

**T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKILLI ŞEBEKELERDE AC/DC HİBRİT ENERJİ SİSTEMLERİNİN  
GÜÇ AKIŞ ANALİZİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Ahmet NUR**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ**

**OCAK 2022**

**T.C  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKILLI ŞEBEKELERDE AC/DC HİBRİT ENERJİ SİSTEMLERİNİN  
GÜÇ AKIŞ ANALİZİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Ahmet NUR  
(23614150812)**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ**

**OCAK 2022**

## TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aőamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgmeden beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Pof. Dr. Asım KAYGUSUZ'a,

Tezin gelişimine katkı sağlayan tez komitesi üyeleri Prof. Dr. M. Salih MAMIŐ ve Dr. Öğretim Üyesi Taner GÖKTAŐ'a,

Tez çalıőmalarım boyunca maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Ulaő KILIÇ'a,

Çalıőmalarımda ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalıőmalarım süresince de bana verdiği her türlü desteklerinden dolayı aileme,

teşekkür ederim.

## ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “Akıllı Şebekelerde AC/DC Hibrit Enerji Sistemlerinin Güç Akış Analizi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ahmet NUR



## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ .....	i
ONUR SÖZÜ.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT .....	x
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Giriş .....	1
1.2 Literatür Taraması .....	2
1.3 Materyal ve Metot .....	6
1.4 Amaç ve İçerik .....	7
<b>2. AKILLI ŞEBEKELER VE GÜÇ AKIŞ ANALİZİ.....</b>	<b>9</b>
2.1 Giriş .....	9
2.2 Akıllı Şebekelerin Tarihsel Gelişimi .....	9
2.3 Akıllı Şebeke Tanımı.....	11
2.3.1 Akıllı şebekelerin temel özellikleri .....	14
2.3.2 Akıllı şebeke standartları .....	16
2.3.3 Dünyada akıllı şebeke çakışmaları .....	19
2.3.4 Türkiye’de akıllı şebeke çalışmaları.....	20
2.4 Akıllı Şebekeler ve Karbon Ayak İzi .....	21
2.5 Akıllı Şebekelerde Güvenlik.....	24
2.5.1 Fiziksel güvenlik .....	24
2.5.2 Siber güvenlik .....	25
2.6 Güç Akış Analizi .....	27
2.7 Hat Parametreleri.....	29
2.8 Bara Tipleri .....	30
2.8.1 Salınım barası.....	30
2.8.2 Generatör barası .....	31
2.8.3 Yük barası .....	31
2.9 Bara Admitans Matrisi ve Düğüm Denklemi .....	31
2.10 AC/DC Güç Akışı Hesaplamaları .....	33
2.11 İterasyon Metodları.....	35
2.11.1 Gauss-Seidel metodu .....	35
2.11.2 Newton-Raphson metodu.....	37
2.11.3 Fast-Decoupled metodu .....	40
<b>3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLI HİBRİT GÜÇ SİSTEMLERİ.....</b>	<b>41</b>
3.1 Giriş .....	41
3.2 Hibrit Güç Sistemleri.....	42
3.3 Hibrit Güç Sistem Bileşenleri .....	43
3.3.1 Rüzgar türbinleri.....	44
3.3.2 Fotovoltaik (PV) paneller .....	47
3.3.3 Hidroelektrik santraller .....	49
3.3.4 Dizel jeneratörler.....	50
3.3.5 Kontrol sistemleri .....	51
3.3.6 Enerji depolama üniteleri.....	51

3.3.7 Güç dönüştürücüleri .....	52
3.3.8 Yükler .....	53
3.4 Hibrit Güç Sistemi Topolojileri .....	54
3.5 Gerilim Kaynaklı Dönüştürücüler .....	56
<b>4. SONUÇLAR .....</b>	<b>61</b>
4.1 Giriş .....	61
4.2 Örnek-1:Değişken Güç Kaynaklarına Sahip AC 13 Bara sistemi .....	63
4.3 Örnek-2:Değişken Yüklere Sahip AC 13 Bara sistemi .....	70
4.4 Örnek-3:Değişken Güç Kaynakları ve Yüklere Sahip AC 13 Bara sistemi .....	75
4.5 Örnek-4: AC/DC 13 Bara Sistemi .....	81
4.6 Örnek-5: AC/DC ve Saf AC 13 Bara Sisteminin Karşılaştırılması .....	85
4.7 Örnek-6: AC/DC IEEE 33 Bara RDS Test Sistemi .....	86
4.8 Değerlendirme ve Öneriler .....	92
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>95</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>105</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>110</b>



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 : Geleneksel Şebeke ile Akıllı Şebeke arasındaki temel farklar.....	13
Çizelge 2.2 : Düşük karbon etkisi oluşturan akıllı şebeke sektörleri..	22
Çizelge 2.3 : Akıllı şebeke kullanımında CO <sub>2</sub> emisyon miktarındaki azalma.....	23
Çizelge 2.4 : Güç sistemi baralarının sınıflandırılması .....	30
Çizelge 3.1 : Hibrit sistemlerde kullanılan enerji depolama birimleri. ....	52
Çizelge 4.1 : Hatlardan aktarılan görünür güç değerleri.....	83
Çizelge 4.2 : Baralara ait gerilim genlik ve açı değerleri. ....	84
Çizelge 4.3 : Jeneratörlerin üretim değerleri.....	85
Çizelge 4.4 : AC/DC sistem ve saf AC test sistemin karşılaştırılması.....	85
Çizelge 4.5 : AC şebeke test sisteminin gerilim ve güç değerleri.....	88
Çizelge 4.6 : DC şebeke test sisteminin gerilim ve güç değerleri.....	88
Çizelge 4.7 : Test sisteminin AC tarafındaki güç akış çözümleri .....	89
Çizelge 4.8 : Test sisteminin DC tarafındaki güç akış çözümleri.....	91
Çizelge 4.9 : Newton-Raphson ve Gauss-Seidel yöntemlerinin karşılaştırılması.....	91

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 : Yapılan çalışmanın temel seviyede akış şeması .....	7
Şekil 2.1 : İlk geleneksel elektrik şebekesinin yapısı.....	10
Şekil 2.2 : Geleneksel şebekeden akıllı şebekeye geçiş süreci.....	14
Şekil 2.3 : NIST akıllı şebeke kavramsal modeli.....	18
Şekil 2.4 : Avrupa’da akıllı şebeke sistemlerinin uygulanmasının ısı haritası.....	20
Şekil 2.5 : Bir bireyin karbon ayak izi .....	22
Şekil 2.6 : Veri kaybına sebebiyet veren saldırıların dağılımı .....	24
Şekil 2.7 : Akıllı şebekelerde güvenlik gereksinimleri .....	26
Şekil 2.8 : Güç sistemi baraları ve hat parametreleri .....	29
Şekil 2.9 : AC/DC sistem için genel amaçlı bara gösterimi .....	34
Şekil 3.1 : Yenilenebilir enerji kaynakları.....	42
Şekil 3.2 : Hibrit güç sisteminde yer alan bileşenler .....	44
Şekil 3.3 : Kara ve deniz rüzgar türbinleri .....	45
Şekil 3.4 : Büyük ve küçük güçte rüzgar türbinleri kullanımı .....	46
Şekil 3.5 : Rüzgar türbinleri gücü ve çapının yıllara göre değişimi .....	47
Şekil 3.6 : Fotovoltaik panellerin yıllara göre fiyat değişimi .....	48
Şekil 3.7 : Fotovoltaik hücrenin çalışma şekli.....	48
Şekil 3.8 : Fotovoltaik hücrenin akım-gerilim eğrisi .....	49
Şekil 3.9 : Hibrit güç üretim sistemi .....	50
Şekil 3.10 : Hibrit DC şebeke yapısı.....	54
Şekil 3.11 : Hibrit AC şebeke yapısı.....	55
Şekil 3.12 : Hibrit AC/DC şebeke yapısı .....	56
Şekil 3.13 : İki terminalli dönüştürücüler.....	56
Şekil 3.14 : Multi terminalli dönüştürücüler .....	57
Şekil 3.15 : Gerilim-kaynaklı dönüştürücü modeli.....	57
Şekil 4.1: Örnek sistemlerin güç akış analizinin akış şeması.....	61
Şekil 4.2: İterasyon metodları ile güç akış analizi.....	63
Şekil 4.3: Değişken yenilenebilir kaynaklı 13 bara test sistemi .....	64
Şekil 4.4: Gün boyu rüzgar türbini güç dağılım değerleri.....	65
Şekil 4.5: Gün boyu güneş panelleri güç dağılım değerleri .....	65
Şekil 4.6: Değişken güç kaynakları için baraların gerilim değerleri .....	66
Şekil 4.7: Değişken güç kaynakları için baraların aktif güç değerleri.....	66
Şekil 4.8: Değişken güç kaynakları için baraların reaktif güç değerleri.....	67
Şekil 4.9: Değişken güç kaynakları için baraların kompleks güç değerleri .....	67
Şekil 4.10: Değişken güç kaynakları için bara-3’ün aktif güç değerleri.....	68
Şekil 4.11: Değişken güç kaynakları için bara-3’ün reaktif güç değerleri.....	68
Şekil 4.12: Değişken güç kaynakları için bara-3’ün kompleks güç değerleri.....	69
Şekil 4.13: Değişken güç kaynakları için bara-3’ün gerilim değerleri .....	69
Şekil 4.14: Değişken yükler için 13 bara test sistemi .....	70
Şekil 4.15: Gün boyu dinamik yük güç dağılım değerleri .....	71
Şekil 4.16: Değişken yükler için baraların gerilim değerleri .....	71
Şekil 4.17: Değişken yükler için baraların aktif güç değerleri .....	72
Şekil 4.18: Değişken yükler için baraların reaktif güç değerleri .....	72
Şekil 4.19: Değişken yükler için baraların kompleks güç değerleri .....	73
Şekil 4.20: Değişken yükler için bara-3’ün aktif güç değerleri .....	73
Şekil 4.21: Değişken yükler için bara-3’ün reaktif güç değerleri .....	74
Şekil 4.22: Değişken yükler için bara-3’ün kompleks güç değerleri.....	74
Şekil 4.23: Değişken yükler için bara-3’ün gerilim değerleri .....	75



<b>Şekil 4.24:</b> Değişken güç kaynaklarına-yüklere sahip AC 13 bara sistemi .....	<b>76</b>
<b>Şekil 4.25:</b> Değişken güç kaynakları-yüklerde baraların gerilim değerleri .....	<b>77</b>
<b>Şekil 4.26:</b> Değişken güç kaynakları-yüklerde baraların aktif güç değerleri .....	<b>77</b>
<b>Şekil 4.27:</b> Değişken güç kaynakları-yüklerde baraların reaktif güç değerleri .....	<b>78</b>
<b>Şekil 4.28:</b> Değişken güç kaynakları-yüklerde baraların kompleks güçleri .....	<b>78</b>
<b>Şekil 4.29:</b> Değişken güç kaynakları-yüklerde bara-3'ün aktif güç değerleri .....	<b>79</b>
<b>Şekil 4.30:</b> Değişken güç kaynakları-yüklerde bara-3'ün reaktif güç değerleri.....	<b>79</b>
<b>Şekil 4.31:</b> Değişken güç kaynakları-yüklerde bara-3'ün kompleks güçleri .....	<b>80</b>
<b>Şekil 4.32:</b> Değişken güç kaynakları-yüklerde bara-3'ün gerilim değerleri .....	<b>80</b>
<b>Şekil 4.33:</b> 13 baralı Hibrit AC/DC güç sistemi şeması.....	<b>82</b>
<b>Şekil 4.34:</b> 13 baralı saf AC güç sistem şeması.....	<b>86</b>
<b>Şekil 4.35:</b> Hibrit AC/DC sistemin 33 baralı AC güç şeması .....	<b>87</b>
<b>Şekil 4.36:</b> Hibrit AC/DC sistemin 5 baralı DC güç şeması .....	<b>87</b>



## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

<b>AC</b>	: Alternatif akım
<b>DC</b>	: Doğru akım
<b>VSC</b>	: Gerilim kaynaklı dönüştürücü
<b>LCC</b>	: Hat komütasyonlu dönüştürücü
<b>IEEE</b>	: Elektrik ve elektronik mühendisleri enstitüsü
<b>RDS</b>	: Radyal Dağıtım Sistemi
<b>NIST</b>	: Ulusal standartlar ve teknoloji enstitüsü (Amerika)
<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbondioksit
<b> V </b>	: Gerilim genliği
<b>δ</b>	: Gerilim faz açısı
<b>S</b>	: Kompleks güç
<b>P</b>	: Aktif güç
<b>Q</b>	: Reaktif güç
<b>pu</b>	: Birim değer
<b>V<sub>i</sub></b>	: İ barasındaki gerilim
<b>δ<sub>i</sub></b>	: İ barasındaki gerilimin faz açısı
<b>I<sub>i</sub></b>	: İ barasından akan akım
<b>G<sub>i</sub></b>	: İ barasındaki generatör
<b>S<sub>Gi</sub></b>	: İ barasındaki generatörün kompleks gücü
<b>P<sub>Gi</sub></b>	: İ barasındaki generatörün aktif gücü
<b>Q<sub>Gi</sub></b>	: İ barasındaki generatörün reaktif gücü
<b>S<sub>Li</sub></b>	: İ barasındaki yükün kompleks gücü
<b>P<sub>Li</sub></b>	: İ barasındaki yükün aktif gücü
<b>Q<sub>Li</sub></b>	: İ barasındaki yükün reaktif gücü
<b>Z<sub>ij</sub></b>	: Hattın empedansı
<b>B</b>	: Hattın şönt suseptansı
<b>a</b>	: Transformator dönüştürme oranı
<b>N</b>	: Bara sayısı
<b>Y<sub>BARA</sub></b>	: Bara admitans matrisi
<b>Y<sub>ii</sub></b>	: Self admitans
<b>Y<sub>ij</sub></b>	: Ortak admitans
<b>J</b>	: Jakobien matrisi
<b>C<sub>Y</sub></b>	: Yakınsama kriteri

# ÖZET

Doktora Tezi

## AKILLI ŞEBEKELERDE AC/DC HİBRİT ENERJİ SİSTEMLERİNİN GÜÇ AKIŞ ANALİZİ

Ahmet NUR

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

111+X sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

Elektrik enerjisinin üretim aşamasından başlayarak iletim, dağıtım ve tüketim aşamasına kadar tüm aşamalarında verimli, güvenli, çevre dostu bir enerji yönetimi oluşturulması akıllı şebeke kavramını ortaya çıkarmıştır. AC/DC hibrit enerji sistemleri iki veya daha fazla enerji üretim yöntemini kullanan sistemlerdir. Güç akış analizi ise elektrik enerji sistemlerinin analiz ve tasarımının temelini oluşturur. Güç akış analizinde amaç, bütün tüketim tesislerine yeterli miktarda, güvenilir, kaliteli, ekonomik ve kesintisiz enerji sağlamaktır.

Bu çalışmada, değişken yenilenebilir dağıtık kaynaklar ve değişken yükler kullanılarak 13 baralı bir AC sisteminde 24 saatlik güç akış analizi yapılmıştır. Analizler soucunda baraların gerilim, aktif, reaktif ve kompleks güç grafikleri elde edilmiştir. Çalışmanın devamında, literatürde bulunan, gerilim kaynaklı dönüştürücüler (VSC) içeren hibrit 13 baralı AC/DC test sistemi Matlab platformunda hazırlanmış ve bu sistemin güç akışı analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçları literatürde olan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Böylece önerilen hibrit 13 baralı AC/DC test sistemi güç akış algoritmasının doğruluğu kanıtlanmıştır. Daha sonra 13 baralı AC/DC test sistemi ve 13 baralı AC sistemi hat kayıplar yönünden karşılaştırılmıştır. Son olarak, IEEE 33 bara RDS (Radyal Dağıtım Sistemi) test sistemi kullanılarak yeni bir hibrit AC/DC sistemi hazırlanmıştır. Önerilen bu yeni sistem için Newton-Raphson ve Gauss-Seidel iterasyon metodları kullanılarak sistemin güç akışı analizi yapılmıştır. Analizler neticesinde elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Akıllı şebeke, Güç Akışı, Hibrit AC/DC sistem, İterasyon metodları

## ABSTRACT

Phd. Thesis

### POWER FLOW ANALYSIS OF AC/DC HYBRID ENERGY SYSTEMS IN SMART GRIDS

Ahmet NUR

Inonu University  
Graduate School of Nature and Applied Sciences  
Department of Electrical and Electronics Engineering

111+X page

2022

Supervisor: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

Creating an efficient, safe, environmentally friendly energy management at all stages of electrical energy, starting from the generation stage to the transmission, distribution and consumption stages, has revealed the concept of smart grid. AC/DC hybrid energy is that type of systems that use two or more energy generation methods. Power flow analysis constitutes the basis of the analysis and design of electrical energy systems. The power flow analysis aims to provide sufficient, reliable, high-quality, cost-effective and uninterrupted power to all consumption facilities.

In the present study, a 24-hour power flow analysis was performed in a 13 bus AC system by using variable renewable distributed sources and variable loads. As a result of the analysis, voltage, active, reactive and complex power graphs of the buses were obtained. Later, the hybrid 13 bus AC/DC test system with voltage source converters (VSC) in the literature was designed on the Matlab platform and the power flow analysis of this system was made. The results in this present study were compared with other results in the literature. Thus, the accuracy of the proposed hybrid 13 bus AC/DC test system power flow algorithm has been proved. Then, 13 bus AC/DC test system and 13 bus AC system were compared in terms of line losses. Finally, a new hybrid AC/DC system was designed using the IEEE 33 bus RDS (Radial Distribution Systems) test system. For this proposed new system, power flow analysis was performed using Newton-Raphson and Gauss-Seidel iteration methods. The results were compared and interpreted.

**Keywords:** Smart grid, Power flow, Hybrid AC/DC system, Iteration methods

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Giriş

Artan dünya nüfusu ile birlikte enerjiye talep sürekli olarak artarken, enerjide kaynak çeşitliliğinin sağlanması büyük önem kazanmıştır. Sanayinin ve insan yaşamının vazgeçilmez bir parçası olan enerjinin kaliteli ve ekonomik kullanımı dünya gündeminde devamlı olarak tartışılan bir konudur. Sanayileşme ile birlikte enerji tüketiminin de artması, mevcut enerjinin kullanımı ve taşınması sırasında kayıpların yüksek olması gibi nedenlerden dolayı akıllı enerji sistemleri hızla önem kazanmaktadır. Elektrik enerjisinin üretim aşamasından başlayarak iletim, dağıtım ve tüketim aşamasına kadar tüm aşamalarında verimli, güvenli ve çevre dostu bir enerji yönetimi oluşturma çabası akıllı şebeke kavramını ortaya çıkarmıştır [1-4].

Elektrik güç sistemini yükler, enerji üretimini gerçekleştiren santraller, enerjiyi taşıyan iletim hatları ve talep edilen enerjiyi müşteriye ulaştıran dağıtım hatları oluşur. Güç sistemlerinin sürekli hal çalışma durumuna ait karakteristik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan hesaplamalar güç akışı analizi olarak tanımlanır. Bir şebekenin planlama aşamasından işletme aşamasına kadar, daha sonra da işletme durumunda yapılması gereken en önemli analizlerden biri güç akış analizidir. Bu çalışmaların amacı; tasarım, planlama, kontrol ve ileriye dönük genişleme tahminleri için gerekli değerlendirmelerin yapılmasıdır. [5, 6]. Güç sistemlerinin büyümesi ve sistemin doğru çalışabilmesi zorunluluğu güç akışı analizinin önemini daha da artırmıştır. Güç akışı analizini zorunlu kılan nedenlerin en önemlisi, bara gerilimlerinin kontrol altında tutularak olası arıza ve kesintiler için önceden önlem alınabilmesinin sağlanmasıdır. Güç akışı çalışmaları, güç sistemleri analizinin çok önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Güç akışı probleminde her bir barada gerilimin büyüklüğü ile açısının belirlenmesi ve her bir hattan geçecek aktif ve reaktif güçlerin bulunması istenmektedir. Herhangi bir güç akışı çalışmasının ana amaç ve hedefleri aşağıdaki gibidir [7, 8]:

- Sistemdeki yük ve jeneratörlerin doğası ile ilgili bazı varsayımlara dayalı olarak iletim hatlarındaki aktif ve reaktif güçleri bulmak,
- Güç sistemindeki tüm baraların gerilimlerini hesaplamak,
- Hiçbir iletim hattı, trafo veya jeneratörün aşırı yüklenip yüklenmediğinin kontrol edilmesi,
- İletim kayıplarını en aza indirmek için güç sisteminin optimum yapısını bulmaktır.

Güç sistemlerinde analiz çalışmaları 1930' lardan itibaren başlanmıştır. Özellikle 1950'li yıllarda bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerin sonucu bilgisayarlı analiz metotları yeni analiz metotları olarak yerini almıştır. Bilgisayarların hızı, güvenilirliği, yüksek hassasiyeti güç akışı analizinde hızla yaygınlaşmasına sebep olmuştur. Günümüzde güç sistemlerini birçok yönden inceleyebilen paket programlar geliştirilmiş olup bu programlar kişisel bilgisayarlarda da kullanıma hazır hale getirilmiştir. Bu paket programları karmaşık yapıdaki güç sistemlerinde analiz ve değerlendirme yapılmasında mühendislere, operatörlere ve teknik elemanlara sistem hakkında ön bilgiler vererek gerçekleştirilecek işlemlerin bilinçli ve kontrollü bir şekilde yapılmasına imkân sağlamaktadır Enerji talebi ve bu talebin karşılanması için gerekli olan yatırımların yüksek maliyetleri, mevcut güç sistemlerinin optimal olarak işletilmesini zorunlu kılmaktadır. Son yarım yüzyılda yarı iletken teknolojisindeki ilerlemeye bağlı olarak DC sistemlerinin AC sistemlerine entegre edilmesiyle, AC-DC sistemlerinin gelişiminde önemli yollar kat edilmiş ve buna bağlı olarak literatürde, AC-DC güç akışı hesabı için farklı çalışmalar yapılmıştır. AC/DC hibrit enerji sistemleri ise iki veya daha fazla enerji üretim yöntemini kullanan sistemlerdir [9, 10].

## **1.2 Literatür Taraması**

Literatürde, özellikle son dönemlerde akıllı şebekeler ile ilgili çok sayıda çalışmaya rastlanmaktadır. Bu çalışmalarda, hem bir bütün olarak akıllı şebeke yapısına değinilmiş, hem de akıllı şebekeyi oluşturan bileşenler (dağıtık üretim sistemleri) ayrı ayrı incelenmiştir. Bu çalışmalardan birinde, bir PV güç kaynağının tasarımı ve kullanımını üzerinde çalışılmıştır. Buna göre, tüm sistemin PV, elektriksel yükler, DC/DC ve DC/AC çeviriciler ve kontrol yapıları Matlab/Simulink ortamında modellenmiş ve analizler yapılmıştır. Ayrıca harmonikleri azaltmak için filtre tasarımı üzerinde durulmuştur [10,11].

Güç sistem planlaması ve işletilmesi aşamaları için önemli bir analiz olan güç akışı analizi ile ilgili geçmişten bugüne yapılmış çok fazla sayıda çalışmaya rastlanmaktadır. Costa vd. yaptığı çalışmada iletim ve dağıtım şebekelerindeki güç akışı probleminin çözümü üzerinde yapılan çalışmaların yöntemleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bir başka çalışmada ise rüzgâr santralleri içeren sistemlerde kullanılmak üzere değiştirilen bir Newton-Raphson güç akışı metodu verilmiştir [12, 13].

Diğer bir çalışmada ise fazla gözlü şebekelerin güç akışı hesaplaması için farklı bir yaklaşım denenmiştir. Buna göre sistem radyal bölümler olarak ayrıştırılmış ve klasik yöntemlerle analizi yapılmıştır. Dengesiz üç fazlı güç sistemleri için döngü analiz metodu temelli güç akışı yönteminin tanımlandığı başka bir çalışmada öncelikle döngü analiz metodu açıklanmış, bu metoda ait formülasyonlar verilmiştir. Daha sonra, kompanzasyonlu geri-ileri yayılım metodu tanımlanarak bu yöntemin akış diyagramı ve formülleri verilmiştir. Başka çalışmada bir mikro şebekenin farklı yük koşulları altında kararlılık analizini yapmıştır. Oluşturulan mikro şebeke bir yakıt pili, bir mikro türbin, bir volan , iki fotovoltaik panel ve bir rüzgâr üretici sisteminden oluşmuştur [14-16].

Liu vd. yaptığı çalışma birbirlerine bağlı olarak çalışan bir AC ve bir DC şebekesi içeren mikro şebeke yapısı üzerinedir. AC şebekesi; rüzgâr türbini, dizel üreteçler ve sıradan AC yüklerden, DC şebekesi ise fotovoltaik paneller, yakıt pili ve DC yüklerinden oluşmuştur. Sistemde AC ve DC olmak üzere iki bara mevcuttur ve bu baralar her iki şebeke tarafından da beslenmektedir. Tüm yapıların modellenmesinden sonra çeşitli yük ve üretim senaryoları için benzetim programı çalıştırılmıştır. Şebeke bağlantılı durum ve izole durum için çalıştırılan sistemin sonuçları, hibrit yapıların hem şebeke bağlantılı hem de izole olarak çalıştırılabileceğini göstermiştir [17].

Güç akış analizi, klasik yöntemler ile çok fazla iterasyon ve dolayısıyla hesaplama gerektirdiğinden, araştırmacılar gelişen bilgisayar ve akıllı sistem teknolojilerini bu tip analizlerde sıklıkla kullanmışlardır. Kumar vd. yaptığı çalışmada, karınca algoritması yöntemi kullanılarak güç akışı analizi yapılmıştır. Gajalakshmi vd. ise güç akışı hesaplamasını bulanık mantık yöntemi ile yapmışlardır. Öncelikle fuzzy kuralları belirlenmiş ve bulanıklaştırma yapılmıştır. Daha sonra elde edilen sistem 3 baralı bir test sistemi üzerinde denenmiştir. Roy ve Chakrabarti, genetik algoritma temelli bir güç akışı çözümü geliştirerek enerji fiyatlandırması üzerine çalışmışlardır [18-20].

Harman, Trakya bölgesi enter-konnekte güç iletim sisteminin güç akışı analizini, bilgisayar ortamında farklı yazılım programları kullanarak gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen güç akışı analizi ile, Trakya bölgesinin; enerji iletim hatlarından akan aktif ve reaktif güçler, hatlarda oluşan kayıplar, baraların gerilim ve açıları, transformatör güçleri, generatör ve yüklerin aktif ve reaktif güç değerleri incelemiştir. Kurban ve Filik ise çalışmalarında, Türkiye'deki 22 baralı santrallerden müteşekkil güç sisteminin kayıplı ve kayıpsız durumlardaki ekonomik dağıtım analizini, Newton-Raphson yöntemini kullanarak gerçekleştirmişlerdir [21, 22].

Abdelaziz vd. farklı kaynak ve yükler içeren izole bir mikro şebekenin diferansiyel eşitliklerini oluşturmuş ve Newton güvenli-bölge yöntemi ile çözmüşlerdir. Yine şekil 2'de örnek bir yapısı görülen başka bir çalışmada, AC/DC hibrit şebekelerin güç akış analizi yapılmıştır. Newton güvenli-bölge algoritması ve farklı kontrol stratejileri ile karakterize edilen güç sisteminin operasyonel ve kontrol yönleri analiz edilmiştir [23, 24].

Efe, tasarlanan bir mikro şebekenin yapay sinir ağı ile güç akışı analizini yapmıştır. Elde edilen sonuçlar, aynı sistemin klasik Gauss-Seidel yöntemi temelli yazılımsal çözümü ile analizi yapıldığı zaman ortaya çıkan sonuçlar ile karşılaştırılarak yapay sinir ağının başarısı incelemiştir. Karadöl, güneş ve rüzgâr enerjili hibrit bir sistem tasarlamıştır. Üretilen enerji değerlerini, AC- DC gerilimlerini ölçmüş, enerjiyi istenilen gerilim ve akım değerine dönüştürebilen gerilim dönüştürücü ve veri kayıt cihazı kullanmıştır. Kurulan hibrit sistemden elde edilen gerilim ve akım değerleri anlık olarak kaydedilmiştir [25, 26].

Yalçın, çok uçlu AC-DC sistemi için bir yaklaşım sunmuştur. Çok uçlu AC-DC sistemlerinde optimal güç akışı hesabı için sezgisel yöntemler kullanılmış, Yapay Arı Kolonisi Algoritması ve Genetik Algoritmayı bu alanda uygulamıştır. Optimizasyon sonuçlarını iyileştirmek adına FACTS (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi) cihazlarından olan STATCOM (Statik Kompanzatör) ve TCSC (Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör), AC-DC sistemine kontrol değişkeni sağlayan eleman olarak ilave edilmiştir. Optimal güç akışı hesabı çalışmasında tüm AC-DC sistemine ait kontrol ve durum değişkenlerine ait değerlerin sınır değerler içinde tutulması amaçlanmıştır. Önerilen yaklaşım ile AC-DC sisteminde yapılan optimal güç akışı hesabı çalışması örnek bir sistem üzerinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir [27].



Murray vd. yapılan bir çalışmada, mikro üretim bağlantılarının şebekede oluşturduğu etkiler analiz edilmiştir. Buna göre, test sistemi olarak Leicester şehrindeki 11 kV fider ve buna bağlı alçak gerilim hatları seçilmiştir. Seçilen örnek şebeke, 3000 düğüm noktası ve 1262 bağlı kullanıcıdan oluşmaktadır. Daha sonra yük modellemesi, fotovoltaik sistem modellemesi, şebeke modellemesi yapılmıştır. Bu modellemelerin uygunluğu kontrol edildikten sonra modelleme sınırları tespit edilmiş ve mikro üretimin şebekeye etkisi tablo halinde verilmiştir. Dou ise dağıtık üretim kaynakları ile oluşturulan bir mikro şebekenin geçici durum kontrolü üzerine çalışmıştır [28, 29].

Lotfi ve Khodaei, bir AC/DC mikro şebeke planlaması üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada dağıtılan enerji kaynakları yatırım ve işletme maliyetlerini, dönüştürücülerin yatırım maliyetini, şebekeden alınan enerji maliyetini ve güvenilirlik maliyetini içeren bir mikro şebekenin toplam planlama maliyetini en aza indirmek amacıyla hibrit bir mikro şebeke planlama modeli önerilmektedir. Allam vd. ise, hibrit AC/DC mikro şebekelerin kararlı durum davranışını doğru bir şekilde analiz etmek için uygulanabilir bir araç olarak yeni bir güç akışı algoritması sunmaktadır. Sunulan model daha sonra optimize edilmiş bir güç akışına dahil edilmiş ve Newton-Güvenli Bölge metodu kullanılarak çözüm bulunmuştur [30, 31].

Ding ve Miao, AC/DC hibrit güç sisteminde STATCOM'un kontrol stratejisinin araştırılması üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, AC/DC hibrit güç şebekesinde dinamik reaktif gücün kontrol stratejisi analiz edilmiştir. Chai vd. gerilim kaynak dönüştürücüleri (VSC'ler) içeren AC/DC hibrit şebekelerde uygun bir çözüm elde etmek için Newton-Raphson yöntemine dayanan birleşik bir güç akışı algoritması önermektedir. İki AC bara ve iki DC baradan oluşan AC/DC hibrit test sistemi için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Arboleya vd. ise demiryolundaki güç kaynağı sistemlerine uygulanan birleştirilmiş AC/DC güç akışı yöntemine yeni katkılar ekleyerek güç akış probleminin uygulanma biçimi üzerinde durmuştur [32-34].

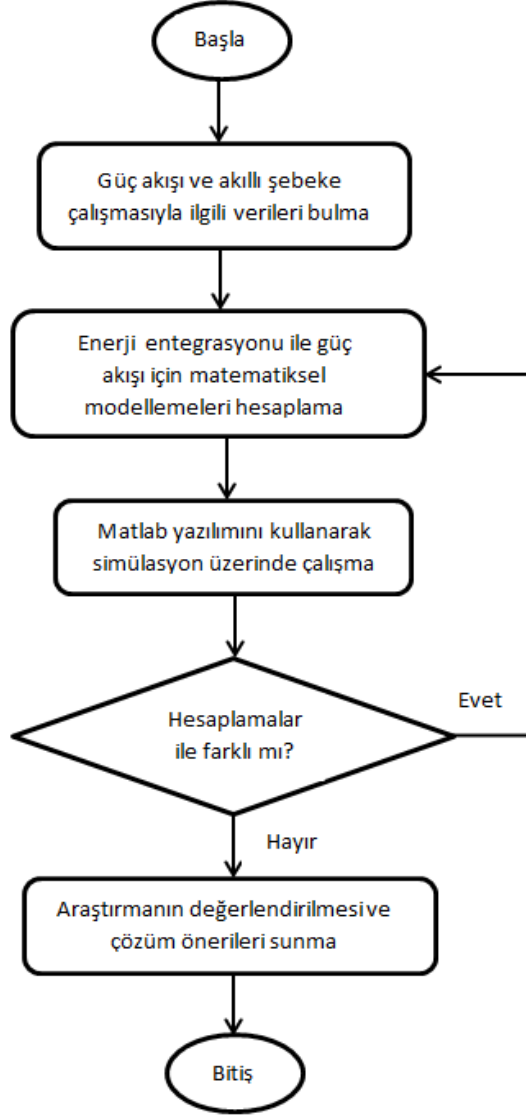
Jimenez vd. DC şebekeler için yeni bir güç akışı sunmaktadır. Sunulan yeni algoritma AC sistemleri için kolayca adapte olmanın avantajına sahiptir. Değişkenler değiştiğinde güç ve gerilimler üzerindeki etkilerin ayrıntılı bir çalışma ile gösterilmiştir. Lin ve ekibi yüksek gerilim DC sisteminin matematiksel modele göre ve DC hattı çalışma modunun anahtarlama kontrol moduna göre analiz etmiştir. DC sistem modeli, Matlab/Simulink yazılım paketini kullanılarak dizayn edilmiştir. Durum hesaplama sonuçları, Matlab tabanlı DC modeliyle PSAP modeli hesaplama sonuçlarının temelde aynı olduğunu göstermiştir.

Ma vd. enerji depolaması ve darbeli yükleri içeren AC/DC hibrit mikro şebekelerin gerçek zamanlı kontrolünü incelemiştir. Tanıtılan AC/DC hibrit güç akışı kontrol şemasının doğrulanması için deneysel sonuçlar sunulmuştur [35-37].

Khorasani vd. akıllı şebeke performansının optimizasyonu için yeni bir AC/DC mikro şebeke tasarımını sunmaktadır. Bu tasarım, güç kalitesi iyileştirmesi, güç akış kontrol, reaktif güç dengeleme ve güç salınımlarının ortadan kaldırılmasını içermektedir. Önerilen tasarım için Matlab/Simulink yazılımını kullanarak çeşitli bilgisayar simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Mousavizadeh vd. dağıtık üretimli AC/DC dağıtım sistemleri için güç akış analizi yapmıştır. Bu amaçla, farklı türde dağıtık matematiksel modeller sunulmuştur. Ardından, modeller güç akışı hesaplamaları için matrisi yöntemine dahil edilmiştir. Önerilen yöntem geri-ileri süpürme (BFS) yöntemine dayanmaktadır. Çalışma farklı türlerde dağıtılmış jenerasyonlar ve dönüştürücülerle donatılmış bir test sisteminde benzetimi yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur [38, 39].

### **1.3 Materyal ve Metod**

Bu tez çalışmasında alternatif enerji kaynaklarından rüzgar ve güneş enerji üretim profilleri ve değişken yükler 24 saat olarak tanımlanarak 13 bara saf AC sistemine uygulanacaktır. Ardından 13 baralı AC/DC sonra 33 baralı bir AC/DC hibrit enerji test sistemi hazırlanacak ve şebekeyle paralel çalışabilen uygulamalar gerçekleştirilecektir. Sistemde AC ve DC baralar, DC ve AC tarafları arasında güç alışverişinde bulunmak için üç fazlı transformatörler ve iki yönlü güç akışı dönüştürücüleri gibi elemanlar yer alacaktır. Daha sonra güç akışı analizi için AC ve DC sisteme ait gerekli olan parametrelerin Matlab programında önerilen sisteme uygulanacaktır. Ardından bara admitans matrisi oluşturularak baraların aktif ve reaktif güç değerleri, gerilim genlik ve açılarının tespit edilmeye çalışılacaktır. Çalışmada matematiksel olarak güç sistemleri ve parametrelerinin nasıl elde edilebileceği anlatılacak ve güç akış analizleri yapılacaktır. Elde edilen parametreler ile Matlab programında tasarımlar ve güç akışı algoritmaları oluşturulacaktır. Oluşturulan tasarımların güç akış analizleri için Newton-Raphson ve Gauss-Seidel yöntemleri kullanılacaktır. Bilgisayar ortamında tasarlanan AC/DC hibrit enerji sisteminden elde edilen değerler incelenerek sonuçların değerlendirilmesi yoluna gidilecektir. Temel seviyede yapılan çalışmanın basamaklarına ait akış şeması şekil 1.1'de gösterilmiştir.



**Şekil 1.1:** Yapılan çalışmanın temel seviyede akış şeması.

#### 1.4 Amaç ve İçerik

Yenilenebilir kaynaklarını içeren enerji sistemleri son yıllarda büyük bir ilgi görerek hızla gelişmektedir. Literatür taraması sonucunda geleceğin enerji sistemleri olan akıllı şebekelerin gelişmiş ve gelişme durumunda olan ülkelerde pek çok uygulama alanına sahip olduğu görülmektedir. Geleceğin şebekeleri yenilenebilir kaynakları içeren AC/DC hibrit sistemleri de kapsayacak şekilde tasarlanıp ve bir bütün olarak değerlendirilmektedir. Bu durum karmaşık yapıya sahip olan akıllı şebekelerin de güç akışı ve kararlılık analizlerinin yapılması gerekliliğini gözler önüne sermiştir.

Bu tezin birinci bölümünde literatür taraması, yöntem ve tezin amacı ifade edilmiştir. Tezin ikinci bölümünde akıllı şebekelerin tarihsel gelişimi ve tanımı, temel özellikleri ve standartları, ülkemizdeki ve dünyadaki akıllı şebeke çalışmaları, akıllı şebekelerde karbon

ayak izi, güç akış analizi, iterasyon metodları gibi konulardan bahsedilmiştir. Tezin üçüncü bölümünde yenilenebilir enerji kaynakları, hibrit AC/DC güç sistemleri ve bileşenleri, hibrit AC/DC güç sistem topolojileri, gerilim kaynaklı dönüştürücüler (VSC) anlatılmıştır. Son bölümde yenilenebilir kaynaklarını içeren enerji bir AC bara test sistemi önce kaynaklar sonra yükler daha sonra hem kaynaklar hem yükler değişken kabul edilerek baraların 24 saatlik aktif, reaktif, kompleks güç değer grafikleri elde edilmiştir. Ardından VSC'ler kullanılarak literatürde daha önce analiz edilmiş olan 13 baralı hibrit bir AC/DC sistem Matlab programında hazırlanarak güç akış analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile literatürdeki sonuçlar kıyaslanmıştır. Böylece tasarlanan Matlab programının güvenilir olduğu ispatlanmıştır. Çalışmanın devamında, 13 baralı hibrit AC/DC sistem ve saf AC 13 baralı sistem hat kayıpları yönünden karşılaştırılmıştır. Son olarak IEEE'nin 33 baralı RDS test sistemine DC sistem eklenerek hibrit AC/DC olarak tasarlanmış, farklı iterasyon yöntemleri ile analiz edilmiş ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

## 2. AKILLI ŞEBEKELER VE GÜÇ AKIŞ ANALİZİ

### 2.1 Giriş

Güç akışı analizleri, akıllı Şebeke güç sistemlerinin planlanmasında ve iőletilmesinde kullanılmaktadır. Akıllı Şebekelerdeki güç sisteminin planlanmasından amaç, bütün tüketim tesislerine yeterli miktarda, güvenilir, kaliteli, ekonomik ve kesintisiz enerji sağlamaktır. Güç sisteminin planlamasında; iletim tesislerinin tasarımı, iletim sisteminin analizi ve gelişimi, güç sistemleri arasında enerji alıő-veriői, üretim yeterlilik çalışması ve sisteme yeni ilavelerin fayda-maliyet analizleri gibi işlemler bulunmaktadır. Üretim planlamasını da güç sistemi planlamasının içine katabiliriz. İletim sisteminin gelecekte alacağı modeller hazırlanarak (örneğin puant yük koşullarında oluşturulan modeller ile) yük analizleri yapılabilir. Bu analizler sayesinde, sistemde kullanılacak elemanların (iletkenlerin tipi ve kesiti, transformatörler, kapasitörler vb) karakteristik özellikleri belirlenebilir. Güç akışı analizleri ile iletim hatlarının yüklenme durumları, baralarda limitler dışında kalan gerilimler, üretim tesislerinde üretilen reaktif üretimler ve işletmede oluşabilecek diğer parametreler belirlenir. Puant yük koőullarının yaygın olarak kullanılmasına rağmen, bazen minimum yük koşullarında da güç akışı analizlerinin yapılması gerekmektedir. Puant yük koşullarında belirlenemeyen gerilim yükselmeleri minimum yük koşullarında belirlenebilmektedir [40,41].

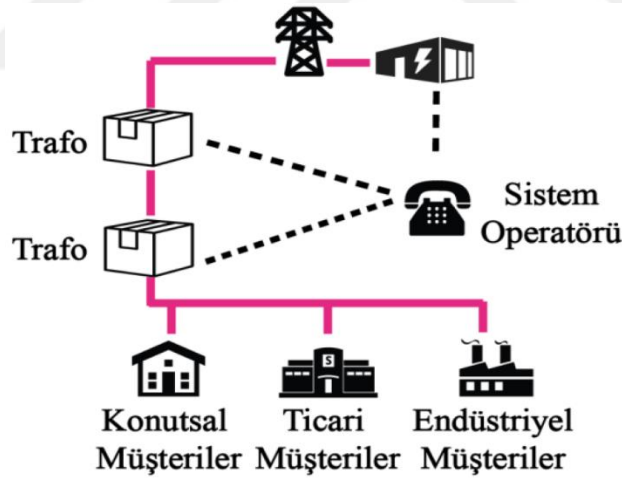
### 2.2 Akıllı Şebekelerin Tarihsel Gelişimi

İnsanoğlunun varlığının baőlangıcından beri gereksinimlerin karőılanabilmesi için enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Sanayi devrimi ile birlikte artan enerji ihtiyaçı, enerji kaynaklarının çeőitlenmesine de neden olmuştur. Enerji kaynakları ve talep arttıkaça daha uzak noktalardan tüketicilere enerji sağlanması gerekliliği enerji iletim hatları ve bileşenlerini devreye sokmuőtur. 19.yy da başlayan bu değişim 20.yy da nihai halini almıő ve konvansiyonel (geleneksel) Şebeke yapısı ortaya çıkmıştır. Alternatif akım elektrik Şebekeleri büyük ölçüde 1896'dan sonra temel olarak Nikola Tesla'nın 1888 yılında yayımlanan tasarımlarına bağlı olarak geliőtirildi [42, 43].

Alternatif Akım'ın Doğru akım karőısında üstün özelliklerinin kabul görmesinden sonra yaşanan bu geliőmelerden de anlaşılabilceği gibi günümüz Şebekelerinde kullanılan pek çok elemanın temelinde 120 yıl öncesinin -artık yetersiz sayılabilecek- teknolojisi yatıyor. [44].

Geleneksel şebeke yapısı, ufak tefek gelişmeler yaşansa da uzun yıllar boyunca çok değişmeden kalmıştır. Şekil 2.1’de ilk geleneksel şebeke yapısı gösterimi verilmiştir [45]. Geleneksel şebeke yapısının en üst katmanında üretim merkezleri bulunur ve müşteriler bu yapı içerisinde en alt katmanda yer alırdı. Ayrıca, kısıtlı bir haberleşme mekanizması bulunurdu. Bu mekanizma, sadece sorumlu şirketle üretim ve dağıtım birimleri arasındaki haberleşmeyi sağlardı. Doğal olarak, bu sistem tek-yönlü bir yapıda ve böyle bir sistemde gerçek zamanlı bir izleme yapmak mümkün değildir [46].

Gelişen ekonomik ihtiyaçlar ve artan talep çerçevesinde zamana yayılan eklemeler mevcut şebekelerin kontrolü zor, karmaşık şebekelere dönüşmelerine yol açmıştır. 1960’ların sonlarına doğru gelişmiş dünyada hemen her ev ve iş yeri elektrik hizmetine kavuşmuştu. Yüz yılın sonlarına doğru ise bu karmaşa özellikle kalabalık şehirlerde ve ileri derecede sanayileşmiş bölgelerde artan enerji kayıpları ve kontrol/takip güçlükleri olarak kendini göstermeye başlamıştır. Günümüzde ise şebeke yapısı içerisinde iletim kontrol merkezleri, yenilenebilir kaynaklar ve daha gelişmiş bir haberleşme altyapısı eklenmiştir [47]. Müşteriler hala en alt katmanda yer alır ve şebekeyle aralarında haberleşme sağlayacak bir altyapı bulunmaz.



**Şekil 2.1:** İlk geleneksel elektrik şebekesinin yapısı.

Genel olarak akıllı şebeke çalışmalarının temelini 1980’lerde başlayan elektronik kontrol, ölçüm ve izleme çabalarına dayandığı söylenebilir. 1990’larda sayaçların işlevselliğinin artması ve günün saatlerine göre elektrik kullanımına yönelik daha spesifik bilgilerin sağlanması da ”akıllı sayaç” teknolojileri için bir dönüm noktası olarak görülebilir [48].

2000’lerin başında İtalya’da hayata geçirilen “Telegestore Project” ilk geniş çaplı (27 milyon civarı konut üzerinden) akıllı sayaç kullanımı sayılmaktadır. Bu projede sayaçlar düşük bant

aralıklı, güç hattı üzerinden haberleşmeden yararlanmışken günümüzde geniş bant haberleşme teknolojileri ve kablosuz (wireless) haberleşme teknolojileri tercih edilmektedir. Geniş bölge şebekelerinin izlenmesi ve senkronizasyonu açısından 1990'larda Bonneville Power Administration'ın akıllı şebeke araştırmalarını ve prototip sensör kullanımı geniş alanlara yayması devrimsel nitelikte oldu. Bu çalışmanın sonucu 2000 yılına girerken ilk işlevsel Geniş Alan Ölçüm Sistemi (Wide Area Measurement System–WAMS) olarak kayıtlara geçmiştir [49, 50].

Konvansiyonel şebekelerin gelecekte Akıllı şebekelere (Smart Grid) evrileceği bilinen bir gerçektir. Akıllı şebeke (Smart Grid) teriminin kendisi ise en azından 2005 yılında S. Massoud Amin ve Bruce F. Wollenberg'in yazarlığını paylaştığı “Toward A Smart Grid” (Akıllı Bir Şebekeye Doğru) isimli makale IEEE P/E Magazine (Vol. 3, No:5, pgs 34-41)'de yayınlandığından bu yana kullanımda görünmektedir. Daha az belirgin izler takip edildiğinde terimin kökenleri 1998 yılına kadar izlenebilmekte. Bunun yanında bu kavrama yönelik kimi işlevsel, kimi teknolojik tabanlı pek çok tanım mevcut durumda [51].

Artan enerji fiyatları ve gelişen teknoloji tüketicilerin düşünce yapısını değiştirerek çoğu aboneyi pasif birer kullanıcı olmaktan çıkarıp daha bilinçli ve enerji kullanımında söz sahibi olmak isteyen, aktif kullanıcılar haline getirdi [52]. İki yönlü enerji akışına izin veren ve dağıtık enerji üretimini destekleyen akıllı şebeke teknolojisinin gelişimi ise bu noktada mevcut engellerin çoğunu kaldırarak şirketlere tüketici alışkanlıklarını değiştirme fırsatı tanıdı.

Klasik şebekelere dijital zeka katmanı eklenmesi ve böylece “akıllı” hale getirilmeleriyle bu şebekeler, enerjinin santralden prize kadar iki yönlü akışını otomatikleştirmek, izlemek ve denetlemek için sensörler, sayaçlar, dijital kumandalar ve analitik araçlar kullanır [53]. Böylece elektrik şirketleri, şebeke performansını optimize edebilir, kesintileri önleyebilir, kesintileri daha hızlı giderebilir ve kullanıcıların ağa bağlı bağımsız aygıtlara kadar enerji kullanımını yönetmelerine olanak sağlayabilir hale gelmektedir.

### **2.3 Akıllı Şebeke Tanımı**

Elektrik şebekelerini akıllandırmak için yapılan çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmalardaki ortak nokta, geleceğin elektrik şebekesinin bileşenlerini benzer bir biçimde tanımlıyor olmalarıdır. Genellikle şebeke bileşenlerinin düşük maliyetli, birbiriyle uyumlu, tepki süresi hızlı, ekolojik sistemlere duyarlı, esnek kullanımlı ve gerçek-zamanlı çalışabilen

bileşenler olmaları istenir. Bu beklentileri kullanarak bir akıllı şebeke tanımlaması yapılabilir ya da geleceğin şebekesine dair beklentiler kullanılarak bir tanım geliştirilebilir. Akıllı şebeke, geleneksel şebekenin regülasyon, teknoloji ve uygulama bakımından geliştirilmiş halidir. ABD Enerji Bakanlığı, akıllı bir şebekeyi şu şekilde tanımlar: Akıllı şebeke her bir müşteriye ve düğümü kontrol eden ve gözlemleyen, güç istasyonu ile kullanıcı arasında iki-yollu elektrik ve bilgi akışı sağlayan, tamamen otomatik bir güç dağıtım ağıdır [54]. Dolayısıyla, akıllı şebeke mevcut şebekenin akıllanmasından ibaret bir yapıymış gibi düşünülmemelidir ya da başka bir ifadeyle geleneksel şebekeler akılsız değildir. Bu tarz bir isimlendirmenin yapılmasının nedeni, geleceğin şebekesini tasarlamak için bir vizyon ortaya koymaktır.

Haberleşme alanında yaşanan gelişmeler, akıllı teknolojilerin şebekeler üzerine uygulanabilmesine imkan tanır. Bu açıdan bakılırsa akıllı şebeke; mevcut elektrik şebekesi içerisinde, gelişmiş otomasyonlara ve bilgi teknolojisi altyapısına sahip, elektrik ve haberleşme altyapılarının bir birlikteliği olarak da tanımlanabilir [55, 56]. Kimi araştırmacılar, geleneksel şebekelerin çeşitli yazılımlar ve otomasyonlar kullandığını, bu nedenle de “akılsız” olmadıklarını savunurlar. Geleneksel şebeke yapısı tabii ki “akılsız” değildir, burada önemli olan akıllı şebekenin geleneksel şebekeyi çok büyük ölçüde değişime uğratmasıdır. Akıllı bir şebeke yapısının geleneksel bir şebekeden nasıl farklılaştığını göstermek amacıyla Çizelge 2.1’de, şebekeler arasında bir karşılaştırma yapılmıştır [57]. Akıllı şebekelerde yüksek verimlilik ve tam otomasyon hedeflerine ulaşabilmek için teknolojinin haberleşme, kontrol gibi tüm imkanlarından yararlanır. Kısaca özetlersek akıllı şebekelerin geleneksel şebekelerden bazı üstünlükleri ise şunlardır [58]:

- Enerji kalitesi oldukça yüksektir.
- Enerji verimi yüksek, kayıp-kaçak oranı düşüktür.
- Sistemin kontrol ve yönetimi kolaydır.
- Sistem gelişen teknoloji ve yeniliklere açıktır.
- Sistemde arıza durumunda arızanın tespiti kolaydır.
- Sistemde tespit edilen arızanın onarım hızı yüksektir.
- Tüketicilere alternatif fiyatlarda enerji imkanı sunar.
- Tüketicinin varsa yenilenebilir enerjisini şebeke sistemine katarak çift yönlü enerji alışverişi sağlar.

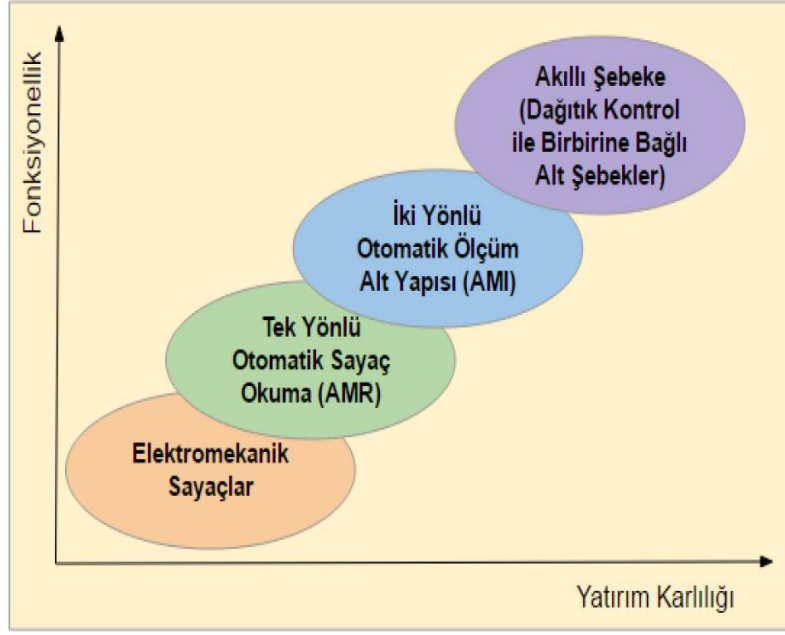


**Çizelge 2.1:** Geleneksel Şebeke ile Akıllı Şebeke arasındaki temel farklar.

<b>Geleneksel Şebeke</b>	<b>Akıllı Şebeke</b>
Elektromekanik	Dijital
Tek yönlü iletişim	İki yönlü iletişim
Merkezi üretim	Dağıtık üretim
Hiyerarşik	Ağ
Az sayıda algılayıcı	Çok sayıda algılayıcı
İzleme yok	İzleyebilme
Elle tamir / düzeltme	Kendi kendini onarabilen
Hatalar ve kesintiler	Hata olması halinde devam edebilme
Manuel ve sınırlı kontrol	Uzaktan ve yaygın kontrol
Az sayıda müşteri seçeneği	Çok sayıda müşteri seçeneği

Günümüz modern ihtiyaçları pek çok alanda mevcut şebeke altyapısı tarafından karşılanamayacak duruma geldiğinde ise yeni arayışlar başlamıştır. Akıllı şebekelere geçişte ilk geliştirilmesi gereken yer kesilmelerin, devre dışı kalmaların kaynağı olan dağıtım birimi olmalıdır. Yüksek talep anında üretim biriminin elektrik kaynaklarını tüketerek veya kapasitesini artırarak daha fazla enerji üretmesi beklenemez. Dağıtım birimi verimli bir hizmet sağlarsa, örneğin yüksek talep anında elektriğe ihtiyacı az olan yere vereceği elektriği o anda ihtiyacı olan yere yönlendirirse, kesilmelerin önüne geçilebilir.

Şekil 2.2.'de geleneksel şebekeden akıllı şebekeye geçişte yaşanan süreç gösterilmektedir. Otomatik Sayaç Okuma (Automated Meter Reading, AMR) ile sınırlı da olsa sayaçtan kaynağa okuma bilgisi gönderilmiştir, fakat gerçek zamanlı bir okuma sağlayamamıştır. Otomatik Ölçüm Altyapısı (Automated Metering Infrastructure, AMI) ise iki yönlü iletişimi sağlayan, temel hedefleri olan yük dengesi, maliyet koruma işlevlerini yerine getiren bir hizmet sunmaktadır [59].



**Şekil 2.2:** Geleneksel şebekeden akıllı şebekeye geçiş süreci.

### 2.3.1 Akıllı şebekelerin temel özellikleri

Akıllı şebekeler üzerine yapılan çalışmaların temelinde, mevcut şebekelerin hızla gelişen teknolojiden faydalandırılması düşüncesi yatar. Araştırmacılar, genellikle akıllı şebekeler nasıl olmalı, hangi bileşenleri barındırmalı ve nasıl tasarlanmalı sorularına cevap arar. Bu cevaplara göre; bir şebekenin akıllı sayılabilmesi için sahip olması gereken bazı özellikler aşağıda verilmiştir [60]:

1. Sayısal Yapı: Hızlı ve güvenilir ölçüm yapabilmek, kontrol ve hesaplama görevlerini gerçekleştirmek ve kolay bakım yapabilmek için, bütün yapının sayısal bir platform üzerine kurgulanması gerekir.
2. Esnek Yapı: Bir şebeke; gelişmelere çabuk adapte olmalı, değişik coğrafi bölgelere uygulanabilmeli ve farklı kontrol stratejileri ile denetlenebilmelidir. Ayrıca, şebeke içerisindeki yazılım ve donanım bileşenleri tak-çalıştır yükseltme imkanına sahip olmalıdır.
3. Dayanıklılık: Bir şebeke, değişen iklimsel koşullarından ya da doğal afetlerden etkilenmeden, herhangi bir kesinti olmadan çalışmasını sürdürebilmelidir. Bu tür problemlerle karşılaşıncı, en kısa sürede bir çözüm üretebilmelidir.
4. Akıllı Yapı: Akıllı teknolojiler ve hesapsal yöntemler, bir şebeke içerisinde gömülü olarak kullanılmalıdır. Sistem, kararlı bir yapı oluşturabilmek için çeşitli analizleri kendisi yapabilmeli; olası arızalarda kendisi için çözüm bulabilmelidir.

5. Kendi Kendini Onarabilme: Bir Şebeke, gerçek zamanlı olarak kendi durumunu gzlemleyebilmeli ve çevrim-içi hesapsal yöntemler kullanarak hatalara karşı önem alabilmelidir.

6. Çevreci Yapı: Akıllı bir Şebekenin sadece verimlilik üzerinden evre dostu olması yeterli değildir. Geri dönüŐümlü bileşenler ve yenilenebilir enerji kaynakları da kullanmalıdır. Yenilikçi teknolojilerin bir kısmının amacı, daha düşük karbon salınımı olmalıdır.

7. Ölçeklenebilirlik: Tüketim taleplerinin aşırı değişken olduğu bir dünyada, Şebekelerin ölçeklenebilir olması gerekir. Ölçeklenebilirlik, kesintiye uğramadan kapasite arttırmayı ya da azaltmayı mümkün kılar.

Akıllı Şebekeler genel olarak 5 katmandan oluşan bir yapıya sahiptir [60, 61]. Bunlar;

G Katmanı: Enerjinin retim, iletim, dağıtım, depolama ve tüketimiyle ilgili sistemleri içeren katmandır.

Kontrol Katmanı: Verilerin toplanması ve iletilmesi için akıllı algılama ve sürücü sistemlerini ihtiva eden katmandır.

Veri İletişim Katmanı: Verilerin etkin bir Şekilde iletiŐimini sağlayan sistemlerin katmanıdır.

Güvenlik Katmanı: Verilerin gizlilik, güvenlik ve Őifrelenmesi iŐlemlerinin yapılmasını sağlayan sistemler katmanıdır.

Uygulama Katmanı: Bilgi teknolojileriyle farklı g uygulamaları için karar verilmesini sağlayan sistemler katmanıdır.

Akıllı Şebekenin sahip olduğu en önemli özelliklerden biri, elektrik enerjisinin üretiminden son kullanıcıya dağıtımına kadar Şebekenin herhangi bir noktasında meydana gelebilecek bütün olaylara karşı bir stratejisinin olmasıdır [61]. Bu Şebekelerde, sürprizler ve beklenmedik olaylar yaŐanmaz. Akıllı Şebekeye, güvenilirlik ve etkinlik kazandıran bu önemli özelliği hesapsal yöntemler kullanılarak geliştirilen mekanizmalarla elde edilir. Akıllı Şebekede, aşağıdaki işlemler için çeşitli hesapsal uygulamalar kullanılır [62]:

- KoŐula bağlı varlık yönetimi ve bakımı
- Tüketici yk kontrolü
- ıkıŐ benzetimi
- Dağıtım sisteminin gerçek zamanlı analizi
- Acil durumlar için kurtarma araçları
- Arıza tespiti

- Besleme hattı gözlemleyicileri
- Entegre gerilim kontrolü
- Akıllı cihazların katılımı
- Yük tahmini
- Çok seviyeli besleme hattı konfigürasyonu
- Ağ yönetimi ve ağ optimizasyonu
- Güç kalitesi uygulamaları

### 2.3.2 Akıllı şebeke standartları

Standartlar olmadan, teknolojinin her alanında yaşanan gelişimlerin, sağlıklı bir şekilde sürdürülebilmesi mümkün olmamaktadır. Akıllı şebekeler gibi büyük altyapı sistemleri kurgulanırken, bu yapıya uygun standartların da geliştirilmesi gerekir. Standartlar, yeni teknolojilerin geliştirme maliyetlerini düşürür. Teknolojilerin geriye dönük uyumlu çalışmalarını, daha güvenli olmalarını ve sorunsuz bir biçimde yaygın olarak kullanılabilmelerini sağlar.

Akıllı şebeke yazılımları ve donanımları, farklı endüstri kolları tarafından geliştirildiği için daha önce bir arada çalışmamış bu endüstrilerin ortak standartlar geliştirip kullanmaları gerekir. Akıllı şebekeler içerisinde çok sayıda farklı teknolojilerin kullanıldığı, çeşitli senaryolar düşünülebilir. Örneğin, akıllı şebekenin, dağıtım sistemlerindeki kontrol üniteleri ve evlerdeki sayaçlarla irtibat kurduğu bir senaryo kurgulamak mümkündür. Başka bir senaryoda bir akıllı şebeke; akıllı ev aletleri, ev kontrol sistemleri ve şebekeyle haberleşebilir ya da elektrikli araçlarla etkileşimde bulunabilir. Benzer çok sayıda yeni senaryo rahatlıkla kurgulanabilir. Bu senaryoların sorunsuz gerçekleşebilmesi için birçok endüstrinin birlikte tanımlamalar yapması, protokoller ve standartlar geliştirmesi gerekir [45].

Akıllı şebekeler, çok sayıda yeni teknoloji içerdiği için, pekçok yeni standardın geliştirilmesine neden olmuştur. Bu standartlar geliştirilirken öncelikli alanlar aşağıdaki gibi belirlenmiştir [60]:

- Akıllı sayaç altyapısı
- Enerji verimliliği uygulamaları için ara yüzler
- Fazör ölçüm üniteleri ve diğer algılayıcılar
- Dağıtım şebekesi otomasyonu

- Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye katılımı
- Akıllı şebekelerde veri haberleşmesi
- Siber güvenlik

Akıllı şebeke standartlarını geliştirmekte olan uluslararası kuruluşlar, işbirliği içerisinde çalışıp farklı yerel ihtiyaçlara cevap verebilen uluslararası standartları oluşturur. Bu kuruluşlar arasında en çok ABD'den National Institute of Standards and Technology (NIST) kurumu öne çıkar. NIST, dünyadaki yaklaşık 600 şirket ve organizasyonla birlikte akıllı şebeke standart çalışmaları yapmaktadır [63]. NIST içerisinde, akıllı şebeke standartları geliştirmek için çok sayıda alt çalışma grubu bulunur. Bu çalışma grupları, akıllı şebekelerde ilerlemelerin hangi alanlarda olacağı konusunda bir fikir verir. Alt çalışma gruplarından bazıları aşağıda verilmiştir:

- Şebeke mimarisi
- Siber güvenlik
- Test ve sertifikasyon
- İletim ve dağıtım
- Endüstriden şebekeye (I2G)
- Binadan şebekeye (B2G)
- Evden şebekeye (H2G)
- V2G
- Ticari politikalar
- Sayaç güncelleme standartları
- Akıllı şebekede internet adresinin (IP) rolü
- Akıllı şebekeler için kablosuz haberleşme

Şekil 2.3'de NIST tarafından önerilmiş ve yaygın kabul görmüş akıllı şebeke kavramsal modeli verilmiştir. Çoğu geliştirici tarafından baz alınan bu modelde, güvenli bir haberleşme ağının örgü topolojisi gibi bütün bileşenleri kapsadığı dikkat çeker. Ayrıca, bir diğer dikkat çeken durum tüketicilerin aynı zamanda üretici vasfını kazanmalarındır. Bu durum yabancı



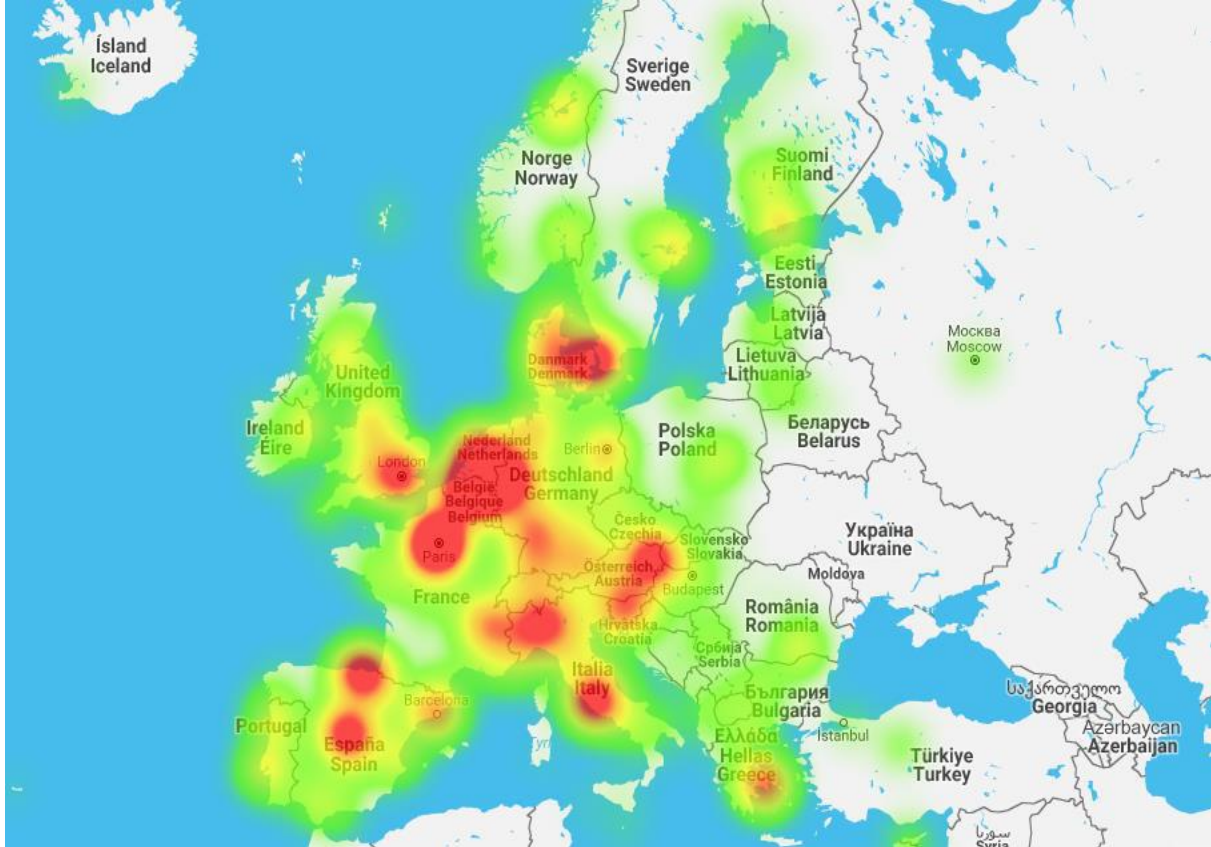
Electrotechnical Standardization (CENELEC) ve European Telecommunications Standards Institute (ETSI) bulunur. Güney Kore ve Çin gibi son yıllarda atılım yapan ülkeler, kendi standart geliştirme kuruluşlarına sahiptir. [64, 65]. Bütün bu uluslararası kuruluşlar tarafından geliştirilmiş önemli standartlardan bazıları aşağıdaki gibidir:

- IEC 62351 Güvenli Enerji Otomasyonu. Enerji otomasyonu ağlarındaki güvenlik gereksinimleri için hazırlanmıştır. Diğer IEC protokollerini de kullanarak yetkilendirme ve erişim kontrolü gibi işlemler için geliştirilmiş standartları içerir.
- IEC 15118 Güvenli Şarj. Elektrikli araç şarj ünitelerinin altyapısı için geliştirilmiştir.
- RFC 6272 Akıllı Şebeke için Internet Protokolleri. IETF tarafından hazırlanan OSI'yi (Open Systems Interconnect) referans modelini kullanan bir haberleşme protokolleri kümesidir.
- IEC 61850 Güç Uygulamaları için Haberleşme Ağları ve Sistemleri. Yüksek gerilim düşürücü merkezdeki haberleşme sistemleri için tasarlanmıştır.
- ANSI C12.19 Şebeke Endüstriyel Son Kullanıcı Cihazları Veri Tabloları. Akıllı sayaçlarda kullanılan veri tablolarını standart bir hale getirmek için bir ortak model geliştirilmesini hedeflemektedir.

### **2.3.3 Dünyada akıllı şebeke çakışmaları**

Dünyanın farklı birçok bölgesinde, hem yerel paydaşlarla hem de uluslararası işbirlikleriyle yapılan projelerde, akıllı şebeke konuları son yıllarda sıklıkla yer alır. Hem enerji alanında hem de teknolojiye yaşanan gelişmeler akıllı şebeke proje çalışmalarına verilen önemi arttırmıştır. Projeler, birbirinden farklı coğrafi bölgelerde yapılsalar bile temelde benzer sorunların üstesinden gelmeyi hedefler. Projelerdeki ortak amaçlar; şebeke altyapısının güçlendirilmesi, yenilebilir kaynak kullanımının artırılması, merkezi olmayan yapılara geçiş, şebeke içi haberleşme mekanizmalarının geliştirilmesi, akıllı sistemlerin oluşturulması, akıllı şehirler için altyapı kurgulanması ve şebekelerin elektrikli araçlar gibi yeni teknolojilere uyumluluğunun sağlanmasıdır. Akıllı şehirler için ön şartın akıllı şebekeler olduğunu düşünen çok sayıda ülke, pilot bölgeler belirleyip akıllı şebeke çalışmaları yapmaktadır. Yokohama, Amsterdam, Miami, Jeju Adası ve Colorado'da bu tür projelerin gerçekleştirildiği pilot bölgeler bulunur. Bu projelerde genel olarak akıllı sayaçlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının

şebekeye katılımı, elektrikli araçların şebeke üzerindeki etkileri ve şebeke bileşenlerinin yenilenmesi gibi konular araştırılmıştır. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi özellikle gelişmiş Avrupa ülkelerinde akıllı şebeke çalışmaları hızla yayılmaktadır [66, 67]. Akıllı bir şehirde, trafik denetiminden yerel hizmetlere kadar birçok mekanizma akıllı sistemler ile kurgulanır. Bu sistemlerin sağlıklı çalışabilmesi için ilk olarak elektrik şebekesinin akıllı yapılarla donatılması gerekir.



Şekil 2.4: Avrupa'da akıllı şebeke sistemlerinin uygulanmasının ısı haritası.

### 2.3.4 Türkiye'de akıllı şebeke çalışmaları

Doğu-batı ve kuzey-güney enerji koridorlarının tam ortasında yer alan, ekonomisi çok hızlı büyüyen bir ülke olan Türkiye'nin, en önemli ekonomik sorunu olarak cari açık gösterilmektedir. Cari açığa neden olan faktörlerin başında ise enerji harcamaları gelir. Türkiye, son on yılın verilerine göre elektrik enerjisine ve doğalgaza olan toplam ihtiyacın büyüme hızında, Çin'den sonra ikinci sırada yer alır [68]. Son 15 yıllık hızlı büyüme evresi, ülkenin enerjiye olan ihtiyacındaki artışın en önemli nedenidir. Petrol ve doğalgaz rezervlerine sahip olunmadığı için, talep artışı ithalatı, ithalat da cari açığı arttırmaktadır. Devam etmekte olan büyümenin, cari açığı daha fazla arttırmaması için Türkiye'nin akıllı şebeke alanında yaşanan gelişimlere hızlı bir biçimde adapte olması gerekir. Bu amaç



doğrultusunda, hem kamu hem de özel sektör stratejik planları arasında enerji konusu önemli bir yer tutar. Hükümet tarafından yakın bir tarihte açıklanan 2023 vizyonunda, akıllı şebekeler ve enerji alanlarında çeşitli projelere yer verilmiştir. 2023 yılına kadar, akıllı şebekeler için iletim hattı alanının 60717 km'ye, üretim kapasitesinin de 158460 MW'a çıkarılması planlanmıştır. Toplam enerji üretiminin %30'nun yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi ve rüzgar enerjisi katkısının 20 bin MW'a çıkarılması diğer öncelikli hedefler arasındadır.

Nükleer enerji konusu, ülke gündeminde daha ön planda yer alsa da Türkiye aslında yenilenebilir enerji kaynaklarına önemli yatırımlar yapan bir ülkedir. Fakat bütün bu çalışmaların istenilen düzeyde verimli bir katkı sağlayabilmesi için, akıllı şebeke alanında yatırımların hız kesmeden sürdürülmesi gerekir. Hem Avrupa Birliği ülkeleriyle şebeke teknolojisi açısından uyumluluk sağlamak hem de enerji alanında yaşanan birtakım sorunların üstesinden gelebilmek için akıllı şebeke teknolojileri geliştirmeyi amaçlayan projelerin sayısının zaman içerisinde arttırılması gerekir [69, 70].

#### **2.4 Akıllı Şebekeler ve Karbon Ayak İzi**

Elektrik enerjisinin akıllı şebeke sistemleri ile tasarlanması ve yönetilmesi sadece enerji verimliliğini sağlamaz, çevreyi ve atmosferi de büyük ölçüde korur. Sanayi devrimi ile birlikte miktarı her geçen yıl katlanarak artan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gazı, küresel ısınmaya neden olan sera gazını oluşturan en büyük bileşendir. Ülkeler sera etkisini azaltmak için Kyoto Protokolü gibi çeşitli uluslararası organizasyonlarla (CO<sub>2</sub>) emisyon miktarının azaltılmasına çalışmaktadır. Karbon ayak izi bir kişi veya kurumun yıllık aktiviteleri sırasında doğaya saldığı karbondioksit miktarını ifade eder. Bu aktiviteler ve hayatımızdaki oranları şekil 2.5'te ifade edilmiştir [71].



Şekil 2.5: Bir bireyin karbon ayak izi.

Enerji sektörü karbon ayak izinin büyüklüğünde oldukça önemli rol oynamaktadır. Elektrik enerjisi sektörü ise enerji sektöründe karbon ayak izini oluşturan en büyük bileşendir. Akıllı şebeke sektörleri (Çizelge 2.2) içinde önemli bir yer alan yenilenebilir enerji açısından ise ülkemiz oldukça zengin bir ülke konumundadır [72].

Çizelge 2.2: Düşük karbon etkisi oluşturan akıllı şebeke sektörleri.

Sektörler	Düşük Karbon Etkisi
Üretim Tarafı	Yenilenebilir enerji kombinasyonu
	Dağıtılmış üretim kombinasyonu
	Üretim planlama optimizasyonu
Dağıtım Tarafı	Enerji tasarruflu tesis uygulaması
	Depolama sistemi gönderilmesi
	Dağıtılmış üretim kullanımı
	Yenilenebilir enerji kullanımı
Tüketim Tarafı	Akıllı ölçüm penetrasyonu
	Optimal hibrit elektrikli araç şarjı
	Optimal ev aletleri kontrolü

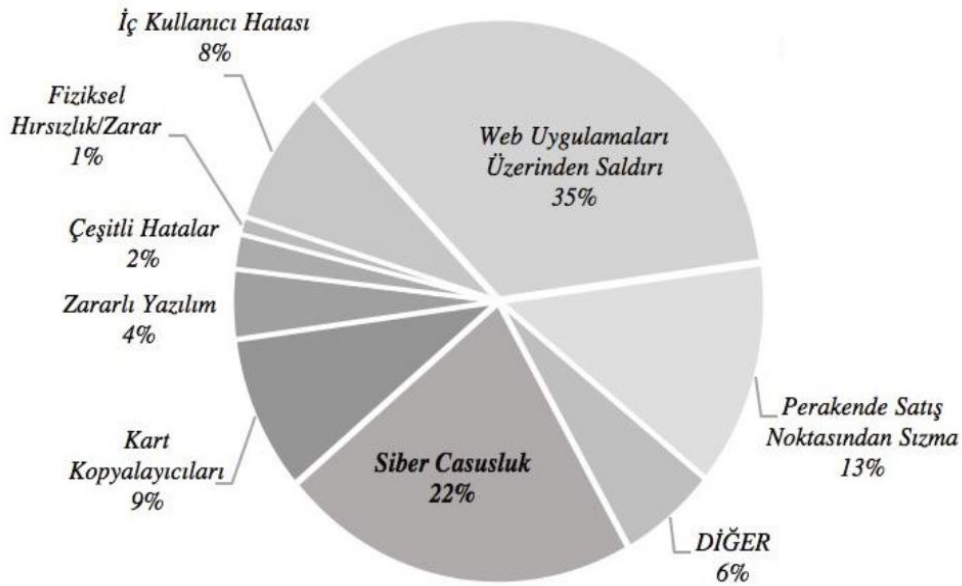
Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) tarafından ABD için hazırlanan rapora göre 2030 yılına kadar elektrik enerjisi sektöründe akıllı şebekelerin kullanımı durumunda doğrudan %12 ve dolaylı %6 olmak üzere toplamda %18 oranında bir enerji ve CO<sub>2</sub> emisyon azalması görülecektir. Bu oran ABD’de 525 milyon ton CO<sub>2</sub> emisyon azaltımı ile eşdeğerdir [72]. 2030 yılına kadar aynı akıllı şebeke politikasının ülkemiz için uygulanması durumunda benzer netice elde edilebilir. 2030 yılında Türkiye için öngörülen karbon salınım miktarı 2009 yılı salınım miktarı olan 299,1 milyon tonunun yaklaşık üç katıdır [12]. Bloomberg New Energy Finance (BNEF) tarafından Türkiye için gerçekleştirilen bir araştırmada, Türkiye’nin 2030 yılında elektrik üretiminin %47’sini yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlayabileceği öngörülmektedir [9]. Bu durumda Çizelge 2.3’deki verilere göre 2030 yılına kadar Türkiye tamamen akıllı şebekelere geçmesi halinde en az 200 milyon ton CO<sub>2</sub> emisyon azalması sağlamış olacaktır. Bu miktar ise yaklaşık 4.3 milyon binek otomobilin 1 yıl boyunca salmış olduğu CO<sub>2</sub> miktarı ile eşdeğerdir [73].

**Çizelge 2.3:** Akıllı şebeke kullanımında CO<sub>2</sub> emisyon miktarındaki azalma.

Elektrik Sektöründeki Mekanizmalar	CO <sub>2</sub> Emisyon Azaltımı *	
	Direkt(%)	Dolaylı(%)
Tüketicinin yük talep sistemlerinde	3	-
Yük talep sistemi ve talep yanıtı arasında	-	0.5
Konut içinde ve küçük/orta ticari binalarda	3	-
Enerji ölçme ve doğrulamada	1	0.5
Maks. talep yükün kaydırılmasında	<0.1	-
Elektrikli araç sistemlerinde	3	-
Gelişmiş gerilim kontrolünde	2	-
Rüzgar ve güneş enerjisi sistemlerinde	<0.1	5
<b>TOPLAM</b>	<b>12</b>	<b>6</b>
*Sistemin %100 akıllı şebeke sistemi ile yönetildiği durumda		

## 2.5 Akıllı Şebekelerde Güvenlik

Akıllı şebekeler, yeni teknolojilerle şebekeyi geliştirirken bir taraftan da daha önce şebekelerde hiç karşılaşılmamış olan güvenlik sorunlarının doğmasına neden olabilirler. Özellikle haberleşme sistemlerindeki olası açıklar, tüketicilerin kişisel verilerinin ele geçirilmesine ya da şebekenin çalışmasını engelleyebilecek siber saldırılara neden olabilir. Bir ülkenin, elektrik şebekesi altyapısına yapılacak bir siber saldırı, sadece kesintilere sebep olmaz; çok önemli fiziksel zararlara ve maddi kayıplara da neden olabilir. Bu yüzden, akıllı şebeke tasarlanırken kesinlikle güvenlik en ön planda yer almalıdır. Akıllı şebekelerde güvenliğin sağlanması hem kullanıcı hem de sağlayıcı açısından oldukça kritik bir öneme sahiptir ve birçok yönden sağlanması gerekmektedir [74, 75]. Aksi halde bu çok ciddi hasarlar oluşabilir ve ciddi veri kaybı yaşanabilir. Şekil 3.8’de veri kaybına sebebiyet veren saldırıların dağılımını gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Veri kaybına sebebiyet veren saldırıların dağılımı.

### 2.5.1 Fiziksel güvenlik

Akıllı şebekelerde yer alan taşınmazların güvenliğinin sağlanması fiziksel güvenliğin sağlanmasında ilk düşünülmesi gereken önlemdir. Saldırganların binalara yapacağı saldırılar; video izleme, kamera, elektronik erişim kontrolü, acil müdahale ile önlenmelidir. Bu önlemler IP tabanlı yapıyla entegre olabilecek şekilde esnek inşa edilmelidir. Güvenli bir altyapı; yönetim ve bilgiye ulaşma konusunda kolaylık sağlayacaktır. Ayrıca personelin

herhangi bir olay anında duruma müdahale edebilmelerini sağlayacak ve zamandan kazanç sağlayacaktır [76].

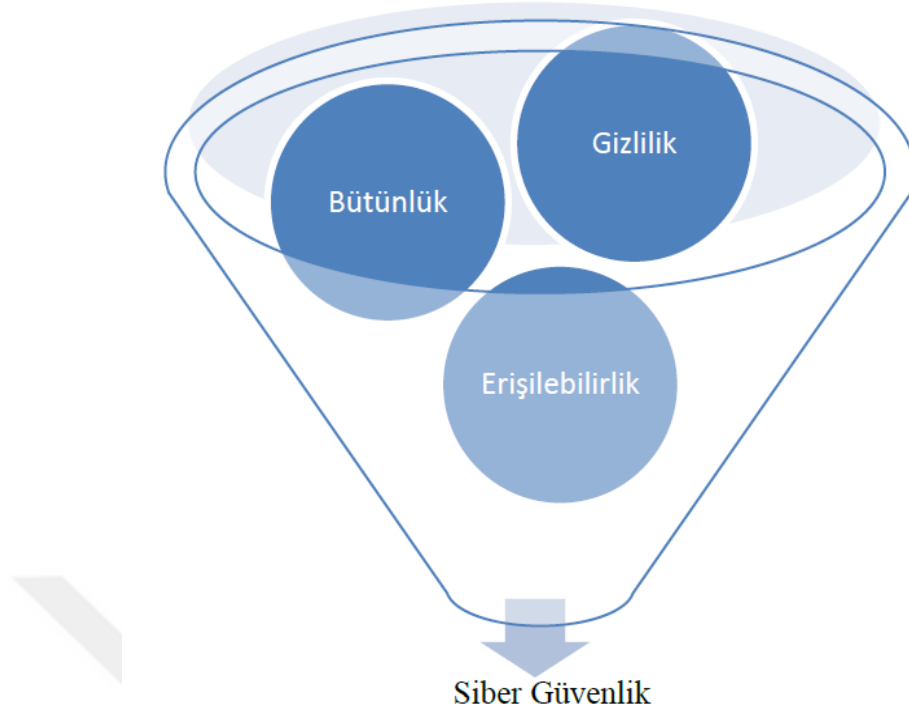
### 2.5.2 Siber güvenlik

Akıllı şebekede, siber saldırılara karşı güncel güvenlik standartlarına uygun biçimde tasarlanan savunma mekanizmaları bulunmalıdır. Güvenlik açısından değerlendirilirse, bir şebeke aşağıdaki yeteneklere sahip olmalıdır [77]:

- Hata kurtarma
- Kendi kendini onarabilme
- Açıkları tespit edebilme
- Yetkisiz girişleri ve zararlı yazılımları tespit edebilme
- Saldırlara karşı kendini koruma
- Olay günlüğü tutma
- Sistem yöneticilerini otomatik uyarma

Akıllı şebekelerde, akıllı sayaçların, akıllı ev aletlerinin ve uygulamaların kullanılmasıyla beraber kişisel verilerin güvenliğiyle ilgili önemli tehditler ortaya çıkar. Akıllı şebekeler, bir hanenin elektrik tüketimiyle ilgili çok detaylı veriye sahip olabildikleri için, bu verilerin kötü niyetli kişilerin eline geçmemesine dikkat edilmesi gerekir. Kişisel bilgi verileriyle ilgili karşılaşılan bazı riskler aşağıdaki gibidir [78]:

- Kimlik bilgisi hırsızlığı
- Davranışların ve özel alışkanlıkların belirlenmesi
- Kullanılan ev aletlerinin tespiti
- Gerçek zamanlı izinsiz izleme
- Haneye izinsiz girişler için açık bulunması
- Elektrikli araçlar ile seyahat bilgilerinin saptanması
- Uyku saatleri ve işe gitme zamanları gibi özel bilgilerinin elde edilmesi



**Şekil 2.7:** Akıllı şebekelerde güvenlik gereksinimleri.

Şekil 2.9’da gösterildiği gibi NIST; temel güvenlik gereksinimlerini ulaşılabilirlik, bütünlük ve gizlilik olarak belirlemiştir [79]. Kısaca açıklarsak;

**Ulaşılabilirlik:** Akıllı şebeke içerisinde herhangi bir veriye (okuma, kullanıcı, sistem durumu) kimlik doğrulamalı olarak herhangi bir zamanda ulaşılabilmesi ve gerekli cevabın alınabilmesi güvenlik açısından oldukça önemlidir. Bir akıllı şebekeye ulaşılabilmesinin durumunda elektrik kullanım bilgisi alınamayacak bu da bilerek veya bilmeyerek hırsızlığa yol açacaktır. Herhangi bir bölgede kullanılan elektrik miktarını bilemeyecek olan akıllı şebeke sistemi ise yük dengesini sağlamakta zorlanacaktır. Ulaşılabilirlik, tüm sistemi etkileyen önemli bir güvenlik gereksinimidir. Servis Reddi (Denial-of-Service, DoS) saldırılarının amacı cihazın her an ulaşılabilir olma özelliğine yöneliktir. Saldırganlar, yüksek frekansta yanlış veri göndererek cihazları meşgul edecek, iletişim ve hesaplama kaynaklarını tüketecektir. Cihaz, normal ağ trafiğine birkaç saniye bile olsa geç cevap vermesi halinde tüm sistemi ekonomi ve güvenlik açısından sarsacaktır [80].

**Bütünlük:** Akıllı şebeke içerisinde herhangi bir veri içeriğinin izinsiz olarak değiştirilmediğinden veya bozulmadığından emin olunmasını sağlamaktadır. Veri veya kontrol komutlarının değiştirilmesi ile yapılan saldırılar, akıllı şebekenin yanlış karar vermesine sebep olacak ve dolayısıyla sistem aksayacaktır. Bu tür saldırılar hem kullanıcı hem de ağ elemanları tarafından gerçekleştirilebilir.

En bilinen saldırı şekli, kullanıcının elektrik okuma bilgisini düşük göstererek düşük fatura gelmesini sağlamasıdır. Ya da ele geçirilen bir sistem elemanının bozulan bir başka cihazın bilgisini organizasyon yönetimine bildirmesi gerekirken bu bildirim sağlamayıp sistemin işleyişini bozmasıdır. Bu tür saldırıların önlenmesi için veri bütünlüğü ve yetkilendirme sağlanmalı ve hata/saldırı tespiti için her alanında etkili bir biçimde uygulanmalıdır.

Gizlilik: Kişisel kullanım bilgisinin kimlik doğrulama olmadan üçüncül kişiler tarafından görülebilmesini sağlamaktadır. Son kullanıcının davranışları/aktiviteleri hakkında detaylı bilgi içeren kullanım bilgisinin yabancıların eline geçmemesi gerekmektedir. Kullanıcının elektrik kullanımını elde eden saldırganlar, kullanıcıya ait özel bilgilere ulaşabilmektedirler. Örneğin, uzun süreli izlemede fırın veya ocağın çalışmaması o evde bir yaşam olmadığını gösterir ve hırsızlık amacı güden saldırganlar kolayca amaçlarına gerçekleştirebilmektedirler. Bu yüzden kullanıcıların mahrem bilgilerine izinsiz olarak ulaşılmalıdır [81].

Yukarıda sayılan önemli güvenlik gereksinimlerinin yanında güvenliği sağlamlaştırmaya yarayacak birçok gereksinim de vardır. Geniş coğrafik alanlara yayılmış çok sayıda sistem elemanının güvenliğini sağlamak oldukça zordur. Kimlik doğrulama, milyonlarca cihazın birbirine bağlı olarak çalıştığı akıllı şebekelerde cihaz ve kişilerin güvenliğinin sağlanması ve üçüncül kişilerin verilere ulaşmasını önlemeye yönelik en önemli adımdır. Yetki kontrolü ise akıllı şebeke içerisinde yer alan sistem veya kullanıcıların yetkisi dâhilinde veriye ulaşması, kullanıcıların veya belirli bir bölgenin elektrik kullanım miktarını öğrenmemesi için gereklidir. Ağ, üzerinden geçen verinin içeriğinin takibini ve değerlendirmesini, farklılık olması durumunda bozukluk veya güvenliği tehdit edecek bir durum olup olmadığını ilgili birimlere bildirimini yaparak dinamik olarak güvenliği temin edecektir. Bu şekilde çalışan bir iletişim ağında tehditler daha hızlı bertaraf edilecek ve saldırılara karşı daha dirençli olacaktır [82].

## **2.6 Güç Akış Analizi**

Güç sistemlerinin tasarlanmasının temelini oluşturan güç akışı analizi, güç sistemlerinin benzetiminde çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Güç akışı problemi, güç sistemlerinin bütün tüketim baralarındaki tüketimi karşılamak amacıyla üretim tesislerinde üretilen enerjinin, iletim ile dağıtım hatlarında ve transformatörlerdeki akışının analizlerle hesaplanmasıdır. Güç sistemlerinde iletim hatları ve transformatörlerin aşırı yüklenmemesi, bütün baralardaki gerilimlerin güvenli çalışma limitlerinin arasında kalması ve jeneratörlerin reaktif üretimlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalması gereklidir. Yani güç

sistemlerinin sağlıklı bir şekilde işletilebilmesi için, yeni üretim ve/veya tüketim tesislerinin sisteme ilave edilmesinin etkilerinin ya da ilave edilen iletim hattının etkilerinin, devreye girmeden evvel bilinmesi gereklidir. Güç sistemi işletmesinde, yük analizi yapılmak suretiyle belirlenen işletme koşullarında sistemdeki aşırı yüklenmeye maruz kalan hatların ve bu hatlardaki iletim limitlerinin belirlenmesi mümkündür [83]. Yine, güç akışı analizi yapılarak, güç faktörünün ve baralardaki gerilimlerin artırılabilmesi için kapasitörlerin sisteme konulacağı en uygun yerin ve kapasitelerinin belirlenmesi de mümkündür.

Güç akışı hesaplaması temel bir tasarım ve analiz çalışması olup güç sistem mühendisliği problemlerinden biridir. Güç akışı ayrıca bir sistemin sürekli hal koşullarını ifade eder. Güç sistemindeki yükler; alt istasyonlarda, büyük tüketicilerde, tüm elektrik üretici, tüketici ve dağıtıcı kurumlarında sürekli ve çok dikkatli bir şekilde takip edilmektedirler. Günlük, haftalık, mevsimlik ve yıllık yük tahminleri yapılabilmektedir. Yıllık tepe yük talebi tahmini, üretim ve planlama için yapılırken; enerji ihtiyaç tahminleri de elektrik üreticileri ve şirketleri için yapılır.

Güç akışı probleminin amacı daha önce de belirttiğimiz gibi bara gerilimleri, hat, transformatör, kablo yük akışları, empedansları, admitansları ve yükleri hesaplayarak, üretimleri belirleyerek enerji arzını karşılamaktır. Başka bir ifadeyle güç akışı problemi çözmenin temel amacı, verilen ağ yapısı, üretim ve tüketim değerlerini kullanarak baralar üzerindeki kompleks gerilim değerlerini ve hatlar üzerinde akan kompleks güç değerlerini bulmaktır (Esen, 2006). Güç akışı analizleri analiz türleri için de ilk adımı oluşturur. Bir sistemde güç akışı analizi için sistemde bilinmesi gereken temel veriler şunlardır [84-87]:

- İletim hatlarının empedansları ve şarj admitansları
- Transformatör empedansları ve kademe ayar değerleri
- Statik kapasitör veya reaktör gibi şönt bağlı teçhizatların admitansları
- Sistemde bulunan her bir baradaki tüketim (yük değerleri)
- Her bir jeneratörün üretim kapasitesi
- Jeneratör baralarının gerilimi veya jeneratörlerin reaktif üretimleri
- Jeneratörlerin maksimum ve minimum reaktif üretim limitleri

Bu verilerle;

- Sistemdeki her bir baranın bilinmeyen geriliminin genliği



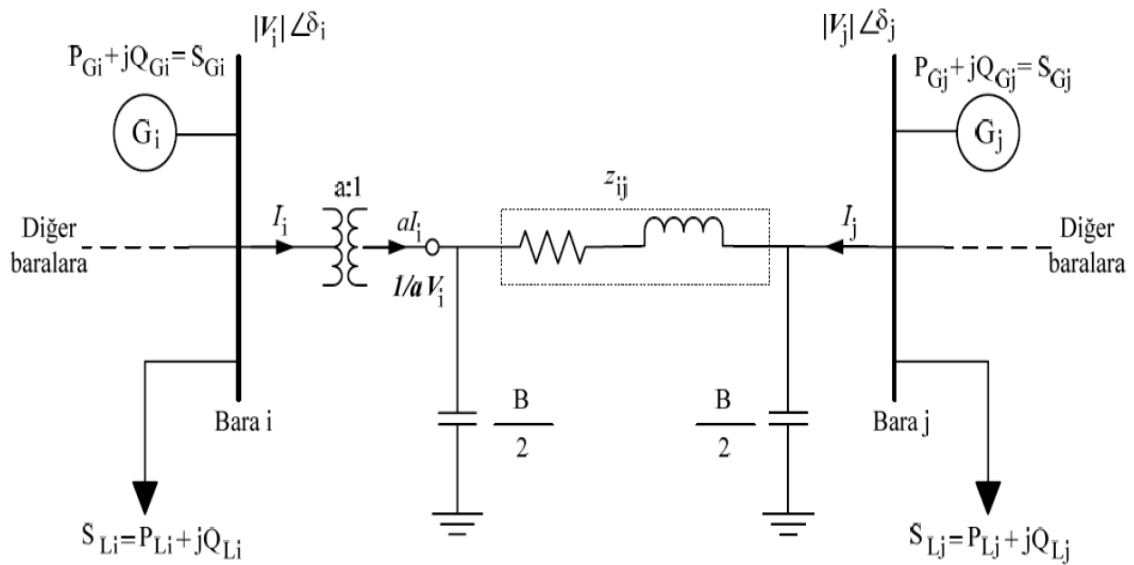
- Her bir baradaki faz gerilimi
- Reaktif üretimi bilinmeyen her jeneratörün reaktif üretimi
- Her bir iletim hattında ve transformatördeki aktif, reaktif güç akışı ve akımlar hesaplanabilmektedir.

## 2.7 Hat Parametreleri

Hat parametreleri, güç sisteminde gerilim düşümü hesabı, güç akışı, kararlılık, kısa devre, geçici rejim (tranzient) analizlerinde ve hatların farklı yüklenme koşullarında performanslarını değerlendirmede kullanılır. Bu tür analizlerin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için enerji iletim hatlarının elektriksel karakteristiklerini ifade eden hat parametrelerinin doğru hesaplanması gerekir.

Enerji iletim hatlarının karakteristik performansını etkileyen elektriksel hat parametreleri direnç, endüktans, kapasitans ve kaçak geçirgenliktir. Kaçak geçirgenlik hatlarda uygulanan izolasyon sayesinde ihmal edilebilir. Hat parametreleri, tesis edilen hat ve direk tasarımı esas alınarak hesaplanır [88].

Hat parametrelerinin belirlenmesi hattın uzunluğuna, iletken tipine ve faz iletkenlerinin birbirlerine göre konumlarına bağlıdır [89]. Şekil 2.8’de temel bir güç sistemine ait baralar ve hat parametreleri gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Güç sistemi baraları ve hat parametreleri.

## 2.8 Bara Tipleri

Güç akışı problemi ele alınırken, sistemin dengede ve sürekli hal koşulları altında çalıştığı varsayılmaktadır ve tek faz model kullanılmaktadır. Her bir baranın tüm özellikleri dört değişken yardımı ile belirlenmektedir. Bu değişkenler gerilim genliği  $|V|$ , faz açısı  $\delta$ , aktif güç  $P$  ve reaktif güç  $Q$ 'dur. Sistemin frekansı sabit ve gerilimi kararlı durum kabullerine göre baraları üç tip olarak tanımlarız [90]. Bunlar;

1-Jeneratör barası (PV barası)

2-Yük barası (PQ barası)

3-Referans bara (Slack veya salınım barası)

Aşağıdaki çizelgede görüldüğü gibi her bir barada 4 nicelikten ikisi verilir diğer ikisi ise hesaplanarak elde edilir.

**Çizelge 2.4:** Güç sistemi baralarının sınıflandırılması.

Bara Tipi	Bilinenler	Bilinmeyenler
Yük Barası	$P, Q$	$V, \delta$
Jeneratör Barası	$P, V$	$Q, \delta$
Referans Barası	$V, \delta$	$P, Q$

### 2.8.1 Salınım barası

Şebekedeki tüm santrallerin aktif üretimlerini tamamen bilmek mümkün değildir. Çünkü hat kayıpları bilinmemektedir. Bu nedenle aktif bara güçlerinden birini bilinmeyen yaparak, bunu çözümün sonunda elde etmek gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle, iletim hatlarındaki kayıp güçler nedeniyle, şebekedeki bütün santrallerin aktif güç üretim miktarları, sistemdeki baralardan birinde aktif güç bilinmeyen seçilerek, çözümün sonunda elde edilebilmektedir. Bu nedenle jeneratör baralarından birinde aktif güç bilinmeyen seçilir ki, bu baraya “salınım barası”, diğer bir deyişle “referans bara” denilir. Güç akışı analizlerinde salınım barası geriliminin genliği ve faz açısı değerleri girilir. Yani bu barada,  $V$  ve  $\delta$  bilinen değerlerdir. Salınım barasının aktif ve reaktif güçleri ise değişkendirler ve hesaplanmaları gerekir.

Bununla birlikte, salınım barasının üretim baralarından biri olması zorunlu değildir. Salınım barasının seçimi bazen problemin çözümünde yakınsaklaşmayı etkileyebilir. Genellikle salınım

barası sistemin elektriksel olarak merkezinde ya da çok sayıda hattın bağlı olduğu baraların arasından seçilir. Tabii bu kurallar tamamen deneyseldir. Salınım barasının aktif gücü değişkendir, bu gücün değeri de diğer santrallerin aktif üretimi ile aktif yükler ve kayıpların toplamı arasındaki fark kadardır. Şebeke baralarına numara verilirken salınım barasına numara vermek ve bu baradaki gerilimi diğer gerilimlerin faz referansı olarak almak faydalı olacaktır [90,91].

### 2.8.2 Jeneratör barası

Gerilim kontrollü bara olarak da bilinen bu tip baralarda P ve V bilinen değerler olup; jeneratör, statik kapasitör vb sistem elemanlarının bağlı olduğu bu baradaki reaktif güç limitleri ile gerilim sabit tutulabilir. [90]. Diğer bir deyişle, bu barada toplam P aktif gücü bilinmekte olup, V gerilim genliği de reaktif güç verilmesi ile belli bir değerde korunmaktadır. Bu bara tipi, genelde bir jeneratöre karşılık gelir.

### 2.8.3 Yük barası

Yük barası PQ barası olarak da adlandırılmakta olup, P ve Q bilinen, V ve  $\delta$  ise bulunması gereken değişkenlerdir [91]. Buradaki P+jQ gücü, fiziksel güç sistemlerinde bir şehir veya sanayi bölgesi gibi yük merkezlerine karşılık gelir. Bara gerilimlerindeki küçük değişikliklerin, P ve Q güçlerinin değerlerini etkilemediği varsayılır.

## 2.9 Bara Admitans Matrisi ve Düğüm Denklemi

Dengeli ve üç fazlı enerji sistemlerinde kullanılan güç akışı analizi sürekli hal koşulu altında genellikle aşağıda tanımlanan kabuller üzerine kurulur [92].

1. Jeneratörler, sisteme bağlı tüm yük talepleri ile iletim hatlarındaki toplam güç kaybını karşılarlar, kendilerine ait aktif ve reaktif güç sınırlarını aşmazlar.
2. Sistemdeki tüm baralara ait gerilim genlikleri nominal gerilim sınırları civarındadır.
3. İletim hatları ve transformatörler aşırı yüklenmezler.

Güç sistemindeki bir i barasının akımı;

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle_{ij} + \delta_j \quad (2.1)$$

şeklinde ifadesi edilebilir. Burada kompleks güç,

$$P_i - jQ_i = V_i I_i \quad (2.2)$$

şeklindedir. Denklem (4.6) ve (4.7) kullanılırsa

$$P_i - jQ_i = (|V_i| \angle -\delta_i) \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle_{ij} + \delta_j \quad (2.3)$$

elde edilir. Burada i ve j baraları arasındaki admitans  $Y_{ij}$  olarak ifade edilmiştir. Bara admitans matrisi, devre kollarının admitans değerlerini kullanarak bir şebekenin içine ve dışına akan akımlarla düğüm noktası arasındaki bağıntıyı kuran denklemlerdir. Düğümler baraları temsil etmektedirler. Dallar iletim hattını ve transformatörleri temsil eder. Düğüm denklemleri Kirchhoff'un akım yasasına dayandığı için admitansa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebepten empedanslar admitansa çevrilir [93]. Empedansları admitansa çevirme işlemi:

$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} \frac{r_{ij} - jx_{ij}}{r_{ij} - jx_{ij}} = \frac{r_{ij} - jx_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (2.4)$$

şeklinde yapılmaktadır. Düğüm denklemleri ise;

$$\mathbf{I}_{\text{Bara}} = \mathbf{Y}_{\text{Bara}} \cdot \mathbf{V}_{\text{Bara}} \quad (2.5)$$

şeklinde yazılmaktadır. Bu eşitlik matris formda yazılırsa;

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

olur.

Denklem (4.10)'da  $\mathbf{I}_{\text{Bara}}$  akım vektörünü,  $\mathbf{V}_{\text{Bara}}$  gerilim vektörünü ifade etmektedir.  $\mathbf{Y}_{\text{Bara}}$  bara admitans matrisi olarak adlandırılmaktadır.  $Y_{ii}$  self admitans,  $Y_{ij}$  ortak admitanstır.  $[\mathbf{Y}]$  matrisinin köşegen elemanlarını oluşturan self admitans, baraya bağlı tüm admitansların toplamına eşittir ve denklem (7) ile ifade edilir.

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij}, j \neq i \quad (2.7)$$

$[\mathbf{Y}]$  matrisinin köşegenleri dışındaki elemanları oluşturan ortak (transfer) admitansı ise baralar arasındaki admitansın negatif değerine eşittir.

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (2.8)$$

N baralı bir sistemi için herhangi bir baraya giren akım

$$I_k = \sum_{j=1}^N Y_{kj} V_j \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $Y_{kj}$  terimi admitans matrisinin elemanlarını ifade eder. Kompleks güç denklemini yazarsak

$$S_k = V_k \left( \sum_{j=1}^N Y_{kj} V_j \right)^* = V_k \sum_{j=1}^N Y_{kj}^* V_j^* \quad (2.10)$$

şeklinde olur.

Burada  $Y_{kj}$  bir admitans fonsiyonu olup kompleks bir değerdedir.  $V_k$ 'nın genlik ve açı değeri  $V_k = |V_k| \angle \theta_k$  şeklindedir.  $Y_{kj} = G_{kj} + jB_{kj}$  şeklinde yazılabilir. Burada  $G_{kj}$  ve  $B_{kj}$  elemanları bu admitans fonksiyonunun reel ve kompleks kısımlarıdır. Euler formunda fazör büyüklük  $V = |V| \angle \theta = |V| \{ \cos \theta + j \sin \theta \}$  gibi tanımlanmakta idi. Öyle ise (2.10) nolu denklem şu şekilde yazılabilir;

$$S_k = \sum_{j=1}^N (|V_k| |V_j| \angle (\theta_k - \theta_j)) (G_{kj} - jB_{kj}) \quad (2.11)$$

$$S_k = \sum_{j=1}^N |V_k| |V_j| \left( \begin{array}{l} \cos(\theta_k - \theta_j) \\ + j \sin(\theta_k - \theta_j) \end{array} \right) (G_{kj} - jB_{kj}) \quad (2.12)$$

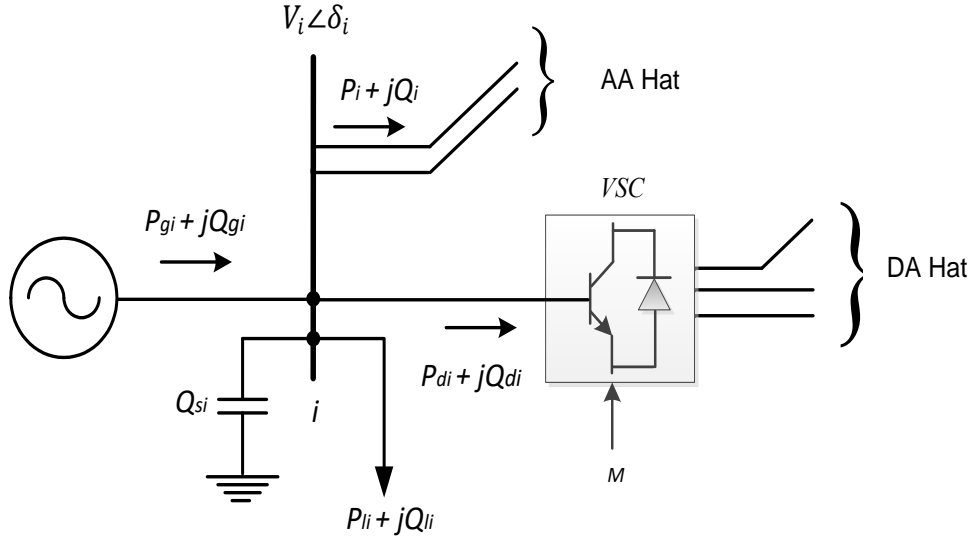
(2.12) nolu denklemi aşağıdaki gibi  $P_k$  ve  $Q_k$  olarak ifade edebiliriz;

$$P_k = \sum_{j=1}^N |V_k| |V_j| (G_{kj} \cos(\theta_k - \theta_j) + B_{kj} \sin(\theta_k - \theta_j)) \quad (2.13)$$

$$Q_k = \sum_{j=1}^N |V_k| |V_j| (G_{kj} \sin(\theta_k - \theta_j) - B_{kj} \cos(\theta_k - \theta_j)) \quad (2.14)$$

## 2.10 AC/DC Güç Akışı Hesaplamaları

Güç sistemlerinde, güç akışı algoritmasının tamamlanması, her bir baradaki aktif ve reaktif güç dengesinin sağlanması ile olur. AC/DC sistemine ait genel amaçlı bara gösterimi Şekil 2.9'da verilmiştir [94].



**Şekil 2.9:** AC/DC sistem için genel amaçlı bara gösterimi.

Sisteme ait eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$P_{gi} = P_{li} + P_{di} + P_i \quad i = 1 \dots N \quad (2.15)$$

$$Q_{gi} + Q_{si} = Q_{li} + Q_{di} + Q_i \quad i = 1 \dots N \quad (2.16)$$

Burada  $P, Q, V, \delta$  ve  $N$  sırasıyla aktif gücü, reaktif gücü, bara gerilim genliğini, bara gerilim açısını ve bara sayısını göstermektedir. Alt indisler  $g, l, s$  ve  $d$  sırasıyla jeneratör, yük, şönt reaktif kompensatör ve DC iletim hattını göstermektedir.

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad i = 1 \dots N \quad (2.17)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad i = 1 \dots N \quad (2.18)$$

Burada  $V_i, V_j, G_{ij}, B_{ij}$  ve  $\delta_{ij}$  sırasıyla  $i$  ve  $j$  numaralı baraların gerilim genliklerini,  $i$  ile  $j$  numaralı baralar arası admitansın gerçel, sanal kısımlarını ve bara açısı değerlerinin farkını göstermektedir. Evirici için DC sistemden AC sisteme aktarılan aktif güç, AC sistem için negatif değere sahiptir [95].

Sistem kısıtlamaları olarak tanımlanan  $h(x, u)$  fonksiyonu ise, AC-DC sistemine ait büyüklüklerinin alt ve üst sınır değerlerine ilişkin kısıtları içermektedir. AC sistemine ait kısıtlamalar;

$$p_{gi}^{\min} \leq p_{gi} \leq p_{gi}^{\max} \quad (2.19)$$

$$q_{gi}^{\min} \leq q_{gi} \leq q_{gi}^{\max} \quad (2.20)$$

$$v_i^{\min} \leq v_i \leq v_i^{\max} \quad (2.21)$$

$$t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max} \quad (2.22)$$

olarak verilirken, DC sistemine ait kısıtlamalar ise;

$$p_{di}^{\min} \leq p_{di} \leq p_{di}^{\max} \quad (2.23)$$

$$v_{di}^{\min} \leq v_{di} \leq v_{di}^{\max} \quad (2.24)$$

$$t_{di}^{\min} \leq t_{di} \leq t_{di}^{\max} \quad (2.25)$$

$$\theta_{di}^{\min} \leq \theta_{di} \leq \theta_{di}^{\max} \quad (2.26)$$

olarak yazılabilir.

## 2.11 İterasyon Metodları

Güç akışı problemi çok sayıda doğrusal olmayan denklemlerden oluştuğundan, çözümleri için iterasyon metotlarının kullanılması gerekir. Güç akışı analizi yapılmak istenen sisteme ait parametreler belirlendikten ve sistem baralarına ait bara admitans matrisi elde edildikten sonra analiz yapılacak yöntem seçilmelidir. Güç sistemlerinde güç akışı analizi için bilgisayarlı güç akışı analizlerinde en çok kullanılan yöntemler Gauss–Seidel, Newton–Raphson ve Fast-Decoupled yöntemleridir [96, 97].

### 2.11.1 Gauss-Seidel metodu

Bu metot ile bilinmeyenlerin değerleri tahmin edilir, birinci eşitlikte elde edilen değer  $V_1$ , ikinci eşitlikte yerine konularak  $V_2$ , üçüncü eşitlikte yerine konularak  $V_3$ 'ün hesaplanması için kullanılır. Bu işlem, her eşitlik için, yakınsama kriterini sağlayana kadar devam eder [36].

Denklem (4.10) eşitliklerindeki bilinmeyenlerin  $[V_{\text{bara}}]$  olduğunu kabul edelim. Gerilim değerleri yalnız bırakılırsa Gauss-Seidel iterasyon denklemleri,

$$V_1^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{11}} (I_1^{(i)} - Y_{12} V_2^{(i)} - \dots - Y_{1n} V_n^{(i)}) \quad (2.27)$$

$$V_2^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{22}} (I_2^{(i)} - Y_{21} V_1^{(i)} - \dots - Y_{2n} V_n^{(i)}) \quad (2.28)$$

$$V_n^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{nn}} (I_n^{(i)} - Y_{n1} V_1^{(i+1)} - \dots - Y_{nn-1} V_{n-1}^{(i+1)}) \quad (2.29)$$

elde edilir. Denklem 2.27-2.29 eşitliklerindeki  $I_n$  yerine,

$$I_n = \frac{P_n - jQ_n}{V_n^*} \quad (2.30)$$

yazılabilir.

Salınım baranın gerilimi bilindiği için onun geriliminin hesaplanmasına gerek yoktur. Denklem 2.17 ve 2.18 ile ifade edilen eşitlikler, sistemdeki tüm yük baraları için uygulanır. Yük baralarındaki P ve Q değerleri bilindiğinden V değerleri bulunmaya çalışılır. Güç sisteminde n bara olsun k. yük barası için Gauss-Seidel iterasyon denklemi,

$$V_k^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{kk}} \left( \frac{P_k - jQ_k}{V_k^{(i)*}} - Y_{k1} V_1^{(i+1)} - Y_{k2} V_2^{(i+1)} - \dots - Y_{kn-1} V_{n-1}^{(i+1)} \right) \quad (2.31)$$

elde edilir. 2.31 eşitliği  $i=0$ 'dan başlayarak  $V_k^{(1)}$  hesaplanır [31]. Bu işlem,

$$|V_k^{(i+1)} - V_k^{(i)}| < C_v \quad (2.32)$$

sağlanana kadar devam eder.  $C_v$  gerilim yakınsama kriterini göstermektedir ve 0,001 ile 0,0001 arasında bir değer alınır.

Gauss-Seidel ile yük akışı çözümünde, sistemdeki jeneratör baraları için yük akışı çözümü farklıdır. Bunun sebebi jeneratör baralarında Q yerine V bilinmektedir. Bu yüzden Q'nun hesaplanması gerekir. Bara sayısı n olan bir sistemde m. bara jeneratör barası olsun. Bu bara için verilen güç ifadesi aşağıdaki şekilde yazılabilir [98, 99].

$$S_m = V_m I_m^* = P_m + jQ_m \quad (2.33)$$

$$I_m = \frac{P_m - jQ_m}{V_m^*} = Y_{m1} V_1 + Y_{m2} V_2 + Y_{m3} V_3 + \dots + Y_{mn} V_n \quad (2.34)$$



$$P_m - jQ_m = V_m^{(i)*} \left( \sum_{j=1}^n Y_{mj} V_j^{(i)} \right) \quad (2.35)$$

(2.35) eşitliğinin sanal kısmı alındığında,

$$Q_m = -\text{Im} \left( V_m^{(i)*} \left( \sum_{j=1}^n Y_{mj} V_j^{(i)} \right) \right) \quad (2.36)$$

elde edilir. Bulunan tüm gerilim değerleri yerlerine konularak  $Q_m$  değerleri hesaplanır. Bulunan değerler  $Q_{\text{mak}}$  değerinden büyükse  $Q_m = Q_{\text{mak}}$ ,  $Q_{\text{min}}$  değerinden küçükse  $Q_m = Q_{\text{min}}$  değeri alınır. Hesaplanan  $Q_m$  yerine konularak gerilim hesaplanır.

Jeneratör baralarının gerilim fazörlerinin hesaplanması yük baralarının gerilim fazörlerinin hesaplanması gibidir. Gerilim değeri jeneratörün maksimum gerilim değerinden büyükse jeneratörün maksimum gerilimi, minimum değerinden küçükse minimum değeri alınır. Her iki durumda da açı değeri sabit tutulup bir sonraki iterasyonda kullanılır.

### 2.11.2 Newton-Raphson metodu

Güç akışın hesaplaması için Newton-Raphson yönteminin ana karakteristiği, bu yöntemin verimliliğinin bilinmeyen değişkenlerin başlangıç değerlerine bağlı olması gerçeğidir. Newton-Raphson yönteminde ilk değerler gerçek değerlerin yakınında seçilirse, yöntem daha verimli olur ve bir düz başlangıçlı başlangıç değerleri hesaplaması tamamen tatmin edicidir. Güç akışı probleminin aranan çözümüne Newton-Raphson yöntemini kullanılarak ulaşılan yinelemelerin sayısı Gauss-Seidel yönteminden daha çok düşüktür. Gauss-Seidel yönteminde olduğu gibi, Newton-Raphson'da yinelemelerin sayısı bara sayısına ve ağ topolojisine bağlı değildir. Newton-Raphson metodunda, bilinmeyenler için başlangıç değerleri tahmin edilir [100]. Doğrusal olmayan bir matris denklemi;

$$\begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} = [y] \quad (2.37)$$

olarak verilsin. Bu eşitlik Taylor serisine açılır, ikinci ve daha yüksek terimler ihmal edilir ise, (2.37) eşitliğini sağlayan  $x$  değerleri  $(i+1)$ . iterasyonda;

$$[x(i+1)] = [x(i)] + [j^{-1}(i)] * [y - f(x(i))] \quad (2.38)$$

denklemleri kullanılarak bulunur.

$[j]$ , Jacobien matrisi olarak adlandırılır ve  $(n \times n)$  boyutunda olup;

$$[j(i)] = \left[ \frac{df}{dx} \right]_{x=x(i)} = \begin{bmatrix} \frac{df_1}{dx_1} & \frac{df_1}{dx_2} & \dots & \frac{df_1}{dx_n} \\ \frac{df_2}{dx_1} & \frac{df_2}{dx_2} & \dots & \frac{df_2}{dx_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{df_n}{dx_1} & \frac{df_n}{dx_2} & \dots & \frac{df_n}{dx_n} \end{bmatrix}_{x=x(i)} \quad (2.39)$$

Taylor açılımında güç akışı algoritması;

$$[x]^T = [\delta_2 \quad \dots \quad \delta_n \quad V_{ng+1} \quad \dots \quad V_n] \quad (2.40)$$

$$[y]^T = [P_{hat2} \quad \dots \quad P_{hatn} \quad Q_{hat(ng+1)} \quad \dots \quad Q_{hatn}] \quad (2.41)$$

$$[f(x)]^T = [P_2 \quad \dots \quad P_n \quad Q_{(ng+1)} \quad \dots \quad Q_n] \quad (2.42)$$

olacaktır. Jacobien matrisi ifadesi (2.39)'da gösterilmiştir. Jacobien matris elemanları aktif ve reaktif güçlerin  $\Delta\delta_i^{(k)}$  ve  $\Delta|V_i^{(k)}|$ 'da hesaplanan kısmi türevleridir. Matrisin ana köşegen ve ana köşegen dışı elemanları için;

$$\frac{dP_i}{d\delta_i} = J1(i,i) = V_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_j (-G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2.43)$$

$$\frac{dP_i}{d\delta_i} = J1(i,j) = V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2.44)$$

$$\frac{dP_i}{d\delta_i} = J2(i,i) = V_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) + 2V_i G_{ii} \quad (2.45)$$

$$\frac{dP_i}{d\delta_i} = J2(i,j) = V_i (G_{ij} \cos \delta_{ij} - B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (2.46)$$

$$\frac{dP_i}{d\delta_i} = J3(i,i) = V_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (2.47)$$

$$\frac{dQ_i}{d\delta_i} = J3(i,j) = -V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} - B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (2.48)$$

$$\frac{dQ_i}{d\delta_i} = J4(i,i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) - 2V_i B_{ii} \quad (2.49)$$

$$\frac{dQ_i}{d\delta_i} = J4(i,i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) - 2V_i B_{ii} \quad (2.50)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{dP_2}{d\delta_2} & \frac{dP_2}{d\delta_3} & \dots & \dots & \frac{dP_2}{d\delta_n} & \frac{dP_2}{dV_{ng+1}} & \frac{dP_2}{dV_{ng+2}} & \dots & \dots & \frac{dP_2}{dV_n} \\ \frac{dP_3}{d\delta_2} & \frac{dP_3}{d\delta_3} & \dots & \dots & \frac{dP_3}{d\delta_n} & \frac{dP_3}{dV_{ng+1}} & \frac{dP_3}{dV_{ng+2}} & \dots & \dots & \frac{dP_3}{dV_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \frac{dP_n}{d\delta_2} & \frac{dP_n}{d\delta_3} & \dots & \dots & \frac{dP_n}{d\delta_n} & \frac{dP_n}{dV_{ng+1}} & \frac{dP_n}{dV_{ng+2}} & \dots & \dots & \frac{dP_n}{dV_n} \\ \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_2} & \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_3} & \dots & \dots & \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_n} & \frac{dQ_{ng+1}}{dV_{ng+1}} & \frac{dQ_{ng+1}}{dV_{ng+2}} & \dots & \dots & \frac{dQ_{ng+1}}{dV_n} \\ \frac{dQ_{ng+2}}{d\delta_2} & \frac{dQ_{ng+2}}{d\delta_3} & \dots & \dots & \frac{dQ_{ng+2}}{d\delta_n} & \frac{dQ_{ng+2}}{dV_{ng+1}} & \frac{dQ_{ng+2}}{dV_{ng+2}} & \dots & \dots & \frac{dQ_{ng+2}}{dV_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \frac{dQ_n}{d\delta_2} & \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_3} & \dots & \dots & \frac{dQ_n}{d\delta_n} & \frac{dQ_n}{dV_{ng+1}} & \frac{dQ_n}{dV_{ng+2}} & \dots & \dots & \frac{dQ_n}{dV_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

olur. Denklem (2.51)'deki aktif ve reaktif güç denklemlerinin açı ve genlik değişimlerine göre kısmi türevlerinden oluşan Jacobian matrisi;

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

şeklinde ifade edilebilir. İteratif olarak denklem (2.53), bir m iterasyon adımında aşağıdaki çözüm adımları ile hesaplanır [101, 102].

$$\delta^{m+1} = \delta^m + \Delta\delta \quad (2.54)$$

$$|V|^{m+1} = |V|^m + \Delta V \quad (2.55)$$

### 2.11.3 Fast-Decoupled metodu

Büyük boyutlu enerji iletim sistemlerinin izlenmesi ve kontrolü amacıyla ana bilgisayarda sık sık güç ve güç akışı hesabı yapılır. Algoritma olarak Newton-Raphson tercih edilmişse, sistemin büyümesi Jacobien matrisini de oldukça büyütür. Bu nedenle bilgisayar bellek gereksinimi artarak, algoritmanın yakınsaması uzar. Bu olumsuzlukları gidermek amacıyla Fast-Decoupled güç akışı çalışmaları başlamıştır. Fast-Decoupled metodu, güç sistemleri özelliklerinden yararlanılarak Newton-Raphson metodunun sadeleştirilmesiyle elde edilen bir çözüm yoludur.

Güç sistemlerinde, nominal işletme koşullarında bara gerilimlerindeki değişimler genellikle reaktif güç akışını, gerilim faz açılarındaki değişimler ise aktif güç akışını etkiler. Bu özellik kullanıldığında Jacobien matrisinin elemanları  $dP_i/dV_i$  ve  $dQ_i/d\delta_i$  ihmal edilmektedir. Bu şekilde güç akışı algoritması hem hızlandırılır, hem de bilgisayar bellek gereksinimi azaltılır. Algoritmanın daha da hızlandırılması için  $V_i \approx V_k \approx 1$  p.u. kabul edilip,  $\delta_i \approx \delta_k$  alınabilir. Bu son kabuller kullanılırsa  $J_1$  ve  $J_4$  sabit matris özelliği kazanır. Böylece her iterasyonda Jacobien matrisinin tekrar hesaplanmasına gerek kalmamaktadır. Dolayısıyla algoritmanın yakınsama hızı oldukça artar. Bu yaklaşım; zaman kazanmanın önemli olduğu yerlerde kullanılmakta olup, doğruya yaklaşık sonuçlar üretebilmektedir [103].

### 3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLI HİBRİT GÜÇ SİSTEMLERİ

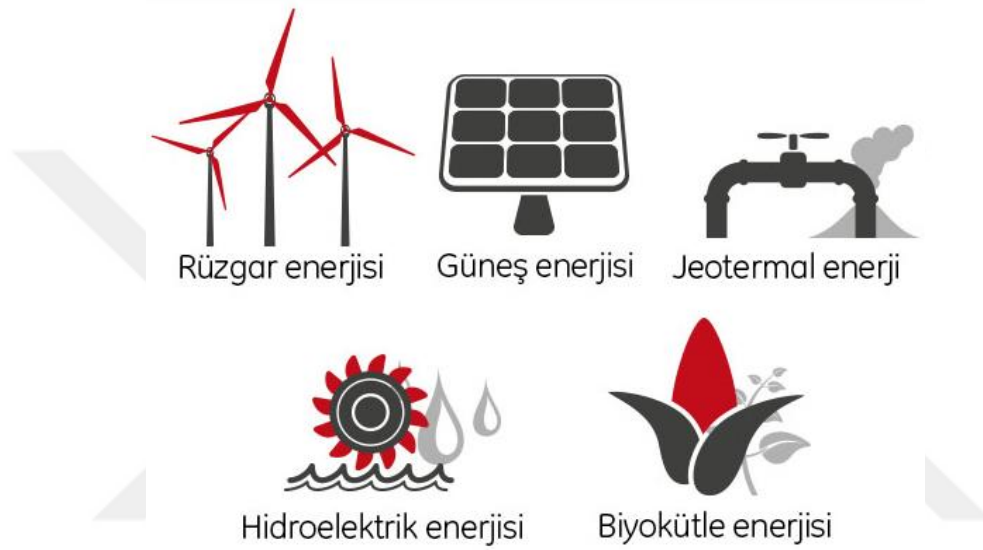
#### 3.1 Giriş

Artan dünya nüfusu ile birlikte enerjiye talep sürekli olarak artarken, enerjide kaynak çeşitliliğinin sağlanması büyük önem kazanmıştır. Sanayinin ve insan yaşamının vazgeçilmez bir parçası olan enerjinin kaliteli ve ekonomik kullanımı dünya gündeminde devamlı olarak tartışılan bir konudur. Küresel ısınma sorununa bağlı olarak yaşanan iklimsel değişimler, nükleer santrallerin oluşturduğu bazı riskler ve artan enerji maliyetleri yüzünden yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi ve enerji üretiminde sürdürülebilirlik popüler çalışma konuları haline gelmiştir. Günümüzde fosil kaynakların tükenmeye başlaması sonucunda enerji darboğazı ve çevreye verdikleri olumsuz etkilerden dolayı enerjinin temiz ve yenilebilir kaynaklardan elde edilmesini zorunlu kılmaktadır. Ülkemiz gibi enerji açısından dışarıya bağımlı birçok ülke, yenilebilir enerji kaynakları kullanarak bu dışarıya bağımlılığı azaltmayı arzular. Türkiye’de kamu teşvikleriyle, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen üretimin, toplam üretim içerisindeki yüzdesi her geçen gün arttırılmaya çalışılmaktadır. Avrupa Birliği ülkeleri ise 2020 yılındaki enerji tüketiminin, asgari %20’sinin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmesini zorunlu kılmış idi [104, 105].

Sürdürülebilir enerji, enerji üretilirken kullanılan doğal kaynakların yok olmayıp, zaman içerisinde kendilerini yenileyebilmesine denir. Sürdürülebilirlik, yeşil enerji ya da çevreci enerji üretimi için üzerinde durulması gereken önemli bir kavramdır. Yenilebilir enerji kaynakları, sadece doğa dostu değildir aynı zamanda sürdürülebilirlik özelliğine sahiptir. Bu kaynaklar, fosil-tabanlı yakıtlar gibi hem zaman içerisinde azalmazlar hem de tüketilirken doğaya zarar vermezler [106]. Akıllı şebekenin, gelecek açısından önemli olmasının bir diğer nedeni yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye katılmalarını ve yönetilmelerini kolaylaştırmasıdır.

Şekil 3.1’de gösterildiği gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını yaygın olarak rüzgar, güneş, jeotermal, hidroelektrik ve biyokütle enerjisi oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en fazla bilinenleri, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisidir. Fakat bu kaynaklar, kendi doğaları gereği şebekeye katılırken bazı sorunlara neden olur. İyi bir planlamayla, mühendislikle ve doğru hesapsal yöntemlerin kullanımıyla bu sorunlarla baş edebilmek mümkündür [107]. Bu kaynakların mimari tasarımı yapılırken, bağlantı noktalarının çok iyi

belirlenmesi, güvenlik ve güvenilirlik açısından iyi bir sistem planlamasının yapılması gerekir. Ayrıca, kullanımlarından kaynaklanan dalgalanmaların ve güç kalitesi bozulmalarının önüne geçmek için iyi bir yük kestirim yöntemi ve akıllı yazılımlar bulunmalıdır. Bu sayede, yatırım maliyetlerinin geri dönüşü hızlandırılabilir ve birim üretim başına düşen maliyet azaltılabilir. Dikkat edilmesi gereken bir başka nokta, dalgalanmaları gidermek için destek kaynak kullanımıyla ilgilidir. Bu destek kaynakların, düşük verimlilikte kullanılması beklenenden daha fazla çevre kirliliğine neden olabilir. Bu kaynaklar kullanılırken, çok iyi bir sistem planlaması yapılmalıdır.



**Şekil 3.1:** Yenilenebilir enerji kaynakları.

### 3.2 Hibrit Güç Sistemleri

En az iki farklı enerji kaynağının birbirini tamamlamasıyla oluşan enerji sistemleri hibrit güç sistemleri olarak adlandırılır. Hibrit güç sistemlerinde birden fazla enerji kaynağının birlikte kullanımını sayesinde hem verim artırılmış hem de arıza durumunda sistemin enerji ihtiyacı kesintisiz karşılanmış olur. Hibrit güç sisteminde yer alan mikro şebekeler, ana güç şebekesine bağlı veya bağımsız olarak çalıştırılabilir [108, 109].

Hibrit şebekeyi oluşturan generetörler, rüzgâr türbinleri, fotovoltaik modüller gibi üretim kaynakları, uygun dönüştürücüler yardımıyla AC veya DC yükleri beslerler. Hibrit sistemler, tek bir enerji üretim kaynağına göre genellikle daha güvenli ve daha az maliyetlidir [110]. Bir hibrit sistem tasarlanırken elemanların boyutlandırma ve en uygun kontrol stratejisi elde edilmelidir. Hibrit AC/DC güç sisteminin kontrolünde iki önemli husus vardır. Bunlar;

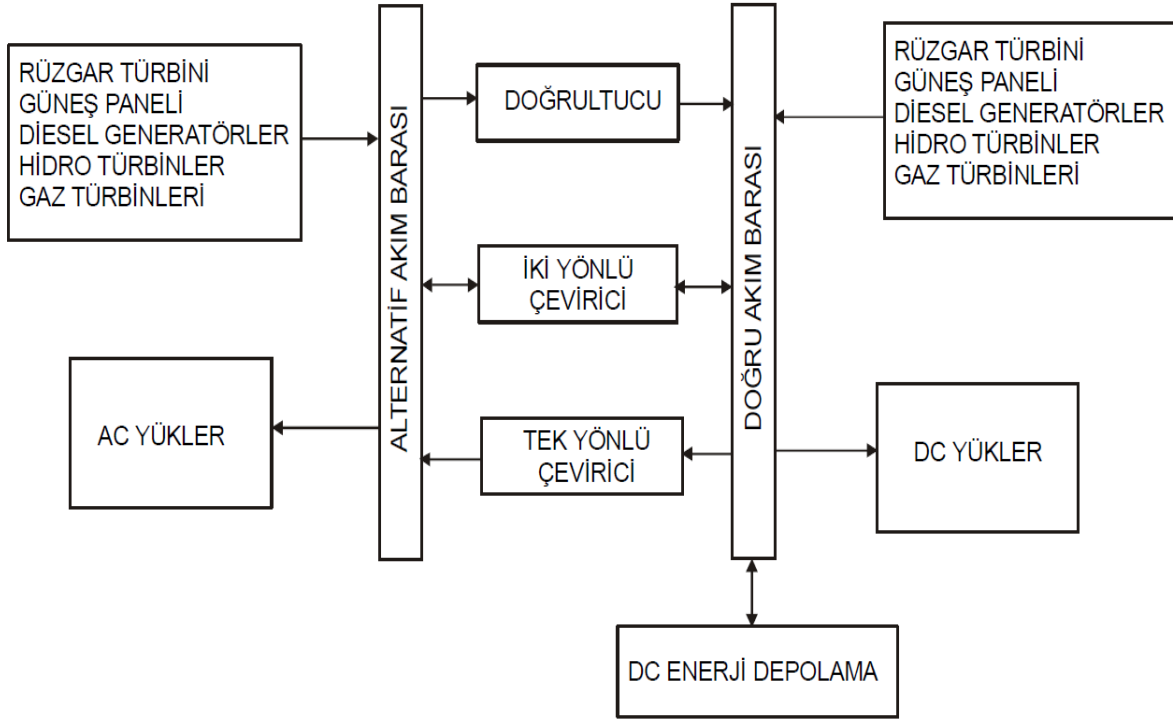
- Hibrit AC/DC güç sisteminde istenilen çıkış geriliminin, frekansının ve güç sistemi kararlılığının sürekliliğini denetim altına almak amacıyla yapılan dinamik kontrol,
- Güç sistemi işletimini daha iyi düzeye çıkarmak amacıyla tüketicilere farklı enerji kaynaklarından akan enerji akısını dengede tutmak için güç sistemi bileşenlerinin en iyi kombinasyon seçimini gerçekleştiren işletme stratejisidir.

### 3.3 Hibrit Güç Sistem Bileşenleri

Hibrit güç üretim sistemleri elektrik gücünün üretimi ve kullanımı için dizayn edilirler. Hibrit güç üretim sistemleri oldukça geniş, merkezi elektrik şebekelerinden bağımlı veya bağımsız birden fazla elektrik güç üretim kaynaklarının bileşimidirler. Bu güç sistemlerinin büyüklükleri ve boyutları büyük adalarda tüketilen çok büyük miktarda tüketilen elektrik gücünden (megawatt) tutun da evlerde kullandığımız ev aletlerinin harcadığı küçük güç miktarlarına (1 kW'a) kadar değişiklik göstermektedir. Daha büyük güç üretim üniteleri (nominal işletme kapasitesi 100 kW dan daha büyük) sabit frekansta alternatif akımda işletilirler [111].

Alternatif akım güç üretim santralleri; dizel jeneratörler, elektrik dağıtım sistemleri, yükler, v.b. işletme elemanlarında oluşmaktadır. Bu büyüklükteki hibrit güç üretim üniteleri işletme elemanlarına ilave olarak yenilenebilir rüzgar türbinleri, güneş panelleri, hidroelektrik jeneratörleri ve enerji depolama ünitelerini içermektedir. Orta büyüklükteki hibrit güç üretim sistemleri (10 kW'ın üzerindeki üretim üniteleri) öncelikli olarak alternatif akımda (AC) işletilmektedirler [112]. Aynı zamanda enerji depolamak amacıyla doğru akım (DC) sistem bileşenlerini de içermektedirler. Hibrit güç üretim sisteminin DC tarafında dizel jeneratörler, yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı ile elektrik enerjisi üreten jeneratörler ve enerji depolama sistemleri yer almaktadırlar. Küçük güçte ve boyuttaki hibrit güç üretim sistemleri (10 kW altındaki) öncelikli olarak DC sistemlerdir.

Şekil 3.2' den görüldüğü gibi genel olarak bir hibrit güç üretim sistemleri, alternatif akım jeneratörleri, doğru akım jeneratörleri, AC ve DC dağıtım sistemleri, yükler, yenilenebilir enerji kaynakları (rüzgar türbinler, güneş panelleri, vb.) enerji depolama üniteleri, güç dönüştürücüleri, yük denetim mekanizmaları ve denetim amaçlı kullanılan kontrol ünitelerini kapsayabilmektedirler [113, 114].



Şekil 3.2: Hibrit güç sisteminde yer alan bileşenler.

### 3.3.1 Rüzgar türbinleri

Rüzgar gücünün ilk kullanımı yaklaşık 5000 yıl önce Nil nehrinde yelkenli gemi götürmek amacıyla kullanılmıştır. Birçok insan ulaşım ve diğer ihtiyaçları için rüzgar gücünden faydalanmışlardır. Yine insanlar çok yaygın olarak 1700 ve 1800'li yıllarda tahıl öğütmek ve su pompalamak amacıyla da kullanmışlardır. İlk yel değirmeni elektrik enerjisi üretmek için 1890 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nin kırsal bir bölgesinde kurulmuştur. Howard Knob Mountain'de 1979 yılında, deneysel olarak yaklaşık toplam kapasitesi 2 MW olan elektrik şebekesi rüzgar türbini tesisi yapılmıştır. Yine 3 MW'lık türbin 1988 yılında Orkney Scotland'da Berger Tepesi üzerinde tesis edilmiştir [115, 116].

Rüzgar enerjisi, kullanımı en hızlı yaygınlaşan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Rüzgar enerjisi, doğaya zararlı bir gaz çıkışı yapmadığı ve çok çevreci bir enerji türü olduğu için çok tercih edilir. Rüzgar türbinleri, rüzgar enerjisini uygun bir maliyetle elektrik enerjisine dönüştürür. Bütün bu avantajlarına rağmen, rüzgar türbinlerinin sahip olduğu bazı dezavantajlar da bulunur. Örneğin, üretim yapabilmeleri için, uygun bir rüzgar miktarına ihtiyaç duyulur. Belirli bir rüzgar miktarının altında üretim yapamazlar ve üretime geçtiklerinde türbinlerin çıktısı kontrol edilemez. Bu durum, şebekenin bazen yeterince beslenmemesine bazen de aşırı beslenmesine neden olabilir. [117]. Rüzgâr türbinlerinin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;



- Yakıt maliyeti yoktur.
- Sıfır emisyonu sahiptir.
- Gelişmiş teknolojidir.
- Çok sayıda üreticisi vardır.
- Düşük bakım gerektirmektedir.
- Bazı yerlerde öngörülebilir güç çıkışı vardır.
- İyi bir konumda watt saat başına düşük maliyetlidir.

Dezavantajları ise aşağıdaki gibi sıralanabilir;

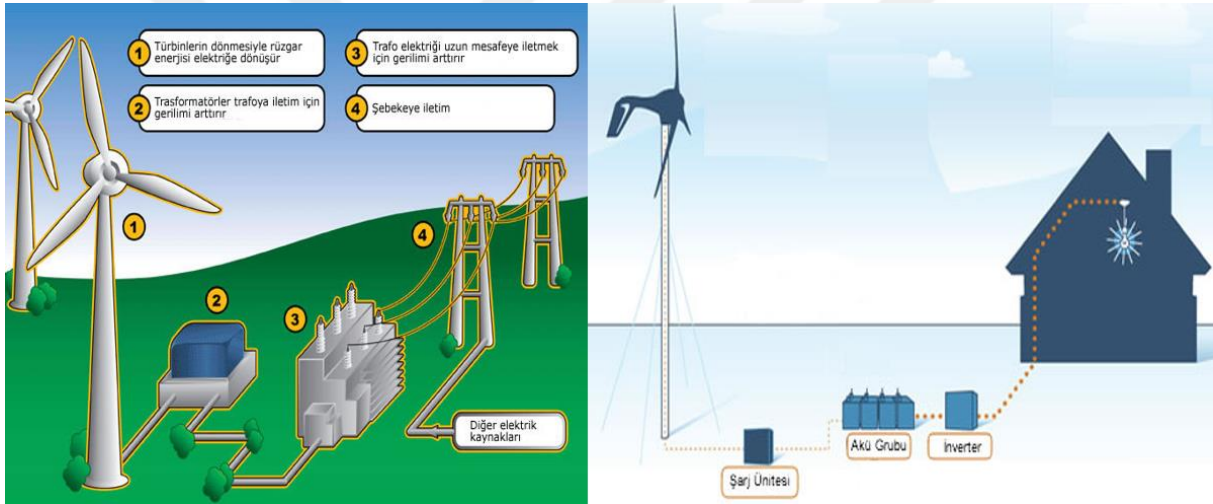
- Üretim rüzgâra bağımlıdır.
- Geniş araziye ihtiyaç vardır.
- Kaynak yetersizliği nedeniyle birçok yerde uygun değildir.
- Şebekeye bağımlı yedek veya tek basına uygulamalara uygun değildir.
- Kule ve kanatlar kuş ölümlerine sebep olabilir.
- Bazı bölgelerde güç çıkışı aralıklı olabilir, bu nedenle büyük bir pil bankası veya alternatif güç kaynağı kullanılmalıdır.
- Hareketli parçalar hızlı yıpranacaktır.
- Geniş birimler için çok yüksek kuleler pahalı olabilir ve ağır dik ekipmanlar gerekebilir.

Rüzgar türbinleri günümüzde şekil 3.3’de görüldüğü gibi karaya (onshore) kurulabildiği gibi denize de (offshore) kurulabilmektedir. Özellikle Japonya’da denizlerin kıyı şeritlerine kurulmaktadır. Bu kurulumlar, her ne kadar daha maliyetli olsa da daha kuvvetli ve uzun süreli bir rüzgara sahip olmaları açısından avantajlıdır [118-120].



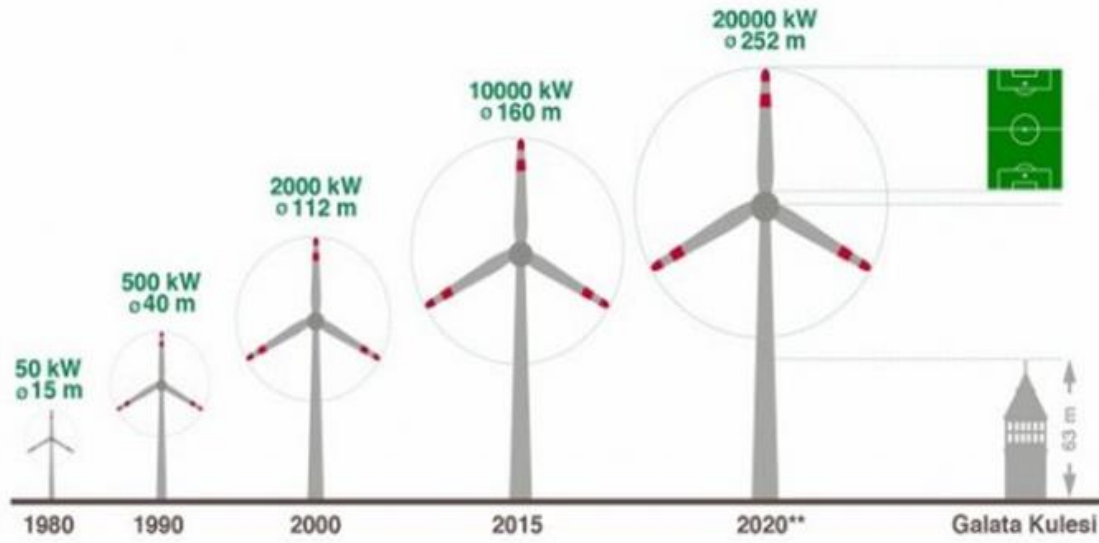
**Şekil 3.3:** Kara ve deniz rüzgar türbinleri.

Rüzgar türbinlerinin bir çoğu iki veya üç pervanelidir(kanatlıdır). İki pervaneli rüzgar türbinleri biraz daha pahalıdır. Üç pervaneli rüzgar türbinlerinde daha az mekanik baskı oluşur. Oluşabilecek problemlere karşı daha hassastırlar. Rüzgar türbini ile kullanılan jeneratör çok küçük ise düşük rüzgar hızlarında türbin tepe güç değerine ulaşacak ve rüzgar hızı kesilene kadar devam edecektir. Eğer türbin boyutu çok büyük ise güç türbin hızı kesilene kadar sürekli artış eğiliminde olacaktır. Rüzgar türbininin enerji çıkışı bölgesel rüzgar hızlarının frekans değerlerinin belirlenmesiyle hesaplanabilir. Daha sonra rüzgar türbini güç eğrisinin kullanarak her bir rüzgar hızında beklenen çıkış gücü aralığı saptanır. Rüzgar türbin yükü ve bundan dolayı hızı gerilim regülatörleri ile elektriksel olarak denetim altına alınır. Çok aşırı rüzgar hızı olması halinde ayarlı ağırlıklarla pervane aralıkları azaltılabilir [121]. Şekil 3.4’de görüldüğü gibi rüzgar türbinleri büyük veya küçük güçte (ev tipi) olarak imal edilirler.



**Şekil 3.4:** Büyük ve küçük güçte rüzgar türbinleri kullanımı.

Temiz bir enerji ve enerji gereksinimini karşılamada ekonomik bir destek sağlayan rüzgar türbinleri çok yaygın olarak dünyanın birçok yerinde kurulup işletilmektedir. Şekil 3.5’de gösterildiği gibi teknolojik ilerlemeler sayesinde rüzgar türbinlerinin üretimi ve kurulumu hızlı bir şekilde yapılabilmekte ve rüzgar enerjisinden daha verimli bir şekilde yararlanılmaktadır. Ortalama kurulu rüzgar türbinlerinin gücü 1990’lı yıllara kadar 500 kW değerindeydi. Daha sonra yeni makinaların kurulumuyla bu güç oranı 1-3 MW’lık güç kapasitesine kadar çıkarılmıştır. Hızla ilerleyen teknoloji ile birlikte rüzgar türbinlerinin güç kapasitesi 10MW’a kadar geliştirilmiştir [122]. Geliştirilen rüzgar türbini dizaynları ve santralleri sayesinde 1980 yılında, rüzgar enerjisi üretimi 35 cents/kWh iken 2004 yılında enerji üretimine elverişli bölgelerde üretim maliyeti 3-4 cents/kWh a kadar düşmüştür.

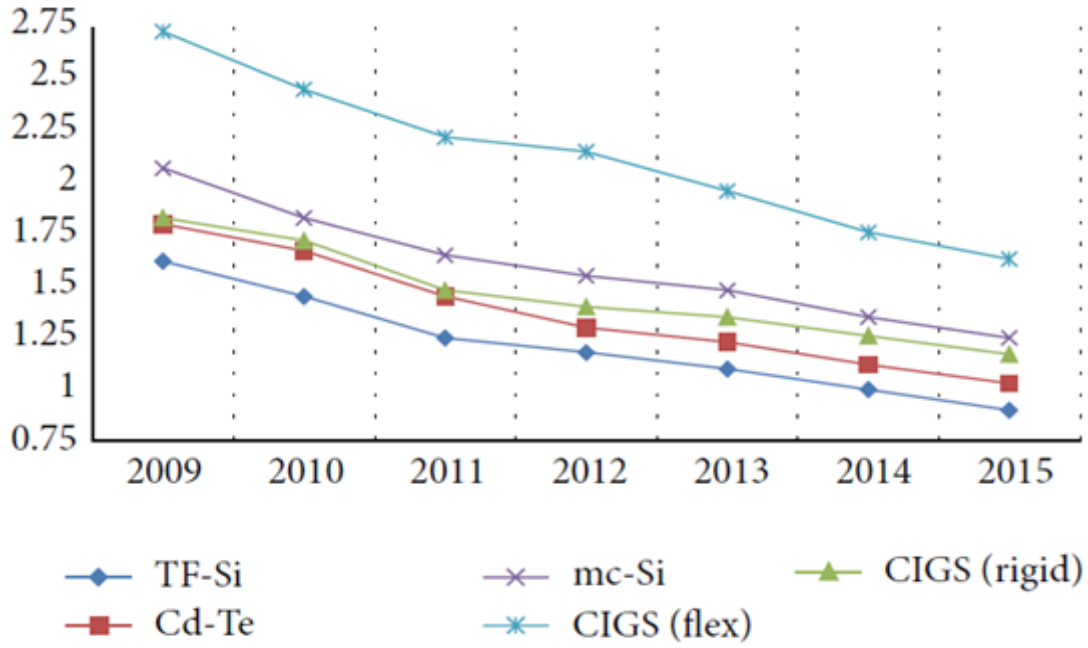


Şekil 3.5: Rüzgar türbinleri gücü ve çapının yıllara göre değişimi.

### 3.3.2 Fotovoltaik (PV) paneller

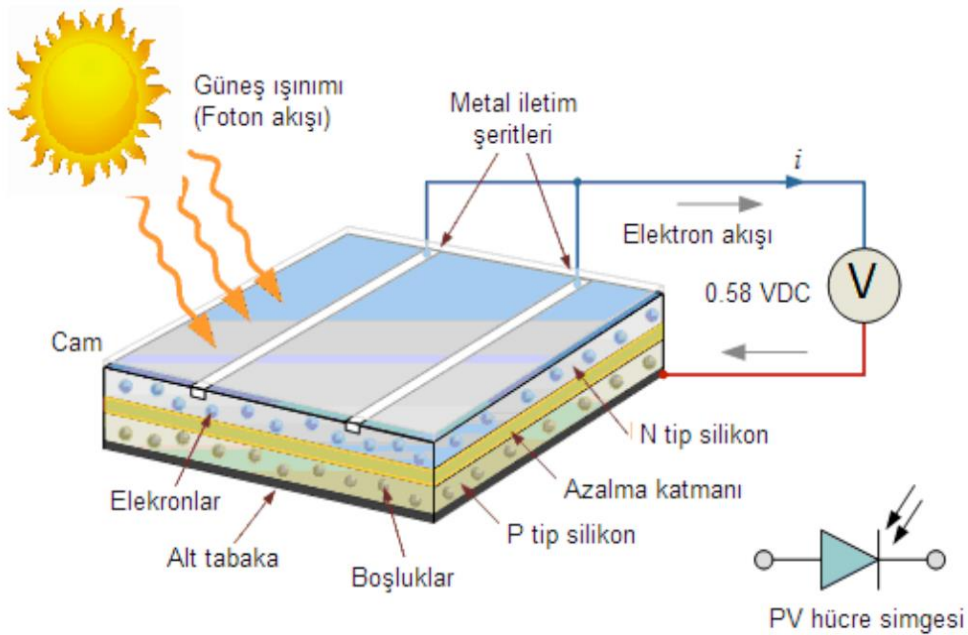
Fotovoltaik (PV, photovoltaic) paneller, ilk olarak 1839 yılında bir Fransız fizikçi tarafından bulunmuştur. Tek bir panel ya da paneller dizisi kullanılarak güvenli bir biçimde güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretilmesini sağlar. Günümüzde bu panellerin verimliliğinin artırılması, çok çalışılan bir konudur. Farklı materyaller geliştirilerek, birim başına soğurabildikleri enerji miktarları arttırılmaya çalışır. Fotovoltaik panellerin farklı uygulama alanları bulunur. Bu paneller kullanılarak; panel tarlaları oluşturulup büyük çaplı bir üretim yapılabilir, tek bir evin enerji ihtiyacı karşılanabilir ya da bir arabaya enerji aktarılabilir. Fotovoltaik panellerin en büyük sorunu, rüzgar türbinleri gibi üretimlerinin süreklilik göstermemesidir [123].

Fotovoltaik paneller güneş ışığını doğrudan doğru akım elektrik enerjisine dönüştürürler. Enerji dönüşümü çok sessiz ve temizdir. Yaygın olarak kullanılan fotovoltaik paneller her birinin çıkış gücü 100 Wp (peak güç) dir. Bazı durumlarda, 300 Wp değerinde güneş panelleri üretilir. 100 Wp ye kadar farklı boyutlarda güneş panelleri üretilir bununla beraber fiyatlandırma da farklılık gösterebilir. Fotovoltaik panellerin boyutuyla fiyatlandırma doğrusal olarak artmaktadır. Fotovoltaik paneller en büyük dezavantajı maliyetlerin çok yüksek olmasıdır. Ancak şekil 3.6'da görüldüğü gibi fotovoltaik paneller fiyatları her geçen yıl düşmektedir ve gelecek yıllarda maliyetlerin daha da düşmesi beklenilmektedir. Fotovoltaik panelleri tiplerine bağlı olarak işletme ömürleri 10 ile 20 yıl arasında değişiklik göstermektedir [124, 125]. Kurulu elektrik şebekelerinden uzak bölgelerde küçük yüklerin güç gereksinimleri için maliyetle-verimlilik ilişkisi daha çok dikkate alınmaktadır.



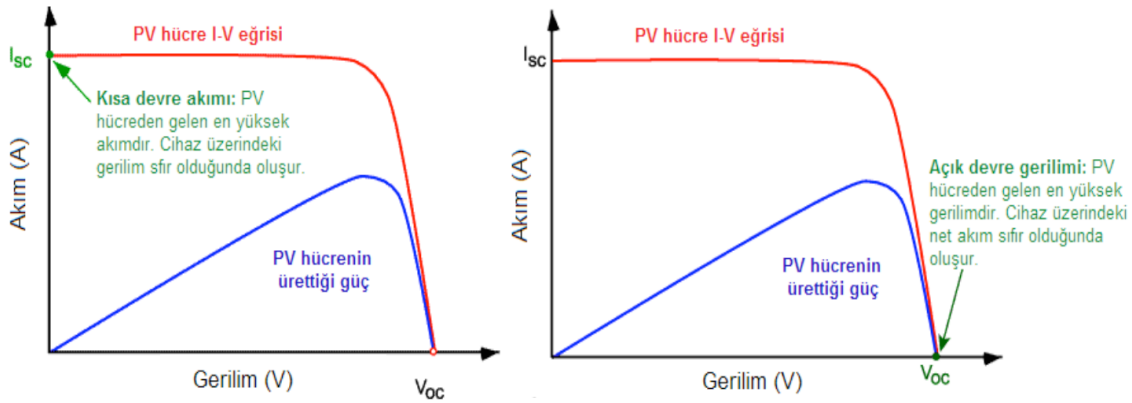
**Şekil 3.6:** Fotovoltaik panellerin yıllara göre fiyat değişimi (\$/W)

Fotovoltaik hücre şekil 3.7’de ifade edildiği gibi bir yarıiletken devre elemanı olması sebebi ile güneş enerjisini fotovoltaik etki DC elektrik enerjisine dönüştürür. Fotovoltaik pil en az birkaç fotovoltaik hücreden oluşmaktadır. Bir fotovoltaik pilin güç oranı standart test şartlarında belirlenmektedir. Bunlar; fotovoltaik pili birleşme sıcaklık derecesi 25 °C, güneş ışığından elde edilen her bir m<sup>2</sup>’deki güç 1000W/m<sup>2</sup> dir [126]. Bir panelin güç oran değeri pil yüzey alanına ve verimliliğine bağlıdır.



**Şekil 3.7:** Fotovoltaik hücrenin çalışma şekli.

Fotovoltaik hücreler şekil 3.8'deki gibi özel akım-gerilim (V-I) ilişkisine sahip olduklarından dolayı akım-gerilim karakteristik eğrisi belirlenir. Güneş panelinin maksimum güç işletme değeri güneş ışınlarının yayılımı ve sıcaklık dereceleri ile elde edilen panel çıkış gücü ile ifade edilir. Fotovoltaik panel üreticileri sıcaklık ve rüzgar hızı gibi değişkenleri belli bir değerde sabit tutarak güneş ışınlarının farklı yayımlım değerlerinde akım-gerilim eğrileri elde ederler. Fotovoltaik panellerinden, açık devre gerilime yakın akım değerlerinden önce sabit güneş ışınlamasında yaklaşık olarak kısa devre akımına yakın oranda bir akım elde edilir. Güneş ışığı yayılımı artarsa aynı oranda lineer olarak güneş paneli çıkış akımını da artır. Maksimum güç noktasındaki gerilim güneş ışınlama seviyesinden etkilenmemiş olarak aynı seviyede kalır. Fotovoltaik panelinin açık devre gerilim çok az değişir [127, 128].



**Şekil 3.8:** Fotovoltaik hücrenin akım-gerilim eğrisi.

### 3.3.3 Hidroelektrik santraller

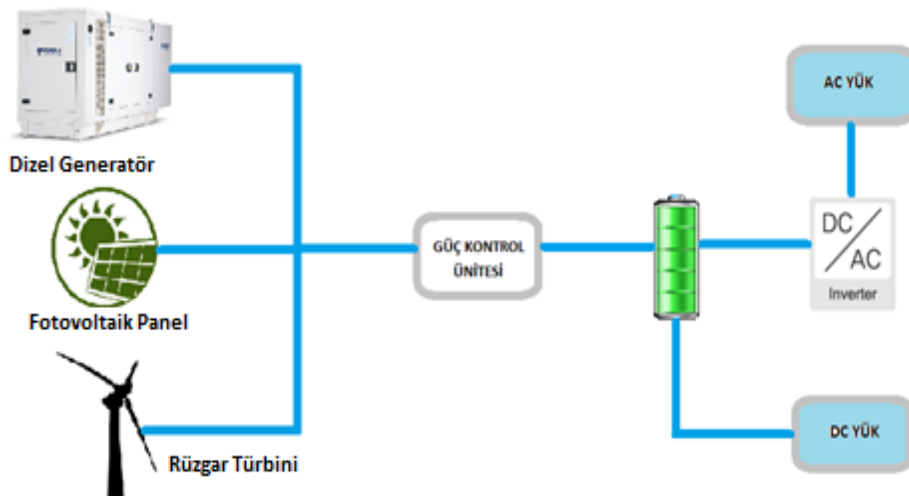
Hidroelektrik santraller (HES) suyun potansiyel enerjisini elektriğe dönüştürürler. Hareketli suyun üzerinde bulunan enerji miktarını suyun debisi ve düşü belirler. Yüksek kotlarda bulunan su, boru içerisine alınarak alçak kotlara inerken hız kazanır ve bir basınç oluşturur. Oluşan basınçtan elde edilen enerji türbin kanatlarına çarptırılarak türbine dairesel hareket kazandırılmış olur (şekil 3.9). Dairesel hareket bir mil yardımı ile elektrik üreticisine (alternatör) aktarılır ve burada elektrik üretilir. Hidroelektrik santrallerin birçok avantajı bulunmakla beraber en önemli avantajları sera gazı emisyonu oluşturmaması, inşaatın yerli imkanlar ile yapılabilmesi, teknik ömrünün uzun olması, yakıt harcamalarının olmaması ve işletme bakım giderlerinin oldukça düşük olması şeklinde sıralanabilir. Hidroelektrik santraller, en yaygın yenilenebilir enerji kaynağıdır. Ülkemizde çok sayıda hidroelektrik santrali bulunur. Bazı çevresel sorunlar nedeniyle eleştirilse de genellikle maliyet açısından uygun olmaları yüzünden tercih edilir. Ayrıca elektrik enerjisi üretimi dışında özellikle tarım ürünlerinin yetiştirilmesi gibi başka alanlarda faydalı bir biçimde kullanılmaktadır [129-132].

### 3.3.4 Dizel jeneratörler

Elektrik güç santrallerinde kullanılan bu jeneratörler dizel makinayla birleştirilmiş senkron jeneratörlerdir. AC güç üretim sistemlerinde frekans, dizel makinaların hız regülatörleri yardımıyla ayarlanan alt ve üst sınır değerleri içerisinde tutulmaya çalışılır. Hız regülatörleri aracılığı ile dizel tahrik makinasının ve senkron jeneratörün hızını ayarlanan değerde korumak için makinaya giden yakıt akışı kontrol edilir [133]. Elektrik şebekelerinin frekansı doğrudan jeneratörün hızıyla ilişkilidir. Bu nedenle arzu edilen seviyede tutulmaya çalışılır. AC güç sistemlerinde daima en az bir tane dizel jeneratör şebekeye bağlıdır. Çünkü, reaktif gücü sağlamak ve frekansı istenilen sınırlar içerisinde ayarlamak için gereklidir.

Dizel jeneratör işletmenin dezavantajları; yakıta bağlı olması, yakıtın taşıma ve depolama maliyeti, yüksek bakım maliyeti ve çevreye yaydığı duman kirliliği gibi faktörleri içermektedir. Dizel jeneratörler dünyada ve şehir merkezinden uzak güç sistemlerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. İşletme amaçlı kullanılan dizel jeneratörün güçleri oranı 1 kW ile 1 MW değerleri arasında değişiklik göstermektedir [134].

Dizel jeneratörler hibrit güç üretim sisteminde iki önemli nedenden dolayı işletmeye alınırlar. Birincisi; yenilenebilir enerji kaynakları yükü karşılayamadığı durumlarda alınır. İkincisi ise, bataryanın şarj durumu arzu edilen değer altında kalıyorsa dizel jeneratör işletmeye alınır. Şekil 3.9'da gösterilen dizel jeneratörün hibrit güç üretim sistemlerinde devreden çıkartılabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarından yük için gerekli olan güç sağlanıyor olması gerekmektedir [135, 136]. Eğer gerekli olan bu güç sağlanıyorsa rahatlıkla dizel jeneratör işletme dışı bırakılabilir.



Şekil 3.9: Hibrit güç üretim sistemi.

### **3.3.5 Kontrol sistemleri**

Hibrit güç üretim sistemi uygulamalarında kontrol sistemlerinin kullanılması hemen hemen kaçınılmaz bir durumdur. İstenilen hizmete ve amaca göre değişik kontrol yöntemleri vardır. Buna örnek olarak bir dizel türbinin hız regülatörü, senkron jeneratörün gerilim regülatörü, rüzgar türbin üzerinde bulunan bataryaların şarj kontrolü gibi işlemler gösterilebilir. Yine hibrit güç üretim sistemini oluşturan yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen gücün kaliteli olması için her bir üretim ünitesinin frekansı ve geriliminin belirlenen değerler içinde korunması istenir. Bu amaç içinde istenilen amaca hizmet verecek değişik kontrol metotları geliştirilir. Bazı durumlarda ise kontrol fonksiyonları belirlenen kontrollerle gerçekleştirilir. Hibrit güç üretim sisteminde denetleyiciler bütün bileşenlerin hepsini veya bazılarını kontrol edebilir. Denetleyicilerle hibrit güç üretim sistemlerinin işletme durumu, belirlenen işletme koşulları altında sürekli denetim altındadır. Yapılan kontrol eylemleri sistemin işletme amaçlarını kaynak yetersizliği ve belirsizliğine rağmen güvence altına almaktadır. Aynı zamanda sisteme zarar verecek durumları da önleyebilirler [137].

### **3.3.6 Enerji depolama üniteleri**

Enerji depolama üniteleri küçük hibrit güç üretim sistemlerinde daha çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Depolama sistemleri çok nadirde olsa geniş AC şebekelerinde ve kısa vadeli güç salınımlarını düzeltmek amacıyla da yaygın olarak kullanılabilir. Enerji depolama işlemi bataryaların kullanımı sayesinde gerçekleştirilmektedir.

Hibrit güç üretim sistemlerinde bataryanın işletilmesi işletme ömrünün optimizasyonu gibi önemli bir unsur ortaya çıkarır. Çünkü tek kaynaklı güç üretim sistemlerinde batarya kullanımına daha çok gereksinim duyulmaktadır. Örneğin sadece rüzgar güç üretimi söz konusu ise talep edilen yük miktarını her zaman karşılamayabilir. Bu gibi durumlar batarya gruplarından enerji talebi sağlanacağından daha çok işletmede kalırlar. Hibrit güç üretim sistemleri genelde rüzgar, güneş, dizel jeneratör gibi birden fazla enerji kaynaklarından oluştuğundan bazı işletme saatlerinde kullanılmayan enerji batarya grupları ile depo edilerek gerekli olduğu durumlarda kullanılmak istenmektedir. Hibrit güç üretim sistemlerinde kullanılan başlıca enerji depolama birimleri ve bunların karşılaştırılması çizelge 3.1'de gösterilmiştir [138-140].

**Çizelge 3.1:** Hibrit sistemlerde kullanılan enerji depolama birimleri.

Depolama Teknolojisi	Avantajı	Dezavantajı	Kullanım Alanı
Pompalanmış su tabanlı depolama	Yüksek kapasite, düşük birim enerji maliyeti	Büyük ve özel alana ihtiyaç olması	Zaman kaydırma enerji uygulamaları, Büyük güçlü yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu
Sıkıştırılmış hava tabanlı depolama	Yüksek kapasite, düşük birim enerji maliyeti	Büyük yeraltı alanına ihtiyaç olması, ek yakıt maliyeti	Zaman kaydırma enerji uygulamaları, Büyük güçlü yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu
Hidrojen	Çevresel etkilerinin olmaması	Düşük verim, yüksek maliyet, depolama tiniteleri sorunları	Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, elektrikli taşıt uygulamaları
Batarya	Olgunlaşmış teknoloji, yüksek güç ve enerji yoğunluğu	Çevresel etkilerinin olumsuz olması, yüksek üretim maliyeti, orta yada düşük çevrim ömrü	Taşınabilir cihazlar, elektrikli taşıtlar, küçük güçlü yenilenebilir enerji sistemleri
Volan	Yüksek güç yoğunlu, hızlı cevap süresi, yüksek çevrim ömrü	Düşük enerji yoğunluğu, yüksek maliyet	Güç kalitesi uygulamaları
Süper kapasitör	Yüksek güç yoğunlu, hızlı cevap süresi, yüksek çevrim ömrü	Düşük enerji yoğunluğu, yüksek maliyet	Elektrikli taşıtlar, güç kalitesi uygulamaları
Süper iletken manyetik depolama	Yüksek güç yoğunlu, hızlı cevap süresi, yüksek çevrim ömrü	Düşük enerji yoğunluğu, yüksek maliyet,	Güç kalitesi uygulamaları

### 3.3.7 Güç dönüştürücüleri

Hibrit güç üretim sisteminin en önemli işletme elemanlarından. Hibrit güç sistemleri için gerekli olan güç dönüştürücülerinin iki tipi vardır. Bunlardan birincisi doğrultucu diğeri ise eviricidir. İşletmelerde genellikle jeneratörler AC güç üretirler. Enerji depolama amaçlı kullanılan bataryaların şarj olabilmesi için batarya şarj edicilerin enerjileri AC enerjiden DC enerjisine dönüştürülmeleri gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan güç dönüştürücülerine doğrultucu adı verilir. Yani AC gücü DC güce dönüştüren devre elemanlarıdır. DC gücü, AC güce dönüştüren elemanlara ise evirici denir.

Hibrit güç üretim sistemleri içerisinde doğrultucular genellikle AC güç kaynağından alınan gücü DC güce dönüştürerek bataryaların şarj olması amacı ile kullanılır. Bir diğerkullanım gerekçesi rüzgar türbini ve dizel jeneratörler AC güç çıkışına sahiptirler. Bu elde edilen AC güç doğrultucular ile doğrultularak DC baralara, eviricilere ve DC gerilimle beslenen yüklere uygulanır. Genellikle bütün devre elemanlarında olduğu gibi doğrultucularda tam yükte çalıştırıldıkları zaman verimle en yüksek değerdedirler. Doğrultucuların yapıları oldukça basit ve maliyetleri ise düşüktür. [132]. Diğerbir önemli özelliği de düzenleyici gerilimleri de içermesidir. Bazı jeneratörler bataryaların şarjı için direkt DC gerilim üretirler.



Eviriciler normalde küçük güç oranları için tek fazlı olarak üretilirler. Üç fazlı eviriciler bir fazlı eviricilere göre maliyetleri yüksektir. Üç fazlı eviriciler daha çok dengesiz yüklere daha kaliteli bir güç sunmak için hizmet vermek amacıyla kullanılmaktadırlar. Yenilenebilir enerji kaynaklı DC baralarda ev aydınlatması amacı ile kullanılmak istenirse küçük ve maliyeti ucuz eviriciler tercih edilmektedir. Evirici seçimi yapılırken yükün çekebileceği maksimum güç dikkate alınır. Eviricilerin birçoğu kısa süreli olarak nominal güçlerinin altı katına kadar çıkış gücü sağlama kabiliyetine sahiptirler. Özellikle endüktif ve kapasitif yüklerin ilk çalıştırılması anında yüksek akım çekmeleri birçok eviricinin korumaya geçmesine neden olmaktadır. [133]. Eviricilerin verimleri düşük güce sahip pratik uygulamalarda verimleri düşüktür. Eviriciler yüksüz işletilmeleri halinde gereksiz yere enerji harcayacaklarından gerekmedikçe yüksüz çalıştırılmazlar.

### **3.3.8 Yükler**

Akıllı şebekeler DC bağlantılı yükler, AC bağlantılı yükler ve hem DC hem de AC bağlantılı yüklerden oluşan hibrit sistemlerden oluşabilmektedir. Hibrit güç sistemlerinde yükler konut, ticari ve endüstriyel olarak çeşitli alanlarda uygulanabilir. Genel olarak, ticari ve endüstriyel kullanıcılar kritik ve hassas yük talepleri için, güç kalitesi ve güvenilirliği yüksek olmasını isterler. Uygulamalarda en çok yaygın olarak kullanılan yükler; 12-24 Volt DC gerilimle çalışan aletler, 220/380 Volt AC gerilimle çalışan aletler veya direkt 380 Volt AC gerilimle çalışan aletlerdir. DC gerilimle çalışan aletler AC gerilimle çalışan aletlere göre biraz daha pahalıdır. AC yüklerin DC kaynak tarafından beslenmesi yapılması gerektiği durumlarda çalışma performansı ve yükün güç oranına uygun eviricilerden yararlanılır. Ama eviriciler güç sistemleri için maliyetli elemanlardır. Eğer evirici kullanımından mümkün olduğu kadar uzak durulursa enerji sisteminin maliyeti belli bir oranda azalır [134].

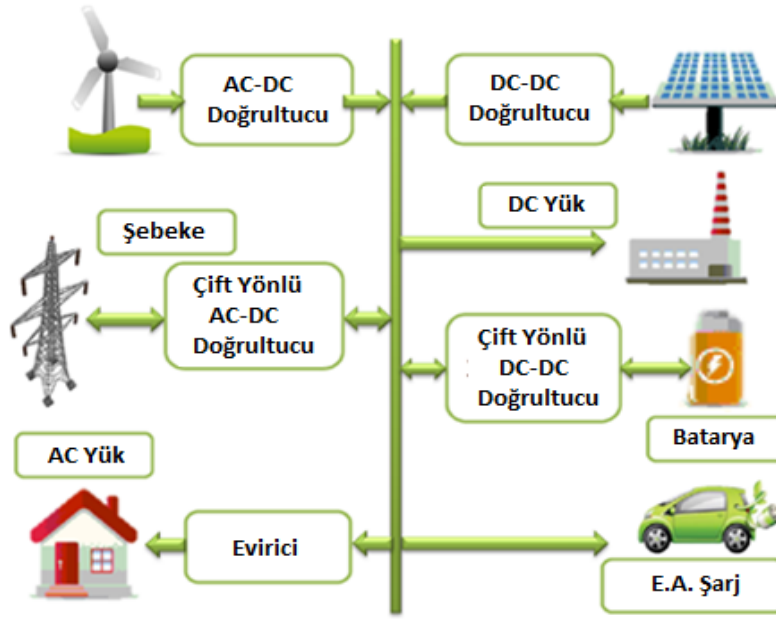
Günlük hayatta DC güç ile çalışan elektrikli araç ve cihazların kullanılmasında çoğu zaman DC gerilime ihtiyaç duyulmaktadır. AC güç kaynağından DC aletlerin beslenmesi söz konusu olduğunda AC gücü DC güce dönüştüren doğrultuculardan faydalanılır.

Hibrit güç üretim sistemleri için gerekli olabilecek bir diğer yük de atık yüküdür. Normal yalıtılmış şebekelerde bu tür yüklere ihtiyaç duyulmayabilir. Şebekede bir güç fazlalığı olduğu durumlarda şebekedeki gerilim yükselmesini önlemek için atık yük kullanılır. Yük için gerekli olan enerji talebinin az olduğu ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji miktarının fazla olduğu sürece şebekenin kararlı çalışması bozulabilir. Atık yük güç

elektroniğine ve anahtarlama direnç yapısında bir devre elemanıdır. Bazı işletme durumlarında atık yük olmadan ihtiyaç fazlası aşırı güç giderilemeyebilir [135].

### 3.4 Hibrit Güç Sistemi Topolojileri

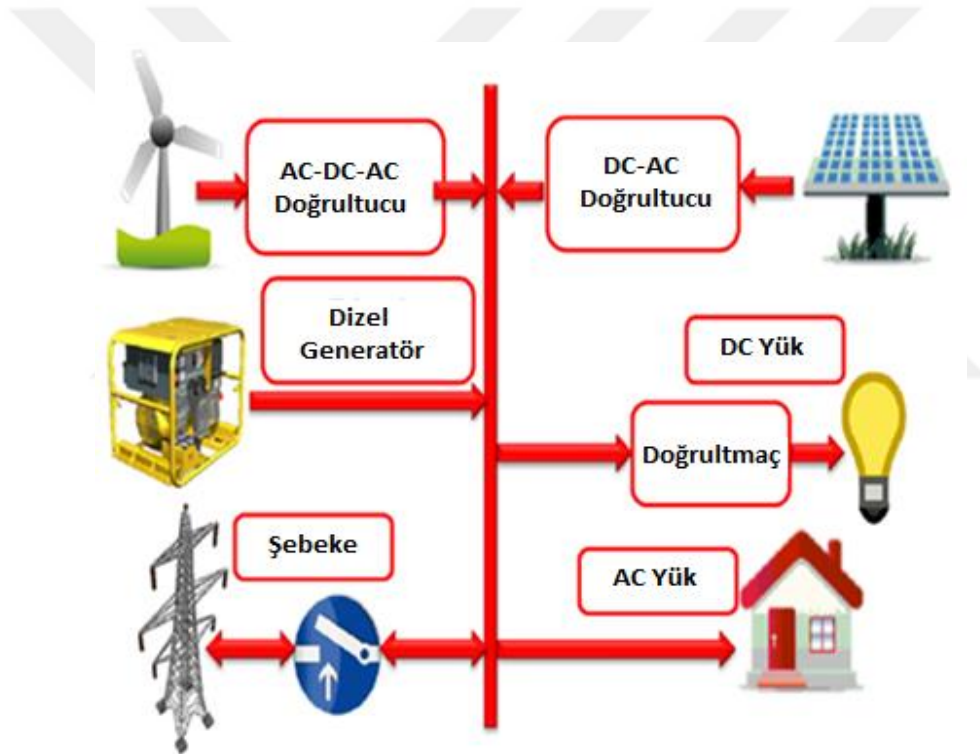
Geleneksel ve yenilenebilir enerji dönüşüm sistemlerinin birlesiminden meydana gelen hibrit güç sistemleri uygulama açısından DC, AC topolojileri olarak sınıflandırılabilir. DC bağlantılı sistem topolojisinde, şekil 3.10'da görüldüğü gibi, tüm jeneratör ve depolama birimleri DC baraya bağlıdır. Çıkışı AC olan güç kaynakları varsa önce DC'ye dönüştürülür. Daha sonra eklenen tüm DC güç kaynakları temel DC güç barasında DC/AC dönüştürücüsü olan eviricilerle AC kullanıcı yüklerine bağlanır. Bu evirici, farklı jeneratör ve depolama birimlerinde üretilen DC gücü, istenilen gerilim ve frekansta AC kullanıcı yük taleplerine AC gerilimle dönüştürür. [136]. Kullanılacak evirici, pik yük taleplerinde yeterli olmalıdır.



Şekil 3.10: Hibrit DC şebeke yapısı.

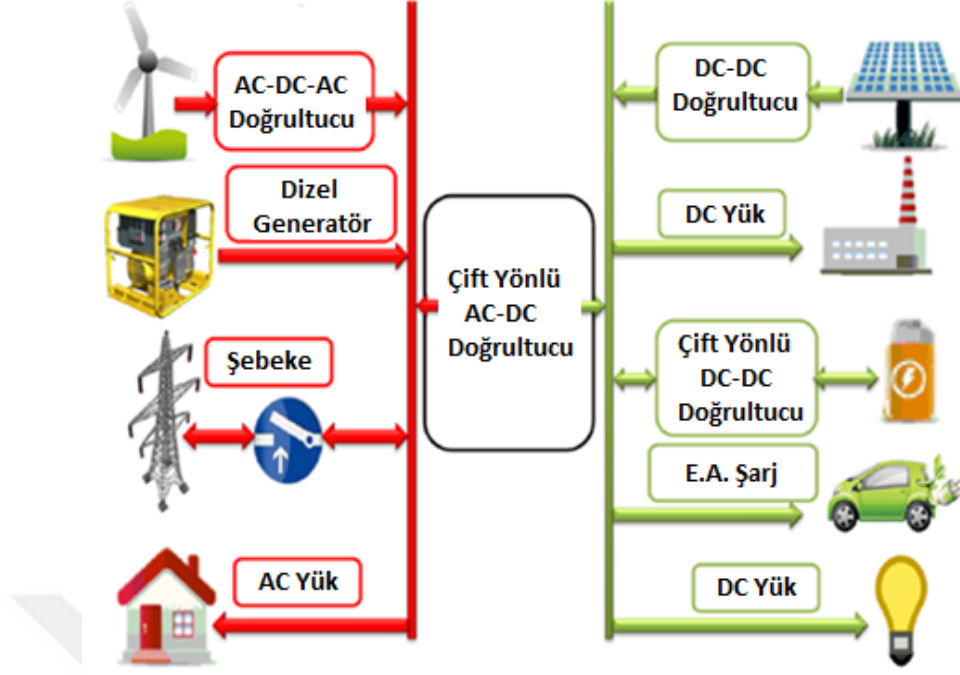
DC bağlantılı hibrit sistemin avantajı; jeneratör şarjı kısa süreli depolama birimlerinde olduğunda bile yük talebini kesintisiz olarak karşılamasıdır. Bu sistemin tasarım ilkeleri uygulama için kolaydır. Bu sistemin ciddi dezavantajları ise, düşük dönüşüm verimi ve sistem içindeki sınırlı kontrolüdür. Ayrıca daha fazla üretim kaynağı veya bir bileşenin kapasitesinin artmasıyla sistemin büyümesi, DC/AC eviricinin sınırlı nominal kapasitesinden dolayı çok karmaşıktır [137].

AC bağlantılı sistem topolojisinde, tüm sistem bileşenleri ve AC kullanıcı yükleri AC baraya bağlıdır. AC bağlantılı sistem topolojisi, DC bağlantılı sistem topolojisine göre daha üstün performansa sahiptir. Her bir evirici kendi jeneratörüne senkronize olabilir, böylece diğer evirici ile bağımsız veya aynı anda güç temin edebilir. Bu durum yük talebini karşılamada enerji kaynakları için bazı esneklik sunar. AC bağlantılı hibrit sistemin çalışması ve kontrolü, senkronizasyon işleminden dolayı bileşenler arasında gereklidir. Bu topoloji, DC bağlantılı topoloji ile karşılaştırıldığında; tüm sistemde daha yüksek verimlilik, daha küçük güç düzenleyici birimi, dizel jeneratörün en uygun çalışması, çalışma zamanı ile birlikte bakım maliyetlerinin azalması ve enerji kullanılabilirliğin yüksek seviyede olması gibi avantajları vardır. Şekil 3.11’de AC baraya bağlı olan hibrit sistemin blok diyagramı görülmektedir [138, 139].



**Şekil 3.11:** Hibrit AC şebeke yapısı.

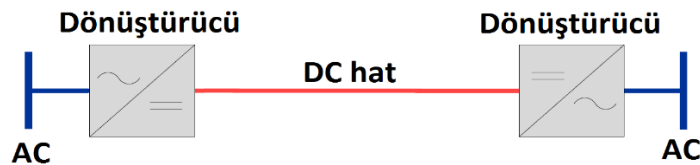
AC ve DC yük ve kaynaklardan oluşan hibrit şebekeler, diğer şebeke topolojileri gibi ana güç şebekesine bağlanabilir veya bağımsız olarak çalıştırılabilir. Şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız hibrit sistem uygulamalarında enerji üretimindeki devamlılık süresini arttırmak için batarya teknolojileri ile enerji depolama sistemleri kullanılır [140]. Şekil 3.12’de ana güç şebekesine bağlı örnek bir hibrit AC/DC sistemi şeması gösterilmiştir



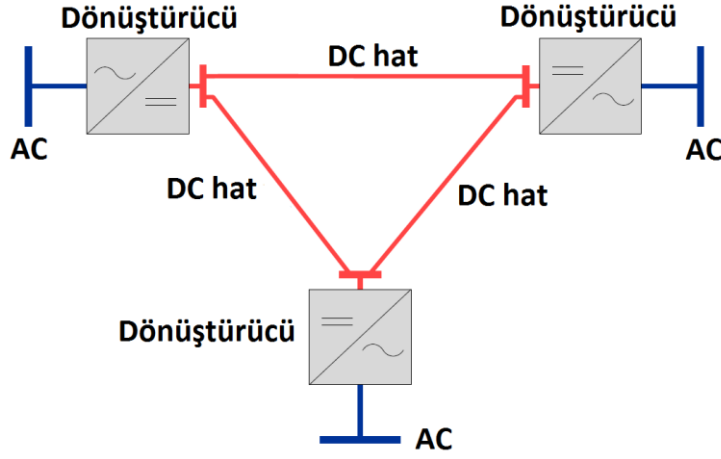
Şekil 3.12: Hibrit AC/DC şebeke yapısı.

### 3.5 Gerilim Kaynaklı Dönüştürücüler

Yenilenebilir enerji kaynakları bulunan hibrit sistemlerin AC/DC dönüşümü için dönüştürücüler kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklı güç sistemlerinde sistem dinamiklerini kontrol etmek için kullanılan reaktörler, kapasitörler, kademe ayarlı transformatörler, faz kaydırıcı transformatörler ve senkron kondensörler gibi klasik güç elektroniği elemanları, güç sistemlerinde karşılaşılan problemleri düzeltmede ve sistem performansını iyileştirmede çok eskiden beri temel çözüm olmuş ve halen de olmaya devam etmektedirler. Gelişen yarı iletken teknolojiyle birlikte Yenilenebilir enerji kaynakları bulunan hibrit AC/DC güç sistemleri içerisinde kullanılan dönüştürücülerde öncelikle akım kaynaklı dönüştürücülerin kullanımı, sonrasında ise gerilim kaynaklı dönüştürücülerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu dönüştürücüler şekil 3.13 ve şekil 3.14’de gösterildiği gibi AC/DC sistemlerinde kullanılan dönüştürücüler iki terminalli veya multi terminalli kullanılmaktadır [141].

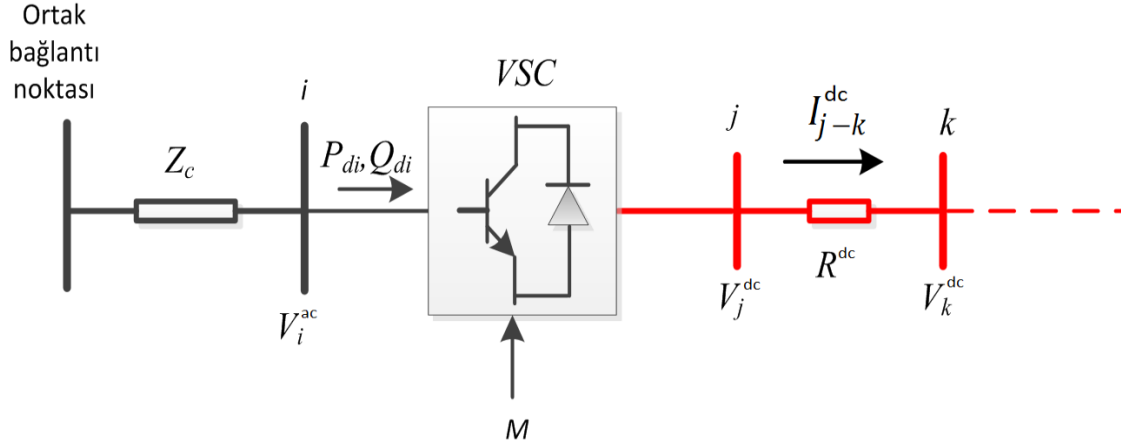


Şekil 3.13: İki terminalli dönüştürücüler.



Şekil 3.14: Multi terminalli dönüştürücüler.

Gerilim kaynaklı dönüştürücü (VSC-Voltage Source Converter): Denetleyicinin uygun şekilde kontrol edilmesiyle,  $V_{DC}$  geriliminden istenilen  $V_{VSC}$  genliğinde ve  $\delta_{VSC}$  faz açısında üç fazlı alternatif gerilim üreten dönüştürücüdür. VSC'ler hızlı ve bağımsız aktif ve reaktif güç kontrolü sağlayabilir. Ayrıca güç akışında, akımın yönünü kolayca tersine çevrilebilir. Bu avantajları nedeni ile VSC'ler hibrit güç sistemlerinde aktif olarak kullanılmaktadır. VSC'nin DC tarafı, iki DC hattına sahip tek kutuplu bir devredir [142]. Herhangi bir baraya bağlanmış olan gerilim-kaynaklı dönüştürücü şekil 3.15'de gösterilmiştir.



Şekil 3.15: Gerilim-kaynaklı dönüştürücü modeli.

Şekilde gösterilen  $R^{dc}$  direnci iletim hat direncinin 2 katı değerindedir. Çeviriciye ait eşitlikler ve AC sistemden çekilen/aktarılan güç eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

$$V_{i,LLrms}^{ac} = K_{vsc} V_j^{dc} \quad (3.1)$$

$$V_{baz}^{ac} = K_{vsc} V_{baz}^{dc} \quad (3.2)$$

$$V_{i,p.u.}^{ac} = M V_{j,p.u.}^{dc} \quad (3.3)$$

$$I^{dc} = G^{dc}(V_j^{dc} - V_k^{dc}) \quad (3.4)$$

$$Q_{di} = P_{di} \tan \varphi_{di} \quad (3.5)$$

Doğrultucu için;

$$P_{di} = P_d^{dc} / \eta_d = (V_j^{dc} I^{dc}) / \eta_d \quad (3.6)$$

Evirici için;

$$P_{di} = P_d^{dc} \eta_d = V_j^{dc} I^{dc} \eta_d \quad (3.7)$$

Burada alt indisler LL, vsc, rms, ve p.u. sırasıyla; faz-faz, gerilim-kaynaklı çevirici, etkin, ve birim değeri ifade etmektedir. Üst indisler ac ve dc sırasıyla, AC ve DC sistemleri ifade etmektedir [143].

VSC dönüştürücü teknolojisinde kendinden komütasyonlu bir dönüştürücü tasarlamak için, hem açma hem de kapatma da kontrol edilebilen Kapıdan Söndürmeli (Gate Turn Off -GTO) tristörler veya Yalıtılmış Kapılı Çift Kutuplu Transistör (IGBT) kullanılmıştır. IGBT'ler sınırlı gerilim engelleme özelliğine sahip olduklarından, iki seviyeli ve üç seviyeli VSC'lerde seri olarak bağlanması gereklidir. Her bir yarıiletkende gerilimi sınırlamak için seri bağlı IGBT'ler kesinlikle aynı anda değiştirilmelidir.

VSC teknolojisi LCC (Hat Komütasyonlu Dönüştürücü)'ye göre yeni bir DC iletim sistemi teknolojisidir. VSC tam kontrol edilebilen IGBT'lerden oluşur ve istenen gerilim dalga formunu oluşturmak için Darbe Genlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation - PWM) kullanılır. PWM ile herhangi bir dalga formu, herhangi bir faz açısı ve temel frekans bileşeninin büyüklüğü oluşturmak mümkündür. Bu yüksek kontrol edilebilirlik geniş bir uygulama yelpazesine olanak sağlar. İstenen ve uygulanan dalga formu arasındaki fark, filtrelenmesi gereken istenmeyen bir bozulmadır. VSC tabanlı AC-DC uygulamalarının pek çok avantajının yanı sıra, PWM yönteminden kaynaklanan yüksek anahtarlama frekansı nedeniyle dönüştürücünün yüksek anahtarlama kayıpları bu sistemlerin ana dezavantajıdır. VSC tabanlı AC-DC sistemlerinde kullanılan dönüştürücüler iki seviyeli veya çok seviyeli olmak üzere farklı topolojilerde olabilir. Tam kontrollü yarı iletken teknolojilerin geliştirilmesi, önemli voltaj düzeylerine ulaştıktan sonra bu teknolojinin ilerlemesini mümkün kılınmıştır. Aslında, mümkün olan maksimum kapasiteler esasen cihazların bugünkü eriştiği teknoloji ile sınırlıdır [144]

IGBT'ler genellikle bir PWM tarafından üretilen bir geçit sinyali ile anahtarlanırlar. IGBT'ler gerilime ve akıma tek bir yönde dayanırlar. Bu nedenle her iki yönde de akım iletimini

sağlamak için bir diyot anti-paralel bağlanır. Dönüştürücü tipik olarak yaklaşık 1kHz'lik bir anahtarlama frekansı ile çalıştırılır ve düşük seviyeli harmonikleri ortadan kaldırmak için anahtarlanır. Böylece, LCC yumuşatma filtresinin tersine, sadece yüksek dereceli harmonikler için bir filtre gerekir.

AC şebekesiyle olan aktif güç alışverişi, çoğunlukla üretilen gerilimin faz açısı tarafından kontrol edilmektedir. Reaktif güç ise üretilen gerilimin büyüklüğü aracılığıyla kontrol edilmektedir. Bu nedenle reaktif güç değişimi farklı dönüştürücülerden bağımsız olarak kontrol edilebilir [145].

Gerilim kaynaklı dönüştürücüler kontrol edilebilir bir gerilim kaynağı olarak düşünülebilir. AC sistem bakış açısından VSC, aktif ve reaktif gücü anında kontrol edebilen kütlesiz senkron bir makine gibi davranır. Ayrıca, aktif ve reaktif güç akışını bağımsız olarak kontrol etme yeteneğine de sahiptir. Çünkü üretilen çıkış gerilimi bara gerilimine göre herhangi bir açıda ve genlikte sentezlenebilir. Klasik LCC iletimine göre VSC'nin başlıca avantajları ve dezavantajları şunlardır [146, 147]:

- VSC'de aktif ve reaktif güç bağımsız olarak kontrol edilebilir. LCC'nin AC şebekeden reaktif güç ihtiyacı vardır.
- Otomatik komütasyonlu cihazların kullanılması sayesinde VSC'deki komütasyon hatası riski azaltılırken klasik dönüştürücülerin tetiklenmesi için bir AC gerilimin olması gerekir.
- Dönüştürücü kontrolörleri bağımsız çalıştığı için dönüştürücüler arasında ayrıca bir iletişim VSC iletiminde gerekli değildir.
- LCC'de ikiden büyük kısa devre oranına (SCR) sahip daha güçlü bir şebeke gerekirken, VSC zayıf şebekelerde çalışabilir.
- VSC, LCC kurulum alanının tipik olarak %50-60'ı kadar daha kompakt bir kurulum alanına ihtiyaç duyar. LCC'de ise hacimli filtreler ve kapasitör tankları nedeniyle, dönüştürücü istasyonu oluşturmak için geniş alanlar ve yatırım maliyeti gerektirmektedir.
- VSC, LCC dönüştürücülerden daha yüksek kayıplara sahiptir.
- VSC önemsiz derecede bir harmonik bozulmaya sahiptir ve çoğu durumda filtreler gerektirmez. LCC'de ise üretilen harmonikleri ortadan kaldırmak için hem AC hem de DC tarafında filtreler gerekmektedir.

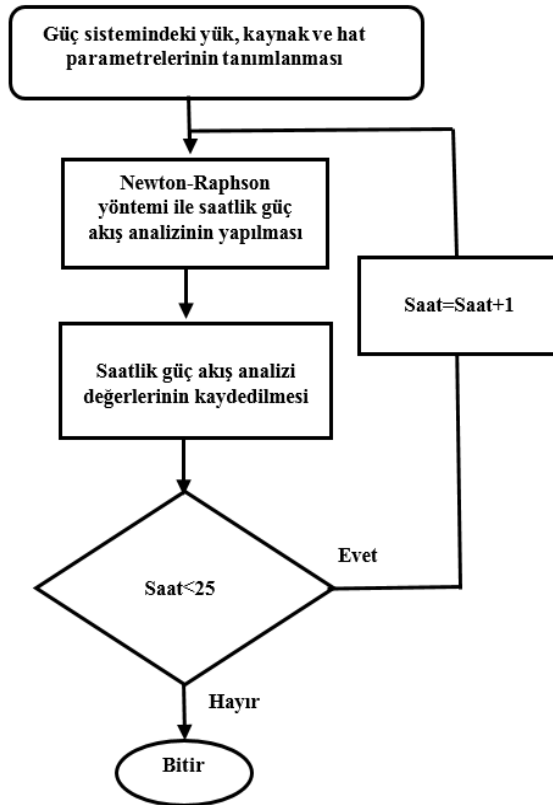
- VSC mevcut IGBT cihazları tarafından sağlanan sınırlı aşırı yük kapasitesine sahipken, LCC ise yüksek güçlü tristör cihazları tarafından sağlanan daha iyi bir kapasiteye sahiptir.
- LCC'de AC gerilim seviyesini DC gerilime göre ayarlamak için sekonder tarafında hem delta hem de yıldız bağlantılarına sahip özel dönüştürücü transformatörlere ihtiyaç duymaktadır.
- LCC'de aktif güç kompanzasyonu gereklidir. Çünkü dönüştürücüler iletilen DC gücün reaktif gücünün %50-60'ını tüketmektedir. Bu nedenle kapasitör banklarına ihtiyaç duyulur.
- LCC'de DC akım sadece bir yöndedir ve bu da güç akışının tersine çevrilmesini zorlaştırır. LCC'de güç akışı yönünün tersine çevrilmesi, terminal geriliminin polaritesini tersine çevirerek sağlanır. VSC ise DC gerilim polaritesini sabit tutar. Böylece güç akışının yönü, güç akışının hızlı bir şekilde ters çevrilmesini sağlayan akım yönü tarafından kontrol edilir.
- LCC'de güç ve DC akımın büyüklükleri terminal gerilim farkıyla kontrol edilir.
- VSC tamamen kontrol edilen güç elektronik cihazları sayesinde ilk kalkınma (blackstart) yeteneğine sahipler ve AC şebekesinden bağımsız olarak çalışabilmektedir.
- VSC güç kontrolü açısından birçok avantaj getiren PWM kullanılmaktadır.
- VSC'de aktif ve reaktif güç, akımın doğrudan ve karesel bileşenlerini ayrıştırarak bağımsız olarak kontrol edilebilir. Bu nedenle reaktif güç LCC'ye kıyasla iletilen DC güçten bağımsızdır.
- VSC'de hacimsel kapasitör grupları aracılığıyla iletilen DC gücüne talebe bağlı olarak reaktif güç üretebilir veya tüketebilir.
- VSC kompakt boyutları onların offshore şebekeler ve rüzgâr çiftliklerinin açık deniz platformlarıyla ara bağlantısına uygun hale getirir.
- VSC'de azalan uygulama mühendisliği ile karmaşık çalışma ve sistem desteği olmaksızın şebekeleri bağlamak mümkün olabilir.
- VSC daha yüksek güç kontrolü ve kolay bir güç yönü dönüşümü nedeniyle, çok terminalli HVDC uygulamaları için idealdir.
- VSC istasyonları, LCC sistemleri için tasarlanmış özel transformatörler yerine daha basit ve daha sıradan normal transformatörleri kullanabilir.



## 4. SONUÇLAR

### 4.1 Giriş

Akıllı şebekeler; gelişmiş ve otomatik bir enerji dağıtım ağı oluşturmak için elektrik ve bilginin iki yönlü akışını kullanan yeni nesil elektrik şebekeleri olarak kabul edilir. Akıllı şebekelerde enerji üretimindeki yönelim, geleneksel enerji kaynaklarının iklim üzerindeki olumsuz etkisiyle mücadelede oldukça önemli bir araç olan, güneş ve rüzgâr gibi birden fazla yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşan hibrit dağıtılmış enerji üretim sistemleridir. Akıllı şebekelerde enerji tüketimdeki yönelim ise değişken yapıya sahip dinamik yüklerdir. Hibrit dağıtılmış enerji üretimi ve dinamik yüklerin en önemli sorunu enerji üretim ve tüketiminde süreksizliğe sahip olmalarıdır. Bu durum, süreksiz kaynakların güç üretim ve dinamik yüklerin güç tüketim değişkenliklerini göz önünde tutan güç akış analizlerine ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Güç akış analizleri, süreksiz dağıtık üretiminin ve dinamik yüklerin yaygınlaştığı güç sistemleri için, yönetim ve planlamada önemli bileşenlerdir.

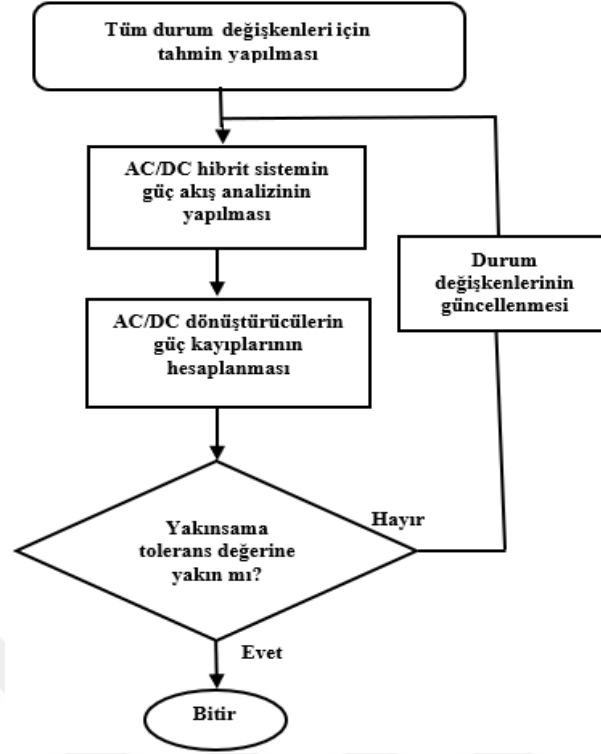


Şekil 4.1: Örnek sistemlerin güç akış analizinin akış şeması.

Güç sistemlerinin yönetilmesi ve planlanmasında yüksek öneme sahip güç akış analizleri, gelişen yeni yöntemler çerçevesinde sürekli yenilenmektedir. Bu bölümde, önceki bölümlerde verilen teorik bilgilerden faydalanılarak çeşitli uygulamalar Matlab ortamında hazırlanmış, güç akış analizleri yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Birinci örnek uygulamada yenilenebilir değişken güç kaynaklarına sahip, yüklerin sabit olduğu AC 13 bara test sistemi analiz edilmiştir. İkinci örnekte değişken yüklere sahip, güç kaynaklarının sabit olduğu AC 13 bara test sistemi analiz edilmiştir. Üçüncü örnekte ise hem yenilenebilir değişken güç kaynaklarına hem de değişken yüklere sahip AC 13 bara test sistemi analiz edilmiştir. Bu üç örneğe ait 24 saatlik güç akış analizinin akış şeması şekil 4.1'de verilmiştir. Analizler neticesinde baraların 24 saatlik gerilim seviyeleri, aktif, reaktif ve kompleks güç durumlarını gösteren grafikler elde edilmiştir. Daha sonra 3 nolu bara için 24 saatlik gerilim seviyesi, aktif, reaktif ve kompleks güç durumlarını gösteren grafikler elde edilmiştir.

Akıllı şebekelerdeki AC hibrit enerji üretim sistemleri ve dinamik yüklerdeki gelişmelere, DC tabanlı dağıtılmış jeneratörler, elektrikli araçlar, modern elektronik yükler eklenmiştir. Dördüncü örnekte ise literatürde LF (Load Flow) Model ve PSCAD programı ile analiz edilmiş olan 13 baralı bir AC/DC test sisteminin sonuçları, Matlab programıyla gerçekleştirilen güç akış analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Burada amaç AC/DC test sistemi için Matlab programında önerilen sistemin güvenilir olduğu görülmüştür. Beşinci örnekte ise dördüncü örnekte verilen AC/DC bara test sistemi saf AC sistem haline getirilmiş daha sonra bu iki sistem kayıplar yönünden karşılaştırılmıştır.

AC/DC güç akışı çalışmasında; salınım barası dışında kalan baralardaki jeneratörlere ait aktif güç değerleri, jeneratör baralarındaki gerilim genlik değerleri ve AC/DC dönüştürücülerdeki kademe ayarlı transformatörlere ait kademe ayar değerleri "kontrol değişkeni" olarak ele alınmıştır. Salınım barası haricindeki baralara ait gerilim açısı değerleri ile jeneratör baraları haricindeki baralara ait gerilim genlik değerleri ise "durum değişkeni" olarak alınmıştır. Son örnekte ise Hibrit IEEE 33 bara radyal dağıtım sistemine (RDS) DC test sistemi eklenmiş ve elde edilen AC/DC test sisteminin güç akış analizleri yapılmıştır. Yapılan güç akış analizlerinde Gauss-Seidel ve Newton-Raphson yöntemleri kullanılmış ve bu iterasyon yöntemleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. İterasyon metodları kullanılarak analiz edilen AC/DC sisteme ait genel güç akış algoritması şekil 4.2'de gösterilmiştir.



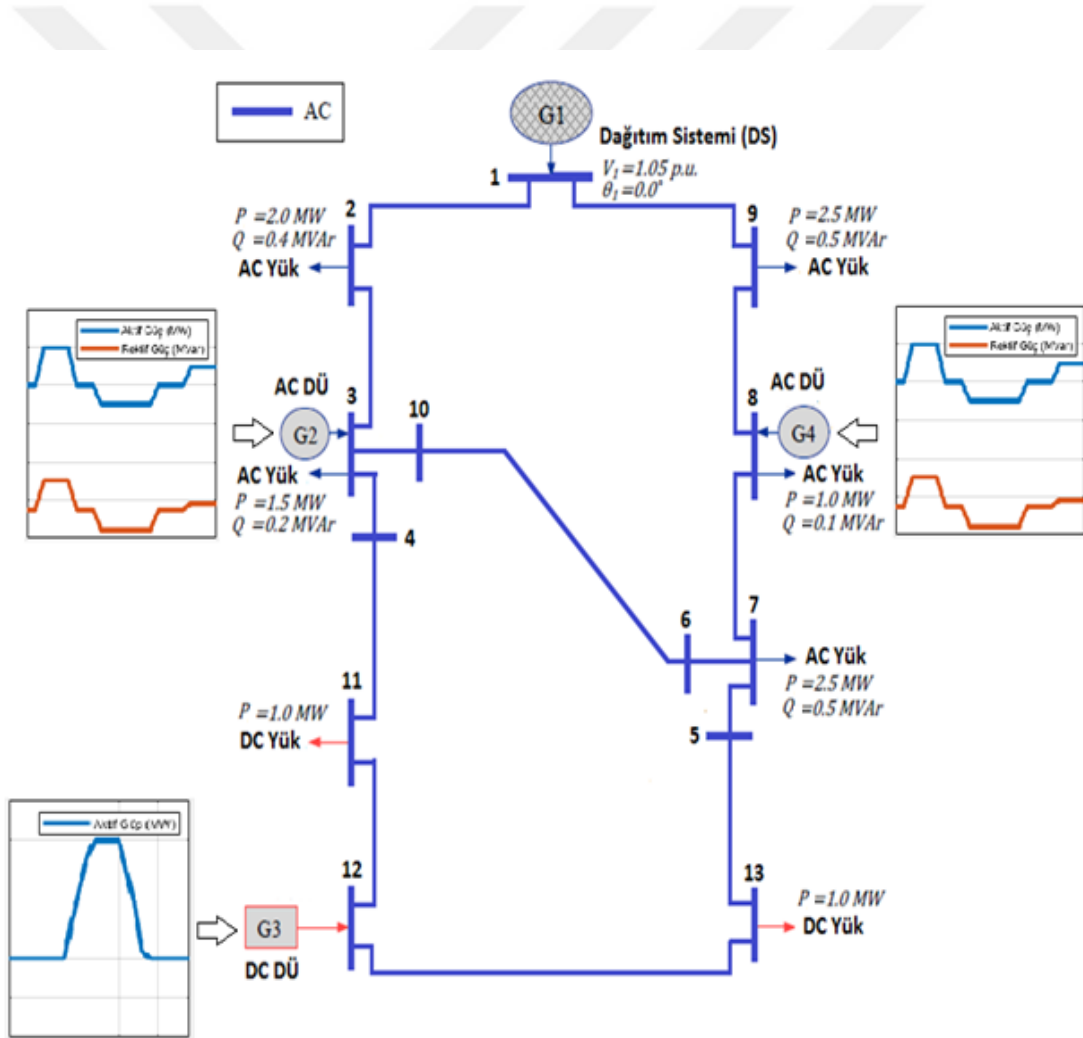
Şekil 4.2: İterasyon metodları ile güç akışı analizi şeması.

#### 4.2 Örnek-1: Değişken Güç Kaynaklarına Sahip AC 13 Bara Sistemi

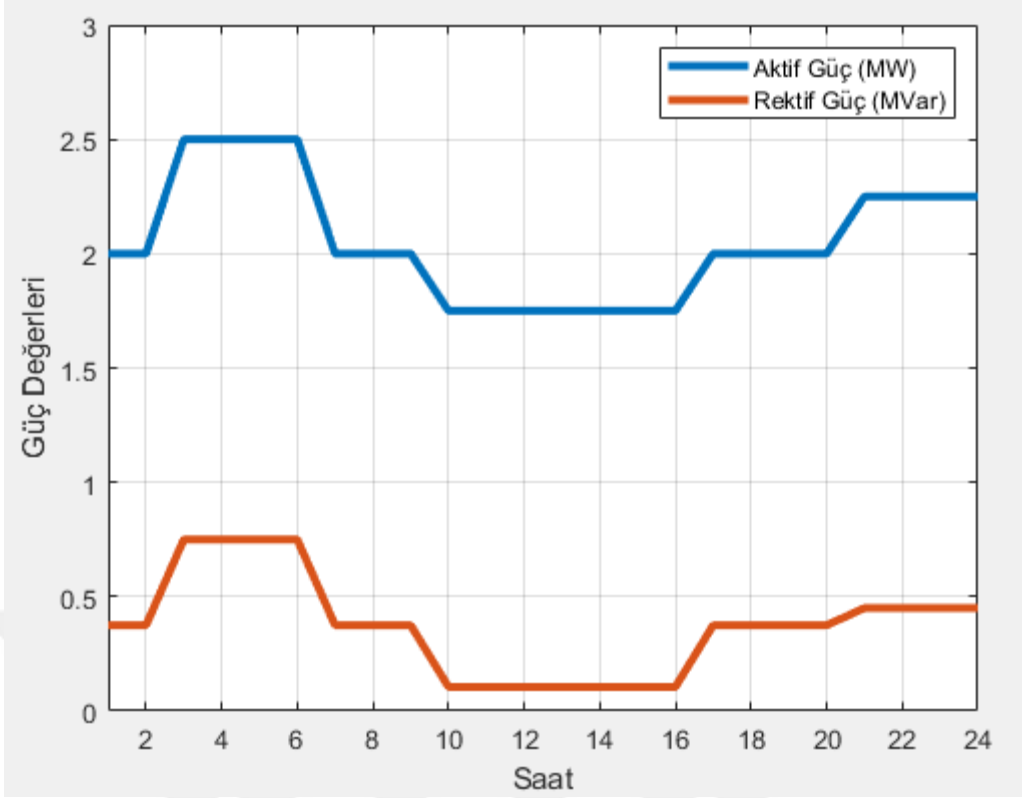
Çalışmamızın bu kısmında literatürden alınan 13 bara AC sistem üzerinde, 24 saatlik güç akışı analizi testleri yapılmıştır. Bu sistem üzerinde şekil 4.3'deki yenilenebilir dağıtık kaynakları seçilmiştir. Burada güç analizi testinde güç sistemine enerji sağlayan üç tip kaynak profili tanımlanmıştır. Sürekli enerji kaynakları (Hidro enerji, termik enerji, nükleer enerji vs.) için, üretim profili olarak 1 numaralı bara jeneratörü belirlenmiştir. Süreksizlik ve yüksek belirsizlik gösteren yenilenebilir kaynaklardan rüzgar enerji üretim profili ise 3 ve 8 numaralı bara jeneratörü için tanımlanmıştır. Yine yenilenebilir kaynaklardan enerji depolama özelliğine sahip güneş enerji üretim profili ise 12 numaralı bara jeneratörü için seçilmiştir. Bu profillerden sürekli enerji kaynakları sabit, yenilenebilir enerji kaynakları ise saatlik davranışlarına uygun olarak belirlenmiştir. Çünkü rüzgar ve güneş sistemlerinde enerji üretimi hava durumu ve iklim koşulları gibi sebeplerden dolayı değişken değerlere sahiptirler.

Değişken olan yenilenebilir dağıtık kaynaklarının güç dağılımı 24 saatlik olarak şekil 4.4 ve şekil 4.5'de verilmiştir. Analiz sonucu olarak, baraların tümünün 24 saatlik gerilim seviyeleri, aktif, reaktif ve kompleks güç durumları sırasıyla, şekil 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9'da

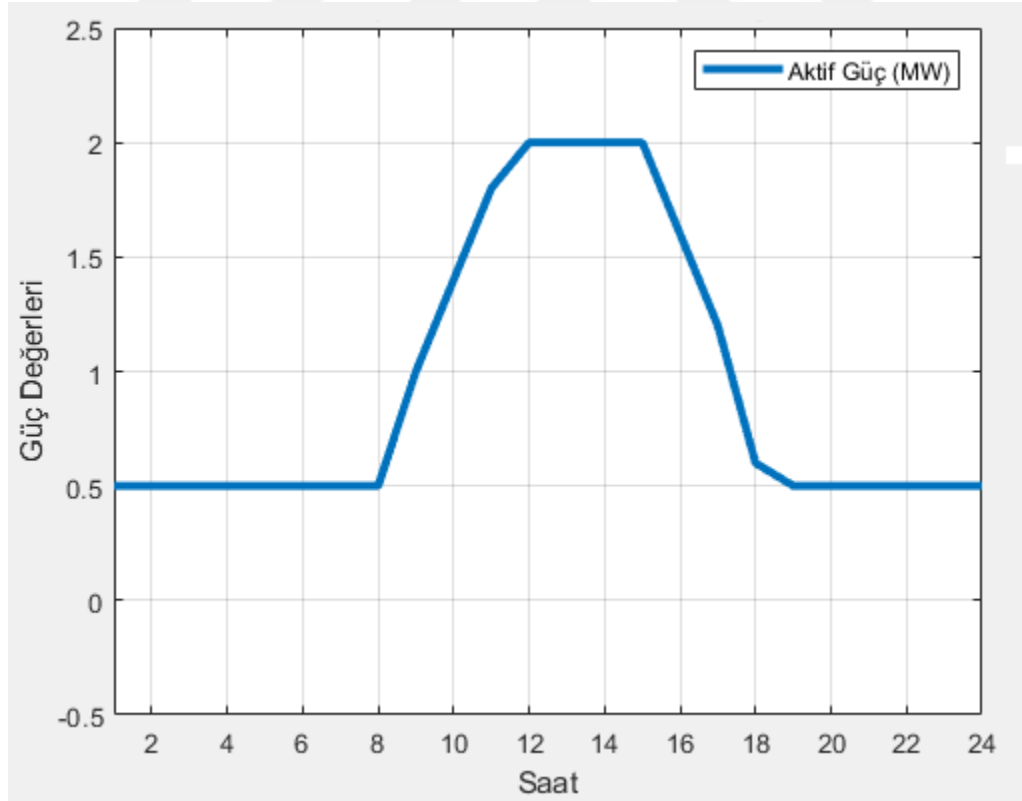
ifade edilmiştir. Şekil 4.10, 4.11, 4.12, 4.12’de ise 3 nolu bara için gerilim seviyeleri, aktif, reaktif ve kompleks güç durumları 24 saatlik olarak grafiklerde gösterilmiştir. Barada aktif ve reaktif güç değerinin negatif olması, bu barada güç tüketimi olduğuna işaret eder. Sadece 1 nolu bara için 24 saatlik gerilim, aktif, reaktif ve kompleks güç değerleri Ek.2’de verilmiştir. Ek.2 değerleri ile grafik renklendirmelerinin birebir uyduğu ve sistemin güvenli çalıştığı saptanmıştır. Grafiklerde görüldüğü gibi, yenilenebilir kaynaklar ile dağıtık üretim yapılan baralarda, bara güçlerinin ve bara gerilim seviyelerinin yüksek olduğu, sadece yükün bağlı olduğu baralarda bu değerler düşük olmaktadır. 3 nolu bara ise rüzgar enerjisi kaynağından direk etkilendiğinden dolayı güç değerleri rüzgar enerjisinin değişimine benzerdir, gerilim seviyesinde ise yaklaşık %3’lük bir dalgalanma görülmektedir.



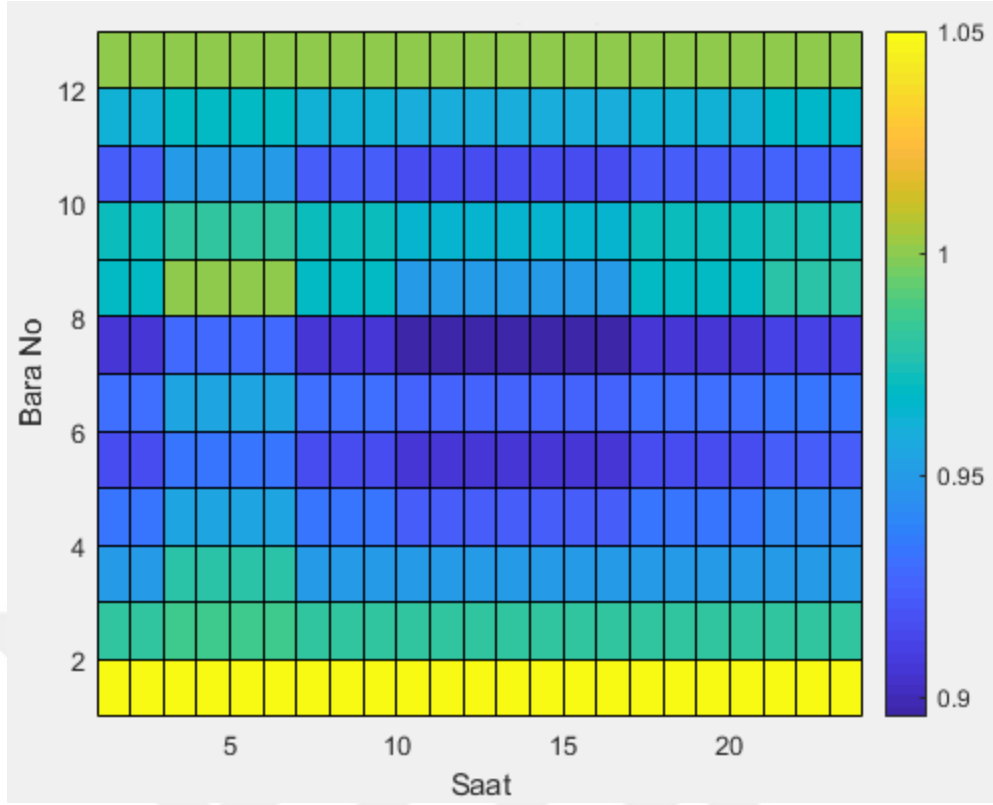
Şekil 4.3: Değişken yenilenebilir kaynaklı 13 bara test sistemi.



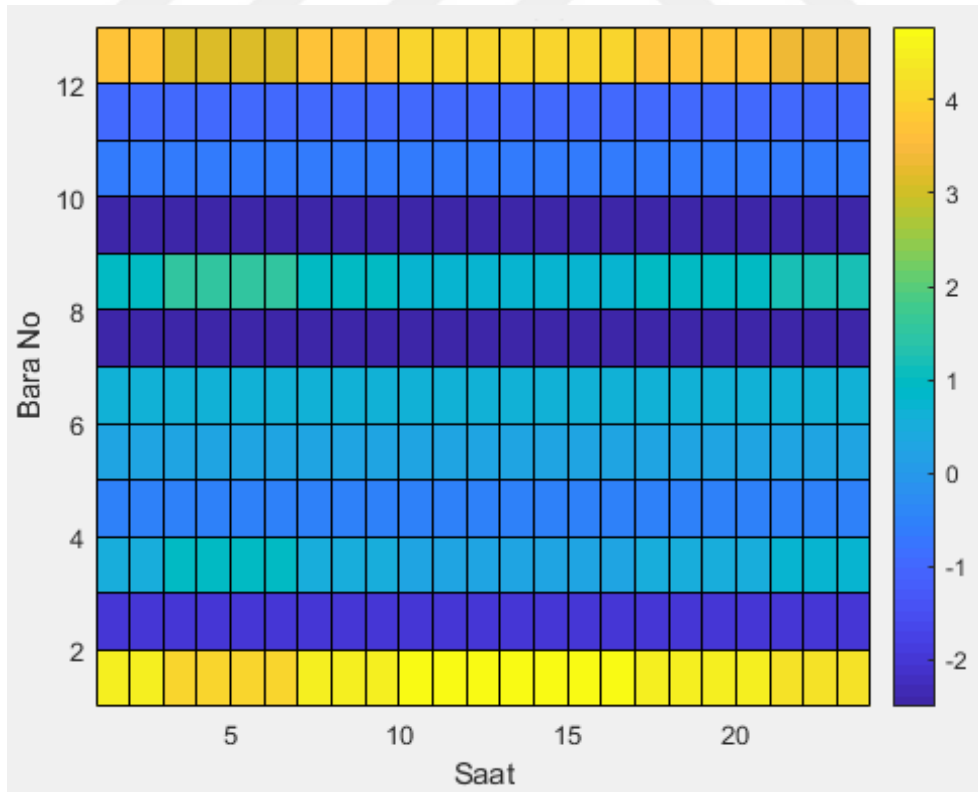
Şekil 4.4: Gün boyu çift beslemeli asenkron rüzgar türbini güç dağılım değerleri.



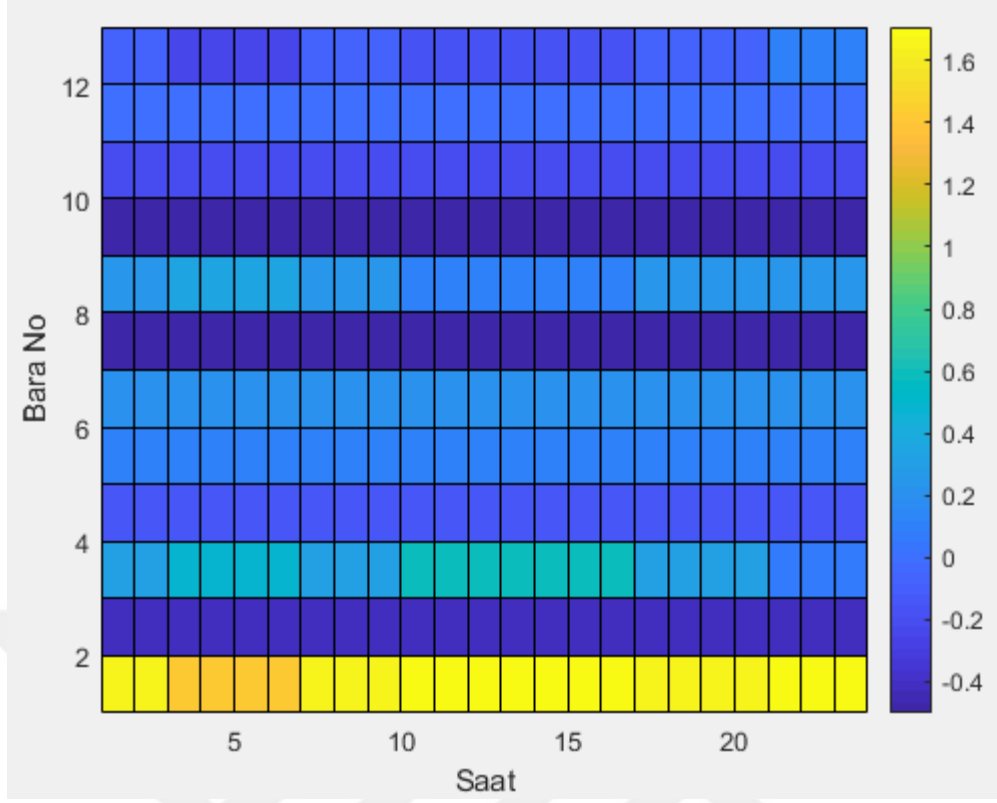
Şekil 4.5: Gün boyu güneş panelleri güç dağılım değerleri.



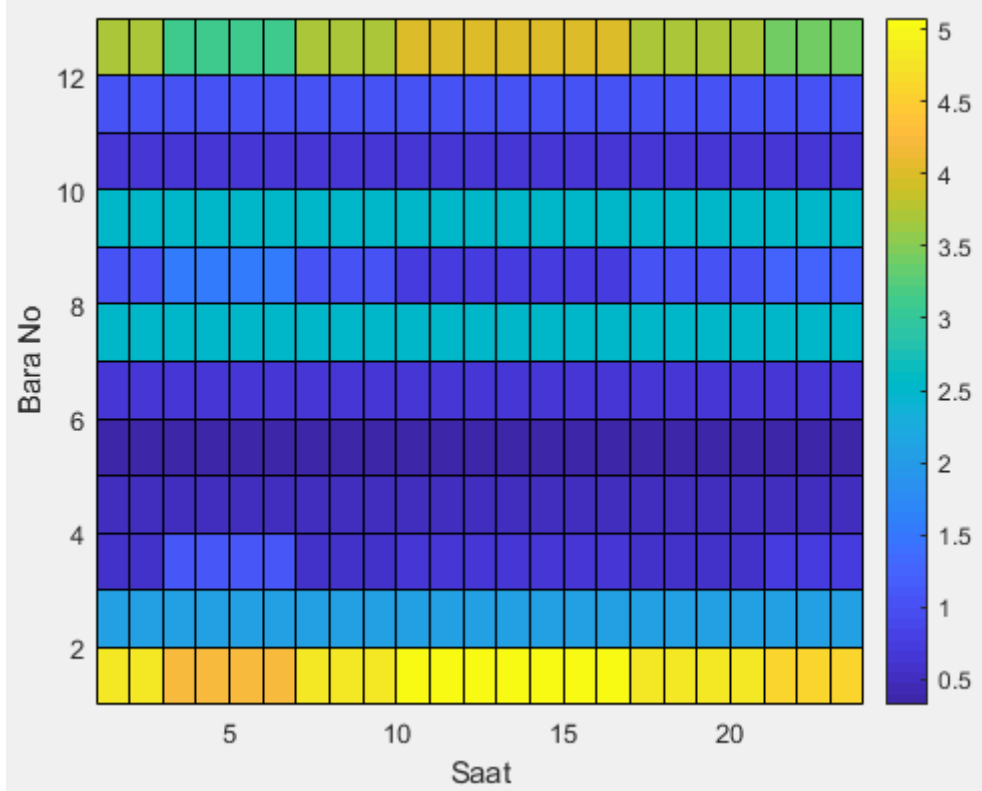
Şekil 4.6: Değişken güç kaynakları için baraların gerilim değerleri (pu).



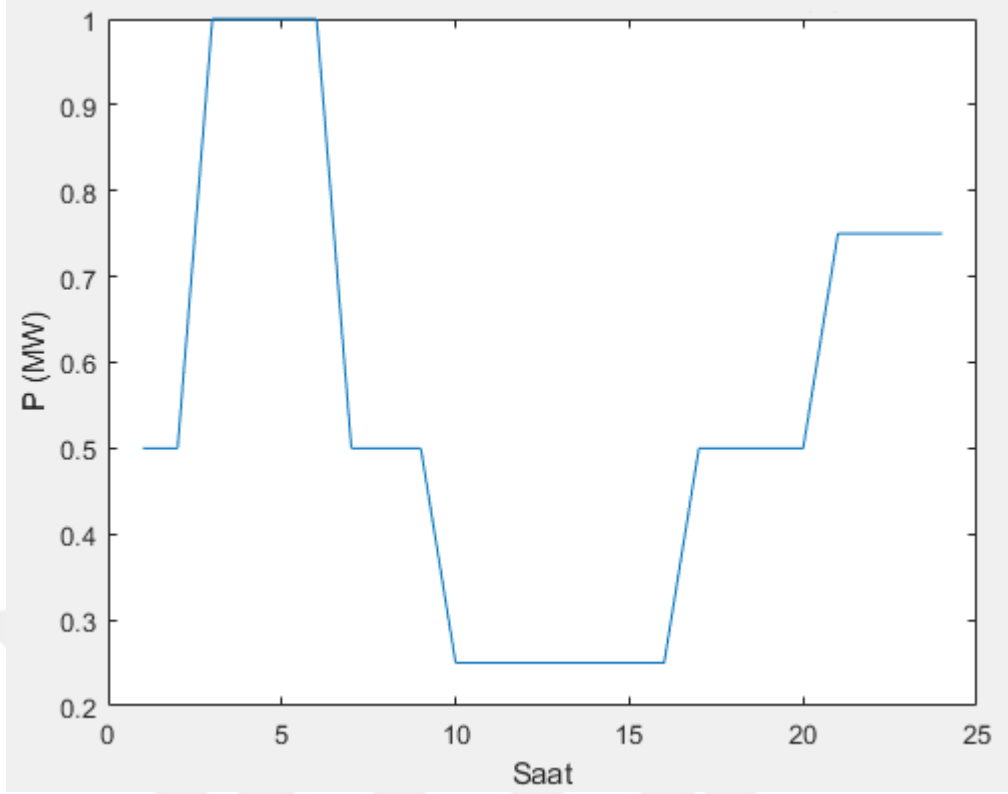
Şekil 4.7: Değişken güç kaynakları için baraların aktif güç değerleri (MW).



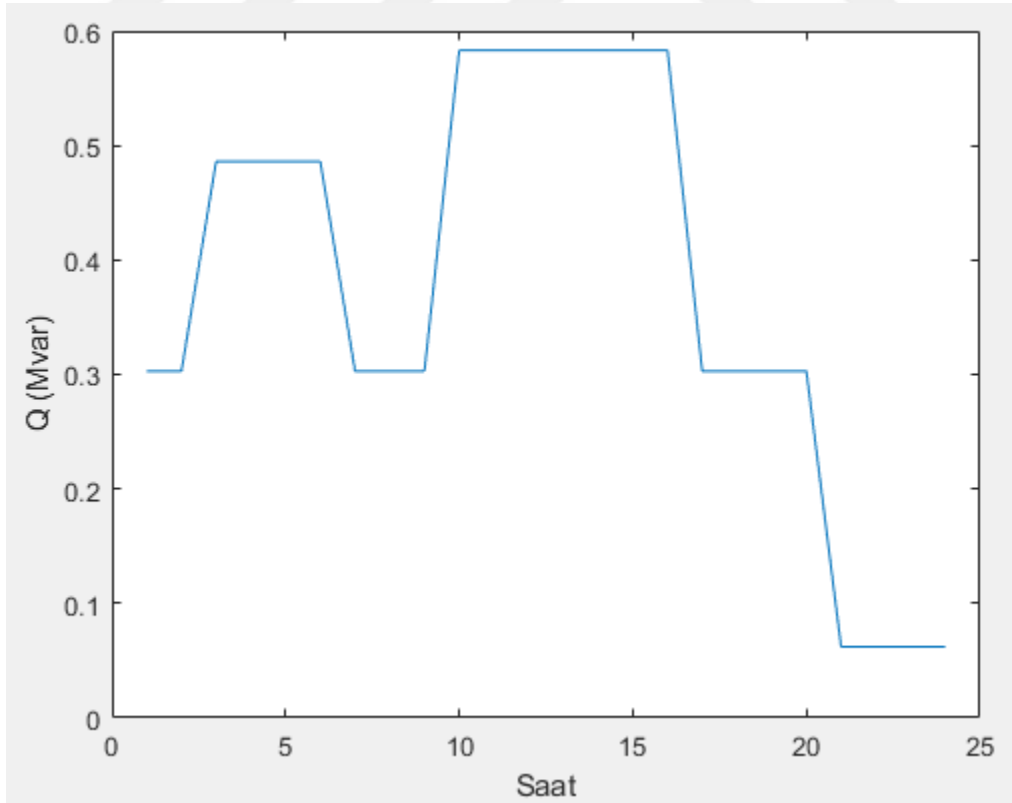
Şekil 4.8: Değişken güç kaynakları için baraların reaktif güç değerleri (MVar).



Şekil 4.9: Değişken güç kaynakları için baraların kompleks güç değerleri (MVA).

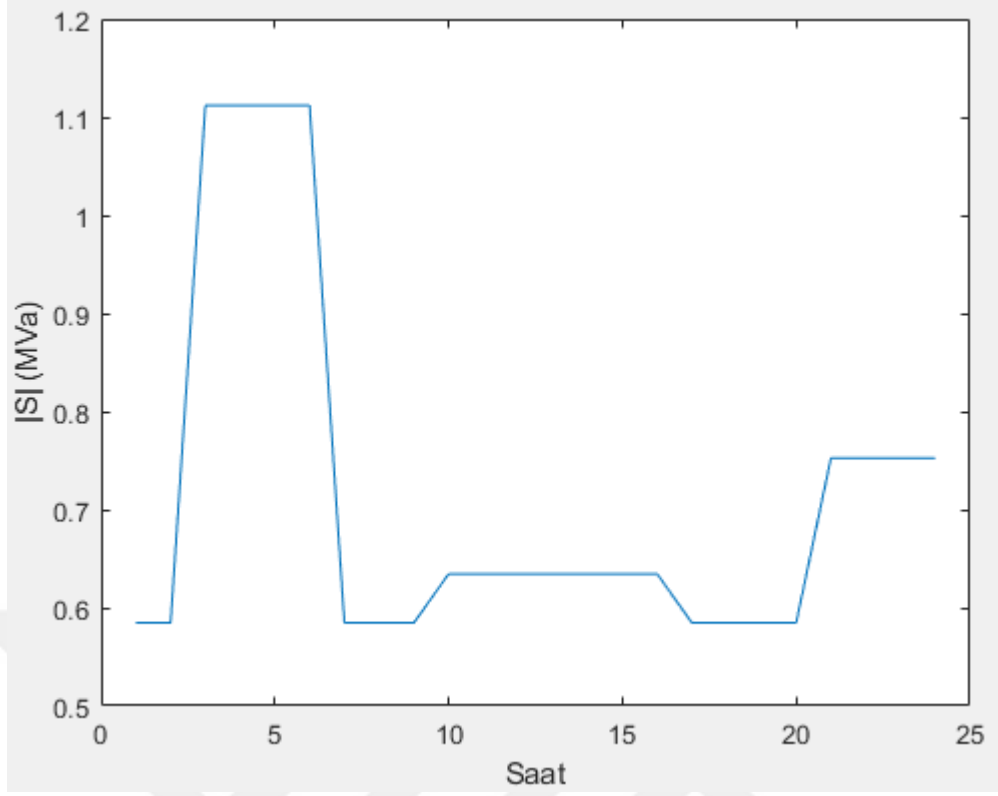


Şekil 4.10: Değişken güç kaynakları için bara-3'ün aktif güç değerleri (MW).

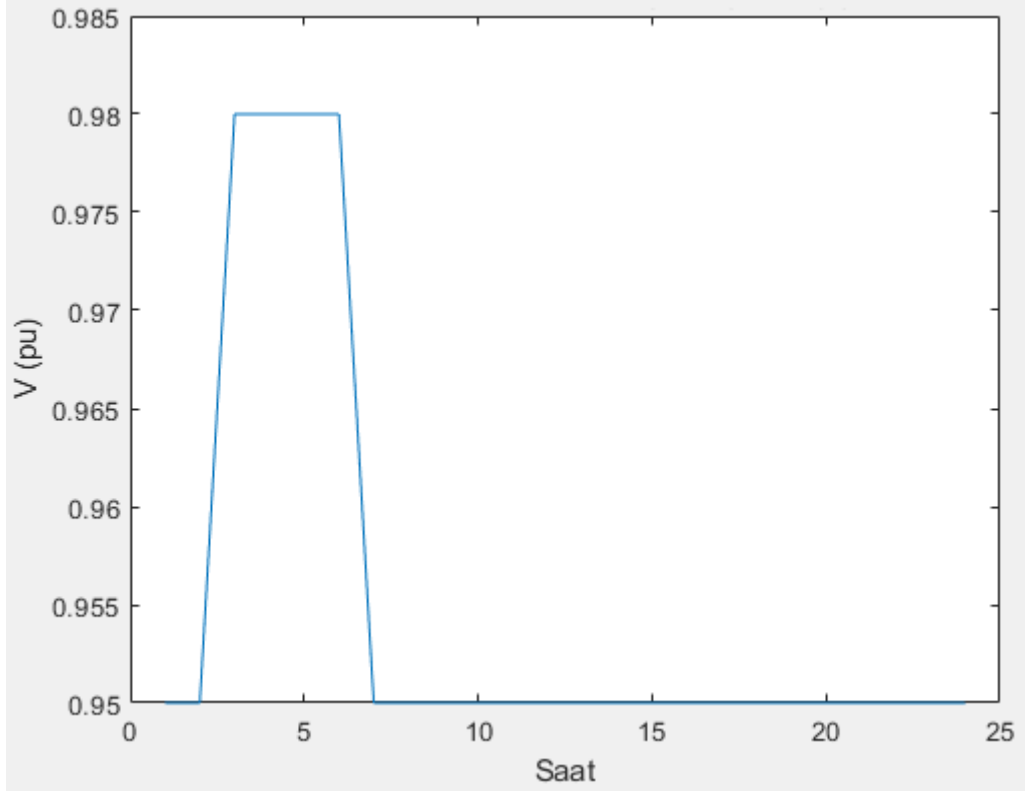


Şekil 4.11: Değişken güç kaynakları için bara-3'ün reaktif güç değerleri (MVar).





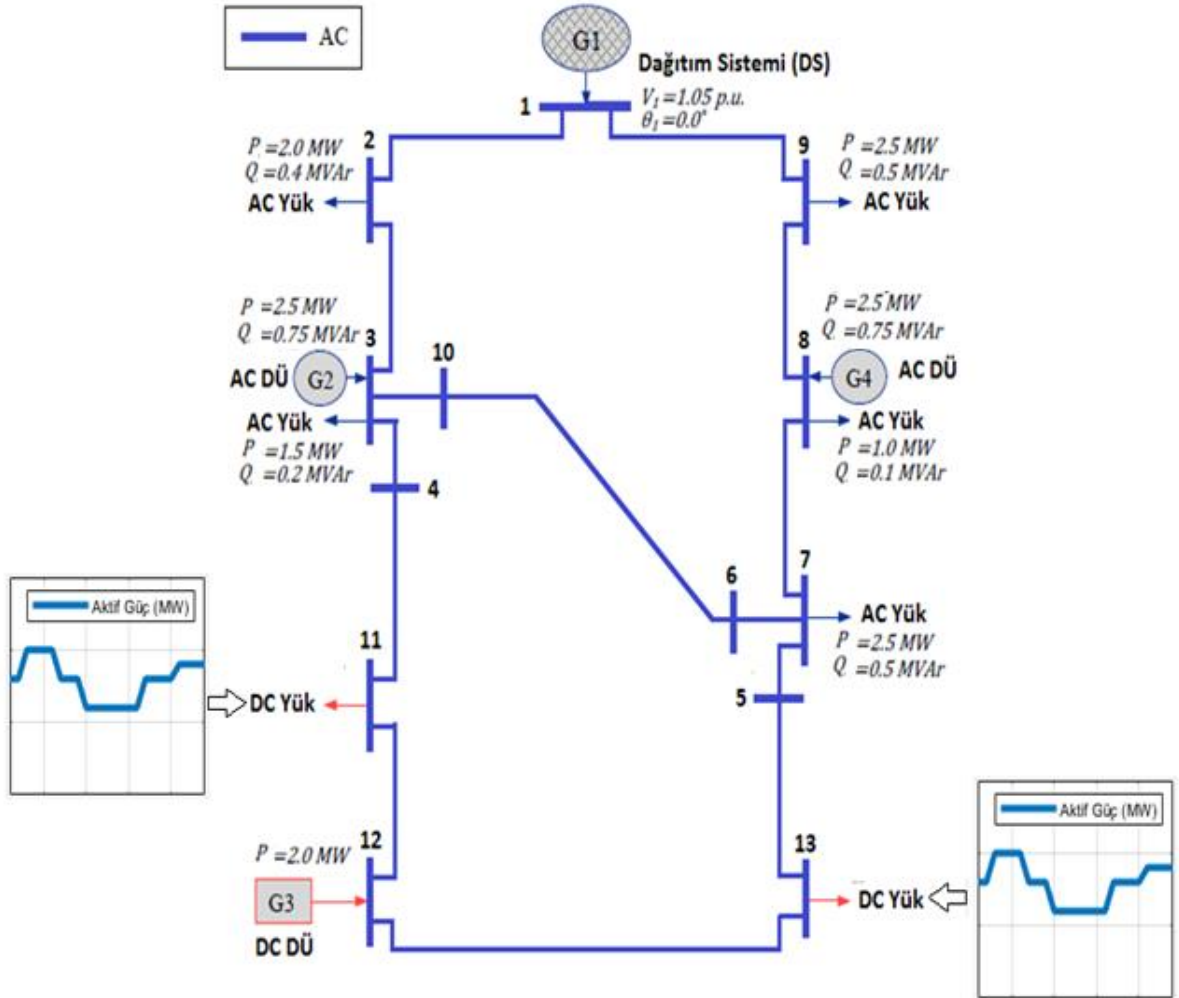
Şekil 4.12: Değişken güç kaynakları için bara-3'ün kompleks güç değerleri (MVA).



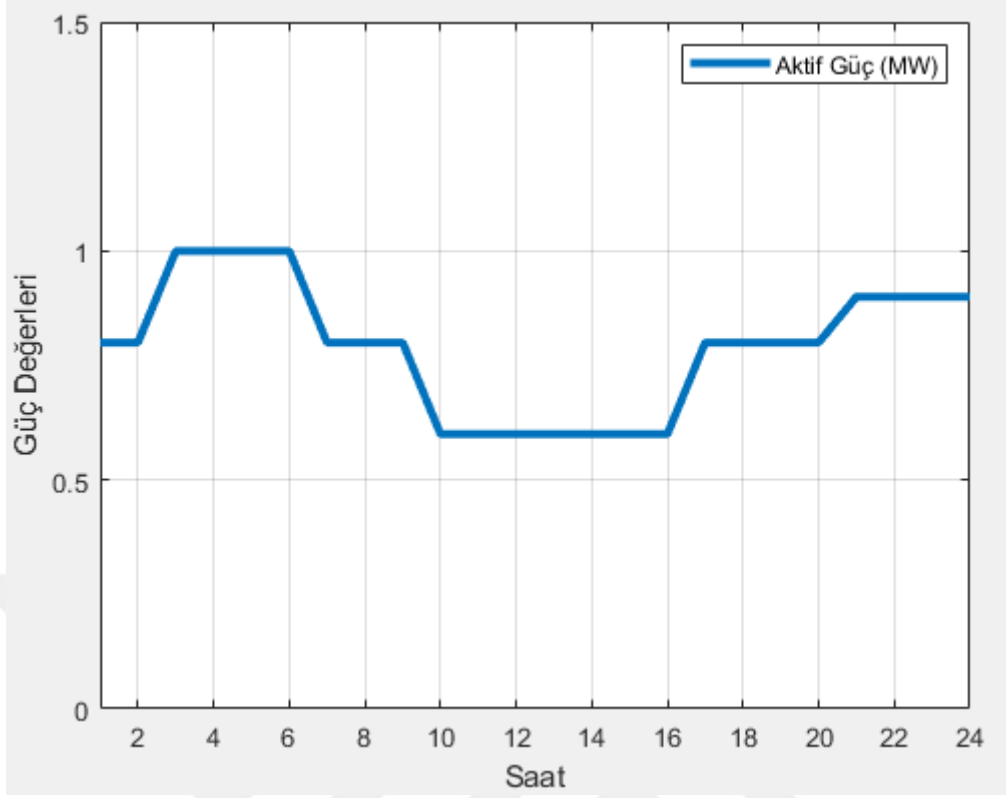
Şekil 4.13: Değişken güç kaynakları için bara-3'ün gerilim değerleri (pu).

### 4.3 Örnek-2: Değişken Yüklere Sahip AC 13 Bara Sistemi

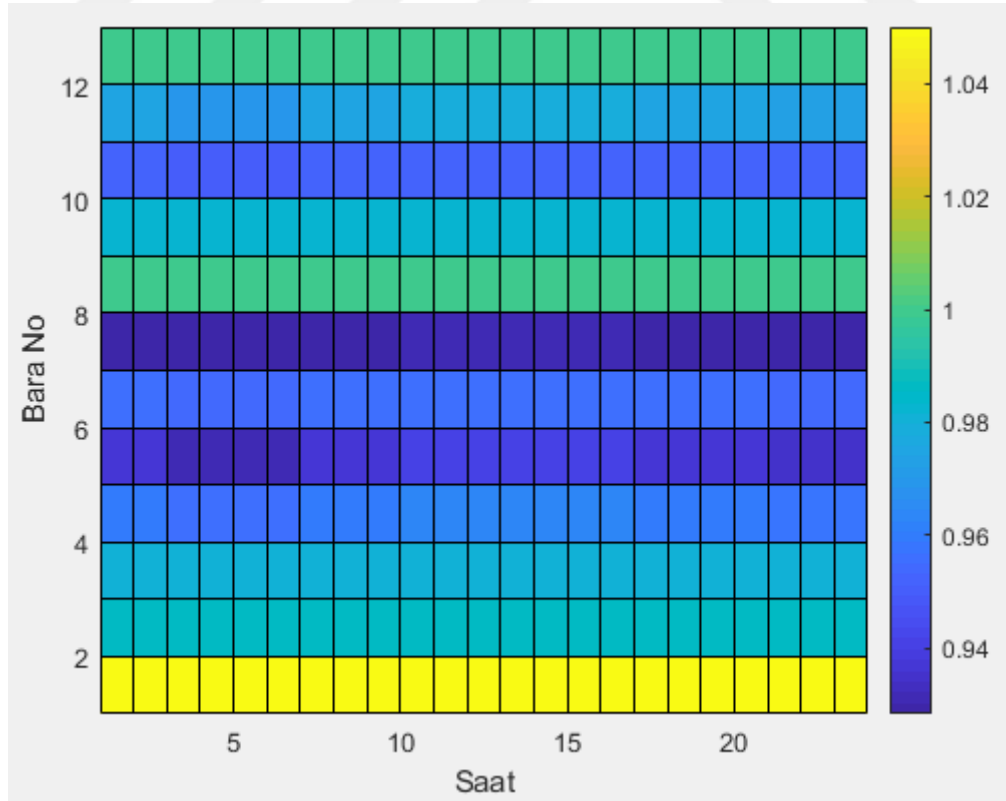
Bu test senaryosunda şekil 4.14’de gösterildiği gibi dağıtık kaynakların güç değerleri sabit kabul edilmiş, 11 ve 13 numaralı baralardaki DC yükler ise değişken şekilde 24 saatlik olarak belirlenmiştir. DC yüklerin güç dağılım değerleri şekil 4.15’de verilmiştir. Analiz sonucunda, şekil 4.16, 4.17, 4.18, 4.19’da görüldüğü gibi baraların sırasıyla, 24 saatlik, gerilim seviyeleri, aktif, reaktif ve kompleks güç durumlarının değişimi görülmektedir. Şekil 4.20, 4.21, 4.22, 4.23’de ise 3 nolu bara için 24 saatlik gerilim seviyeleri, aktif, reaktif ve kompleks güç durumlarını ifade etmektedir. Bu grafiklerde baraların durumuna baktığımızda, jeneratör baralarının üretici konumunda olduğu için gerilim değerlerinin 1 ve 1’in üstü olduğu güç değerlerinin ise pozitif olduğu, yük baralarının gerilim değerlerinin 1’in altında ve güç değerlerinin ise negatif olduğu görülmüştür. 3 nolu barada, aktif güç ve gerilim değerinin yük değişiminden etkilenmediği, sadece reaktif gücün etkilendiği görülmektedir.



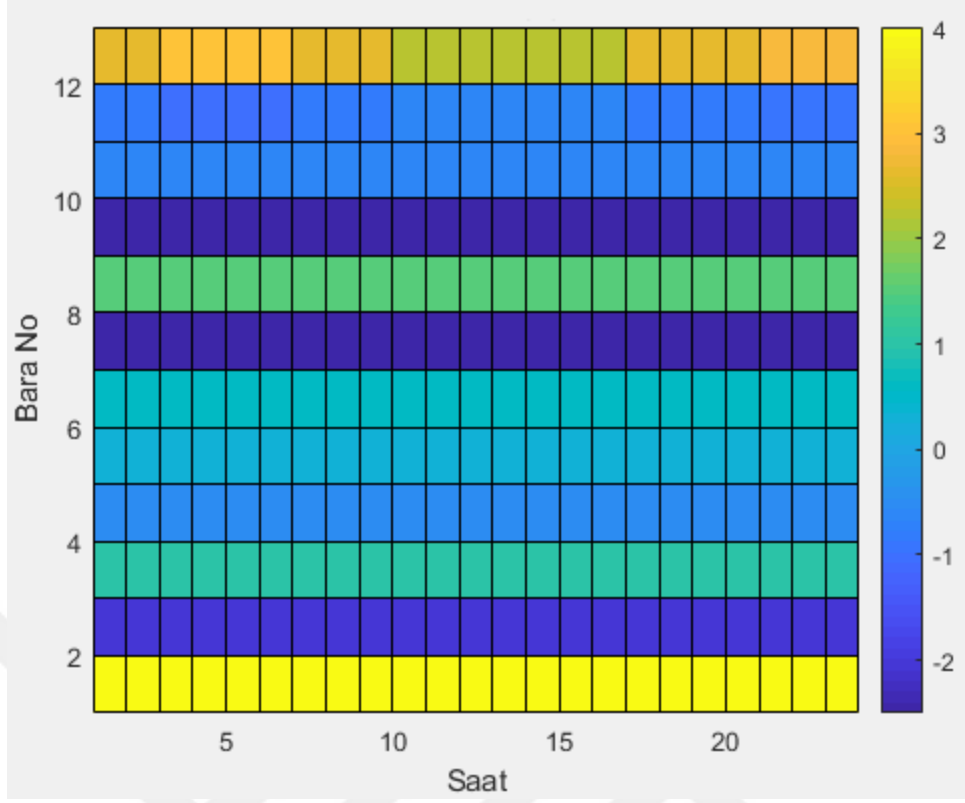
Şekil 4.14: Değişken yükler için 13 bara test sistemi.



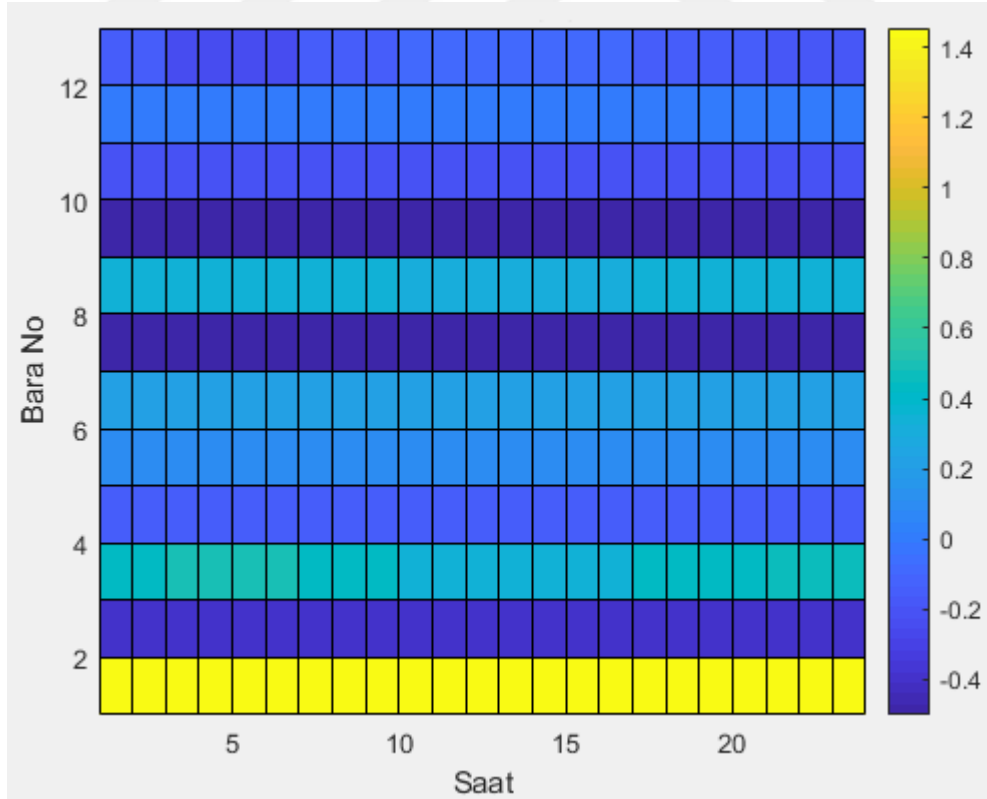
Şekil 4.15: Gün boyu dinamik yük güç dağılım değerleri.



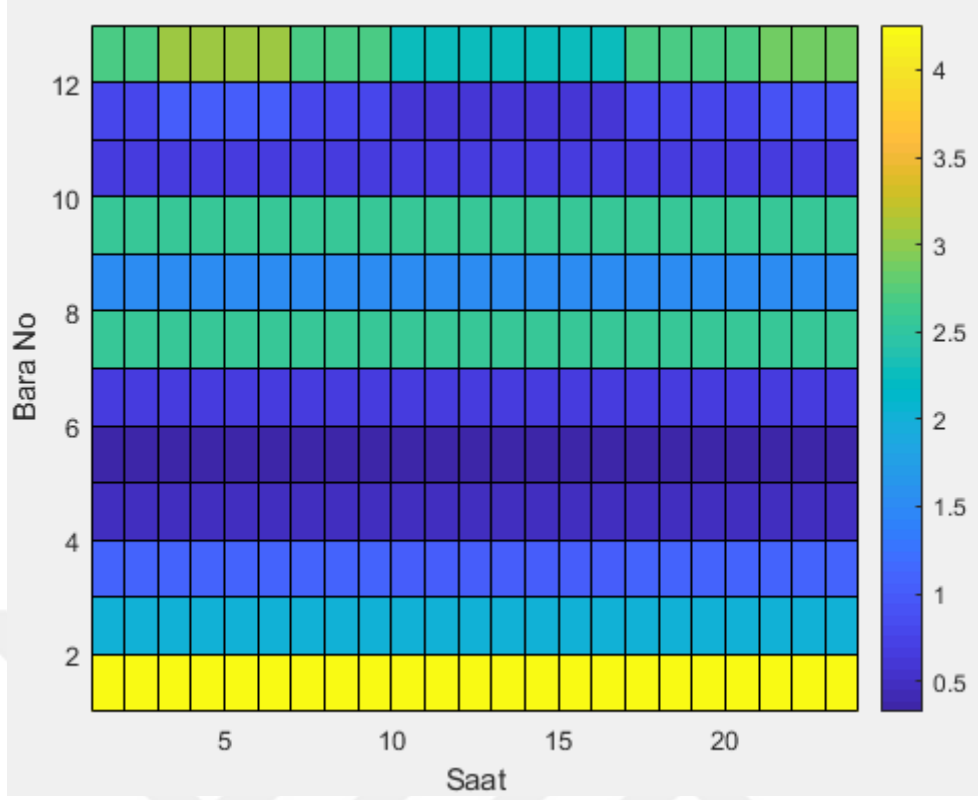
Şekil 4.16: Değişken yükler için baraların gerilim değerleri (pu).



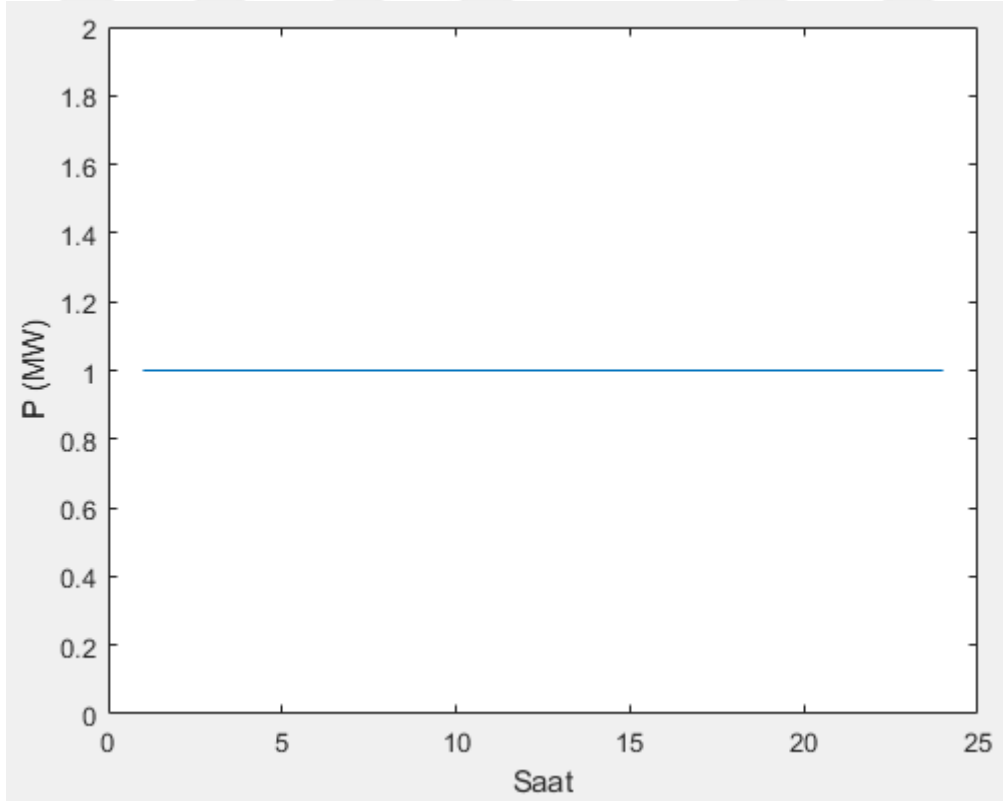
Şekil 4.17: Değişken yükler için baraların aktif güç değerleri (MW).



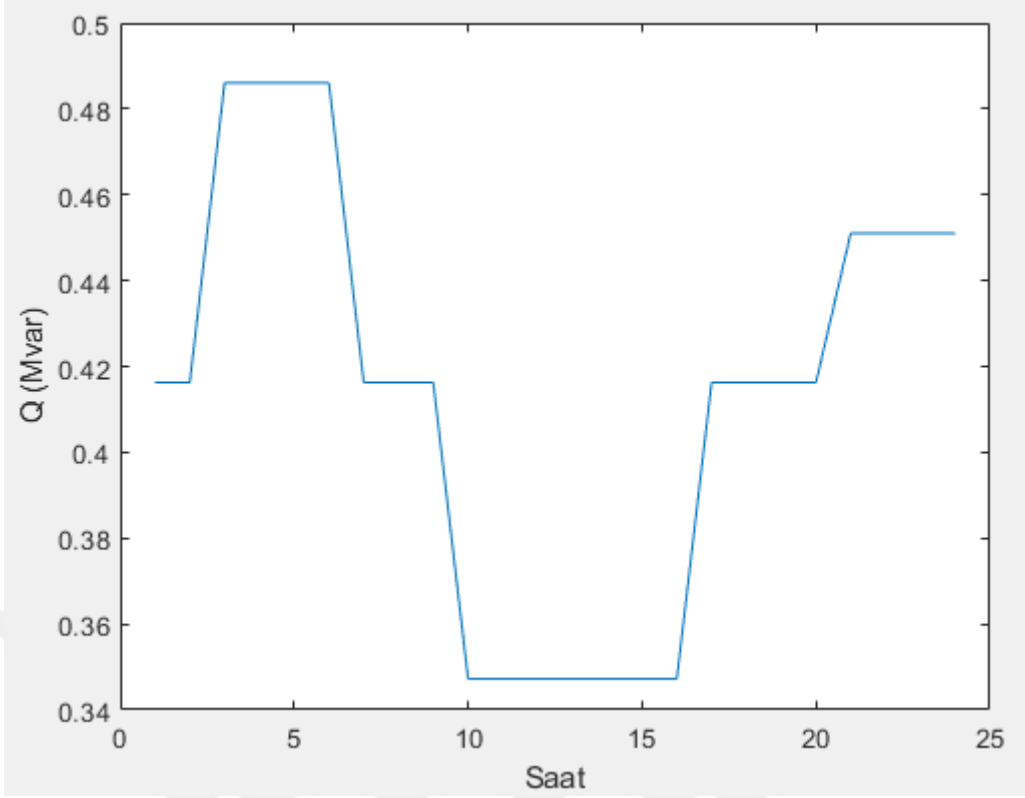
Şekil 4.18: Değişken yükler için baraların reaktif güç değerleri (MVar).



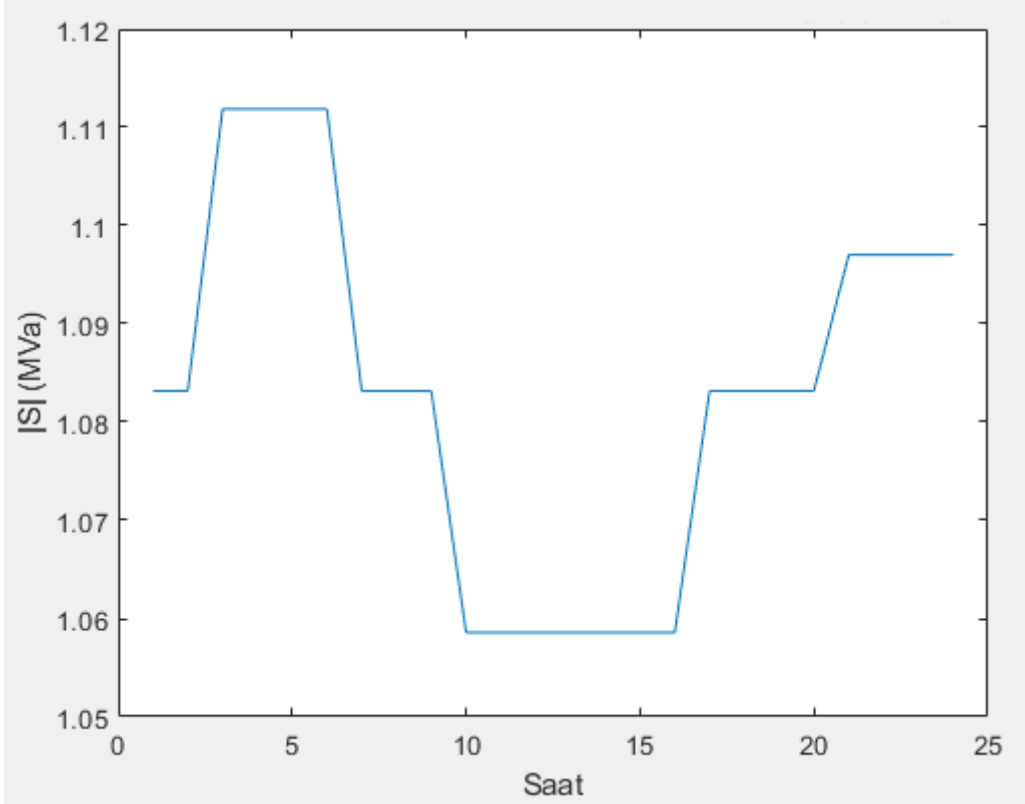
Şekil 4.19: Değişken yükler için baraların kompleks güç değerleri (MVA).



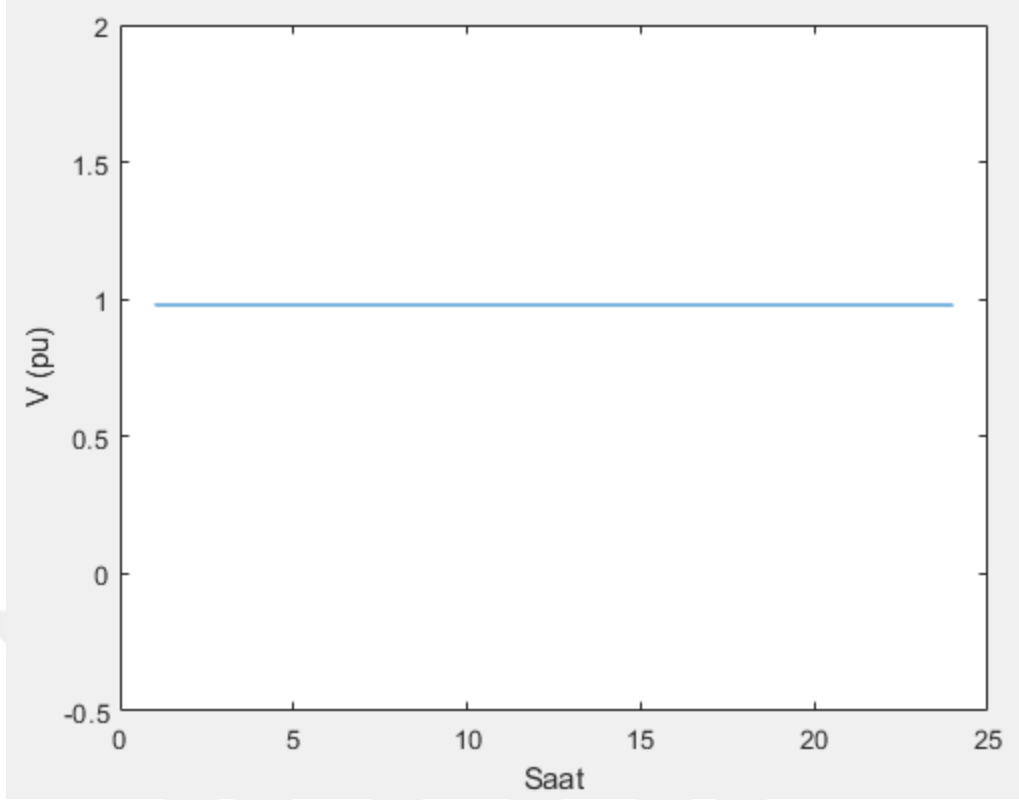
Şekil 4.20: Değişken yükler için bara-3'ün aktif güç değerleri (MW).



**Şekil 4.21:** Değişken yükler için bara-3'ün reaktif güç değerleri (MVar).



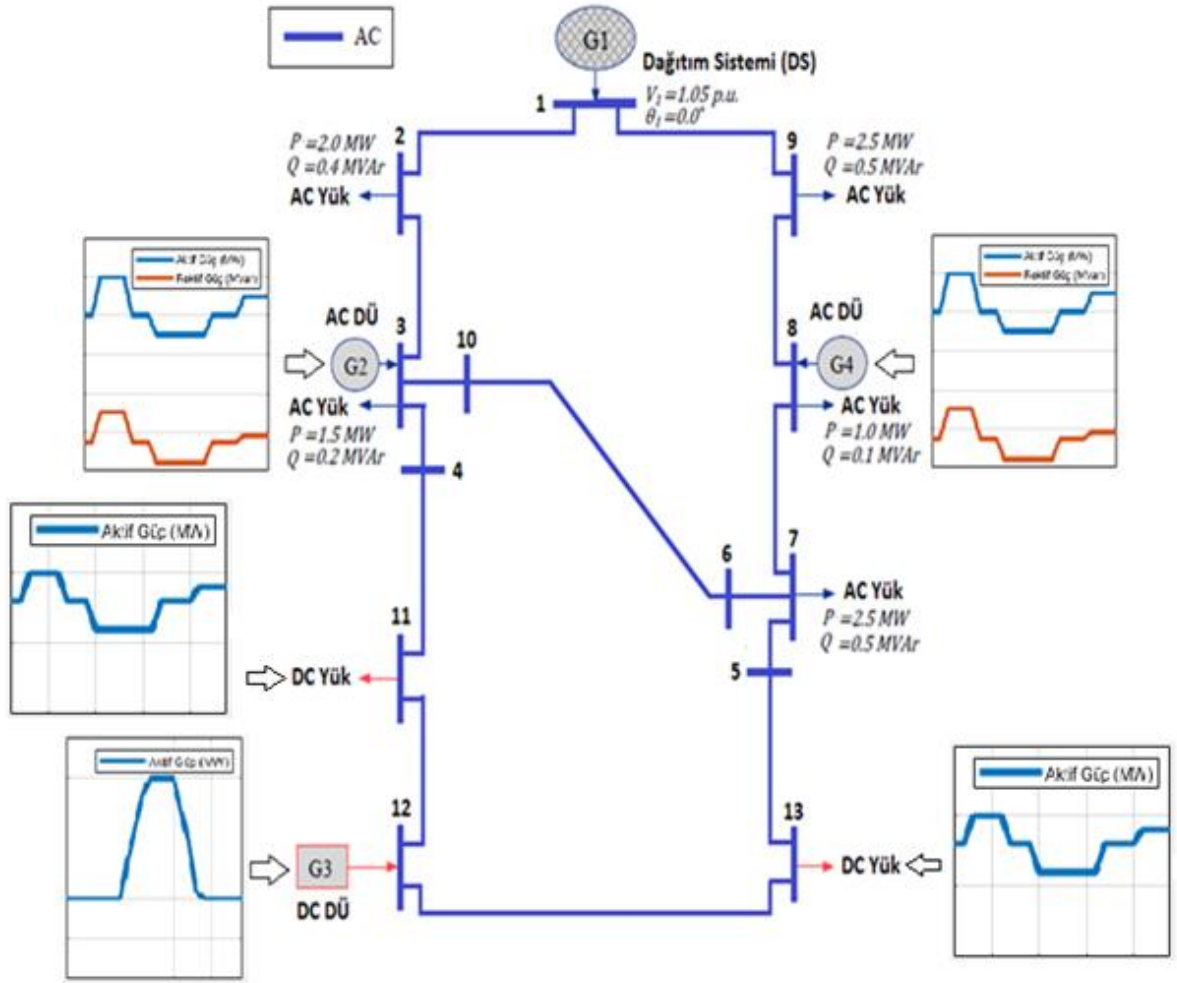
**Şekil 4.22:** Değişken yükler için bara-3'ün kompleks güç değerleri (MVA).



**Şekil 4.23:** Değişken yükler için bara-3'ün gerilim seviyesi değerleri (pu).

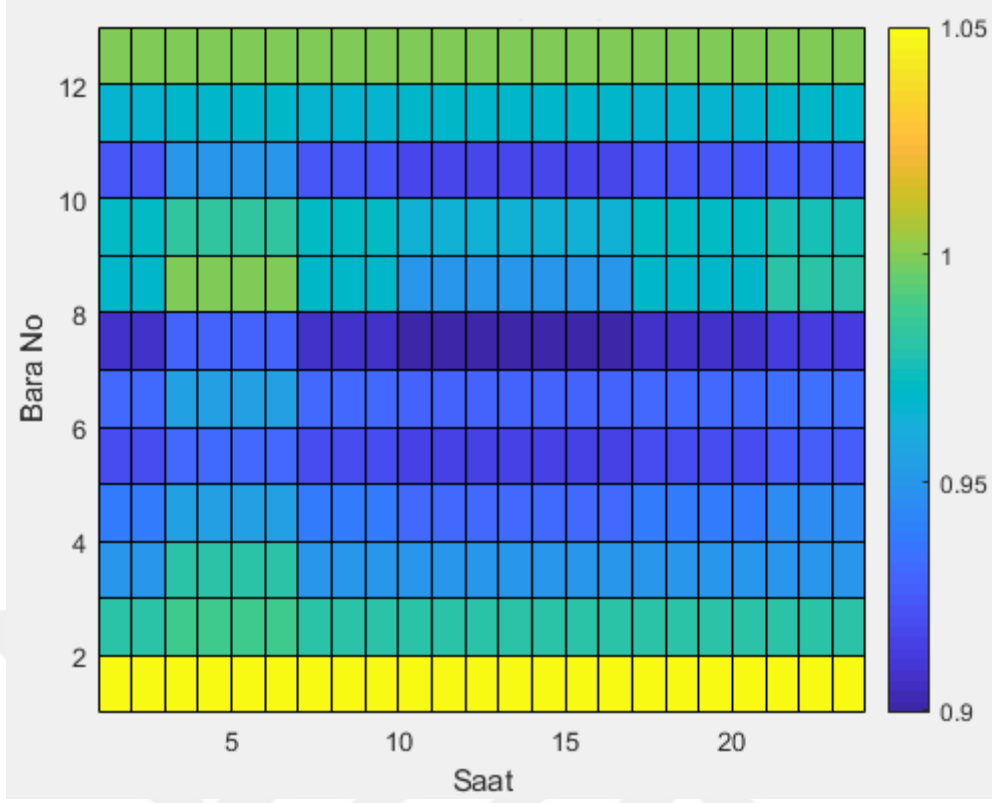
#### **4.4 Örnek-3: Değişken Güç Kaynakları ve Yüklere Sahip AC 13 Bara Sistemi**

Bu test senaryosunda şekil 4.24'de görüldüğü gibi birinci test senaryosundaki değişken yenilenebilir dağıtık kaynaklar ve ikinci test senaryosundaki değişken DC yükler kullanılmıştır. Test sistemine ait hat empedansları Ek.1'de verilmiştir. Yapılan analizler neticesinde, şekil 4.25, 4.26, 4.27, 4.28'de görüldüğü gibi baraların tümünün 24 saatlik gerilim seviyeleri, aktif, reaktif ve kompleks güç durum değerleri verilmiştir. Şekil 4.29, 4.30, 4.31, 4.32'de 3 nolu bara için 24 saatlik gerilim seviyeleri, aktif, reaktif ve kompleks güç durum grafikleri elde edilmiştir. Baraların 24 saatlik gerilim, aktif, reaktif ve kompleks güç grafiklerine baktığımızda sistem dengede olduğu için önceki örneklerde olduğu gibi jeneratör baralarındaki gerilim değerinin 1 ve 1'in üstü, güç değerinin pozitif olduğu, diğer baralardaki gerilim değerinin 1'in altında güç değerinin negatif olduğu görülmüştür. 3 nolu baradaki aktif, reaktif ve kompleks güç değerlerinde jeneratör ve yükün etkisinden dolayı dalgalanmanın fazla olduğu, gerilim değerinde ise dalgalanmanın az olduğu görülmüştür.

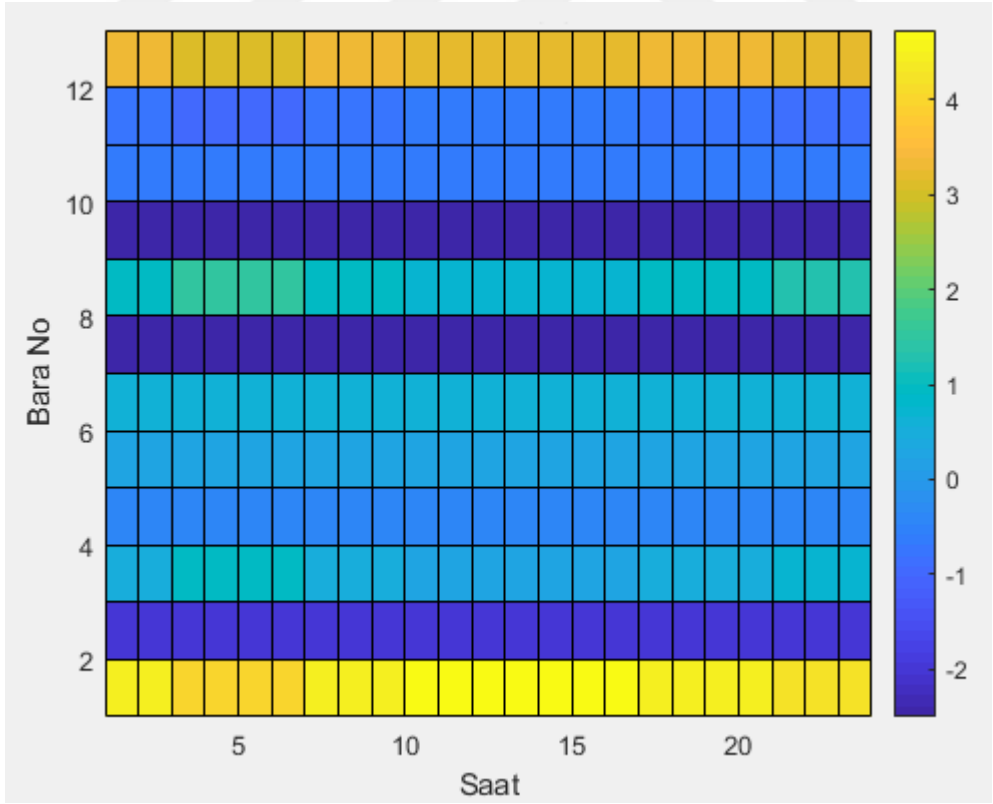


Şekil 4.24: Değişken güç kaynaklarına-yüklere sahip AC 13 bara sistemi.

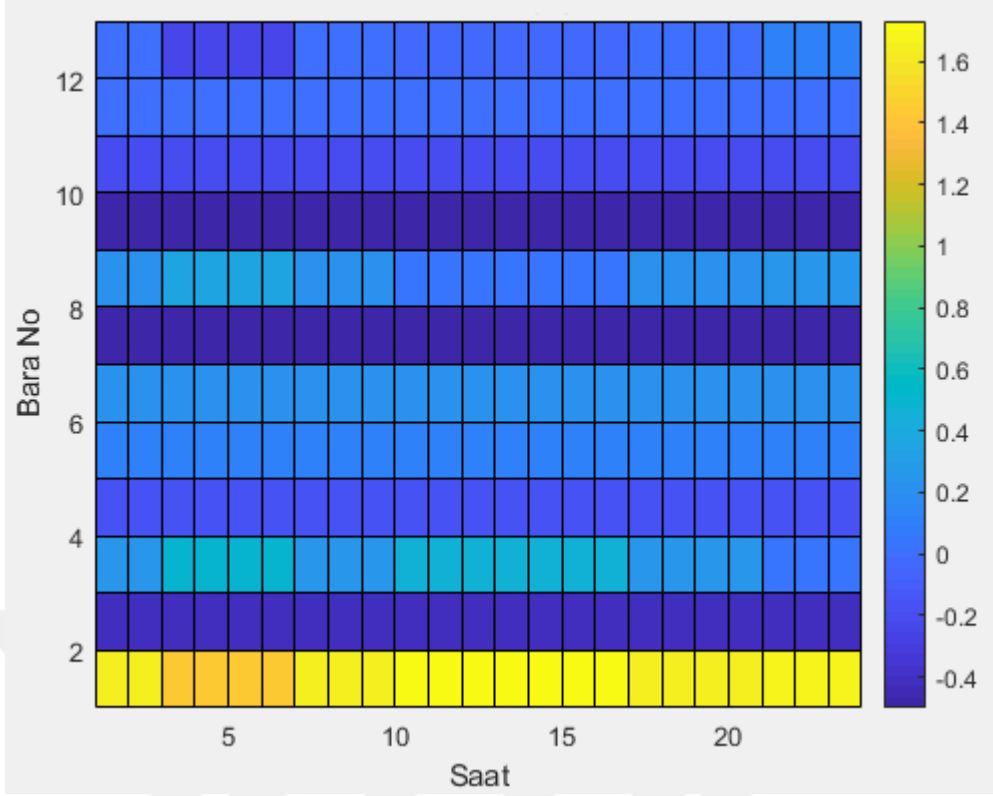




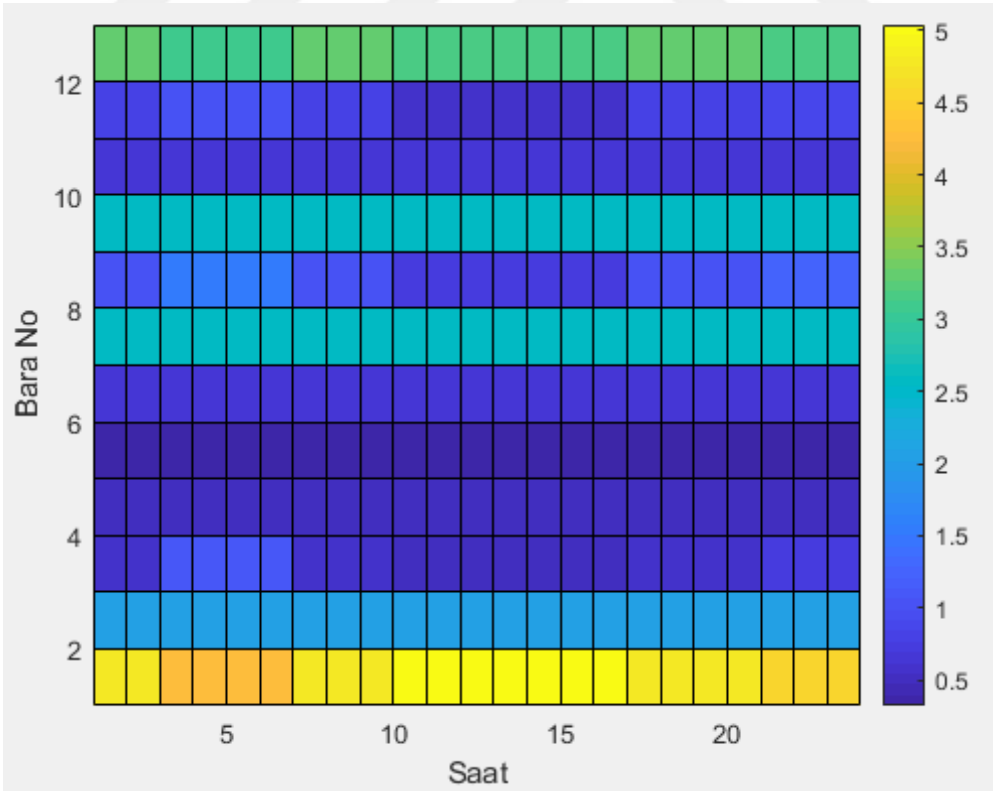
Şekil 4.25: Değişken güç kaynakları-yüklerde için baraların gerilim değerleri (pu).



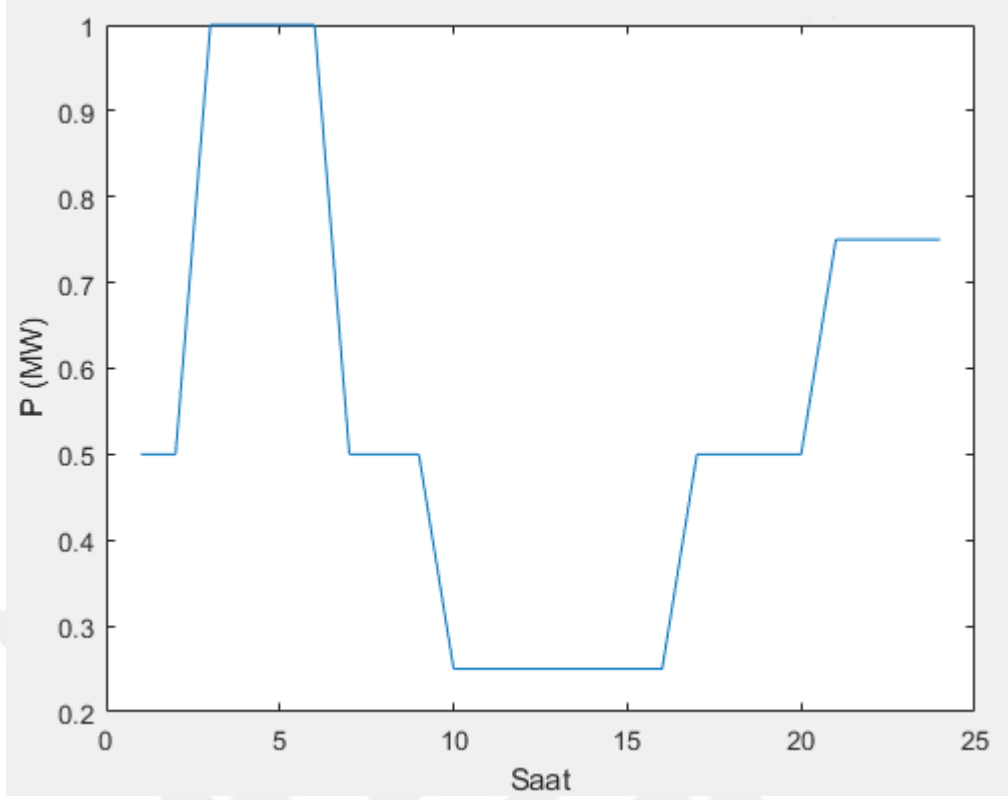
Şekil 4.26: Değişken güç kaynakları-yüklerde için baraların aktif güç değerleri (MW).



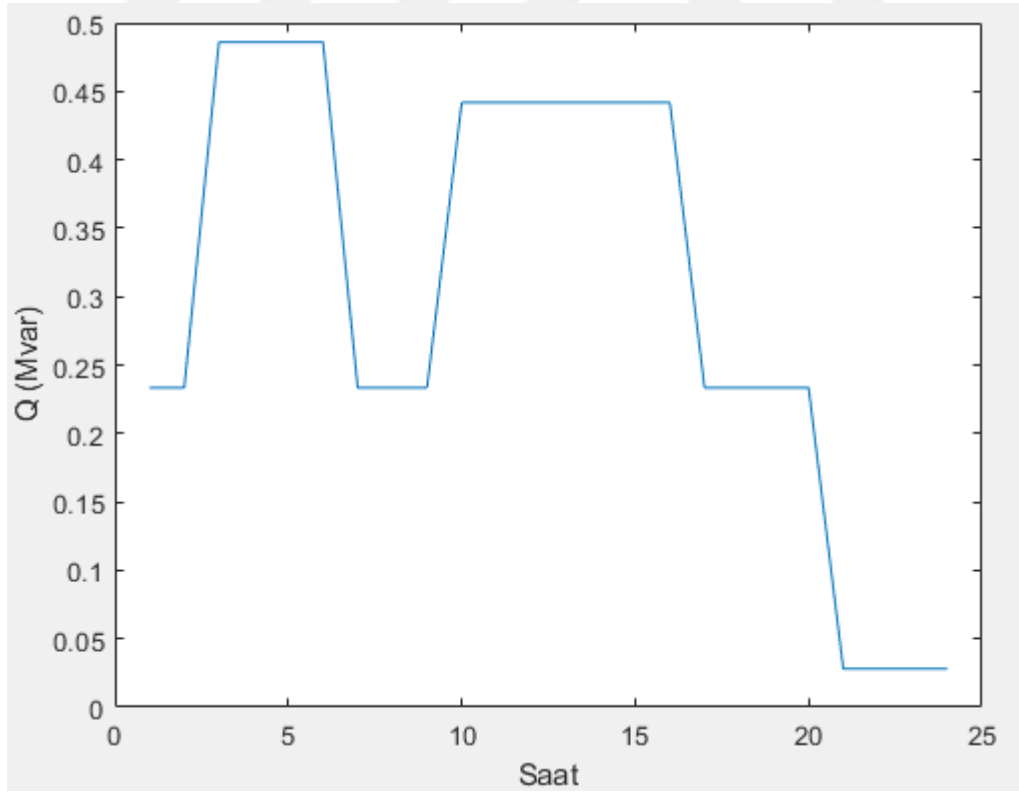
Şekil 4.27: Değişken güç kaynakları-yüklerde için baraların reaktif güç değerleri (MVar).



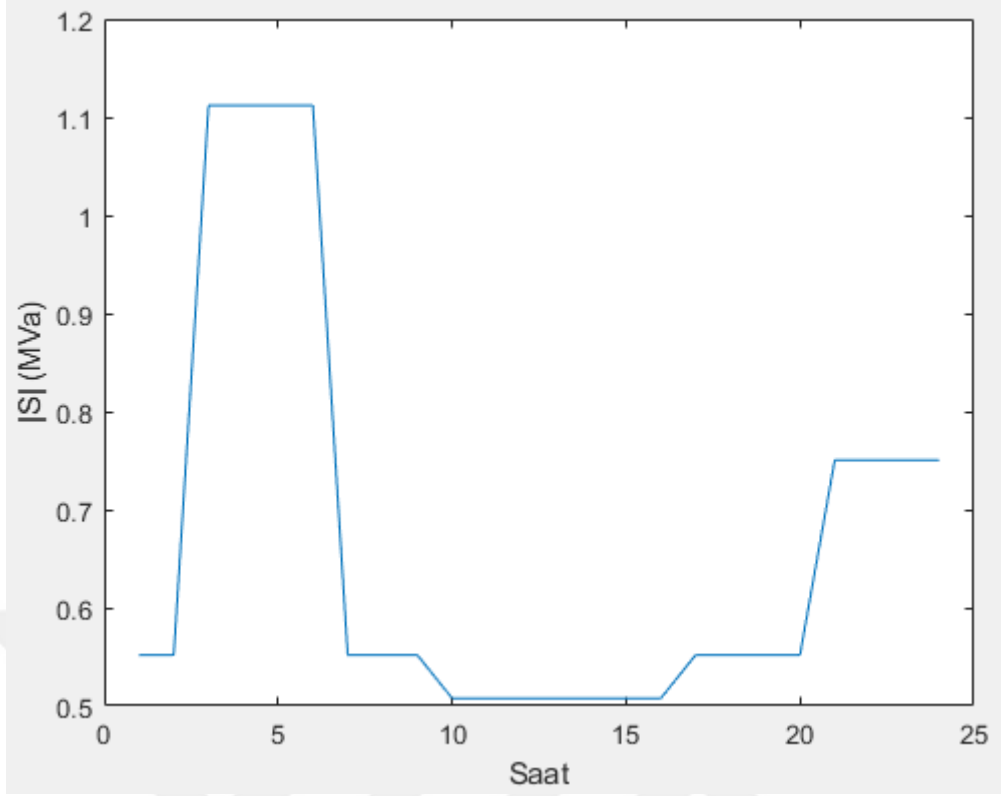
Şekil 4.28: Değişken güç kaynakları-yüklerde baraların kompleks güç değerleri (MVA).



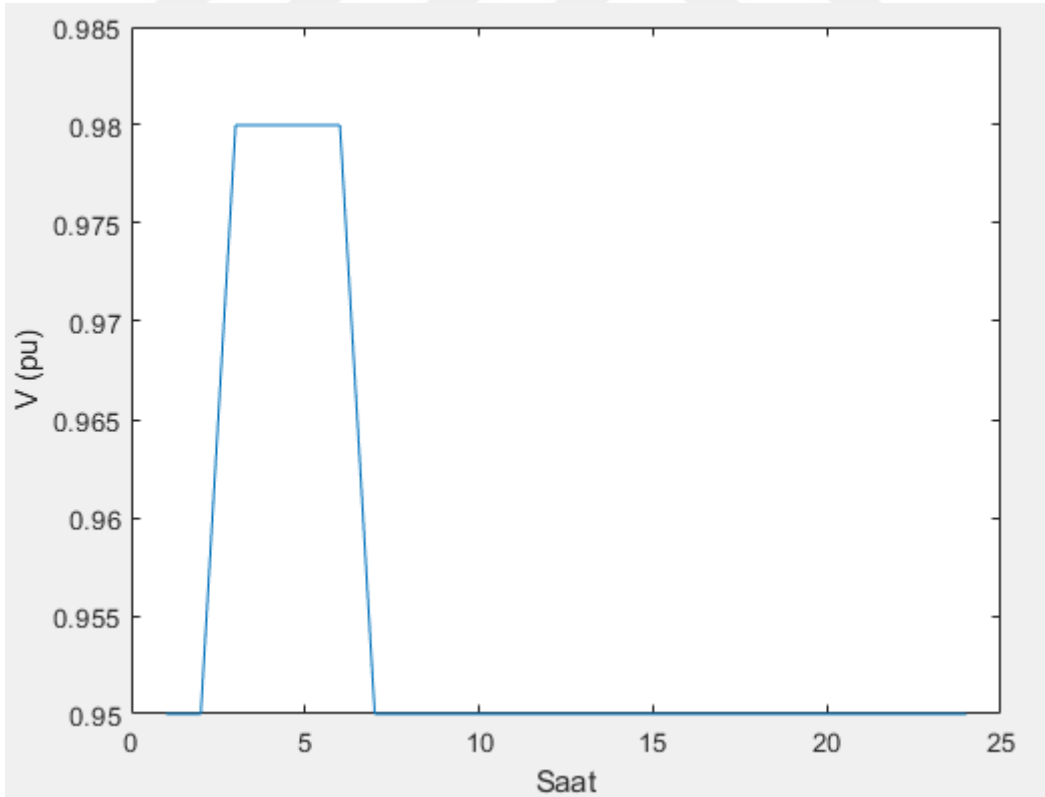
Şekil 4.29: Değişken güç kaynakları-yüklerde bara-3'ün aktif güç değerleri (MW)



Şekil 4.30: Değişken güç kaynakları-yükler için bara-3'ün reaktif güç değerleri (MVar).



Şekil 4.31: Değişken güç kaynakları-yüklerde bara-3'ün kompleks güç değerleri (MVA).



Şekil 4.32: Değişken güç kaynakları-yüklerde bara-3'ün gerilim değerleri (pu).

#### 4.5 Örnek-4: AC/DC 13 Bara Test Sistemi

AC/DC güç sistemlerinde güç akışı için öncelikle DC sistemin AC sistemden çektiği/aktardığı güçlerin bilinmesi gereklidir. Bu güçler ile ilgili baralarda yük güncellemesi yapılır. Newton-Raphson ile AC sisteme ait güç akışı yapılır ve AC sisteme ait durum değişken değerleri elde edilir. Bu değişkenler ile birlikte yapılan hesaplamalar yardımıyla DC sisteme ait durum değişken değerleri hesaplanır. AC/DC sisteme ait kontrol ve durum değişkenleri aşağıda verilmiştir.

$$u = [u_{AC}, u_{DC}] \quad (4.1)$$

$$u_{AC}^T = [P_{G2}, P_{G4}, V_1, V_3, V_8] \quad (4.2)$$

$$u_{DC}^T = [P_{10}^{ac}, Q_{10}^{ac}, P_{11}^{ac}, Q_{11}^{ac}, P_{12}^{ac}, Q_{12}^{ac}, P_{13}^{ac}, Q_{13}^{ac}, M_{10}, M_{11}, M_{12}, M_{13}] \quad (4.3)$$

$$x = [x_{AC}, x_{DC}] \quad (4.4)$$

$$x_{AC}^T = [P_{G1}, V_2, V_7, V_9, V_{10}, V_{11}, V_{12}, V_{13}, Q_{G1}, Q_{G2}, Q_{G4}] \quad (4.5)$$

$$x_{DC}^T = [P_{G3}] \quad (4.6)$$

$$u_{DC}^T = [V_5^{dc}, V_{10}^{dc}, I_{10-12}^{dc}, I_{5-4}^{dc}, I_{5-6}^{dc}] \quad (4.7)$$

Güç akışı analizi adımları aşağıdaki gibidir:

- Başla.
- Kontrol değişkenleri olan  $u_{AC}$  ve  $u_{DC}$ 'nin değerleri belirlenir.
- AC sisteme ait bara admitans matrisi oluşturulur.
- DC sistemin AC sistemden çektiği ve aktardığı güçler hesaplanır.
- İlgili baralarda aşağıdaki eşitlik ile güç güncellemesi yapılır;

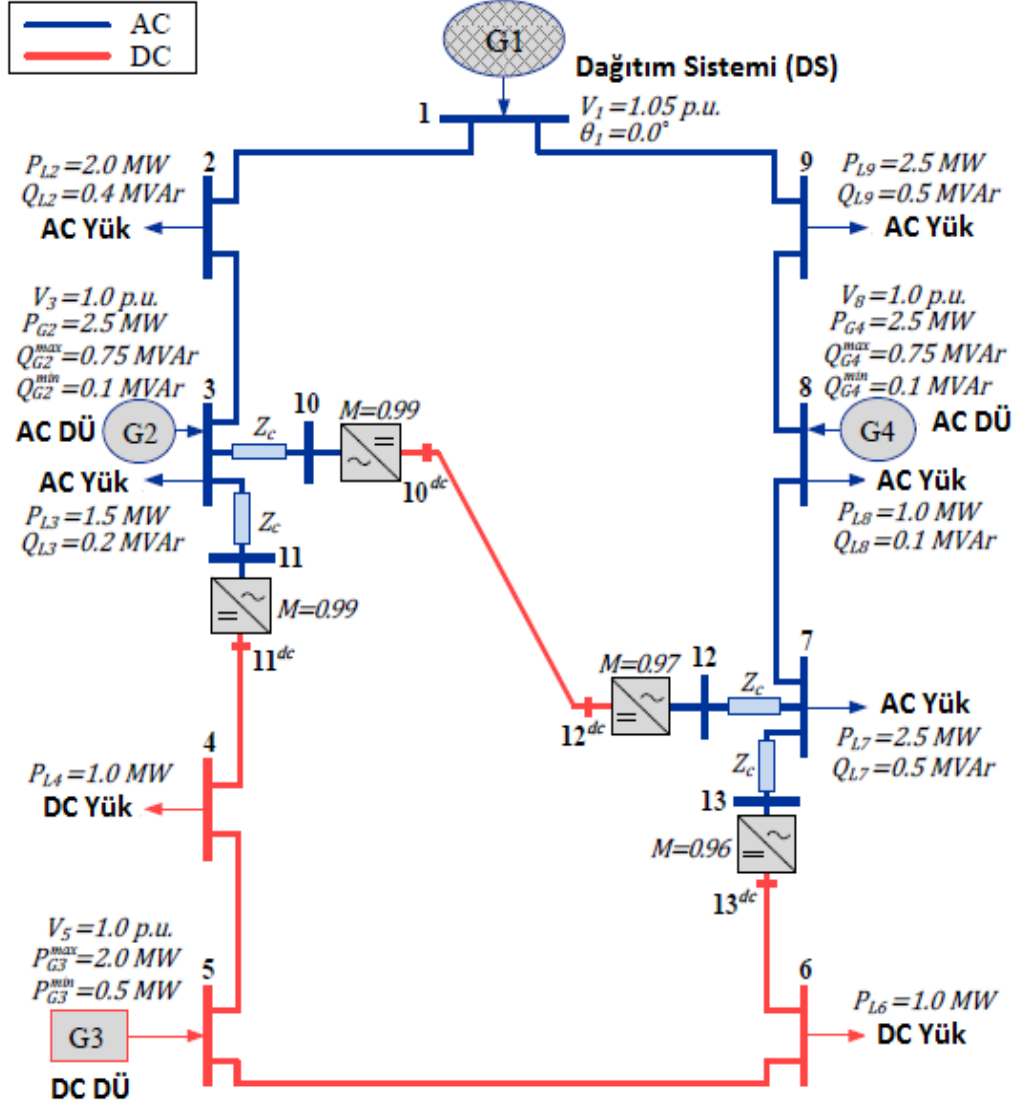
$$P_{li}^{yeni} = P_{li} + P_{di} \quad (4.8)$$

$$Q_{li}^{yeni} = Q_{li} + Q_{di} \quad (4.9)$$

- AC sistemin güç akışı yapılır.
- DC sistemin durum değişkenleri hesaplanır
- Algoritma bitirilir.

Önerilen yaklaşım hibrit 13 baralı AC/DC güç sistemi üzerinde test edilmiştir. Şekil 4.33'de, test sistemi gösterilmiştir [141]. Test sistemine ait hat empedansları Ek.3'de verilmiştir. Şekildeki DÜ kısaltması dağıtık üretimi ifade etmektedir. Tezde gerilim kaynaklı dönüştürücü (VSC) teknolojisinin seçilmesinin ana nedenleri;

- Değişen yük akış durumuna göre iletim hattının çift yönlü kullanılabilmesi,
- Dönüştürücü istasyonlarının yer aldığı bölgelerden kaynaklı olarak gerilim kararlığı için aktif ve reaktif gücü bağımsız olarak kontrol edilebilme yeteneği,
- Daha esnek kontrol edilebilirliktir.



Şekil 4.33: 13 baralı Hibrit AC/DC güç sistemi şeması [141].

**Çizelge 4.1:** Hatlardan aktarılan görünür güç değerleri.

Bara No		LF Model		PSCAD		MATLAB	
Başlangıç	Bitiş	P (MW)	Q (MVA <sub>r</sub> )	P (MW)	Q (MVA <sub>r</sub> )	P (MW)	Q (MVA <sub>r</sub> )
1	2	2.183000	0.573300	2.186000	0.571600	2.182987	0.573194
1	9	2.738000	0.666600	2.737000	0.667000	2.737627	0.666669
2	1	-2.123800	-0.476400	-2.127000	-0.474400	-2.12377	-0.476280
2	3	0.123800	0.076400	0.126900	0.074420	0.123769	0.076278
3	2	-0.122700	-0.074600	-0.125800	-0.072650	-0.12271	-0.07455
3	10	0.656400	0.236500	0.657200	0.238000	0.656406	0.236498
3	11	0.466300	0.163700	0.467600	0.165100	0.466306	0.163676
4	5	-0.545700	-	-0.547900	-	-0.54553	-
4	11 <sup>dc</sup>	-0.454300	-	-0.452100	-	-0.45431	-
5	4	0.547100	-	0.549341	-	0.546956	-
5	6	1.323000	-	1.323260	-	1.320503	-
6	5	-1.314700	-	-1.314900	-	-1.31218	-
6	13 <sup>dc</sup>	0.314700	-	0.314900	-	0.314692	-
7	8	-1.572900	-0.220100	-1.575000	-0.223000	-1.57253	-0.220050
7	12	-0.620000	-0.183800	-0.619200	-0.182600	-0.62035	-0.183940
7	13	-0.307100	-0.096000	-0.306100	-0.094400	-0.30713	-0.096010
8	7	1.645200	0.338500	1.647000	0.341700	1.644792	0.338343
8	9	-0.145200	-0.014700	-0.144300	-0.015090	-0.14479	-0.014730
9	1	-2.645700	-0.515600	-2.645000	-0.516000	-2.64534	-0.515620
9	8	0.145700	0.015600	0.144900	0.015974	0.145335	0.015623
10	3	-0.655000	-0.215300	-0.652000	-0.212000	-0.655	-0.215290
10 <sup>dc</sup>	12 <sup>dc</sup>	0.641900	-	0.641950	-	0.6419	-
11	3	-0.465600	-0.153000	-0.463000	-0.150300	-0.4656	-0.153040
11 <sup>dc</sup>	4	0.456288	-	0.454060	-	0.456288	-
12	7	0.621300	0.204200	0.623600	0.207500	0.6217	0.204343
12 <sup>dc</sup>	10 <sup>dc</sup>	-0.633980	-	-0.634100	-	-0.634	-0.634000
13	7	0.307400	0.101100	0.310600	0.104000	0.30746	0.101057
13 <sup>dc</sup>	6	-0.313670	-	-0.314000	-	-0.31373	-

Sistem içerisinde baz değerleri:  $S_{baz} = 100 \text{ MVA}$ ,  $V_{baz}^{ac} = 4.16 \text{ kV}$  ve  $V_{baz}^{dc} = 6.8 \text{ kV}$  olarak alınmıştır. VSC'lerin verim ve güç faktörleri sırasıyla 0.98 ve 0.95 olarak alınmıştır. Yapılan güç akışı sonucunda, hatlardan aktarılan güçler, baraların gerilim genlik ve açı değerleri ve jeneratörlerin üretim değerleri sırasıyla; çizelge 4.1, çizelge 4.2 ve çizelge 4.3'te verilmiştir. Bu çizelgelerdeki değerlere baktığımızda önerilen Matlab programı ile elde edilen değerlerin diğer analiz programları ile elde edilen değerlere oldukça yakın olduğu dolayısıyla önerilen sistemin güvenilir ve sağlıklı çalıştığı görülmüştür.

**Çizelge 4.2:** Baralara ait gerilim genlik ve açı değerleri.

Bara No	Bara Tipi	LF Model		PSCAD		MATLAB	
		Gerilim		Gerilim		Gerilim	
		Genlik (p.u.)	Açı (derece)	Genlik (p.u.)	Açı (derece)	Genlik (p.u.)	Açı (derece)
1	AC, Salınım	1.0500	0.0000	1.05000	0.0000	1.0500	0.0000
2	AC, PQ bara	1.0130	-2.0627	1.01300	-2.0772	1.01256	-2.07218
3	AC, PV bara	1.0000	-2.4637	1.00000	-2.4637	1.00000	-2.43857
4	DC, Yük bara	0.9970	-	0.99738	-	0.99738	-
5	DC, $V^{da}$ bara	1.0000	-	1.00000	-	1.00000	-
6	DC, Yük bara	0.9940	-	0.99380	-	0.99369	-
7	AC, PQ bara	0.9460	-6.6463	0.94560	-6.6396	0.94558	-6.63976
8	DC, PV bara	1.0000	-2.9794	1.00000	-2.9794	1.00000	-2.98163
9	AC, PQ bara	1.0040	-2.6356	1.00400	-2.6560	1.00434	-2.65664
10	AC, PQ bara	0.9880	-4.0680	0.98780	-4.1068	0.98819	-4.05737
11	AC, PQ bara	0.9920	-3.6096	0.99188	-3.6274	0.99171	-3.58511
12	AC, PQ bara	0.9560	-4.9847	0.95610	-4.9876	0.95636	-4.96073
13	AC, PQ bara	0.9510	-5.7869	0.95080	-5.8398	0.95104	-5.80485



**Çizelge 4.3:** Jeneratörlerin üretim değerleri.

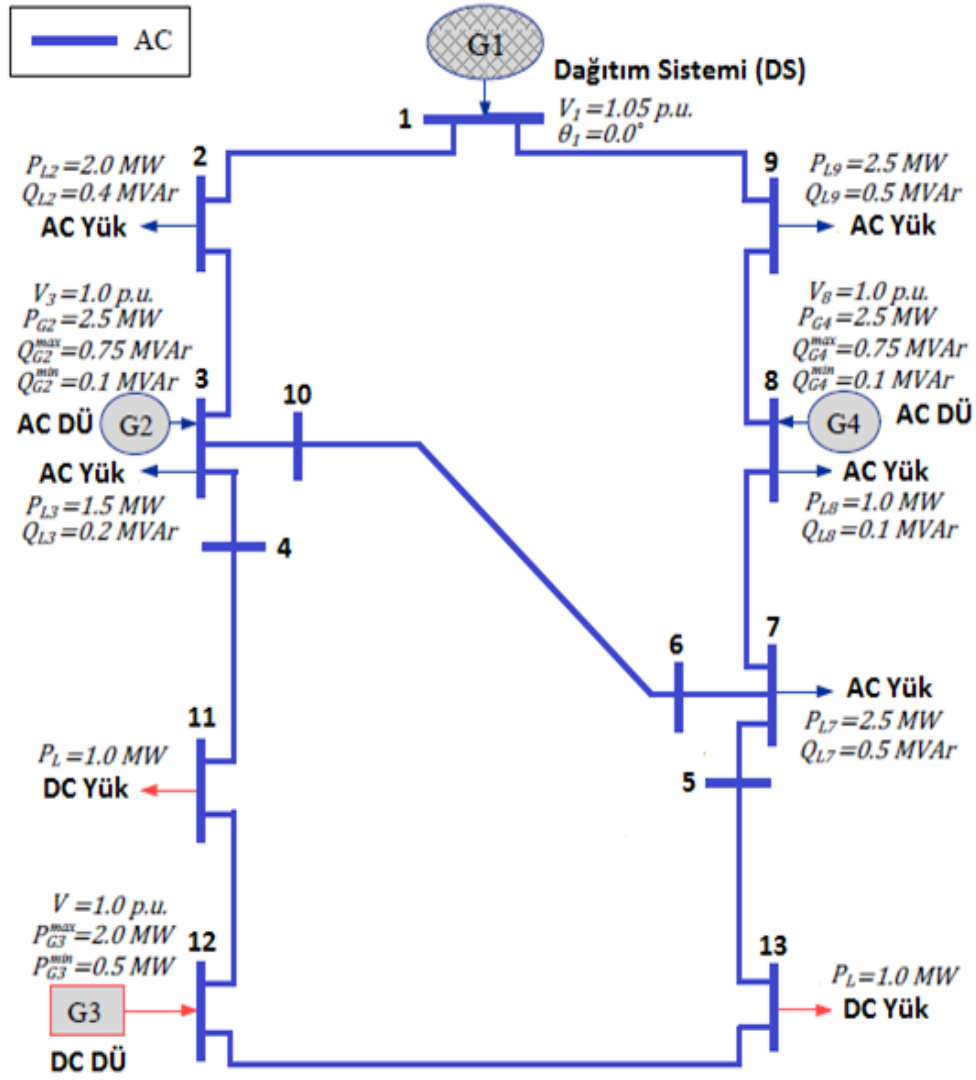
Bara No	Bara Tipi	LF Model		PSCAD		MATLAB	
		Aktif Güç (MW)	Reaktif Güç (MVar)	Aktif Güç (MW)	Reaktif Güç (MVar)	Aktif Güç (MW)	Reaktif Güç (MVar)
1	AC, Salınım	4.9210	1.2399	4.9240	1.2390	4.9206	1.2399
3	AC, PV bara	2.5000	0.5300	2.5000	0.5305	2.5000	0.5256
5	DC, V <sup>dc</sup> bara	1.8701	-	1.8726	-	1.8674	-
8	AC, PV bara	2.5000	0.4238	2.5000	0.4266	2.5000	0.4236

#### 4.6 Örnek-5: AC/DC ve saf AC 13 Bara Sisteminin Karşılaştırması

Bu bölümde daha önceki bölüm şekil 4.33’de belirtilen 13 baralı AC/DC test sistemi şekil 4.34’de belirtilen 13 baralı saf AC test sistemi haline getirilmiştir. Daha sonra bu 13 baralı saf AC test sistemi ve 13 baralı AC/DC test sistemi aktif ve reaktif güç hat kayıpları açısından karşılaştırılmıştır. AC/DC test sistemine ait güç akış değerleri ve hat kayıpları Ek.4 ve Ek.5’de saf AC test sistemine ait güç akış değerleri ve hat kayıpları ise Ek.6’da verilmiştir. Sistemlerde yakınsama tolerans değeri  $10e-8$  alınmıştır. Bu iki sistemin karşılaştırılması Çizelge 4.4’de gösterilmiştir. Karşılaştırma AC/DC sisteminde hatlardaki aktif ve reaktif güç kayıplarının saf AC sistemindeki aktif ve reaktif güç kayıplarından düşük olduğunu göstermiştir. Bu durum hatlardaki kayıplar açısından DC iletimin daha avantajlı olduğunu ortaya koymuştur.

**Çizelge 4.4:** AC/DC sistem ve saf AC test sistemin karşılaştırılması.

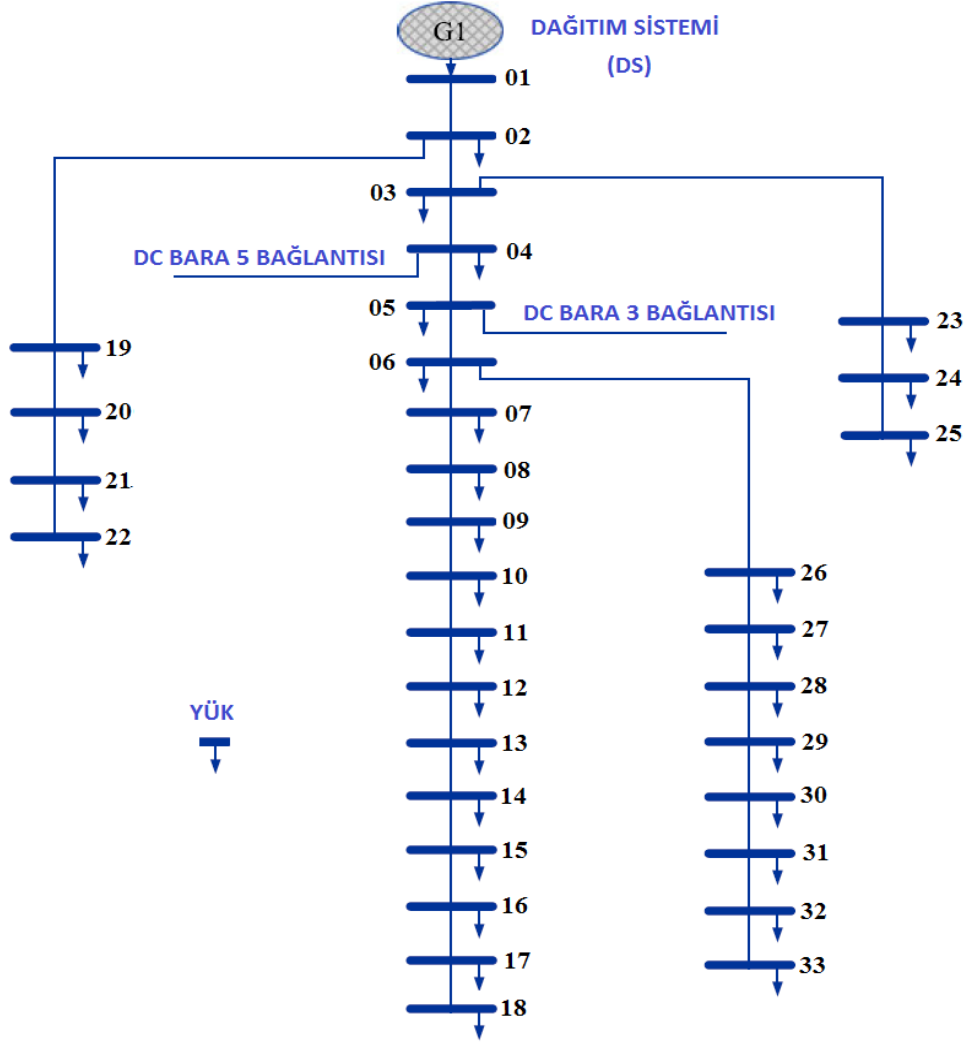
Değerler	Saf AC Sistem	AC/DC Hibrit Sistem
Toplam Hat Kaybı (MW)	0.406	0.232
Toplam Hat Kaybı (MVar)	0.594	0.445
Tolerans Değeri	5.71939e-8	3.00146e-10
İterasyon Sayısı	4	4



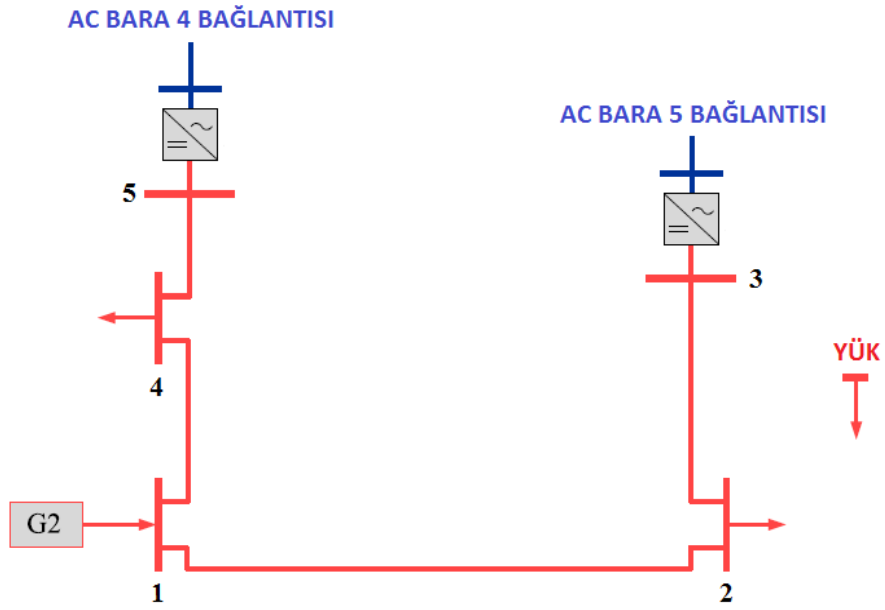
Şekil 4.34: 13 baralı saf AC güç sistem şeması.

#### 4.7 Örnek-6: AC/DC IEEE 33 Bara RDS Test Sistemi

Çalışmamızın bu bölümünde bara sistemi büyütülerek, hibrit IEEE 33 Bara RDS Test Sistemi hazırlanmıştır. Önerilen hibrit AC/DC güç sistemi için per unit cinsinde baz değerleri  $S_{\text{baz}}=1 \text{ MVA}$ ,  $V_{\text{ac,baz}}=12.66 \text{ kV}$  ve  $V_{\text{dc,baz}}=6.8 \text{ kV}$  olarak alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan tüm AC/DC dönüştürücülerin verimliliği ve güç faktörü %95 alınmıştır. Tüm baralarda gerilim sınırları  $V_{\min}=0.9 \text{ p.u.}$  ve  $V_{\max}=1.05 \text{ p.u.}$  arasındadır. IEEE 33 bara RDS test sistemine ve önerilen DC test sistemine ait diğer veriler Ek.7 ve Ek.8’de sunulmuştur. DC test sistem ile bağlanmış AC test sistemi yani IEEE 33 bara RDS test sistemi şekil 4.35’de, DC test sistem ise şekil 4.36’da gösterilmiştir.



Şekil 4.35: Hibrit AC/DC sistemin 33 baralı AC güç şeması.



Şekil 4.36: Hibrit AC/DC sistemin 5 baralı DC güç şeması.

**Çizelge 4.5:** AC şebeke test sisteminin gerilim ve güç değerleri.

Bara No	Newton-Raphson Yöntemi						Gauss-Seidel Yöntemi					
	Gerilim (p.u.)	Açı (derece)	Yük		Jeneratör		Gerilim (p.u.)	Açı (derece)	Yük		Jeneratör	
			MW	MVar	MW	MVar			MW	MVar	MW	MVar
1	1.000	0.000	0.000	0.000	4.254	2.553	1.000	0.000	0.000	0.000	4.194	2.522
2	0.997	0.012	0.100	0.060	0.000	0.000	0.997	0.012	0.100	0.060	0.000	0.000
3	0.981	0.084	0.090	0.040	0.000	0.000	0.982	0.084	0.090	0.040	0.000	0.000
4	0.973	0.142	0.630	0.248	0.000	0.000	0.974	0.142	0.630	0.248	0.000	0.000
5	0.966	0.215	-0.136	-0.034	0.000	0.000	0.967	0.214	-0.136	-0.034	0.000	0.000
6	0.948	0.121	0.060	0.020	0.000	0.000	0.949	0.126	0.060	0.020	0.000	0.000
7	0.944	-0.112	0.200	0.100	0.000	0.000	0.945	-0.099	0.200	0.100	0.000	0.000
8	0.930	-0.266	0.200	0.100	0.000	0.000	0.932	-0.245	0.200	0.100	0.000	0.000
9	0.924	-0.341	0.060	0.020	0.000	0.000	0.926	-0.315	0.060	0.020	0.000	0.000
10	0.918	-0.405	0.060	0.020	0.000	0.000	0.920	-0.375	0.060	0.020	0.000	0.000
11	0.917	-0.398	0.045	0.030	0.000	0.000	0.919	-0.368	0.045	0.030	0.000	0.000
12	0.916	-0.386	0.060	0.035	0.000	0.000	0.918	-0.357	0.060	0.035	0.000	0.000
13	0.910	-0.479	0.060	0.035	0.000	0.000	0.912	-0.449	0.060	0.035	0.000	0.000
14	0.907	-0.560	0.120	0.080	0.000	0.000	0.910	-0.528	0.120	0.080	0.000	0.000
15	0.906	-0.599	0.060	0.010	0.000	0.000	0.908	-0.566	0.060	0.010	0.000	0.000
16	0.905	-0.622	0.060	0.020	0.000	0.000	0.907	-0.589	0.060	0.020	0.000	0.000
17	0.903	-0.702	0.060	0.020	0.000	0.000	0.905	-0.667	0.060	0.020	0.000	0.000
18	0.902	-0.711	0.090	0.040	0.000	0.000	0.904	-0.677	0.090	0.040	0.000	0.000
19	0.996	0.001	0.090	0.040	0.000	0.000	0.996	0.001	0.090	0.040	0.000	0.000
20	0.993	-0.066	0.090	0.040	0.000	0.000	0.993	-0.066	0.090	0.040	0.000	0.000
21	0.992	-0.086	0.090	0.040	0.000	0.000	0.992	-0.086	0.090	0.040	0.000	0.000
22	0.991	-0.106	0.090	0.040	0.000	0.000	0.991	-0.106	0.090	0.040	0.000	0.000
23	0.978	0.053	0.090	0.050	0.000	0.000	0.978	0.053	0.090	0.050	0.000	0.000
24	0.971	-0.036	0.420	0.200	0.000	0.000	0.971	-0.036	0.420	0.200	0.000	0.000
25	0.968	-0.080	0.420	0.200	0.000	0.000	0.968	-0.080	0.420	0.200	0.000	0.000
26	0.946	0.160	0.060	0.025	0.000	0.000	0.947	0.165	0.060	0.025	0.000	0.000
27	0.943	0.217	0.060	0.025	0.000	0.000	0.944	0.221	0.060	0.025	0.000	0.000
28	0.932	0.300	0.060	0.020	0.000	0.000	0.932	0.304	0.060	0.020	0.000	0.000
29	0.924	0.378	0.120	0.070	0.000	0.000	0.925	0.381	0.120	0.070	0.000	0.000
30	0.920	0.484	0.200	0.600	0.000	0.000	0.921	0.486	0.200	0.600	0.000	0.000
31	0.916	0.399	0.150	0.070	0.000	0.000	0.917	0.401	0.150	0.070	0.000	0.000
32	0.915	0.376	0.210	0.100	0.000	0.000	0.916	0.378	0.210	0.100	0.000	0.000
33	0.915	0.368	0.060	0.040	0.000	0.000	0.916	0.371	0.060	0.040	0.000	0.000
Total			4.029	2.403	4.254	2.553	Total		4.029	2.403	4.194	2.522

**Çizelge 4.6:** DC şebeke test sisteminin gerilim ve güç değerleri.

Bara No	Newton-Raphson Yöntemi						Gauss-Seidel Yöntemi					
	Gerilim (p.u.)	Açı (derece)	Yük		Jeneratör		Gerilim (p.u.)	Açı (derece)	Yük		Jeneratör	
			MW	MVar	MW	MVar			MW	MVar	MW	MVar
1	1.000	0.000	0.000	0.000	1.711	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	1.711	0.000
2	0.998	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.998	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
3	1.002	0.000	-0.500	0.000	0.000	0.000	1.002	0.000	-0.500	0.000	0.000	0.000
4	0.994	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.994	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
5	0.992	0.000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.992	0.000	0.200	0.000	0.000	0.000
Total			1700	0.000	1.711	0.000	Total		1700	0.000	1.711	0.000

AC istemi ifade eden çizelge 4.5'e baktığımızda iki yöntemin birbirine yakın, DC istemi ifade eden çizelge 4.6'da ise her iki yöntemin birebir aynı sonuçlar verdiği görülmektedir.

**Çizelge 4.7:** Test sisteminin AC tarafındaki güç akış çözümleri.

Bara No	Bara No	Newton-Raphson Metodu			Gauss-Seidel Metodu		
		MW	MVar	MVA	MW	MVar	MVA
1		4.254	2.553	4.961	4.194	2.522	4.894
	2	4.254	2.553	4.961	4.195	2.522	4.894
2		-0.100	-0.060	0.117	-0.100	-0.060	0.117
	1	-4.239	-2.546	4.945	-4.181	-2.515	4.879
	3	3.778	2.325	4.436	3.721	2.294	4.371
	19	0.361	0.161	0.395	0.361	0.161	0.395
3		-0.090	-0.040	0.098	-0.090	-0.040	0.098
	2	-3.717	-2.294	4.368	-3.661	-2.264	4.305
	4	2.688	1.797	3.233	2.634	1.769	3.173
	23	0.940	0.457	1.045	0.939	0.457	1.045
4		-0.630	-0.248	0.677	-0.630	-0.248	0.677
	3	-2.663	-1.784	3.205	-2.610	-1.756	3.146
	5	2.033	1.536	2.548	1.981	1.510	2.491
5		0.136	0.034	0.140	0.136	0.034	0.140
	4	-2.016	-1.528	2.530	-1.966	-1.502	2.474
	6	2.152	1.562	2.660	2.103	1.537	2.604
6		-0.060	-0.020	0.063	-0.060	-0.020	0.063
	5	-2.114	-1.529	2.609	-2.066	-1.505	2.555
	7	1.103	0.535	1.226	1.070	0.523	1.191
	26	0.951	0.974	1.361	0.942	0.966	1.350
7		-0.200	-0.100	0.224	-0.200	-0.100	0.224
	6	-1.101	-0.529	1.221	-1.068	-0.517	1.187
	8	0.901	0.429	0.998	0.869	0.417	0.964
8		-0.200	-0.100	0.224	-0.200	-0.100	0.224
	7	-0.889	-0.420	0.983	-0.858	-0.409	0.951
	9	0.689	0.320	0.760	0.660	0.310	0.729
9		-0.060	-0.020	0.063	-0.060	-0.020	0.063
	8	-0.685	-0.317	0.754	-0.656	-0.307	0.724
	10	0.625	0.297	0.692	0.597	0.288	0.663
10		-0.060	-0.020	0.063	-0.060	-0.020	0.063
	9	-0.621	-0.295	0.687	-0.594	-0.285	0.659
	11	0.561	0.275	0.625	0.548	0.267	0.610
11		-0.045	-0.030	0.054	-0.045	-0.030	0.054
	10	-0.560	-0.274	0.624	-0.548	-0.267	0.609
	12	0.515	0.244	0.570	0.506	0.237	0.559
12		-0.060	-0.035	0.069	-0.060	-0.035	0.069
	11	-0.514	-0.244	0.569	-0.505	-0.237	0.558
	13	0.454	0.209	0.500	0.445	0.203	0.489
13		-0.060	-0.035	0.069	-0.060	-0.035	0.069
	12	-0.452	-0.207	0.497	-0.442	-0.201	0.485
	14	0.392	0.172	0.428	0.384	0.168	0.419
14		-0.120	-0.080	0.144	-0.120	-0.080	0.144
	13	-0.391	-0.171	0.427	-0.384	-0.167	0.418
	15	0.271	0.091	0.286	0.266	0.088	0.281
15		-0.060	-0.010	0.061	-0.060	-0.010	0.061
	14	-0.271	-0.091	0.285	-0.266	-0.088	0.280
	16	0.211	0.081	0.225	0.208	0.079	0.223
16		-0.060	-0.020	0.063	-0.060	-0.020	0.063
	15	-0.210	-0.080	0.225	-0.208	-0.079	0.223
	17	0.150	0.060	0.162	0.148	0.059	0.160

**Çizelge 4.7:** Test sisteminin AC tarafındaki güç akış çözümleri (devamı).

Bara No	Bara No	Newton-Raphson Metodu			Gauss-Seidel Metodu		
		MW	MVar	MVA	MW	MVar	MVA
17		-0.060	-0.020	0.063	-0.060	-0.020	0.063
	16	-0.150	-0.060	0.162	-0.148	-0.059	0.159
	18	0.090	0.040	0.099	0.091	0.041	0.100
18		-0.090	-0.040	0.098	-0.090	-0.040	0.098
	17	-0.090	-0.040	0.098	-0.091	-0.041	0.100
19		-0.090	-0.040	0.098	-0.090	-0.040	0.098
	2	-0.361	-0.161	0.395	-0.361	-0.161	0.395
	20	0.271	0.121	0.297	0.271	0.121	0.297
20		-0.090	-0.040	0.098	-0.090	-0.040	0.098
	19	-0.270	-0.120	0.296	-0.270	-0.120	0.296
	21	0.180	0.080	0.197	0.180	0.080	0.197
21		-0.090	-0.040	0.098	0.090	-0.040	0.098
	20	-0.180	-0.080	0.197	-0.180	-0.080	0.197
	22	0.090	0.040	0.099	0.090	0.040	0.099
22		-0.090	-0.40	0.098	-0.099	-0.040	0.098
	21	-0.090	-0.040	0.098	-0.090	-0.040	0.099
23		-0.090	-0.050	0.103	-0.090	-0.050	0.103
	3	-0.936	-0.455	1.041	-0.936	-0.455	1.041
	24	0.846	0.405	0.938	0.846	0.405	0.938
24		-0.420	-0.200	0.465	-0.420	-0.200	0.465
	23	-0.841	-0.401	0.932	-0.841	-0.401	0.932
	25	0.421	0.201	0.467	0.421	0.201	0.467
25		-0.420	-0.200	0.465	-0.420	-0.200	0.465
	24	-0.420	-0.200	0.465	-0.420	-0.200	0.465
26		-0.060	-0.025	0.065	-0.060	-0.025	0.065
	6	-0.948	-0.972	1.358	-0.940	-0.965	1.347
	27	0.888	0.947	1.299	0.882	0.941	1.290
27		-0.060	-0.025	0.065	-0.060	-0.025	0.065
	26	-0.885	-0.946	1.295	-0.879	-0.939	1.286
	28	0.825	0.921	1.236	0.819	0.915	1.227
28		-0.060	-0.020	0.063	-0.060	-0.020	0.063
	27	-0.814	-0.911	1.221	-0.807	-0.905	1.213
	29	0.754	0.891	1.167	0.748	0.886	1.159
29		-0.120	-0.070	0.139	-0.120	-0.070	0.139
	28	-0.746	-0.884	1.156	-0.741	-0.897	1.149
	30	0.626	0.814	1.027	0.623	0.810	1.022
30		-0.200	-0.600	0.632	-0.200	-0.600	0.632
	29	-0.622	-0.812	1.023	-0.619	-0.808	1.018
	31	0.422	0.212	0.472	0.419	0.208	0.468
31		-0.150	-0.070	0.166	-0.150	-0.070	0.166
	30	-0.420	-0.210	0.470	-0.418	-0.207	0.466
	32	0.270	0.140	0.304	0.270	0.139	0.304
32		-0.210	-0.100	0.233	-0.210	-0.100	0.233
	31	-0.270	-0.140	0.304	-0.270	-0.139	0.303
	33	0.060	0.040	0.072	0.060	0.041	0.073
33		-0.060	-0.040	0.072	-0.060	-0.040	0.072
	32	-0.060	-0.040	0.072	-0.060	-0.041	0.073

**Çizelge 4.8:** Test sisteminin DC tarafındaki güç akış çözümleri.

Bara No	Bara No	Newton-Raphson Metodu			Gauss-Seidel Metodu		
		MW	MVar	MVA	MW	MVar	MVA
1		1.711	0.000	1.711	1.711	0.000	1.711
	2	0.504	0.000	0.504	0.504	0.000	0.504
	4	1.207	0.000	1.207	1.207	0.000	1.207
2		-1.000	0.000	1.000	-1.000	0.000	1.000
	1	-0.502	0.000	0.502	-0.502	0.000	0.502
	3	-0.498	0.000	0.498	-0.498	0.000	0.498
3		0.500	0.000	0.500	0.500	0.000	0.500
	2	0.500	0.000	0.500	0.500	0.000	0.500
4		-1.000	0.000	1.000	-1.000	0.000	1.000
	1	-1.200	0.000	1.200	-1.200	0.000	1.200
	5	-0.200	0.000	0.200	-0.200	0.000	0.200
5		-0.200	0.000	0.200	-0.200	0.000	0.200

AC sistemi ifade eden çizelge 4.7'ye baktığımızda Newton-Raphson yöntemi ile Gauss-Seidel yönteminin birbirine yakın, DC istemi ifade eden çizelge 4.8'de ise her iki yöntemin birebir aynı sonuçlar verdiği görülmektedir.

**Çizelge 4.9:** Newton-Raphson ve Gauss-Seidel yöntemlerinin karşılaştırılması.

	AC Sistem		DC Sistem	
	Newton-Raphson Metodu	Gauss-Seidel Metodu	Newton-Raphson Metodu	Gauss-Seidel Metodu
Toplam Hat Kaybı (MW)	0.224	0.216	0.011	0.011
Toplam Hat Kaybı (MVar)	0.150	0.145	0.000	0.000
Tolerans Değeri	4.002e-13	0.0224222	1.136e-13	7.199e-9
İterasyon Sayısı	5	301	4	17

Çizelge 4.9’da Hibrit AC/DC IEEE 33 bara RDS test sisteminde güç akış analizini Newton-Raphson metodu ile incelediğimizde AC sistemde 5, DC sistemde 4 iterasyonda sonuçlanmıştır. Aynı sistemi Gauss-Seidel metodu ile incelediğimizde AC sistemde 301, DC sistemde 17 iterasyonda sonuçlanmıştır. Güç akış analizinde tolerans değeri azaldıkça iterasyon sayısı artar. Çizelgedeki iterasyon sayılarına göre Newton-Raphson metodu daha az iterasyonda çözüme gitmiştir. Burada Newton-Raphson metodunun hızlı bir şekilde çözüme gittiğini görmekteyiz. Ayrıca Newton-Raphson metodunun AC ve DC sistemdeki tolerans değeri Gauss-Seidel metodundan düşüktür. Bu durum Newton-Raphson metodunun daha iyi yakınsadığını göstermektedir. Toplam hat kaybı hesaplamalarında sistemin DC kısmında her iki yöntem ile aynı değerleri elde edilmesine rağmen sistemin AC kısmında Newton-Raphson metodunda daha düşük sonuçlar elde edilmiştir.

Başka bir nümerik analiz metodu olan Fast-Decoupled metodu Newton-Raphson metodundaki Jacobian matrisinde ihmaller yapılarak hesaplamaların daha hızlı yapılması esasına dayanmaktadır. Gauss-Seidel ve Newton-Raphson metodu kullanılarak analiz edilen bu çalışmaya ek olarak Fast-Decoupled metodu ile de analiz edilmeye çalışılmıştır. Fakat Newton-Raphson metodundaki Jacobian matrisinde ihmaller nedeniyle Hibrit AC/DC IEEE 33 bara RDS test sisteminde güç akış analizi hesaplaması yapılamamıştır.

#### **4.8 Değerlendirme ve Öneriler**

Elektrik enerjisi yaygın olarak kullanılan, fakat pahalı bir enerji türüdür. Enerji güç sistemleri, sürekli değişen durumlarda çalışan ve lineer olmayan sistemlerdir. Enerji güç sistem planlayıcıları enerji maliyetini azaltma ve tasarruf için her türlü araştırma ve geliştirmeyi yapmak zorundadır. Son yıllarda, ekonomik ve çevresel şartlar, güç sistemlerinin en verimli işletim şartlarında ve işletme noktalarda çalışmayı mecbur kılmıştır. Elektrik enerjisinin üretim aşamasından başlayarak iletim, dağıtım ve tüketim aşamasına kadar tüm aşamalarında verimli, güvenli ve çevre dostu bir enerji yönetimi oluşturma çabası akıllı şebeke kavramını ortaya çıkarmıştır. Hibrit enerji sistemleri ise iki veya daha fazla enerji üretim yöntemini kullanan sistemlerdir. Gelişen teknoloji ile birlikte gittikçe yaygınlaşan bu sistemlerin en büyük avantajı birden fazla üretim yönteminin birlikte kullanılmasıyla sistem devamlılığının ve güvenilirliğinin sağlanmasıdır.

Güç sisteminde güç akışı analizi, güç sistem ağını çözmek için uygulanan sayısal analizi içeren çok kullanışlı bir araçtır. Güç akışı analizi, geçici kararlılık, optimal güç akışı ve olasılık çalışmaları gibi birçok analiz için gereklidir. Güç sistemlerini modellemek ve güç



akışını kontrol etmek, enterkonnekte sistemin güvenilir ve korumalı çalışması için önemlidir. Elektrik güç sistemlerinin güç akışı analizi ile güç faktörünün belirlenmesi, baralardaki gerilimleri arttırmak için sisteme eklenecek kapasitörlerin en uygun yer ve kapasitelerini belirlemek için de gereklidir.

Bu çalışmada öncelikle süreksiz dağıtık üretim ve değişken yük talep durumları altında gün içi güç akışı analizleri gerçekleştirilmiş ve baraların elektriksel parametrelerinin saatlik bazda değişim grafikleri elde edilmiştir. Değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının ve değişken DC yüklerin baralar üzerindeki gerilim, aktif, reaktif ve kompleks güçlere etkisi incelenmiştir. Bu incelemelerde, yenilenebilir dağıtık kaynakların gerilim ve güç seviyesi kararlılığına ciddi bir olumsuz etkisinin olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni, bütün sistemde enerji dengesinin sağlanmasıdır. Enerji dengesi, kayıplar dahil olmak üzere sistemde tüketilen gücün, jeneratörlerden çekilen güce eşit olması halidir. Baraya eklenen dağıtık yenilenebilir kaynak, diğer baralardan bu baraya akan gücü azaltmıştır. Böylece, bara gerilim seviyesinin korunabilmesi sağlanabilmiştir.

Çalışmamızın ana kısmı olan AC/DC güç akış analizi için literatürde daha önce analiz edilmiş olan 13 baralı bir AC/DC test sistemi Matlab programında hazırlanarak analizi yapılmıştır. Böylece AC/DC test sistemi için Matlab programında önerilen sistemin güvenilir olduğu görülmüştür. Devamında ise AC/DC bara test sistemi saf AC sistem haline getirilerek AC/DC sistem ve saf AC sistemi kayıplar yönünden karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak saf AC sistemde hat kayıplarının AC/DC hibrit sisteme göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Çalışmamızın son kısmında ise IEEE 33 bara RDS test sistemine VSC'ler kullanılarak bir DC test sistemi eklenmiş ve Matlab ortamında modellenmiştir. Daha sonra Gauss-Seidel ve Newton-Raphson metotları aracılığıyla farklı tolerans değerlerine göre güç akış hesaplamaları yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur. Yapılan güç akış analizleri neticesinde Newton-Raphson metoduna kıyasla Gauss-Seidel metodunun tolerans değeri çok daha yüksek olmasına rağmen oldukça fazla iterasyon sayısına sahip olduğu ortaya çıkmıştır. AC sistemde Newton-Raphson ve Gauss-Seidel metotlarında baralar arası güç akış hesaplamaları ile hatlardaki aktif ve reaktif güç kaybı değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. DC sistemde ise hiçbir fark oluşmadan bu değerler birbirine eşit elde edilmiştir.

Güç akış analizi için çeşitli örneklere uygulanan ve elde edilen sonuçlara geliştirilen algoritmaların farklı güç sistemi problemlerinin çözümüne başarı ile uygulandığı görülmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre ileride yapılacak olan çalışmalar için aşağıdaki öneriler verilmektedir.

- Gerçek bir şebekenin dinamik analizlerinin alt yapısı oluşturularak, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji sistemlerinin güç akışı incelenebilir.
- Hibrit AC/DC şebekenin modelinin analizi Matlab/Simulink platformunda farklı bara değerleri için gerçekleştirilmesi yapılabilir.
- Newton-Rapson ve Gauss-Seidel analiz yöntemleri değiştirilerek hibrit sistemler için farklı yöntemler elde edilip güç sistemi problemine uygulanabilir.
- Test sistemi büyütülebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Akçin, M., Alagöz, B. B., Keleş, C., Karabiber, A., Kaygusuz, A.** (2013). Dağıtık Kontrol ile Akıllı Şebekelerde Geniş-Alan Yönetimi ve Geleceğe Dönük Projeksiyonlar, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17 (3), 457-470.
- [2] **Tümay, M., Topal, T.** (2015). Akıllı Şebekeler, 17. *Akademik Bilişim Konferansı*, Eskişehir, Türkiye.
- [3] **Gellings, C.** (2011). *Estimating the Costs and Benefits of the Smart Grid*, Eprri Technical Report, USA.
- [4] **Nur A., Kaygusuz A.** (2015). Smart Grids Impact on Carbon Footprint Reduction, 3. *International Istanbul Smart Grid Congress and Fair*, Istanbul, Turkey.
- [5] **Yanıktepe, B., Özalp C., Savrun, M. M., Köroğlu, T., Cebeci, Ç.** (2011). Rüzgar-Güneş Hibrid Güç Sistemi Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Uygulama Örneği, *6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, Turkey.
- [6] **Keyhani, A.** (2013). *Yenilenebilir Enerji Sistemlerinde Akıllı Şebeke Tasarımı*, EMO ve Wiley.
- [7] **Cetin, E., Yilanci, A., Ozturk, H. K., Colak, M., Kasikci, I., Iplikci, S.** (2010). A Micro DC Power Distribution System for a Residential Application Energized by Photovoltaic-Wind/Fuel Cell Hybrid Energy Systems, *Energy & Buildings*, 42 (8), 1344-1352.
- [8] **Chousein, K.** (2006). *KKTC Elektrik Üretim İletim Sisteminde Yük Akışı ve Gelişim Planı* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [9] **Kaygusuz, A., Gul, O., Alagoz, B. B.** (2012). An Analysis for Impacts of Renewable Distributed Generation Conditions on the Load Flow Stability of Electrical Power Systems, *EMO Scientific Journal*, 2 (4), 134-141.
- [10] **Köse, G.** (2010). *Hibrit (Güneş+Rüzgar) Enerji Sisteminden Elektrik Üretimi: Kütahya Örneği* (Yüksek Lisans Tezi). Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- [11] **Mengi, Ö., Altaş, D. H.** (2008). AA ve DA Yüklerini Besleyen PV/Akü Grubunun Matlab/Simulink Ortamında Modellenmesi ve Simülasyonu, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Müh. Sempozyumu*, Bursa.
- [12] **Costa, V. M., Rosa, A. L. S.** (2008). A Comparative Analysis of Different Power Flow Methodologies, *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Latin America, Bogota.
- [13] **Li, Y., Luo, Y., Zhang, B., Mao, C.** (2011). A Modified Newton-Raphson Power Flow Method Considering Wind Power, *Power and Energy Engineering Conference*, China, Wuhan.

- [14] **Dilek, M., Leon, M., Broadwater, F., Lee, R.** (2010). A Robust Multiphase Power Flow for General Distribution Networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, 25 (2), 760-768,
- [15] **Wu, W. C., Zhang, B. M.** (2008). A Three-Phase Power Flow Algorithm For Distribution System Power Flow Based On Loop-Analysis Method, *Electrical Power and Energy Systems*, 30, 8-15.
- [16] **Kamel, M. R., Chaouachi, A., Nagasaka, K.** (2011). Detailed Analysis of Micro-Grid Stability During Islanding Mode Under Different Load Conditions, *Scientific Research Engineering Journal*, 3, 508-516.
- [17] **Liu, X., Wang, P., Loh, P. C.** (2010). A Hybrid AC/DC Micro-Grid, *International Power Engineering Conference*, Singapore.
- [18] **Kumar, Y., Dwivedi, K., Agnihotri, G.** (2009). “Development of Ant Algorithm for Load Flow Analysis, *IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, Seattle, USA.
- [19] **Gajalakshmi, P., Rajesh, S.** (2007). Fuzzy Modeling of Power Flow Solution, *29th International Telecommunications Energy Conference*, Rome, Italy.
- [20] **Roy, P., Chakrabarti, A.** (2012). Genetic Algorithm Based Optimal Power Flow Solution for Determination of Spot Pricing of Generators in Deregulated Electricity Environment of a Developing Country, *Acta Electrotehnica*, 53 (1), 29-34.
- [21] **Harman, Z.** (2010). *Trakya Bölgesi Yük Akışı Analizinin Farklı Yazılımlarla Gerçekleştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- [22] **Kurban, M., Başaran Filik, Ü.** (2007). Türkiye’deki 22 Baralı 380 kv Güç Sisteminin İki Farklı Yöntem Kullanılarak Ekonomik Dağıtım Analizi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 87-95.
- [23] **Abdelaziz, M. M. A., Farag, H. E., El-Saadany, E. F., Abdel-Rady, Y., Mohamed, I.** (2012). A Novel and Generalized Three-Phase Power Flow Algorithm for Islanded Microgrids Using a Newton Trust Region Method, *IEEE Transactions On Power Systems*, 28, 190-201.
- [24] **Eajal, A. A., Abdelwahed, M. A., El-Saadany, E. F., Ponnambalam, K.** (2016). A Unified Approach to the Power Flow Analysis of AC/DC Hybrid Microgrids, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7 (3), 1145 – 1158.
- [25] **Efe, S. B.** (2014). *Mikro Şebekelerde Güç Akış Analizi* (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [26] **Karadöl, İ.** (2017). *Kahramanmaraş Bölgesi için Güneş ve Rüzgâr Enerjisi Hibrid Sisteminin İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi). Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- [27] **Yalçın, F.** (2013). *FACTS Cihazları İçeren AA–DA Sisteminde Optimal Güç Akışı Hesabı* (Doktora Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [28] **Thomson, M., Infield, D. G.** (2007). Network Power-Flow Analysis for a High Penetration of Distributed Generation, *IEEE Transactions On Power Systems*, 22 (3), 1157-1162.

- [29] **Dou, C. X., Liu, B.** (2012). Transient Control for Mmicro-Grid with Multiple Distributed Generations Based on Hybrid System Theory, *Electrical Power and Energy Systems*, 42, 408–417.
- [30] **Lotfi, H., Khodaei, A.** (2017). Hybrid AC/DC Microgrid Planning, *Energy*, 118, 37-46.
- [31] **Allam, M. A., Hamad, A. A., El-Saadany, E. F.** (2017). A Steady-State Analysis Tool for Unbalanced Islanded Hybrid AC/DC Microgrids, *Electric Power Systems Research*, 152, 71–83.
- [32] **Ding, L., Miao, Y.** (2011). Research of Control Strategy of Statcom in AC/DC Hybrid Power System, *Energy Procedia*, 12, 437-442.
- [33] **Chai, R., Zhang, B., Dou, J., Hao, Z., Zheng, T.** (2016). Unified Power Flow Algorithm Based on the NR Method for Hybrid AC/DC Grids Incorporating VSCs, *IEEE Transactions on Power Systems*, 31 (6), 4310-4318.
- [34] **Arboleya, P., Diaz, G., Coto, M.** (2012). Unified AC/DC Power Flow for Traction Systems: A New Concept, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61 (6), 2421-2430.
- [35] **Jimenez, E., Carrizosa, M.J., Benchaib, A., Dammd, G., Lagarrigue, L.** (2016). A New Generalized Power Flow Method for Multi Connected DC Grids, *Electrical Power and Energy Systems*, 74, 329–337.
- [36] **Lin, L., Shuntao, X., Hang, L., Xiu, J.** (2016). Flow Analysis and Calculation of AC/DC Power System Based on MATLAB and PSASP, *28th Chinese Control and Decision Conference*, China.
- [37] **Cintuglu, M. H., Mohammed, O. A.** (2017). Control of a Hybrid AC/DC Microgrid Involving Energy Storage and Pulsed Loads, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53 (1), 567-575.
- [38] **Khorasani, P. G., Joorabian, M., Seifossadat, S. G.** (2017). Smart Grid Realization With Introducing Unified Power Quality Conditioner Integrated With DC Microgrid, *Electric Power Systems Research*, 151, 68–85.
- [39] **Mousavizadeh, M. S., Shariatkhah, M. H., Haghifam, M. R.** (2017). Load Flow Analysis for AC/DC Distribution Systems With Distributed Generations, *Electric Power Components and Systems*, 45 (10), 1057–1067.
- [40] **Blaabjerg, F., Teodorescu, R., Liserre, M., Timbus, A. V.** (2006). Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53 (5), 1398-1409.
- [41] **Overbye, T. J.** (2009). Transmission System Visualization for the Smart Grid, *Power Systems Conference and Exposition*, PSCE '09, IEEE/PES, 15-18 March.
- [42] **Marken, P., Marczewski, J. J., D'Aquila, R., Hassink, P., Roedel, J .H., Bodo, R. L.** (2009). A smart transmission technology that is compatible with the existing and future grid, *Power Systems Conference and Exposition*, PSCE '09. IEEE/PES, 15-18 March.
- [43] **Uzunoglu, M., Erdinc, O.** (2013). *Introduction to Smart Grids*, Nobel Press.
- [44] **Metke, A. R., Ekl, R. L.** (2010). Security technology for smart grid networks, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1(1), 99-107.

- [45] **IEA Council**, (2011). *Technology roadmap smart grids*, International Energy Agency, OECD/IEA.
- [46] **Fadaeenejad, M., Saberian, A. M., Fadaee, M., Radzi, M. A. M.** (2014). The Present and Future of Smart Power Grid in Developing Countries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 828-834.
- [47] **Jiang, Z., Li, F., Qiao, W., Sun, H., Wan, H., Wang, J., Xia, Y., Xu, Z., Zhang, P.** (2009). A vision of smart transmission grids, *Power & Energy Society General Meeting*, PES '09 IEEE, 26-30 July.
- [48] **Sloutweg, H.** (2009). Smart Grids-the Future or Fantasy?, *IET Seminar on Smart Metering*, Londra.
- [49] **Massoud, A., Wollenberg, S.** (2005), Toward a smart grid: power delivery for the 21st century, *IEEE Power and Energy Magazine*, 3, 34-41.
- [50] **Ipakchi, A., Albuyeh, F.** (2009), Grid of the future, *IEEE Power and Energy Magazine*, 7, 52-62.
- [51] **Hauser, C. H., Bakken, D. E., Bose A.** (2005). A Failure to Communicate: Next Generation Communication Requirements, Technologies, and Architecture for the Electric Power Grid, *IEEE Power and Energy Magazine*, 3, 47-55.
- [52] **Santacana, E., Rackliffe, G., Tang, L., Feng, X.** (2010). Getting Smart, *IEEE Power and Energy Magazine*, 8, 41-48.
- [53] **He, H.** (2010). Toward a Smart Grid: Integration of Computational Intelligence Into Power Grid, *The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 1-6 May.
- [54] **Hadjsaid, N., Sabonnadiere, J. C.** (2012). *Smart Grids*, Wiley-ISTE, New Jersey.
- [55] **Borlase, S.** (2013). *Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions*, CRC Press, Pacific Northwest.
- [56] **Momoh, J.** (2012). *Smart Grid: Fundametantals of Design and Analysis*, Wiley-IEEE Press, New Jersey.
- [57] **Farhangi, H.** (2010). The path of the smart grid, *IEEE Power and Energy Magazine*, 8 (1), 18-28.
- [58] **Ali, A. B.** (2013). *Smart Grids Opportunities, Developments, and Trends*, Springer-Verlag, London.
- [59] **Mert, D.** (2016). *Akıllı Şebekelerde Mahremiyet Korunmalı Veri Toplama Protokolü*, (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [60] **Baloğlu, U. B.** (2017). *Akıllı Şebekelerde Hesapsal Yöntem Uygulamaları*, (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [61] **Carvallo, A., Cooper, J.** (2011). *The Advanced Smart Grid: Edge Power Driving Sustainability*, Artech House, Massachusetts.
- [62] **Fang X., Misra S., Xue G., Yang D.** (2012). Smart grid-The new and improved power grid, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14 (4), 944-980.
- [63] **NIST Council**, (2014). *NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards*, Release 3.0.

- [64] **European Commission**, (2005). *Towards Smart Power Networks*, European Commission Directorate-General for Research Information and Communication Unit, Brussels.
- [65] **European Commission**, (2006). *European Smart Grids Technology Platform*, European Commission Directorate-General for Research Information and Communication Unit, Brussels.
- [66] **Demirkol, Ö. F.** (2014). Akıllı Şebekelerin Gerekliliği ve Dünyada Uygulamaları, Rapor, İstanbul, Türkiye.
- [67] **Catalin F., Covrig, M. A.** (2015). *Smart Grid Projects Outlook*, European Commission.
- [68] **Yigit, M.** (2016). Natural Hub: The Main Priority is the Promotion of East-West and North-South Energy Corridors Through the Delivery of Caspian Middle Eastern and Central, *Asian energy resources to European and World markets via Turkey*, 40, 28-39.
- [69] **Kaygusuz, A.** (2016). Yeni Türkiye'nin Enerjide Çözüm Yolu: Akıllı şebeke, *Yeni Türkiye Dergisi Bilim ve Teknoloji Özel Sayısı-II*, 89 (2), 622-630.
- [70] **Colak, I., Sagiroglu, S., Fulli, G., Yesilbudak, M., Covrig, C. F.** (2016). A Survey on the Critical Issues in Smart Grid Technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 396-405.
- [71] **Zhou T., Kang, C., Chen, X., Wu, Y., Xin, J.** (2012). Evaluating Low-Carbon Effects of Demand Response from Smart Distribution Grid, *3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, Germany.
- [72] **Pratt, R. G., Balducci, P. J., Gerkenmeyer, C., Katipamula, S., Kintner-Meyer, M. C. W., Sanquist, T. F., Schneider, K. P., Secret T. J.** (2010). *The Smart Grid: An Estimation of the Energy and CO2 Benefits*, (No. PNNL-19112), USA.
- [73] **Berke, M. Ö., Wilshire, M., Hoberg, J., Orlandi, I., Boyle, H.** (2014). *Türkiye'nin Yenilenebilir Gücü*, (No. 978-605-9903-01-1), İstanbul.
- [74] **Kurtul, A. M. F. Zeyveli, M. F.** (2017). *Informatics Innovation Association*, Report, Turkey.
- [75] **Hekim, H., Başbüyük, O.** (2013). Cyber Crimes and Turkey's Cyber Security Policies, *Journal of International Security and Terrorism*, 4 (2), 135-138.
- [76] **Ünver, M., Canbay, C.** (2010). Ulusal ve Uluslararası Boyutlarıyla Siber Güvenlik, *Journal of Electrical Engineering*, 4, 94-103.
- [77] **Akçin, M., Kaygusuz, A., Keleş, C., Karabiber, A., Alagöz B. B.** (2013). Akıllı Şebekelerde Kontrol ve Haberleşme: Günümüzden Geleceğe Fırsatlar, *Automatic Control National Meeting*, Turkey.
- [78] **Rech, D., Harth, A.** (2012). Towards a Decentralised Hierarchical Architecture for Smart Grids, *EDBT/ICDT 2012 Joint Conference*, Germany.
- [79] **Fan, W., Jain, R.** (2014). *Security of State Estimation in the Smart Grid*, Network Security Report, Washington.

- [80] **Ericsson, G. N.** (2010). Cyber Security and Power System Communication-Essential Parts of a Smart Grid Infrastructure, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25 (3), 1501-1507.
- [81] **Henkoğlu, T., Yılmaz, B.** (2013). European Union Information Security Policies, *Turkish Librarianship*, 27 (3), 451-471.
- [82] **Wang, W., Lu, Z.** (2013). Cyber security in the Smart Grid: Survey and Challenges, *Journal of Computer Networks*, 57, 1344-1371.
- [83] **Kothari, D. P., Nagrath, I. J.** (2009). *Modern Power System Analysis*, McGraw-Hill Press.
- [84] **Berry, F. C., Sauser, S. L.** (2003). The Future of Electrical and Computer Engineering Education, *IEEE Transactions on Education*, 45 (5), 467-476.
- [85] **Oliveria, A. R. L., Soares, S.** (2003). Optimal Active Power Dispatch Combining Network Flow and Interior Point Approaches, *IEEE Transactions on Power Systems*, 18 (4), 1235-1240.
- [86] **Acha, E., Agelidis, V., Anaya, O., Miller, T. J. E.** (2002). *Power Electronic Control in Electrical Systems*, Oxford: Newnes.
- [87] **Lopes J. A., Moreira C. L., Madureira, A. G.** (2006). Defining Control Strategies for Microgrids Islanded Operation, *IEEE Trans. On Power Systems*, 21 (2), 916-924.
- [88] **Ramasamy, N.** (2002). *Computer-Aided Power System Analysis*, Marcel Dekker, Inc., New York.
- [89] **Çakır, H.** (1986). *Elektrik Güç Sistemleri Analizi*, Y.T.Ü. Mühendislik Fakültesi, İstanbul.
- [90] **Kundur, P.** (1994). *Power system Stability and Control*, Mc. Graw-Hill Press.
- [91] **Glover, J. D., Sarma, M. S., Overbye T. J.** (2012). *Power System Analysis and Design*, Cengage Learning Press.
- [92] **Efe S. B., Cebeci M., Erdogan H., Ozturkmen G.** (2015). A Novel Approach to Power Flow Analysis for Grid Connected Micro Grid, *International Conference on Engineering of Modern Electric Systems*, Oradea.
- [93] **Madrigal, M., Ponnambalam, K., Quintana, V. H.** (1998). Probabilistic optimal power flow, *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 1, 385-388.
- [94] **Kılıç, U., Ayan, K.** (2013). Optimizing Power Flow of AC-DC Power Systems Using Artificial Bee Colony Algorithm, *Electrical Power and Energy Systems*, 53, 592-602.
- [95] **Grigsby, L. L.** (2012). *Electric Power Generation, Transmission and Disturbution*, CRC Press.
- [96] **Gautam, L. K., Mishra, M., Bisht, T.** (2015). A Methodology for Power Flow & Voltage Stability Analysis, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 18 (4), 321–326.
- [97] **Ali, W. H., Cofie, P., Fuller, J.** (2015). Analysis of the Load Flow Problem in Power System Planning Studies, *Energy and Power Engineering*, 7, 509-523.



- [98] **Yeşilbudak, M., Ermiş, S., Bayındır, R.** (2017). Comparison of Load Flow Analysis Methods in Power Systems With Different Number of Buses, *Gazi University Journal of Science, Part C*, 5 (3), 237-246.
- [99] **Firuzabad, M. F., Aminifar, F., Safdarian, A.** (2015). A Novel Efficient Model for the Power Flow Analysis of Power Systems, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 23, 17-27.
- [100] **Dutto, S., Masetti, G., Chiaradonna, S., Giandomenico, F. D.** (2019). On Extending and Comparing Newton Raphson Variants for Solving Power-Flow Equations, *IEEE Transactions on Power systems*, 34 (4), 2577-2587.
- [101] **Jankovic, S., Ivanovic, B.** (2015). Application of Combined Newton Raphson Method to Large Load Flow Models, *Electric Power Systems Research*, 127, 134-140.
- [102] **Kulworawanichpong, T.** (2010). Simplified Newton Raphson Power Flow Solution Method, *Electrical Power and Energy Systems*, 32, 551-558.
- [103] **Nazari, A. A., Keypour, R. Beiranvand, M. H., Amjady, N.** (2020). A Decoupled Extended Power Flow Analysis Based on Newton Raphson Method for Islanded Microgrids, *Electrical Power and Energy Systems*, 117, 105-112.
- [104] **Abur, A.** (2013). Akıllı şebekeler: Yeni uygulamalar ve ileriye dönük düşünceler, *Akıllı Şebekeler ve Türkiye Elektrik Şebekesinin Geleceği Sempozyumu*, Ankara, Türkiye.
- [105] **Değirmenci, F.** (2009). Avrupa Birliği Enerji Politikalarındaki Gelişmeler ve Türkiye Açılımları, *11. Enerji Kongresi*, İzmir, 21-23 Ekim.
- [106] **Farret, F. A., Simoes M. G.** (2006). *Integration of Alternative Sources of Energy*, IEEE Press, Wiley.
- [107] **Bull, S. R.** (2001). Renewable Energy Today and Tomorrow, *Proceedings of IEEE*, 89, 1216-1221.
- [108] **Deshmukh, M. K., Deshmukh, S. S.** (2008). Modeling of Hybrid Renewable Energy Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 235-249.
- [109] **Ülgen, K., Eke, R. Kara, O.** (2005). Optimization of a Wind/Pv Hybrid Power Generation System, *International Journal of Green Energy*, 2, 57-63.
- [110] **T. Gülersoy, M. Engin,** (2012). PV-Wind Hybrid Power System Performance Simulation and Sizing, *6.th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, İzmir, 28-30 June.
- [111] **Pereira, A. L.** (2000). *Modular Supervisory Controller for Hybrid Power Systems*, Riso-R-1202(EN), Riso National Laboratory, Roskilde.
- [112] **Sreedher, R. G.** (2005). *Modeling and Power Management of A Hybrid Wind-Microturbine Power Generation System* (Master of Science). Montana State University, Bozeman, Montana.
- [113] **Eduard, M., Edward M. H.** (2002). Power Quality Issues in a Hybrid Power System, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38 (3), 803-809.
- [114] **Masters, G. M.** (2004). *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Wiley-Interscience.

- [115] **Blaabjerg, F., Chen, Z.** (2006). *Power Electronics for Modern Wind Turbines*, Morgan & Claypool Publishers.
- [116] **Blanchi, F. D., Battista H. D., Mantz, R. J.** (2007). *Wind Turbine Control Systems*, Springer.
- [117] **Pamuk, N.** (2009). *380 ve 154 KV'luk Kuzeybatı Anadolu Şebekesi Güç Akışı Benzetimleri* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [118] **Dennya, E., O'Mahoney A., Lannoyec E.** (2017). Modelling the Impact of Wind Generation on Electricity Market Prices in Ireland: An Econometric Versus Unit Commitment Approach, *Renewable Energy*, 104, 109-119.
- [119] **Hau, E.** (2006). *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*, (2nd ed.) Springer.
- [120] **Erduman, A., Kılıçkiran, H.C., Kekezoglu, B., Durusu, A., Tanrıöven, M.** (2013). Wind Turbine Effects on Power System Voltage Fluctuation, 3th *International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems*, Istanbul. 3-4 October.
- [121] **Abdelhalim, H., Farid, A. M., Adegbege, A. A., Rouco, L., Youcef-Toumi, K.** (2013). Small-Signal Stability Effects of Turbine Governors on Power Systems with High Penetrations of Integrated Wind Power, *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) IEEE PES*, Washington, DC, USA, 24-27 February.
- [122] **Muljadi E., Butterfield C. P., Chacon, J., Romanowitz H.** (2006). Power Quality Aspects in a Wind Power Plant, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Canada.
- [123] **Bansal, R. C., Bhatti, T. S., Kothari D. P.** (2002). On Some of the Design Aspects of Wind Energy Conversion Systems, *Pergomon, Energy Conversion and Management*, 43, 2175–2187.
- [124] **Manwell J. F., Morgan J. G., Rogers A. L.** (2002). *Wind Energy Explained Theory, Design and Application*, Wiley.
- [125] **A. Nur, A. Buğutekin,** (2017). Economic Evaluation of Solar Photovoltaic Systems For A Smart Home, *International Conference on Advanced Technology & Sciences*, Istanbul, Turkey.
- [126] **Cengiz, M. S., Mamiş, M. S.** (2015). Price Efficiency Relationship for Photovoltaic Systems on a Global Basis, *International Journal of Photoenergy*, 1, 1-12.
- [127] **Dinçer, F.** (2011). Potential of Electricity Production of Solar Energy in Turkey and Economical Analysis with Comparative Evaluation According to the European Union Countries, *KSU Journal of Engineering Sciences*, 14 (1), 8-17.
- [128] **Mohtasham, J.** (2015). Review Article-Renewable Energies, *Energy Procedia*, 74, 1289-1297.
- [129] **Kılıç, F. C.** (2011). Recent Renewable Energy Developments, Studies, Incentives in Turkey, *Energy Education Science and Technology*, 28 (1), 37-54.

- [130] **Karagöl, E. T., Kavaz, İ.** (2017). Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji, *Seta Magazine*, Issue 197.
- [131] **Alkan, B. U.** (2015). *Hidroelektrik Santrallerinin Değerlemesi Üzerine Model Önerisi* (Yüksek Lisans Tezi). Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- [132] **Koçak, M. E.** (2011). *Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Hidroelektrik Santraller ve Sırakonaklar HES Projesi* (Yüksek Lisans Tezi). Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [133] **Sağır, H.** (2012). *Su-Enerji-Çevre İlişkileri Bağlamında Hidroelektrik Santrallerinin (HES) Ekolojik ve Ekonomik Etkileri: Doğu Karadeniz Bölgesi Hidroelektrik Santralleri Araştırması* (Doktora Tezi). Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya.
- [134] **Şekkeli, M., Keçecioglu, Ö. F.** (2011). Hidroelektrik Santrallerin Türkiye’deki Gelişimi ve Kahramanmaraş Bölgesi Örnek Çalışması, *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14 (2), 19-26.
- [135] **Polat, S.**, (2010). *Dört Zamanlı, Tek Silindirli, Değişken Sıkıştırma Oranlı Bir Dizel Motorunun Bilgisayar Yardımı ile Teorik Simülasyonu ve Performans Analizi*, (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [136] **Austen, A. E. W., Lyn, W. T.** (1992). *Study of Burning Rate and Nature of Combustion in Diesel Engines*, In Proceedings of Ninth International Symposium on Combustion.
- [137] **Basshuysen R., Schafer F.** (1990). *A Two-Stroke Diesel Engine Simulation Program*, National Aeronautics and Space Administration(NASA) AVSCOM Technical Report88-C-024, DAAL03-86-D-001, Iowa State University Engine Research Institute, Ames, Iowa.
- [138] **Akshminarayanan, P. A., Aghav, Y. V.** (2010). *Modelling Diesel Combustion*, Mechanical Engineering Series, Indian.
- [139] **Gabriele, S. H.** (1998). *Optimization of Hybrid Energy Systems Sizing and Operation Control* (PhD.Thesis). University of Kassel, Germany.
- [140] **Ibrahim, H., Ilinca, A., Perron, J.** (2008). *Energy Storage Systems-Characteristics and Comparisons*, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [130] **Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A. and Efthimiou, V.** (2009). Overview of Current and Future Energy Storage Technologies for Electric Power Applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [131] **Nair, N. K. C., Garimella, N.** (2010). Battery Energy Storage Systems: Assessment for Small-Scale Renewable Energy Integration, *Energy and Buildings*, 42 (11), 2124-2130.
- [132] **Kocaman, B.** (2015). *Yenilenebilir Enerji Kaynaklı Mikro Şebekelerde Enerji Yönetimi* (Doktora Tezi). Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [133] **Katirae, F, Iravani R, Hatziargyriou N, Dimeas A.** (2008). Microgrids Management: Controls and Operation Aspects of Microgrids. *IEEE Power Energy Magazine*, 6 (3), 54-65.

- [134] **Kocaman, B.** (2014). A Case of Energy Management Application for Microgrids. *BEU Journal of Science*, 3 (1), 35-52.
- [135] **Haziargy, N.** (2014). *Microgrids: Architecture and Control*, Wiley-IEEE Press.
- [136] **Haytham, M. A.** (2017). *Optimal Planning and Operation of AC-DC Hybrid Distribution Systems* (PhD Thesis). Waterloo, Ontario, Canada.
- [137] **Tamilselvan, V., Jayabarathi T., Raghunathan T., Yang X.** (2008). Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Systems Using Flower Pollination Algorithm, *Alexandria Engineering Journal*, 57, 2775–2786.
- [138] **Wilson, A.V., Franklin, L. Q.** (2016). Load Flow Method for Radial Distribution Systems with Distributed Generation Using a Dynamic Data Matrix, *IEEE Technical Chapters Meeting*, Ecuador.
- [139] **Nigim, A. K., Lee, W. J.** (2007). Microgrid Integration Opportunities and Challenges. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, USA, June.
- [140] **Mutlu, M. A.** (2017). *Microgrid Protection Against Ground Faults* (MSc. Thesis), Istanbul.
- [141] **Haytham, M. A., Ayman, B. E., Salama, M. M. A.** (2018). A Generalized Approach to the Load Flow Analysis of Ac–Dc Hybrid Distribution Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 33 (2), 2117-2127.
- [142] **Arifoğlu, U.** (2003). The Power Flow Algorithm For Balanced and Unbalanced Bipolar Multiterminal Ac/Dc Systems, *Electric Power Systems Research*, 64 (3), 239-246.
- [143] **Arifoğlu, U.** (1999). Load Flow Based on Newton’s Method Using Norton Equivalent Circuit for an AC-DC Multiterminal System, *European Transactions on Electrical Power*, 9 (3), 167-174.
- [144] **Yalçın, F., Arifoğlu, U.** (2013). A New Approach Based on Genetic Algorithm for Optimal Reactive Power Flow Solution in Multi-terminal AC-DC systems, *Przeglad Elektrotechniczny*, 89 (3), 231-235.
- [145] **Pai, M. A., Padiya, K. R., Radhakrishna, C.** (1991). Transient Stability Analysis of Multi Machine AC/DC Power Systems Via Energy Function Method, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 100 (12), 5027-5035.
- [146] **Kılıç, U.** (2013). *AA-DA Sistemlerinde Yapay Arı Koloni Algoritması ile Geçici Hal Kararlılık Kısıtlamalı Optimal Güç Akışı* (Doktora Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [147] **Saadat, H.** (1999). *Power System Analysis*, Mc Graw-Hill Press.

## EKLER

**Ek.1:** Hibrit 13 baralı saf AC güç sisteminin empedansları.

Başlangıç Bara	Bitiş Bara	Direnç ( $\Omega$ )	Reaktans ( $\Omega$ )
1	2	0.2218	0.3630
1	9	0.2218	0.3630
2	3	0.8870	1.4520
3	10	0.0500	0.7540
3	4	0.0500	0.7540
4	11	0.4415	0
5	13	0.4415	0
6	10	0.8830	0.8830
7	18	0.4435	0.7260
7	6	0.0500	0.7540
7	5	0.0500	0.7540
8	9	0.4435	0.7260
11	12	0.2208	0
12	13	0.2208	0

**Ek.2:** Bara 1 için 24 saatlik gerilim, aktif, reaktif ve kompleks güç değerleri.

Saat	Gerilim Değeri (pu)	Aktif Güç (MW)	Reaktif Güç (MVar)	Kompleks Güç (MVA)	Saat	Gerilim Değeri (pu)	Aktif Güç (MW)	Reaktif Güç (MVar)	Kompleks Güç (MVA)
1	1.05	4.514	1.644	4.804	13	1.05	4.783	1.708	5.078
2	1.05	4.514	1.644	4.804	14	1.05	4.783	1.708	5.078
3	1.05	4.010	1.430	4.257	15	1.05	4.783	1.708	5.078
4	1.05	4.010	1.430	4.257	16	1.05	4.783	1.708	5.078
5	1.05	4.010	1.430	4.257	17	1.05	4.514	1.644	4.804
6	1.05	4.010	1.430	4.257	18	1.05	4.514	1.644	4.804
7	1.05	4.514	1.644	4.804	19	1.05	4.514	1.644	4.804
8	1.05	4.514	1.644	4.804	20	1.05	4.514	1.644	4.804
9	1.05	4.514	1.644	4.804	21	1.05	4.250	1.679	4.569
10	1.05	4.783	1.708	5.078	22	1.05	4.250	1.679	4.569
11	1.05	4.783	1.708	5.078	23	1.05	4.250	1.679	4.569
12	1.05	4.783	1.708	5.078	24	1.05	4.250	1.679	4.569

**Ek.3:** Hibrit 13 baralı AC/DC güç sisteminin empedansları.

Başlangıç Bara	Bitiş Bara	Direnç (Ω)	Reaktans (Ω)	Başlangıç barası	Bitiş barası	Direnç (Ω)	Reaktans (Ω)
1	2	0.2218	0.3630	5	6	0.2208*	-
1	9	0.2218	0.3630	6	13	0.4415*	-
2	3	0.8870	1.4520	7	8	0.4435	0.7260
3	10	0.0500	0.7540	7	12	0.0500	0.7540
3	11	0.0500	0.7540	7	13	0.0500	0.7540
4	5	0.2208*	-	8	9	0.4435	0.7260
4	11	0.4415*	-	10	12	0.8830*	-

\* DC dirençleri

**Ek.4:** Hibrit 13 baralı AC/DC güç sisteminin DC sistem güç akışı değerleri.

Line Flow and Losses						
--Line--	Power at bus & line flow			--Line loss--		
from to	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	
1	2.052	-0.000	2.052			
	2	1.319	1.319	0.008	0.000	
	4	0.733	0.733	0.002	-0.000	
2	-1.000	0.000	1.000			
	1	-1.311	1.311	0.008	0.000	
	3	0.311	0.311	0.001	0.000	
3	-0.310	0.000	0.310			
	2	-0.310	0.310	0.001	0.000	
4	-1.000	0.000	1.000			
	1	-0.731	0.731	0.002	-0.000	
	5	-0.269	0.269	0.001	0.000	
5	0.270	0.000	0.270			
	4	0.270	0.270	0.001	0.000	
Total loss				0.012	0.000	

**Ek.5:** Hibrit 13 baralı AC/DC güç sisteminin AC sistem güç akışı değerleri.

Line Flow and Losses						
--Line--		Power at bus & line flow			--Line loss--	
from	to	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar
1		5.217	0.630	5.255		
	2	2.412	0.459	2.455	0.069	0.112
	9	2.805	0.172	2.810	0.090	0.147
2		-2.000	-0.400	2.040		
	1	-2.343	-0.346	2.369	0.069	0.112
	3	0.343	-0.054	0.347	0.006	0.010
3		0.925	0.528	1.066		
	2	-0.337	0.064	0.343	0.006	0.010
	10	0.987	0.371	1.054	0.003	0.047
	4	0.276	0.094	0.291	0.000	0.004
4		-0.275	-0.091	0.290		
	3	-0.275	-0.091	0.290	0.000	0.004
5		0.304	0.100	0.320		
	7	0.304	0.100	0.320	0.000	0.004
6		0.929	0.305	0.978		
	7	0.929	0.305	0.978	0.003	0.041
7		-2.500	-0.500	2.550		
	8	-1.270	-0.140	1.278	0.042	0.069
	6	-0.926	-0.265	0.963	0.003	0.041
	5	-0.303	-0.095	0.318	0.000	0.004
8		1.104	0.695	1.305		
	7	1.312	0.208	1.329	0.042	0.069
	9	-0.208	0.486	0.529	0.007	0.011
9		-2.500	-0.500	2.550		
	1	-2.715	-0.024	2.715	0.090	0.147
	8	0.215	-0.476	0.522	0.007	0.011
10		-0.984	-0.323	1.036		
	3	-0.984	-0.323	1.036	0.003	0.047
Total loss					0.220	0.445

**Ek.6: 13 baralı saf AC güç sisteminin güç akışı değerleri.**

Line Flow and Losses						
--Line--		Power at bus & line flow			--Line loss--	
from	to	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar
1		4.027	1.303	4.233		
	2	1.876	0.595	1.968	0.078	0.127
	9	2.151	0.708	2.265	0.103	0.169
2		-2.000	-0.400	2.040		
	1	-1.798	-0.468	1.858	0.078	0.127
	3	-0.202	0.068	0.213	0.004	0.007
3		1.000	0.973	1.395		
	2	0.206	-0.061	0.215	0.004	0.007
	10	0.624	0.464	0.778	0.003	0.046
	4	0.169	0.570	0.595	0.002	0.027
4		-0.466	-0.153	0.490		
	3	-0.168	-0.543	0.569	0.002	0.027
	11	-0.298	0.390	0.491	0.012	0.000
5		0.307	0.101	0.324		
	13	-0.631	0.128	0.644	0.021	0.000
	7	0.938	-0.027	0.939	0.005	0.076
6		0.621	0.204	0.654		
	10	0.038	-0.203	0.206	0.004	0.000
	7	0.583	0.407	0.711	0.003	0.041
7		-2.500	-0.500	2.550		
	8	-0.986	-0.237	1.014	0.052	0.086
	6	-0.581	-0.366	0.687	0.003	0.041
	5	-0.933	0.104	0.939	0.005	0.076
8		1.500	0.300	1.530		
	7	1.039	0.323	1.088	0.052	0.086
	9	0.461	-0.024	0.462	0.009	0.015
9		-2.500	-0.500	2.550		
	1	-2.048	-0.539	2.118	0.103	0.169
	8	-0.452	0.039	0.454	0.009	0.015
10		-0.655	-0.215	0.689		
	3	-0.621	-0.418	0.749	0.003	0.046
	6	-0.034	0.203	0.206	0.004	0.000
11		-1.000	0.000	1.000		
	4	0.310	-0.390	0.498	0.012	0.000
	12	-1.310	0.390	1.366	0.044	0.000
12		3.071	-0.519	3.114		
	11	1.353	-0.390	1.408	0.044	0.000
	13	1.717	-0.128	1.722	0.065	0.000
13		-1.000	0.000	1.000		
	5	0.652	-0.128	0.664	0.021	0.000
	12	-1.652	0.128	1.657	0.065	0.000
<b>Total loss</b>					<b>0.406</b>	<b>0.594</b>



**Ek.7: Hibrit 33 baralı AC/DC güç sisteminin AC empedansları.**

Başlangıç Bara	Bitiş Bara	Direnç ( $\Omega$ )	Reaktans ( $\Omega$ )	Baradaki Yük	
				kW	kVar
1	2	0.0922	0.0477	100.00	60.00
2	3	0.4930	0.2511	90.00	40.00
3	4	0.3660	0.1864	120.00	80.00
4	5	0.3811	0.1941	60.00	30.00
5	6	0.8190	0.7070	60.00	20.00
6	7	0.1872	0.6188	200.00	100.00
7	8	1.7114	1.2351	200.00	100.00
8	9	1.0300	0.7400	60.00	20.00
9	10	1.0440	0.7400	60.00	20.00
10	11	0.1966	0.0659	45.00	30.00
11	12	0.3744	0.1238	60.00	35.00
12	13	1.4680	1.1550	60.00	35.00
13	14	0.5416	0.7129	120.00	80.00
14	15	0.5910	0.5260	60.00	10.00
15	16	0.7463	0.5450	60.00	20.00
16	17	1.2890	1.7210	60.00	20.00
17	18	0.7320	0.5740	90.00	40.00
18	19	0.1640	0.1565	90.00	40.00
19	20	1.5042	1.3554	90.00	40.00
20	21	0.4095	0.4784	90.00	40.00
21	22	0.7089	0.9373	90.00	40.00
22	23	0.4512	0.3083	90.00	50.00
23	24	0.8980	0.7091	420.00	200.00
24	25	0.8960	0.7011	420.00	200.00
6	26	0.2030	0.1034	60.00	25.00
26	27	0.2842	0.1447	60.00	25.00
27	28	1.0590	0.9337	60.00	20.00
28	29	0.8042	0.7006	120.00	70.00
29	30	0.5075	0.2585	200.00	600.00
30	31	0.9744	0.9630	150.00	70.00
31	32	0.3105	0.3619	210.00	100.00
32	33	0.3410	0.5302	60.00	40.00

**Ek.8:** Hibrit 33 baralı AC/DC güç sisteminin DC dirençleri.

Başlangıç Bara	Bitiş Bara	Direnç ( $\Omega$ )	Reaktans ( $\Omega$ )
1	2	0.2208	-
1	4	0.2208	-
2	3	0.4415	-
4	5	0.4415	-

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Ahmet NUR

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2008, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2014, Munzur Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
- **Doktora** : 2022, İnönü Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

### MESLEKİ DENEYİM:

- 2010-2013, Munzur Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi
- 2013-2014, Adıyaman Üniversitesi, Besni Meslek Yüksekokulu, Mekatronik Bölümü, Öğretim Görevlisi
- 2014-Devam, Adıyaman Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi

## DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

(Makaleler, Bildiriler, Patentler vb.)

- **Nur, A., Kaygusuz, A.** (2021). Load Flow Analysis with Newton Raphson and Gauss Seidel Methods in a Hybrid AC/DC System, IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 44, No. 4, pp. 529-536.
- **Nur, A., Kaygusuz, A., Kılıç, U.** (2019). Power Flow Analysis of AC/DC Hybrid Systems in Smart Grids, Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11, 102-110.
- **Nur, A., Kaygusuz, A.** (2016). Power Flow Study For a Microgrid by Using Matlab and Powerworld Simulator, International Journal of Energy and Smart Grid, 1(1), 14-21.
- **Nur, A., Kaygusuz, A.** (2017). Cyber Security in Smart Grids, International Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt, Turkey.
- **Nur, A., Kaygusuz, A.** (2016). Load Control Techniques in Smart Grids, International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair, Istanbul, Turkey.
- **Nur, A., Kaygusuz, A.** (2016). Power Flow Study For a Microgrid by Using Matlab and Powerworld Simulator, International Engineering, Science and Education Conference, Diyarbakır, Turkey.
- **Nur, A., Kaygusuz, A.** (2015). Smart Grids Impact on Carbon Footprint Reduction, International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair, Istanbul, Turkey.