren, tavsiyeleri ile önümü aydınlatan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Sezai TAŞKIN’a, hayatım boyunca maddi ve manevi olarak destekleriyle hep yanımda olan anne ve babama, her zaman yanımda hissettiğim moral ve motivasyon kaynağım kıymetli eşime ve biricik oğluma gönülden teşekkür ederim.

Macit TOZAK
Manisa, 2020



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Bir Akıllı Şebeke Sisteminin Modellenmesi, Simülasyonu ve Deneysel Olarak Doğrulanması

Macit TOZAK

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Sezai TAŞKIN

Geçtiğimiz 15 yılda bilgi ve iletişim teknolojilerindeki hızlı gelişmelerin katkısıyla bir sistemi uzaktan izleme, yönetme, büyük veriyi işleyerek optimize etme, çeşitli hesaplamalı yöntemlerle sistem üzerindeki insan faktörünü en aza indirme ve bunlara benzer daha fazla işlemleri yapmak mümkün hale gelmiştir. Bu bağlamda, geleneksel elektrik şebekesi, yeniden yapılandırılarak bilgi ve iletişim teknolojilerinin güvenlik boyutu da ihmal edilmeden, yoğun olarak uygulandığı akıllı şebeke olarak ifade edilen yeni bir şebeke modeline dönüştürülmektedir. Bu yeni sistemle şebekenin uzaktan izlenebilmesi, müdahale edilmesi, onarılması, talep tarafı yönetiminin gerçekleştirilmesi, çift yönlü veri ve güç akışının sağlanması, enerjinin depolanması, elektrikli araçların şebekeye bağlanması, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve mikroşebekelerin etkin olarak kullanılması mümkün hale gelmektedir.

Bu tezde, 2018 yılında kurulan Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Akıllı Şebekeler Laboratuvarı'nda bulunan De Lorenzo firmasına ait Akıllı Şebeke deney setinin MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi, simülasyonu ve deneysel olarak doğrulanması gerçekleştirilmiştir.

Deney setinde birer adet hidroelektrik, rüzgâr, termik ve güneş enerjisi santrallerini temsil eden birimler bulunmaktadır. Hidroelektrik santral 0,8 kVA nominal güce sahip senkron jeneratör ile, rüzgâr enerjisi santrali bir adet 1,5 kW güce sahip sincap kafesli asenkron jeneratör ile, termik santral 3 fazlı güç kaynağı ile, güneş enerji santrali ise 90 Wp güç değerine sahip bir adet fotovoltaiik panel ile temsil

edilmektedir. Sistemde ayrıca her faz için 7 kademeli omik, kapasitif ve endüktif yükler bulunmaktadır. SCADA ekranında şebekeye ait veriler gözlemlenmekte, sisteme hem bu ekran üzerinden hem de el ile müdahale edilebilmektedir.

Bu çalışmada laboratuvar ölçeğindeki bir akıllı şebeke sistemine ait bütün bileşenler MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş, deneylerle bu modeller doğrulanmış ve sistemin benzetimi sanal ortamda da gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, MATLAB’da bir arayüz tasarlanmıştır. Jeneratör ve yüklerdeki değişimlere göre sistem verileri bu arayüzde gösterilmektedir. Böylece hem lisans hem de lisansüstü düzeyde akıllı şebekeler alanındaki eğitim ve araştırmalarda kullanılmak üzere çok bileşenli bir sistemin gerçek modeli ortaya konulmuştur. Böylece, test ortamından bağımsız çalışma imkanı sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler:(akıllı şebeke, sistem modellemesi, güç sistemi analizi,)

2020, 98 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Modelling, Simulation and Experimental Verification of a Smart Grid System

Macit TOZAK

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Electrical-Electronics Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Sezai TAŞKIN

With the contribution of rapid developments in information and communication technologies in the past 15 years, it has become possible to remotely monitor, manage, optimize and process big data, minimize the human factor on the system with various computational methods, and more. In this context, the traditional electricity grid is restructured and transformed into a new grid model, which is expressed as a smart grid where it is intensely applied, without neglecting the security aspect of information and communication technologies. With this new system, it is possible to remotely monitor, intervene and repair the electricity grid, perform demand-side management, provide bidirectional data and power flow, store energy, connect electric vehicles to the network, and use renewable energy sources and micro grids effectively.

In this thesis, modeling, simulation and experimental verification of the Smart Grid didactic system belonging to De Lorenzo company at Manisa Celal Bayar University Faculty of Engineering Electrical-Electronics Engineering Department Smart Grids Laboratory, which was established in 2018, was carried out.

There are units representing hydroelectric, wind, thermal and solar power plants in the experiment set. The hydroelectric power plant is represented with a synchronous generator which has a nominal power of 0.8 kVA, the wind power plant is represented with a squirrel cage asynchronous generator with a power of 1.5 kW, the thermal power plant is represented with a 3-phase power supply unit, and the solar power plant is represented with a photovoltaic panel which has 90 Wp power. The system also has 7-stage ohmic, capacitive and inductive loads for each phase.

Informations belong to smart grid units can be observed on the SCADA screen, the system can be intervened both on this screen and manually.

In this study, all components of a laboratory scale smart grid system are modeled in MATLAB / Simulink environment, these models are verified by experiments and the system is simulated in virtual environment. In addition, an interface is designed in the MATLAB environment. System data are displayed in this interface according to changes in generators and loads. Thus, the real model of a multi-component system has been introduced for use in education and research in the field of smart grids at both undergraduate and postgraduate levels.

Keywords:(smart grid, system modelling, power system analysis)

2020, 98 pages

1. GİRİŞ

Elektrik şebekesi elektriğin üretimi, iletimi, dağıtımı ve kontrolünden meydana gelen bir sistemdir. 19. yy. da merkezi üretim ve uzun hat boyunca yüksek gerilim ile tek yönlü iletim esasına göre tasarlanan alternatif akım elektrik şebekesi, günümüze kadar geçen sürede köklü yapısal değişikliklere uğramadan kullanılmıştır. Günümüzde bilgisayar ve ağ sistemlerindeki gelişmelerin meydana getirdiği avantajlarla birlikte artan enerji ihtiyacı, fosil yakıtlı enerji kaynaklarının çevresel etkilerinden dolayı yenilenebilir enerjiye olan talebin artması ve elektrikli araçların şebekeye dahil edilmesi gibi sebeplerden dolayı mevcut tek yönlü şebeke işleyişi yetersiz hale gelmeye başlamıştır. Bu durum akıllı şebeke kavramını gündeme getirmiştir.

Akıllı şebeke konseptinin temelindeki düşünce 1980’li yılların ortalarında Pasifik Kuzeybatı Ulusal Laboratuvarında (PNNL) ortaya çıkmıştır. Burada yapılan çalışmalarda, 1000’den fazla binadaki her bir cihazın harcadığı enerji gerçek zamanlı izlenmiş ve veri toplama sistemi oluşturulmuştur [1]. Elde edilen verilerin işlenmesi ile mevcut geleneksel sistemin işlevselliğini arttırmaya yönelik çalışmalar artarak devam etmiştir.

Akıllı şebekenin geleneksel şebekeye göre birçok üstünlüğü vardır. Bunlar Tablo 1.1’de açıklanmıştır [2].

Tablo 1.1. Geleneksel şebeke ile akıllı şebekenin karşılaştırılması

Geleneksel şebeke	Akıllı Şebeke
Elektromekanik	Dijital
Tek yönlü haberleşme	Çift yönlü haberleşme
Merkezi üretim ile tek yönlü güç akışı	Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak dağıtık üretim gerçekleştirilebilir. Bir birim hem üretici hem de tüketici olabilir
Hiyerarşik yapılıdır	Ağ yapılıdır
Az sayıda sensör içerir	Çok sayıda sensör içerir
Kendini izleyemez ve denetleyemez	Kendini izleyebilir ve denetleyebilir
Sisteme el ile müdahale edilir	Sistem kendi kendine müdahale edebilir
Arıza ve kesintiler bulunduğu bölgeden daha fazla alanı etkiler	Arızalar şebekenin geri kalanından soyutlanır ve sadece bulunduğu bölgeyi etkiler
El ile kontrol ve test yapılır	Uzaktan kontrol ve test yapılır
Sınırlı kontrol	Geniş alana nüfuz eden kontrol
Müşteri için az seçenek mevcuttur	Müşteri için çok seçenek mevcuttur

1.1. Literatür Taraması

Ordys ve ark. (1994) tarafından yapılan çalışmada kojenerasyon santralleri temelinde büyük ölçekli güç üretim tesislerinin modellenmesi ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Gaz türbini, buhar türbini, buhar kazanı, yoğunlaşma ve su besleme ünitesi gibi birimler modellenmiş, kontrol stratejileri gösterilmiş ve Easy5x, Matrixx ve Simulink gibi programlarla simülasyon çalışmaları yapılmıştır [3].

Oğuz (2007) çalışmasında, 300 kW'lık rüzgar enerji santrali ile 400 kW'lık doğalgaz santralinden oluşan hibrid sistemi MATLAB/Simulink ortamında modellemiş, analizini yapmış ve işletme çıkış değerlerini istenilen düzeye getirmek amacıyla Adaptif Neuro-Fuzzy Çıkarım Kontrolörü (ANFÇK) kullanarak sistem iyileştirmesini gerçekleştirmiştir [4].

Chen ve ark. (2008), yenilenebilir enerji tabanlı hibrit bir sistem tasarlamışlardır. Rüzgar ve güneş enerjilerinin yanında her koşulda sistem performansını garantilemek için ultrakapasitör ve yakıt hücresi kullanmışlardır. Yükte, rüzgar hızında ve ortam sıcaklığındaki ani değişimlerde sistemin kabul edilebilir aralıklarda çalıştığı MATLAB/Simulink ortamında gösterilmiştir [5].

Lu ve ark. (2010), laboratuvar ortamında oluşturulan tasarım ve protokolleri test etmek amacıyla bir akıllı şebeke test düzeneği oluşturmuşlardır. Tasarlanan sistem; akıllı güç anahtarları, yenilenebilir enerji içeren güç kaynağı, haberleşme ağı ve güç ölçerlerden oluşturulmuş olup deneysel olarak doğrulanmıştır [6].

Dumitru ve ark. (2010), MATLAB/Simulink ile güneş, rüzgar ve hidroelektrik santrallerinden oluşan hibrit bir sistemin modellenmesini, simülasyonunu ve analizini yapmışlardır [7].

Salehi ve ark. (2012), laboratuvar ortamında bir akıllı güç sistemi oluşturmuşlardır. İki kısımdan oluşan çalışmanın ilk bölümünde, sistemin donanımı tasarlanmıştır. Bu kısımda 36 kW'lık yenilenebilir enerji kaynağı, 72 kW güce sahip depolama birimleri, iletim hatları, bara modeli, senkronizasyon birimi, dinamik yük modeli ve haberleşme altyapısıyla birlikte laboratuvar ölçekli bir akıllı şebeke sistemi oluşturulmuştur [8]. İkinci kısımda ise sistemin kontrolü, bilgisayarda izlenmesi ve

korunması gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda, National Instruments(NI) firmasına ait veri toplama kartları ile sistemin parametreleri elde edilmiş, LabVIEW™ yazılımıyla gerçek zamanlı izleme yapılmıştır [9].

Rohjans ve ark. (2014) akıllı şebeke için simülasyon yöntem ve araçlarını ifade etmişlerdir. Simülasyon araçlarını, Tekli Simülasyon Yaklaşımı (tek bir simülasyon aracının kullanılması ile çok alana etki eden simülatörler) ve Eş Simülasyon Yaklaşımı (birkaç simülasyon ortamının birleştirilmesi) olmak üzere iki katagoride incelemişlerdir. İlk kategoriye GridLab-D (açık kaynaklı bir güç dağıtım sistemi simülasyonu ve analiz aracı), HOMER (şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı güç sistemlerinin farklı tasarımlarını değerlendirme aracı), IDAPS (Akıllı Dağıtılmış Özerk Güç Sistemi), The ILIAs ve IPSYS (yenilenebilir enerji kaynakları yoğunluklu mikroşebekeyi analiz atme aracı) gibi araçlar örnek olarak verilmiştir. İkinci kategoriye ise EPOCHS (Elektrik Enerjisi ile Haberleşmeyi Senkronize Edici Simülatör), GEKO (Global Olay Odaklı Eş-simülasyon), ADEVS (Ayrık Olay Sistemi Simülatörü), PowerNet (ns-2 ve Modelica'nın ortak çalıştığı simülatör) ve VPNET (Güç sistemi yönü VTB ile, haberleşme yönü ise ns-2 ile gerçekleştirilmiştir) gibi simülasyon yaklaşımları örnek olarak verilmiştir [10].

Çakıl ve ark. (2015), MATLAB/Simulink ile Keban Barajından Elazığ'a giden iletim hattının modellemesini ve sayısal analizini yapmışlardır. 1083 MVA kurulu güce sahip olan sistemin harcadığı yıllık aktif güç 1883 MWh, reaktif güç ise 188 MVarh olup 1243 km ve 657 km uzunluğa sahip iki adet iletim hattı içermektedir. Bu model ile sistemin geçici durum analizi, hata analizi, yük akış analizi yapılmış olup baralardaki akım ve gerilim değerleri, kısa devre akımı ve nötr akımları analiz edilmiştir [11].

Ayvazoğluüksel ve ark. (2015), MATLAB/Simulink ortamında bir akıllı şebeke modeli oluşturmuşlardır. Bu sistemde yardımcı enerji kaynağı olarak güneş panelleri kullanılmış olup şebeke ile binalar arasında çift yönlü yük akışı olacak şekilde bir model oluşturulmuştur [12].

Bonaiuto ve ark. (2017), bir akıllı şebeke ortamında enerji depolama alanı olarak kullanılan elektrikli araç park yerinin davranışını analiz etmek için MATLAB/Simulink ile bir model oluşturmuşlardır [13].

1.2. Tezin Amacı

Bu çalışmada termik, hidroelektrik, rüzgâr ve güneş enerji santrallerinden oluşan 4 farklı enerji kaynağını barındıran De Lorenzo Akıllı Şebekeler deney setinin MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi, simülasyonu ve gerçek verilerle modelin doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Deney setinin her elemanı, Simulink ortamında bir blok haline getirilip karakteristiklerinin deney setine bağlı kalmadan MATLAB/Simulink üzerinden izlenebilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, MATLAB’da bir arayüz oluşturulmuştur. Buradan, sistem girdilerine karşılık sisteme ait veriler izlenebilmektedir.

Çalışma sonucunda ortaya çıkan model ile 4 farklı enerji kaynağının eş zamanlı ve verimli şekilde devreye alınması sağlanmaktadır. Ortaya çıkan ölçekli model ile daha büyük güçlü akıllı şebeke sisteminin geliştirilmesi, kontrolü alanlarında kullanılabilecek bir altyapı oluşturulmuştur. Ayrıca, lisans/lisansüstü düzeyde fiziksel sisteme bağlı kalmadan akıllı şebekeler alanında çalışacak araştırmacılar için sanal deney ortamı oluşturulmuştur. Örneğin, bu model üzerinde daha ileriki aşamalarda çeşitli optimizasyon teknikleri denenebilecektir.

Mevcut deney setinin modellendiği benzer bir çalışmaya rastlanmamış olup bu bakımdan çalışmanın özgünlüğü bulunmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

Çalışmanın bu bölümünde akıllı şebekenin bileşenleri detaylı olarak açıklanmış, ülkemizde ve dünyada bu konuyla ilgili gelişmeler ele alınmıştır.

2.1. Akıllı Şebeke ve Bileşenleri

Akıllı şebeke konsepti ilk olarak gelişmiş ölçüm altyapısı fikri ile talep yönetimini, enerji verimliliğini ve doğal afet – sabotajlar gibi durumlar karşısında kendi kendini iyileştirerek arz güvenilirliğini artırmak amacıyla ortaya çıkmıştır. Bu temel üzerinde yeni gelişmelerle başlangıçtaki hedefini aşmış ve elektrik endüstrisini yeniden şekillendirme aracı olmuştur [14].

Akıllı şebeke kavramı için birçok farklı tanımlamalar yapılmıştır. Bu tanımların her biri akıllı şebekenin kavramsal altyapısını oluşturması bakımından değerlidir. Buna göre, akıllı şebekenin bir tanımı şöyledir; elektriğin üretimi, iletimi, dağıtımı ve son kullanıcı tarafından kullanılmasına kadar her aşamada bilgiyi, iki yönlü siber güvenli haberleşme teknolojilerini ve hesapsal zekayı bütünleşik bir şekilde kullanarak oluşturulan temiz, sürdürülebilir, esnek, güvenilir ve dayanıklı bir elektrik şebeke sistemidir [15], [16]. Bir diğer tanım, Türkiye Akıllı Şebekeler 2023 Vizyon ve Strateji Belirleme Projesi Özet Raporuna göre [17] akıllı şebeke; geleneksel elektrik üretim santrallerinin, iletim ve dağıtım hatlarının, enerji depolama birimlerinin, yenilenebilir enerji kaynaklarının, talep tarafı yönetiminin ortak bilgi ve haberleşme teknolojileri altyapısıyla birlikte oluşturulan elektrik şebekesi olup

Şekil 2.1’deki gibi bir formülle ifade edilmiştir.

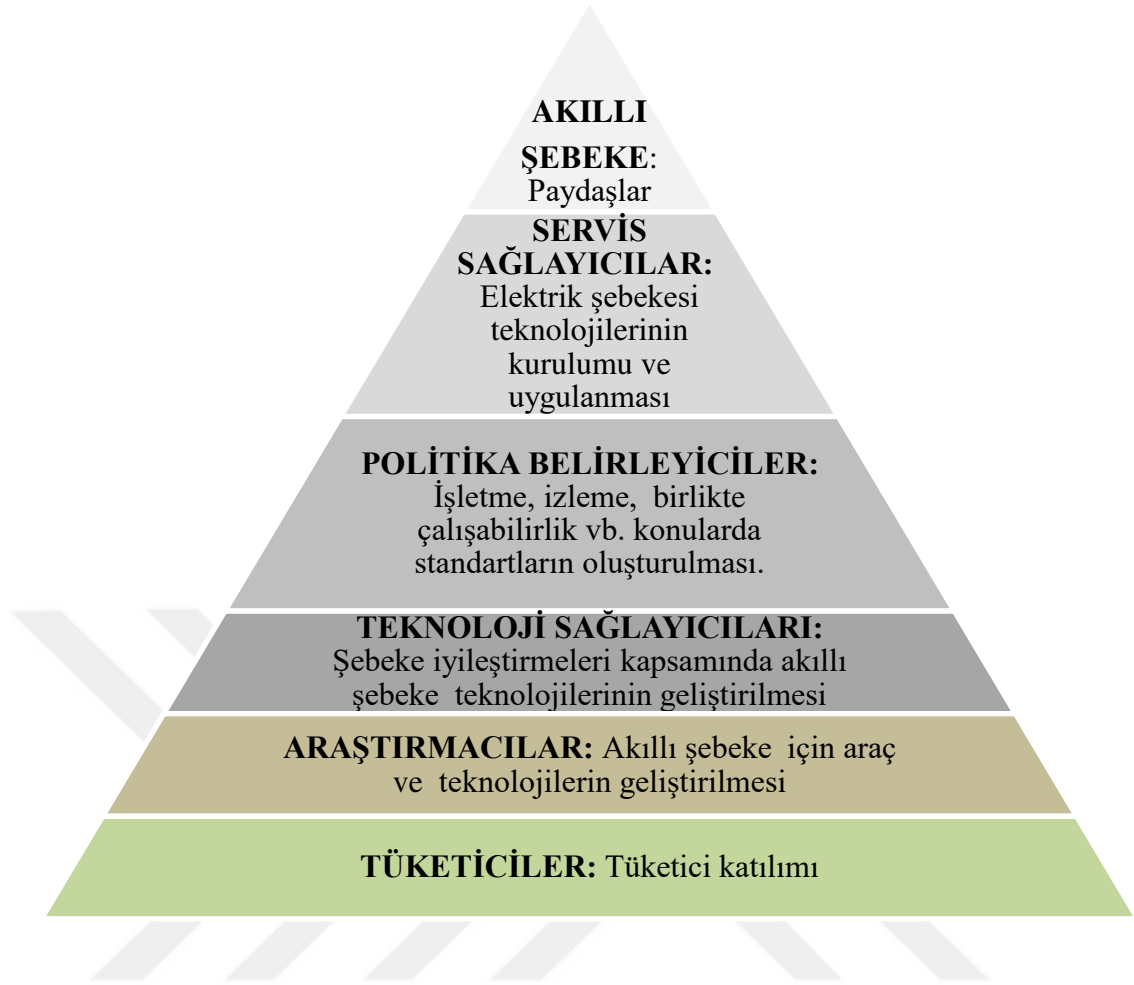
$$\int_{\substack{t \rightarrow 0 \\ i \rightarrow \infty}}^{ICT} (\text{Geleneksel Üretim} + \text{İletim} + \text{Dağıtım} + \text{Depolama} + \text{Yenilenebilir Üretim} \\ + \text{Üreten Tüketiciler} + \text{Yeni Yük Tipleri})$$

Şekil 2.1. Türkiye Akıllı Şebekeler 2023 Vizyon ve Strateji Belirleme Raporu’na göre Akıllı Şebeke

Amerikan Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST) tarafından oluşturulan akıllı şebeke kavramsal modeli oldukça popülerdir. Üretim, iletim,

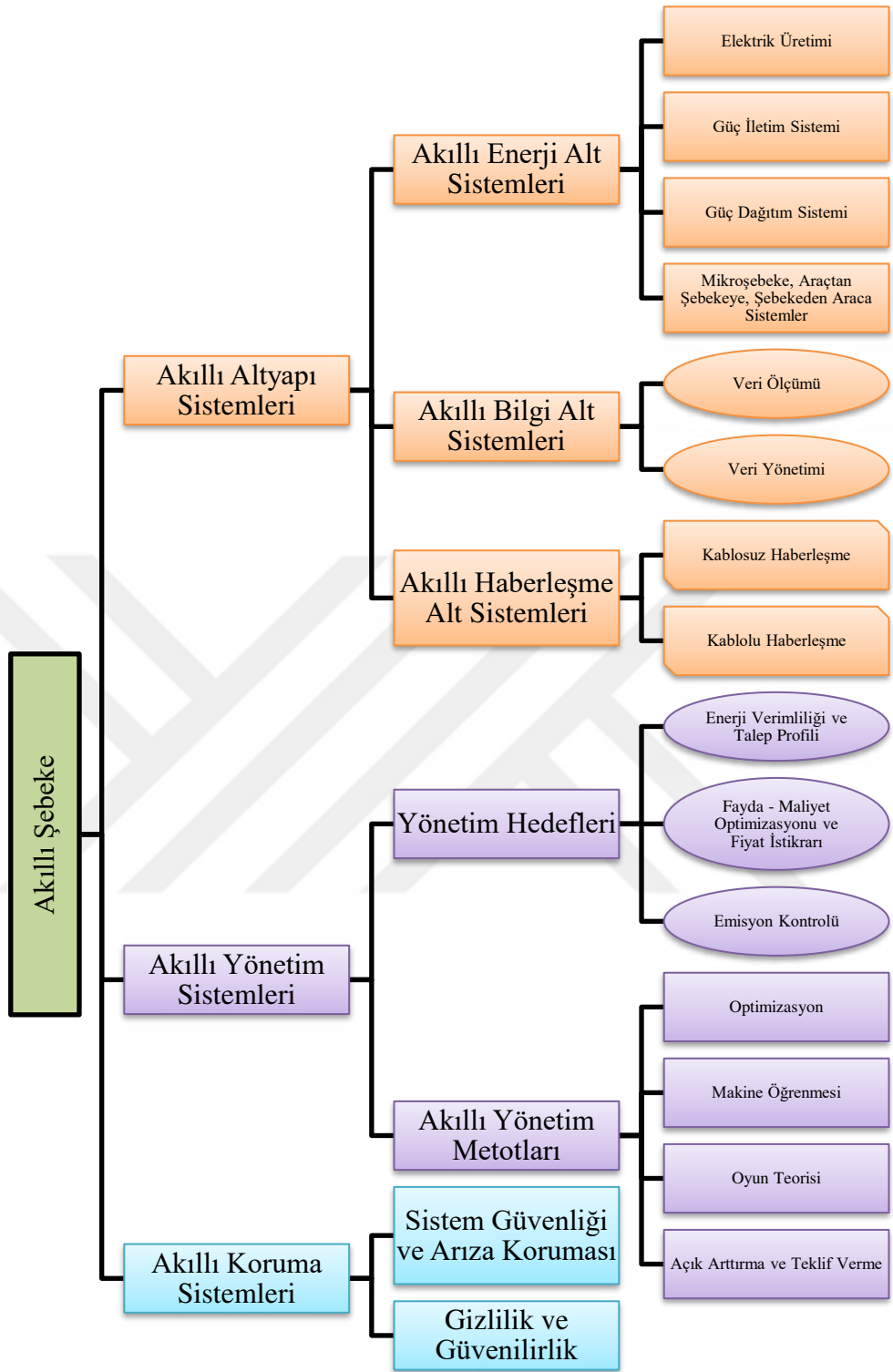
- Mevcut elektrik şebekesinin kapasitesinin ve verimliliğinin artması;
- Arızalara karşı dayanıklılığın artması;
- Sistemin bozucu karşı etkilere kendi kendini iyileştiren tepkiler vermesine ve kestirimci bakıma olanak sağlaması;
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasının önünün açılması;
- Şebekenin dağıtık güç kaynaklarına uyum sağlaması;
- Bakım ve operasyonun otomatikleşmesi;
- Elektrikli araçlar ve yeni güç kaynakları ile sera gazı emisyonlarının azalması;
- Şebekenin daha güvenli hale gelmesi;
- Şarjlı elektrikli araçlara ve yeni enerji depolama seçeneklerine geçişin sağlanması;
- Müşteriye daha fazla seçenek sunulması;
- Yeni ürünler, hizmetler ve pazarların ortaya çıkması.

Bir akıllı şebeke ekosistemi çok farklı katmandan oluşmaktadır. Şekil 2.3'te bu katmanlar gösterilmiştir [1]. Buna göre en altta sisteme aktif bir şekilde dahil olan tüketiciler bulunmaktadır. Onun üzerindeki araştırmacılar sürekli araştırma ve geliştirme çalışmalarıyla sorunlara yeni çözümler üretmekte ve iyileştirmeler yapmaktadırlar. Teknoloji sağlayıcıları bu çalışmaları ürün haline getirmektedirler. Politika belirleyicileri ise bu ürünleri, ölçme, izleme, operasyon gibi çeşitli alanlarda kullanılmasına karar vermektedirler. En üstteki akıllı şebeke paydaşları ise elektriğin üretim, iletim ve dağıtımını sağlamaktadırlar.



Şekil 2.3. Akıllı Şebeke paydaşları ve işlevleri

Fang ve ark., akıllı şebeke sistemini 3 aşamada ele almışlardır. Bunlar; akıllı altyapı sistemleri, akıllı yönetim sistemleri ve akıllı koruma sistemleridir. Akıllı şebeke üzerine yapılan çalışmaların alt başlıkları Şekil 2.4'te ayrıntılı olarak belirtilmiştir [16].



Şekil 2.4. Akıllı Şebeke üzerine yapılan çalışmaların detaylı sınıflandırılması

2.1.1. Akıllı Altyapı Sistemleri

Akıllı şebeke altyapı sistemleri, akıllı enerji, bilgi ve haberleşme alt sistemleri olmak üzere 3 kısımdan oluşmaktadır.

2.1.1.1. Akıllı Enerji Alt Sistemleri

Geleneksel şebekede merkezi üretim santrallerinden elde edilen güç, iletim kayıplarını azaltmak için yükseltici trafolar yardımıyla yükseltilerek iletim hattına verilir. Daha sonra, yükseltilen gerilim, düşürücü trafolar ile dağıtım şebekesi için belirlenen gerilim seviyesine düşürülür. Ancak akıllı şebekede elektrik üretimi ve elektrik akış şekli farklıdır. Dağıtık üretim yöntemiyle sadece iletim seviyesinden değil aynı zamanda dağıtım seviyesinden de üretilen elektrik şebekeye verilebilir. Dahası bir müşteri sadece kullanıcı değil hem kullanıcı hem üretici olabilmektedir [16].

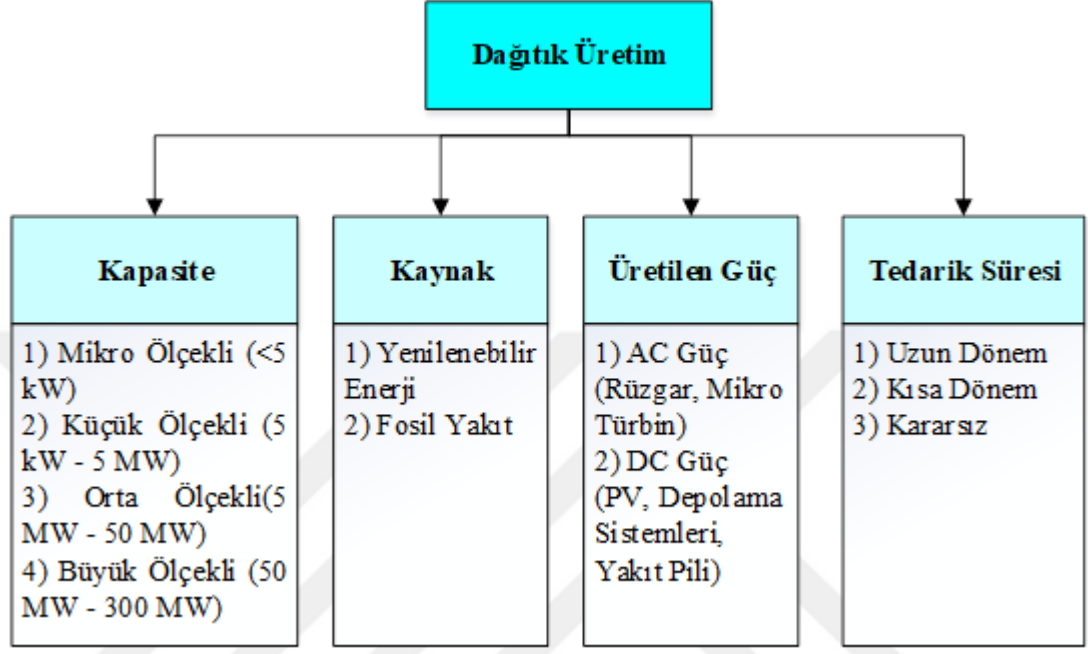
Bir güç sisteminin işleyişinin sürdürülebilirliği ve verimliliği için frekans ve yük kontrolü gerekmektedir. Bir şebekeden beklenenler: anlık yük taleplerini karşılayabilmesi, aşırı yüklenmiş bir sistem bileşeninin olmaması, aktif ve reaktif güç dengesinin sağlanması, frekansın ve bara geriliminin anma değerlerinde sabit kalmasıdır [19]. EPDK'nın Elektrik Şebeke Yönetmeliğine göre [20], hedeflenen işletme frekansı 49,8 Hz ile 50,2 Hz aralığı olmakla birlikte kabul edilebilir değerler 49,5 Hz ile 50,5 Hz aralığıdır. Şebekenin bu kriterler dikkate alınarak kontrolü sağlanmalıdır. Akıllı şebeke enerji sistemi faaliyetleri dağıtık üretim, dinamik fiyatlandırma, elektrikli araçlar gibi birçok bozucu etkiye rağmen üretimden son kullanıcıya bu hassas dengenin korunması için gösterilen çabalardan ibarettir.

Burada, enerji alt sistemleri başlığı altında akıllı şebekede elektriğin üretimi, iletimi, dağıtımı, mikroşebeke yapısı ve elektrikli araçların şebekedeki rolü konuları ele alınacaktır.

2.1.1.1.1. Elektrik Üretimi

Geleneksel şebekede elektrik büyük güçlü santrallerde üretilip tek yönlü iletilmekteyken, akıllı şebekede küçük ölçekli tüketici-üretici birlikte olan birimlerin devreye girmesiyle çift yönlü güç akışı sağlanmaktadır. Akıllı şebekenin en önemli özelliklerinden biri hidroelektrik, rüzgâr, güneş, jeotermal ve biyogaz gibi yenilenebilir ile kömür, nükleer ve doğalgaz gibi yenilenebilir olmayan çok çeşitli kaynakların elektrik üretiminde sistemde herhangi bir aksama olmadan kullanılmasının sağlanmasıdır. Akıllı üretim ile tüm bu kaynak çeşitliliği içinde kaynakları optimum düzeyde kullanarak şebekenin frekans, gerilim ve güç faktörü değerlerinin standartlara uygun olarak elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Dağıtık Üretim (Distributed Generation), yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla temiz ve yerli enerjinin elde edilmesi açısından hususi önem arz etmektedir. Şekil 2.5'te, Dağıtık Üretim, kapasite, enerji kaynağı, üretilen güç ve tedarik süresi ölçütlerine göre sınıflandırılmıştır [21].



Şekil 2.5. Dağıtık üretim sınıflandırması

Genellikle 300 MW altı küçük üretim tesislerinden oluşan bu yapılar şebekeye alçak-orta gerilim seviyesinden bağlanırlar ya da şebekeden ayrı mikroşebeke olarak bulunurlar. Yerinde üretim olarak faaliyet gösterdiklerinden iletim hat kayıpları minimum düzeydedir. Enterkonnekte sisteme bağlı olmayan alanlarda, elektrik arz maliyeti yüksek yerlerde ve işletmelerde enerji tedarikini sağlamak ve maliyeti azaltmak için uygulanmaktadırlar.

Dağıtık üretim merkezlerinde AC güç kaynağı yaygın olarak rüzgar enerjisi veya fosil yakıtlı mikro türbin kullanılır. DC güç ise güneş enerjisi, depolama sistemleri ve yakıt pillerinden elde edilir. Proton değişim membranlı yakıt hücresi (PEMFC), alkalın yakıt hücresi (AFC), fosforik asit yakıt hücresi (PAFC), katı oksit yakıt hücresi (SOFC) ve erimiş karbonat yakıt hücresi (MCFC) gibi çeşitli yakıt hücreleri DC enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Volan, süperiletken manyetik depolama enerji depolama teknolojileri, basınçlı hava ile enerji depolama gibi çeşitli

mekanik, elektrik veya kimyasal özelliklere sahip depolama sistemleri dağıtık üretimde yer alabilmektedir [22].

2.1.1.1.2. Güç İletim Sistemi

Akıllı iletim sistemi birbiriyle etkileşimli 3 adet bileşenden oluşan entegre bir sistemdir. Bunlar; akıllı kontrol merkezleri, akıllı iletim ağları ve akıllı trafo merkezleridir. Geleneksel iletim sisteminden farklı olarak akıllı iletim sisteminin özellikleri dijital, esnek, dayanıklı, sürdürülebilir ve özelleştirilebilir olmasıdır [23].

Akıllı kontrol merkezlerinin işlevleri şunlardır:

- Gerçek zamanlı/öngörücü modelleme ve güvenlik analizi,
- Proaktif/uyarlanabilir koruma,
- İşletmeciler ve piyasa için özel bilgi sağlama.

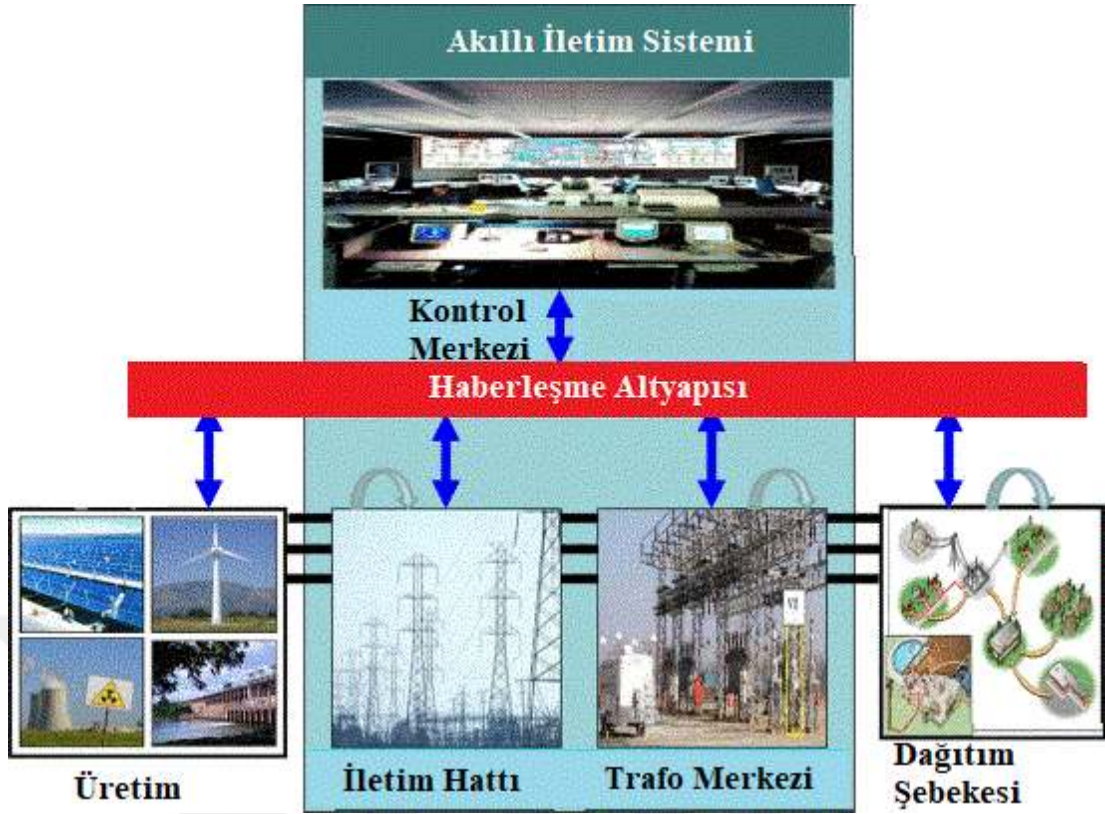
Akıllı iletim ağları ile şunlar amaçlanır;

- Tesis bakımı,
- Gelişmiş güç elektroniği ekipmanları ile esnek kontrol,
- Yüksek verimlilikte/kalitede iletim.

Akıllı trafo merkezleri ile şunlar yapılır;

- Otonom kontrol,
- Adaptif kontrol,
- Yenilenebilir kaynaklara entegre olarak çalışma,
- Talep tarafı yönetimi.

Akıllı iletim sistemi Şekil 2.6'daki gibi kontrol merkezi haberleşme altyapısı üzerinden kendi içerisindeki iletim hatları, trafo merkezleri, üretim birimleri ve dağıtım şebekesiyle sürekli haberleşme ve etkileşim halindedir [23].



Şekil 2.6. İletim, üretim ve iletim sistemleri arasındaki etkileşim

Elektrik iletimi çeşitli gerilim seviyelerinde yapılmaktadır. Ülkemizde mevcut iletim hat gerilimleri 380 kV, 220 kV, 154 kV ve 66 kV olup Tablo 2.1’de buna ilişkin detaylar sunulmuştur [24].

Tablo 2.1. Türkiye iletim hat uzunluklarının kapasitelere göre dağılımı

Türkiye İletim Hat Uzunlukları					
Yıl	380 kV	220 kV	154 kV	66 kV	Toplam
2018	23248,8 km	84,8 km	44760,5 km	109,7 km	68203,8 km

2.1.1.1.3. Güç Dağıtım Sistemi

Dağıtım sistemi, elektriğin müşteriye ulaştırılmasındaki son aşamadır. Dağıtım şebekesinin amacı, üretilen elektriği son kullanıcıya temiz, doğru frekans ve gerilimde sunmaktır. Bundan dolayı dağıtım şebekesi;

- Sabit frekans,
- Sabit gerilim,
- Faz kayması olmaması,

- Sürdürülebilir maliyet koşullarını sağlamalıdır.

Geleneksel şebekede bu kısımda tek yönlü güç akışı var iken, akıllı şebekede dağıtık üretim kaynaklarının her seviyede dağıtım sisteminden şebekeye bağlanabildiğinden çift yönlü yük akışı vardır. Bu durumda, müşteriler aynı zamanda üretici olabilmektedir.

Dağıtım sisteminden şebekeye entegre edilecek olan üretim birimleri için bazı analizler gerçekleştirilmelidir. Bunlar yük akış analizi, kısa devre, harmonik ve fliker analizi, dinamik analizler, topraklama analizi, yalıtım koordinasyonu analizi gibi analizlerdir. Ayrıca, bu analizler üretim sistemi ve hat mesafesi gibi kriterlere göre değişiklik gösterebilmektedir [25]. Bir yenilenebilir enerji kaynağının şebeke bağlantısındaki en önemli parametre, bağlantı noktasındaki kısa devre güç değeridir. Kapasitör banklar vb. gibi genel sistem esnekleştirmelerinin sağlanmadığı durumlarda bu kısıttan dolayı çok daha az güçte yenilenebilir enerji kaynağı şebekeye bağlanabilmektedir.

2.1.1.1.4. Mikroşebeke, Araçtan Şebekeye, Şebekeden Araca Sistemler

Mikroşebeke dağıtık üretim ile birlikte ortaya çıkmış olup, kendi içerisinde üretim, yük ve depolama birimlerini barındıran bir sistemdir. Mikroşebekede rüzgâr, güneş, biyokütle, yakıt hücreleri, küçük ölçekli gaz, hidroelektrik ve dizel jeneratörler gibi çok farklı enerji kaynakları birlikte veya tek başına kullanılabilir. Bir mikroşebeke ana şebekeye bağlı olarak veya tamamen izole halde bulunabilir.

Mikroşebekenin uygulama alanları şunlardır [26]:

- Askeri birlikler
- Şehir şebekeleri ve kırsal besleyici hatlar
- Endüstriyel alanlar
- Yerleşkeler
- Tarımsal bölgeler ve orman arazileri
- Şebekeye uzak olan yerleşim yerleri

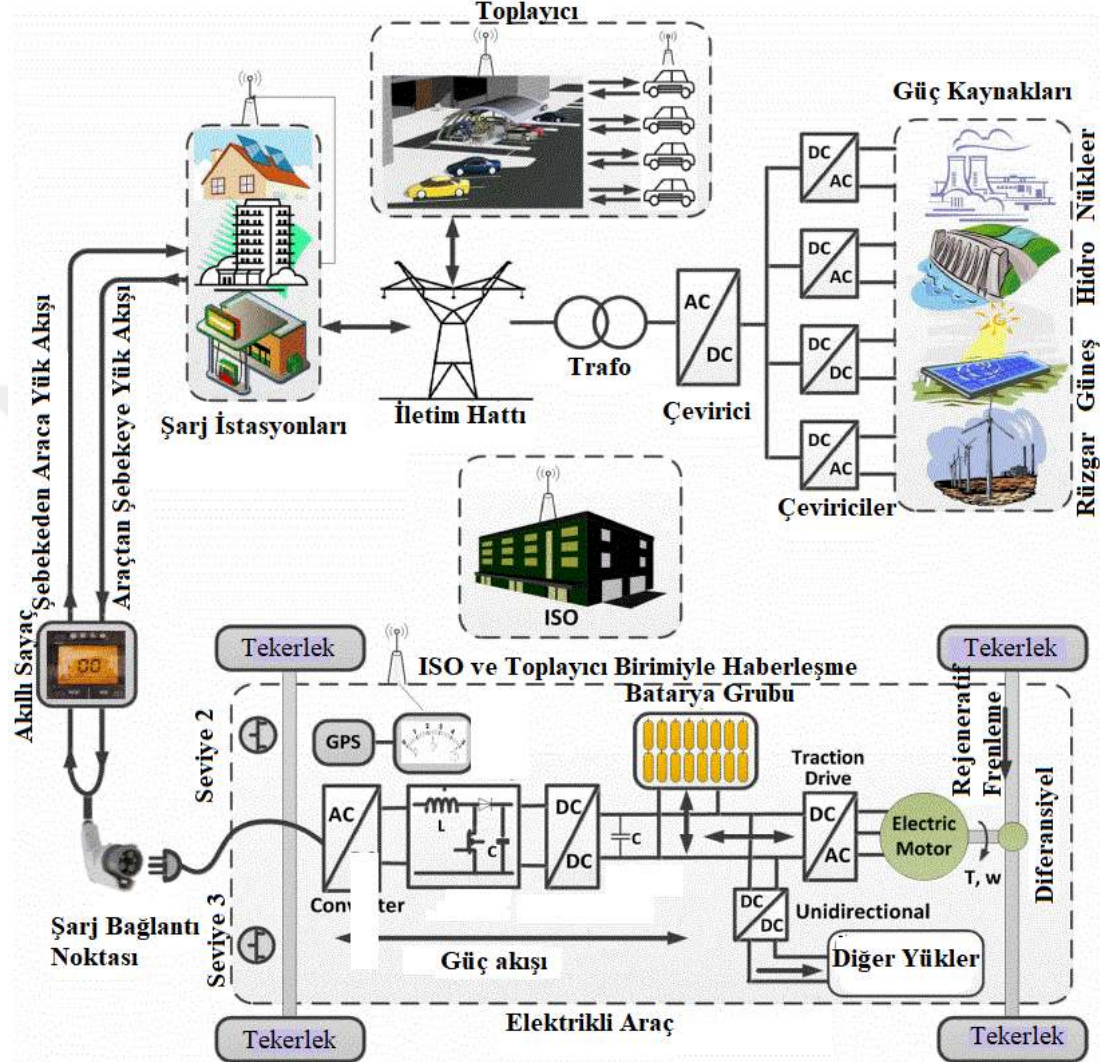
Mikroşebekede kaliteli besleme yapılabilmesi için yüklerin dağıtık enerji kaynakları tarafından en uygun şekilde paylaşılması, uygun büyüklükte enerji depolama ünitelerinin bulunması gereklidir [27].

Elektrikli araçlar çevre kirliliğini azaltıcı katkısından ve yakıt giderlerinin daha az olmasından dolayı giderek yaygınlaşmaktadır. Çin dünyada en fazla elektrikli aracın bulunduğu ülke olup onu Avrupa ülkeleri ve ABD takip etmektedir. 2018 yılı sonu itibarıyla dünyada 5 milyonun üzerinde elektrikli araç bulunmaktadır. Bu rakamın 2030 yılında 250 milyonuna geçeceği tahmin edilmektedir [28]. Ancak bu alanda batarya maliyeti, şarj süresi ve etkin menzil gibi bazı konularda teknolojik yeniliklere ihtiyaç duyulmaktadır.

Elektrikli araçların Hibrit Elektrikli Araç (HEV), Şarjlı Hibrit Elektrikli Araç (PHEV), Bataryalı Elektrikli Araç (BEV) ve Yakıt Hücresel Elektrikli Araç (FCEV) gibi çeşitleri vardır. İçerisinde hem elektrik motorunu hem de içten yanmalı motoru bulunduran HEV’lerde, dışarıdan şarj mümkün değildir. Araç kendi içerisinde dönme hareketinden ve rejeneratif frenlemeden elde ettiği enerjiyi küçük bir bataryada depolar ve kalkış esnasında kullanır. PHEV’lerde de HEV’de olduğu gibi iki adet motor vardır ancak araç dışarıdan şarj edilebilir. Bunlarda elektrik enerjisi daha uzun süre kullanılır. BEV’lerde ise yalnızca elektrik enerjisi kullanılır. Bu tür araçlarda aracın menzili ve şarj süresi önemlidir. FCEV’de yakıt hücresi ile elde edilen elektrik enerjisi kullanılır. Bunların avantajı içten yanmalı motora sahip araçlarda olduğu gibi kısa sürede depoyu doldurup harekete geçebilme imkânı olmasıdır. Genellikle yakıt olarak hidrojen kullanılır. Depodaki hidrojen ile oksijenin birleşiminden elektrik enerjisi elde edilir ve açığa su çıkar. Dezavantajı ise saf hidrojeni elde etme maliyetinin yüksek olması ve hidrojenle işlem yapmanın tehlikeli olmasıdır.

Elektrikli araçlarda şebekeden araca (G2V) ve araçtan şebekeye (V2G) çift yönlü güç akışı olabilmektedir. Bundan dolayı hem yük hem kaynak davranışı gösterebilmektedir. Şebekeden gelen alternatif akım önce doğrultucu ile doğrultulup sonra çevirici ile istenilen düzeye getirilir ve DC olarak bataryada depolanır.

Bataryadaki enerji kullanılmak istendiğinde bir evirici ile elde edilen AC güç motora verilir ve hareket sağlanır. Elektrikli aracın iç bağlantı diyagramı ve şebeke bağlantıları Şekil 2.7’de verilmiştir [29].



Şekil 2.7. Elektrikli araç bileşenleri ve şebeke bağlantıları.

Elektrikli araçlarda, araçtan şebekeye güç akışı ile şebeke için yeni bir depolama alanı ve puant yük zamanları için kaynak oluşmaktadır. Bu durum günün çoğu saatlerini şarj istasyonunun olduğu otoparklarda geçiren araçlar için geçerlidir. Park halindeki araç şebekeye bağlandığında şebeke ile haberleşme ağı üzerinden bağlantı kurar ve puant yük zamanında şebeke araçtan daha yüksek ücretle elektrik satın alır. Aracın bataryası daha sonra talebin az olduğu saatlerde daha az ücret karşılığında tekrardan şarj edilir. Bütün bu sistemin kullanıcıyı da mağdur etmeden yönetilmesi

için bu alanda yapılan çalışmalar sonucunda elde edilecek somut bir kontrol algoritmasının oluşturması oldukça önemlidir. Çünkü, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının sabit bir kaynak olmaması ve buna karşılık piyasada negatif fiyatlanmanın olmaması için rezerv kapasitesinin oluşturulması gerekliliği böylece kazan-kazan ilişkisi çerçevesinde çok daha ucuz bir maliyetle gerçekleştirilebilecektir.

2.1.1.2. Akıllı Bilgi Alt Sistemleri

Akıllı şebeke dönüşümünün kaynağı yalnızca güç elemanlarındaki gelişmeler değildir. Bunun yanında, belki çok daha önemli olan bilgi teknolojilerindeki gelişmelerdir. Merkezi operasyon biriminden dağıtım ve iletim şebekelerini bilgisayarda gözleme, analiz, iyileştirme ve kontrol edebilme konusunda elde edilen teknolojiler akıllı şebekeye yön vermiştir. Akıllı bilgi alt sistemleri, akıllı şebekede verinin elde edilmesi, modellenmesi, bütünleştirilmesi, analizi ve optimizasyonu için kullanılır. Akıllı şebeke dağıtım otomasyonunun temelinde verinin ölçüm ve yönetimini içeren akıllı bilgi alt sistemleri mevcuttur [16].

Akıllı bilgi alt sistemlerinde sensörlerden, akıllı sayaçlardan ve fazör ölçüm birimlerinden elde edilen bilgiler; verilerin yönetimi, modellenmesi, analizi ve optimizasyonu gibi işlemler için kullanılmaktadır.

2.1.1.2.1. Veri Ölçümü

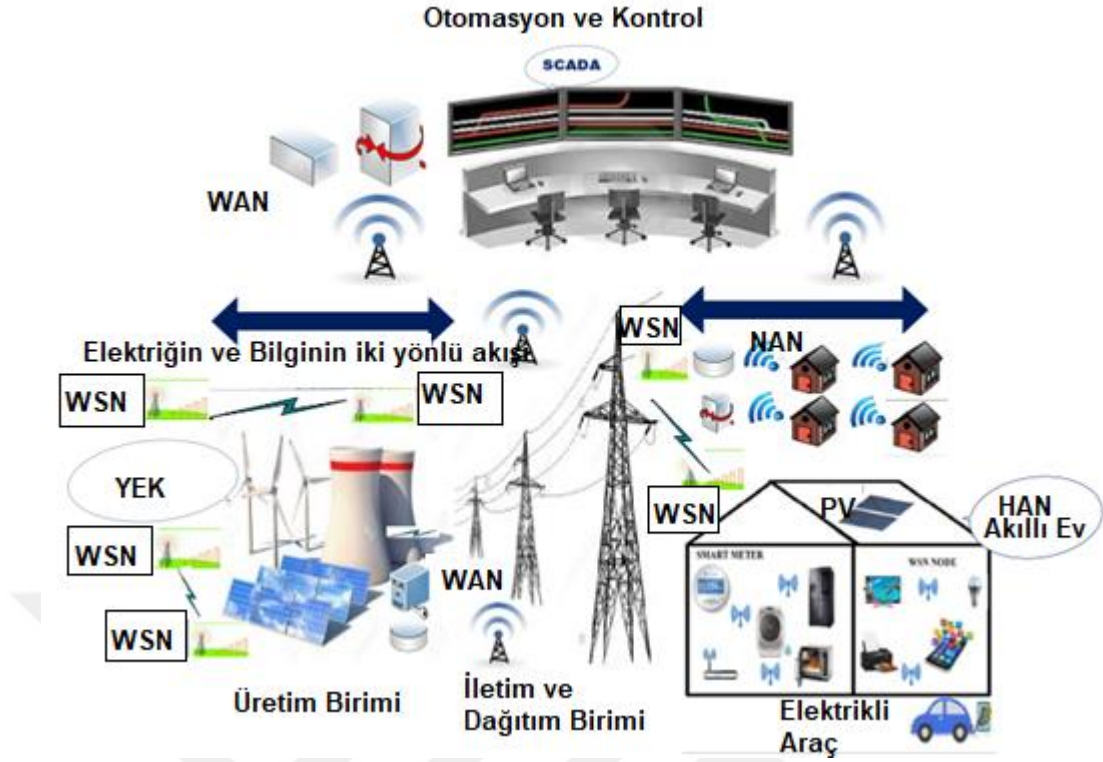
Akıllı şebeke kavramının başlangıç noktası gelişmiş ölçüm altyapısı fikrine dayanmaktadır. Veri ölçümü için akıllı sayaçlar, sensörler ve fazör ölçüm birimleri (PMU) kullanılmaktadır. Gelişmiş ölçüm altyapısı, otomatik sayaç okuma sistemleri (OSOS)'ne dayanan akıllı şebekenin temel unsurlardandır.

Akıllı sayaç, belirlenen zaman aralıklarında kullanıcıya ait tüketim değerlerini kontrol eden, izleme ve faturalandırma amacıyla elektrik dağıtım şirketine en az günde bir defa bilgi gönderen, uzaktan açma/kapama yeteneğine sahip bir ölçüm cihazıdır. Tüketicieye, anlık olarak tüketim istatistiklerini bildirme ve gerçek zamanlı fiyat oluşturmaya katkı sağlar. Böylece tüketiciyi puant yük zaman diliminden uzaklaşmaya teşvik eder ve sistemin optimum düzeyde kullanılmasını sağlar. Tüketici açısından ise faturalarını düşürme imkanı sunar [16].

Akıllı şebekede veri ölçümünün bir diğer unsuru da sensörlerdir. Sensörler, küme halinde ağ bağlantısı ile birbiriyle haberleşen Kablosuz Sensör Ağları (WSN) olarak ifade edilen bir yapıda kullanılmaktadır. WSN, akıllı şebekenin çeşitli alanlarında kontrol, izleme, ölçüm ve hata teşhisi gibi işlemleri düşük maliyetle gerçekleştirir. Bir sensör düğümü temel olarak şu elemanlardan oluşur: sensörler, bellek, işlemci, alıcı-verici, güç kaynağı ve eyleyici. Şekil 2.8’de temel WSN düğüm mimarisi verilmiştir. Sensörler ile akım, gerilim, nem ve sıcaklık gibi çeşitli değerler ölçülür. Küçük sensör düğümleri; HAN (Ev ağ bağlantısı), NAN(Yakın/komşu ev bağlantısı) ve WAN(Geniş ağ bağlantısı) içerisinde uzaktan kablosuz haberleşmek için toplu bir sensör ağı oluşturur ve üretim, iletim ve dağıtım birimlerinin çeşitli kısımlarında bahsedilen amaçlar doğrultusunda kullanılır [30]. Şekil 2.9’da WSN’nın akıllı şebekede kullanımı gösterilmiştir.

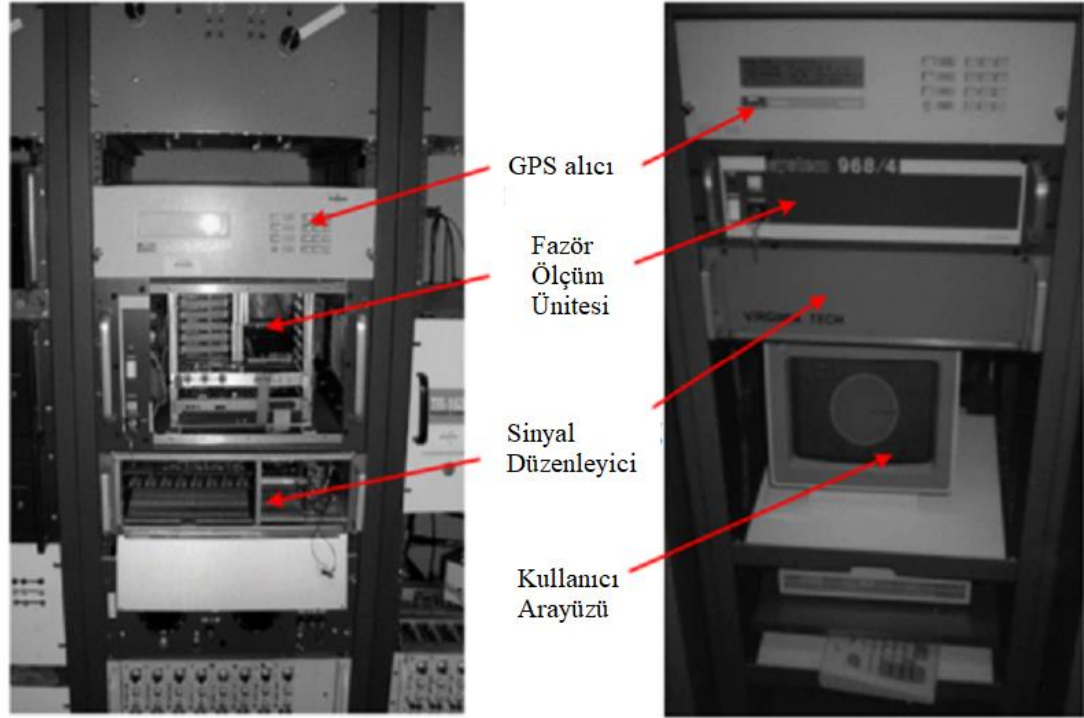


Şekil 2.8. WSN düğüm mimarisi



Şekil 2.9. Akıllı Şebeke hiyerarşik mimarisinde kablosuz sensör ağı uygulaması

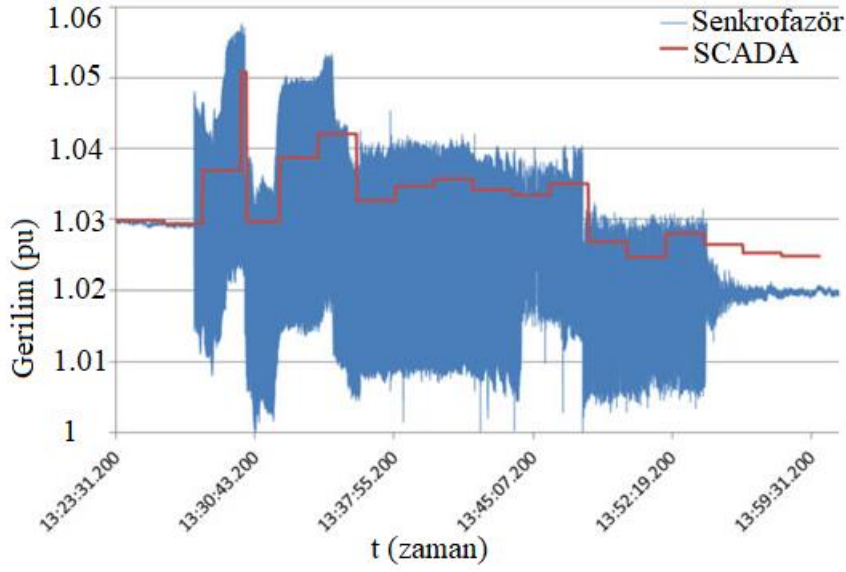
Şebekede hattın belli noktalarında akım, gerilim ve faz açısı değerlerini eş zamanlı olarak izlemek için PMU kullanılır. Elde edilen bu verilerin eş zamanlı olması GPS ile sağlanır. 1980’li yılların ortalarında GPS ile gerçek zamanlı olarak uzaktan ölçülen verilerin kullanımı gerçekleştirilmiştir. PMU’ya ait ilk prototip ise 1990’lı yıllarda Virginia Tech’de geliştirilmiş olup Şekil 2.10’da gösterilmiştir [31, 32]. PMU ile sistem değişkenlerine karşı hızlı tepki göstermek mümkün olmaktadır.



Şekil 2.10. Virginia Tech'te oluşturulan ilk PMU seti

SCADA sistemi geleneksel şebekelerde gerçek zamanlı fazör bilgilerinin elde edilmesi ve izlenmesinde kullanılmaktadır. Ancak SCADA'nın birtakım dezavantajları vardır [31]:

- 4-6 saniye arası gecikme olmaktadır. Bu durum sistemin senkronizasyonu olumsuz yönde etkilemektedir.
- Örnekleme oranı PMU'ya göre daha azdır. Şekil 2.11'de görülen bozucu etkiye maruz kalan bir durumda SCADA verilerinde olayın boyutu tam olarak görülememektedir. PMU ile ölçülen verinin örnekleme frekansı daha yüksek (saniyede 30-50 örnek) olduğu için bozucu etki elde edilen sinyalde daha net görülmektedir [33].
- Kablolama ve kurulum maliyeti yüksektir.



Şekil 2.11. Hızlı dinamik bir olay süresince PMU ölçümü ve SCADA verisinin karşılaştırılması

2.1.1.2.2. Veri Yönetimi

Veri yönetiminin bileşenleri; veriyi modelleme, analiz etme, birleştirme ve optimize etmektir. Bu bileşenlerden veri modellemenin amacı; sürekli, görünür, uyumlu, taşınabilir ve düzeltilebilir özelliklerde bir veri oluşturarak standartlaşmayı sağlamaktır. Sistem içinde sistemlerden oluşan akıllı şebekede gerekli tüm sistemler için ortak bir veri modelinin oluşturulması bir sisteme ait verinin diğer sistemlerde daha etkin ve kolay bir şekilde kullanılmasına olanak sağlar. Oluşturulan veri modeli mevcut sistemin altyapısından istifade etmeli, mevcut ve gelecek uygulamalar için anlaşılabilir olmalıdır. İyi tanımlanmış bir veri modeli ile geçmiş program düzenlemeleri kolay bir şekilde yapılabilmelidir [16].

Veri analizi; verinin işlenmesi, yorumlanması ve karşılıklı ilişkilendirilmesinde yardımcı olur. Ölçme ve izleme sistemlerinden elde edilen verilerin önce analiz edilmesi gerekmektedir. Daha sonra çeşitli kaynaklardan elde edilen farklı dizgisel, anlamsal ve kavramsal yapıya sahip büyük miktardaki bu veriler birleştirilerek uygulamalara dahil edilirler. Günümüzde elektrik şirketleri sistem planlaması, elektrik dağıtımı ve müşteri işlemleri ile ilgili sınırlı miktarda veri toplama, işleme ve depolama kapasitelerine sahiptir. Çoğu zaman şirketlerin sahip olduğu bu bilgiler diğer şirketlere açık olmadığından birbirinden kopuk ve birbiri için

kıymetli olan veri adacıkları oluşmaktadır. Akıllı şebeke ile mevcut imkanları etkin kullanmak ve şirketlerin veri toplama maliyetlerini azaltmak için gizlilik kuralları çerçevesinde bu veri adacıklarını birleştiren bir sistem hedeflenmektedir. Ancak bu aşamada karşılaşılan problem, elde edilen büyük miktardaki bu verilerin depolanması ve taşınmasıdır. Bunun için haberleşme hızındaki iyileştirmelerin yanında (5G), bu verilerin gereksiz olanları atılarak, sıkıştırılarak vd. yöntemlerle optimize edilmesi gerekmektedir [16].

Akıllı şebeke verilerinin depolanması ve bilgi işlem hizmetleri için bulut bilişim teknolojileri önerilmektedir. Bu yöntem birtakım güvenlik risklerini barındırmakla birlikte akıllı şebekeyi etkin kullanmayı ve maliyetleri düşürmeyi sağlar. Bulut yöneticileri geniş depolama ve işlem kapasitelerine sahip olduklarından dolayı bilgiyi depolamanın yanında bir takım bilgi yönetim ve hesaplama işlemlerini de bir hizmet olarak sunabilirler. Böylece ürettiği elektriği satmak isteyen bir enerji tedarikçisi, dış hizmet alımıyla bazı temel ve genel bilgi işlem hizmetlerini bulut servis sağlayıcılarından satın alıp bunun için oluşturacağı altyapı giderlerinden tasarruf eder [16]. Özellikle küçük çaplı bireysel tüketici/üretici konumundaki işletme ve kişiler için bilişim sistemini baştan tasarlamaktansa bu hizmeti bir servis sağlayıcıdan almak akıllı şebeke ekosistemine toplumun her kesiminin ulaşabilirliği açısından önemlidir.

2.1.1.3. Akıllı Haberleşme Alt Sistemleri

Akıllı haberleşme alt sistemleri, şebekede bulunan sistemler, aygıtlar ve uygulamalar arasındaki gelişmiş haberleşme bağlantısı ve bilgi akışının kontrolünü gerçekleştirir. Akıllı şebekede iletişimin çift yönlü olması konusunda fikir birliği mevcuttur. Ancak bu iletişimin nasıl olacağı ve hangi teknolojilerin kullanılacağı konusunda farklı yaklaşımlar vardır. Bunun sebebi akıllı şebekenin farklı alanlarda kullanılmak üzere çeşitli haberleşme ağ yapılarını içermesidir. Akıllı şebekede kullanılan ağ yapıları Şekil 2.12’de gösterilmiş olup genel olarak şunlardır [16]:

- Kurumsal veri yolu (Enterprise bus): Kontrol merkezlerini, pazarları ve üretim merkezlerini birbirine bağlar.
- Geniş ağ bağlantısı (WAN): Coğrafi olarak uzak bölgeleri birbirine bağlar
- Saha ağ bağlantısı (FAN): Kesici ve trafo gibi şebeke elemanlarını kontrol eden cihazları birbirine bağlar. WAN, LAN ve MAN gibi ağların özelliklerinden olarak oluşturulmuştur.

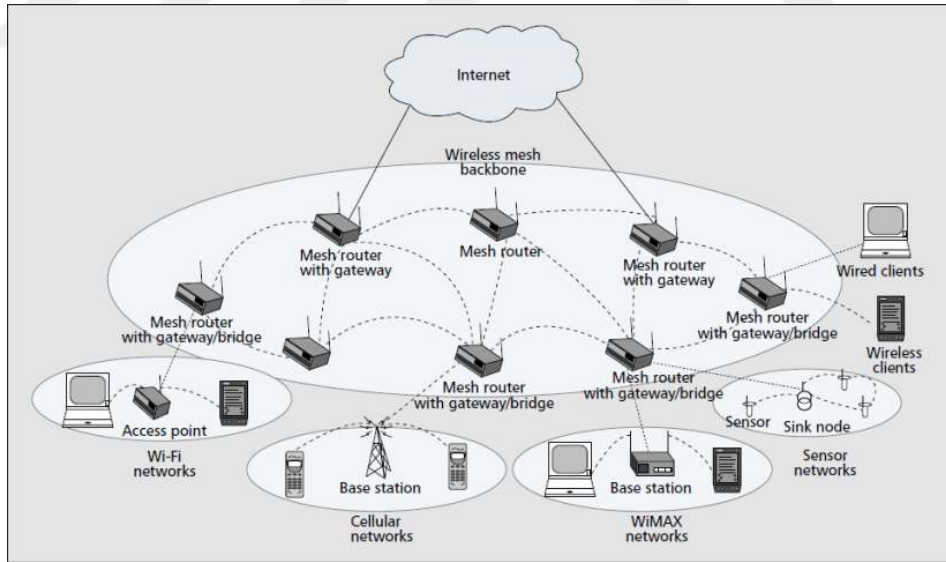
2.1.1.3.1. Kablosuz Haberleşme Teknolojileri

Kablosuz haberleşme teknolojileri günlük yaşantımızda haberleşme özelliği olan birçok elektronik cihazda haberleşme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Mekân bağımsız, taşınabilir ve uygun fiyatlı olması kablosuz haberleşmenin tercih sebeplerindendir. Akıllı şebekede de mesafe, maliyet ve hassasiyete göre çeşitli kablosuz haberleşme teknolojileri kullanılabilir.

Akıllı şebekede kullanılabilecek kablosuz haberleşme teknolojileri şunlardır:

a) Kablosuz Örgü Ağı (Wireless Mesh Network - WMN)

Kablosuz örgü ağları kendi kendini organize edebilen ve yapılandırabilen dinamik bir yapıdır. Ağdaki düğümler kendi kendine geçici bir bağ oluşturabilir ve ağ örgüsünü sürdürebilir. İki farklı düğümden oluşurlar. Bunlar, ağ yönlendiricileri ve ağ istemcileridir. Ağ yönlendiricileri çeşitli kablosuz erişim teknolojilerine dayanan birden fazla kablosuz arabirim içermektedir. Temel bir kablosuz örgü ağı yapısı Şekil 2.13'te gösterilmiştir [34].

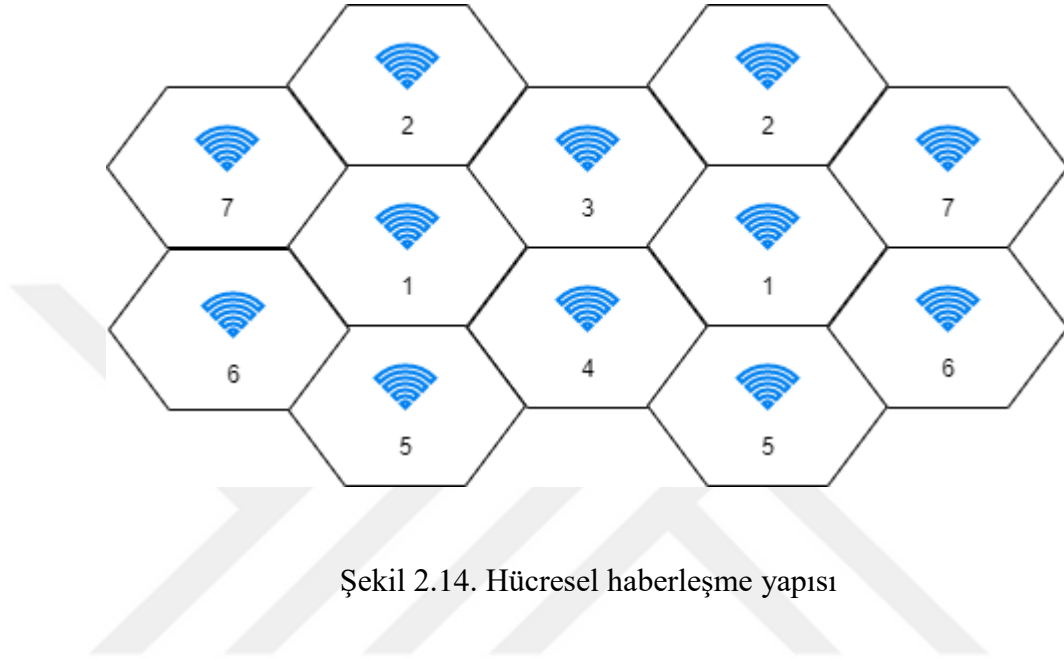


Şekil 2.13. Temel kablosuz örgü ağları yapısı

b) Hücresel Haberleşme

Hücresel haberleşme, spektrum verimliliğini arttırmak ve geniş kapsama alanı ile daha fazla kullanıcının iletişimini sağlamak amacıyla geliştirilmiş kurulumu hızlı, kolay ve ucuz olan bir haberleşme teknolojisidir. Bu yöntemde haberleşmenin yapılacağı alan, birbirine komşu olan her bir hücrenin farklı frekanslarda haberleşme

kanallarına sahip olduğu hücrelerden oluşmaktadır. Birbiriyle komşu olan her bir baz istasyonu için farklı haberleşme kanalları ayrılmıştır. Ancak komşu olamayan hücreler aynı frekansa sahip kanallar kullanılabilir [35]. Şekil 2.14'te hücresel haberleşme yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Hücresel haberleşme yapısı

Hücresel haberleşme sistemleri 1978 yılında ABD'nin Chicago eyaletinde 1. nesilden (1G) başlamış günümüze kadar 4. nesil(4G) olarak tabir edilen teknolojiye kavuşmuştur. Günümüzde 5. nesil(5G) için standart ve teknoloji geliştirme üzerine çalışmalar devam etmektedir [35]. 6. Nesil haberleşme çalışmaları da başlamıştır. Nesnelerin interneti (IoT) kavramının gündeme geldiği ve giderek artan sayıda nesnenin internete bağlandığı günümüz dünyasında hücresel haberleşmenin payı büyük olacaktır. Bunun için daha hızlı, ucuz ve güvenilir bir hücresel haberleşme altyapısına ihtiyaç duyulmaktadır.

Akıllı şebekede hücresel haberleşme; akıllı ölçüm altyapısı, talep tarafı yönetimi, kesinti yönetimi ve ev ağı (HAN) gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Hücresel haberleşme altyapısı telekomünikasyon şirketleri tarafından hemen hemen her yerde kurulduğu için akıllı sayaç uygulamalarında bir haberleşme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Güvenlik açısından ele alındığında anonimlik, kimlik doğrulama, sinyal koruma ve kullanıcı veri koruma hücresel haberleşme teknolojisinin güçlü yönleridir. Ancak halka açık olan hücresel haberleşme sisteminde müşteri

yoğunluğuna bağlı olarak özellikle afet dönemlerinde ağ tıkanıklığı ve performans düşüklüğü yaşanabilir. Bundan dolayı önemli uygulamalar için hususi haberleşme kanalına sahip özel ağ oluşturulabilir [36].

c) Bilişsel Radyo Ağları ile Haberleşme

Bilişsel radyo (CR - cognitive radio) lisanslı frekans spektrumlarının lisanssız (ikincil) kullanıcılar tarafından dinamik spektrum erişimi yoluyla fırsatçı şekilde kullanılmasını sağlayan bir teknolojidir. Böylece oldukça değerli olan ve sınırlı miktarda bulunan spektrumlar daha etkin olarak kullanılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, ikincil kullanıcıların birincil kullanıcıları etkilememesidir. Bunun için dinamik spektrum tahsisi gereklidir. Geleneksel CR' de spektrum yönetimi 4 aşamada gerçekleşir. Bunlar: spektrum algılama, spektrum belirleme, spektrum paylaşma ve spektrum değiştirme [37], [38].

CR, akıllı şebekede kritik olmayan verileri iletmek, haberleşmenin yoğun olduğu alanlarda yedek haberleşme yöntemi olarak, gerçek zamanlı veri alışverişine ihtiyaç duyulmayan sensörler ve akıllı ölçüm cihazlarının haberleşmesi gibi uygulamalarda kullanılabilir. Bu konuda yapılan bazı çalışmalar aşağıda belirtilmiştir:

Yang ve ark. [39] talep tepki yönetimi (DRM - Demand Response Management) sisteminin güvenilir spektrum algılamasında kullanılmak üzere düşük sinyal-gürültü oranına (SNR – Signal to Noise Ratio) sahip spektrum performansı sağlamak için geliştirilmiş stokastik rezonans algoritmasına (GSRED - generalized stochastic resonance) dayanan bir çalışma yapmışlardır. DRM'ye dayalı gerçek zamanlı fiyatlandırma incelenmiş, kesinti olasılığı ve algılama zamanı parametrelerinin DRM üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Algılama zamanını makul seviyede ayarlanarak akıllı şebekenin yükünü fazla arttırmadan DRM performansını optimize etmişlerdir.

Ozturk ve ark. [40] akıllı şebeke ve şehirlerde IoT uygulamalarına yönelik artan talepleri karşılamak için CR ağında IEEE 802.22 standardına göre TV beyaz alanlarını (TV white spaces) kullanmışlardır.

d) IEEE 802.15.4 Standardına Dayalı Kablosuz Haberleşme

IEEE 802.15.4 protokolü düşük hıza sahip kablosuz kişisel alan ağları (Wireless Personal Network – WPAN) için tanımlanmıştır. Bu protokole sahip haberleşme yöntemi ile küçük verileri göndermek için diğer kablosuz haberleşme yöntemlerine göre daha az enerji harcanır [41].

Zigbee, LoWPAN6, ISA100.11a ve WirelessHART gibi protokoller altyapılarında IEEE 802.15.4 protokolünü kullanırlar. Zigbee ev ağında, tesislerde, akıllı ölçüm cihazlarında en yaygın kullanılan haberleşme teknolojilerinden biri olabilir. 2,4 GHz bandında çalışan WirelessHART zaman senkronize, kendi kendini düzenleyen ve kendi kendini onaran örgü mimarisini kullanır. Çok tedarikçili ve birlikte çalışabilir kablosuz standart olarak geliştirilen WirelessHART, işlem alanı cihaz ağlarının ihtiyaçları için tanımlanmıştır. “Endüstriyel Otomasyon için Kablosuz Sistemler: Proses Kontrol ve İlgili Uygulamalar” adıyla yayınlanan ISA100.11a, Uluslararası Otomasyon Topluluğu (International Society of Automation) tarafından geliştirilen açık bir kablosuz ağ teknolojisi standardıdır. Akıllı şebekedeki trafo merkezi veya üretim tesisi gibi kablosuz sensör ağı uygulamaları için WirelessHART veya ISA100.11a kullanılması tavsiye edilir [16].

e) Uydu Haberleşmesi

Uydu vasıtasıyla haberleşme yöntemi kurulumu kolay olup küresel ölçekte iletişim imkânı sunar. Kırsal alanlarda, afet zamanlarında karasal haberleşmeye alternatif olarak kullanılabilir. Dezavantajları şunlardır: Karasal haberleşmeye göre daha gecikmeli çalışır ve sönümlene etkisi ve iklim şartlarına göre haberleşme kalitesi değişir [16].

f) Mikrodalga ve Serbest Uzay Optik Haberleşme

Mikrodalga teknolojileri iki konum arası haberleşmede güvenli bir şekilde küçük dalga boyu ve yüksek bant genişliği gibi özellikleriyle oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.1.1.3.2. Kablolu Haberleşme Teknolojileri

Akıllı şebekede kullanılabilecek kablolu haberleşme teknolojileri şunlardır:

a) Fiber Optik Haberleşme

Fiberoptik haberleşme yöntemi günümüzde büyük üretim tesislerinde üretim ağlarının kontrol birimleri ile haberleşmesi için kullanılmaktadır. Fiberoptik haberleşme, elektromanyetik ve radyo sinyallerinden etkilenmediği için yüksek gerilimli çalışma ortamları için uygundur.

b) Güç İletim Hattı Üzerinden Haberleşme (PLC)

PLC, enerji iletim hattı üzerinden veri iletimini sağlayan yöntemdir. Halihazırda mevcut enerji iletim hattını kullandığı için kurulum maliyeti düşüktür. Haberleşme için yalnızca prizlere takılan alıcı-verici cihazlar gerekmektedir. Başlangıçta PLC veri hızı yalnızca birkaç Kbps iken genişbant PLC ile 200 Mbps'ye ulaşmıştır. Haberleşme mesafesi alçak gerilimde 200 metre iken, orta gerilimde 3 km'ye kadar ulaşmaktadır. Tablo 2.2'de PLC ile diğer erişim teknolojileri karşılaştırılmıştır. AMR, AMI, DSM, V2G, ev aletlerinin kontrolü, yüksek gerilim hatlarında uzaktan arıza tesbiti gibi akıllı şebeke alanlarında PLC haberleşme yöntemi uygulanmaktadır. PLC tarafından sağlanan iki yönlü haberleşme AMI'daki müşterilerin cihazları ile sistemin birbiriyle haberleşmesini sağlar. Böylece gerçek zamanlı fiyatlandırma ve müşteriye anlık fatura bilgileri sağlanır. Şebeke ile elektrikli araçların darbant-PLC yöntemi kullanılarak haberleşmesi ile yük kontrolü sağlanır. Servis sağlayıcılar ile ev aletlerinin haberleşerek DSM yöntemiyle yoğun talebin yönetimi sağlanır. Burada genişbant-PLC haberleşme yöntemi kullanılır. PLC, akıllı şebeke uygulamaları haricinde internet erişimi için de kullanılmaktadır [42].

Tablo 2.2. PLC ile diğer erişim teknolojilerinin karşılaştırılması

PLC Teknolojisi	Diğer Erişim Teknolojileri
Benzersiz bir haberleşme çözümü sağlar	Benzerleri vardır
Düşük maliyet	Yüksek maliyet
Çevre üzerinde daha az etki oluşturur	Daha fazla etki oluşturur (antenler vs.)
Gelişen teknoloji, küresel standardı yoktur	Küresel standartları vardır
Daha fazla ölçeklenebilir	Daha az ölçeklenebilir
Daha fazla birlikte çalışabilir	Daha az birlikte çalışabilir

2.1.2. Akıllı Yönetim Sistemleri

Akıllı yönetim sistemleri; enerji verimliliğini arttırmak, talep dengesini sağlamak, sera gazı emisyonunu ve operasyon maliyetlerini azaltmak amacıyla çeşitli optimizasyon teknikleri, makine öğrenmesi ve oyun teorisi gibi yöntemlerle şebekeye gelişmiş yönetim, denetim ve fonksiyonellik özellikleri katmaktadır. Bu kısımda akıllı altyapı sistemleri ile oluşturulan akıllı şebekenin sürekli geliştirilebilir bir şekilde çeşitli yönetim araçlarıyla yönetilmesi amaçlanmaktadır. Böylece sistem aklının iyileşme süreci sürekli hale gelmektedir. Önemli olan elde edilen verilerin daha etkin nasıl kullanılacağına araştırılması ve buna ilişkin yeni yönetim araçlarının geliştirilmesidir.

Akıllı yönetim teknikleri iki ana başlık altında incelenecektir. İlk olarak yönetim hedefleri, sonrasında yönetim araçları ve yöntemleri açıklanacaktır.

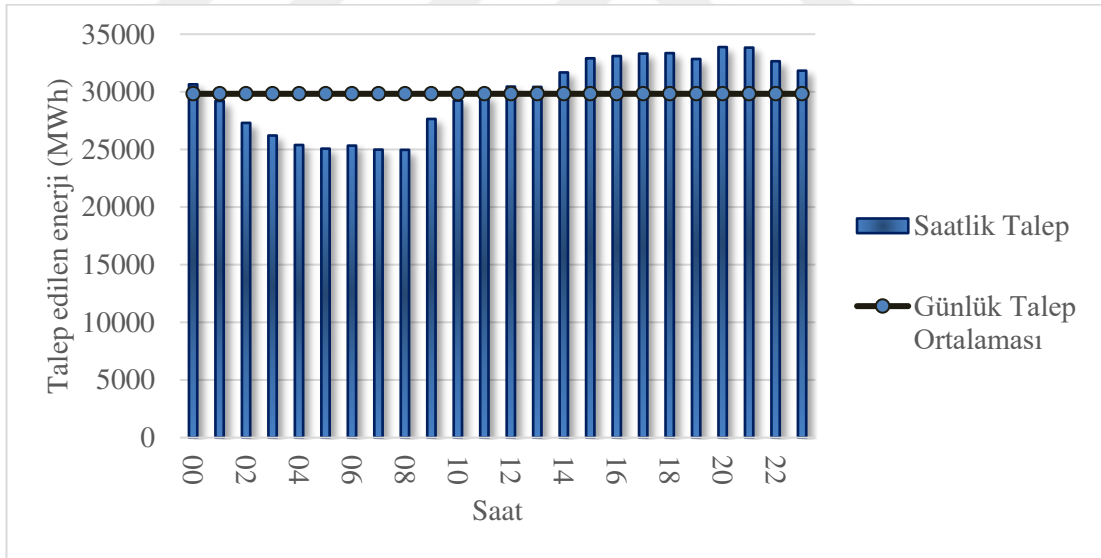
2.1.2.1. Yönetim Hedefleri

Akıllı yönetim sistemleri kapsamında, geleneksel şebekenin kabiliyeti dışında kalan enerji verimliliği, güç talep profilini dengeleme, fayda-maliyet optimizasyonu, fiyat istikrarı ve emisyon kontrolü işlevlerine yönelik hedefler tartışılmaktadır.

2.1.2.1.1. Enerji Verimliliği ve Talep Profili

Mevcut şebekede talep profili incelendiğinde gün içinde ve yıl içinde çeşitli dalgalanmaların olduğu görülmektedir. Ülkeler, herhangi bir kesinti ve gerilim düşüklüğü oluşmaması için en kötü seneryoya hazırlıklı olacak miktarda üretim tesislerini kurmaktadır. Günümüzde enterkonnekte bir şebekede talep doğrultusunda enerji üretimi yapılmakta, sistem kapasitesi en fazla talebi karşılamaya yönelik olarak oluşturulmaktadır. Tüketiciler pasif olup, sistem iyileşmesine herhangi bir katkı sağlamamaktadırlar. Bu durumda enerji verimliliği problemi karşımıza çıkmaktadır. Akıllı şebekede talep tepkisi yönetimi (DRM) ile tüketicilerin enerji arz durumundan anlık olarak haberdar olup, buna göre alışkanlıklarını değişken fiyat uygulamalarının teşvikiyle değiştirmeleri ve böylece kapasitenin daha verimli kullanılması hedeflenmektedir. Ayrıca tüketicinin yaşam alanında harcadığı enerjinin detaylı olarak kullanım alanına göre sınıflandırılmasıyla, enerji israfından kaçınması konusunda bilinç oluşturacaktır.

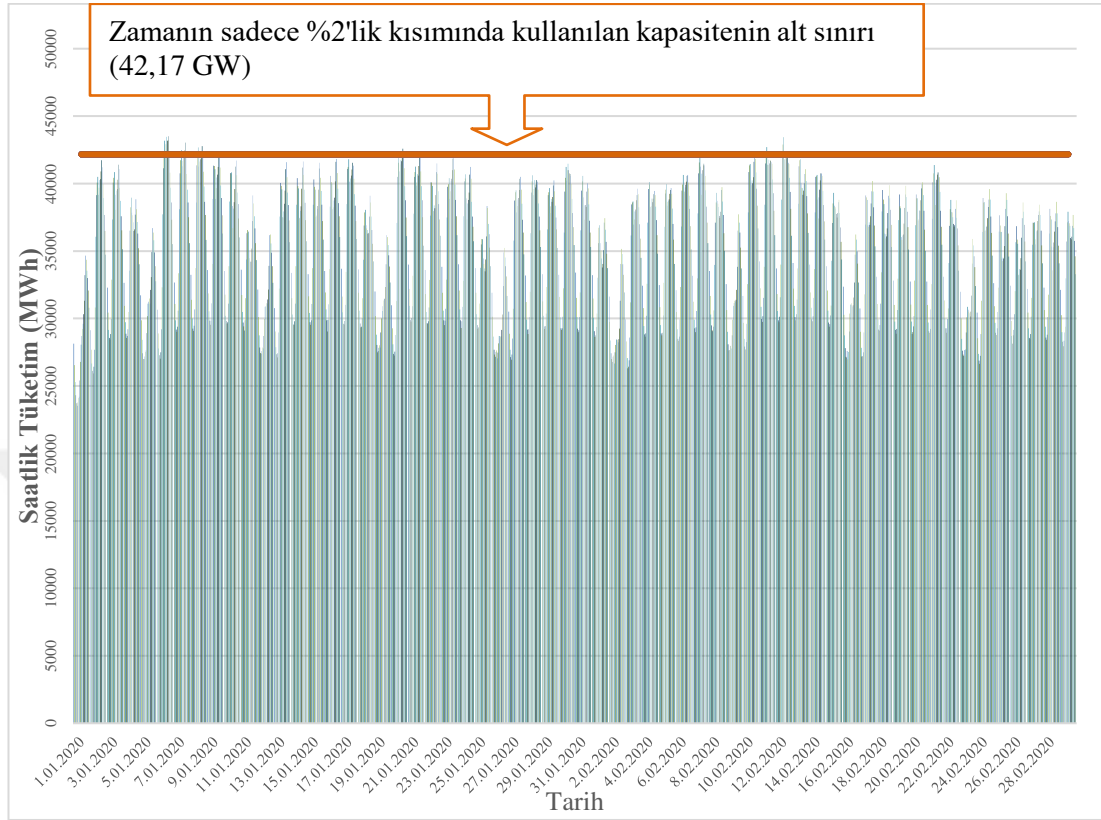
31 Mart 2020 tarihli Türkiye geneli günlük enerji talebine ait verileri gösteren Şekil 2.15'teki grafikten anlaşılabacağı üzere gün içinde ortalama enerji talebi 29,8 GWh iken, en yüksek anlık talep (puant yük) 34,1 GWh'tir. Bu tarihe kadar olan 2020 yılına ait talep verileri incelendiğinde en yüksek anlık talebin 43,7 GWh, buna karşın en düşük anlık talebin ise 22,5 GWh olduğu kaydedilmiştir. Ayrıca, puant yük 2018 yılında 46,2 GWh, 2019 yılında ise 45,3 GWh olarak ölçülmüştür [43]. Enerji altyapı yatırımlarının yıl içinde oluşması muhtemel en yüksek talebi karşılayabilecek şekilde yapılması gerektiğinden, kurulan enerji tesislerinden büyük bir kısmı talebin düşük olduğu saatlerde devre dışı kalacaktır. Akıllı şebekede talep tarafı yönetimi ile gerçek zamanlı ve esnek tarifelendirme yöntemi sayesinde yükleri kaydırıp talebi geniş zamana yayarak puant talebi düşürme, düşük talebi artırma, talep esnekliği sağlama, talep tasarrufu sağlama ve talep büyümesini optimize etme gibi işlevleri gerçekleştirmek amaçlanmaktadır [44]. Burada yapılması gereken işlem tüketicilerin taleplerini kaydırması konusunda ikna edilmesidir. Böylece, altyapı maliyetleri daha aza indirilecek, kapasite kullanım oranları artacaktır.



Şekil 2.15. 31 Mart 2020 tarihli Türkiye geneli saatlik enerji talep profili

Ocak-Şubat 2020 tarihleri arasında Türkiye geneli saatlik tüketim grafiği Şekil 2.16'da verilmiştir. Bu süre içerisinde en yüksek anlık talep 43,7 GWh olup zamanın sadece %2'sinde 42,17 GWh değerinin üzerinde ölçülmüştür. Buradaki 1,53 GWh'lık farka karşılık gelen kapasite kurulum maliyetinin, DRM yöntemi ile düşürülmesi mümkündür. Zamanın sadece %10'luk kısmına karşılık gelen talepler DRM

yöntemiyle diğer zamanlara yayıldığında ise 40,71 GW’lık kapasite yeterli olmaktadır. Bu durumda 3 GW’lık bir kapasite kurulum maliyetinden kazanç sağlanacaktır.



Şekil 2.16. Ocak - Şubat 2020 tarihlerinde Türkiye geneli saatlik tüketim verisi (MWh).

2.1.2.1.2. Fayda – Maliyet Optimizasyonu ve Fiyat İstikrarı

Akıllı şebeke altyapısı oluşturulurken farklı seneryolar analiz edilmelidir. Birbirinden farklı akıllı şebeke seneryolarının yaygınlaşması için gerekli olan maliyet ve bunun karşılığında sağlanan faydaların analiz edilmesi sonucu sistem kurulum stratejisi belirlenir.

Akıllı şebekede enerji piyasası değişken fiyat stratejileri üzerine kurulacaktır. Akıllı yönetim sisteminin bir amacı da bu değişken fiyatlı piyasa koşullarında hem tedarikçiye hem de tüketiciye, oluşturulacak kontrol ve optimizasyon yöntemleriyle, optimum faydanın sağlamasıdır. Örneğin, elektrikli aracını şebekeye dahil eden bir müşteriyi ele alalım. Bu müşterinin talebinin az olduğu zamanlarda düşük fiyatla bataryasını doldurması, talebin yoğun olduğu zamanlarda ise depoladığı enerjiyi daha yüksek fiyata şebekeye satması beklenmektedir. Bu sırada talebin düşük olduğu zaman

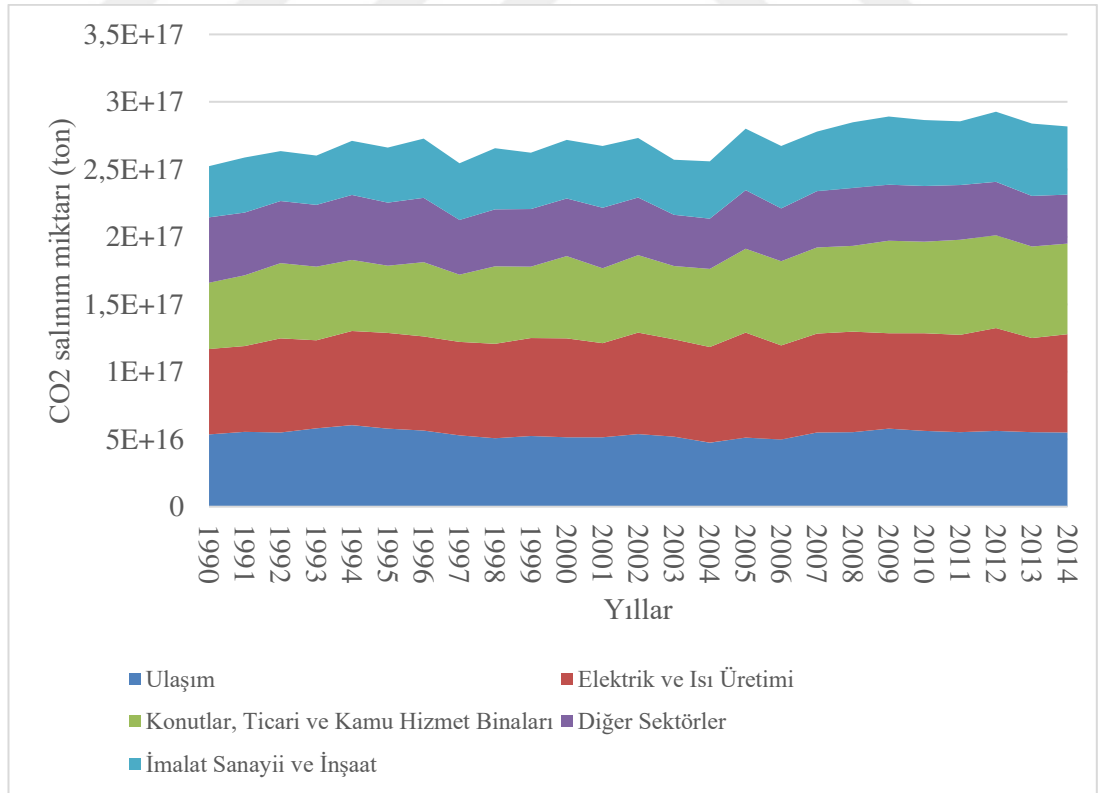
diliminde oluşan fiyat, enerji üretim maliyeti göz önüne alarak belirlenmelidir. Talebin yüksek olduğu zaman diliminde ise depolamadan kaynaklanan fazla maliyetin diğer tüketicilere yansımaları da kabul edilebilir düzeyde tutmalıdır.

2.1.2.1.3. Emisyon Kontrolü

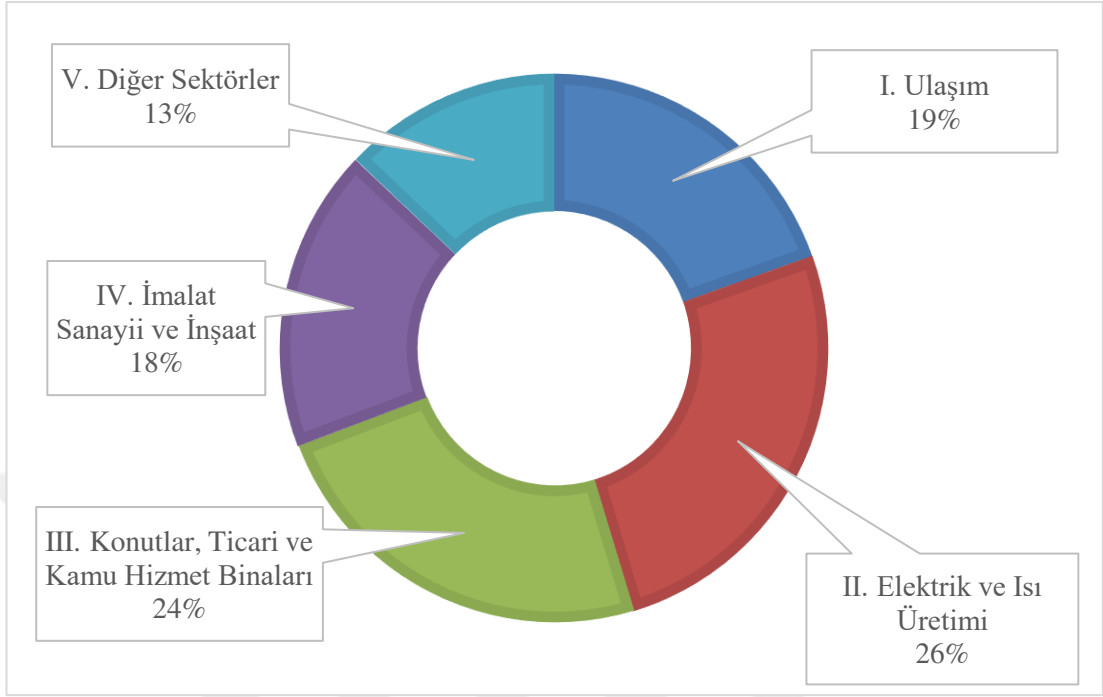
Uluslararası Enerji Kuruluşu (IEA), küresel enerji politikalarında bir değişiklik yaşanmazsa, 2050 yılında CO₂ emisyonunun % 130 ve petrol tüketiminin de % 70 oranında artışı sonucu ile dünya sıcaklığının ortalama 6⁰ C yükseleceğini tahmin etmektedir [45].

Dünya genelinde yıllık CO₂ salınımına neden olan başlıca sektörler şunlardır; (i) ulaşım, (ii) elektrik ve ısı üretimi, (iii) bireysel, ticari ve kamu binaları, (iv) imalat ve inşaat. Sektörlere göre CO₂ salınımının dağılımı

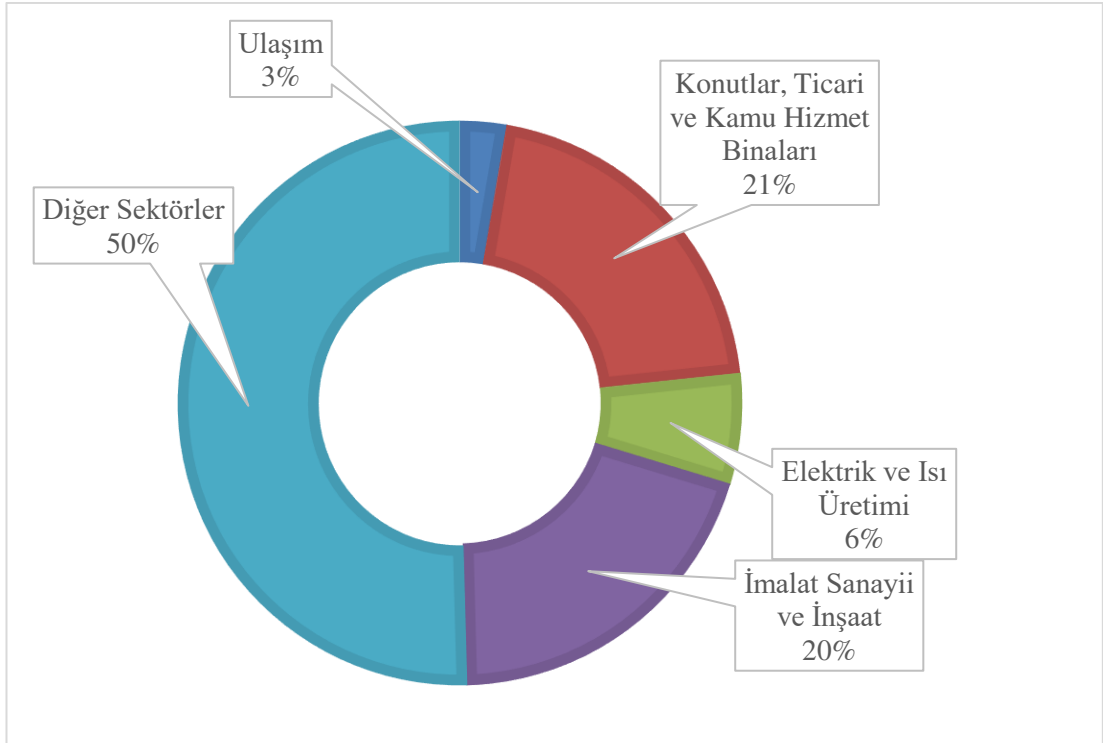
Şekil 2.17’de gösterilmiştir [46]. 2014 yılına ait Dünya geneli CO₂ salınımının sektörlere göre dağılımı Şekil 2.18’de, Türkiye geneli dağılım oranları ise Şekil 2.19’da gösterilmiştir [46].



Şekil 2.17. Dünya genelinde farklı sektörlerdeki CO₂ salınım miktarlarının yıllara göre değişimi.



Şekil 2.18. 2014 yılı Dünya geneli CO₂ emisyon salınım oranlarının sektörlere göre dağılımı.



Şekil 2.19. 2014 yılı Türkiye geneli CO₂ emisyon salınım oranlarının sektöre göre dağılımı.

Dünya genelinde sera gazı salınımını azaltmak için akıllı şebeke bağlamında elektrikli araçların ve yenilenebilir enerji kullanımının artması gerekmektedir. Şekil 2.18'deki veriye göre Dünya genelinde akıllı şebeke yatırımları ile bu alanlardaki gelişmeler, özellikle toplam sera gazı salınımının %69'una karşılık gelen I, II ve III nolu sektörlerden kaynaklanan kirliliği azaltacaktır.

2.1.2.2. Akıllı Yönetim Metotları

Akıllı şebekede enerji verimliliğini arttırmak, talep profilini iyileştirmek, fayda-maliyet optimizasyonunun sağlamak, fiyat istikrarını temin etmek ve emisyon kontrolü gibi amaçları gerçekleştirmek için çeşitli hesaplamalı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar; optimizasyon, makine öğrenmesi, oyun teorisi gibi hesaplamalı yöntemler ile açık artırma ve teklif verme yöntemleridir.

2.1.2.2.1. Optimizasyon

Akıllı şebekede sistem yönetimi için çeşitli optimizasyon teknikleri önerilmektedir. Optimizasyon bir işlemde en fazla fayda ve en az maliyeti elde etme sürecidir. DRM bağlamında yapılan çalışmalar toplam güç tüketimini azaltmak, üretim maliyetini azaltmak ve sosyal refahı arttırmayı amaçlamaktadır. Sosyal refahın artırılması, elektrik hizmet sektörünün kazancından elektrik üretim ve iletim maliyetleri çıkarılması ile elde edilir. Bir optimizasyon probleminde amaç birtakım kısıtlarla sahip olan değişkenler kümesine (tasarım vektörü) ait fonksiyon setini (amaç fonksiyonu) en düşük veya en yüksek değerlere ulaştıran değişkenler kümesini bulmaktır. Burada tasarım vektörü bir probleme ait değişkenler vektörü olarak ifade edilir. Yük zaman planlaması probleminde; yükün tipi, zorunlu olup olmaması, başlangıç-bitiş zamanı ve süresi, talebi karşılama sırası gibi veriler tasarım vektörü olarak tanımlanabilir. Amaç fonksiyonu, optimize edilecek olan özelliklerdir: Güç tüketimini azaltmak ve/veya sosyal refahı arttırmak gibi. Problemdaki kısıtlar ise enerji depolama kapasitesi, üretim kapasitesi ve cihazlar gibi sisteme ait kısıtlardır [47].

Optimizasyon yönteminin türü tasarım vektörü, amaç ve kısıt fonksiyonlarına göre belirlenir. Bu fonksiyonların hepsi doğrusal ise doğrusal bir çözüm yöntemi,

herhangi biri doğrusal değil ise doğrusal olmayan yöntemlerle çözülür. Dinamik, stokastik, deterministik, sağlam ve dışbükey gibi çeşitli türlerde optimizasyon uygulamaları mevcuttur [16].

Bazı problemlerde klasik optimizasyon algoritmaları ile problemin çözümüne ulaşamaz veya çok uzun sürede ulaşılır. Özellikle birden fazla optimizasyon amacının olduğu ve büyük veriler ile işlem yapılırken bahsedilen problemlerle karşılaşılma ihtimali yüksektir. Böyle durumlarda parçacık sürü optimizasyonu, arı kolonisi optimizasyonu ve genetik algoritma gibi sezgisel – meta sezgisel algoritmalar iyi sonuç verebilir.

2.1.2.2.2. Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesi; PMU, akıllı sayaçlar ve sensörlere ait veriler gibi ölçülebilen verileri analiz ederek davranış geliştirmek için kullanılan bir yöntemdir.

2.1.2.2.3. Oyun Teorisi

Akıllı şebekede optimizasyon, üreticilerin ve tüketicilerin sağlayacağı veriler kullanılarak yapılmaktadır. Ancak bazı etmenlerin verilerini paylaşmak istemediği veya çok fazla veri ile işlem yapmanın mümkün olmadığı durumlarda, oyun teorisi yöntemi talep tarafındaki stratejik davranışları analiz etmek için kullanılır. Oyuncular beklenen faydayı sağlamak için her oyun için ayrı birer strateji belirlerler. Aynı stratejilerin tekrarlanmaya başladığı noktaya Nash dengesi denir ve bu noktada beklenen faydanın sağlandığı düşünülür. Oyun teorisinin akıllı şebekede kullanılan çeşitli yöntemleri vardır. En yaygın olanları ise bayes, tıkanıklık, iş birliği yapan ve yapmayan gibi yaklaşımlardır [48].

2.1.2.2.4. Açık Arttırma ve Teklif Verme

Açık arttırma yöntemi, akıllı şebekede yerel bir pazar olan mikroşebekede piyasayı yönetmek için kullanılabileceği gibi talep tarafı yönetiminde müşterilerin talebini azaltmaya gönüllü oldukları fiyatı belirttikleri bir sistem olarak önerilmektedir [16].

2.1.3. Akıllı Koruma Sistemleri

Akıllı şebeke teknolojisi birçok avantajının yanında dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Çünkü internete bağlanan her bir nesnenin uzaktan

manipüle edilme ihtimali vardır. Bundan dolayı sistemin güvenliği oldukça önemlidir. Güvenliği sağlanmadan kullanılan her bir teknoloji hem ciddi maddi zarara hem de sistemin çökmesine sebep olabilir. Akıllı şebekedeki gelişmiş ölçüm altyapısı ile elde edilen verilerin, sistemlerin ve operasyon merkezlerinin herhangi bir arıza, afet veya sabotaj anında zarar görmemesi oldukça önemlidir. Bunun için akıllı koruma sistemlerine ihtiyaç duyulur. Akıllı koruma sistemleri; gelişmiş güvenilirlik analizi, arıza anında sistem koruma, siber saldırılara karşı güvenlik ve gizlilik koruma hizmetleri sunar.

2.1.3.1. Sistem Güvenliği ve Arıza Koruması

Elektrik şebekesinin herhangi bir olumsuz durum yaşanmadan sürekli olarak işler durumda olması gerekir. Çünkü sistemde meydana gelen bir arıza üretimin durmasına ve özellikle endüstriyel kullanıcıların zarar görmesine neden olmaktadır. Ayrıca, dağıtık üretim, ani talep değişikliği, trafo ve iletim hattı deformasyonları gibi nedenlerden dolayı oluşan sürekli gerilim düşüklüğü, frekans kayması gibi arızalar sistemin peşpeşe arızalarla bütün olarak çökmesine sebep olur.

Akıllı şebekenin sunduğu gelişmiş ölçüm ve izleme altyapısını kullanarak oluşturulan doğru bir şebeke modeliyle elektrik kesintisine neden olacak sistem göstergelerinde ani değişimin, üretim-tüketim dengesizliklerinin ve hat yüklenmelerinin tahmin edilip peşpeşe arızaya sebep olmasını engelleyecek biçimde sistemin gerekli eylemleri kendi kendine önceden yapması beklenir. Kısa vadeli isabetli yenilenebilir enerji üretim tahmini ve yük tahmini sistem kararlılığı açısından önemlidir. Ekipmanların ısılarının anlık kontrolü arıza henüz oluşmadan veya yayılmadan kontrol altına alınmasını sağlamaktadır. Ayrıca ekipmanların kullanım sürelerinin kontrol edilip arızaya neden olmadan gerekli değişimlerin yapılması ve ekipman üzerinde yapılan ölçüm parametrelerinin zamana göre değişim grafiğinden sapma miktarına göre hata tahmini yapılması olası arızaların önlenmesine yardımcı olacaktır.

Hata oluştuğundan sonra ilk olarak arıza bölgesinin izole edilmesi gereklidir. Böylece hem arızanın yayılması önlenecek hem de daha fazla tüketicinin mağdur olmaması sağlanacaktır. Sonrasında sistemin kendi kendini iyileştirmesi ve veri kaybını telafi etmesi akıllı koruma sistemlerinin hedeflerindendir.

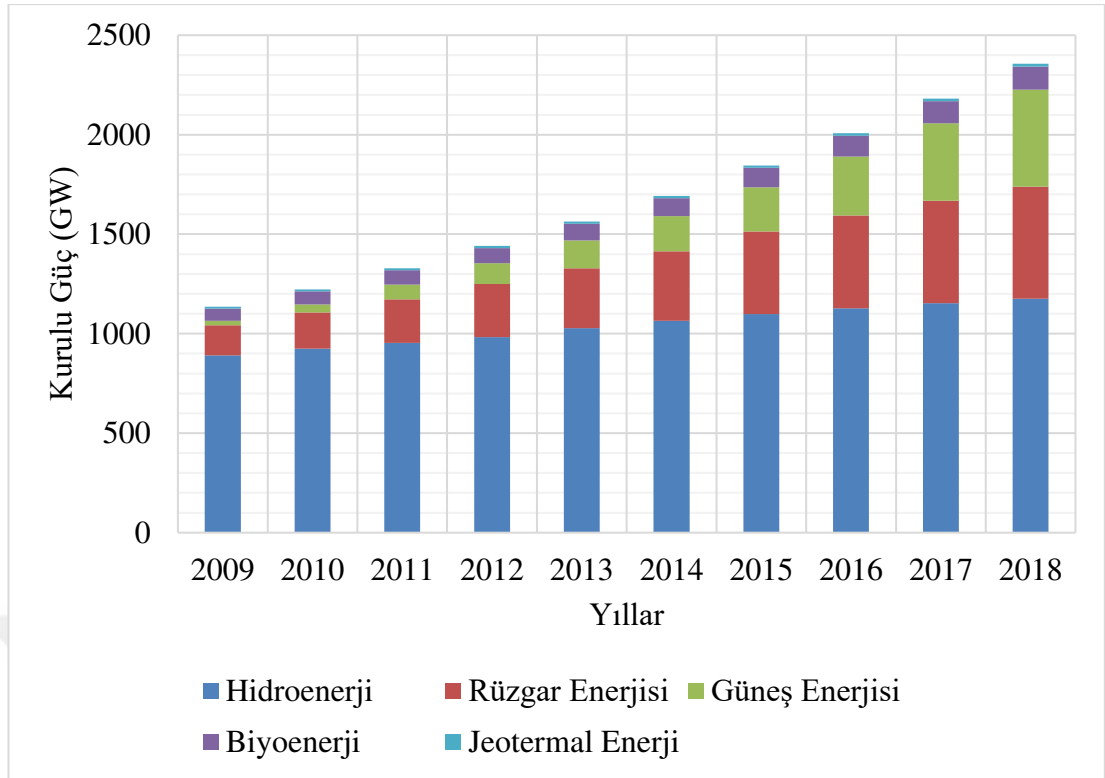
2.1.3.2. Gizlilik ve Güvenilirlik

Gizlilik ve güvenlik konusu sadece bireysel saldırılar değil şirketler ve devletler arası husumetlerin kendini gösterebileceği kısımdır. Güvenlik açıkları, art niyetli kişilerin sisteme girip kişisel verileri ele geçirmesine, kontrol yazılımlarına erişmesine, yük koşullarını değiştirmesine böylece kendilerine maddi kazanç yolu sağlamalarına neden olacaktır. Bundan dolayı, ölçümde, izlemede ve veri iletişimde güvenlik olmazsa olmazdır.

2.2. Dünyada Elektrik Üretimi ve Akıllı Şebeke Çalışmaları

Dünyada gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin birçoğu akıllı şebeke plan ve projelerini ortaya koymuşlardır. Akıllı ölçüm sistemlerinden başlayıp elde edilen verileri etkin bir şekilde işleme, kullanma ve korumaya yönelik çalışmalar sürekli devam etmektedir.

Akıllı şebekenin en önemli bileşenlerinden biri de yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. 2009 – 2018 yılları arası Dünyadaki yenilenebilir enerji toplam üretim kapasitesi Şekil 2.20’de belirtilmiştir. Buna göre, 2018 yılında dünyada yenilenebilir enerji kurulu gücü 2356 GW seviyelerine ulaşmıştır. Son yıllarda yenilenebilir üretim kapasitesi, küresel ısınma ve kaynakların azalması gibi sebeplerden dolayı güncellenen hedeflerle sürekli artmaktadır. Avrupa Birliği’nin hedefi toplam harcanan enerjinin 2020 yılı için en az %20’sini, 2030 yılı için ise en az %32’sini yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamaktır. Aynı zamanda, Avrupa Birliği Ulusal Enerji ve İklim Planları (NECPs)’in hazırladığı taslağa göre Avrupa Birliği ülkelerinde 2030 yılı için sera gazı salınımını 1990 yılı ölçüm değerinden en az %40 daha az seviyelere indirmek ve enerji verimliliğinde en az %32,5 iyileşme hedeflenmektedir [49].



Şekil 2.20. 2009-2018 yılları arası Dünyadaki toplam yenilenebilir enerji üretim kapasitesi [50]

AB ülkelerinde 2017 yılı itibariyle 950 akıllı şebeke projesine 4,97 milyar Avro değerinde yatırım yapılmıştır. Bu projelerin 540'ı Ar-Ge, 410 tanesi ise uygulama projesidir. Ar-Ge projeleri için harcanan miktar 1,61 milyar Avro iken uygulama projeleri için harcanan miktar ise 3,36 milyar Avrodur. En fazla yatırım yapılan alanlar; akıllı ağ yönetimi, talep tarafı yönetimi, dağıtık üretimin şebekeye entegrasyonu ve depolama çözümleri olup tüm yatırım miktarının %80'ini oluşturmaktadırlar [51].

Çin ilk olarak akıllı şebeke çalışmalarına 2006 yılında başladı. 2011-2020 yılları arasında 91,6 milyar dolar harcama yapmayı planladı. Böylece 220 milyon ton kömürden tasarruf etmeyi planladı. Aynı zamanda 100 akıllı şehir projesini 2013 yılında onayladı. Hindistan 2017-2027 yılları arasında akıllı şebeke yatırımlarına 44,9 milyar dolar bütçe ayırdı. Güney Amerika ülkeleri 2018-2027 yılları arası akıllı şebeke altyapı yatırımları için 20,1 milyar dolar ayırdı [52].

Dünyada enerji kaynaklarına göre üretim kapasitesinin geçmiş ve tahmini değişimi Tablo 2.3'te verilmiştir. Enerji üretimindeki geçmiş ve tahmini veriler Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.3. Dünyada kaynaklara göre kurulu gücün ve bu kaynakların toplam üretimdeki payının tahmini [53]

Kaynak \ Yıl	2011	2020	2030	2040
* Kurulu güç (GW)	*	*	*	*
** Enerji kaynağının toplam kurulu güçteki payı	**	**	**	**
Sıvı yakıtlar	394 8%	388 6%	348 5%	320 4%
Doğal gaz	1370 26%	1597 24%	1870 25%	2252 27%
Kömür	1715 33%	1947 30%	1936 26%	1970 23%
Nükleer	369 7%	414 6%	532 7%	602 7%
Hidroelektrik	949 18%	1178 18%	1296 17%	1473 17%
Rüzgar	220 4%	569 9%	750 10%	961 11%
Jeotermal	10 0%	22 0%	41 1%	52 1%
Güneş	69 1%	293 4%	427 6%	551 7%
Diğer yenilenebilir kaynaklar	105 2%	169 3%	222 3%	275 3%
Genel Toplam	5201 100%	6577 100%	7422 100%	8456 100%

Tablo 2.4. Dünyada kaynaklara göre elektrik üretimi değişim tahmini ve enerji kaynağının toplam üretimdeki payı (TWh) [53]

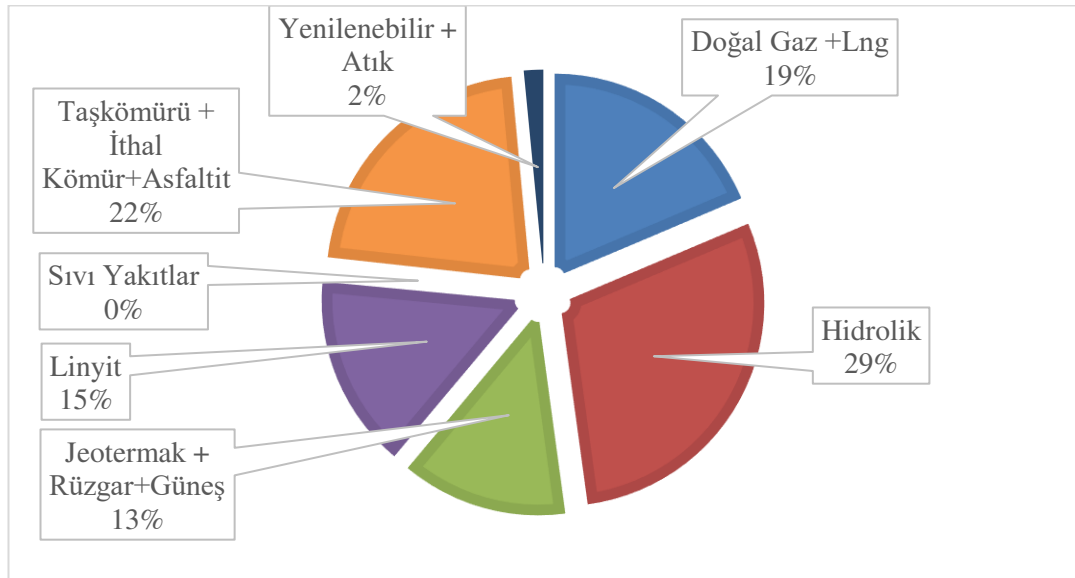
Kaynak \ Yıl	2011	2020	2030	2040
* Üretim miktarı (TWh)	*	*	*	*
** Enerji kaynağının toplam üretimdeki payı	**	**	**	**
Sıvı yakıtlar	992 5%	856 3%	618 2%	564 2%
Doğal gaz	4626 22%	5257 20%	7475 24%	10141 28%
Kömür	8635 41%	9727 38%	10121 33%	10621 29%
Nükleer	2518 12%	3051 12%	3946 13%	4501 12%
Hidroelektrik	3488 16%	4294 17%	4816 16%	5571 15%
Rüzgar	447 2%	1312 5%	1863 6%	2452 7%
Jeotermal	67 0%	139 1%	309 1%	395 1%
Güneş	65 0%	448 2%	722 2%	962 3%
Diğer yenilenebilir kaynaklar	364 2%	681 3%	973 3%	1247 3%
Genel Toplam	21202 100%	25765 100%	30843 100%	36454 100%

2.3. Ülkemizde Elektrik Üretimi ve Akıllı Şebeke Çalışmaları

Yenilenebilir enerjinin depolanması maliyetli olduğu için şebeke sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla büyük güç üretim tesislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Genellikle buralarda enerji kaynağı olarak fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Ülkemizde ise fosil yakıtların az bulunmasından dolayı enerjide dışa bağımlılık oranı yüksektir. 2019 yılında üretilen toplam 304251 GWh'lık enerjinin kaynaklara göre dağılım oranları Şekil 2.21'de verilmiştir. Buna göre, tamamı ithal edilen ithal kömür ve doğalgazın toplam üretimdeki payı %41 olmuştur.

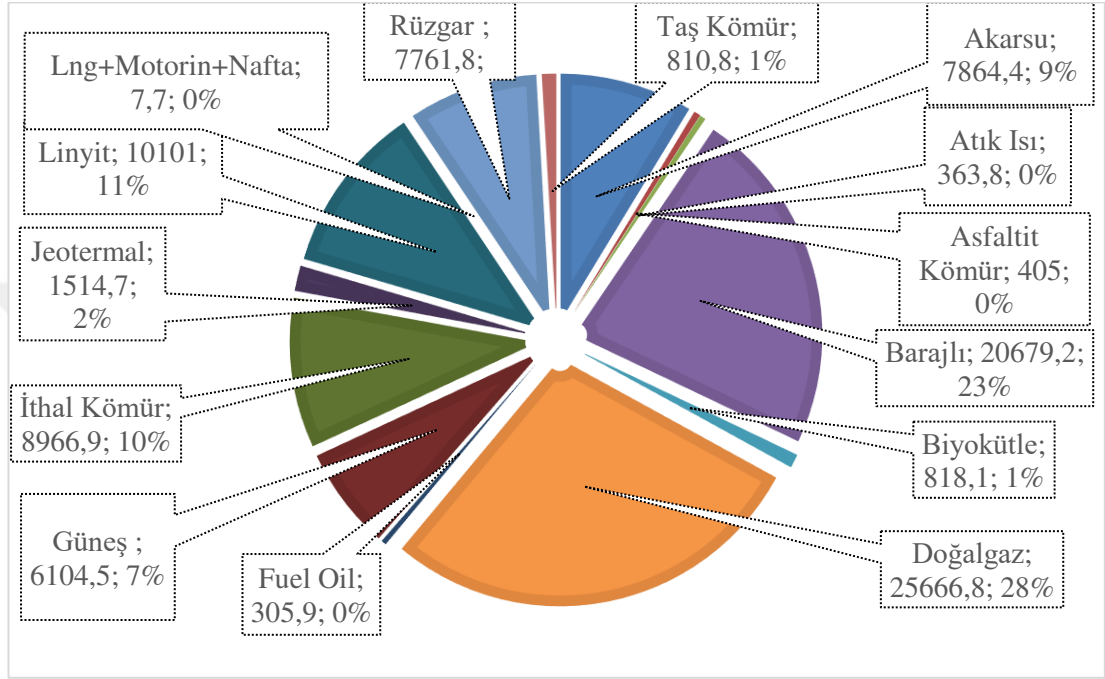
Ülkemiz hidroelektrik yatırımları konusunda oldukça iyi konumdadır. 2019 yılında toplam üretimin %29'u hidroelektrik santralinden elde edilmiştir. 2020 yılı itibariyle 100 MW üzerinde 11 adet santralin yapımı devam etmektedir. Bunlar toplamda takriben 5000 MW'lık kurulu güce sahip olacaklardır.

Ülkemizde elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla enerji ihtiyacı çok daha fazla artacaktır. Artan talebi karşılamak amacıyla 4800 MW kurulu güce sahip Mersin Akkuyu Nükleer Enerji Santralinin 2023 yılında bir bölümü devreye alınacaktır. Ardından 4480 MW güce sahip Sinop Nükleer Enerji Santralinin 2023 yılında ilk kısmının açılması planlanmıştır [54].



Şekil 2.21. 2019 yılı enerji üretiminin kaynaklara göre dağılımı

Türkiye'nin 2020 yılı Mart Ayı sonu itibariyle kaynaklara göre kurulu güç bilgileri Şekil 2.22'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Buna göre, Türkiye'nin toplam kurulu gücü 2020 Mart ayı itibariyle 91,37 GW'tır. Bunun %48,9'luk kısmı rüzgâr, güneş, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir kaynaklardan oluşmaktadır [55].



Şekil 2.22. Türkiye Mart 2020 itibariyle kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı (%)

2019 yılı Temmuz ayında yayınlanan 2019-2023 yılları arasını kapsayan 11. Kalkınma Planında enerji alanında alınan kararlardan bir kısmı şöyledir [56]:

- Akıllı şebeke uygulamaları yaygınlaştırılacaktır.
- Piyasa altyapısı talep tarafı katılımını sağlayacak şekilde düzenlenecektir.
- Elektrik şebekesi esnek hale getirilecektir.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimi arttırılacak, şebekeye güvenli bir şekilde entegre edilmeleri için gerekli teknik altyapı çalışmaları yapılacaktır.
- Yenilenebilir üretimin şebeke sınırlandırmalarını ortadan kaldırmak için enerji depolama tesisleri kurulacaktır.
- Kendi enerjisini üreten çok daha verimli binaların yaygınlaşması sağlanacaktır.

- İşletmelerin kendi ihtiyaçlarını karşılaması amacıyla lisanssız güneş ve rüzgâr enerji santrali uygulamaları yaygınlaştırılacaktır.
- Akıllı sayaç ve uzaktan okuma sistemleri yaygınlaştırılacaktır.
- Kayıp oranı azaltılacaktır.
- Enerji sisteminin güvenliğini sağlamak için Siber Güvenlik Operasyon Merkezi kurulacaktır.
- Milli Akıllı Şebeke Yönetim Sistemi (Milli SCADA) geliştirilmesi için çalışmalar yapılacaktır.
- Akkuyu Nükleer Güç Santralının ilk ünitesi 2023 yılında devreye alınacaktır. Bunun yanında 2 Nükleer Güç Santrali daha kurulacaktır.
- Yenilenebilir enerjinin toplam üretimdeki payı %32,5'ten (2018 yılı) %38,8'e çıkarılacaktır.
- Elektrik kurulu gücü 109,474 GW düzeyine çıkarılacaktır.

Ülkemizde akıllı şebeke vizyonunun ve yol haritasının belirlenmesi açısından EPDK ve ELDER tarafından hazırlanan “Türkiye Akıllı Şebekeler 2023 Vizyon ve Strateji Belirleme Projesi Özet Raporu” da oldukça önemlidir. Bu raporda ulusal enerji politikaları doğrultusunda ülkemizin akıllı şebekeden beklentileri şöyle ifade edilmektedir [17]:

- 2035 yılı itibariyle kaçak elektrik kullanımının ortadan kalkması, iletim ve dağıtımdaki teknik kayıpları asgari seviyeye indirmek.
- Tedarik sürekliliğini OECD ülkelerinin üzerine çıkarmak.
- Entegre yük yönetimi ile enerjinin kalite ve süreklilik standartlarını yükseltmek.
- İşlemleri dijitalleşme ile otomatik hale getirip servis hız ve verimliliğini arttırmak.
- Kullanıcıları piyasaya dahil etmek ve kullanıcılara gerçek zamanlı veri sağlamak.
- Entegre varlık yönetimi ile doğru yatırımı kaynakları israf etmeden doğru zamanda yapmak.
- Esnek tüketici tarifesi ile kullanıcının enerji maliyetini düşürmek
- Gerçek zamanlı talep izleme ile üretim verimliliğini arttırmak.

- Gelişmiş talep tarafı yönetimi ile puant talebini düşürüp uygun bir zaman dilimine kaydırmak.
- Elektrikli araçlar, çatı tipi güneş paneli ve depolama sistemleri gibi gelecekte yaygınlaşma ihtimali güçlü olan uygulama alanları için teknolojik altyapıyı yaygınlaştırmak.
- Kullanılacak teknolojilerde yerli tasarım ve üretimi gerçekleştirmek.

Aynı rapora göre 2035 yılı için önerilen somut hedefler ise şöyledir;

- Dağıtık üretimin şebeke altyapısının sağlanması ve çatı tipi güneş santrallerinde 40 GW kurulu güce ulaşılması,
- Akıllı sayaç altyapısının yaygınlaştırılması. Bu kapsamda dağıtılan enerjinin ve müşterilerin en az %80'ini kapsayan gelişmiş ölçüm altyapısı kurulması,
- Ulusal akıllı sayaç haberleşme protokolünün oluşturulması,
- Talep tarafının en az %40'ının piyasaya katılarak 10 GW'lık talep tarafı yönetimi yapılması,
- Şebekenin önemli noktalarında izlenebilirlik, kontrol edilebilirlik ve kendi kendine onarma işlevlerinin yaygınlaştırılması,
- 10 GW çatı tipi güneş santrali, 10 GW büyük ölçekli depolama, 5 GW şebeke yönetimi, 10 GW talep tarafı yönetiminden oluşan 35 GW'lık esneklik kaynağının şebekeye dahil edilmesi,
- Şebeke varlıklarının kapasite kullanım verimliliğinin %20 arttırılması,
- Operasyonel verimliliğin %20 oranında arttırılması,
- Üretim ve iletim kayıpları dahil olmak üzere kayıp-kaçak oranının %8 seviyelerine indirilmesi,
- Terör saldırılarına ve doğal afetlere karşı şebekenin dayanıklılığının sağlanması,
- İşletmeciliğin veri ve analitik odaklı hale getirilmesi,
- Uluslararası standartlara uygun olarak yeni standartlar ve haberleşme protokollerinin oluşturulması,
- Elektriğin yanında doğalgaz ve su altyapılarının birlikte ele alınması,
- Yaklaşık 15 milyon elektrikli araç için kapasite yönetimi ile birlikte yeni şarj istasyonlarının şebekeye bağlanması,
- Yeni binaların yarısının mikro şebeke özelliğine sahip olarak inşa edilmesi,

- Şebekede gelişmiş ekipmanların tercih edilmesi,
- Piyasa yapısının ve mevzuatın akıllı şebeke uygulamalarının önünü açacak nitelikte yeniden şekillendirilmesi,
- Akıllı şebeke teknolojilerini geliştirmeye ve ihracata yönelik desteklerin sağlanması,
- Akıllı sayaç altyapısının %90 oranında yerli üretim ile tesis edilmesi.

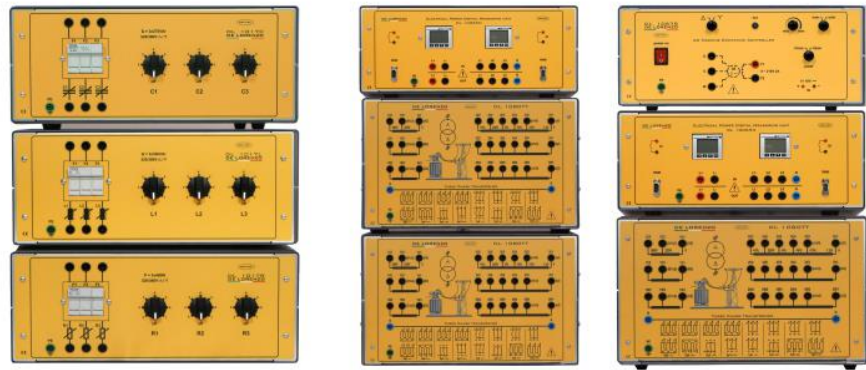


3. MATERYAL VE YÖNTEM

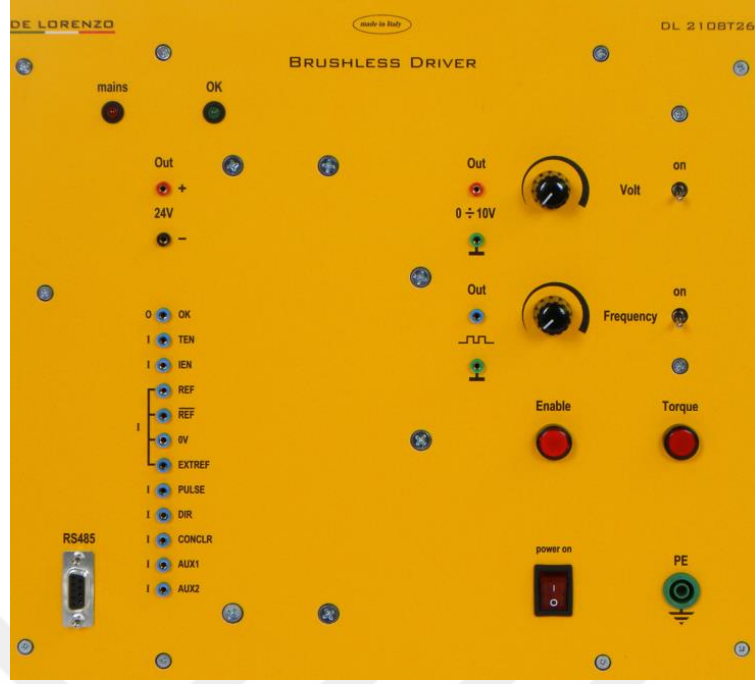
Bu kısımda çalışmada kullanılan akıllı şebeke deney seti tanıtılmış ve kullanılan ekipmanlar hakkında bilgi verilmiştir.

3.1. Merkezi Kontrol ve Veri Toplama Sistemi

Elektriğin üretilmesinden tüketilmesine kadar her aşamasında sisteme ait hat akım ve gerilim değerleri, aktif, reaktif ve görünür güçler, güç faktörü, frekans gibi değerler merkezi kontrol ve veri toplama birimi (SCADA) üzerinden izlenmektedir. Ayrıca, bu sistem üzerinden kesicilerin konumu değiştirilebilmekte, elektrik makinelerin tork ve hız değerleri izlenebilmekte, fotovoltaiik panel için ışıınım miktarı ayarlanabilmekte, senkron ve asenkron makineleri döndüren servo motorların kontrolü yapılabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan De Lorenzo firmasına ait akıllı şebeke deney setinin genel görünümü Şekil 3.1’de, SCADA ekranına ait ana panel ise Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. De Lorenzo firmasına ait akıllı şebeke deney seti genel görünümü



Şekil 3.4. Servo motor sürücüsü kontrol paneli

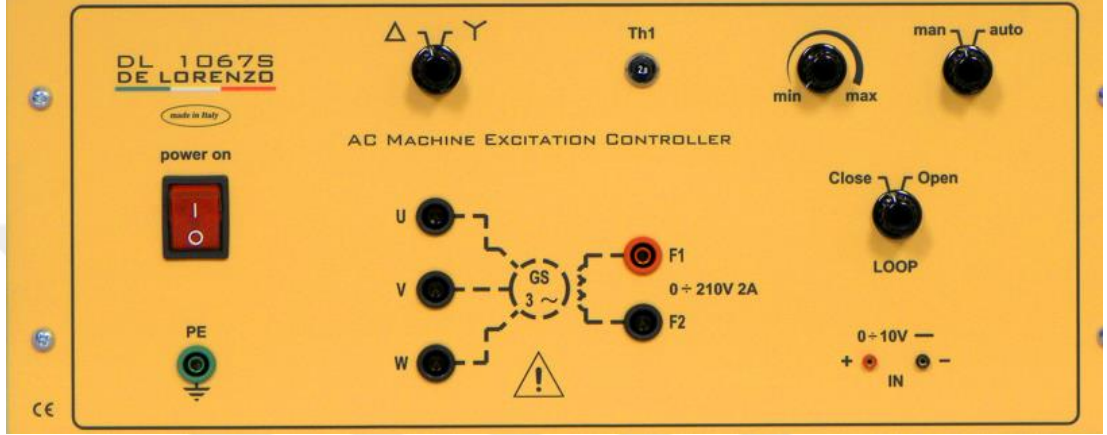
3.2.1. Hidroelektrik Üretim Birimi

Hidroelektrik santrali temsil eden birim Şekil 3.5'te gösterilen bir adet senkron jeneratör ile elektrik üretimi sağlamaktadır. Jeneratörün rotoru 1 kW gücünde servo motor ile döndürülmektedir. SCADA ekranından jeneratörün uyarım gerilimi kontrol edilerek çıkışta istenilen düzeyde gerilim elde edilmektedir. Ayrıca, senkron jeneratörü tahrik eden servo motorun devir sayısını servo sürücüsü yardımıyla ayarlayarak istenilen düzeyde frekans elde edilmektedir. 4 kutuplu olan senkron makineden 50 Hz frekansa sahip gerilim elde etmek için jeneratör milinin 1500 RPM hızda döndürülmesi gerekmektedir.



Şekil 3.5. Deneylerde kullanılan senkron makine

Jeneratörün alan sargıları Şekil 3.6’da gösterilen “AC makine uyartım denetleyicisi” ile beslenmektedir. Bu denetleyici, uyartım sargıları için 0-210 V gerilim ve 0-2 A arası akım sağlamaktadır. Buradan elde edilen doğru akım senkron makinenin rotorundaki alan sargılarına verilmektedir. Ayrıca senkron jeneratörün U1-V1-W1 uçları çıkışın ölçülüp uyartım gerilimi ile düzenlenebilmesi için bu denetleyiciye bağlanmaktadır.



Şekil 3.6. AC makine uyartım denetleyicisi

Şekil 3.7’de gösterilen jeneratör senkronizasyon rölesi senkron jeneratörün şebekeye bağlanması için gerekli sabit gerilim, frekans ve faz açısı şartlarını sağlaması için kullanılmaktadır. Aldığı gerilim bilgisine göre senkron jeneratör gerekli şartları sağladığında röle çıkışları aktif olur ve kesicinin kapatmasını sağlar.

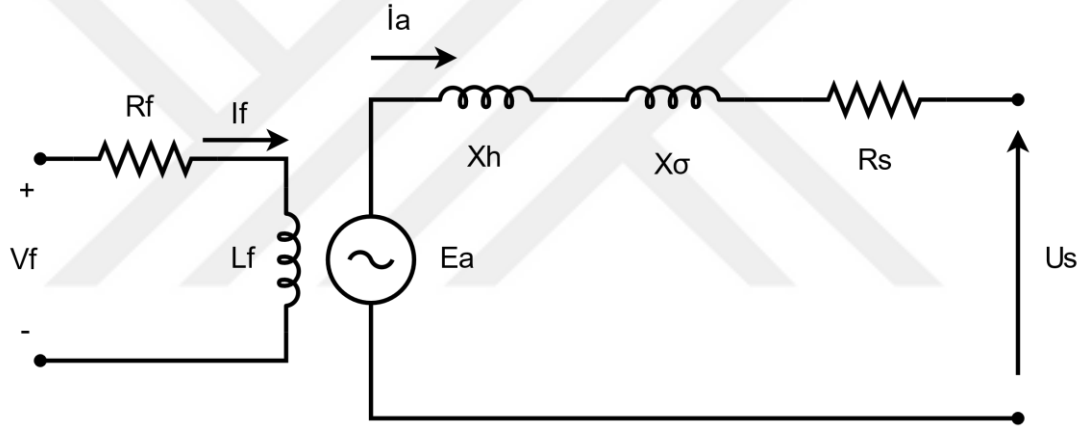


Şekil 3.7. Jeneratör senkronizasyon rölesi

Deneylerde kullanılan senkron makinenin etiket değerleri Tablo 3.1’de verilmiş olup eşdeğer devresi Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Senkron makine etiket değerleri (rotoru sargılı)

50 Hz Çalışma Frekansında		60 Hz Çalışma Frekansında	
Nominal endüvi gerilimi 220/380 Vrms (Δ/Y)	Nominal endüvi akımı 2,1/1,2 A (Δ/Y)	Nominal endüvi gerilimi 220/380 Vrms (Δ/Y)	Nominal endüvi akımı 2,4/1,39 A (Δ/Y)
Nominal güç 0,8 KVA	Güç faktörü $\cos\varphi=1$	Nominal güç 0,9 KVA	Güç faktörü $\cos\varphi=1$
Anma hızı 1500 devir/dakika	Frekans 50 Hz	Anma hızı 1800 devir/dakika	Frekans 60 Hz
Max. alan gerilimi 220 V	Max. alan akımı 0,9 A	Max. alan gerilimi 220 V	Max. alan akımı 0,9 A



Şekil 3.8. Senkron makine tak faz eşdeğer devresi

Senkron makinenin eşdeğer devresindeki elemanlar şöledir:

V_f = Alan gerilimi (uyartım gerilimi)

E_a = Endüvi gerilimi

U_s = Faz gerilimi

V_n = Nominal faz gerilimi (380 V)

I_f = Alan akımı (uyartım akımı)

I_a = Endüvi akımı

R_f = Uyarma sargı direnci

L_f = Uyarma sargı endüktansı

X_h = Stator mıklatislanma reaktansı

X_{σ} = Stator kaçak akı reaktansı

$X_s = X_h + X_{\sigma}$ = Senkron reaktans

R_s = Stator faz sargı direnci

Statorun senkron reaktansı Denklem (3.1)'e göre hesaplanmıştır. Yüksüz çalışma durumunda, jeneratörün faz çıkışları nominal gerilime ($V_n=380$ V) ulaşması için 103,8 V uyarım gerilimi (V_f) uygulanmıştır. Bu durumda uyarım akımı (I_e), 0.47 A olarak ölçülmüştür. Senkron jeneratör yıldız bağlandığında ve faz uçları kısa devre yapıldığında, I_e değeri yüksüz durumda nominal gerilimi üretirken sahip olduğu değere getirildiğinde ($I_e=0.47$ A) elde edilen faz akımı (I_{k0}) 0,93 A olmaktadır. Bu durumda statorun senkron reaktansı (X_s), 235.91 Ω olarak elde edilir ($L_s=0,75$ H). Senkron makine endüvi sargı direnci DA çalışma durumunda 15 Ω olarak ölçülmüştür. $R_{A_ac}=1.1 \cdot R_{A_DA}$ eşitliği [57] kullanılarak AA'da bu değer 16.5 Ω olarak elde edilmiştir. Ayrıca, RLC metre ile rotor alan sargısı direnci (R_f) 216.8 Ω ve endüktansı (L_f) 6.65 H olarak ölçülmüştür.

$$X_s = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot I_{k0}} \quad (3.1)$$

3.2.2. Rüzgâr Enerjisi Üretim Birimi

Rüzgâr enerjisi üretim birimi Şekil 3.9'da gösterilen 1 adet 1.5 kW gücünde asenkron makine, rüzgar gücünü temsilen jeneratörü tahrik eden 1 kW gücünde servo motor, rüzgar hızını ölçmek amacıyla kullanılan 1 adet anemometre, rüzgar yönünü tayin eden 1 adet rüzgar oku ve rüzgar hızını ayarlamak amacıyla kullanılan 1 adet rüzgar simülatöründen oluşmaktadır. Burada kullanılan asenkron makineye ait etiket değerleri Tablo 3.2'de belirtilmiştir.



Şekil 3.9. Deneyde kullanılan asenkron makine

Tablo 3.2. Asenkron makine etiket değerleri (sincap kafesli)

50 Hz Çalışma Frekansında		60 Hz Çalışma Frekansında	
Nominal endüvi gerilimi 230/400 Vrms (Δ/Y)	Nominal endüvi akımı 6,4/3,7 A (Δ/Y)	Nominal endüvi gerilimi 230/400 Vrms (Δ/Y)	Nominal endüvi akımı 5,7/3,3 A (Δ/Y)
Nominal güç 1,5 kW	Güç faktörü $\cos\phi=0,73$	Nominal güç 1,5 kW	Güç faktörü $\cos\phi=0,8$
Anma hızı 1420 RPM	Frekans 50 Hz	Anma hızı 1720 RPM	Frekans 60 Hz

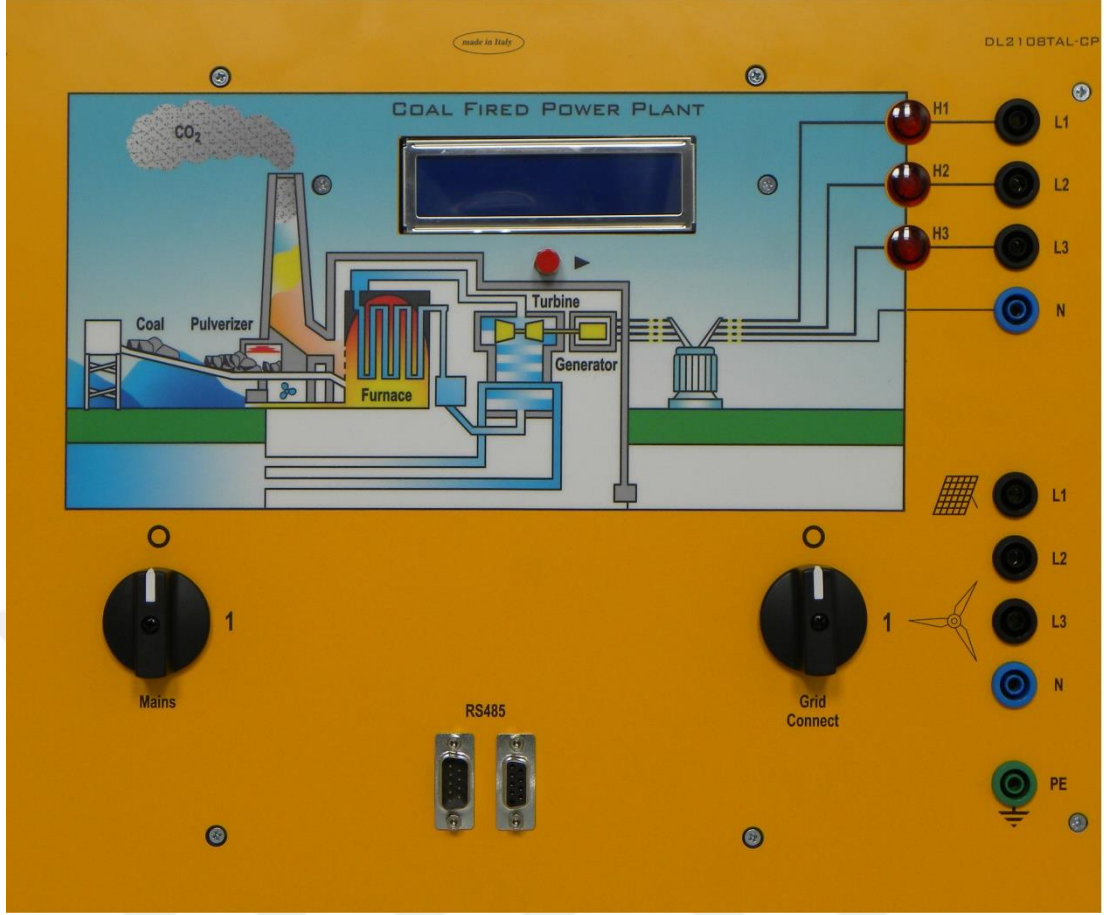
Rüzgar'dan elde edilen gücü etkin kullanabilmek için hatve açısı (pitch angle) ve nacel sapma açısı (yaw angle) kontrolüne ihtiyaç duyulmaktadır. Sapma açısı kontrol edilerek nacelin rüzgâra dönmesi ve böylece rüzgârdan maksimum gücün elde edilmesi sağlanmaktadır. Hatve açısı kontrol edilerek rüzgârın kanatlara çarpma açısı (angle of attack) ayarlanmakta ve böylece kanat hızının kontrolü sağlanmaktadır. Sistemde SCADA ekranı üzerinden hatve açısı (pitch angle) kontrolü yapılmaktadır. En yüksek güç, hatve açısı 31.5^0 iken elde edilmiştir.



Şekil 3.10. Hatve açısı kontrol ekranı

3.2.3. Termik Enerji Üretim Birimi

Termik santral; Şekil 3.11’de gösterilmiş olup doğrudan şebekeden beslenen 400 V fazlar arası gerilime sahip 3 fazlı güç kaynağı ile temsil edilmektedir. Üzerinde bulunan göstergede yenilenebilir enerji kaynakları şebekeye dahil edildiğinde sera gazı salınımındaki azalma oranı gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Termik santral ünitesi

3.2.4. Güneş Enerjisi ile Elektrik Üretim Birimi

Güneş enerji sistemi 1 adet 90 Wp gücünde güneş panelinden, 1 adet şebekeye bağlı evirici (grid tie power invertor), 4 adet 300 W gücünde halojen lambalardan oluşmaktadır. Güneş paneli ve halojen lambalar Şekil 3.13'te, şebeke bağlantılı inverter ise Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Güneş paneline ait etiket değerleri Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Güneş paneli etiket değerleri (1000 W/m² ışıınım ve 25 °C hücre sıcaklığı koşullarında)

Maksimum güç (Pmax)	90 Wp
Maksimum güçteki gerilim (Vpmax)	18,37 V
Maksimum güçteki akım (Ipmax)	4,90 A
Açık devre gerilimi (Voc)	22,05 V
Kısa devre akımı (Isc)	5,15 A

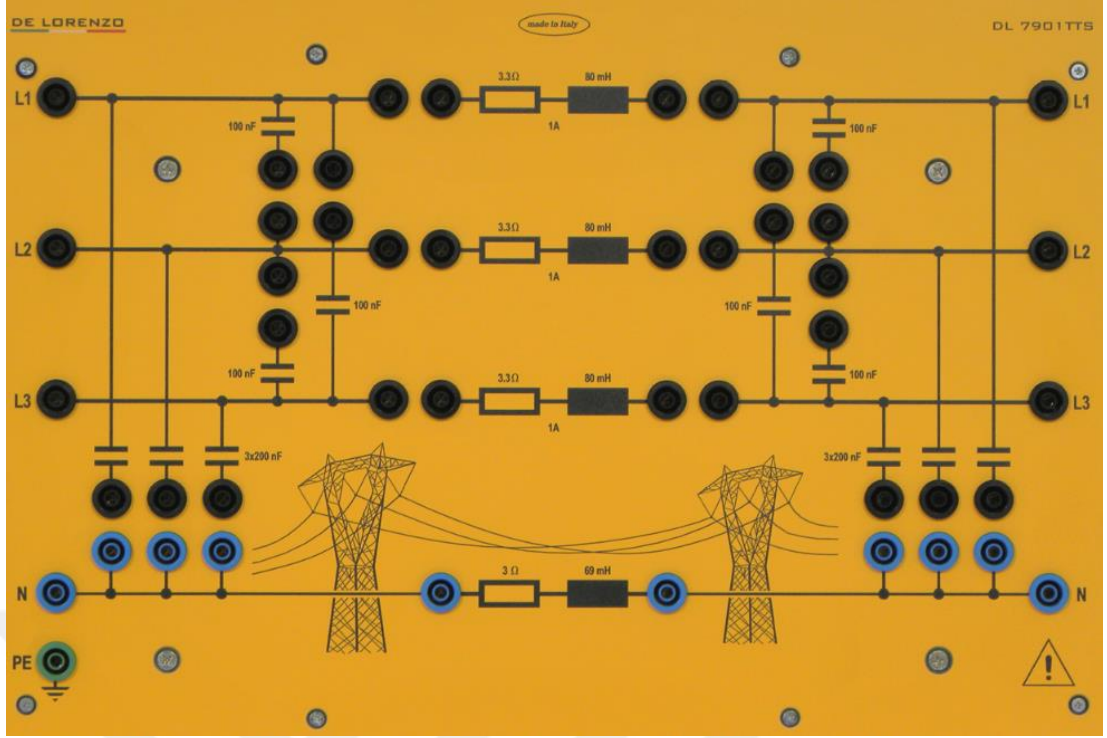
Güneş sisteminde kullanılan şebekeye bağlı eviricinin özellikleri şöyledir:



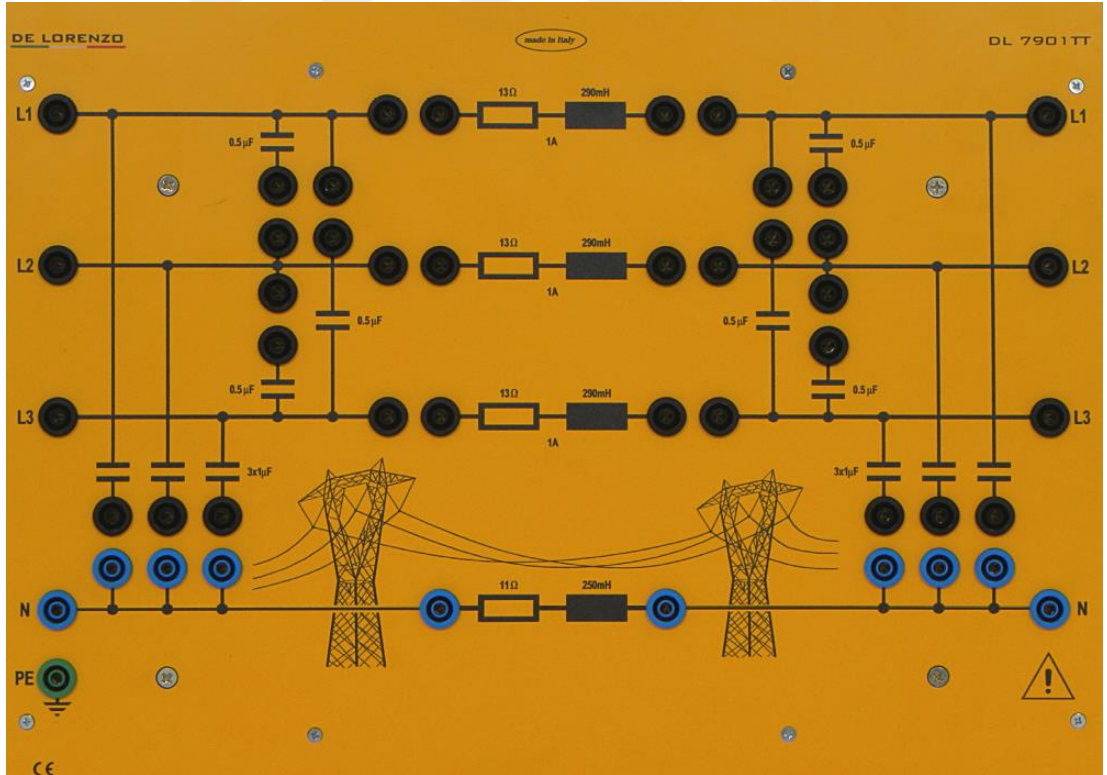
Şekil 3.13. Güneş paneli ve güneş simülatörü

3.3. İletim Birimi

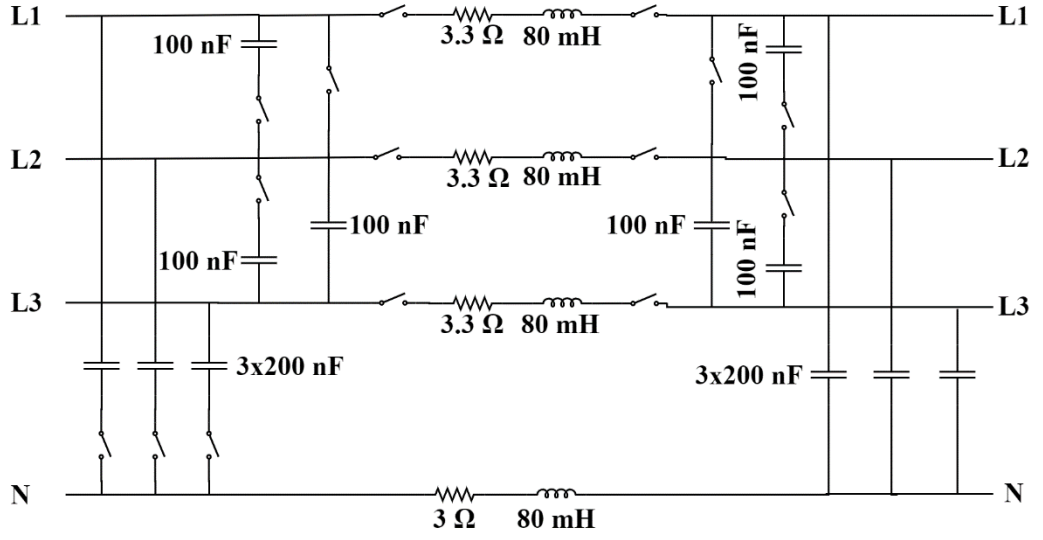
Sistemde iki farklı havai iletim hattını simüle eden modül mevcuttur. 1:1000 oranında ölçek faktörüne sahip olan modüllerden ilki Şekil 3.14’te gösterilen 100 km uzunluğundaki 380 kV-1000 A iletim hattını, ikincisi ise Şekil 3.15’te gösterilen 360 km uzunluğundaki 380 kV-1000 A iletim hattını temsil etmektedir. Bu iletim hattı modeline ait eşdeğer devre modelleri sırasıyla Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de verilmiştir.



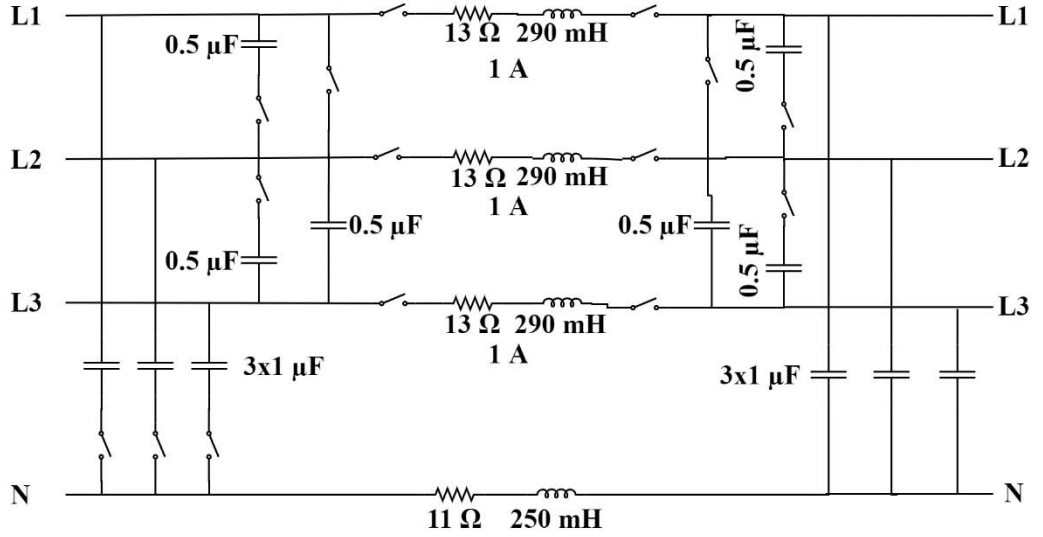
Şekil 3.14. 100 km uzunluğundaki 380 kV, 1000 A iletim hattını temsil eden modül



Şekil 3.15. 360 km uzunluğundaki 380 kV, 1000 A iletim hattını temsil eden modül



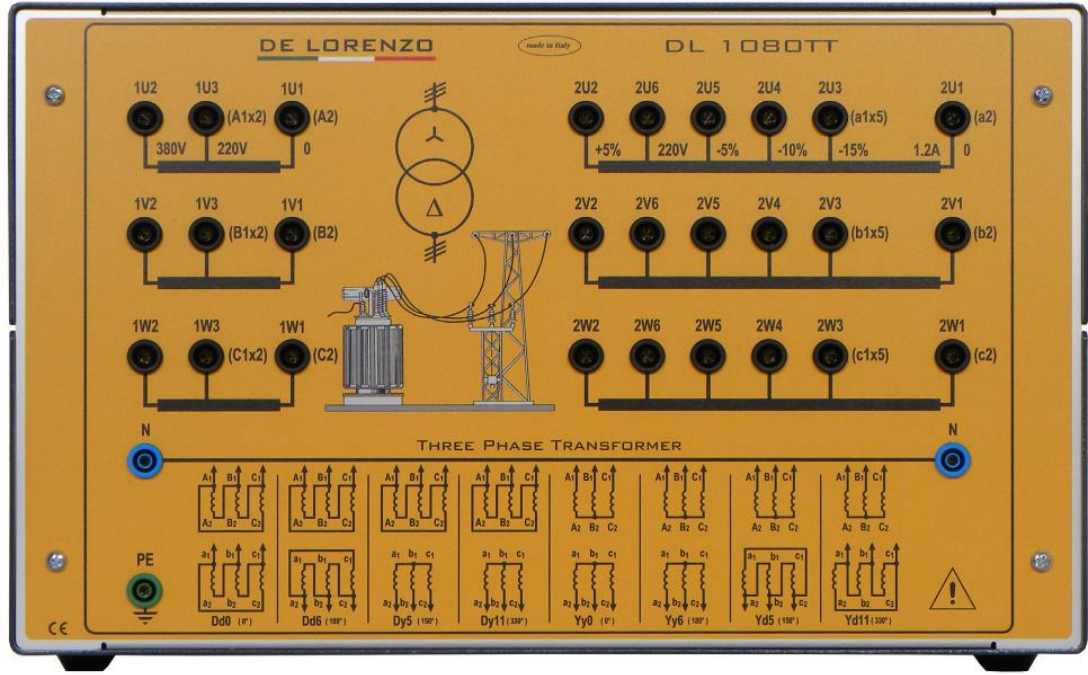
Şekil 3.16. 100 km uzunluğundaki 380 kV, 1000 A iletim hattı devre şeması



Şekil 3.17. 360 km uzunluğundaki 380 kV, 1000 A iletim hattı devre şeması

3.4. Trafo Birimi

Sistemde senkron, asenkron üretim birimleri ve yük tarafı için birer adet Şekil 3.18’de gösterilen trafo kullanılmaktadır. 220 V giriş geriliminin %5, %0, %-5, %-10 ve %-15’i oranında dönüşüm ile çıkış gerilimi elde edilmektedir. Yıldız ve üçgen bağlantı koşullarına göre iki farklı girişi mevcuttur. Trafoların nominal gücü 800 VA’dır.

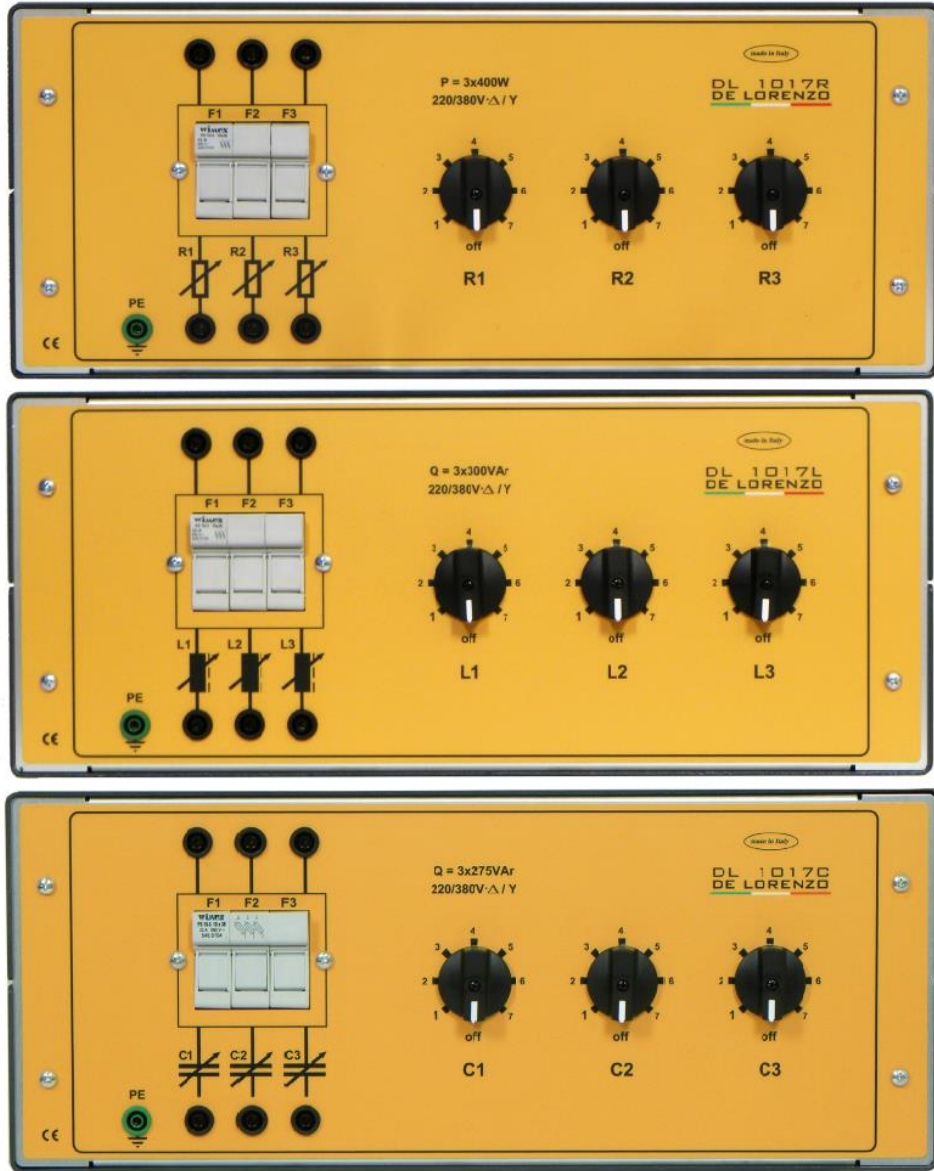


Şekil 3.18. 3 fazlı trafo

3.5. Yükler

Sistemde Şekil 3.19’da gösterildiği üzere her faz için ayrı olmak üzere omik, endüktif ve kapasitif özellikte 3 farklı yük bulunmaktadır. Yüklerin her biri 7 kademedan oluşmaktadır. Aynı kademedeki ve özellikteki yükler birbirine eş olarak tasarlanmış, ölçüm sonucunda da yakın değerler elde edilmiştir. Her faz için omik yüklerin ölçülen değerleri Tablo 3.4’te, endüktif yüklerin değerleri Tablo 3.5’te ve kapasitif yüklerin değerleri Tablo 3.6’da gösterilmiştir.

Dirençlerin tek faz ve 3 fazda sahip oldukları maksimum aktif güç 1200 W, endüktif yüklerin sahip oldukları maksimum reaktif güç 890 VAR, kapasitif yüklerin tek faz veya üç fazlı bağlantıda sahip oldukları maksimum reaktif güç 825 VAR’dır. Anma gerilimi; yıldız bağlantıda 400 V, üçgen bağlantıda 230 V’tur.



Şekil 3.19. Omik, endüktif ve kapasitif yükler

Tablo 3.4. Anahtar konumuna göre her faz için ölçülen direnç değerleri

Anahtar Konumu	R1 (Ω)	R2 (Ω)	R3 (Ω)	Faz başına düşen maksimum güç (W)
1. Kademe	1066	1058	1056	46
2. Kademe	752	748	746	65
3. Kademe	440	438	438	110
4. Kademe	304	300,8	302	160
5. Kademe	216,4	214,6	215,4	230
6. Kademe	151 Ω	151,2	151,6	330
7. Kademe	125,8	125,8	126,2	400

Tablo 3.5. Anahtar konumuna göre her faz için ölçülen endüktans değerleri

Anahtar Konumu	L1 (H)	L2 (H)	L3 (H)	Faz başına düşen maksimum güç (VAr)
1. Kademe	3,18	3,15	3,24	34
2. Kademe	2,27	2,25	2,32	48
3. Kademe	1,25	1,25	1,27	83
4. Kademe	0,82	0,84	0,84	121
5. Kademe	0,56	0,58	0,58	171
6. Kademe	0,37	0,41	0,39	242
7. Kademe	0,31	0,32	0,32	297

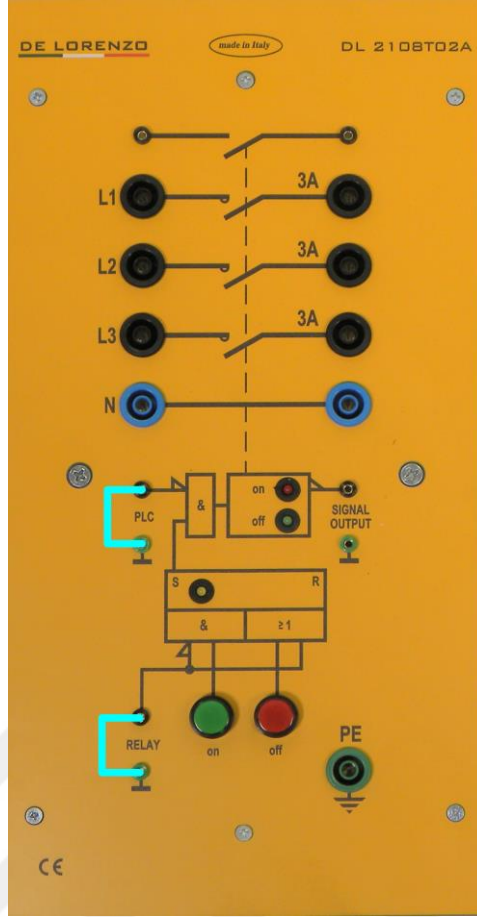
Tablo 3.6. Anahtar konumuna göre her faz için ölçülen kapasitans değerleri

Anahtar Konumu	C1 (μ F)	C2 (μ F)	C3 (μ F)	Faz başına düşen maksimum güç (VAr)
1. Kademe	2,13	2,13	2,13	30
2. Kademe	3,3	3,3	3,33	45
3. Kademe	5,15	5,14	5,15	76
4. Kademe	8,37	8,45	8,46	121
5. Kademe	10,49	10,56	10,59	152
6. Kademe	13,79	13,86	13,9	197
7. Kademe	18,93	18,99	19,04	275

3.6. Kesiciler

Deney setinde 4 adet kesici bulunmaktadır.

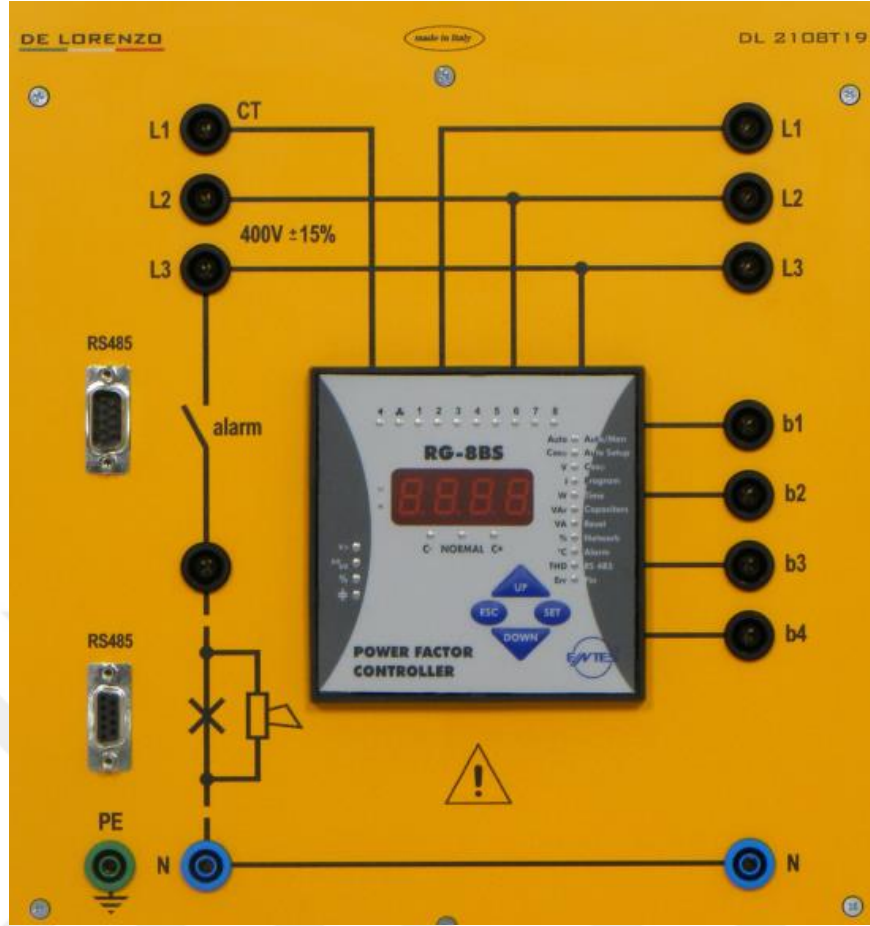
Şekil 3.20’de deneyde kullanılan bir kesici modülü gösterilmiştir. Bunlardan 3 tanesi normalde kapalı iken 1 tanesi normalde açık kontaklıdır. Kesiciler hem üzerindeki butonlara basarak manuel olarak, hem de uzaktan röle ve PLC ile kontrol edilebilmektedir. Fider yönetim rölesi, senkronizasyon rölesi ve haberleşme modülündeki analog çıkışlar üzerinden SCADA arayüzünden kesiciler kontrol edilmektedir.



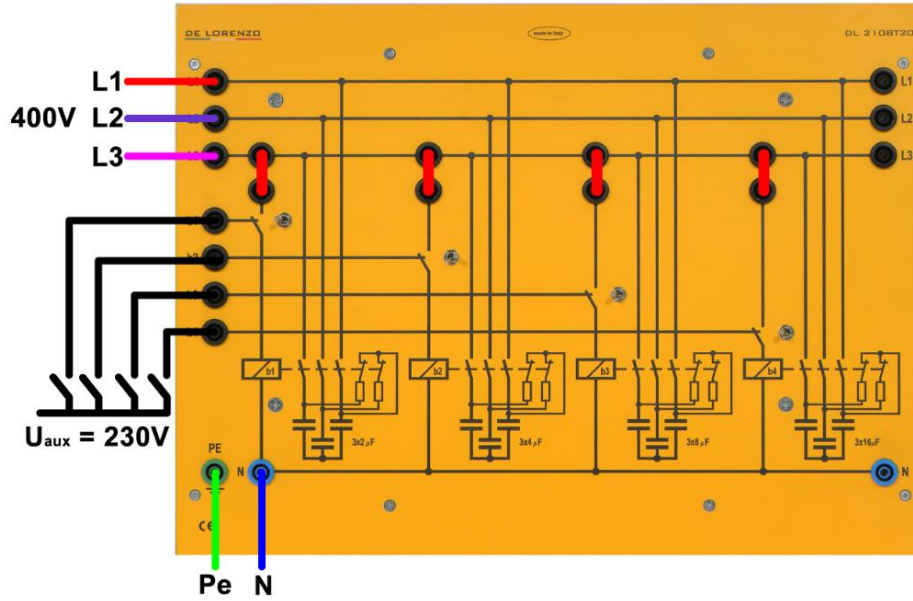
Şekil 3.20. Kesici modülü

3.7. Reaktif Güç Kontrol Birimi ve Kapasitif Banklar

Reaktif güç kontrol biriminde bulunan güç faktörü denetleyicisi ile hattın güç faktörü ölçülür. Denetleyiciden çıkan kontrol işaretleriyle hatta paralel bağlı anahtarlanabilir kapasitif banklar kullanılarak $\cos(\varphi)$ değeri istenilen aralıkta tutulur. Deneylerde kullanılan reaktif güç denetleyicisi Şekil 3.21’de, birlikte kullanıldığı kapasitif bank modülü Şekil 3.22’te gösterilmiştir.

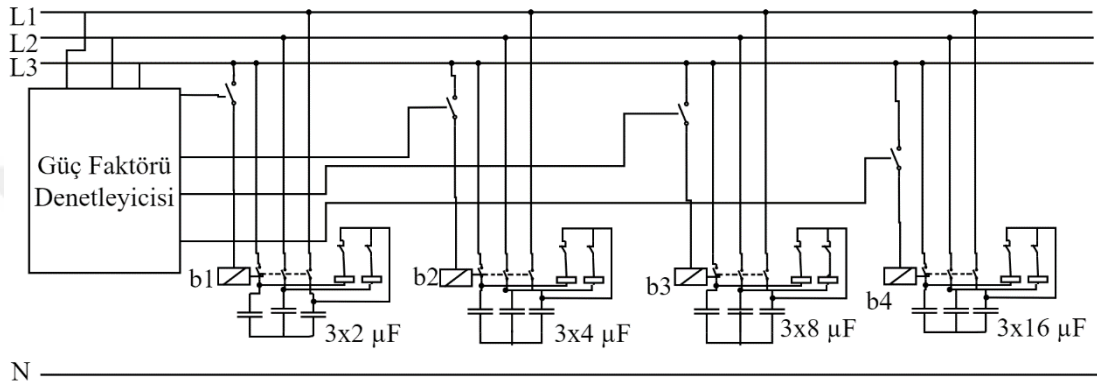


Şekil 3.21. Reaktif güç denetleyicisi



Şekil 3.22. Kapasitif bank modülü

Anahtarlanabilir kapasitif bank biriminde farklı kapasitans değerlerine sahip 4 farklı kapasitör grubu mevcuttur. Bunlar her faz için 2 μF , 4 μF , 8 μF ve 16 μF değerlerine sahip kapasitörlerdir. 50 Hz, 400 V altında 1360 VAr gücündeki endüktif karakterli reaktif gücü kompanse edebilir. Her kapasitör grubun sisteme dahil edilmesi veya çıkarılması güç faktörü denetleyicisi tarafından kontrol edilir. Şekil 3.23'te anahtarlanabilir kapasitif bankların ve güç faktörü denetleyicisinin bağlantı şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Anahtarlanabilir kapasitif bankların ve güç faktörü denetleyicisinin bağlantı şeması

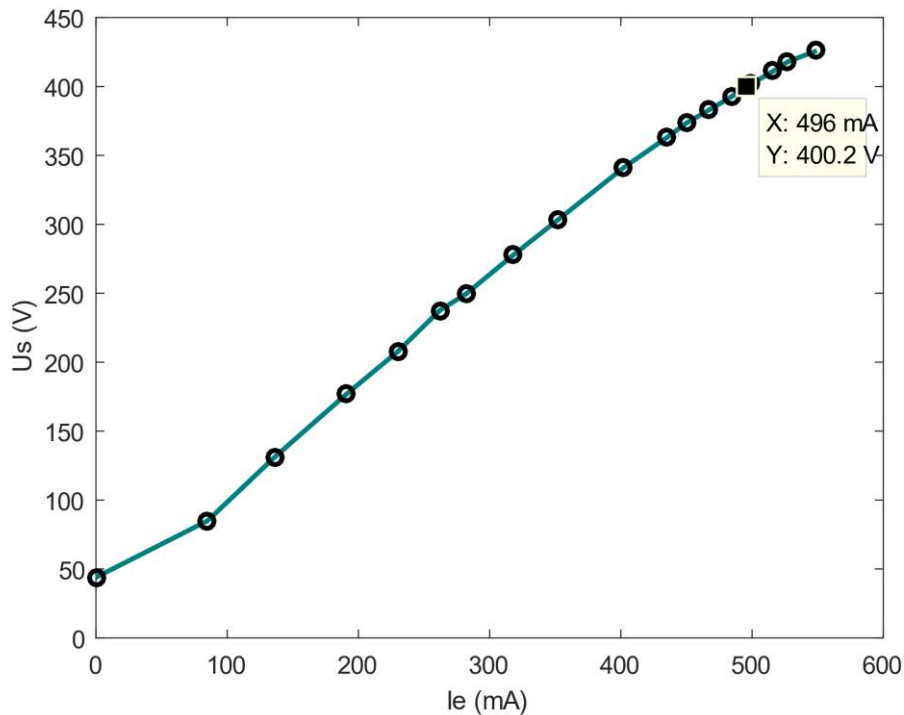
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Deneysel Çalışmalar

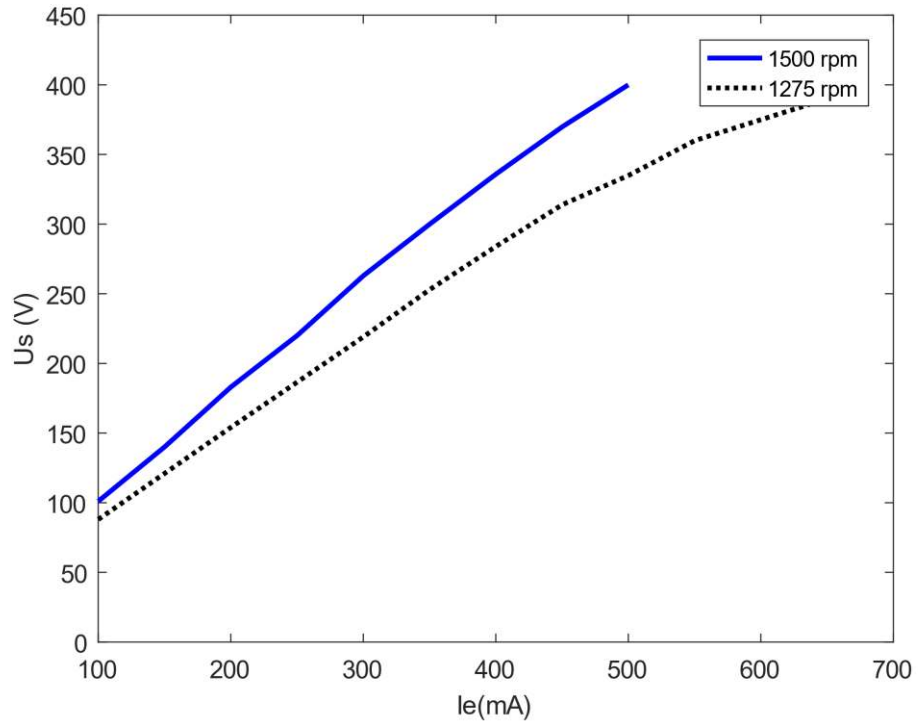
Bu çalışmada uygulamalar De Lorenzo firmasına ait “Akıllı Şebeke Deney Seti” üzerinde yapılmıştır. Winlog isimli SCADA uygulaması üzerinden deneyler yönetilmiş, sonuçlar kaydedilmiştir. Öncelikle akıllı şebekeyi oluşturan birimlere ait deneyler her sistem için ayrı ayrı yapılmış, sonrasında ise tüm sistem birbirine bağlanmıştır.

4.1.1. Hidroelektrik Santral Deneyleri

Hidroelektrik üretim birimini temsil eden senkron jeneratörün nominal uyartım akımını bulmak için yüksüz çalışma deneyi yapılmıştır. Endüvi sargılarında 50 Hz frekansa sahip gerilim elde etmek için ilk olarak jeneratör milinin fırçasız DC servomotor ile 1500 dev/dk hızında döndürülmesi sağlandı. Daha sonra, uyartım akımı yavaş yavaş artırılarak bu noktalara karşılık gelen armatür gerilimi ölçüldü. Senkron jeneratörün yüksüz çalışması durumunda elde edilen I_e - U_s grafiği ve nominal uyartım akımı (I_{en}) Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Buna göre 400 V armatür gerilimi elde etmek için 0,496 A uyartım akımı uygulanmıştır. Ayrıca farklı 1500 ve 1275 d/d rotor dönüş hızlarında elde edilen I_e - U_s grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

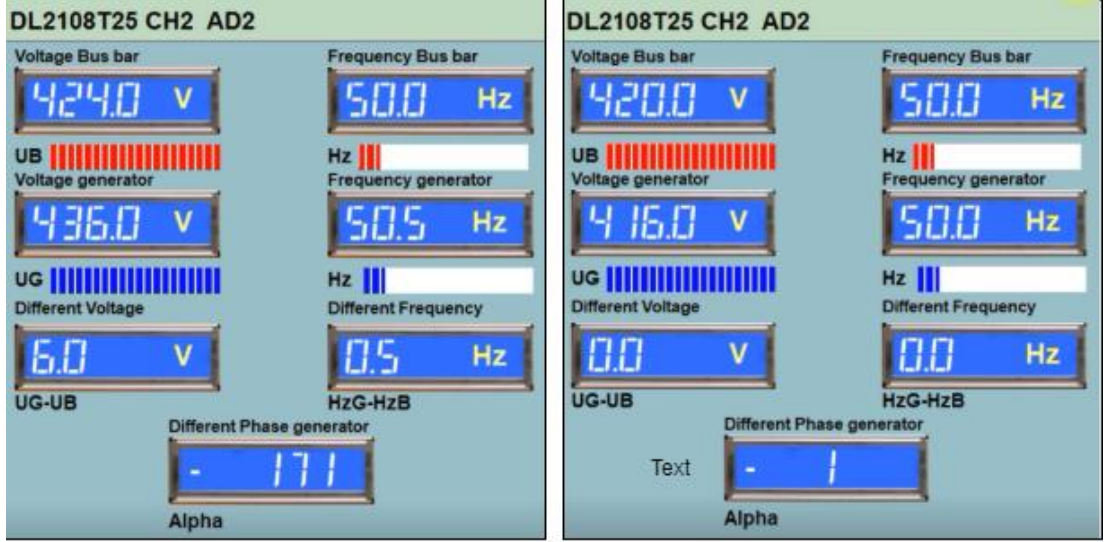


Şekil 4.1. Senkron makine yüksüz çalışma deneyi



Şekil 4.2. Senkron jeneratörün farklı rotor hızlarında I_e - U_s grafiği

Senkron jeneratörün şebekeye bağlanabilmesi için jeneratör şebeke ile aynı gerilim (rms), frekans, faz sırası ve faz açısına sahip olmalıdır. Frekans rotorun devir sayısı ile ayarlanmakta olup jeneratör rotoru 1500 dev/dak hızda döndürüldüğünde 50 Hz frekans elde edilmektedir. Sabit gerilim, uyartım modülü ile, faz sırası bağlantı şekli ile ayarlanmaktadır. Şebeke ile senkron jeneratörün eşleştirilmesi ise senkronizasyon rölesi ile sağlanmaktadır. Rölenin senkronizasyonu sağlaması; gerilim farkı (ΔU_B) en fazla %20, frekans farkı (Δf) en fazla %0,6 olduğunda açılma süresinin en az 5 sn boyunca 20° 'nin altında olması şartlarına bağlanmıştır. Senkron jeneratörün şebekeye bağlanmasından önce ve sonra jeneratör ve şebeke durumuna ait bara üzerindeki gerilim, frekans ve faz açısı değerleri Şekil 4.3'te verilmiştir.



Senkronizasyon Öncesi

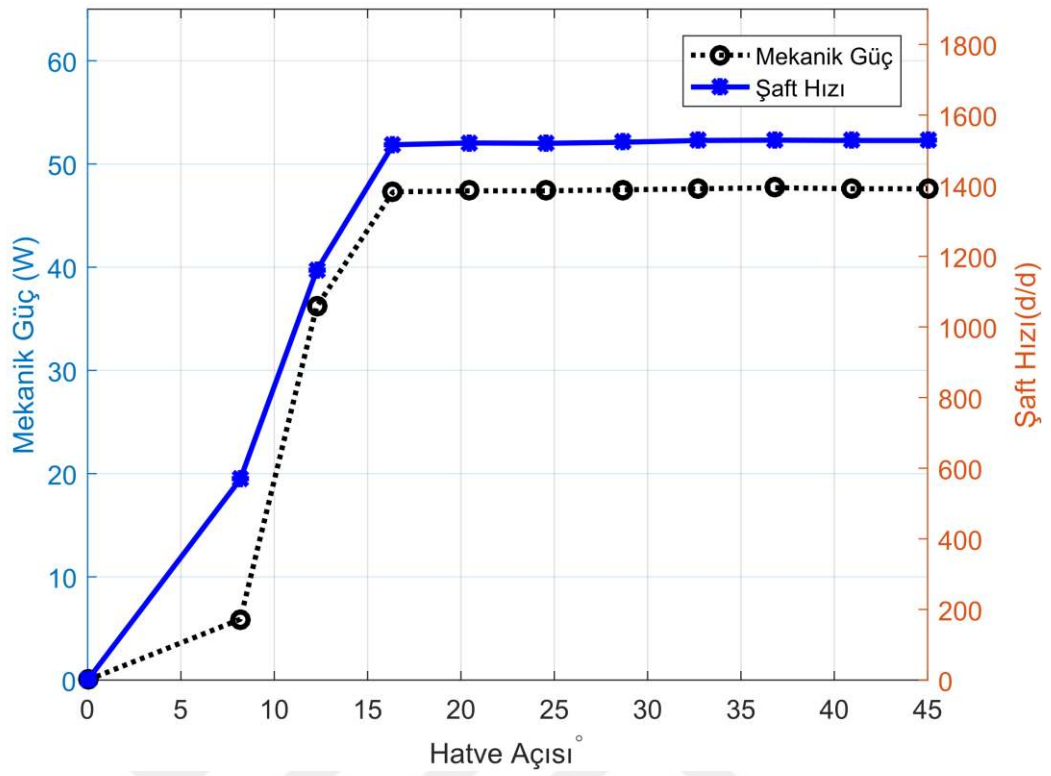
Senkronizasyon Sonrası

Şekil 4.3. Senkron jeneratörün şebekeye bağlanmasından önce ve sonra jeneratör ve şebeke durumu

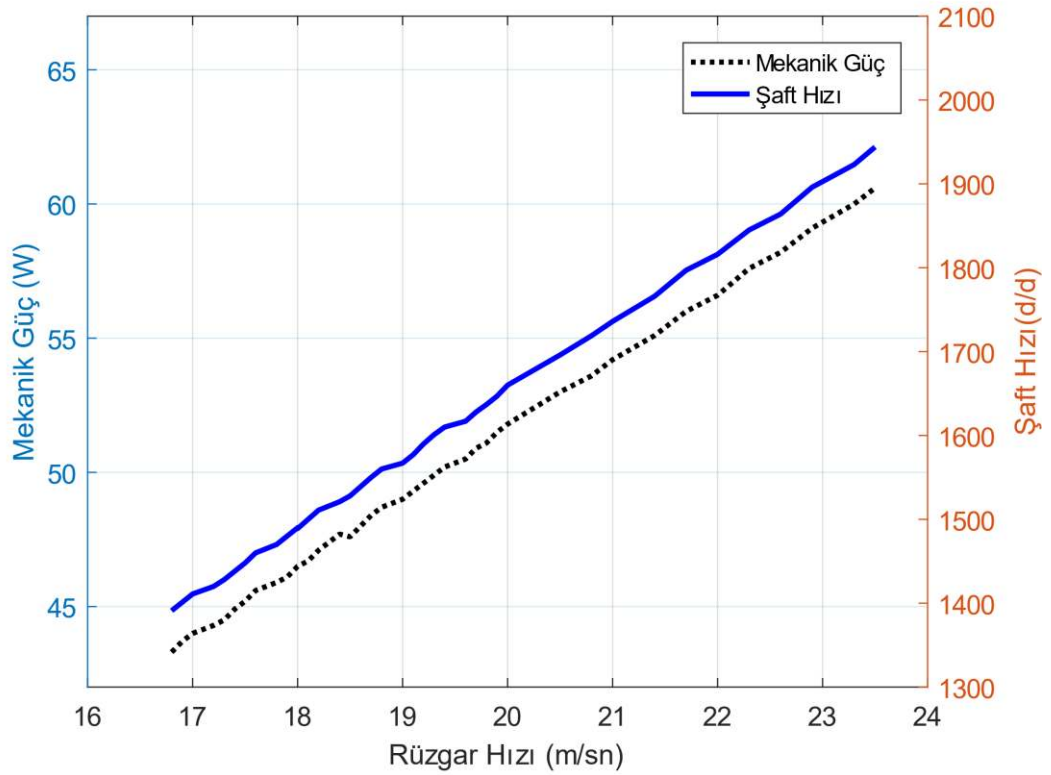
4.1.2. Rüzgar Santrali Deneyleri

Rüzgar enerjisi üretim biriminde 1,5 kW gücünde sincap kafesli asenkron makine kullanılmıştır. Asenkron makinenin rotor hızı senkron hızı geçtiğinde jeneratör olarak çalışır ve elektromanyetik tork negatif yönlüdür. Aktif güç pozitif ise jeneratörden şebekeye, negatif olduğunda ise şebekeden motora enerji sağlanmaktadır.

Rüzgar santralinin hız ve hatve açıları Şekil 4.4'teki kontrol ekranı üzerinden girilmekte ve bu değerlere karşılık gelen tork, mekanik güç, şaft hızı, güç faktörü, aktif, reaktif ve görünür güç değerleri elde edilmektedir.

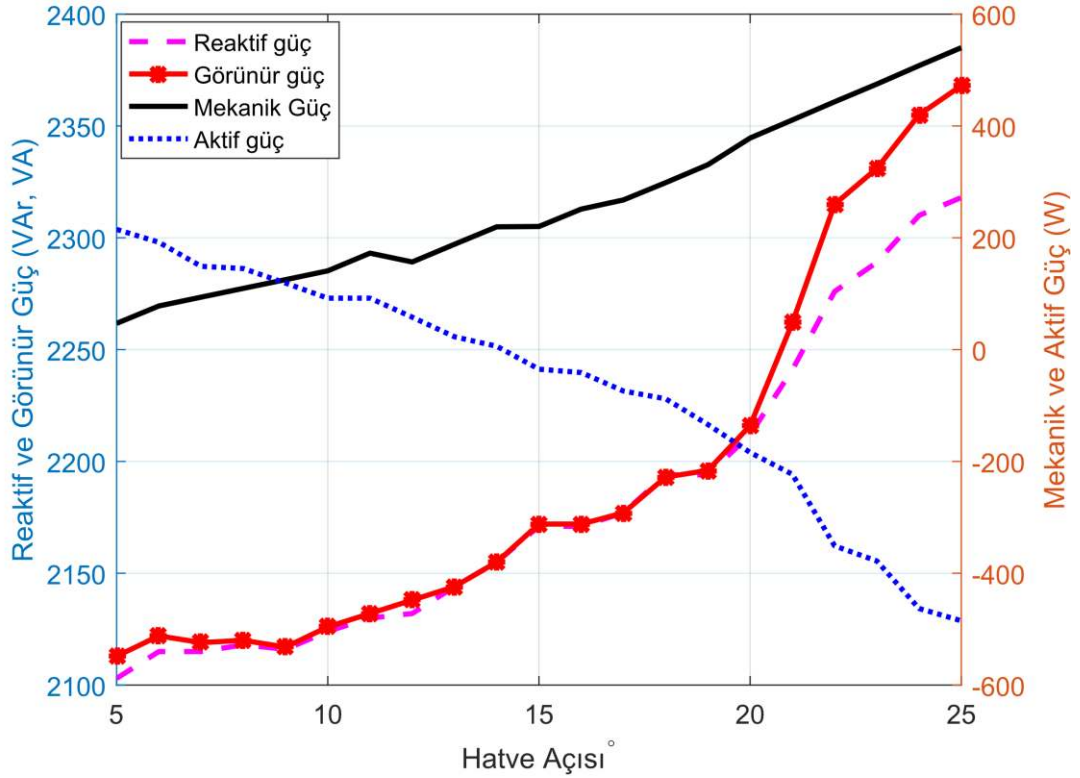


Şekil 4.5. Rüzgar türbini hatve açısına göre mekanik güç ve rotor dönüş hızı değişimi (rüzgar hızı 18,5 m/s)



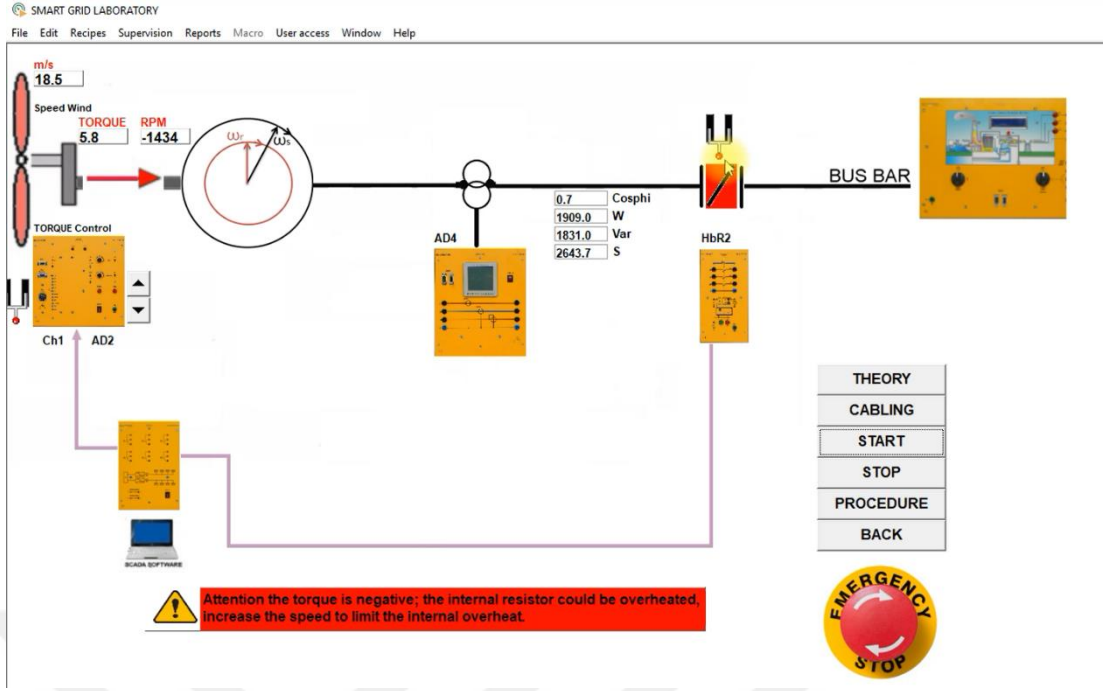
Şekil 4.6. Rüzgar hızına göre mekanik güç ve şaft hızı (hatve açısı 45°)

Rüzgar türbinin 18,5 m/s sabit rüzgar hızında hatve açısına göre mekanik, aktif, reaktif ve görünür güç değerleri Şekil 4.7’de verilmiştir. Buna göre, makineye jeneratör modunda çalışması için negatif tork uygulanmış ve hatve açısı 15° ’e ulaşp tork değeri -1,4 Nm olduktan sonra asenkron makine jeneratör moduna geçmiştir. Mekanik güçle birlikte, aktif güç ve görünür güçteki aktif gücün oranı artmıştır.

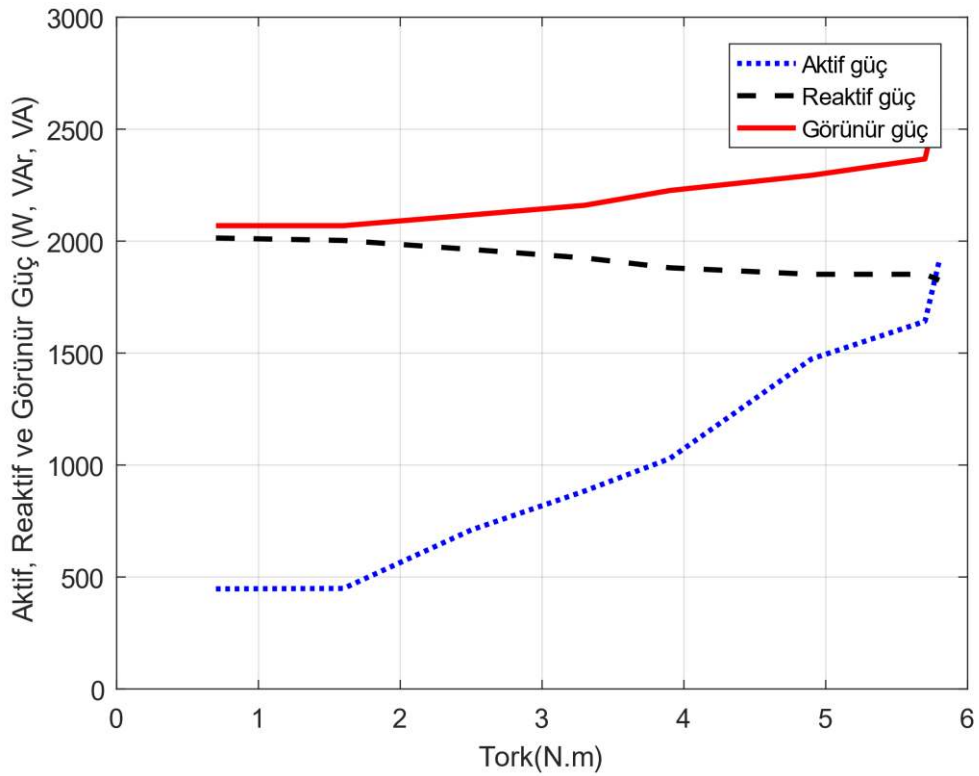


Şekil 4.7. Hatve açısına göre rüzgar türbinin mekanik, aktif, reaktif ve görünür güç değerleri (Rüzgar hızı = 18 m/s)

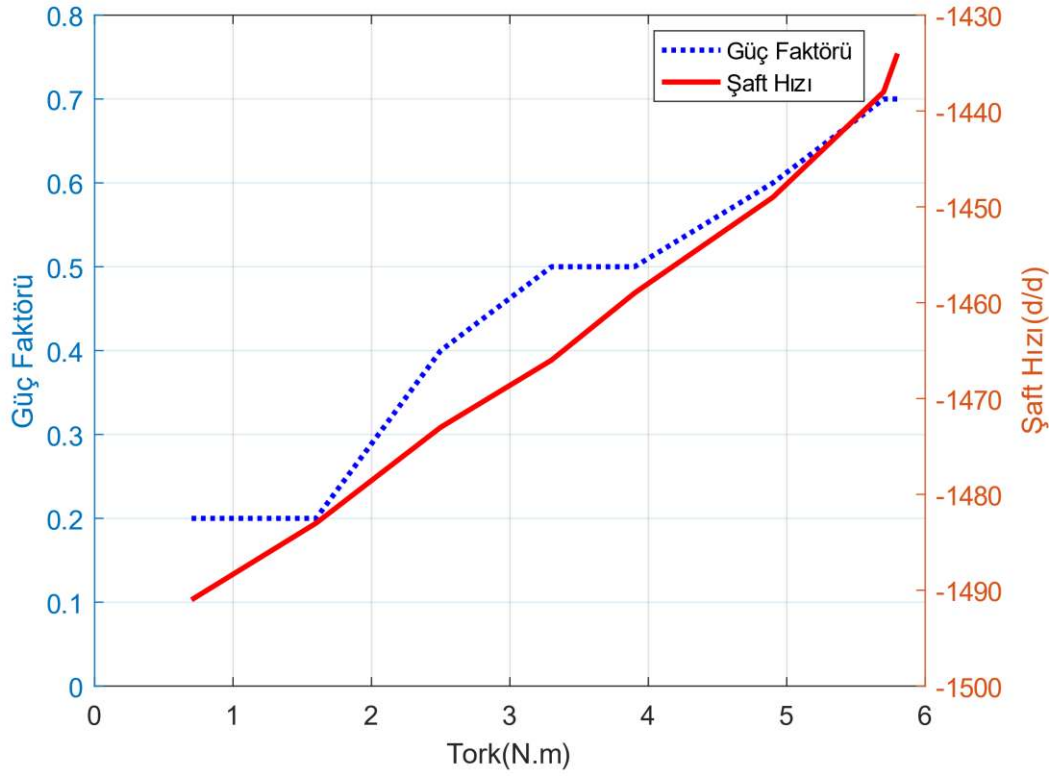
Deneyin ikinci kısmında asenkron jeneratör termik santrale bağlanmıştır. Bu durumda farklı torklarda elde edilen güç faktörü, aktif güç, reaktif güç ve görünür güç değerleri gözlemlenmiştir. Tork kontrolü ve şebeke parametrelerinin gözlemlenmesi Şekil 4.8’de gösterilen arayüz ile yapılmıştır. Deney sonucunda uygulanan torka göre aktif, reaktif ve görünür güç değerleri Şekil 4.9’da, güç faktörü ve şaft hızı değişimi ise Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Rüzgar türbini tork kontrolü arayüzü



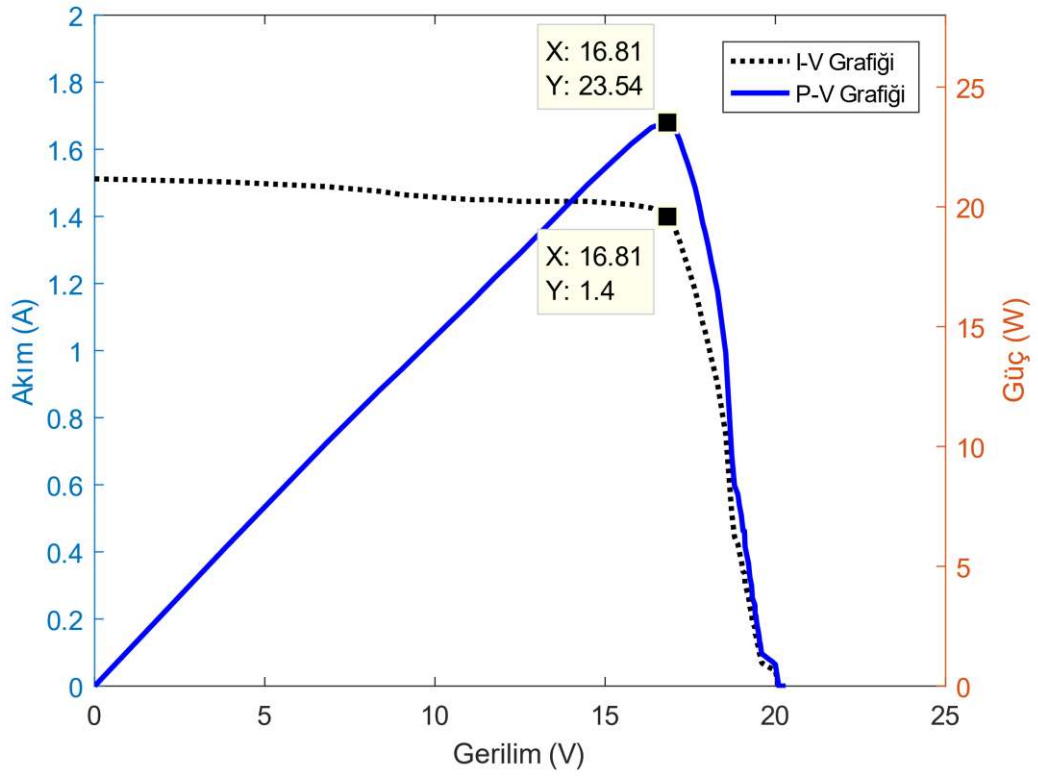
Şekil 4.9. Torka göre güç aktif, reaktif ve görünür güç değerleri (Rüzgar hızı = 18,5 m/s)



Şekil 4.10. Torka göre güç faktörü ve şaft hızı (Rüzgar hızı = 18,5 m/s)

4.1.3. Fotovoltaik Panel Deneyleri

Deneyde kullanılan FV panel 36 adet güneş hücresinden oluşmaktadır. FV panelden 1000 W/m^2 güneş ışınımında ve 25°C hücre sıcaklığında 90Wp değerinde güç elde edilmektedir. Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen Şekil 4.11'teki güç-gerilim grafiğine göre, güneş simülatörü Simsun cihazı %100 seviyesinde iken panelden en fazla $23,4 \text{ W}$ değerinde çıkış gücü elde edilmiştir. Piranometre ile panelin değişik noktalarında ışıınım miktarı ölçülmüş ve 270 W/m^2 civarında ışıınım değerleri gözlemlenmiştir.



Şekil 4.11. Fotovoltaik panel I-V ve P-V grafikleri

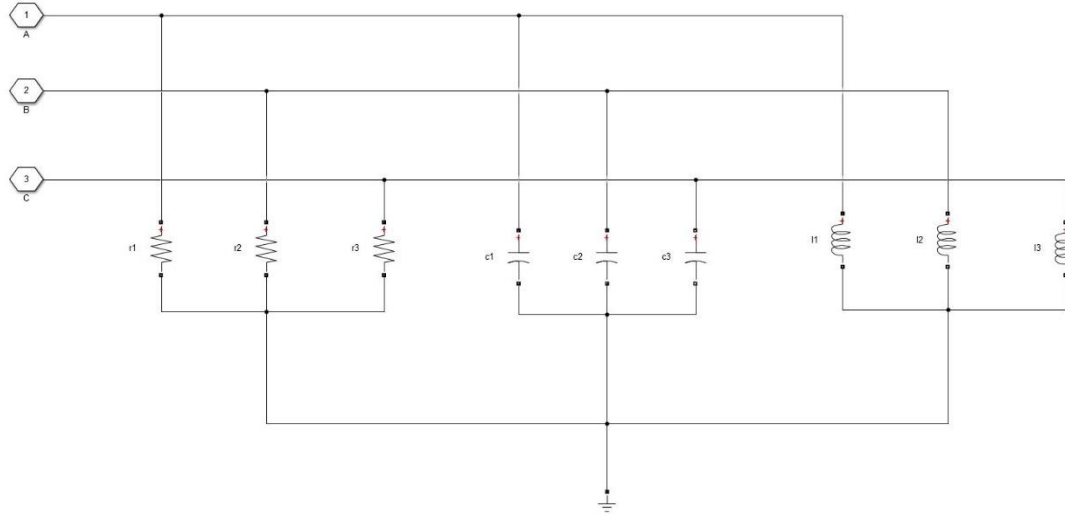
4.2. Sistem Modelleri

Çalışmanın bu kısmında De Lorenzo Akıllı Şebeke sistemi, MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. 4 farklı üretim birimi, 2 adet iletim hattı, 3 adet trafo, 1 adet kompanzasyon ve çeşitli ölçüm modüllerinden oluşan sistemin her bileşeni üzerinde deneyler yapılmış, buradan elde edilen sonuçlara göre her bir modelin parametreleri belirlenmiş ve bu parametrelere göre modeller oluşturulmuştur. Daha sonra, tüm parçalar birleştirilerek mevcut akıllı şebeke sisteminin modeli bütün olarak elde edilmiştir. Her bir üretim birimi kesicilerin bağlı olduğu anahtarlar ile kontrol edilmektedir. Kesiciler kapalı olduklarında yeşil, açık olduklarında ise kırmızı renk lamba ile kullanıcı bilgilendirilmektedir. Ölçüm modülleri üretim birimleri, iletim hatları ve yüklerden ayrı bir grup olarak tasarlanmıştır. Ancak sistem girdileri, kesicilerin kontrol düğmeleri ve göstergeler her iki kısımda da mevcuttur.

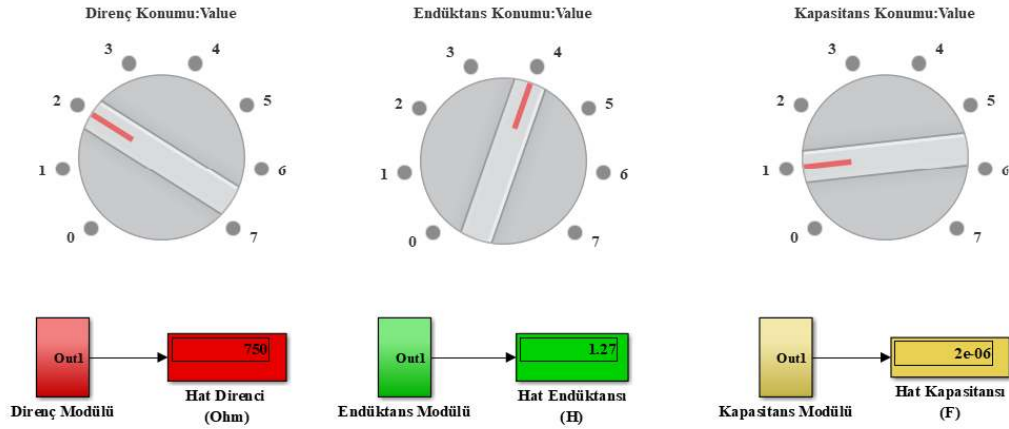
4.2.1. Sistem Yüklerinin ve Anahtarların Modeli

Deney setinde bulunan rezistif, endüktif ve kapasitif yükler Tablo 3.4, Tablo 3.5 ve Tablo 3.6'daki veriler kullanılarak her faz için eşit yük olacak şekilde Y-bağlı

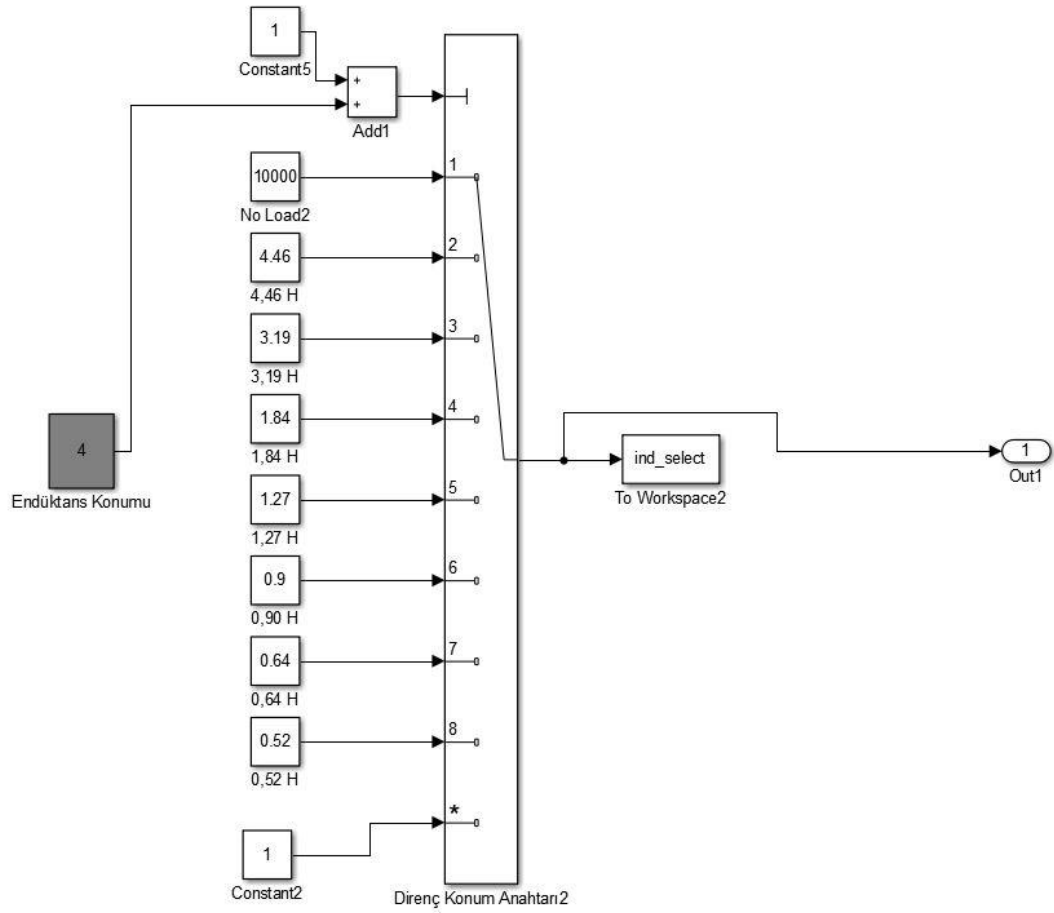
olarak oluşturulmuş ve Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Deney setinde olduğu gibi, anahtarların konumu değiştirildiğinde ilgili yük değerinin değişmesi için Şekil 4.13’teki anahtarlama modeli tasarlanmıştır. Endüktans değerlerini değiştirmek için kullanılan anahtarın iç yapısı da Şekil 4.14’te gösterilmiştir. Diğer yük anahtarları için de benzer model kullanılmıştır.



Şekil 4.12. Y-bağlı yükler



Şekil 4.13. Simulink omik, endüktif ve kapasitif yük anahtar modelleri

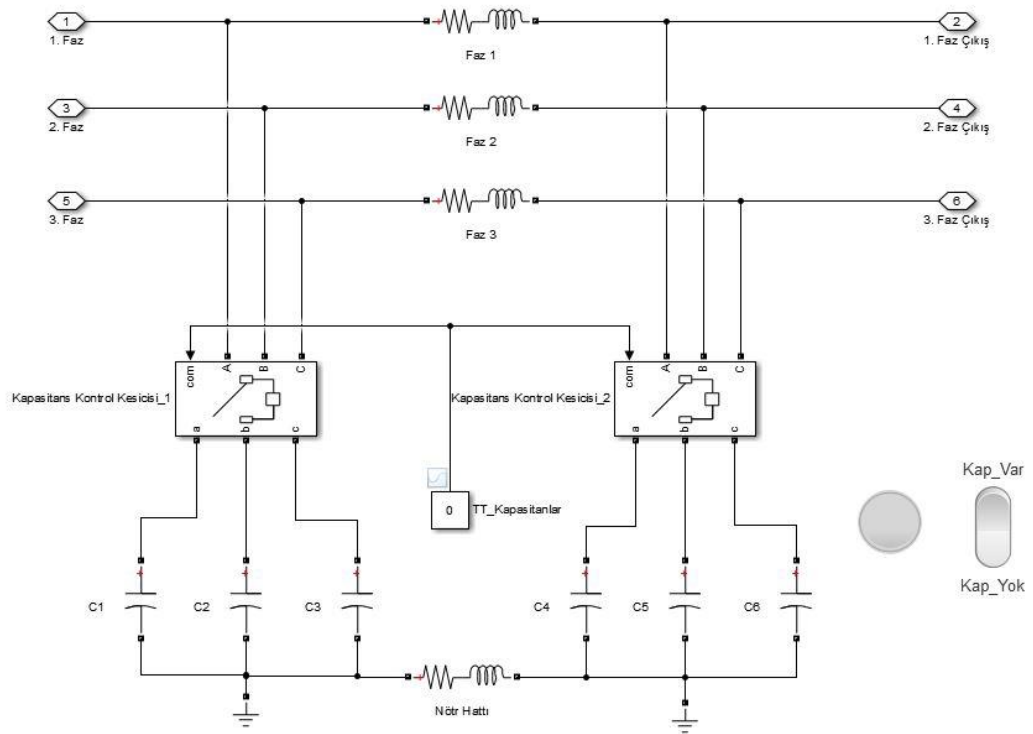


Şekil 4.14. Endüktif yükler anahtarlama bloğu iç gösterimi

4.2.1. İletim Hatları ve Trafo Modeli

İletim hatları ve yük tarafındaki alçaltıcı trafo, sistemde kalıcı reaktif etki yaptığından dolayı birlikte incelenmiştir. Sistemde her iki iletim hattı için de

Şekil 4.15'teki model kullanılmıştır. Model parametreleri devre elemanlarının etiket değerlerinden oluşmaktadır. Şekil 4.16'da gösterilen trafo parametreleri ölçüm ve deney sonuçlarına göre ayarlanmıştır.



Şekil 4.15. İletim hattı modeli

Block Parameters: Three-Phase Transformer (Two Windings)2

Three-Phase Transformer (Two Windings) (mask) (link)

This block implements a three-phase transformer by using three single-phase transformers. Set the winding connection to 'Yn' when you want to access the neutral point of the Wye.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Configuration Parameters Advanced

Units SI

Nominal power and frequency [Pn(VA) , fn(Hz)]

[800 , 50]

Winding 1 parameters [V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(Ohm) , L1(H)]

[420 12 0.152790]

Winding 2 parameters [V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(Ohm) , L2(H)]

[420 6.4 0.05093]

Magnetization resistance Rm (Ohm)

17640/0.9

Magnetization inductance Lm (H)

4324/113

Saturation characteristic [i1(A) , phi1(V.s) ; i2 , phi2 ; ...]

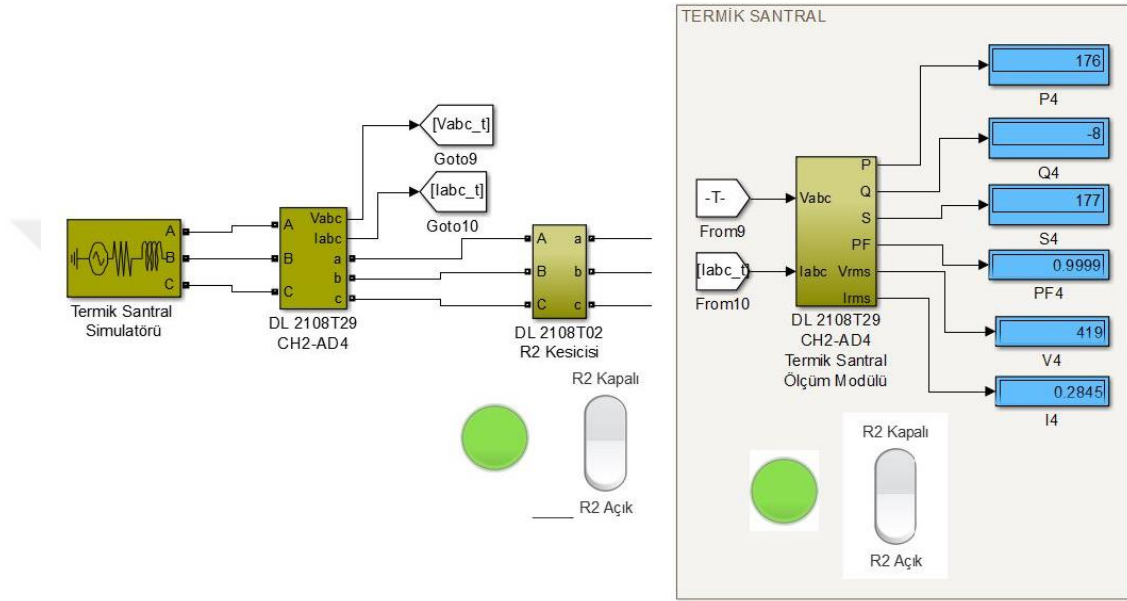
[0 0;0.0022627 2.1608;0.94281 2.737]

Initial fluxes [phi0A , phi0B , phi0C] (V.s):

Şekil 4.16. Trafo blok parametreleri

4.2.2. Termik Santral Modeli

Modelde termik santral 3 fazlı güç kaynağı ile temsil edilmiştir. Bu birime ait DL 2108T29 kodlu enerji ölçüm modülü, DL 2108T02 kodlu kesici ve bu kesiciyi kontrol eden R2 rölesi için oluşturulan model Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Ayrıca, modelde kullanılan 3 fazlı güç kaynağına ait parametreler de Şekil 4.18’de belirtilmiştir.



Şekil 4.17. Termik santral modeli

Block Parameters: Termik Santral Simulatörü

Three-Phase Source (mask) (link)

Three-phase voltage source in series with RL branch.

Parameters Load Flow

Configuration: Yg

Source

☐ Specify internal voltages for each phase

Phase-to-phase voltage (Vrms):

419

Phase angle of phase A (degrees):

0

Frequency (Hz):

50

Impedance

☒ Internal ☐ Specify short-circuit level parameters

Source resistance (Ohms):

0.8929

Source inductance (H):

16.58e-3

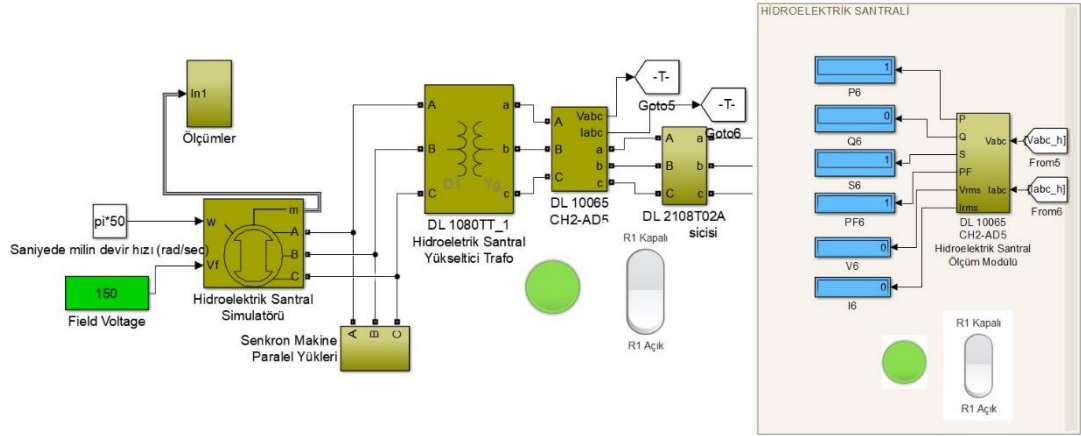
Base voltage (Vrms ph-ph):

400

Şekil 4.18. Termik santralin jeneratörünü temsil eden 3 fazlı güç kaynağına ait blok parametreleri

4.2.3. Hidroelektrik Sistem Modeli

Hidroelektrik sistem modeli senkron jeneratör, yükseltici trafo, kesici ve ölçüm modüllerinden oluşmaktadır. Hidroelektrik santral modeli Şekil 4.19’da, senkron makineye ait blok parametreleri ise Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Blok parametreleri ölçümler ve deney verilerinin sonuçlarına göre ayarlanmıştır.



Şekil 4.19. Hidroelektrik santral modeli

Block Parameters: Synchronous Machine SI Fundamental

Synchronous Machine (mask) (link)

Implements a 3-phase synchronous machine modelled in the dq rotor reference frame. Stator windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Advanced Load Flow

Nominal power, voltage, frequency, field current [Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz) ifn(A)]:

[800 380 50 0.47]

Stator [Rs(ohm) Ll,Lmd,Lmq(H)]:

[15 0.31 0.811 0.12]

Field [Rf'(ohm) Lf'd(H)]:

[21.9316 0.6604]

Dampers [Rkd',Lkd' Rkq1',Lkq1'] (R=ohm,L=H):

[3.142 0.007334 4.772 0.01015]

Pole pairs:

2

Initial conditions [dw(%) th(deg) ia,ib,ic(A) pha,phb,phc(deg) Vf(V)]:

[0 0 0 0 0 0 0 0 0]

☒ Simulate saturation Plot

[ifd(A) ; Vt(VLL rms)]: [4,341.3,363.2,373.8,383.2,392.8,402.1,411.5,418.3,426.2]

Şekil 4.20. Hidroelektrik santralin jeneratörünü temsil eden asenkron makinenin blok parametreleri

4.2.4. Rüzgâr Enerji Sistemi Modeli

Rüzgar santrali birimi asenkron jeneratör, kesici ve ölçüm modülünü içermekte olup Şekil 4.21’de gösterilmektedir. Ayrıca, girilen tork değerine göre elde edilen aktif gücün de kontrolü sistem üzerinden sağlanmaktadır. Rüzgar santralinin jeneratörü asenkron makine ile temsil edilmiştir. Şekil 4.22’da gösterilen asenkron makineye ait



Block Parameters: Rüzgar Santrali Simülatörü

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Advanced Load Flow

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:

[1500 400 50]

Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Lls(H)]:

[2.053*2.08 0.008101]

Rotor resistance and inductance [Rr'(ohm) Llr'(H)]:

[1.904 0.008101]

Mutual inductance Lm (H):

0.3144/1.63

Inertia, friction factor, pole pairs [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]:

[0.02/2 0.002494/1.7 2]

Initial conditions

[1,0 0,0,0 0,0,0]

☐ Simulate saturation Plot

[i(Arms) ; v(VLL rms)]: 78367 ; 230, 322, 414, 460, 506, 552, 598, 644, 690]

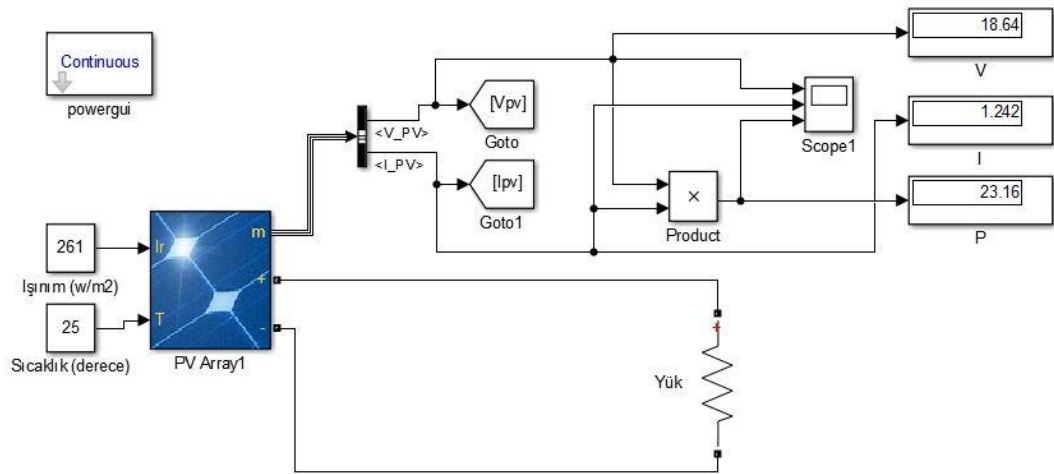
OK Cancel Help Apply

Şekil 4.22. Rüzgar santralinin jeneratörünü temsil eden asenkron makinenin blok parametreleri

4.2.5. Güneş Enerji Sistemi Modeli

Deneyde kullanılan güneş paneli modeli ve parametreleri sırasıyla Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Modelde Tablo 3.3'te verilen etiket değerleri kullanılmıştır. Ayrıca, deneyler laboratuvar ortamında gerçekleştirildiğinden T sıcaklığı 25^0 olarak belirlenmiştir. Pironometre ile panelin farklı noktalarında yapılan ışıyım ölçümlerinde 270 w/m^2 civarında değerler elde edilmiştir. Modelin 261 w/m^2 ışıyım değerinde deney ile aynı en yüksek güç noktasına ulaştığı görülmüştür.

Şebekeye bağlı fotovoltaik sistem modülü Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Fotovoltaik sistem akıllı şebeke deney sistemine alçaltıcı yük tarafından L1 fazına bağlanmıştır. Burada akım kaynağı olarak temsil edilen fotovoltaik sistemin etkisi, DL 10065N ölçüm modülü ile faz akımlarının ölçülmesi sonucu fazlar arası akım farkı ile gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.23. Güneş paneli modeli

Block Parameters: PV Array1

PV array (mask) (link)

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series. Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module

Input 1 = Sun irradiance, in W/m², and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters Advanced

Array data

Parallel strings: 1

Series-connected modules per string: 1

Module data

Module: User-defined

Maximum Power (W): 90.013

Cells per module (Ncell): 36

Open circuit voltage Voc (V): 22.05

Short-circuit current Isc (A): 5.15

Voltage at maximum power point Vmp (V): 18.37

Current at maximum power point Imp (A): 4.9

Temperature coefficient of Voc (%/deg.C):

Temperature coefficient of Isc (%/deg.C):

Display I-V and P-V characteristics of ...

array @ 25 deg.C & specified irradiances

Irradiances (W/m²): [261.5]

Plot

Model parameters

Light-generated current IL (A): 5.2071

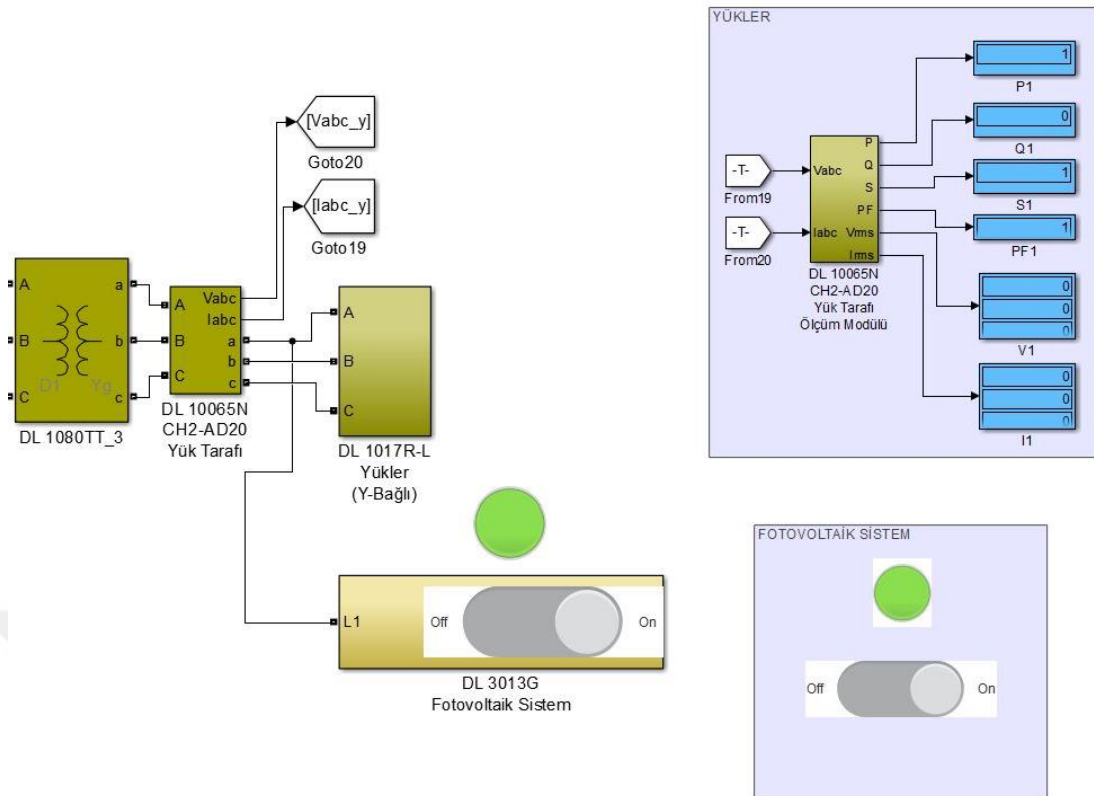
Diode saturation current I0 (A): 3.9022e-11

Diode ideality factor: 0.9315

Shunt resistance Rsh (ohms): 181.1319

Series resistance Rs (ohms):

Şekil 4.24. Güneş paneli parametreleri



Şekil 4.25. Fotovoltaik sistem modeli

4.2.6. Otomatik Kompanzasyon Bloğu Modeli

Deney sisteminde kompanzasyon işlemi üretim birimlerinin birleştiği nokta olan CH2-AD10 numaralı ölçüm modülünün sonrasına bağlanmış olup DL 2108T19 kodlu güç faktörü denetleyicisi ve DL 2108T20 kodlu kapasitif banklar ile yapılmaktadır. Kapasitif banklar 4 kademededen oluşmaktadır. Her kademeye ait etiket değerleri ve ölçülen değerler Tablo 4.1’de verilmiştir. Deney setinde, güç faktörü denetleyicisi hattın gücünü algıladıktan sonra kendi içerisindeki kontrol algoritmasıyla kapasitif bankların uygun olanlarını devreye almaktadır.

Tablo 4.1. Kompanzasyonda kullanılan kapasitörlerin etiket ve ölçülen değerleri

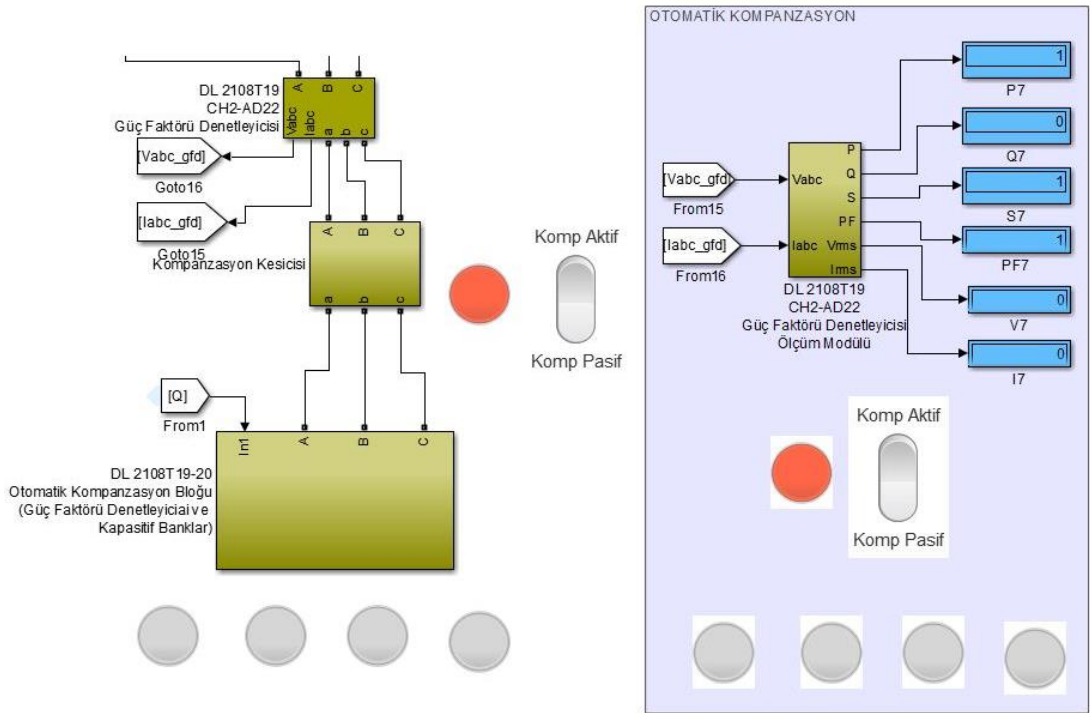
Kademe	Etiket değeri (μF)	Ölçülen değeri (μF)
1.	2	1,8
2.	4	3,68
3.	8	7,6
4.	16	15,07

Kapasitif banklar ve ölçüm modülü için oluşturulan model Şekil 4.26’da gösterilmiştir. Kompanzasyonun aktif olması için “Komp” düğmesine basmak gerekmektedir. Eğer hatta Tablo 4.2’de belirtilen aralıklarda endüktif reaktif güç bulunuyorsa ilgili kademedeki kapasitif yükler aktif olmakta ve bunlara karşılık gelen

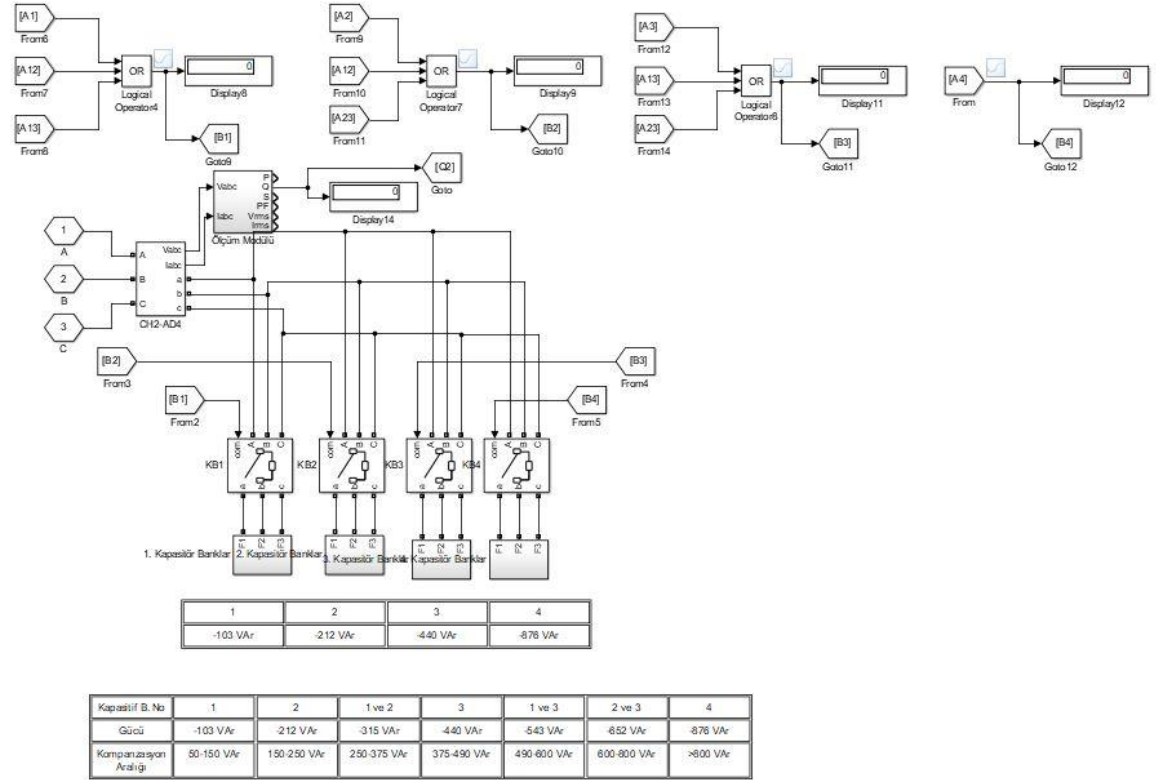
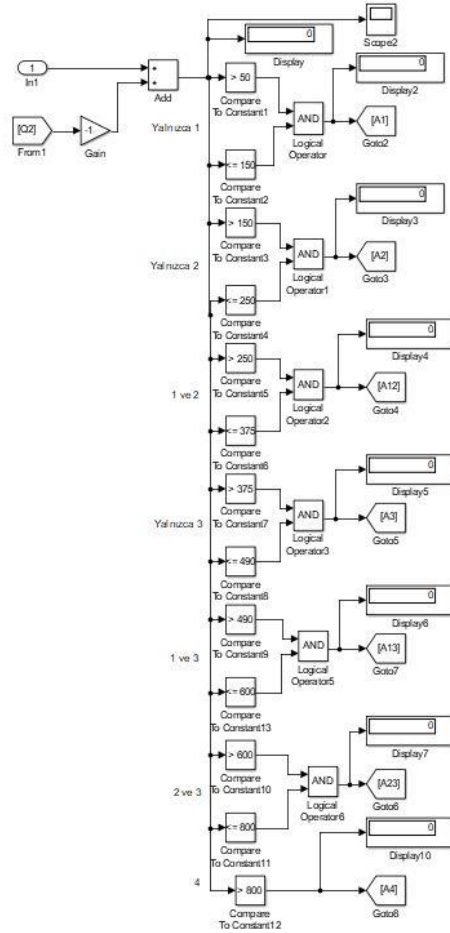
lambalar yanmaktadır. Tablo 4.2’deki kontrol işlemini gerçekleştiren model Şekil 4.27’de verilmiştir. Buna göre her bir kademedeki kapasitif yük bir adet kesici ile kontrol edilmektedir. CH2-AD10’daki ölçüm modülünden gelen reaktif güç verisine göre bu kesiciler kontrol edilmektedir.

Tablo 4.2. Hattta bulunan endüktif reaktif güce karşılık aktif olan kapasitif banklar ve kompanzasyon bloğunun her kademedeki yük değeri

Kapasitif Bank Kademe Ayarı	1	2	1 ve 2	3	1 ve 3	2 ve 3	4
Kapasitif yükün gücü (VAr)	-103	-212	-315	-440	-543	-652	-876
Kompanzasyon aralığı (VAr)	50-150	150-250	250-375	375-490	490-600	600-800	>800



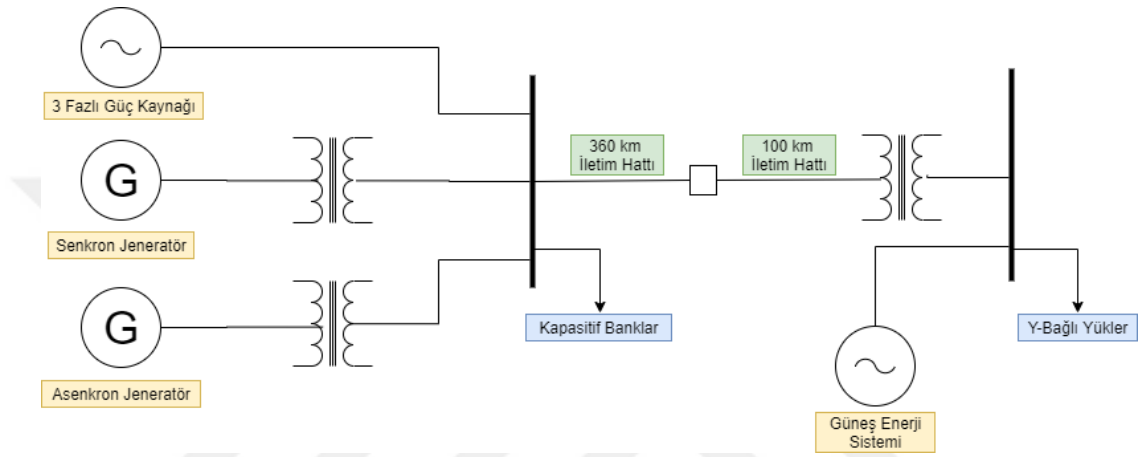
Şekil 4.26. Otomatik kompanzasyon bloğu ve ölçüm modülü



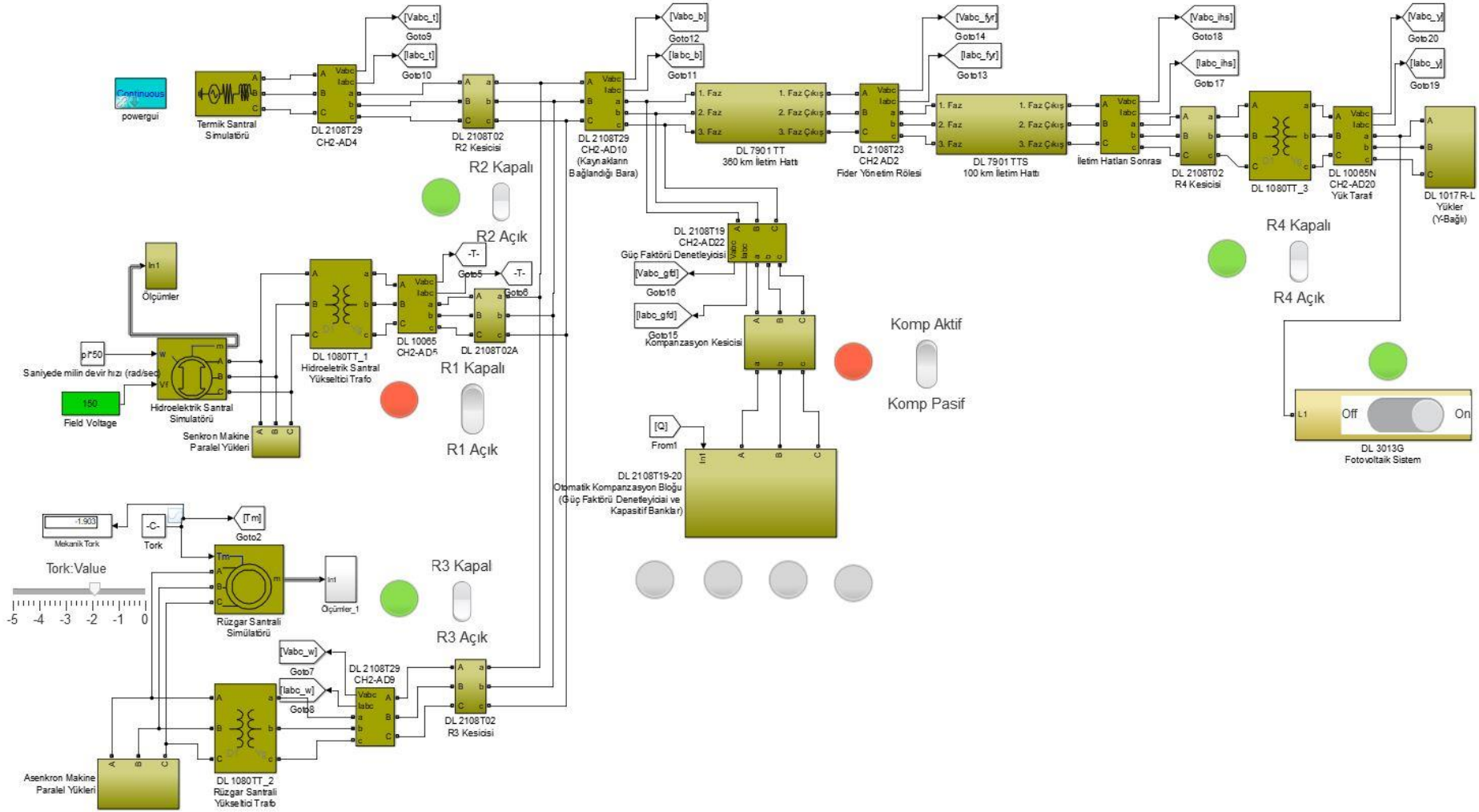
Şekil 4.27. Otomatik kompanzasyon bloğu iç yapısı

4.2.7. Akıllı Şebeke Modeli

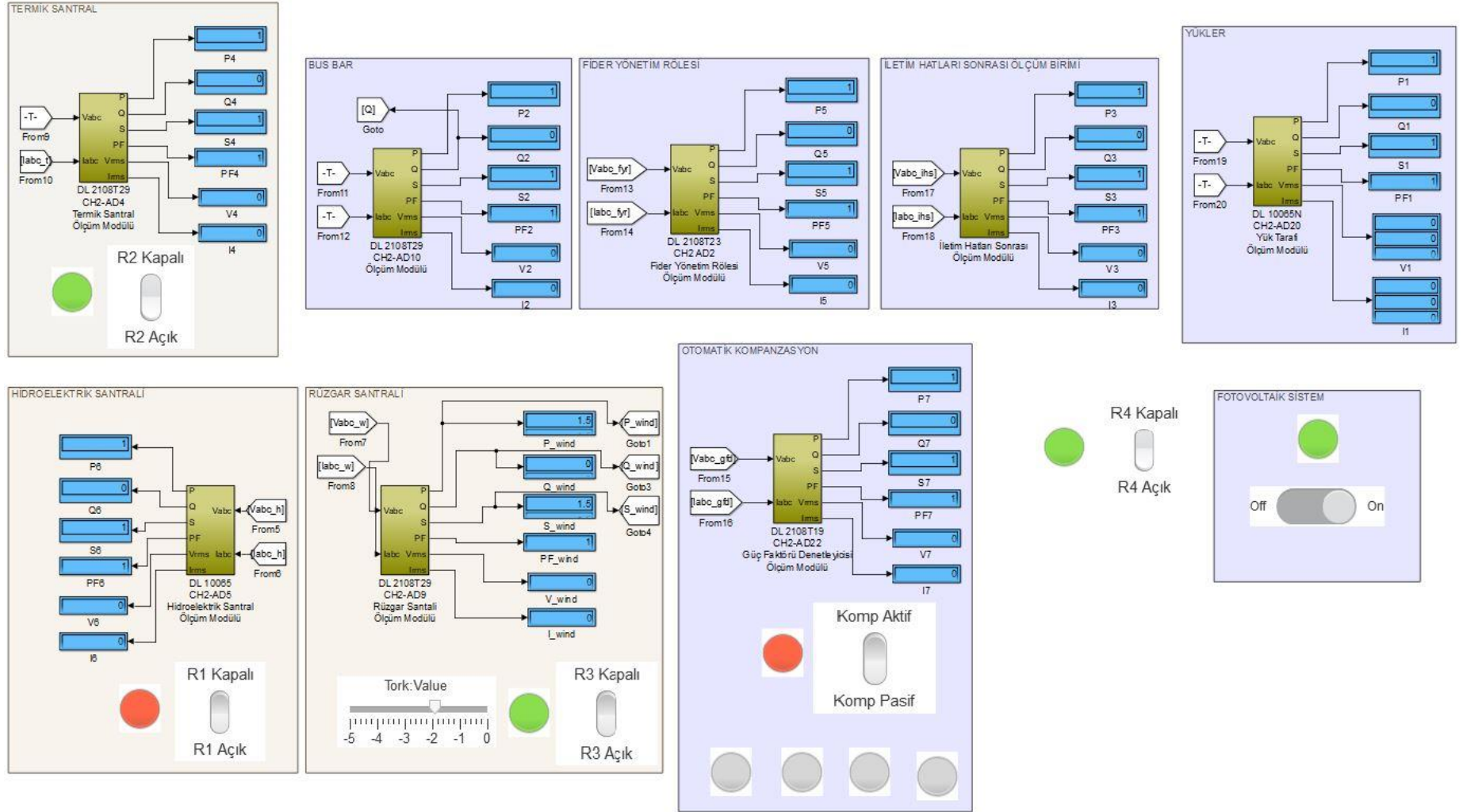
Bu aşamada, daha önce elde edilen modeller Şekil 4.28’de yer alan tek hat şemasına göre birleştirilmiştir. Kesiciler ile üretim birimlerinin kontrolü sağlanmıştır. Sistemin görsel karmaşıklığını azaltmak amacıyla iki kısma ayrılmıştır. İlk kısımda, güç sistem elamanları bulunurken ikinci kısımda, yalnızca SCADA ekranına da benzer şekilde ölçüm modüllerine ait göstergeler bulunmaktadır.



Şekil 4.28. Akıllı Şebeke tek hat şeması



Şekil 4.29. Akıllı şebeke sisteminin Simulink modeli



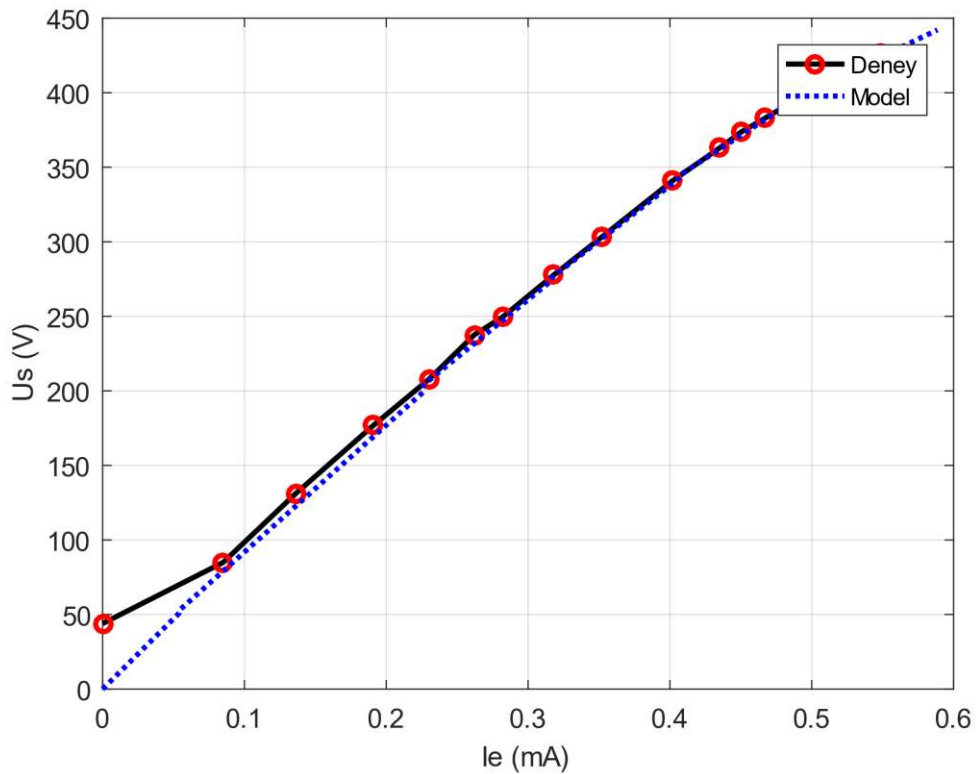
Şekil 4.30. Akıllı şebeke Simulink modeli ölçüm modülleri

4.3. Simulasyon Sonuçları ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırması

Çalışmanın bu kısmında deney ve simülasyon sonuçlarından elde edilen değerler aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Modellerin performanslarını ölçmek amacıyla Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (Mean Absolute Percentage Error - MAPE) yöntemi kullanılmıştır.

$$\text{Ortalama Mutlak Yüzde Hata} = \frac{100}{k} \sum_{i=1}^k \frac{|y_{deney} - y_{model}|}{y_{deney}}$$

Senkron jeneratörün boşa çalışması deney seti ve model üzerinde gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlara ait grafik Şekil 4.31’te gösterilmiştir. Modelin bu deneye ait ortalama mutlak yüzde hatası %3,16 olarak hesaplanmıştır.



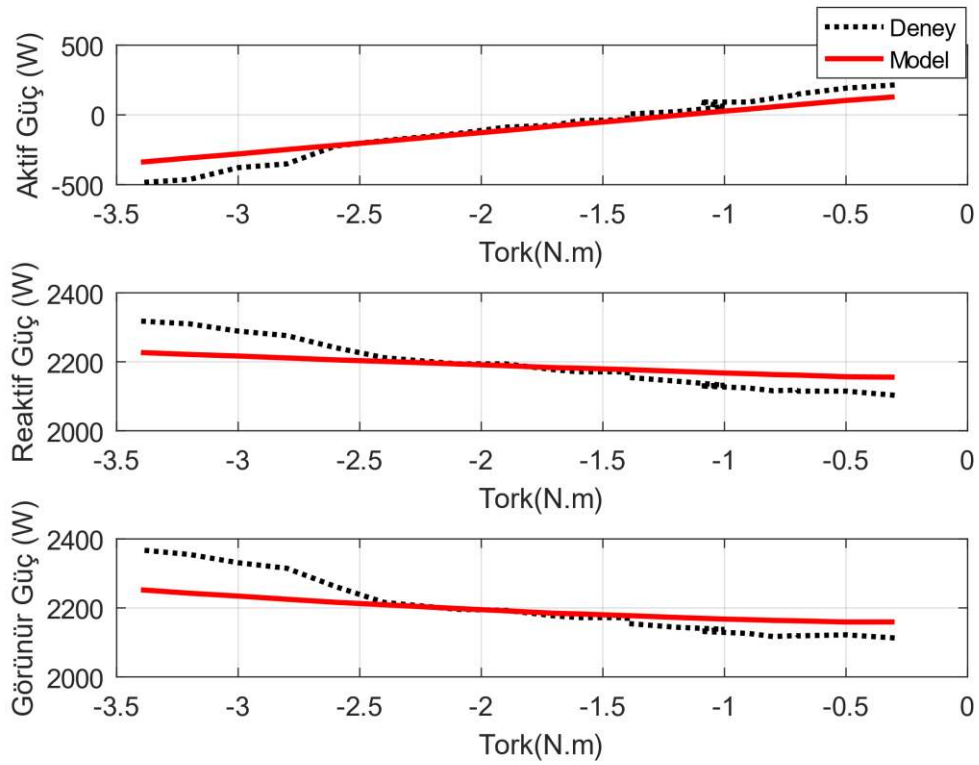
Şekil 4.31. Senkron jeneratör boşa çalışma durumu deney ve model karşılaştırması

Bir güç sisteminde yük miktarı arttığında jeneratörün çıkış gerilimi düşmektedir. Bu durumun önüne geçmek için senkron jeneratörde uyarım gerilimi arttırılmalıdır. Deney ve oluşturulan modelde, dirençler 1-6 arası konumlarda değiştirilmiş, hat gerilimi uyarım gerilimi ile kontrol edilmiştir. Her bir yük

seviyesinde hat akımı, aktif güç, uyarım gerilimi ve uyarım akım değerleri kaydedilmiş ve ortalama mutlak yüzde hata değerleri Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Senkron jeneratör gerilim regülasyonu deney-model mutlak yüzde hata ortalaması

Karşılaştırılan parametre	Ortalama mutlak yüzde hata
Hat akımı	3,474
Aktif güç	3,108
Uyarım gerilimi	5,695
Uyarım akımı	6,915

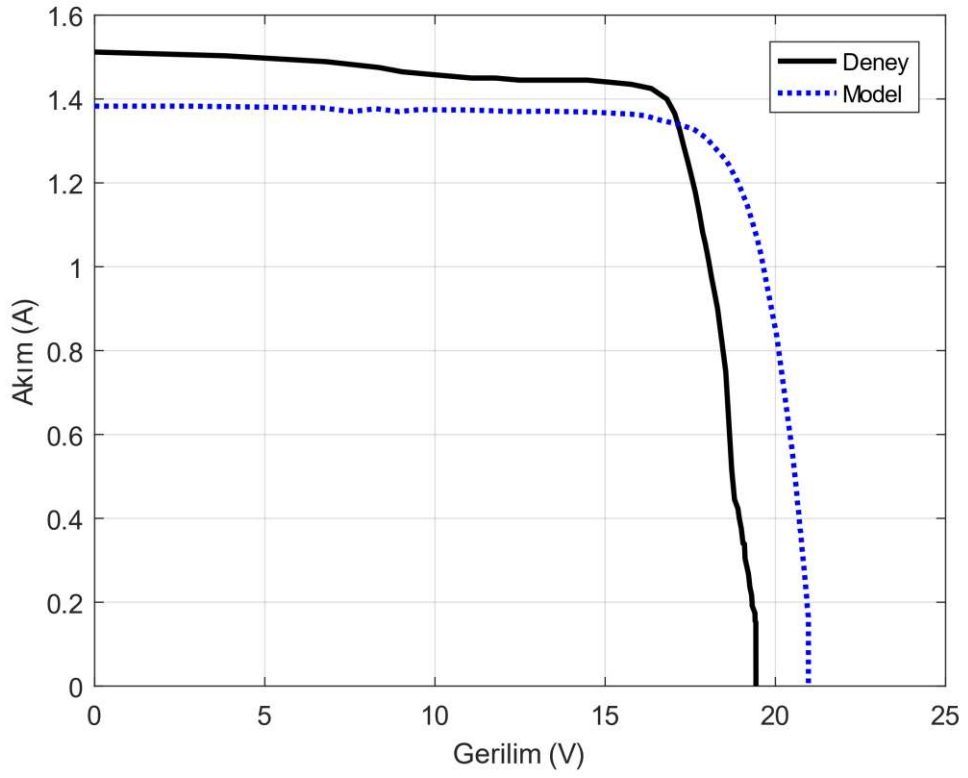


Şekil 4.32. Asenkron generatör güç değerleri deney ve model karşılaştırması

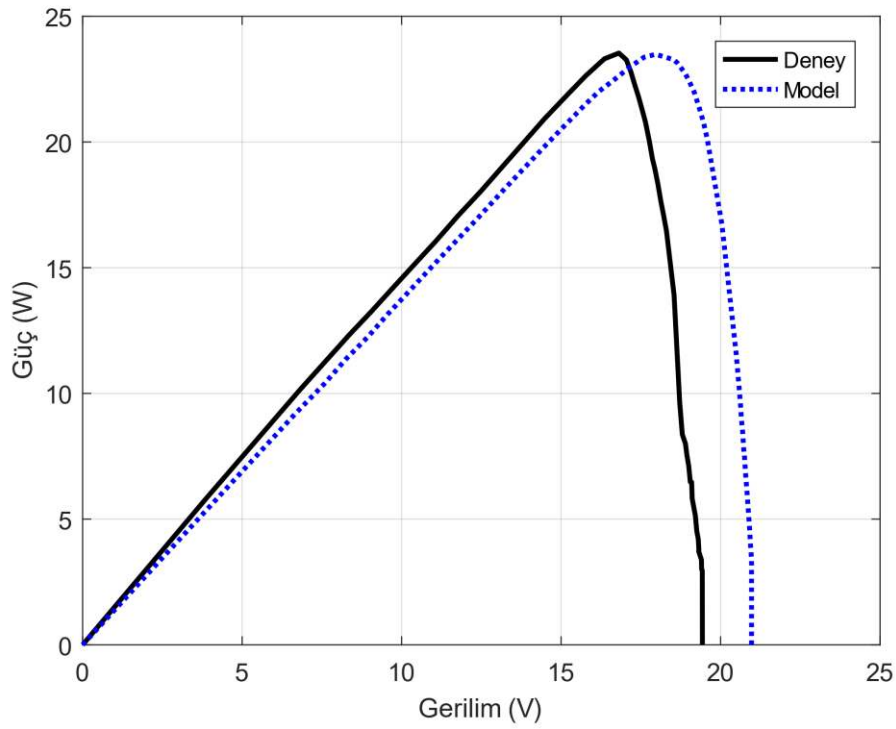
Şekil 4.32’de asenkron makinenin uygulanan torka karşılık çekilen güç parametreleri karşılaştırılmıştır. Makinenin jeneratör modda çalıştırılması amaçlandığı için simülasyonda negatif değerli tork uygulanmıştır. Ortalama mutlak yüzde hata

değerleri, aktif güç için 13,21, reaktif güç için 1,7 ve görünür güç için 1,8 olarak bulunmuştur.

Güneş paneline deney ve modelden elde edilen I-V grafiği Şekil 4.33'te birlikte verilmiştir. Akım seviyesinde %6,89 oranında, gerilim seviyesinde ise %2,96 oranında sapma görülmüştür. Ancak Şekil 4.34'te görüldüğü gibi her iki durumda da aynı en yüksek güç noktalarına ulaşılmıştır.



Şekil 4.33. Güneş paneli I-V grafiği deney-model karşılaştırması



Şekil 4.34. Güneş paneli P-V grafiği deney-model karşılaştırması

İletim hatları ve trafonun sistemde yaptığı kalıcı reaktif etki Tablo 4.4’de gösterilmiştir. Buna göre, deney ve modelde, iletim hatına ait direnç ve endüktasların şebekeye etkisi ihmal edilecek düzeyde elde edilmiştir. Her iki iletim hattının kapasitansları bağlandığında ise kalıcı kapasitif reaktif etki -133 Var olarak elde edilmiştir. Model de bu değer %3,01 sapma ile -137 VAr olarak gözlemlenmiştir. Trafonun ise hem 42 VAr kalıcı endüktif reaktif hem de 25 W aktif etkisi bulunmaktadır.

Tablo 4.4. İletim hatları kapasitanslarının ve trafonun şebekeye kalıcı etkisi (İH=iletim hattı paralel kapasitansları, 1: bağlı, 0: bağlı değil, P ve Q: CH2-AD10 üzerinde ölçülen güç değerleri)

İH 1 (360 km)	İH 2 (100 km)	Trafo	Deney		Model	
			P (W)	Q (VAr)	P (W)	Q (VAr)
0	0	0	0	0	1	-1
1	0	0	0	-108	0	-113
0	1	0	0	-20	0	-23
0	0	1	25	42	25	42
1	1	0	0	-133	0	-137
1	1	1	27	-86	27	-90

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada bir akıllı şebeke sisteminin MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi, simülasyonu ve deneysel olarak doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Ölçüm modülleri ile güç sistemi birbirinden ayrılarak kullanıcı için tüm sistemi daha rahat görme imkanı sağlanmıştır. Bu sayede her bileşenin birlikte veya tek başına davranışı gözlemlenebilmektedir.

Elde edilen benzetim modeli genel olarak deneysel verilere yakın sonuçlar vermektedir. Deneysel veriler ile model arasında hata oranları bazı noktalarda %10 seviyesini geçmiş olsa da bu noktalarda verilerle model arasında doğrusal bir ilişki kurulmuştur. Hataların belli başlı sebepleri şöyle sıralanabilir: kullanılan ekipmanların sıcaklık ile değişen karakteristikleri, bazı parametrelerin ölçülememesi, MATLAB programının içinde mevcut hazır araçların kullanılması. Gerçek sisteme daha yakın sonuçlar elde etmek için her bir ünitenin davranışının matematiksel modeli hesaplanıp bütün parametrelerin eklendiği bir model oluşturulabilir.

Tezin ileriki aşamasında elde edilen bu model kullanılarak akıllı şebeke sistemi üzerinde kontrol ve optimizasyon teknikleri uygulanabilir. Sisteme eklenecek yeni bileşenler bu model üzerinde test edilebilir. Sisteme enerji depolama tesisi gibi bir birim dahil edilerek çift yönlü enerji akışı, yük kaydırma, talep tarafı yönetimi üzerine çalışmalar yapılabilir. Ayrıca, elde edilen model kullanılarak daha geniş ölçekteki akıllı şebeke sistemlerine ilişkin araştırmalar yapılabilir.

Bu çalışmanın benzerlerinden farkı geniş kapsamı olmasıdır. Ayrıca kullanılan deney setine ait bir model diğer çalışmalarda rastlanmamıştır. Bazı çalışmalarda yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye bağlantısı modellenmiş ancak sistemin genelinden ziyade daha spesifik konular ele alınmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] J. Momoh, *Smart grid fundamentals of design and analysis*, First Edit. John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2012.
- [2] H. Farhangi, “The path of the smart grid”, *IEEE Power Energy Mag.*, c. 8, sayı 1, ss. 18–28, 2010.
- [3] A. W. Ordys, A. W. Pike, M. A. Johnson, R. M. Katebi, ve M. J. Grimbale, *Modelling and simulation of power generation plants*, First Edit. Springer-Verlag London, 1994.
- [4] Y. Oğuz, “Hibrid güç üretim sisteminin modellemesi, analizi ve neuro-fuzzy kontrolör kullanılarak sistem performansının iyileştirilmesi”, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2007.
- [5] H. C. Chen, J. C. Qiu, ve C. H. Liu, “Dynamic modeling and simulation of renewable energy based hybrid power systems”, içinde *3rd International Conference on Deregulation and Restructuring and Power Technologies, DRPT 2008*, 2008, ss. 2803–2809.
- [6] G. Lu, D. De, ve W.-Z. Song, “SmartGridLab: A laboratory-based smart grid testbed”, 2010, ss. 143–148.
- [7] C. Dragoş Dumitru ve A. Gligor, “Modeling and simulation of renewable hybrid power system using Matlab/Simulink environment”, 2010.
- [8] V. Salehi, A. Mohamed, A. Mazloomzadeh, ve O. A. Mohammed, “Laboratory-based smart power system, part I: Design and system development”, *IEEE Trans. Smart Grid*, c. 3, sayı 3, ss. 1394–1404, 2012.
- [9] V. Salehi, A. Mohamed, A. Mazloomzadeh, ve O. A. Mohammed, “Laboratory-based smart power system, part II: Control, monitoring, and protection”, *IEEE Trans. Smart Grid*, c. 3, sayı 3, ss. 1405–1417, 2012.
- [10] S. Rohjans, S. Lehnhoff, S. Schütte, F. Andrén, ve T. Strasser, “Requirements for smart grid simulation tools”, içinde *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2014, ss. 1730–1736.
- [11] T. Çakıl, H. F. Carlak, ve Ş. Özen, “Modeling of power network system of the high voltage substation: A simulation study”, *Int. J. Eng. Appl. Sci.*, c. 7, sayı 3, ss. 39–57, 2015.
- [12] O. Ayvazogluysel Erol ve U. Basaran Filik, “Akıllı şebeke sisteminin Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi için Matlab / Simulink ortamında modellenmesi”, içinde *3. Uluslararası İstanbul Akıllı Şebekeler Kongre ve Fuarı*, 2015.
- [13] V. Bonaiuto ve F. Sargeni, “A Matlab Simulink model for the study of smart grid-Grid-integrated vehicles interactions”, içinde *RTSI 2017 - IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry, Conference Proceedings*, 2017.
- [14] F. Rahimi ve A. Ipakchi, “Demand response as a market resource under the smart grid paradigm”, *IEEE Trans. Smart Grid*, c. 1, sayı 1, ss. 82–88, 2010.
- [15] H. Gharavi ve R. Ghafurian, “Smart grid: The electric energy system of the future”, içinde *Proceedings of the IEEE*, 2011, c. 99, sayı 6, ss. 917–921.
- [16] X. Fang, S. Misra, G. Xue, ve D. Yang, “Smart grid - The new and improved power grid: A survey”, *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, c. 14, sayı 4, ss. 944–980, 2012.
- [17] “Türkiye akıllı şebekeler 2023 vizyon ve strateji belirleme projesi”. [Çevrimiçi]. Available at:

- https://docs.wixstatic.com/ugd/Odddb28_e8308d743b014663809005a678c00ceb.pdf. [Erişim: 22-Eki-2019].
- [18] National Institute of Standards and Technology, “NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0”, 2014.
- [19] O. I. Elgerd, *Electric energy systems theory: An introduction*, c. 9, sayı 4. 1971.
- [20] “Elektrik şebeke Yönetmeliği”, *EPDK*, 2014. [Çevrimiçi]. Available at: <http://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-6730/elektrik--sebeke-yonetmeliği>. [Erişim: 17-Eki-2019].
- [21] “Frequency Control of a Stand-Alone Hybrid Wind and Solar Based Distributed Generation System through an Optimized Energy Storage”. [Çevrimiçi]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/318035009_Frequency_Control_of_a_Stand-Alone_Hybrid_Wind_and_Solar_Based_Distributed_Generation_System_through_an_Optimized_Energy_Storage. [Erişim: 08-Kas-2019].
- [22] M. Funsho Akorede, H. Hizam, ve E. Pouresmaeil, “Distributed energy resources and benefits to the environment”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, c. 14, sayı 2, ss. 724–734, 2010.
- [23] F. Li vd., “Smart transmission grid: Vision and framework”, *IEEE Trans. Smart Grid*, c. 1, sayı 2, ss. 168–177, 2010.
- [24] “İletim Hattı Uzunlukları”. [Çevrimiçi]. Available at: <https://webapi.teias.gov.tr/file/3cdbf092-28d1-4920-8a37-691607e4e01f?download>. [Erişim: 29-Tem-2020].
- [25] H. B. Çetinkaya ve F. Dumlu, “Dağıtık üretim tesislerinin şebeke entegrasyonunda yaşanabilecek olası problemler ve entegrasyon analizleri”, içinde *Akıllı şebekeler Ve Türkiye Elektr. şebekesinin Geleceği Sempozyumu*, 2013.
- [26] “Mikroşebeke uygulama alanları ve bileşenleri”. [Çevrimiçi]. Available at: <https://www.aselsan.com.tr/tr/cozumlerimiz/enerji-sistemleri/enerji-yonetimi-ve-akilli-sebeke-sistemleri/mikro-sebeke-sistemleri>. [Erişim: 11-Ara-2019].
- [27] B. Türkay, “Dağıtılmış enerji kaynakları içeren şebeke tasarım önerisi”, *Elektrik Mühendisleri Odası*, 2009. [Çevrimiçi]. Available at: http://www.emo.org.tr/ekler/1ab1c9e23198a83_ek.pdf. [Erişim: 11-Ara-2019].
- [28] “Global EV outlook 2019”. [Çevrimiçi]. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>. [Erişim: 13-Ara-2019].
- [29] M. Yilmaz ve P. T. Krein, “Review of benefits and challenges of vehicle-to-grid technology”, içinde *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2012*, 2012, ss. 3082–3089.
- [30] L. Chhaya, P. Sharma, G. Bhagwatikar, ve A. Kumar, “Wireless sensor network based smart grid communications: Cyber attacks, intrusion detection system and topology control”, *Electronics*, c. 6, sayı 1, s. 5, Oca. 2017.
- [31] H. Var ve B. E. Türkay, “Akıllı şebekelerde durum kestirimi için fazör ölçüm birimlerinin optimum yerleştirilmesi”.
- [32] A. G. Phadke ve T. Bi, “Phasor measurement units, WAMS, and their applications in protection and control of power systems”, *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, c. 6.
- [33] L. Vanfretti, M. Baudette, J. L. Domínguez-García, M. S. Almas, A. White, ve J. O. Gjerde, “A phasor measurement unit based fast real-time oscillation detection application for monitoring wind-farm-to-grid sub-synchronous dynamics”, *Electr. Power Components Syst.*, c. 44, sayı 2, ss. 123–134, Oca.

- 2016.
- [34] I. F. Akyildiz ve X. Wang, “A survey on wireless mesh networks”, *IEEE Commun. Mag.*, c. 43, sayı 9, Eyl. 2005.
- [35] M. Geylani, M. Çibuk, H. Çınar, ve F. Ağgün, “Geçmişten günümüze hücresel haberleşme teknolojilerinin gelişimi”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Derg.*, c. 18, sayı 54, ss. 606–623, 2016.
- [36] V. C. Güngör vd., “Smart grid technologies: Communication technologies and standards”, *IEEE Trans. Ind. Informatics*, c. 7, sayı 4, ss. 529–539, Kas. 2011.
- [37] M. Cicioğlu, S. Cicioğlu, ve A. Çalhan, “Yazılım tanımlı bilişsel radyo (yt-br) ağları”, içinde *International Academic Research Congress(INES 2016)*, 2016, ss. 3026–3029.
- [38] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, ve S. Mohanty, “A survey on spectrum management in cognitive radio networks”, *IEEE Commun. Mag.*, c. 46, sayı 4, ss. 40–48, Nis. 2008.
- [39] T. Yang, T. Huang, Y. Gu, H. Gan, Y. Wu, ve H. Zhang, “Spectrum sensing for demand response management in smart grid”, içinde *2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, 2019, ss. 745–750.
- [40] M. Ozturk, A. I. Abubakar, N. U. Hassan, S. Hussain, M. A. Imran, ve C. Yuen, “Spectrum cost optimization for cognitive radio transmission over tv white spaces using artificial neural networks”, içinde *2019 UK/China Emerging Technologies, UCET 2019*, 2019.
- [41] G. Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi ve S. Ökdem, “Slotsuz IEEE 802.15.4 ağlarda CSMA/CA parametre değerlerinin hesabına yönelik monte carlo makinesinin tasarımı”, 2017.
- [42] M. Yigit, V. C. Gungor, G. Tuna, M. Rangoussi, ve E. Fadel, “Power line communication technologies for smart grid applications: A review of advances and challenges”, *Computer Networks*, c. 70. Elsevier B.V., ss. 366–383, 09-Eyl-2014.
- [43] Yük Tevzi Bilgi Sistemi, “31 Mart 2020 tarihli Türkiye geneli günlük enerji talebi”. [Çevrimiçi]. Available at: https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf;jsessionid=69B86E27BFD684875977ACADF537D792. [Erişim: 10-Nis-2020].
- [44] M. A. Zehir ve M. Bağrıyanık, “Akıllı şebekelerde gelişmiş yerel talep yönetimi”, içinde *EVK 2013 - 5. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, 2013, ss. 14–18.
- [45] S. Hajiaghasi, A. Salemnia, ve M. Hamzeh, “Hybrid energy storage system for microgrids applications: A review”, *Journal of Energy Storage*, c. 21. Elsevier Ltd, ss. 543–570, 01-Şub-2019.
- [46] “Carbon dioxide (CO₂) emissions by sector or source, World, 1960 to 2014”. [Çevrimiçi]. Available at: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>. [Erişim: 15-Nis-2020].
- [47] J. S. Vardakas, N. Zorba, ve C. V. Verikoukis, “A survey on demand response programs in smart grids: pricing methods and optimization algorithms”, *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, c. 17, sayı 1, ss. 152–178, Oca. 2015.
- [48] U. B. BALOĞLU, “Akıllı Şebekelerde Hesapsal Yöntem Uygulamaları”, Fırat Üniversitesi, 2017.
- [49] “European Council climate strategies & targets”. [Çevrimiçi]. Available at: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_en. [Erişim: 01-Kas-2019].
- [50] “IRENA renewable 2019 statics”. [Çevrimiçi]. Available at:

<https://www.irena.org/publications/2019/Jul/Renewable-energy-statistics-2019>. [Erişim: 06-Kas-2019].

- [51] F. Gangale, J. Vasiljevska, C. Covrig, A. Mengolini, ve G. Fulli, “Smart Grid Projects Outlook 2017, Facts, Figures and Trends in Europe”, 2017.
- [52] M. Tozak, S. Taşkın, ve İ. Yıldırım, “Smart grids and smart cities - A systematic mapping study”, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilim. Derg.*, c. 15, sayı 2, ss. 227–233, Haz. 2019.
- [53] P. Breeze, *Power generation technologies*, Third Edit. Elsevier Ltd., 2019.
- [54] “Enerji Atlası”. [Çevrimiçi]. Available at: <https://www.enerjiatlası.com/>. [Erişim: 29-Nis-2020].
- [55] “Türkiye Mart 2020 itibariyle kurulu gücü”. [Çevrimiçi]. Available at: <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/kurulu-guc-raporlari>. [Erişim: 29-Nis-2020].
- [56] “On Birinci Kalkınma Planı 2019-2023”, 2019.
- [57] N. Onat, “Mini Hidroelektrik Santraller için Güneş Pilleri ile Uyarılan Senkron Generatör Tasarımı”, Marmara Üniversitesi, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Elektrik Eğitimi Programı, 2005.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Macit TOZAK

Doğum Yeri ve Yılı : Manisa, 1990

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : macit.tozak@cbu.edu.tr

Eğitim Durumu

Lise : Dündar Çiloğlu Anadolu Lisesi, 2008

Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Bölümü, 2013

Mesleki Deneyim

Manisa Celal Bayar Üniversitesi 2017-..... (halen)

Yayınları

[1] M. Tozak, S. Taşkın, and İ. Yıldırım, “Smart Grids and Smart Cities - A Systematic Mapping Study,”
Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilim. Derg., vol. 15, no. 2, pp. 227–233, Jun. 2019.